

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA, INSTITUTO DE QUÍMICA, INSTITUTO DE
BIOCIÊNCIAS, FACULDADE DE EDUCAÇÃO

**INTERPRETANDO A RELATIVIDADE ESPECIAL:
Discutindo o Debate Realismo e Antirrealismo Científicos no
Ensino de Ciências**

André Batista Noronha

São Paulo

2014

ANDRÉ BATISTA NORONHA MOREIRA

**INTERPRETANDO A RELATIVIDADE ESPECIAL:
Discutindo o Debate Realismo e Antirrealismo Científicos no
Ensino de Ciências**

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, ao Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ivã Gurgel (IF-USP) (Presidente)

Prof. Dr. Osvaldo Frota Pessoa Junior (FFLCH-USP)

Prof^ª. Dr^ª. Andreia Guerra de Moraes (CEFET-RJ)

São Paulo

2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Noronha, André Batista

Interpretando a relatividade especial: discutindo o debate realismo e antirrealismo científicos no ensino de ciências. São Paulo, 2014.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel

Área de Concentração: Física

Unitermos: 1. Física (Estudo e ensino); 2. Relatividade (Física); 3. História da ciência; 4. Filosofia da ciência.

USP/IF/SBI-014/2014

Agradecimentos

Muitas pessoas me ajudaram de forma essencial ao longo desses anos. De certa forma, este trabalho foi feito por dezenas de mãos. A gratidão é tão grande que meu maior receio neste momento é esquecer nomes, o que seria uma enorme injustiça.

Ao meu orientador, professor Ivã Gurgel, pela relação profícua e enriquecedora que vem sendo construída desde o primeiro encontro.

Aos professores Cristiano Mattos, Maria Regina, Cristina Leite, Luiz Carlos de Menezes, Maurício Pietrocola, Elio Carlos Ricardo, João Zanetic e Vera Henriques pelo apoio e exemplo em diferentes momentos da graduação e pós-graduação. Aos professores Osvaldo Pessoa Jr e Andreia Guerra por aceitarem participar da banca de defesa desta dissertação. Além disso, agradeço aos professores Osvaldo Pessoa Jr e Maria Regina pela leitura crítica do texto de qualificação.

Ao empenho, paciência e dedicação dos secretários do programa interunidades: Thomas, Rosana, Silvana e Nathalia.

Aos estudantes do curso *Evolução dos Conceitos de Física*, ministrado no primeiro semestre de 2013, em especial àqueles que propuseram-se a participar de todas as etapas da pesquisa de campo.

Aos colegas pelo convívio quase diário. Pessoal da sala 305 (Profis): Daniel, Carol, Talita, Natália, Robson, Florindo, Rodrigo, João, Jaqueline, e a todas as gerações de várzeas que passaram por aquela querida sala desde 2009. Pessoal do corredor: Danilo, Roberto, Maristela, Alexandre, Evandro, Graciela, Fábio Juliano, Jucivagno, Felipe, Fernando, Tato, Itamar, Joaquim e Glauco. Aos colegas das reuniões em grupo: Márcia, Sofia, Helton, Yuri, Renan, Kátia e Gabriela.

À minha família pelo apoio incondicional desde o início: Rosana, Thais, Terezinha, José Marcos, Andreia e Giovana.

A Suelen, por tudo que me ensina e transmite.

À CNPq pela bolsa de financiamento concedida ao projeto de pesquisa no período de março de 2012 a março de 2014.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Colocando a ciência em seu lugar	1
1.2	A importância das discussões filosóficas no ensino de ciências	4
1.3	Síntese e porvir	7
2	História e Filosofia da Ciência, Natureza da Ciência e Ensino de Ciências	11
2.1	Breve histórico	11
2.2	Algumas vantagens e desvantagens da aproximação histórico-filosófica ao ensino de ciências	15
2.3	Uma aproximação necessária, porém não suficiente	21
2.4	Estudo bibliográfico sobre o ensino de Teoria da Relatividade Especial com abordagens históricas e filosóficas	23
2.5	Natureza da Ciência e Ensino de Ciências	27
2.5.1	O consenso sobre a importância da Natureza da Ciência	27
2.5.2	O não consenso sobre o conteúdo da Natureza da Ciência	33
2.6	Síntese e porvir	41
3	Realismo e Antirrealismo Científicos	43
3.1	Uma das questões fundamentais na Filosofia	43
3.2	Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos	48
3.2.1	Critérios de Realidade e Observabilidade	52
3.2.2	(Anti) Realismo Ontológico e (Anti) Realismo de Entidades	58
3.2.3	(Anti) Realismo Epistemológico, (Anti) Realismo Axiológico e (Anti) Realismo de Teorias	60
3.2.4	Sociólogos da Ciência e Posturas Antirrealistas	64

SUMÁRIO

3.3	Alguns dos principais argumentos do debate	68
3.4	Síntese e porvir	72
4	História, Filosofia e a Teoria da Relatividade Especial	75
4.1	O “mito-Einstein” e a paternidade da Teoria da Relatividade Especial	75
4.2	Equivalência matemática e empírica	82
4.3	Formalismo matemático mínimo	84
4.4	Interpretações do formalismo matemático mínimo	85
4.5	Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial	91
4.5.1	A tradição francesa na óptica dos corpos em movimento	94
4.5.1.1	Aberração estelar, experimento de Arago e a hipótese de arrasto parcial de Fresnel	94
4.5.1.2	Experimento de Fizeau, o “Princípio da Relatividade” de Mascart e o “celeuma óptico” no fim do século XIX	98
4.5.2	As tradições britânica e germânica na eletrodinâmica dos corpos em movimento	101
4.5.2.1	Forças à distância × Ação contígua por campos	101
4.5.2.2	A “revolução intelectual” de Hertz	107
4.6	Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)	109
4.6.1	A postura “dualística” de Lorentz	109
4.6.2	O início do século XX e a “engenharia do Elétron”	116
4.7	Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)	120
4.7.1	Influências científicas sobre Einstein	120
4.7.2	O analista de patentes e a “materialização” da simultaneidade	125
4.7.3	O “artigo fundador”, Operacionalismo Epistemológico e influências filosóficas	129
4.7.4	A realidade dos fenômenos relativísticos na interpretação de Einstein	134
4.8	Interpretação Dinâmica de Poincaré (1906)	137
4.8.1	<i>Polytechnicien e grand savant</i>	137
4.8.2	Longitudes, Física de Princípios e Convenções	139
4.8.3	A crise na Física na virada de século e a realidade do éter	142
4.8.4	A dinâmica do elétron segundo Poincaré	144

SUMÁRIO

4.9	Interpretação Substantivista do Espaço-Tempo de Minkowski (1907)	149
4.9.1	Minkowski, matemática e eletrodinâmica	149
4.9.2	O “Mundo Absoluto” de Minkowski e a Visão Eletromagnética de Mundo	150
4.9.3	As explicações dos fenômenos relativísticos e a realidade do Espaço- Tempo	153
4.10	Quadro síntese das interpretações estudadas	157
4.11	Síntese e porvir	158
5	Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo	161
5.1	Introdução, contexto de pesquisa e objetivos	161
5.2	Metodologia	163
5.3	Questionário	164
5.3.1	Elaboração e aplicação das questões	164
5.3.2	Coleta, dados e variáveis	167
5.3.3	Um diagrama como instrumento de ilustração	169
5.3.3.1	Análise de correlação (Anti) Realismo de Teorias × (Anti) Realismo de Entidades	173
5.4	Aulas aplicadas e análise de resenhas	175
5.5	Grupo Focal	181
5.5.1	Organização, materiais utilizados e considerações	184
5.6	Estudo e análise das concepções	188
5.6.1	Estudante 033	191
5.6.2	Estudante 113	194
5.6.3	Estudante 201	198
5.6.4	Estudante 581	203
5.6.5	Estudante 583	206
5.6.6	Estudante 872	211
5.6.7	Estudante 893	214
5.6.8	Estudante 942	218
5.7	Síntese	224
6	Considerações finais	227

SUMÁRIO

Referências Bibliográficas	235
A Questionário	II
B Tabela de respostas dadas ao questionário	XIV
C Slides utilizados na aula A	XVI
D Slides utilizados na aula B	XXXIV
E Texto utilizado para a aula B	XLIV
F Resenhas analisadas digitalizadas da aula A	LVI
G Resenhas analisadas digitalizadas da aula B	LXX
H Transcrição do Grupo Focal	LXXXVI

Resumo

NORONHA, A. **Interpretando a Relatividade Especial: Discutindo o Debate Realismo e Antirrealismo Científicos no Ensino de Ciências**. 2014. 245 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física). Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Neste trabalho investigamos, teoricamente e empiricamente, quais são os possíveis aspectos da natureza da ciência, relacionados ao debate realismo e antirrealismo científicos, que emergem da história e filosofia da teoria da relatividade especial e têm potencial para promover debates no ensino de física. Para tal, primeiramente reconhecemos a importância da aproximação histórico-filosófica ao ensino de ciências, assim como a relevância dos aspectos consensuais e não consensuais da natureza da ciência. Argumentamos, em especial, que estes aspectos controversos e não consensuais podem trazer uma visão ainda mais rica e realista da ciência. Fazemos uma exposição sintética sobre algumas das principais características do debate realismo e antirrealismo científicos, suas principais vertentes, categorias e argumentos correntes. Fazemos também um estudo teórico histórico e filosófico sobre a teoria da relatividade, no qual enfatizamos a capacidade do formalismo matemático da teoria ser filosoficamente interpretável. Quatro interpretações históricas da teoria, a de Lorentz (1904), a de Einstein (1905), a de Poincaré (1906) e a de Minkowski (1907) são discutidas e caracterizadas com base no estudo sobre o debate realismo e antirrealismo científicos. Descrevemos em seguida uma pesquisa de campo realizada no primeiro semestre de 2013 aplicada a estudantes de física, de licenciatura e bacharelado, da Universidade de São Paulo. Seus objetivos foram investigar as concepções filosóficas dos estudantes sobre o debate realismo e antirrealismo científicos no contexto da teoria da relatividade especial e mostrar como ele pode trazer ricas discussões no ensino de ciências. A pesquisa foi dividida em três etapas: aplicação de questionário específico sobre o tema filosófico; análise de resenhas entregues pelos estudantes, e; realização de grupo focal. O resultado da análise e triangulação dos dados sugere que o debate mostra-se, também entre os estudantes, de uma forma não consensual e filosoficamente rica.

Palavras-chave: ensino de ciências; história e filosofia da ciência; natureza da ciência; ensino de relatividade especial; realismo e antirrealismo.

Abstract

NORONHA, A. **Interpreting the Special Relativity: Discussing Scientific Realism Anti-realism Debate in the Science Teaching**. 2014. 245 f. Dissertation (Master in Physics Education). Institute of Physics, Institute of Chemistry, Institute of Biosciences, Faculty of Education. University of São Paulo, São Paulo, 2014.

In this work we investigate theoretically and empirically some possible aspects of the nature of science, related to scientific realism and anti-realism debate emerging from the history and philosophy of the special theory of relativity which can potentially encourage related discussions in physics education. For such, first we acknowledge the importance of historical-philosophical approach to teaching science, as well the educational relevance of the consensual and non-consensual aspects of nature of science. We argue, particularly, that these controversial and non-consensual aspects can provide an even richer and more realistic view of science. We make a summary of some of the main features of scientific realism and anti-realism debate, its main categories and current arguments. We also make a historical and philosophical theoretical study on the special theory of relativity, wherein we emphasize the capacity of its mathematical formalism be philosophically interpretable. Four historical interpretations of the theory, Lorentz's (1904), Einstein's (1905), Poincaré's (1906) Minkowski's (1907), are discussed and characterized based on earlier study on scientific realism and anti-realism debate. We report then a field research conducted in the first semester of 2013 applied to undergraduated physics students at the University of São Paulo. Its objectives went to investigate the philosophical conceptions of students about scientific realism and anti-realism debate under the special theory of relativity and its subjects, and to show how rich can it be for science education. This research was divided into three stages: the application of a specific questionnaire on the philosophical subject; the analysis of papers submitted by students, and; the performing of a focus group. The outcome of data triangulation suggests that the debate reveals itself also among students, in a non-consensual and philosophically rich way.

Keywords: science teaching; history and philosophy of science; nature of science; teaching of special relativity; realism and anti-realism.

Apresentação

(...) e não esquecer que a estrutura do átomo não é vista mas sabe-se dela. Sei de muita coisa que não vi. E vós também. Não se pode dar uma prova da existência do que é mais verdadeiro, o jeito é acreditar. Acreditar chorando.

Clarice Lispector

Essa dissertação é resultado de uma pesquisa de mestrado em ensino de ciências, realizado no Programa Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, entre os anos 2012 e 2014. Enquadra-se ao lado de muitos outros trabalhos atuais que defendem, propõem ou aplicam estratégias de aproximação da história e filosofia da ciência ao ensino de ciências.

A demanda de um ensino de ciências relevante tomou, nos últimos anos, contornos bastante abrangentes. Documentos curriculares apelam por fundamentos educacionais e abordagens que façam com que as aulas de ciências não fiquem à margem das rápidas transformações tecnológicas e sociais que atualmente existem. Por outro lado, também apelam por uma concepção de ciência que não seja como aquelas, bastante distorcidas, constantemente veiculadas nos grandes meios de comunicação. O tema “Teoria da Relatividade”, central na dissertação, envolve-se a estas duas questões: parte considerável no avanço tecnológico no último século deve à física moderna; a teoria ainda sofre grandes distorções caricaturais, e é muito vinculada ao estereótipo de Einstein como cientista genial e solitário. Além disso, as teorias relativísticas influenciaram outras esferas do conhecimento, fomentando debates na filosofia, inspirando novas correntes artísticas, entre outros. Por outro lado, Relatividade já é um assunto presente em muitos livros didáticos de física do ensino básico, e uma disciplina obrigatória em vários cursos de Física e Engenharia. Assim, pode-se considerar que também é responsabilidade dos pesquisadores em ensino de física propor e realizar ações que proporcionem um ensino de Relatividade mais relevante, seja no nível básico ou superior. Propusemo-nos, nesta dissertação, a cumprir parte desta responsabilidade por meio da história e filosofia da Teoria da Relatividade Especial.

Em suma, este trabalho contém alguns elementos teóricos (fundamentados em estudos sobre história e filosofia da ciência) e empíricos (fundamentados em uma pesquisa de campo com estudantes de física) que visam responder a seguinte pergunta de pesquisa:

Quais aspectos da Natureza da Ciência, relacionados ao debate Realismo e Antirrealismo Científicos, emergem quando consideramos a pré-história e a história da Teoria da Relatividade Especial, e quais deles têm potencial para promover debates no ensino de física?

Como pode ser notado, o enunciado possui vários conceitos específicos, “Natureza da Ciência”, “debate Realismo e Antirrealismo Científicos” e “pré-história e a história da Teoria da Relatividade Especial”. Por isso, foram elaborados capítulos específicos sobre cada um deles, onde são definidos, discutidos e integrados ao corpo da pesquisa como um todo. Não se trata de um trabalho genuíno e autêntico de história e filosofia da ciência, muita embora os estudos sobre esses temas tenham sido cuidadosamente elaborados com importantes fontes secundárias e algumas primárias relacionadas aos assuntos. Trata-se de uma dissertação destinada a pesquisadores em ensino de ciências interessados nos temas deste trabalho, mas também a professores e estudantes de física que buscam referências iniciais em história e filosofia da Teoria da Relatividade Especial, seja para formação própria, seja para fins didáticos ou de pesquisa.

A dissertação possui cinco capítulos, mais as considerações finais, referências bibliográficas e oito apêndices. Sua estrutura é organizada da seguinte forma:

Capítulo 1 (Introdução): Introduzimos o trabalho como um todo, trazendo motivações para seus temas e argumentando pela aproximação de questões filosóficas ao ensino de relatividade.

Capítulo 2 (História e Filosofia da Ciência, Natureza da Ciência e Ensino de Ciências): Defendemos a importância da História e Filosofia da Ciência, assim como da Natureza da Ciência, no contexto de ensino de ciências. Em especial, defendemos a relevância daquilo que é por vezes chamado na literatura de “visão não consensual da Natureza da Ciência”, por proporcionar uma visão ainda mais rica da ciência.

Capítulo 3 (Realismo e Antirrealismo Científicos): Apresentamos o debate de forma panorâmica e não exaustiva. O debate, no contexto de ensino de ciências, constitui um aspecto não consensual da Natureza da Ciência. Exemplos de posturas possíveis são dadas, assim como os principais argumentos de filósofos, historiadores e sociólogos realistas e antirrealistas.

Capítulo 4 (História, Filosofia e a Teoria da Relatividade Especial): Apresentamos um estudo histórico e filosófico sobre a Teoria da Relatividade Especial, dando especial ênfase à

capacidade do formalismo da teoria ser filosoficamente interpretável de diferentes formas. As interpretações são caracterizadas à luz dos conceitos discutidos no capítulo 3.

Capítulo 5 (Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo): Descrevemos uma pesquisa de campo realizada com estudantes de física da Universidade de São Paulo, matriculados no curso *Evolução dos Conceitos da Física*. Seu objetivo foi investigar suas concepções filosóficas acerca do debate Realismo e Antirrealismo no contexto da Teoria da Relatividade Especial. A pesquisa contou com três etapas: aplicação de questionário contextualizado ao curso; análise de resenhas (associadas a uma intervenção didática de duas aulas, denominadas aqui de aula A e aula B), e; grupo focal. Com a triangulação dos dados de cada etapa, foi possível perceber coerência interna nos argumentos de boa parte dos alunos e também uma grande diversidade de posturas e argumentos quanto à possibilidade da teoria descrever aspectos da realidade e seus processos inobserváveis.

Capítulo 6 (Considerações finais): Realizamos uma síntese dos estudos teóricos e da pesquisa de campo no sentido de responder objetivamente à pergunta de pesquisa.

Apêndice A (Questionário): Apresentamos o questionário aplicado aos estudantes na primeira etapa da pesquisa de campo. Contém catorze questões, com temas relacionados às aulas do curso e também às características do debate Realismo e Antirrealismo Científicos.

Apêndice B (Tabela de respostas dadas ao questionário): Contém uma tabela com as respostas quantificadas dos estudantes dadas ao questionário.

Apêndice C (Slides utilizados na aula A): Contém os slides utilizados na primeira aula (intervenção didática) dada pelo proponente do trabalho, sobre história da Teoria da Relatividade Especial.

Apêndice D (Slides utilizados na aula B): Contém os slides utilizados na segunda aula (intervenção didática) dada pelo proponente do trabalho, sobre filosofia da Teoria da Relatividade Especial.

Apêndice E (Texto utilizado para a aula B): Contém o texto de leitura obrigatória aos estudantes utilizado na aula B, elaborado pelo proponente.

Apêndice F (Resenhas analisadas digitalizadas da aula A): Encontram-se as resenhas da aula A dos estudantes convidados para a última fase da pesquisa de campo. As resenhas digitalizadas tiveram suas linhas enumeradas para análise.

Apêndice G (Resenhas analisadas digitalizadas da aula B): Encontram-se as resenhas da aula B dos estudantes convidados para a última fase da pesquisa de campo. As resenhas digitalizadas

tiveram suas linhas enumeradas para análise.

Apêndice H (Transcrição do Grupo Focal): Contém a transcrição do grupo focal realizado com oito estudantes.

Cabe mencionar que as traduções das citações de obras de língua estrangeira são nossas. Algumas siglas são utilizadas constantemente neste trabalho: NdC = Natureza da Ciência; HFC = História e Filosofia da Ciência; dRAC = debate Realismo e Antirrealismo Científicos; TRE = Teoria da Relatividade Especial, e; TRG = Teoria da Relatividade Geral. Há exposições históricas nas quais se ilustram alguns argumentos com símbolos e operações matemáticas (em especial no capítulo 4). Símbolos em negrito sem índices (tais como \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{f}) representam vetores. Símbolos com índices (tais como A_μ , $g_{\mu\nu}$) representam componentes de vetores ou tensores. Símbolos em negrito com índices (tais como \mathbf{e}^μ , \mathbf{e}_μ) representam tensores. A representação $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ refere-se ao produto escalar usual entre vetores. A representação $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ refere-se ao produto vetorial usual entre vetores. As representações d/dt , $\partial/\partial t$ e ∇ referem-se, respectivamente, à derivada usual, à derivada parcial e ao operador diferencial nabla.

1 Introdução

1.1 Colocando a ciência em seu lugar

Para mim, toda perspectiva humanista que negue a rigorosidade da ciência, que deixe de procurá-la, que se afaste da tecnologia (...) toda visão humanista que caia nisso é reacionária. Um humanismo sério não contradiz a ciência nem o avanço da tecnologia. A minha perspectiva humanista não tem nada contra ciência. Pelo contrário, ela se funda também na ciência. No fundo, a ciência é a viabilizadora dessa visão humanista a que eu me agarro. (...) Tenho a impressão de que uma correta perspectiva pedagógica seria aquela que, jamais negando a necessidade da ciência e da tecnologia, nunca, porém, resvalasse para uma posição de mitificação da ciência. Uma correta prática educativa desmitifica a ciência já na pré-escola. E quando digo “desmitifica a ciência”, digo: põe no seu devido lugar a ciência, o que vale dizer: respeita a ciência, não fazendo com que ela vire assim uma espécie de a priori da história, e o cientista uma espécie de emissário da divindade, que caiu do céu, ou foi produzido num certo útero privilegiado, e que aparece, então, como um trazedor de recados, também privilegiado. Não: o cientista é um sujeito igual aos outros. Não significa com isso que eu diga que todo mundo pode virar cientista. De jeito nenhum, como nem todo mundo é virtuoso de violão, do piano ou da flauta. Mas todo mundo pode tocar! (FREIRE, 2011 [1984], p.90-91)

A chamada “mitificação” da ciência insere-se entre os vários problemas que atualmente a educação enfrenta, nacional e internacionalmente. Criam-se visões deformadas de ciência, que parecem oscilar entre formas de *cientificismo* (valorizações quase fanáticas da ciência) e de *ceticismo* (a descrença e desconsideração completa sobre tudo que provém da ciência). Isso por vezes é salientado junto ao fato de que formas de conhecimento “suspeitas”, como a astrologia, as superstições e outras, parecem ser socialmente preferidas à ciência. A ciência parece se distanciar cada vez mais das pessoas, sejam estudantes ou cidadãos comuns, ao mesmo tempo em que a sociedade usufrui (não raro de forma inconsequente e desenfreada) da tecnologia, a “irmã gêmea” da ciência.

De certa forma, pode-se entender que o papel do ensino de ciências, como afirmou Paulo Freire há quase trinta anos, é “colocar a ciência no seu devido lugar”. Uma das tarefas do

pesquisador em ensino de ciências é elaborar, propor ou pensar criticamente ideias cujo intuito derradeiro seja o de tornar o ensino de ciências mais relevante, uma vez que nem todos se tornam cientistas, muito embora possam “tocar” a ciência.

Uma grande parcela da população de certa forma “toca” a ciência e a tecnologia dos dias atuais. Seja tocar em aparelhos celulares com touchscreen, nas teclas dos computadores e laptops, seja “tocar com os olhos” em telas de LCD (*Liquid Crystal Display*, Tela de Cristal Líquido) e Plasma. Talvez, nunca se tenha “tocado” tanto a ciência, em especial a *Física Moderna e Contemporânea* (daqui em diante FMC), sendo que muitas vezes não se há a consciência disto. As irmãs ciência e tecnologia causaram de forma inegável uma mudança radical no cotidiano de muitas pessoas em todo o mundo, considerando pelos menos os últimos dois séculos. Mas “tocá-las” não basta para colocá-las em seus devidos lugares.

Para colocar a ciência em seu devido lugar é preciso *compreendê-la*, ainda que minimamente. Ou melhor, é preciso compreender *sobre* a ciência, aquilo que hoje comumente denomina-se na área de ensino de ciências de *Natureza da Ciência* (daqui em diante NdC), seja em seus aspectos consensuais ou não consensuais. Uma famosa frase atribuída ao filósofo Heráclito¹ resume essa proposta: “*Só se pode entender a essência das coisas quando se conhecem sua origem e seu desenvolvimento*”². Compreender a ciência significa compreender sua origem e seu desenvolvimento, em suma, sua história e sua filosofia. Como será discutido no capítulo seguinte, existem várias propostas de aproximação da *História e Filosofia da Ciência* (daqui em diante HFC) ao ensino de ciências, sendo ela hoje um consenso entre pesquisadores da área. Como exatamente abordar a HFC em sala de aula é uma questão frequentemente discutida nos principais eventos e periódicos especializados, de qualquer forma, não se trata de uma tarefa fácil.

Dada as demandas atuais em se aproximar a FMC e a HFC (e também a NdC) ao ensino de ciências, com o intuito de tornar as aulas mais relevantes, propõe-se aqui a seguinte questão: *o quê de FMC e o quê de HFC podemos selecionar para que os estudantes consigam “colocar a ciência em seu lugar”?* Uma das (inúmeras) respostas possíveis é o ensino de *Teoria da Relatividade Especial* (daqui em diante TRE) com abordagem histórico-filosófica.

¹Heráclito de Éfeso (aprox. 535 a.C.-475 a.C.), filósofo pré-socrático.

²Essa frase abre o primeiro capítulo do livro-texto *Gravitação*, do Prof. João Zanetic, IFUSP. O proponente deste trabalho teve a oportunidade de cursar a disciplina Gravitação com o professor no ano de ingresso do curso de Licenciatura em Física (2008). Para ele, assim como para vários de seus colegas, foi uma experiência bastante positiva.

1.1 Colocando a ciência em seu lugar

As teorias relativísticas fazem parte daquilo que pode ser chamado de “revolução da física moderna” no início do século passado. Ao lado da física quântica, as teorias relativísticas se tornaram um dos pilares do atual corpo de conhecimentos da ciência. Mas, fora do círculo acadêmico, por vezes as teorias relativísticas tem conotações bastante diversas. Algumas de suas características violam fortemente o senso comum, e não raro geram ceticismo (mesmo dentro da academia) ou apropriações inadequadas (como a existência do jargão, supostamente apoiado pelas teorias relativísticas, de que *tudo é relativo*). Tempos relativos. Perda de simultaneidade. Corpos contraídos. Equivalência de massa e energia. Gêmeos envelhecendo a diferentes taxas. Fusão do espaço e do tempo. Essas e várias outras características não são encontradas no nosso dia-a-dia, o que poderia explicar as reações de surpresa, estranheza e ceticismo. Mesmo estudantes de física assim reagem, em geral, quando deparam-se com um primeiro curso sobre as teorias relativísticas. É importante dizer que, ao passo que existem vários estudos sobre o aspecto filosófico da física quântica e suas implicações para o ensino de ciências (básico ou superior), estudos semelhantes com as teorias relativísticas ainda não são tão comuns.

Hoje em dia, o uso de aparelhos GPS (*Global Positioning System*, Sistema de Posicionamento Global) torna-se cada vez uma realidade mais acessível. Relógios especializados, muitos celulares e também carros populares levam consigo aparelhos GPS, que fornecem em segundos dados sobre a posição geográfica, com precisões espantosas. É possível, assim, “tocar” as teorias relativísticas, neste caso, a *Teoria da Relatividade Geral* (daqui em diante TRG). Todavia, como posto anteriormente, não basta nós as tocarmos. É preciso “colocá-las em seu lugar”. É preciso compreender *sobre* elas. E isto significa compreender suas origens e desenvolvimentos, a validade de suas ideias e fundamentos. Significa compreender, ainda que minimamente, a história e filosofia das teorias relativísticas.

Como será discutido no capítulo 4, na história e pré-história da TRE nos deparamos com muitos elementos que em geral não são discutidos com profundidade em livros didáticos (no nível básico e também no nível superior) ou obras de divulgação. Suas origens parecem estar ligadas a fatores bem distantes da abstração hoje atribuída a ela, como o problema da sincronização de relógios distanciados na segunda metade do século XIX. A interpretação do seu conteúdo físico foi, desde cedo, bastante controverso, levando ao surgimento de várias interpretações filosóficas. As pessoas que empreenderam-se na criação e no desenvolvimento do que hoje chamamos TRE, muito embora concordassem com o formalismo matemático, não raro discordavam diametralmente sobre várias questões do “conteúdo físico” da teoria. Tempos

relativos. Perda de simultaneidade. Corpos contraídos. Equivalência de massa e energia. Gêmeos envelhecendo a diferentes taxas. Fusão do espaço e do tempo. Nenhum destes e outros tópicos foram triviais em nenhum momento do contexto de criação e desenvolvimento da TRE, seja entre matemáticos e físicos, seja também entre historiadores, filósofos e estudiosos que se aventuraram sobre ela.

A questão da fusão do espaço e tempo, por exemplo, ainda é bastante atual nos debates de filosofia da ciência, mas especificamente, de filosofia do espaço-tempo. O Espaço-tempo é uma entidade real? Ou se trata apenas de um instrumento teórico eficaz e útil? Os fenômenos relativísticos também estão sujeitos a problematização. A discordância sobre o que é *real* das implicações do formalismo da TRE aproxima a ciência à filosofia, em especial, ao *debate Realismo e Antirrealismo* (daqui em diante dRAC). Como será discutido no capítulo 3, trata-se de um dos mais antigos e profundos debates da filosofia. A TRE diz de fato como a realidade física é? Os fenômenos relativísticos são fisicamente reais? O espaço e tempo compõe mesmo uma só entidade física? Os experimentos de fato corroboram a veracidade dessa teoria? Essas e várias outras questões surgem dessa aproximação (ainda maior) entre ciência e filosofia.

1.2 A importância das discussões filosóficas no ensino de ciências

O que é realidade? As teorias científicas descrevem o real? O que é verdade? Como saber se as teorias científicas são verdadeiras? Como podemos ter certeza de que são verdadeiras? Essas, em geral, são típicas perguntas que emergem de debates científico-filosóficos: profundas, inquietantes e, acima de tudo, insolúveis. Diz-se, na forma de uma brincadeira depreciativa, que a filosofia faz perguntas que não têm respostas, enquanto a religião traz respostas a perguntas não feitas. Pode-se entender que a ciência, por vezes, parece estar próxima de uma e, por vezes, de outra. Acreditamos que a face mais rica da ciência seria aquela próxima à filosofia. A face da ciência mais próxima à religião seria, curiosamente, aquela muitas vezes presentes em salas de aula de ciência, nas quais os estudantes são atropelados por respostas científicas a perguntas que eles não fizeram.

O leitor pode-se perguntar: mas para quê estudar um debate que pode mostrar-se terrivelmente complicado do ponto de vista filosófico no contexto do ensino de ciências? Por quê, por exemplo, discuti-lo com estudantes de física, futuros professores e futuros pesquisadores? A

1.2 A importância das discussões filosóficas no ensino de ciências

resposta é relativamente simples: para mostrá-los a face filosófica da ciência, aquela face que é escondida ou ignorada na maioria dos livros-texto, disfarçada ou maquiada em muitos discursos científicos, desprezada e ridicularizada pelo espírito técnico-especifista que atualmente habita boa parte das “mentes científicas”.

Como comentado anteriormente, muitos estudantes tem um primeiro contato traumático com a TRE, reagindo não raro com ingênua incredulidade ou ceticismo. Por outro lado, também existem estudantes que a aceitam facilmente, “naturalizando-a”. Para ambos estes estereótipos extremos, e também para o denso espectro de reações possíveis entre eles, a aproximação da TRE com o dRAC mostra-se proveitosa, pois toca o ponto no qual estes extremos discordam: a “carga de realidade” da teoria. Essa discordância ocorreu na história da TRE. O formalismo da teoria se mostrou interpretável do ponto de vista físico e filosófico. Nos primeiros anos do século passado, várias interpretações científico-filosóficas possíveis, entre elas a de Einstein e de Lorentz-Poincaré, dividiram grupos de cientistas os quais, apesar de olharem para as mesmas equações, viam diante de si quadros científico-filosóficos de mundo bastantes diferentes em seus princípios. Questionar, pois, a realidade de uma teoria científica, das entidades e processos inobserváveis que dela advêm, é algo próprio da ciência e seu desenvolvimento histórico. Negar ou suprimir isto é negar ou suprimir parte do que caracteriza a ciência, sua “natureza”.

Um das formas de “colocar a ciência no seu lugar” é, defendemos, questionando e averiguando criticamente as pretensões das teorias científicas em “apreender” a realidade. Reações como a aceitação passiva (“naturalização” da teoria) ou a rejeição enérgica (ceticismo absoluto) contribuem apenas para mitificar (ainda mais) a ciência, e em especial, a TRE. Como lemos de Freire na citação que inicia o capítulo, uma correta perspectiva pedagógica é aquela que, pelo contrário, desmitifica-a. Discutir as implicações da TRE no contexto do dRAC, a curiosa história da sua criação, estudar as interpretações científico-filosóficas que surgiram, estas podem ajudar a alcançar esse objetivo, tão caro a demandas educacionais atuais.

Ao optarmos por aproximar um debate filosófico tão complexo ao ensino de ciências, mais especificamente, a estudantes de graduação de física, nossa intenção não é torná-los “pequenos filósofos da ciência”. Analogamente, a intenção do ensino básico de ciências não é (já há algum tempo) transformar os jovens em “pequenos cientistas”. Um dos principais argumentos a favor da aproximação histórico-filosófica é sua capacidade em possibilitar debates que muito raramente são tratados em cursos tradicionais, seja no ensino básico e principalmente no ensino superior. Além disso, os estudantes em geral se identificam com as questões centrais destes

Introdução

debates, referentes por exemplo à veracidade das teorias, ao status ontológico das entidades teóricas, entre outros. O método “cala boca e calcule”, infelizmente muito popular em cursos de física, inibe completamente qualquer tentativa de “subversão filosófica”. “Subverter filosoficamente”, por exemplo, é questionar (não gratuitamente, mas com rigor e critérios) tudo aquilo que foi naturalizado na ciência, transpor aquilo que está dado ou posto. Um belo trecho de um ensaio escrito por Nietzsche³ sobre a filosofia de Tales de Mileto⁴ ilustra melhor esta atitude:

(...) exatamente em Tales se pode aprender como procedeu a filosofia, em todos os tempos, quando queria elevar-se a seu alvo magicamente atraente, transpondo as cercas da experiência. Sobre leves esteios, ela salta para diante: a esperança e o pressentimento põem asas em seus pés. Pesadamente, o entendimento calculador arqueja em seu encaço e busca esteios melhores para também alcançar aquele alvo sedutor, ao qual sua companheira mais divina já chegou. Dir-se-ia ver dois andarihos diante de um regato selvagem, que corre rodopiando pedras e apoiando-se nelas para lançar-se mais adiante, ainda que, atrás dele, afundem bruscamente nas profundezas. O outro, a todo instante, detém-se desamparado, precisa antes construir fundamentos que sustentem seu passo pesado e cauteloso; por vezes isso não dá resultado e, então, não há deus que possa auxiliá-lo a transpor o regato⁵.

Por vezes o “passo pesado e cauteloso” do “entendimento calculador”, ou, do pensamento científico, é entediante, sendo preciso saltar adiante. Ao longo de sua história, não raro, a ciência se vê na necessidade de “saltar”, “transpondo as cercas da experiência” como o faz a filosofia. Um destes saltos foi justamente o advento das teorias relativísticas no início do século passado. Assim, pode-se dizer que a ciência é uma já antiga devedora da filosofia, e vice-versa. Seus desenvolvimentos históricos, embora independentes em alguns pontos, estão ligados em outros essenciais, em especial na epistemologia. Este é um dos argumentos que sustentam a importância de se aproximar questões filosóficas ao ensino de ciências. Reafirmamos: negar ou suprimir essa importância é negar ou suprimir parte do que caracteriza a ciência, parte de sua “natureza”. Se é uma atual demanda da área de ensino em ciências ensinar *sobre* a ciência, essa advertência não pode ser ignorada.

Não se pode negar, por exemplo, o papel que a filosofia teve na criação e também no desenvolvimento da TRE. A proximidade de Albert Einstein com a filosofia, suas leituras de obras

³Friedrich Wilhelm Nietzsche (1844-1900), filósofo alemão.

⁴Tales de Mileto (aprox. séc. VII a.C.), filósofo pré-socrático.

⁵NIETZSCHE, Friedrich (1873). In: Col. Os Pensadores: Pré-socráticos (1999). Trad. Rubens Rodrigues Torres Filho, pp.43-46.

1.3 Síntese e porvir

de Ernst Mach⁶, David Hume⁷ e outros, tiveram (concordam especialistas) papel central no desenvolvimento de suas ideias nos primeiros anos do século passado. Einstein, aliás, é tido como exemplo de “cientista-filósofo”, sem elaborar um sistema filosófico propriamente dito, mas nunca deixando o espírito de descontente indagação e as leituras filosóficas até o resto de sua vida. Henri Poincaré, entusiasta da filosofia da ciência, expressava suas ideias com tanta clareza e profundidade filosófica, que não se pode negar que elas se originaram de genuínos pensamentos filosóficos, bastante inspiradores até hoje. Um dos reconhecidos sucessos de Hendrik Lorentz foi de encontrar sua própria visão científico-filosófica entre grandes doutrinas metacientíficas (portanto, filosóficas) de sua época. Também Hermann Minkowski, responsável por uma profunda formalização da TRE, que confundiu até mesmo Einstein em um primeiro momento, carrega um forte ideal filosófico, um platonismo matemático apaixonado e quase explícito em seus textos. Em todos estes casos, a ciência vem de mãos dadas à filosofia. Negar essa relação é negar aspectos cruciais da história e filosofia da TRE. Se pretendermos ensinar não só a teoria mas *sobre* ela, também não podemos negar essa relação.

1.3 Síntese e porvir

A proposta deste trabalho está fundamentada na defesa da aproximação de questões históricas e filosóficas ao ensino de ciências, seja no ensino básico ou superior. É uma forte demanda atual, presente em documentos curriculares oficiais e na literatura especializada, que o ensino de ciências seja algo de alguma forma relevante aos estudantes. E ao longo dos últimos anos, a HFC tem se mostrado com uma proposta promissora para este fim.

Repetimos aqui a pergunta de pesquisa que foi exposta na Apresentação:

Quais aspectos da Natureza da Ciência, relacionados ao debate Realismo e Antirrealismo Científicos, emergem quando consideramos a pré-história e a história da Teoria da Relatividade Especial, e quais deles têm potencial para promover debates no ensino de física?

Como comentado anteriormente, o enunciado acima possui vários conceitos específicos (Natureza da Ciência, debate Realismo e Antirrealismo Científicos, e pré-história e história da Teoria da Relatividade Especial), e em prol da consistência deste trabalho, nos vimos na

⁶Ernst Mach (1838-1916), físico e filósofo austríaco.

⁷David Hume (1711-1776), filósofo escocês.

Introdução

necessidade de discutir minimamente cada um deles. Por essa e outras razões, a dissertação foi estruturada em cinco capítulos, considerações finais e oito apêndices, os quais foram sucintamente descritos anteriormente na Apresentação. Há um capítulo específico para o dRAC (capítulo 3), outro para a história e filosofia da TRE (capítulo 4), e outro dedicado à HFC e NdC no ensino de ciências (capítulo 2). A figura 1.1 representa um mapa visual dos temas e capítulos do trabalho.

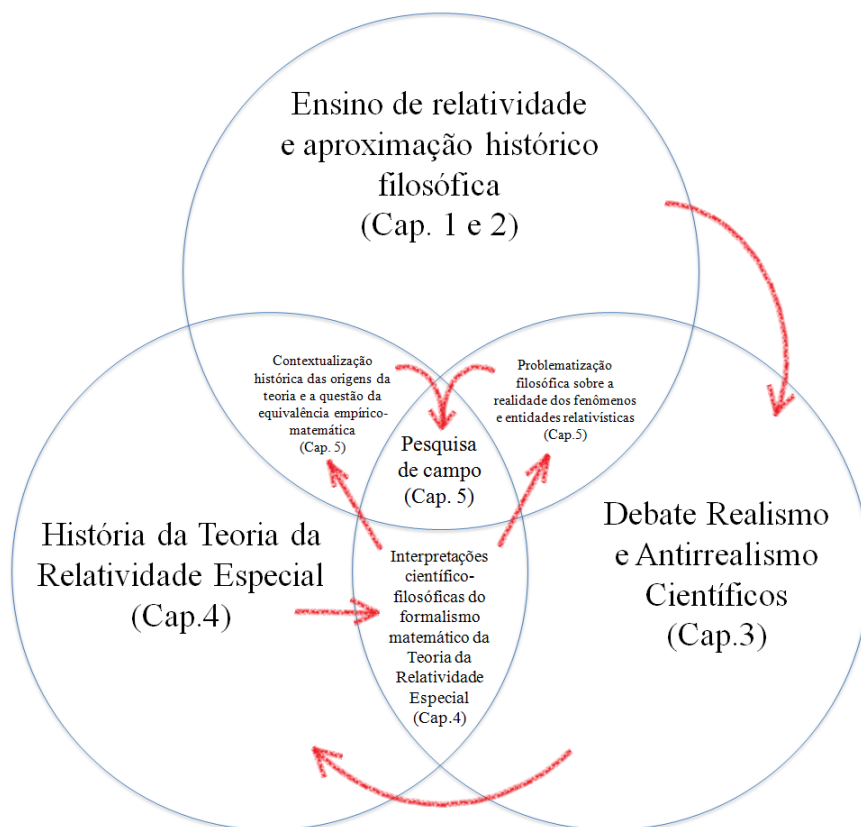


Figura 1.1: Mapa da dissertação.

As setas em vermelho representam a sequência com os temas são tratados na dissertação. A composição dos capítulos que formam o texto pode dar a impressão de que existem alguns “saltos” entre eles. Especialmente entre os capítulos 2 (História e Filosofia da Ciência, Natureza da Ciência e Ensino de Ciências) e 3 (Realismo e Antirrealismo Científicos), e entre este último e o capítulo 4 (História, Filosofia e a Teoria da Relatividade Especial). Contudo, embora os temas sejam desenvolvidos de forma quase independente, eles acabam por convergir, em especial no capítulo 5 (Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo). Neste, no qual se descreve uma pesquisa de campo realizada com estudantes de física da Universidade de São Paulo, os estudos históricos sobre as origens da TRE fundamentam conceitualmente as intervenções didáticas realizadas e parte do material

1.3 Síntese e porvir

de aplicação da pesquisa. Além disso, nele os estudos filosóficos ao mesmo tempo possibilitam uma compreensão mais profunda das interpretações da teoria e fundamentam diferentes etapas da pesquisa, desde a construção dos enunciados do questionário até os temas sugeridos no grupo focal. Na figura 1.1, a pesquisa de campo encontra-se na região de intersecção das três circunferências ilustradas, o que significa que sua construção, aplicação e análise são exercícios que envolvem de forma essencial esses três temas.

2 História e Filosofia da Ciência, Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

2.1 Breve histórico

Apelos mais diretos à história da ciência e seu fins pedagógicos não são novidade. É o objetivo deste tópico ilustrar de forma branda como essa demanda é relativamente antiga, e também como foi progressivamente incorporada como uma das principais linhas de pesquisa em ensino de ciências.

Em primeiro lugar, cabe mencionar que a forma como a própria história da ciência foi entendida mudou com o tempo, tendo se renovado muito nos últimos anos. Isto é, a historiografia da ciência apresentou diferentes fases como diferentes ênfases. A aproximação da história da ciência com a pedagogia ocorreu de forma mais explícita a partir do século XIX (MATTHEWS, 1994), sendo que isso só foi possível em razão do surgimento de uma concepção histórica do conhecimento científico. No início do século XVIII, por exemplo, a influência da filosofia cartesiana sobre as ciências e outras áreas era tamanha que, assim como a “razão cartesiana” era anti-histórica e abstrata, as ciências não eram entendidas como históricas, mas sim como construtos abstratos prevaletentes, universais e atemporais (KRAGH, 2011 [1989], p.6). Durante este século, predominou a tendência em se entender a história da ciência como a história do progresso científico, a história da busca (com sucesso) pela verdade científica, como fica claro no relato de Joseph Priestley¹:

Tomei como regra pessoal, e creio ter-lhe sido sempre fiel, não tomar em atenção os erros, equívocos e alterações dos estudiosos da eletricidade (...). De bom grado votaria ao eterno esquecimento todas as querelas que não tenham contribuído para a descoberta da verdade. Se dependesse de mim, nunca a posteridade viria a saber que alguma vez houve algo como inveja, ciúme e sofismar entre

¹Joseph Priestley (1733-1804), teólogo, político e filósofo natural britânico.

os admiradores do meu estudo favorito (PRIESTLEY *apud ibid.*, p.4).

Anos depois, durante o século XIX, a influência das correntes positivistas na Europa fez com que a história da ciência fosse vista como uma atividade ociosa e vazia. Como coloca Kragh, devido a arrogância frequente dos positivistas, aliada ao fato de encararem como indubitavelmente certos os métodos da ciência, a história da ciência para eles se limitava à história da ciência de sua própria época e à alguns poucos predecessores imediatos (*ibid.*, p.8). Entretanto, outros positivistas, como Ernst Mach no final do século XIX, entendiam a história da ciência de outra forma:

Temos de aceitar também que, para a compreensão histórica de uma ciência, não só é necessário o conhecimento das ideias aceitas e desenvolvidas pelos mestres subsequentes, mas também os pensamentos rejeitados e efêmeros dos investigadores, e acima de tudo as noções que, apesar de aparentemente errôneas, podem ser muito importantes e muito instrutivas. A investigação histórica do desenvolvimento de uma ciência é extremamente necessária, a não ser que os princípios nela acumulados se transformem num sistema de prescrições imperfeitamente compreendidas ou, pior, num sistema de *preconceitos*. A investigação histórica não só promove a compreensão do que existe agora, como também nos coloca perante novas possibilidades, ao demonstrar que aquilo que existe é, em grande medida, *convencional* e *acidental*. De um ponto de vista mais elevado, para o qual convergem diferentes cursos de pensamento, podemos olhar ao nosso redor com uma visão mais livre e descobrir novas vias, até então desconhecidas (MACH *apud ibid.*, p.11).

Pode-se perceber no discurso de Mach um apelo pedagógico pela história da ciência. De fato, muitos pesquisadores da área em ensino de ciências nos dias de hoje fazem referência a Mach como um dos pioneiros da aproximação entre história das ciências e ensino de ciências (MATTHEWS, 1994, p.1).

Pierre Duhem² também defendeu a importância do estudo histórico para uma compreensão mais profunda dos conceitos científicos, o que fica claro na sua afirmação de que a história da ciência é “*a melhor forma, e, provavelmente, a única, de facultar àqueles que estudam física uma visão clara e correta da tão complexa e viva organização desta ciência*” (DUHEM *apud* KRAGH, 2011 [1989], p.19). Matthews (2012, p.3), traçando um histórico de nomes que se empenharam de uma forma ou de outra à aproximação da HFC ao ensino de ciências, cita William Whewell³, Thomas Huxley⁴ e, adentrando no século XX, menciona John Dewey⁵.

²Pierre Maurice Marie Duhem (1861-1916), físico e historiador da ciência francês.

³William Whewell (1794-1866), polímata inglês.

⁴Thomas Henry Huxley (1825-1895), biólogo britânico

⁵John Dewey (1859-1952), filósofo e pedagogo estadunidense.

2.1 Breve histórico

Desde o fim da segunda guerra mundial tornou-se lugar comum argumentar pela proximidade entre a empreitada científica e o raciocínio ético e filosófico (EL-HANI, 2006, p.4-5). E a partir da década de 60, ocorreram eventos que causaram grandes mudanças na historiografia da ciência e também na filosofia. Entre eles, as chamadas *virada linguística* e *virada historicista*, a primeira ligada ao reconhecimento da linguagem como agente estruturador do pensamento, e a segunda às mudanças na filosofia da ciência que marcaram o fim da hegemonia do empirismo e positivismo lógicos. Estas viradas estão vinculados nomes de pensadores de diferentes correntes filosóficas, como Wittgenstein⁶, Rorty⁷, Fleck⁸, Kuhn⁹, Lakatos¹⁰, Toulmin¹¹, Feyerabend¹² e diversos outros. A importante obra de Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas*, foi essencial à mudança dos rumos na História, Filosofia e também Sociologia da Ciência. Após as “viradas”, a concepção de Método Científico, por exemplo, mudou drasticamente. Como afirma Videira (2006, p.26), por já certo tempo prevalecia a ideia de um único e infalível método, o qual, após as críticas da chamada “Nova História e Filosofia da Ciência”, chegou quase a desaparecer desfrutando de uma posição bem menos prestigiada que outrora. Feyerabend, no prefácio à terceira edição de sua importante obra *Contra o Método* escrito em 1992, resumiu o quadro de estudos da ciência à época: “*estamos bem longe da velha ideia (platônica) de ciência como um sistema de enunciados desenvolvendo-se por meio da experimentação e observação e mantido em ordem por padrões racionais duradouros*” (FEYERABEND, 2007 [1975], p.14).

As décadas de 60 e 70 do século passado foram também os períodos do surgimento de grandes projetos de física, muitos deles objetos de estudos e inspiração até hoje. Entre eles, em especial, o *Projeto Harvard (Harvard Physics Project)*, cuja criação remete aos nomes James Conant¹³, Gerald Holton¹⁴, James Rutherford¹⁵ e Fletcher Watson¹⁶. O projeto se viu na missão de “cobrir” a falha recente do projeto PSSC (*Physical Science Study Committee*), dando uma abordagem mais humanística, histórico-filosófica e menos técnica. Nos anos de aplicação, centenas de milhares de estudantes estadunidenses estudaram pelo projeto. Houve aumento

⁶Ludwig Joseph Johann Wittgenstein (1889-1951), filósofo austríaco.

⁷Richard Rorty (1931-2007), filósofo pragmatista estadunidense.

⁸Ludwig Fleck (1896-1961), médico e biólogo polaco.

⁹Thomas Samuel Kuhn (1922-1996), filósofo e historiador da ciência estadunidense.

¹⁰Imre Lakatos (1922-1974), filósofo da ciência e da matemática húngaro.

¹¹Stephen Edelston Toulmin (1922-2009), filósofo inglês.

¹²Paul Karl Feyerabend (1924-1994) filósofo da ciência austríaco.

¹³James Bryant Conant (1893-1978), químico estadunidense.

¹⁴Gerald James Holton (1922-), físico e historiador da ciência estadunidense.

¹⁵F. James Rutherford (1924-), professor de ciências.

¹⁶Fletcher G. Watson (1912-1997), astrônomo estadunidense.

substancial na porcentagem de estudantes de física nos cursos superiores, e os grandes testes educacionais mostraram um resultado satisfatório daqueles estudantes que usufruíram o Projeto Harvard ainda na fase anterior ao ingresso na faculdade (MATTHEWS, 1995 [1992]).

As “viradas” mencionadas anteriormente influenciaram fortemente de forma direta e indireta outras áreas, entre elas o ensino de ciências. Em ressonância aos críticos da visão positivista (cientificista) de mundo, muitos movimentos pedagógicos a partir dos anos 70, como o Construtivismo, incorporaram suas críticas (MATTHEWS, 1993, p.360). Como cita Krasilchik (1987), à época o que estava então em questão “*era incorporar, ao racionalismo subjacente do processo científico, a análise de valores e o reconhecimento de que ciência não era neutra*” (*ibid.*, p.17). Concomitantemente, a importância da inclusão efetiva da HFC nos currículos escolares de ciências estava sendo seriamente discutida, principalmente na formação de professores de ciências (MATTHEWS, 1995 [1992], p.188-189). A título de exemplo, no ano de 1970 foi realizado um evento no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), reunindo educadores e cientistas, no qual discutiu-se a relevância, a possibilidade e as limitações do uso pedagógico da HFC.

Durante a década de 80 do século passado, ocorreram vários congressos e seminários internacionais que tratavam da questão da aproximação da HFC ao ensino de ciências. Como comenta Matthews (*ibid.*, p.166), surgiram então muitas iniciativas para estudos acadêmicos e produção de materiais didáticos que tratassem tanto da história da ciência como da filosofia da ciência. Ainda segundo Matthews (*idem*) alguns programas estadunidenses de formação de professores de ciências tomaram a HFC e também a sociologia da ciência como obrigatórias. É importante mencionar que em 1989 foi realizada a primeira edição da conferência homônima organizada pelo *International History, Philosophy and Science Teaching Group (IHPSTG)* (*Grupo Internacional de História, Filosofia e Ensino de Ciências*). Desde então tem sido realizada bianualmente, e contribuiu para amadurecer essa tradição de pesquisa na área (MATTHEWS, 2012, p.3).

A década de 90 do século passado ficou marcada na área pela criação do periódico *Science & Education*, editado por Michael Matthews desde sua primeira edição em 1992. Trata-se de um dos principais periódicos da área, ligado ao IHPSTG (*idem*). Embora de escopo amplo, os principais temas da revista orbitam a HFC e sua aproximação com o ensino de ciências. Na esfera política, a década de 90 é lembrada por várias iniciativas de associações em prol dos benefícios pedagógicos e sociais da HFC, entre elas, a estadunidense *American Association for the Advancement of Science* (*Associação Americana pelo Avanço da Ciência*) (*ibid.*, p.6). No

2.2 Algumas vantagens e desvantagens da aproximação histórico-filosófica ao ensino de ciências

Brasil, houve em 1998 a criação de parâmetros curriculares nacionais, no qual nota-se apelos por uma abordagem humanística e histórico-filosófica ao ensino de ciências (BRASIL, 1998). Em documentos posteriores e complementares, este apelo fica ainda mais explícito (BRASIL, 2006), embora em todos eles não haja um comprometimento mais sistemático com a HFC (EL-HANI, 2006, p.4).

Atualmente, existe um consenso quase unânime entre pesquisadores em ensino de ciências acerca da importância da aproximação da HFC ao ensino de ciências, que pode ser notado nas publicações da área, em dissertações e teses, e também nos principais congressos e seminários (VILAS-BOAS *et al.*, 2013; MATTHEWS, 2012; HENRIQUE, 2011; FORATO, 2009; MARTINS, 2007). Cabe mencionar a realização em 2010 da 1ª Conferência Regional Latino-americana do IHPSTG no Brasil, na cidade de São Sebastião. A segunda edição foi realizada em Mendoza, Argentina, em 2012. Em 2012 também houve a 1ª Conferência Regional Asiática do IHPSTG, realizada em Seoul, Coreia do Sul. A próxima edição do IHPSTG será em julho de 2015, a ser realizada no Brasil¹⁷. Podemos entender que a realização destes eventos em diferentes partes do mundo demonstra a força desta área de pesquisa, assim como a importância atribuída à HFC ao ensino de ciências, muito embora os currículos de ciências em muitos países tenham mudado muito pouco nos últimos anos no sentido de concretizar a aproximação histórico filosófica (EL-HANI, 2006, p.5)

2.2 Algumas vantagens e desvantagens da aproximação histórico-filosófica ao ensino de ciências

Na literatura especializada em pesquisa em ensino de ciências, pode-se notar um conjunto relativamente recorrente de afirmações positivas e negativas referentes à aproximação da HFC ao ensino de ciências. Embora recorrentes, não se pode deixar enganar pela aparente simplicidade de algumas das afirmações, pois elas podem envolver rupturas que tornam difícil a aproximação. Assim, é preciso ter em mente que muitos dos resultados positivos da aproximação são tributários de boas condições de sala de aula e de bons materiais histórico-filosóficos (PEDUZZI, 2005, p.157). Com se sabe, infelizmente estas condições ainda não são uma realidade

¹⁷<http://ihpst.net/conferences/upcoming-conferences/>. A título de menção, o 25º *International Congress of History of Science, Technology and Medicine*, um dos mais importantes eventos da área de HFC, será realizado em 2017 também no Brasil.

acessível a todos.

O primeiro e talvez principal aspecto positivo, quase sempre apontado em pesquisas que visam a aproximação ao ensino de ciências, é que esta pode facilitar a apreensão de uma concepção da ciência enquanto construção histórica humana, por meio da desmitificação da visão de ciência estável e atemporal, abrindo as portas para o seu entendimento enquanto processo histórico, “*sujeita ao seu contexto sociocultural de desenvolvimento*” (FORATO, 2009, p.8). Aliado a isso está o segundo aspecto positivo. A aproximação também possibilita fortemente a interdisciplinaridade com outras áreas do conhecimento, como a história geral e a filosofia, além de conectar as ciências “*a questões pessoais, éticas, culturais e políticas*” (MATTHEWS, 1993, p.361). Esse tipo de concepção permite compreender a ciência como algo que afeta e é afetado por outras esferas culturais, como “*estruturas de poder, (...) fatores socioeconômicos, filosofia e religião*” (LEDERMAN, 2007, p.834).

Um terceiro aspecto positivo, é que a aproximação propicia o diálogo entre o desenvolvimento do pensamento individual com os desenvolvimentos históricos de ideias científicas. Isto é, o estudante que entra em contato com a história da ciência pode descobrir que muitas das dificuldades que atualmente ele enfrenta são similares às dificuldades que pensadores, cientistas¹⁸ e filósofos do passado enfrentaram. Este paralelo pode estimular a aproximação entre professor e aluno, no sentido de o primeiro entender ainda melhor as dificuldades do segundo. Também pode, em tese, ajudar o professor de alguma forma a organizar melhor o programa de ensino e sua aula, também como, numa situação específica, traçar uma relação entre as dificuldades do(s) aluno(s) com dificuldades enfrentadas por algum pensador do passado. Como afirmam Castro e Carvalho (1992), a aproximação com a HFC possibilita “*estabelecer um diálogo (e não um paralelo) entre o processo de construção da ciência pelos cientistas e o processo de construção empreendido pelos estudantes*” (*ibid.*, p.229).

Além de propiciar a apreensão de uma concepção humana da ciência, primeiro aspecto positivo apontado, a aproximação histórico-filosófica pode propiciar também a compreensão da ciência como uma das heranças culturais mais importantes da humanidade, como um legado a ser preservado e valorizado. Isto é, essa abordagem pode propiciar uma valoração maior e mais crítica sobre a ciência e suas implicações múltiplas. Por outro lado, tem-se que a importância da HFC no ensino de ciências transcende as salas de aula, uma vez que os empreendimentos em

¹⁸As palavras “ciência” e “cientista” são criações do século XIX. Desta forma, não há muita precisão do ponto de vista histórico chamar Isaac Newton, por exemplo, de “cientista”. Contudo, para fins de praticidade, usaremos essa palavra por falta de um outro termo mais geral.

2.2 Algumas vantagens e desvantagens da aproximação histórico-filosófica ao ensino de ciências

incluí-la no ensino básico envolve questões político-educacionais, como as reformas e análises de currículos escolares (MATTHEWS, 1994, p.7).

O próximo aspecto positivo a ser citado é de que a aproximação pode ajudar a uma melhor compreensão dos conteúdos escolares específicos de ciências. Não raro vemos estudantes com sérias dificuldades em compreender uma explicação científica de um determinado fenômeno ou conceito. Isso ocorre com frequência, por exemplo, com aqueles estudados no contexto da Física Moderna. Vannucchi (1996) advoga que a aproximação histórico-filosófica permite destravar estes impasses no aluno ao apresentá-lo aos aspectos metodológicos e epistemológicos da ciência. Pode-se discutir a variedade de interpretações sobre o fenômeno, modelos alternativos, teorias conflitantes, entre outros (*ibid.*, p.20). Por outro lado, outro aspecto positivo da aproximação histórico-filosófica no ensino de ciências é que ela incita de forma própria o desenvolvimento do raciocínio, o pensamento crítico e a idealização científica nos estudantes (MATTHEWS, 1995 [1992], p.182). Diferentemente de grande parte dos exercícios puramente lógicos e analíticos, as questões trazidas pela HFC são desafiadoras e podem propiciar o debate e o diálogo críticos.

Finalmente, um dos mais importantes aspectos positivos da aproximação histórico-filosófica ao ensino de ciências é que ela permite uma compreensão menos ingênua da natureza da atividade científica experimental e teórica. Isto é, abre espaço a interessantes discussões sobre questões metacientíficas, como “*o papel da idealização e das experiências de pensamento, (...) os aspectos metafísicos dos grandes debates, além dos fatores políticos, econômicos e sociais do desenvolvimento científico*” (VANNUCCHI, 1996, p.13). Assim, vemos que uma visão distorcida e estereotipada de cientista, muitas vezes veiculada por diversos meios de comunicação, pode ser problematizada e questionada. Segundo Castro e Carvalho (1992, p.234), ao compreender mais criticamente a dinâmica científica (isto é, o que um cientista ou uma comunidade científica faz ou procede em situações específicas), o aluno pode adquirir “*uma postura mais científica em relação à realidade, havendo, portanto, uma aproximação em nível metodológico entre o ensino da ciência e a pesquisa científica*”.

A maioria dos argumentos citados acima foram sumarizados por Michael Matthews (1994) em sua conhecida e importante obra. Entretanto, apesar de sua grande importância para o crescente consenso acerca da aproximação da HFC ao ensino de ciências, alguns dos aspectos positivos levantados em seu texto carecem de um esclarecimento maior (VILAS BOAS *et al*, 2013, p.293). Por outro lado, também existem críticas negativas à aproximação da HFC no

ensino de ciências. Algumas delas provém de historiadores que veem como problemática a inclusão de tópicos históricos no ensino sem o rigor típico dos profissionais que lidam com a história da ciência. Outros autores preferem dosar suas críticas negativas, argumentando por um uso adequado da HFC evitando ao máximo as pseudo-histórias, as quase-histórias e as hagiografias (ALLCHIN, 2004; WHITAKER, 1979; MARTINS, 2006).

Um primeiro aspecto negativo, o risco da “pseudo-historização” da ciência no ensino de ciências, foi salientado por Allchin (2004). Esse risco consiste na atitude dos professores de ciência realizarem uma abordagem seletiva da história da ciência, respeitando exclusivamente objetivos pedagógicos e deixando de lado a “fidelidade histórica”, criando assim uma “pseudo-história”. Muitos historiadores, preocupados com a simplificação da história da ciência nas salas de aula, defendem que a abordagem histórico-filosófica no ensino de ciências seria parcial e incompleta (PEDUZZI, 2005, p.153). Em geral, pesquisadores em ensino de ciências que advogam pela aproximação da HFC ao ensino de ciências, defendem que os propósitos pedagógicos são diferentes dos propósitos do historiador, e que portanto não devem ser confundidos (ZANETIC, 1989; VANNUCHI, 1996; FORATO, 2009; HENRIQUE, 2011). O contra-argumento à inclusão da HFC no ensino de ciências, de que a única história possível nos cursos de ciências era a pseudo-histórica, foi apresentado no evento ocorrido no MIT em 1970, citado anteriormente (MATTHEWS, 1995 [1992], p.173).

Um segundo aspecto negativo, semelhante ao primeiro, refere-se ao risco conhecido como quase-historização da ciência (WHITAKER, 1979). Esse risco consiste na “fabricação” de uma história com o intuito de reforçar uma ideologia ou visão da ciência. Neste sentido, encontra-se outro ponto negativo, que resume-se no risco de haver influências ideológicas, políticas e religiosas de professores sobre o conteúdo histórico a ser ensinado. Em historiografia, a prática de se fazer história de forma muito parcial, usando algum “óculos” teórico ou ideológico, foi cunhada de “whiggismo”, e é extremamente criticada¹⁹. No ensino de ciências, Whitaker (1979) ataca o exercício de reescrever de forma não crítica a história da ciência para fins pedagógicos, como por exemplo a reordenação cronológica da história da ciência em função da ordem da exposição dos conteúdos em sala de aula. Muitos defensores da aproximação ao ensino de ciências, como Vannucchi (1996), argumentam que as quase-histórias são uma distorção muitas

¹⁹O termo “whiggismo” na história da ciência significa o mesmo que *presentismo*, isto é, olhar para o passado com os olhos do presente. Segundo Brush (1995), o oposto do presentismo seria o *historicismo* (no sentido adotado pelos historiadores da ciência), isto é, o esforço em olhar para o passado como “ele realmente era”, sem cometer anacronismos (p.217).

2.2 Algumas vantagens e desvantagens da aproximação histórico-filosófica ao ensino de ciências

vezes inevitável, mas que podem ser interessantes para os propósitos educacionais. Um exemplo de quase-história, bastante presente no ensino de física moderna, é a suposta ligação genética entre a realização dos experimentos de Michelson²⁰ e Morley²¹ em 1887 e a origem da TRE em 1905 por Einstein (MATTHEWS, 1995 [1992], p.174).

O próximo ponto negativo a ser destacado é que as discussões histórico-filosóficas empobrecem, em tese, o “espírito científico tecnicista”. Isto é, autores que levantam este ponto argumentam que discussões sobre HFC tendem a enfraquecer “*as convicções científicas necessárias à conclusão bem sucedida da aprendizagem da ciência*” (*ibid.*, p.173), principalmente nos cursos superiores. Usando um termo conhecido de Kuhn, o estudante em contato com a história da ciência poderia abalar suas crenças no “paradigma vigente”, o que afetaria (negativamente) sua formação (doutrinária) (PEDUZZI, 2005, p.152). Entretanto, parece inexistir conjuntos contundentes de evidências que apoiam isto. Como aponta Matthews (1994), há evidências justamente do contrário, que discussões histórico-filosóficas podem ser enriquecedoras tanto no ensino de ciências da escola básica, na formação de professores, e também na formação de pesquisadores. O sucesso do Projeto Harvard, segundo Matthews (1995 [1992], p.178), é um contraexemplo ao pessimismo sobre a aproximação da HFC ao ensino de ciências.

As distorções históricas, segundo Martins (2006), podem ter um efeito negativo para um ensino de ciências. Essas distorções podem se manifestar de diferentes maneiras, como pelo reducionismo da história da ciência a nomes, datas e anedotas, pelas concepções errôneas sobre o método científico, e pelo uso de argumentos de autoridade (*ibid.*, p.xxv-xxvi). O reducionismo pode levar facilmente à muito criticada visão da ciência repleta de grandes gênios, e o uso de argumentos de autoridade por sua vez pode levar à crença desmedida e acrítica da ciência (cientificismo), o que também não é interessante ao ensino de ciências (*idem*). Segundo Martins, as “armadilhas” do mal uso da HFC só podem ser sanadas com algum conhecimento epistemológico e historiográfico, o qual nem sempre os professores de ciências dispõem (*ibid.*, p.xxvii).

Finalmente, um dos principais aspectos negativos levantado por críticos à aproximação ao ensino de ciências é a falta de tempo para aplicação em sala de aula. Esse aspecto é salientado tanto por pesquisadores da área como professores que tentam sem sucesso implementar tópicos históricos e filosóficos em sala de aula. No entanto, como salienta Vannucchi (1996, p.28), a aproximação não implica no abandono do conteúdo programático. Pelo contrário, muitos con-

²⁰Albert Abraham Michelson (1852-1931), físico estadunidense.

²¹Edward Williams Morley (1838-1923), físico estadunidense.

teúdos precisam de uma fundamentação, por vezes através de discussões histórico-filosóficas, para que façam o mínimo de sentido. A implementação integral da HFC no ensino de ciências no contexto atual da escola básica talvez seja impossível, e também não interessante. Por outro lado, sua ausência total nos currículos pode transformar a “ciência escolar” em um conjunto de regras e enunciados de memorização não explicitamente inter-relacionado, uma “retórica de conclusões” desinteressante e sem sentido aos estudantes, principalmente aos do ensino básico.

Por fim, outro aspecto que vale mencionar é a falta de instituições de ensino superior que oferecem cursos com conteúdos históricos e filosóficos sobre a ciência, o que em geral acarreta na formação histórico-filosófica precária dos professores de ciência. Isto é entendido como outra das maiores dificuldades da aproximação da HFC ao ensino de ciências. É por essa e outras razões que, não sem motivos, houve esforços nas últimas décadas em se implementar cursos em instituições brasileiras visando suprimir essa deficiência na formação de professores.

Existem importantes exemplos destes esforços, dos quais citaremos apenas alguns. Moreira e colaboradores (2007) relatam o caso da implementação de uma disciplina de história e epistemologia da física no curso de licenciatura em física na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Outro exemplo é a criação do *Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências* no ano 2000, também na Universidade Federal da Bahia²². Há também o exemplo de Peduzzi (2005) com a implementação de um curso de Mecânica com abordagem histórico-filosófica, em 1999 no curso de física da Universidade Federal de Santa Catarina.

Por fim, mas não menos importante, cabe fazer referência aos apelos pela inclusão da HFC que existem na terceira parte do já mencionado documento “*Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio)*”, referente à área “*Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*” (BRASIL, 1998, p.27), coordenada pelo professor Luís Carlos de Menezes do Instituto de Física da Universidade de São Paulo²³. Também vale mencionar, em particular, os apelos presentes no documento “*Proposta Curricular do Estado de São Paulo: Física*” de 2008, referentes à importância de se levar em conta as dimensões histórica e filosófica do conhecimento físico²⁴.

Pode-se dizer então que a defesa pela inclusão da HFC no ensino de ciências não se mani-

²²Para mais informações, visitar o website do programa:

<https://twiki.ufba.br/twiki/bin/view/PPGEFHC/ProgramaPpgefhc>, acessado dia 29/02/2013.

²³Os documentos podem ser encontrados na página:

<http://fep.if.usp.br/~profis/pcn.html>, acessada dia 29/6/2013.

²⁴O documento pode ser encontrado na página:

http://www.rededosaber.sp.gov.br/portais/Portais/18/arquivos/Prop_FIS_COMP_red_md_20_03.pdf, acessada dia 29/6/2013.

2.3 Uma aproximação necessária, porém não suficiente

feita somente entre os grupos de pesquisadores, mas toma também dimensões políticas. Hoje sua importância é consenso na área, mesmo tendo-se em mente suas dificuldades de implementação, suas limitações e os “perigos” de seus mal usos (VILAS BOAS *et al*, 2013; MARTINS, 2006).

2.3 Uma aproximação necessária, porém não suficiente

Ponderando sobre os pontos positivos e negativos da aproximação da HFC ao ensino de ciências, podemos pensar sobre a seguinte pergunta: essa aproximação vale a pena? Para este trabalho consideraremos que a resposta é *sim*, em consonância com um atual consenso entre pesquisadores da área, muito embora a aproximação não deixe de merecer críticas e reformulações quando necessárias. Em especial, a relevância do debate filosófico estudado neste trabalho para o ensino de ciências só fará sentido a quem também entender que a aproximação traz mais benefícios do que malefícios.

Embora exista hoje o consenso mencionado, a princípio deve-se entender a aproximação histórico-filosófica como *mais uma* abordagem ou estratégia de ensino, ainda que o próprio conhecimento científico tenha em si uma natureza histórica e filosófica. Isto é, frente à complexidade dos problemas que a educação científica hoje enfrenta, essa inclusão não pode ser tomada de forma entusiástica como *o único* caminho para a resolução completa destes problemas. Nesta direção, há mais de vinte anos Zanetic alertou:

Não se deve olhar a História da Ciência como uma panaceia para o ensino. Houve uma época em que se pensava que o ensino estava ruim porque não havia laboratório. Fizeram laboratórios e continuou ruim. Em outra época, o problema era não haver livro didático: veio o livro didático e não melhorou, ao contrário, piorou. Estudo dirigido, ensino integrado, instrução programada... foi tentado tudo e se constatou que não existe uma panaceia. A gente pode substituir o ensino de física atual por História e nos vestibulares, daqui a três anos, se deparar com a pergunta: quando é que nasceu Newton? Talvez se corra este perigo. Então não é por aí. Não é só ensinar História, senão, aí o aluno vai começar a decorar frases. Então é um problema complicado realmente. Não é trivial, creio, introduzir a História da Física (ZANETIC *apud* CRUZ, 1988, p.88).

O conteúdo deste alerta persiste, pois é unânime entre os pesquisadores da área e professores de ciências que não é trivial aproximar a HFC ao ensino de ciências. Naturalmente, muito se conquistou em termos de pesquisa e resultados de análises, mas estes (importantes) avanços são sempre modestos e não podem ser generalizados, dada a complexidade que envolve a educação

em suas diversas dimensões. Como enfatiza categoricamente Matthews (1995 [1992], p.165), a história, a filosofia e a sociologia da ciência não têm todas as respostas para os diversos problemas que envolvem hoje a educação científica. Estas, sugere, encontram-se relacionadas intimamente a questões econômicas e culturais (MATTHEWS, 1994, p.7)

Uma evidência que a HFC não é uma “panaceia” ao ensino é o fato de que ela pode ser usada para diferentes objetivos educacionais, inclusive aqueles desinteressantes frente às atuais demandas da área e de currículos oficiais. Podemos fazer uso de diferentes historiografias ao discutir história da ciência em sala de aula e livros (OLIVEIRA & SILVA, 2011). A título de exemplo, podemos discutir as origens da TRE com base em determinadas abordagens historiográficas para reforçar uma visão experimentista de ciência, bastante criticada na área (NORONHA, 2011; HOLTON, 1978 [1973]). Em um conhecido artigo sobre esta problemática, Brush (1974) adverte que professores de ciência que queiram introduzir a história da ciência em suas aulas devem se atentar às tendências historiográficas modernas, ao que chamava de “Nova História da Ciência”. Esta era caracterizada pela crítica à objetividade científica, à valorização de uma dimensão subjetiva nos processos de validação de teorias, ao ataque às concepções estritamente empíricas da origem do conhecimento científico, entre outras (*ibid.*, p.1168-9). Reconhecendo as dificuldades e controvérsias inerentes à aproximação da história da ciência ao ensino, sugere:

[p]ara o professor que deseja desdoutinar seus estudantes da ideia tradicional de cientista como um descobridor neutro de fatos, não usar materiais históricos do tipo que são preparados por historiadores da ciência: eles não servirão ao seu propósito. [...] Por outro lado, aqueles professores que querem contrapor o dogmatismo presente nos livros didáticos e transmitir algum entendimento da ciência enquanto atividade vinculada a considerações metafísicas e estéticas encontrarão estímulo na nova história da ciência (*ibid.*, p.1176).

Enquanto a ausência de história da ciência pode transmitir uma concepção frágil de ciência neutra e “descobridora de fatos”, o mal uso dela pode não só reforçar essa visão como, segundo Martins (2006, p.xxiv), deturpar totalmente a NdC. Estes pontos ilustram a “maleabilidade didática” da HFC no ensino de ciências, no sentido de se poder utilizá-la para alcançar diferentes objetivos educacionais. Assim, se ela fosse considerada a “panaceia” dos problemas do ensino, poderia também ser considerada a “antipanaceia”, pois poderia ser manuseada de tal forma a agravar aqueles mesmos problemas. Por outro lado, transcendendo o problema da relevância da HFC, tem-se que do ponto de vista prático em sala de aula elas estão longe de ser uma “panaceia”, pois existem inúmeras dificuldades na produção de bons materiais, na formação de

2.4 Estudo bibliográfico sobre o ensino de Teoria da Relatividade Especial com abordagens históricas e filosóficas

professores e na aplicação efetiva de propostas com esta ênfase (MARTINS, 2007; MARTINS, 2006).

Tratando-a como uma abordagem metodológica em sala de aula, podemos no máximo conceber a HFC como um meio necessário (mas não suficiente) para atacar problemas específicos e alcançar objetivos educacionais também específicos (TEIXEIRA; FREIRE JR & EL-HANI, 2009, p.531). Neste trabalho, a entendemos como um meio necessário para atingir o objetivo de discutir aspectos não consensuais da NdC relacionados ao dRAC no contexto da TRE. A questão da realidade dos processos e entidades científicas não está presente no “conhecimento escolar”, e este debate sem os aportes da HFC perde quase todo o seu sentido. Todavia, uma vez aceito que uma das formas de tornar o ensino de ciências mais relevante é questionar criticamente o próprio conhecimento, faz-se necessário irmos à esfera do *metaconhecimento* (seja este escolar ou não). Por essa razão, a aproximação da HFC ao ensino de ciências mostra-se necessária para os fins deste trabalho.

2.4 Estudo bibliográfico sobre o ensino de Teoria da Relatividade Especial com abordagens históricas e filosóficas

Propostas de ensino de TRE e TRG não são novidade na área de ensino de física. Muitos trabalhos envolvendo propostas de sequências didáticas, intervenções pontuais diferenciadas, propostas de currículo e de outras naturezas, surgiram nos últimos anos, tanto no âmbito nacional como no internacional. No caso do Brasil, o ensino de relatividade ganhou espaço próprio, de modo que muitos livros didáticos atuais abordam o tema. Houve e há incentivos em documentos oficiais, como os parâmetros curriculares (BRASIL, 1998), para que se aborde temas relacionados à FMC no ensino médio. Por outro lado, o fato de muitos exames vestibulares nacionais não abordarem estes temas é dos motivos que faz com que muitas vezes eles sejam abordados (quando o são) de forma bastante superficial (GUERRA, BRAGA & REIS, 2007, p.575). Pesquisas apontam que a formação conceitual muitas vezes frágil de parte dos professores de física também contribui para isso (PIETROCOLA, 2010).

A seguir ilustramos o resultado de um breve estudo bibliográfico sobre algumas pesquisas de ensino de teorias relativísticas no ensino médio com abordagem histórico-filosófica. Muitos trabalhos se encaixam neste recorte, de tal maneira que fez-se uma seleção de apenas alguns que envolvessem de forma mais explícita essa abordagem. É importante salientar que também

existem várias dissertações e teses sobre o tema, que não estão incluídas nesta pesquisa bibliográfica. Ele foi realizado em alguns dos principais periódicos da área²⁵, os artigos são sumariamente discutidos na ordem cronológica de publicação. De forma alguma este estudo esgota a diversidade de propostas de ensino de teorias relativísticas com abordagem histórico-filosófica que existem na literatura especializada.

Villani e Arruda (1998), entre outras questões, tentam em seu trabalho estabelecer analogias entre a pré-história e a história da TRE e o processo de aprendizagem de conceitos da teoria. Comentam que um dos principais problemas para a última questão é o prevalecimento de “concepções espontâneas” entre os estudantes (*ibid.*, p.86). Um exemplo de concepção espontânea no contexto da teoria, segundo os autores, é a crença de que os efeitos relativísticos (contração do espaço e dilatação do tempo) são efeitos de ilusão (*ibid.*, p.87). Segundo algumas pesquisas apontadas pelos autores, mesmo estudantes de Física (graduação e pós-graduação) apresentam deficiências na aprendizagem da teoria, o que indica que não raro o ensino da teoria não é algo plausível aos estudantes (*ibid.*, p.87). Uma das analogias propostas pelos autores é entre a relativa demora para aceitação das teorias relativísticas no início do século passado e a resistência dos estudantes em aceitar seus postulados (*ibid.*, p.93). Como conclusão, os autores argumentam que o ensino de relatividade no ensino médio deve focar dois aspectos, seus resultados empíricos e aplicações, e a ruptura com a mecânica clássica. Já no ensino superior, argumentam que para que o ensino relatividade seja plausível aos estudantes, diferentes estratégias, entre elas a abordagem histórico-filosófica, devem ser usadas (*ibid.*, p.97).

Arriasecq e Greca (2002) elencam algumas considerações relevantes para a introdução de TRE no ensino médio, estabelecendo eixos necessários à introdução da teoria em livros didáticos. Um deles seria a contextualização histórica das origens da teoria, na qual se pode discutir questões como o programa mecanicista newtoniano, sua incompatibilidade com o eletromagnetismo, os trabalhos de Lorentz²⁶, a influência epistemológica das obras de Mach sobre Einstein, entre outras (*ibid.*, p.58-59). Outro eixo seria a reflexão epistemológica acerca de questões controversas sobre as origens da teoria, que estimulam discussões sobre o papel da experimentação para o início e desenvolvimento da teoria, a originalidade da abordagem einsteiniana e a suposta antecipação por outros autores, as corroborações experimentais da teoria, entre outras (*ibid.*, p.59-61). As autoras também discutem a importância do eixo conceitual, apontando como fator

²⁵*Science & Education, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ciência & Educação e Revista Brasileira de Ensino de Física.*

²⁶Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), físico neerlandês.

2.4 Estudo bibliográfico sobre o ensino de Teoria da Relatividade Especial com abordagens históricas e filosóficas

motivante as dificuldades enfrentadas tanto por alunos como também por professores de física sobre os conceitos da TRE. Argumentam que referências explícitas nos livros didáticos a temas como movimento relativo na mecânica clássica, noção clássica de simultaneidade e aos paradoxos relativísticos ajudariam a ambos entenderem melhor a “ruptura” conceitual introduzida pela teoria. As autoras concluem afirmando que a abordagem histórico-filosófica é interessante por proporcionar uma melhor concepção de ciência, mas que ela não pode ser desvinculada da dimensão conceitual da teoria (*ibid.*, p.66).

Köhnlein e Peduzzi (2005) apresentam componentes para um módulo didático baseado em uma abordagem histórico-filosófica da TRE. O módulo proposto foi testado numa sala de ensino médio de uma escola pública brasileira. A motivação dos autores advém do fato de que há uma presença exagerada da concepção empirista de ciência, e que a ideia de que há somente um método científico é muito presente em livros didáticos de ciências nos ensinos fundamental e médio (*ibid.*, p.37). Comentam que “*a concepção empirista da ciência faz parte inclusive do ideal de ciência da maioria dos professores em exercício nessas áreas: é disseminada pelos meios de comunicação e está presente nas ideias espontâneas dos estudantes do Ensino Médio*” (*ibid.*, p.37). O resultado obtido da aplicação do módulo didático mostrou-se “*uma estratégia muito positiva, capaz de envolver o aluno nas discussões em sala de aula e promover o seu interesse*” (*ibid.*, p.63). Entretanto, os autores ressaltam que não haverá efeitos substanciais com estes tipos de estratégias caso o professor não possua nenhuma formação filosófica, e concluem que a “*mudança, tão necessária, certamente passa pela atualização dos currículos dos cursos de formação de professores*” (*ibid.*, p.64).

Silveira e Peduzzi (2006), discutem três episódios históricos focando o papel da experimentação na gênese do conhecimento científico, sendo um deles a relação entre os experimentos de Michelson e Morley de 1887 e a criação inicial da TRE por Einstein, já comentada anteriormente. Sobre cada uma delas, os autores contam uma história empirista e “*uma outra história, muito mais rica, dinâmica e complexa*” (*ibid.*, p.26), ligada a tendências historiográficas e filosóficas contemporâneas. A história empirista caricatural recorrente deste tema faz uma ligação histórica quase causal entre a realização dos experimentos de Michelson e Morley e o “descobrimto” da teoria por Einstein. Para os autores, a “*história (ou caricatura) empirista não apenas empobrece a história da ciência, induz a visões distorcidas da natureza da ciência e do empreendimento científico*” (*ibid.*, p.49), e concluem: “*do ponto vista didático, em particular, a filosofia contemporânea da ciência abre imensas e ainda pouco exploradas vias para uma*

interpretação mais realista e humana da história do conhecimento científico” (idem).

Guerra, Braga e Reis (2007) apresentam uma proposta curricular aberta de inserção do estudo das teorias relativísticas na primeira série do ensino médio com viés histórico-filosófico. O eixo central da proposta, que foi aplicada em uma escola brasileira da rede federal, é composto pelos postulados trazidos por Einstein em 1905 e suas consequências, e seu objetivo educacional foi “*apresentar as teorias da física dentro de seu contexto de produção, de forma a possibilitar em sala de aula um debate em torno à ciência, seus limites e possibilidades*” (*ibid.*, p.576). Foram utilizados recursos visuais, como quadros e filmes, com o intuito de motivar discussões históricas sobre a natureza do Espaço e do Tempo desde a época de Galileu. Em determinada etapa foram apresentadas a TRE e a TRG. A apresentação da teoria geral se mostrou desafiadora, haja vista sua complexidade conceitual e principalmente matemática. Neste momento o paralelismo com as obras de arte foi, segundo os autores, bastante frutífero (*ibid.*, p.581-582). As reações dos estudantes foram registradas e avaliadas, e se mostraram em geral positivas. Como conclusão, Guerra, Braga e Reis apontam sobre a importância de incluir estes temas no currículo, de forma que não virem meros temas “apêndices”. Frente ao desafio de incluir um tema distante dos alunos, os autores reforçam a importância das abordagens interdisciplinares e histórico-filosófica (*idem*).

Em outro trabalho, Guerra, Braga e Reis (2010) defendem que no caso específico do estudo da TRE, o trabalho em sala de aula deve seguir uma abordagem histórico-filosófica (*ibid.*, p.568). Procuram mostrar como o contexto anterior às origens da teoria revela um entrelaçamento de diferentes saberes, os quais, de uma forma ou de outra, pareciam levar a questionamentos aos conceitos de Espaço e Tempo. Lorentz, antes de Einstein, já havia notado a necessidade de se tratar a variável de tempo de forma não usual à época (*ibid.*, p.572). Poincaré, também antes de Einstein, percebeu que o conceito de simultaneidade era frágil, propondo que este fugia à intuição e precisava ser *definido*, sendo portanto uma *convenção* (*ibid.*, p.573). Ao longo do século XIX, as concepções artísticas e literárias de Espaço rompiam com as concepções “clássicas”, ao mesmo tempo que surgiam as geometrias não euclidianas (*ibid.*, p.574). Por outro lado, o Tempo era atacado tanto por filósofos, cientistas e engenheiros em problemas que envolviam telégrafos, determinação de longitudes e sincronização de relógios distantes (*ibid.*, p.576). Einstein, argumentam os autores, compartilhava deste ambiente cultural em transformação, de forma que seus resultados não são obra de um gênio isolado, mas sim de alguém presente em um contexto histórico-cultural específico (*ibid.*, p.579). Por fim, Guerra, Braga e

2.5 Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

Reis defendem que o ensino das teorias relativísticas deve ser contemplado uma vez que é um assunto muito divulgado de forma acrítica, o que pode levar a enganos. Defendem também que é preciso o tratamento didático da teoria por meio de uma abordagem histórico-filosófica, pois assim se evita concepções equivocadas sobre a teoria e a sobre a figura de Einstein pelos estudantes (*ibid.*, p.580).

Arriasecq e Greca (2012), trazendo contribuições recentes de pesquisas em HFC e Didática da Ciência, oferecem uma proposta de sequência didática de TRE com abordagem contextual. Argumentam que atualmente a inclusão da teoria em currículos escolares se tornou recomendada na maioria das reformas curriculares (*ibid.*, p.828). Contudo, como comenta as autoras, o ensino de relatividade não é uma tarefa fácil, por suas consequências e estrutura não serem consideradas intuitivas. A abordagem contextual histórico-filosófica se apresenta então como uma proposta interessante para superar esta dificuldade e aprimorar as práticas em sala. Com base em ideias de Bachelard²⁷, as autoras identificam os principais obstáculos epistemológicos que podem surgir na sequência didática, como as hipóteses (tácitas) do Espaço, Tempo e simultaneidade absolutos (*ibid.*, p. 838). A proposta, construída e aplicada em uma escola argentina, possui cinco momentos. Primeiramente, questões gerais de história e epistemologia são discutidas. Nas duas etapas seguintes, conceitos de mecânica e eletromagnetismo são ilustrados, com o fim de mostrar o conflito entre essas áreas e sua relação com o início da TRE. Em seguida, se introduz a teoria de Einstein. Por fim, se discute com os estudantes a vida e imagem de Einstein, visando ir além do “mito” criado sobre ele (*ibid.*, p.839). O resultados das análises, segundo as autoras, se mostraram bastante produtivos (*ibid.*, p.842), e concluem que a abordagem histórico-filosófica da teoria ajuda a prevenir que estudantes adquiram uma concepção inadequada da NdC e que acreditem em cientistas “super gênios” (*ibid.*, p.848).

2.5 Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

2.5.1 O consenso sobre a importância da Natureza da Ciência

Como comenta Pietrocola (*apud* FORATO, 2009, p.23), paralelamente aos conhecidos problemas de ensino e aprendizagem de física, prevalece no campo das concepções de ciência visões deformadas consolidadas e aceitas socialmente, reforçadas muitas vezes pela própria educação científica. De fato, diferentes pesquisas apontam que “visões ingênuas” sobre a ciência por

²⁷Gaston Bachelard (1884-1962), filósofo e poeta francês.

parte de estudantes e professores constituem hoje um dos principais obstáculos a uma educação científica plena. Especificamente no âmbito epistemológico, essa preocupação se traduz, por exemplo, na considerável presença de concepções filosóficas limitadas em estudantes, professores e livros didáticos (LEDERMAN *et al* 2002; LEDERMAN, 1992; 2007; GIL-PÉREZ *et al*, 2001). Entre estas concepções, ou “mitos da ciência” segundo McComas (1998), estariam as ideias de que as teorias científicas são verdades absolutas (no sentido de serem definitivas e incorrigíveis), que o método científico fornece provas irrefutáveis, que a ciência tem resposta para tudo, que os experimentos compõem o principal caminho rumo ao conhecimento científico, que os modelos científicos representam a realidade, que a ciência é construída sempre por mentes brilhantes e solitárias, que o fazer científico é neutro e imparcial, entre outros. Contribuindo muitas vezes de forma negativa, tem-se ainda a mídia e outros grandes meios de comunicação que não raro transmitem estas visões por meio de um “discurso científico autoritário”, atingindo uma enorme parcela da população (GIL-PÉREZ *et al*, 2001).

O que torna entendimentos ingênuos sobre a ciência algo alarmante é o fato de não contribuírem para uma educação científica plena, uma demanda educacional atual que visa a formação de cidadãos críticos sobre questões científicas, esclarecidos e atuantes na sociedade e em seus problemas (PRAIA *et al*, 2007). De fato, muitos autores consideram que estes pontos (educação científica plena e a formação de cidadãos críticos) podem ser considerados objetivos importantes para o ensino de ciências (AIKENHEAD, 2006). Uma visão não ingênua de ciência permite que a validade de um corpo de conhecimentos seja questionada de forma crítica, de forma a reconhecer seus limites de aplicação e seu uso não justificado. Além disso, o exercício da crítica passa a fazer ainda mais parte do processo de ensino, possibilitando que o mesmo se torne uma competência dos alunos. Em resumo:

(...) pode-se sempre argumentar que a compreensão da NdC fornece aos estudantes uma melhor compreensão da ciência enquanto disciplina, e também fornece um contexto que dá sentido aos assuntos que nós esperamos que os alunos aprendam. Nesse sentido, a NdC é defendida em razão do seu valor educacional intrínseco em compreender a ciência como uma disciplina, e não por ter qualquer coisa que seja de valor instrumental concreto (LEDERMAN, 2007, p.872).

Desta forma, podemos então considerar que para uma educação científica plena é preciso o ensino não só *de* ciência mas *sobre* a ciência, ou, um ensino da NdC. Há pouco menos de vinte anos a importância da aproximação de questões relativas à NdC ao ensino de ciências se tornou consenso, o que se reflete em artigos de periódicos da área (VILAS BOAS *et al*, 2013). O que

2.5 Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

não implica, contudo, que haja críticas à aceitação acrítica sobre esta importância (ACEVEDO *et al*, 2005). Por outro lado, o consenso sobre a importância não implica um consenso sobre o conteúdo da NdC, como será discutido adiante. E de fato, embora muito se pense e se pesquise como a NdC deve ser trabalhada no ensino de ciências, não existe consenso pleno sobre as questões: como definir “NdC”? Qual seu conteúdo? Qual a “natureza da NdC”?

Muitos autores têm diferentes visões sobre como conceber a NdC e, principalmente, como “aplicá-la”. Mesmo os filósofos, que tomam a frente no debate sobre a NdC em um âmbito mais geral, não têm consenso sobre “a natureza da NdC” (PESSOA JR, 2013; EFLIN, GLENNAN & REISCH, 1999). Do ponto de vista prático e metodológico, muitos professores apresentam bastantes dificuldades em tratar temas da NdC em sala de aula. Ainda assim, o interesse em se inserir nos currículos de disciplinas científicas não só os próprios conteúdos científicos como também discussões sobre a natureza destes conteúdos é enorme, sendo inclusive já relativamente antiga (VILAS BOAS *et al*, 2013, p.294). Isto é, podemos entender isto como uma evidência de que o apelo a uma educação científica menos metódica e mais reflexiva não é nova.

A controvérsia sobre como conceber a NdC não deve ocultar o fato de que há alguns consensos pontuais (HENRIQUE, 2011, p.43; EL-HANI, 2006, p.6). Para Gil-Pérez e colaboradores (2002), por exemplo, existe uma base comum na forma como conceber a NdC no trabalho de importantes autores como Popper²⁸, Kuhn, Toulmin, Lakatos, Feyerabend, Laudan²⁹ e Giere³⁰, e que esta base deve estar trabalhada com o fim de facilitar a compreensão da construção do conhecimento científico (*ibid.*, p.563). Segundo estes autores, essa base comum consiste na rejeição de um conjunto de distorções da NdC, que chamam de “*epistemologia espontânea*” (*ibid.*, p.564), tais como o indutivismo extremo, uma visão dogmática de ciência associada à existência de um único método científico, a visão linear e acumulativa da ciência, a visão excessivamente analítica e desfragmentada das ciências, as visões individualistas e elitistas que privilegiam “grandes gênios” e a ideia de que a ciência é socialmente neutra ou avulsa de todas as outras esferas sociais e culturais (*ibid.*, p.563).

Contudo, existem várias propostas sobre o que deveria constituir uma base comum à NdC. Partindo de um estudo sobre oito documentos curriculares internacionais, McComas e colaboradores (*apud* EL-HANI, 2006, p.6-7) elaboraram, há mais de dez anos, uma lista de tópicos que comporiam esta base comum:

²⁸Sir Karl Raimund Popper (1902-1994), filósofo austríaco.

²⁹Larry Laudan (1941-), filósofo da ciência e epistemólogo estadunidense contemporâneo.

³⁰Ronald Giere (1938-), filósofo da ciência estadunidense contemporâneo.

- (i) o conhecimento científico, embora robusto, tem uma natureza conjectural.
 - (ii) O conhecimento científico depende fortemente, mas não inteiramente, da observação, da evidência experimental, de argumentos racionais e do ceticismo.
 - (iii) Não há uma maneira única de fazer ciência, i.e., não há método científico universal, a ser regido universalmente.
 - (iv) A ciência é uma tentativa de explicar fenômenos naturais.
 - (v) Leis e teorias cumprem papéis distintos na ciência, e teorias não se tornam leis, mesmo quando evidências adicionais se tornam disponíveis.
 - (vi) Pessoas de todas as culturas contribuem para a ciência.
 - (vii) Novos conhecimentos devem ser relatados abertamente e claramente.
 - (viii) A construção do conhecimento científico requer registros de dados acurados, crítica constante das evidências, das teorias, dos argumentos etc. pelas comunidades de pesquisadores, e replicação dos estudos realizados.
 - (ix) Observações são dependentes de teorias, de modo que não faz sentido pensar-se em uma coleta de dados livre de influências e expectativas teóricas.
 - (x) Cientistas são criativos.
 - (xi) A história da ciência apresenta um caráter tanto evolutivo quanto revolucionário.
 - (xii) A ciência é parte de tradições sociais e culturais.
 - (xiii) A ciência e a tecnologia impactam uma à outra.
 - (xiv) Ideias científicas são afetadas pelo meio social e histórico no qual são construídas.
- (idem).

Pode-se notar que há pontos de convergência com a base elaborada por Gil-Pérez e colaboradores (2002), o que, segundo El-Hani (2006, p.9), reforça a tese de que há de fato alguns consensos sobre a NdC.

A rigor, os estudos sobre a NdC remontam a movimentos filosóficos que podem ser chamados de a *Visão Tradicional* ou *Recebida* (Carnap³¹, Reichenbach³², Hempel³³ e outros), a *Visão Globalista* (Toulmin, Kuhn, Lakatos e outros), e mais recentemente, a *Visão Ciência, Tecnologia e Sociedade* (Latour³⁴, Galison³⁵, Boaventura³⁶ e outros) e a *Visão Pluralista Ob-*

³¹Rudolf Carnap (1891-1970), filósofo alemão

³²Hans Reichenbach (1891-1953), filósofo da ciência alemão.

³³Carl Gustav Hempel (1905-1997), filósofo alemão.

³⁴Bruno Latour (1947-), filósofo e sociólogo das ciências francês.

³⁵Peter Lois Galison (1955-), físico e historiador da ciência estadunidense.

³⁶Boaventura de Sousa Santos (1940-), sociólogo português.

2.5 Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

jetivista (Laudan, Hacking³⁷ e outros) (PESSOA JR, 2013). Isto é, os estudos sobre a NdC se carregam de uma concepção ou de outra há pelo menos cem anos. Nas últimas três décadas, importantes pesquisadores em ensino de ciências, em especial Derek Hodson, Richard Duschl, Michael Matthews e Norman Lederman, estenderam essa tradição de estudos sobre a ciência ao ensino de ciências (MATTHEWS, 2012, p.3). Em oposição à discussão truncada entre filósofos acerca da NdC, houve um esforço dentro da área de ensino de ciências no sentido da consolidação de um consenso adequado a fins educacionais. É bastante conhecido que nos últimos anos construiu-se na área o que atualmente é conhecido como *visão consensual da NdC*. A consolidação não só do consenso sobre a *importância* mas também sobre o *conteúdo* da NdC foi uma importante conquista da área, ainda que existam críticas ao segundo ponto.

Segundo Lederman (2007), o termo “Natureza da Ciência” tipicamente se refere aos valores e suposições inerentes ao conhecimento científico e ao desenvolvimento do conhecimento científico. Embora a NdC possa ser definida como um conjunto de teses que caracterizaria a ciência, não é consensual que conjunto seria este, o que é um fato aceito pelos pesquisadores em ensino de ciências em face da grande diversidade de visões díspares sobre a ciência entre cientistas e estudiosos de disciplinas metacientíficas, como filosofia da ciência, história da ciência, sociologia da ciência, entre outras. Em face disto, Abd-El-Khalick e Lederman (2000) mostraram preferir usar a sigla “NOS” (Natureza da Ciência, do inglês *Nature Of Science*) do que “the NOS” (a Natureza da Ciência), por não acreditarem em uma única natureza da ciência. Tendo os seus critérios de demarcação não estritamente definidos, como ocorre com a ciência, pesquisas, propostas e projetos sobre o tema da NdC revelam posições nem sempre convergentes entre os pesquisadores, o que dá origem à cisão “visões consensuais da NdC” × “visões não consensuais da NdC”.

Mesmo cientes de que entre filósofos, historiadores e sociólogos da ciência não há consenso sobre a NdC, Lederman e colaboradores elaboraram, ao longo das duas décadas passadas, uma lista (fechada) de aspectos consensuais da NdC que tornou-se forte referência na área. Tomando que a NdC refletiria a base epistemológica da ciência (PESSOA JR, 2013), o grupo de Lederman advoga que, para os fins da educação básica, há pontos consensuais que contemplam ao mesmo tempo três critérios: são acessíveis pelos estudantes, são consenso por boa parte dos filósofos e historiadores, e são úteis para os futuros cidadãos (MATTHEWS, 2012, p.10). Estes pontos, chamados por Matthews (*ibid*) de “sete pontos de Lederman” são:

³⁷Ian Hacking (1936-), filósofo canadense.

1. *A natureza empírica da ciência*, no qual eles [Lederman e colaboradores] reconhecem que embora a ciência seja empírica, cientistas não têm acesso direto à maioria dos fenômenos naturais (...).
2. *Teorias científicas e leis*, no qual eles defendem que ‘leis são descrições de relações entre fenômenos observáveis... Teorias, por outro lado, são explicações inferidas dos fenômenos observados ou das regularidades nestes fenômenos... Teorias e leis são formas diferentes de conhecimento e um não se torna o outro’ (...).
3. *A natureza imaginativa e criativa do conhecimento científico*, no qual eles defendem que ‘a ciência é empírica... Contudo, a geração de conhecimento científica também envolve imaginação humana e criatividade. Ciência... não é uma atividade ordenada, inteiramente racional e sem vida... entidades científicas, como os átomos e espécies, são antes modelos teóricos funcionais do que cópias da realidade’ (...).
4. *A natureza teórico-dependente do conhecimento científico*, no qual se defende que ‘as asserções teóricas ou disciplinares dos cientistas, crenças, conhecimentos anteriores, treinamento, experiências e expectativas influenciam em seu trabalho. Todos esses fatores de fundo formam um estado de ser que afeta os problemas que os cientistas investigam e como eles conduzem suas investigações’ (...).
5. *O enraizamento social e cultural do conhecimento científico*, no qual é defendido que ‘Ciência, enquanto empreendimento humano, é praticada em um contexto de uma cultura maior e seus praticantes são o produto desta cultura. Isto implica que a Ciência afeta e é afetada pelos vários elementos e esferas intelectuais da cultura na qual está enraizada’ (...)
6. *O mito do método científico*, no qual se defende que ‘não há um único método que poderia garantir o desenvolvimento de um conhecimento infalível... e não há uma sequência simples de atividades... que leva [os cientistas] indubitavelmente a respostas ou soluções válidas ou funcionais’.
7. *A natureza provisional do conhecimento científico*, no qual se argumenta que ‘conhecimento científico, embora confiável e durável, não é nunca absoluto ou definitivo. Esse conhecimento, incluindo os fatos, teorias e leis, está sujeito a mudanças’ (...) (*ibid.*, p.10-11).

Ao elencar estes pontos, Lederman e colaboradores declaram-se cientes de que não deve existir uma caracterização única da NdC, e que os “aspectos consensuais” podem mudar em função do tempo, sendo que estes pontos elencados só fazem sentido no contexto atual (ABDEL-KHALICK & LEDERMAN, 2000; HENRIQUE, 2011, p.47). Como comenta Henrique (2011, p.46), assim como se propõe que uma visão científica fechada e não provisional seja dogmática, uma visão metacientífica também fechada e não provisional seria tão dogmática quanto. Por isso, não se pode tomar os “sete pontos de Lederman” de forma acrítica, e desconsiderar, por exemplo, que eles tenham caráter provisional, assim como teria o conhecimento

2.5 Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

científico atual segundo os próprios autores. De qualquer forma, filósofos, em geral, consideram que as ciências comporiam um fenômeno cultural bastante difuso para ser caracterizado como contendo uma única natureza (EFLIN, GLENNAN & REISCH, 1999).

Segundo Matthews (2012, p.10), o principal ponto positivo no conjunto destes pontos é que ele possibilita aos pesquisadores em ensino de ciências um instrumento para avaliar as concepções de NdC. Por outro lado, os principais pontos negativos são que esta lista pode ser entendida como “mais um conteúdo de ensino” por professores de ciências, e que ela pode virar um “mantra”, isto é, algo a ser seguido e não questionado.

2.5.2 O não consenso sobre o conteúdo da Natureza da Ciência

A cisão “visão consensual da NdC” × “visão não consensual da NdC” reflete tensões metacientíficas entre filósofos e correntes filosóficas, algumas bastante antigas e fundamentais à filosofia. Eflin, Glennan e Reisch (1999) exemplificam algumas questões consensuais e não consensuais:

Áreas de *consenso* sobre a natureza da ciência:

O principal objetivo da Ciência é adquirir conhecimento do mundo natural;

Há uma ordem implícita no mundo que a Ciência procura descrever da maneira mais simples e compreensível;

A Ciência é dinâmica, mutável e experimental;

Não há nenhum método científico único.

Áreas *sem* consenso sobre a natureza da ciência:

A geração do conhecimento científico depende de compromissos teóricos e fatores sociais e culturais;

A verdade das teorias científicas é determinada por características do mundo que existem independentemente do cientista (*apud* HENRIQUE, 2011, p.46).

Como comenta Henrique (*idem*), dada a complexidade da ciência, seria muito arriscado falar de concepções “corretas” ou “errôneas” da NdC. Como comentado, Lederman e pesquisadores colaboradores estavam cientes disto ao elaborar os pontos consensuais, visando-os para fins do ensino de ciências. Recentemente, muitos autores têm criticado filosoficamente a visão consensual da NdC, em especial os “sete pontos de Lederman” (IRZIK & NOLA, 2011; MATTHEWS, 2012; ROZENTALSKI; HENRIQUE & NORONHA, 2012; HENRIQUE; ZANETIC & GURGEL, 2012). As críticas, de forma geral, apontam para as fragilidades dos “sete

pontos de Lederman”, tais como sua incapacidade em apontar aspectos mais específicos das diferentes ciências, e sua insuficiência em não contemplar questões metacientíficas (principalmente as não consensuais) atualmente debatidas, como o papel da matemática nas ciências, o Realismo Científico (MATTHEWS, 2012, p.20; NORONHA & GURGEL, 2013), os critérios de demarcação da ciência, a relação entre ciência e religião (HENRIQUE, 2011), entre outros.

Matthews (2012, p.12) critica o primeiro ponto de Lederman, argumentando que afirmar que a NdC é empírica, de forma não esclarecedora, passa por cima de dois grandes problemas da filosofia da ciência: o status ontológico das entidades científicas e o papel da abstração e idealização na ciência. Afirmar que a NdC é empírica significa que nosso conhecimento sobre entidades e processos inobserváveis é também empírico? Significa dizer que estas entidades e processos inobserváveis são reais? Segundo Matthews (*idem*), Lederman evoca seu primeiro ponto por haver grande consenso sobre a existência de uma realidade objetiva, sendo que as grandes controvérsias surgem no domínio do diretamente inobservável. Desta forma, Lederman estaria atropelando um dos ricos e antigos debates da filosofia da ciência, caro a este trabalho: o dRAC. O conhecimento deste debate, segundo Matthews (*ibid.*, p.13), embora não apropriado a estudantes do ensino básico, seria apropriado a professores de ciências.

Matthews propõe uma mudança de termos, de *Natureza da Ciência* para *Características da Ciência*, argumentando que seria mais interessante discutir, investigar e formular *características* da ciência do que se ensinar sua (suposta) *natureza* (*ibid.*, p.18). Assim feito, os “sete pontos de Lederman” se tornam vários pontos, alguns consensuais e outros não consensuais, muitos levantados pelos atuais estudos em HFC e também em Sociologia da Ciência. Cada um, segundo Matthews, com um enorme aporte histórico-filosófico e potencial de discussão (*ibid.*, p.18-20). Argumenta que este nova “lista” não deve ser apresentada como dogma, o que seria confundir educação científica com doutrinação, e que a compreensão da sutileza de seus pontos depende de um conhecimento histórico-filosófico mínimo (*ibid.*, p.21).

Outros autores críticos aos “sete pontos de Lederman”, que a princípio assim como Matthews não negam a importante conquista dos pesquisadores da área com a construção de uma visão consensual de NdC, apontam alternativas na tentativa de escapar das fragilidades desta visão. Uma destas fragilidades seria a incapacidade dos pontos em contemplar especificidades de diferentes ciências. Irzik e Nola (2011) ilustram exemplos do que seriam algumas destas especificidades:

2.5 Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

Embora a maioria das ciências sejam experimentais, algumas não o são. Teorias astronômicas (antes do advento dos radiotelescópios) recorrem a observações telescópicas, mas astronomia não é uma ciência experimental; experimentos simplesmente não são possíveis neste campo. Agora, considere a característica de fazer previsões. Novamente, a maioria das ciências objetivam fazer previsões, em especial novas previsões, mas nem todas contemplam isso. Por exemplo, a mecânica celeste é de fato muito boa em prever as posições dos planetas. Da mesma forma, a ciência dos terremotos realiza um bom trabalho em explicar porque terremotos ocorrem, mas até então tem falhado em prever o acontecimento de grandes terremotos, embora apresente sucesso em prever suas localizações. A ciência dos terremotos também não é exatamente uma ciência experimental; não fazemos experimentos manipulando terremotos (...). Física de partículas, por outro lado, é uma ciência, tanto do ponto de vista observacional como experimental, e é muito boa tanto em explicar como em prever muitos fenômenos subatômicos (*ibid.*, p.596).

Pode-se entender que os autores sugerem nesta citação que parece não fazer sentido perguntar sobre a “essência” da Ciência, pois cada ciência apresenta especificidades que as diferem entre si de forma determinante. Para esses autores, se existirem semelhanças pontuais entre as diferentes formas de ciência, elas não seriam suficientes para serem utilizadas como critérios últimos e definitivos de demarcação de ciência (*ibid.*, p.595), tampouco definem “de forma essencial” o que é o conhecimento científico. Sobre o “essencialismo” da NdC, comentam Eflin, Glennan e Reisch (1999):

O conceito de natureza da ciência parece pressupor: (a) que existe uma natureza da ciência para ser descoberta e ensinada aos estudantes; (b) que uma lista de tópicos pode descrever a natureza da ciência; e (c) que para uma disciplina ser considerada científica, cada um dos tópicos deve ser verdadeiro para essa disciplina. Na filosofia, essa é uma visão essencialista da ciência, em que se acredita que há uma essência da natureza ou um conjunto de critérios que descrevam todas e somente as atividades e investigações são consideradas científicas. A maior parte dos filósofos da ciência e educadores que refletiram sobre essa questão consideram que essa visão essencialista não pode ser sustentada (EFLIN, GLENNAN & REISCH *apud* HENRIQUE, 2011, p. 46).

Em seguida, esses autores argumentam que o essencialismo, bastante controverso nos debates filosóficos, pode afinal ser interessante para fins pedagógicos (*idem*). Contudo, Irzik e Nola (2011) discordam dessa visão, expondo três críticas à visão consensual da NdC (*ibid.*, p.592-3). Primeiramente, argumentam que ela retrata uma visão muito estreita da ciência, por não fazer menções a aspectos importantes da investigação científica, tais como suas regras metodológicas e os seus objetivos. Sem discussões sobre estas questões, Irzik e Nola argumentam que fica difícil compreender minimamente como se dá e o que é o conhecimento científico.

A segunda crítica, já comentada anteriormente, é de que a visão consensual implica em um retrato muito monolítico da ciência, por não levar em consideração as especificidades de cada ciência. Por fim, a terceira crítica refere-se à falta de coerência interna e unidade sistemática em alguns dos “sete pontos de Lederman”, e a insuficiente atenção prestada a algumas de suas consequências. Alguns pontos da lista de Lederman parecem implicar fortemente na dependência de pré-concepções teóricas e na subjetividade do conhecimento científico, sendo que não fica claro as consequências disto para a questão da possibilidade da objetividade científica, por exemplo.

Filosoficamente, as críticas de Irzik e Nola à visão consensual da NdC resumem-se no fato de que ela se aproxima de um “essencialismo” que, na prática, parece não existir em uma forma trivial. Buscando uma imagem de Ciência que não seja dinâmica somente no tempo (como, em tese, é o conjunto de “sete pontos de Lederman”), mas também no “espaço das ciências”, Irzik e Nola usam o conceito de “semelhanças de família”, inspirados na obra de Wittgenstein, para compor uma nova abordagem de NdC que faça justiça às diferentes formas de ciência e suas especificidades.

Segundo os autores, podemos conceber a abordagem por semelhanças de família à NdC pelo menos de duas formas: semelhanças do tipo *série*, e semelhanças do tipo *politética*. No tipo *série*, temos que as diferentes ciências não compartilham necessariamente das mesmas características, de forma que, podemos ter duas diferentes formas de conhecimento científico que têm muito pouco em comum (por exemplo, Botânica e Cosmologia). Assim, não haveria essência(s) em comum entre todas as ciências, mas sim “semelhanças entre pares” próximos (ver figura 2.1). Por outro lado, no tipo *politética*, que é adotada pelos autores, se argumenta que as diferentes ciências compartilham, em alguma medida, características básicas a toda ciência. Em suas palavras: “(1) atividades, (2) objetivos e valores, (3) metodologias e regras metodológicas, e (4) produtos” (*ibid.*, p.596). Para Irzik e Nola, “Ciência” não teria uma definição precisa e exata, mas congregaria necessariamente variações destas quatro categorias: *atividades* como observar, fazer experimentos, classificar e levantar problemas; *objetivos e valores* como explicação, previsão e simplicidade; *metodologias e regras metodológicas* como indução, método hipotético-dedutivo e analogias; *produtos* como hipóteses, teorias, leis, modelos e dados experimentais (PESSOA JR., 2013).

Didaticamente, Irzik e Nola (2011, p.605) argumentam que essa abordagem é efetivamente útil em transmitir aos estudantes uma ideia da riqueza da NdC, e permite os professores caracte-

2.5 Natureza da Ciência e Ensino de Ciências

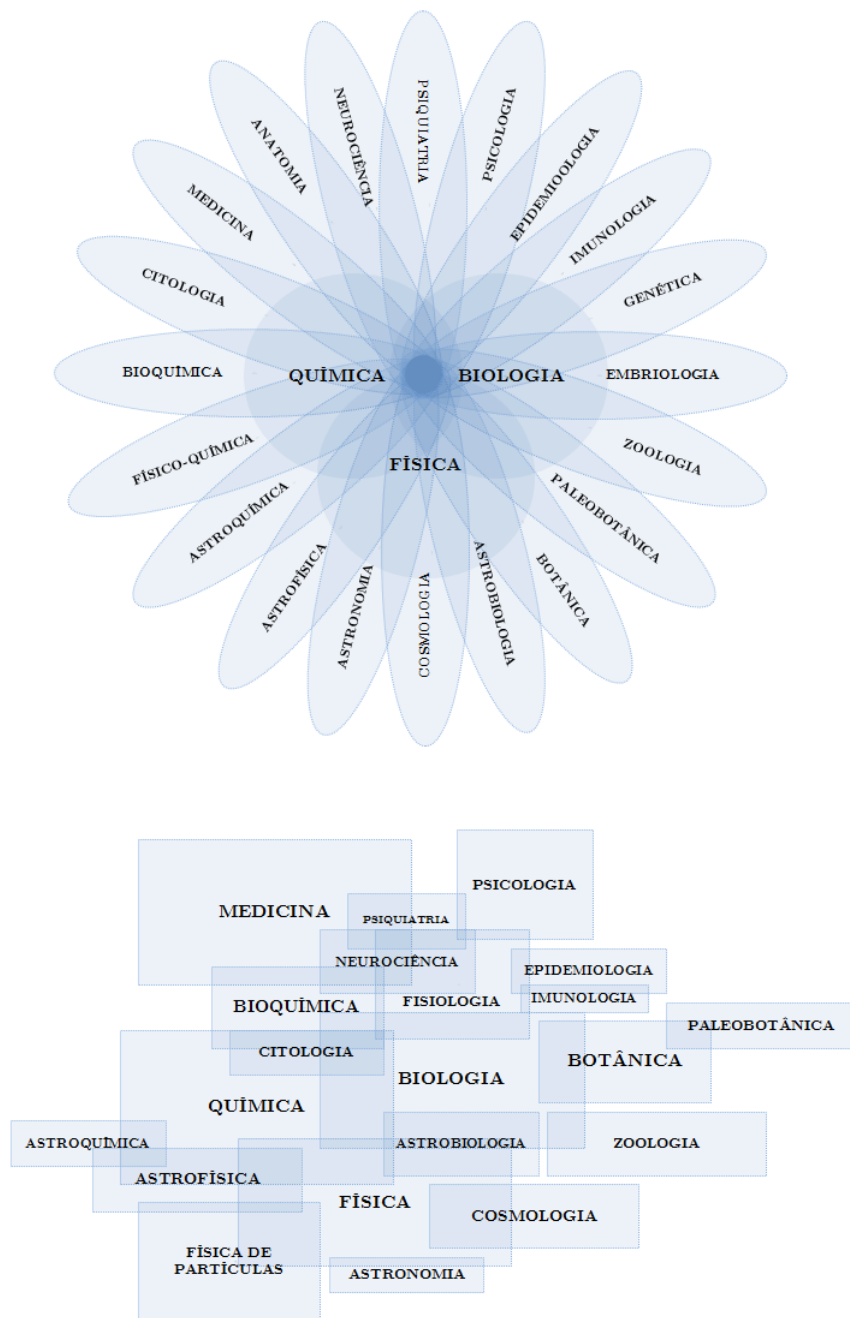


Figura 2.1: Acima, representação de uma imagem essencialista da Ciência (todas as ciências ilustradas possuem uma essência em comum, que na imagem encontra-se na intersecção de todas as formas). Abaixo, representação da relação entre as ciências pela abordagem de semelhanças de famílias do tipo *série*. É importante salientar que há ao menos três desvantagens nesse tipo de representação gráfica: o rigor das definições de cada ciência e suas subáreas é mínimo; os limites entre cada ciência não estão bem delimitados, e; pela grande inter-relação entre algumas ciências, a representação de forma plana é limitada. As ciências ilustradas nas figuras foram escolhidas aleatoriamente.

rizarem melhor a Ciência: “*ciência é um sistema cognitivo ou padrão de práticas e pensamentos que envolve tais e tais atividades; tais e tais valores e objetivos; que produz isso e aquilo usando essas e aquelas metodologias e regras metodológicas*”(idem). Não explicitam nenhuma estratégia didática, contudo, como salienta Pessoa Jr (2013), defendem que essa abordagem proporciona discussões mais abertas em sala de aula, como a exploração de diferentes metas e valores, métodos científicos, definições de verdade, entre outros.

Todavia, a proposta de Irzik e Nola, embora importante e interessante, não carece de críticas. Tomando como base uma citação anterior (*ibid.*, p.596), temos que pode-se considerar Astronomia como ciência experimental, desde que aceitemos que observações astronômicas e a existência de instrumentos de coleta de dados podem ser considerados como características de uma ciência experimental. Analogamente, não parece muito sensato diminuir o poder de previsibilidade da ciência dos terremotos pelo fato de não podermos “manipular” terremotos, sendo que ela é relativamente eficaz em previsões estatísticas. Embora as diferentes ciências tenham diferentes características, parece que não se toma atenção suficiente às implicações do fato de que os termos (palavras) “atividades”, “objetivos e valores”, “metodologias” e “produtos” adquirem noções ou sentidos próprios em função do contexto (mais especificamente, do contexto de cada tipo de ciência) em que são empregadas (ver figura 2.2). Por outro lado, os autores exploram apenas os aspectos cognitivos da ciência, deixando de lado (confessadamente) o debate acerca do enraizamento social e cultural do conhecimento e das práticas científicas (*ibid.*, p.605).

Por vezes, a leitura da proposta de Irzik e Nola pode sugerir que há certa pretensão de demarcar, muito embora de forma crítica e cuidadosa, o que é ciência, ao contrário do que os próprios autores afirmam. Afinal, elencar quatro “categorias básicas” a todas as ciências pode parecer um flerte, em alguma medida, com um tipo de essencialismo, o que seria uma crítica bastante controversa à proposta dos autores. Claramente, a exposição de Irzik e Nola não nos leva necessariamente a esta conclusão, o que seria uma contradição uma vez que criticam os “sete pontos de Lederman” justamente por passarem uma imagem “monolítica” e “essencialista” de Ciência. Seria um projeto audacioso e fora das metas deste trabalho propor uma nova e concreta abordagem à NdC. Assim, visando defender a relevância do dRAC no ensino de ciências, tomamos o que consideramos melhor e mais interessante em cada abordagem discutida. Felizmente, tanto a proposta de Matthews como a de Irzik e Nola são bastante ricas e interessantes, e ambas abrem as portas para a discussão deste debate.

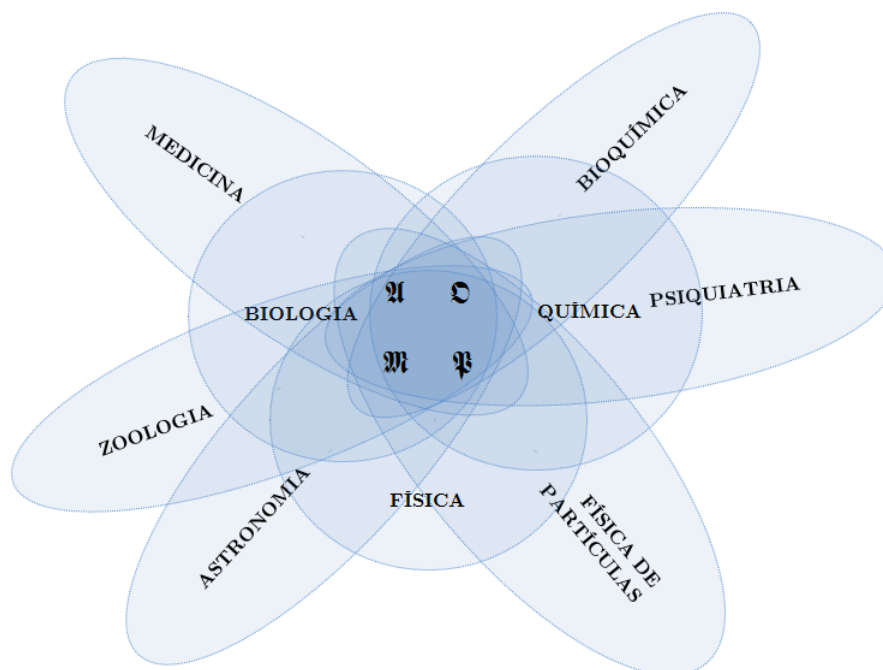


Figura 2.2: Representação da relação entre as ciências pela abordagem de semelhança de famílias tipo *politética*. Dada a generalidade dos quatro elementos politéticos ilustrados pelos autores (IRZIK & NOLA, 2011), ilustramos como é possível interpreta-los de diferentes maneiras. Na figura, \aleph representa “atividades”, por exemplo, a capacidade de uma determinada ciência em possibilitar a realização de experimentos. \emptyset representa “objetivos e valores”, por exemplo, a capacidade de previsão de fenômenos ou comportamentos dentro de um contexto teórico. \mathfrak{M} representa “metodologias ou regras metodológicas”, por exemplo, as regras metodológicas que fazem parte da estrutura das teorias. Por fim, \mathfrak{P} representa “produtos”, por exemplo, os resultados materiais advindos da aplicação de uma determinada teoria em um ramo específico. Essa representação gráfica apresenta as mesmas limitações da figura anterior. As ciências ilustradas nas figuras foram escolhidas aleatoriamente.

Primeiramente, a proposta de Matthews (2012) de mudança de nomenclatura é interessante, por que traz com ela também uma mudança quanto a atitude filosófica frente à complexidade multifacetada da Ciência. A palavra “características” é mais compatível com a noção de algo que é uma construção histórica contextualizada do que a palavra “natureza”. Por outro lado, tomando a abordagem por semelhanças de família apresentada por Irzik e Nola (2011), a concepção do tipo *série* parece ser mais compatível com o conceito de *características da ciência* proposta por Matthews. Pode-se argumentar que nem sempre na história da Ciência as quatro categorias básicas elencadas pelos autores estiveram presentes (na forma como são apresentados e entendidas hoje em dia), de forma que as “categorias básicas da NdC” seriam também um produto de uma construção histórica contextualizada. O que entendemos hoje por “Ciência”, “metodologia científica” e “atividades” pode (deve) não ter sido as mesmas compreensões que se teve no passado.

Irzik e Nola (*ibid*) argumentam que a abordagem por semelhanças de família é neutra quanto ao debate do Realismo e Antirrealismo Científicos, permitindo, por exemplo, que “*educadores realistas [ênfatem] verdade como o objetivo da ciência tanto para as entidades observáveis como para as não observáveis*” (*ibid.*, p.605), e analogamente que educadores antirrealistas “[ênfatem] a adequabilidade empírica” (*idem*). Argumentam que a abordagem por semelhanças de família também é compatível para os casos em que o professor evita completamente o debate (*idem*). Todavia, ainda que em alguns domínios possa se mostrar extremamente complexo, segundo Matthews (*ibid.*, p.12) o debate entre realistas, empiristas e instrumentalistas remonta à época de Aristóteles, e desde então (levando em conta suas transformações históricas e contextuais) teria sido central em várias etapas do desenvolvimento histórico da ciência e da filosofia. Assim, negar ou evitar o debate seria negar uma importante *característica da ciência* a ser discutida por professores e estudantes.

Pode-se considerar que o dRAC não se comporta como uma “categoria básica” das diferentes ciências, pois ele se manifesta com características bastante peculiares nos debates filosóficos sobre cada uma delas. Em termos da cisão “visão consensual da NdC” × “visão não consensual da NdC”, o debate é bastante não consensual e controverso, como será discutido no capítulo seguinte. Entretanto, não necessariamente um debate com estas características, aliado à sua complexidade, é desinteressante ao ensino de ciências. Como mencionado anteriormente, alguns filósofos sugerem que este debate não deve ser tratado com estudantes no ensino básico, dada sua complexidade e “não consensualidade” (EFLIN, GLENNAN & REISCH, 1999; IR-

2.6 Síntese e porvir

ZIK & NOLA, 2011). Contudo, é justamente sua natureza não consensual que pode ser um elemento interessante, principalmente à formação de professores de ciências. Matthews (1995 [1992], p.191) constatou que esse debate em cursos de formação de professores pode ser enriquecedor, mesmo para aqueles estudantes que nunca estudaram HFC.

A aproximação das controvérsias científico-filosóficas ao ensino de ciências pode possibilitar uma melhor compreensão das características da ciência, pois estas estiveram quase sempre presentes na história da Ciência (MATTHEWS, 2012; MATTHEWS, 1994). Os resultados da pesquisa de campo ilustrados no capítulo final deste trabalho indicam que a não consensualidade sobre o dRAC é algo que se manifesta nos próprios estudantes de física (de licenciatura e bacharelado), de um forma bastante rica e diversa. Essa diversidade de posturas filosóficas, que possivelmente não seria tão manifesta em discussões sobre questões consensuais, é extremamente interessante ao ensino de física em ao menos dois aspectos: ela reflete, de um modo próprio, a também diversidade de posturas filosóficas de estudiosos da ciência e cientistas quanto à possibilidade e justificação do conhecimento científico, e permite o exercício reflexivo e não doutrinário sobre uma teoria científica

2.6 Síntese e porvir

Neste capítulo defendemos a aproximação da HFC ao ensino de ciências e a relevância de questões não consensuais da NdC. Apesar de existirem críticas sérias à aproximação, argumentamos que a HFC se mostra necessária para questionar criticamente o próprio conhecimento científico, uma das possíveis formas de tornar o ensino de ciências mais relevante. Comentamos a importância da criação de uma visão consensual da NdC, feita tendo-se em vista problemas específicos do ensino de ciências. Argumentamos, porém, que a visão consensual não é suficiente, e que as questões não consensuais podem trazer uma visão ainda mais fiel e menos estagnada da ciência. O dRAC, um dos temas centrais deste trabalho, enquadra-se como questão não consensual da NdC, e a sua aproximação ao ensino de ciências é controversa e pouco explorada.

No próximo capítulo discutimos com afincos facetas do dRAC. Um breve histórico será ilustrado, e algumas categorias, que são recorrentes em outros capítulos, são introduzidas seguidas de descrições e exemplos. Trata-se de um debate antigo e bastante complexo, e, embora pretenda-se no capítulo seguinte um exercício de síntese e completeza, não é feito um estudo

exaustivo do assunto. Referências para aprofundamento são apresentadas ao longo das seções. Ao final, apresentamos importantes argumentos de correntes realistas e antirrealistas. O principal intuito do capítulo que segue é dar subsídios filosóficos para as discussões levantadas nos capítulos 4, no qual discutimos diferentes interpretações científico-filosóficas da TRE, e na pesquisa de campo descrita no capítulo 5, no qual investigamos as tendências filosóficas de estudantes de física em relação ao dRAC no contexto da teoria.

3 Realismo e Antirrealismo Científicos

3.1 Uma das questões fundamentais na Filosofia

Tanto leigos como filósofos profissionais já se puseram às questões: o que é o Real? Como se pode conhecê-lo? Podemos ter segurança daquilo que se sabe?

Não por acaso, investigações filosóficas sobre a possibilidade e fundamentação do conhecimento são antigas, quiçá pioneiras no pensamento humano. A famosa alegoria de Platão¹, ou “Mito da Caverna”, talvez seja um importante exemplo de quão antigas essas investigações são. Ainda que o uso da palavra “Real” seja bastante diversificada, sendo uma “*palavra camaleão*” segundo o filósofo John Lucas (2006, p.219), tomando os traços de quem a tenta compreender, ela é central nos questionamentos acerca do conhecimento do mundo por parte de filósofos e também cientistas.

Como coloca o filósofo Samir Okasha (2002), é importante salientar que esse debate, conhecido como *debate Realismo e Antirrealismo*, pertence a uma área específica da Filosofia, a Metafísica (p.58). O debate que é discutido neste trabalho não é este (embora tenha conexões fortes), que é mais geral, mas sim aquele entre realistas *científicos* e antirrealistas *científicos*², isto é, realistas ou antirrealistas quanto a entidades e processos estudados pela Ciência³. O *debate Realismo e Antirrealismo Científicos* (dRAC) está conectado a quase todos os outros debates ligados à filosofia da ciência, pois toca questões centrais à natureza do conhecimento

¹Platão (428/427 a.C. - 348/347 a.C.), filósofo e matemático grego.

²Estes são chamados às vezes genericamente por instrumentalistas ou fenomenalistas.

³A rigor, na filosofia existem algumas diferenças entre o (Anti) Realismo e o (Anti) Realismo Científico. O Realismo é uma postura mais abrangente, que envolve questionamentos gerais sobre o conhecimento. Já o Realismo Científico, como salientado, limita-se a questionamentos sobre o conhecimento científico. Neste trabalho, quando utilizarmos o termo *Realismo* (ou a alguma forma específica, como Realismo Ontológico, Realismo Epistemológico, Realismo de Entidades ou Realismo de Teorias) estaremos nos referindo ao *Realismo Científico*. Analogamente, quando utilizarmos o termo *realista*, estaremos nos referindo ao *realista científico*.

científico (CHAKRAVARTTY, 2013, p.1).

Os questionamentos expostos no início do capítulo compõem um ponto onde ciência e filosofia se relacionam e se confundem. Afinal, os cientistas, assim como os filósofos, também se perguntam sobre o que é Real, se ele é acessível, entre outras questões. Estudos históricos da física quântica ilustram um conhecido exemplo dessa relação. Admitir ou não a existência real de entidades (como a onda quântica, que seria o referente da função de onda) e ou processos diretamente inobserváveis (como o processo de troca de bósons) pode ser entendido como uma postura científico-filosófica. A Física contemporânea também é testemunha dessa relação, ainda que esta seja muitas vezes desprezada pelo espírito científico pragmatista. De certa forma, se um físico teórico atual crê, por exemplo, na existência de supercordas (entidade inobservável e sem perspectivas de ser observada diretamente) está de certa forma não só fazendo Física mas também Metafísica, ainda que não saiba ou não queira admitir.

De fato, muitos outros exemplos de debates sobre interpretações realistas e antirrealistas de teorias foram importantes em episódios relevantes da história da ciência: interpretação realista de Copérnico⁴ do modelo heliocentrista de universo e o prefácio instrumentalista de Osiander⁵; o Realismo Metafísico do Espaço por Newton⁶ e o ceticismo de Leibniz⁷; o Realismo sobre átomos de Planck⁸ e o Empirismo sensualista de Mach; as críticas realistas de Einstein à incompletude da Mecânica Quântica e a Interpretação de Copenhagem por Bohr⁹, e diversas outras¹⁰ (MATTHEWS, 1994, p.163-177; NIINILUOTO, 1999, p.144-159).

A importância da Filosofia para a Ciência e vice-versa também se mostra explícita na mente e nos feitos de um dos maiores cientistas do século passado: Albert Einstein. Muitos estudos biográficos, e mesmo sua autobiografia publicada em 1949, revelam um cientista tão íntimo da Filosofia quanto indubitavelmente era da Ciência. Como destaca Stachel (1999), suas leituras filosóficas, desde jovem, em obras de Ernst Mach, Henri Poincaré¹¹, David Hume e outros, foram essenciais à construção de uma nova concepção de Espaço e Tempo, presente em suas teorias relativísticas (*ibid.*, p.267). Schlick¹² (1920), um importante filósofo do início do século

⁴Nicolau Copérnico (1473-1543), astrônomo e matemático polaco.

⁵Andreas Osiander, o Velho (1498-1552), teólogo luterano alemão.

⁶Isaac Newton (1643-1727), matemático, alquimista e teólogo inglês.

⁷Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), filósofo, matemático e diplomático alemão.

⁸Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemão.

⁹Niels Henrik David Bohr (1885-1962), físico dinamarquês.

¹⁰É importante salientar que se tratam de leituras históricas de episódios com base em termos e conceitos atuais.

¹¹Jules Henri Poincaré (1854-1912), matemático, físico e filósofo da ciência francês.

¹²Moritz Schlick (1882-1936), físico e filósofo alemão.

3.1 Uma das questões fundamentais na Filosofia

passado, comparou a importância filosófica das análises de Einstein sobre o tempo e espaço com aquela de Hume caracterizada por suas críticas às noções de causalidade e substância (*ibid.*, p.87). O físico e filósofo francês Michel Paty (1993) também expõe a importância do pensamento filosófico em Einstein, que, embora não tenha criado um sistema filosófico *sui generis*, tornou-se um exemplo marcante de um “cientista-filósofo”.

Sobre a relação entre Ciência e Filosofia, o importante historiador Willian Durant¹³ (1996 [1926]) afirmou:

Filosofia é uma interpretação hipotética do desconhecido (como na metafísica) ou do conhecido de forma inexata (como na ética ou na filosofia política); é a trincheira adiantada no cerco à verdade. Ciência é o território (ocupado) capturado; e por detrás dele ficam as regiões seguras nas quais o conhecimento e a arte constroem o nosso mundo imperfeito e maravilhoso. A filosofia parece estar preparada, perplexa, mas isto é só por que ela deixa os frutos da vitória para suas filhas, as ciências, enquanto ela própria segue adiante, divinamente descontente, em direção ao incerto e ao inexplorado. (p.26)

Nas perspectivas atuais, temos que o “território (ocupado) e capturado” pertencente à Ciência se mostra tão incerto e inexplorado em alguns domínios quanto o rumo da Filosofia. Mas isso não tira a profundidade da citação de Durant, e só mostra na verdade quão mais próximas estão essas áreas quanto pensava o historiador. O não contentamento com o desconhecido é compartilhado tanto pela Filosofia como pela Ciência, ainda que na tentativa de saná-lo cada uma tome alguns caminhos e intuítos bastante diferentes. Essas tentativas, ainda que tenham sido realizadas inúmeras vezes ao longo da história, ficam particularmente evidentes no século XX, que foi palco de uma das maiores disputas entre filósofos da Ciência e cientistas com veias filosóficas. Em parte suscitada pelos importantes desenvolvimentos científicos e tecnológicos da época, mas também por debates iniciados no século XIX, filósofos e cientistas com aspirações realistas e antirrealistas travaram inúmeros conflitos intelectuais acerca de questões metacientíficas. O valor da ciência, a interpretação das teorias, as transformações científicas históricas e temas semelhantes dominaram (e ainda têm seu espaço) muitos círculos filosóficos e acadêmicos.

Como ocorre com outros importantes debates filosóficos, a disputa entre Realismo e Antirrealismo não se finalizou, não está sendo finalizada e nem há perspectivas de que um dia seja. Como afirma o filósofo da ciência finlandês Illkka Niiniluoto (1999):

¹³William James Durant (1885-1981), filósofo, historiador e escritor estadunidense.

[E]nquanto estivermos fazendo filosofia, nenhum consenso final deve ser esperado: o debate do realismo é um de seus problemas eternos, uma vez que nenhum dos vários programas filosóficos pode ser provado ou refutado por qualquer argumento *pro* ou *contra*. (p.v)

Os debates entre as várias interpretações do formalismo matemático da Mecânica Quântica compõem um exemplo tanto da relação entre ciência e filosofia como do caráter “eterno” destes tipos de debates filosóficos. Basicamente, os principais pontos de divergências entre interpretações da física quântica centram-se sobre a *possibilidade* (ou não) de se inferir sobre processos e entidades inobserváveis *durante* um experimento quântico, e o processo conhecido como redução do pacote de onda. O filósofo da ciência Osvaldo Pessoa Jr (2006) ilustra e discute algumas interpretações da teoria (mais especificamente, de seu formalismo matemático mínimo), mostrando que, partindo de um mesmo experimento (interferências em um interferômetro de Mach-Zender), podemos propor várias explicações coerentes e equivalentes quanto aos resultados experimentais finais. Mesmo com os desdobramentos atuais da teoria quântica, especialmente quanto aos experimentos inspirados pela análise de John Bell¹⁴ (referente às desigualdades de Bell), o debate não só persiste como revigora-se.

Não é somente na física quântica que o debate acerca da realidade de entidades e processos surge. Filósofos (e também cientistas sensíveis a estas questões) engendram discussões parecidas sobre os fundamentos da mecânica, do eletromagnetismo, da termodinâmica, e em especial, das teorias relativísticas. Além destas, as teorias de supercordas também têm sido alvo de debates semelhantes, o que deu início ao que ficou conhecido como “The String Wars” (Guerra das cordas) (PESSOA JR, 2011c).

Um fato importante e interessante é que esse debate aparentemente exclusivo a filósofos (ou cientistas sensíveis a estes temas) transcende a própria Filosofia e a Ciência, e surge de formas peculiares em campos como história, sociologia, economia e, especialmente, na educação, seja em nível de pesquisa como em sala de aula. Em geral, fora do contexto científico, raramente se vê necessidade em crer em objetos que não podem ser observados e que são difíceis de conceber com base apenas no senso comum, que é o caso dos objetos científicos. Assim, estudantes que se iniciam na educação científica muitas vezes se veem na tarefa de lidar com e compreender propriedades de objetos e processos científicos inobserváveis, o que, aliado à tendência ao ceticismo ao que é inobservável, não raro gera uma inércia ao ensino das disciplinas científicas.

Um exemplo em que esse tipo de debate vai além da Filosofia e da Ciência é o das discussões

¹⁴John S. Bell (1928-1990), físico norte-irlandês.

3.1 Uma das questões fundamentais na Filosofia

sobre os fundamentos das ciências psicológicas. Debates sobre a existência de entidades psíquicas como a libido, o superego e a transferência freudiana efervescem (HACKING, 2012 [1983], p.85). Além disso, esses debates epistemológicos também se manifestam de certa maneira além do domínio acadêmico, como o filósofo Christopher Norris (2007 [2005]) exemplifica. Na tentativa de justificar a invasão no Iraque, o Secretário de Defesa dos EUA, Donald Rumsfeld insistiu constantemente na existência de armas de destruição em massa em território iraquiano. A descrença na existência destes “aparatos inobserváveis” para grande parte da população mundial gerou muita desconfiança quanto ao discurso do secretário. Frente a isto, Rumsfeld deu a seguinte declaração em fevereiro de 2003 (*apud ibid*), p.31):

Existem coisas que nós sabemos que sabemos. Também sabemos que existem conhecidos que são desconhecidos; ou seja, sabemos que existem coisas que não sabemos; mas existem também desconhecidos que são desconhecidos - aquilo que nós não sabemos que não sabemos.

Se questionarmos essas afirmações de forma crítica, racional e sistemática (Sabemos que sabemos? Sabemos o que não sabemos?), estaremos fazendo metafísica, mesmo tendo como pano de fundo outras dimensões (ética, política, religiosa, etc). É claro que, quando se discute no contexto do conhecimento científico, o debate toma níveis de complexidade específicos, bem diferentes do exemplo acima. Contudo, este serve-nos para mostrar que um dos ímpetus primordiais do debate (o questionamento sobre a existência daquilo que não se observa) está presente numa atitude que não é exclusiva de filósofos e cientistas.

Mesmo sem uma demonstração mais significativa, é sensato afirmar que uma das essências do dRAC não se manifesta somente em círculos de filósofos de poltrona, mas também de certa forma na vida de muitos de nós em diferentes circunstâncias e de diferentes maneiras. E o mais importante, ele se manifesta em estudantes de física que muitas vezes se veem diante de um discurso do professor sobre entidades e processos que ele não pode observar diretamente em seu dia-a-dia. Matthews (1994) fornece um exemplo disto:

Uma ocorrência comum nas aulas de ciências é uma criança perguntar: Se ninguém viu átomos, como nós podemos construir imagens deles? Essa criança está levantando um dos mais interessantes debates da filosofia da ciência: a relação entre evidências e modelos, e entre modelos e realidade. Bons professores de ciências devem encorajar tais questões e serem capazes de prover respostas satisfatórias, ou sugestões para questões posteriores. Responder “eu não sei” ou “porque está no livro” é desperdiçar uma oportunidade de introduzir os estudantes às ricas dimensões metodológicas da ciência (*ibid.*, p.4).

Neste capítulo pretendemos ilustrar de forma branda como esse debate se dá no campo acadêmico. Não se pretende de maneira alguma esgotar discussões filosóficas tão antigas, ricas e complexas em poucas páginas. Pretende-se, pelo contrário, um estudo panorâmico que subsidie e fundamente as discussões nos capítulos seguintes.

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

“Realismo” é uma palavra que, usada sem contexto específico, pode trazer inúmeros significados diferentes. Assim como “Real”, “Realismo” é também uma palavra camaleão, tendo conotações diferentes para cada estilo de pensamento de cada filósofo ou cientista. Para compreendê-la melhor em seus diferentes usos, iremos elencar algumas categorias de Realismo, tendo como referenciais Niiniluoto (1999) e Hacking (2012 [1983]), que elaboraram importantes obras sobre o assunto. Essas categorias foram usadas nas discussões conceituais assim como na pesquisa de campo descrita no capítulo 5¹⁵. Tanto as diversas formas de Realismo como as de Antirrealismo podem ser mais bem compreendidas utilizando conceitos básicos de quatro dimensões da Filosofia: dimensão ontológica (ou metafísica), dimensão epistemológica, dimensão semântica e dimensão axiológica¹⁶.

Em poucas palavras:

Ontologia¹⁷ estuda a natureza da realidade, especialmente problemas concernentes à existência. Semântica refere-se à relação entre linguagem e realidade. Epistemologia investiga a possibilidade, a fonte, a natureza e o alcance do conhecimento humano. A questão dos objetivos da investigação científica é um dos temas da axiologia (NIINILUOTO, 1999, p.1).

Resumidamente, uma postura ontológica refere-se à crença (ou não) da existência de um objeto, uma postura semântica refere-se à crença (ou não) de que se pode interpretar literalmente determinadas asserções teóricas, uma postura epistemológica refere-se à crença (ou não) da possibilidade de se conhecer determinado algo, e uma postura axiológica refere-se à crença (ou

¹⁵Para os fins deste trabalho, entendemos as posturas realistas e antirrealistas como “crenças” e não como “atitudes”. Sobre essa distinção, ver Crasnow (2000).

¹⁶Existem ainda outras dimensões do debate que não foram mencionadas. Ver primeiro capítulo de Niiniluoto (1999).

¹⁷Tomando Ontologia enquanto estudo do *ser*, é importante salientar que existem várias disposições do *ser*: *Substância, Atributo* (qualidade ou propriedade), *Relação, Universal, Particular, Poder Causal*, entre outros. Estaria fora das competências deste trabalho discutir cada uma destas disposições, tendo em vista que cada uma remonta a um longa história de debates cheios de concepções bastante distintas e específicas.

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

não) de que existe um valor a ser dado a determinados empreendimentos. Essas crenças podem ser entendidas como relativamente independentes (*ibid*, p.2), de forma que se pode ter várias combinações entre elas.

Uma forma de diferenciar essas crenças é por meio das questões fundamentais que cada uma acarreta (*idem*):

[Realismo] *Ontológico*: Quais entidades são reais? Existe um mundo externo independente do pensamento?¹⁸

[Realismo] *Semântico*: A verdade é uma relação objetiva entre linguagem e mundo?

[Realismo] *Epistemológico*: O conhecimento acerca do mundo é possível?

[Realismo] *Axiológico*: A verdade é um dos objetivos da investigação científica?

Ainda que estas questões apresentem imprecisões (por exemplo, falta de especificação quanto à definição ou teoria de verdade em questão), elas podem ajudar a entender um pouco melhor as diferentes posturas presentes no debate. Neste trabalho usaremos somente três das categorias apresentadas por Niiniluoto (*idem*): *Realismo* (ou *Antirrealismo*) *Ontológico* (*de entidades e processos científicos*), *Realismo* (ou *Antirrealismo*) *Epistemológico* e *Realismo* (ou *Antirrealismo*) *Axiológico*. Também adotaremos a divisão entre *Realismo de Entidades* e *Realismo de Teorias* feita por Hacking (2012 [1983]). Ele as define como:

O *realismo de entidades* afirma que muitas entidades teóricas realmente existem. O antirrealismo de entidades nega isso, dizendo tratar-se de ficções, de construções lógicas, ou de partes do instrumento intelectual que utilizamos para raciocinar sobre o mundo. De forma menos dogmática, esse antirrealismo alega, pelo menos, que não temos e não podemos ter razões suficientes para supor que as entidades em questão não são fictícias. Elas até podem existir, mas não é necessário que assumamos isso de modo a podermos compreender o mundo. (...)

O *realismo de teorias* diz que as teorias científicas, se verdadeiras ou falsas, não dependem do que sabemos: o objetivo da ciência é a verdade, e a verdade é como o mundo é (...). O antirrealismo de teorias diz que as teorias podem ser, na melhor das hipóteses, justificadas, adequadas, úteis, aceitáveis, mas não críveis, e pouco mais além disso (p.88-89).

¹⁸É possível notar aqui duas dimensões de Realismo Ontológico: um acerca da existência do mundo exterior, e outro acerca da existência de entidades e processos inobserváveis. Como se procurará explicitar ainda neste capítulo, iremos considerar Realismo Ontológico como aquele referente apenas à existência de entidades e processos científicos inobserváveis. Como será comentado posteriormente, adotamos que ambos os realistas científicos e antirrealistas científicos consideram a tese da existência do mundo exterior, embora discordem sobre sua acessibilidade ou cognoscibilidade.

Pode-se notar que o Realismo de Entidades (no sentido de Hacking) é um Realismo Ontológico de entidades e processos inobserváveis (no sentido de Niiniluoto), e que o Realismo de Teorias (no sentido de Hacking) é um Realismo Axiológico (no sentido de Niiniluoto, dada a menção explícita sobre o objetivo da ciência por Hacking) e também um Realismo Epistemológico (no sentido de Niiniluoto, sendo que a verdade seria alcançável por meio das teorias científicas).

Como exemplo de Antirrealismo de Entidades, tem-se o Descritivismo, postura na qual se admite que todos os termos teóricos (referentes a observáveis e também aos inobserváveis) são traduzíveis na linguagem observacional (NIINILUOTO, 1999, p.12), de forma que não precisamos necessariamente acreditar de forma realista neles. Já o Antirrealismo de Teorias pode ser entendido como uma forma de Instrumentalismo (de teorias), postura na qual as teorias têm caráter puramente de idealização, e seus conceitos e símbolos são tratados como instrumentos sem interpretação física (*idem*). Isto é, as teorias não podem ser ditas verdadeiras (a verdade não é objetivo da Ciência), e também não se pode dizer que elas dizem de fato algo sobre o mundo, sendo no máximo úteis.

Segundo Hacking (2012 [1983], p.88), é possível, considerando sua distinção entre Realismos, termos posturas híbridas. Isto é, é possível ser realista de entidades e antirrealista de teorias ou ser realista de teorias e antirrealista de entidades. Niiniluoto (1999, p.12) chama estas posturas de “meio-Realismo”. Exemplos de Hacking são Bertrand Russell¹⁹ (realista de teorias e antirrealista de entidades) e Nancy Cartwright²⁰ (realista de entidades e antirrealista de teorias). Niiniluoto (1999, p.12-13) cita como exemplos de “meio-Realismo” Ernan McMullin²¹ (na denominação de Hacking, realista de entidades e antirrealista de teorias) e John Worrall²² (realista de teorias e antirrealista de entidades).

O que é Realismo Científico? O filósofo da ciência Bas van Fraassen (2007 [1980]), conhecido por sua postura antirrealista dentro do debate do Realismo, fornece um exemplo do que seria uma concepção ingênua desta postura: “o retrato que a ciência nos dá do mundo é verdadeiro, fidedigno nos detalhes, e as entidades postuladas na ciência realmente existem; os avanços da ciência são descobertas, e não invenções” (*ibid.*, p.24). Isto é algo próximo do “Realismo do senso comum” de nossas crenças sobre os objetos e processos que nos cercam no

¹⁹Bertrand Arthur William Russell (1872-1970), matemático, filósofo e lógico britânico.

²⁰Nancy Cartwright (1944-), filósofa inglesa.

²¹Ernan McMullin (1924-2011), filósofo da ciência irlandês.

²²John Worrall (1946-), filósofo da ciência inglês.

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

dia-a-dia. Segundo Hesse (2005 [1961]), este tipo de concepção é muito presente nos estágios iniciais da ciência, com descrições diretas de objetos macroscópicos (*ibid.*, p.3). Entretanto, para certos domínios específicos de fenômenos, como aqueles na escala atômica ou em velocidades altíssimas, esse tipo de concepção falha, pois descrições diretas e mesmo observações diretas são limitadas ou mesmo impossíveis. Assim, é preciso definições mais precisas, com o fim de possibilitar a fluidez do debate e evitar confusões desnecessárias.

Niiniluoto (1999, p.4) entende Realismo Científico como uma visão filosófica de mundo, visão esta que traz um sistema de crenças que envolvem de uma maneira ou de outra, o conhecimento científico. Afirmar que uma defesa bem sucedida do Realismo Científico (Crítico) requer encontrar uma combinação plausível de posições ontológicas, epistemológicas, axiológicas, semânticas e também éticas sobre a existência, a possibilidade e a justificação do conhecimento (*idem*).

O filósofo da Ciência Caetano Plastino (1995) exemplifica sete proposições mais precisas que podem fazer parte de uma visão realista da ciência:

- 1) A existência e a natureza dos fatos do mundo não dependem das teorias ou métodos que a ciência utiliza.
- 2) Toda asserção científica, interpretada literalmente, é verdadeira ou falsa.
- 3) O valor-de-verdade de uma asserção científica é determinado pelo mundo. Uma asserção é verdadeira quando mantém uma relação de correspondência com o mundo.
- 4) A ciência procura teorias que façam uma descrição verdadeira (ou aproximadamente verdadeira) do mundo.
- 5) Os termos teóricos preservam sua referência durante as mudanças científicas. As teorias científicas sucessoras incorporam o cerne das teorias precedentes.
- 6) O progresso da ciência consiste num processo convergente de aproximação de uma teoria científica completa e verdadeira.
- 7) Nas ciências maduras, as teorias são aproximadamente verdadeiras e seus termos centrais referem-se a objetos do mundo (*ibid.*, p.9).

Pode-se notar que as quatro dimensões de Niiniluoto (1999) destacadas anteriormente se manifestam de forma subjacente em quase todas as preposições acima. Em primeira aproximação, a dimensão ontológica aparece de forma quase explícita nas proposições 1), 3), 6) e 7), a dimensão semântica em 2), 3), 4), 5) e 7), a dimensão epistemológica em 3), 5) e 6), e a dimensão axiológica em 3) e 4). Fazendo uso destas dimensões, podemos obter de início diferentes combinações de posturas realistas e antirrealistas. As posturas referentes à Epistemologia, à Axiologia e à Ontologia serão definidas, exemplificadas e discutidas nas próximas

subseções, juntamente com as posturas classificadas por Hacking (2012 [1983]) como Realismo de Entidades e Realismo de Teorias.

As posturas antirrealistas normalmente surgem de alguma oposição a algumas das dimensões expostas por Plastino. Isto é, demonstram uma postura de ceticismo ou agnosticismo filosófico quanto a algumas delas, não necessariamente negando-as categoricamente. Porém, conforme será salientado adiante, o ceticismo ou agnosticismo dos antirrealistas científicos são quanto somente a entidades e processos inobserváveis. Ou seja, em geral concordam com os realistas no que tange o “mundo observável” como cadeiras e mesas, porém discordam com eles sobre questões referentes ao “mundo inobservável” como elétrons e quarks. Assim, antes de prosseguir é interessante trazer uma discussão sobre *critérios de realidade* dentro da filosofia da ciência, e também introduzir, de forma sintética, o conceito de *observabilidade*, central no argumento de muitas posturas filosóficas dentro do debate. Muitas diferenças entre posturas filosóficas a serem estudadas podem ser mais bem compreendidas com base nestas duas questões.

3.2.1 Critérios de Realidade e Observabilidade

Ao se discutir sobre a realidade de teorias científicas, assim como da realidade das entidades e processos que estas postulam, é necessário se fazer uso de critérios de realidade. No contexto do cotidiano, o critério de realidade mais utilizado é, de longe, a observabilidade. Contudo, a observabilidade não deixa de apresentar fragilidades (há coisas que vemos por meio de ilusões de óptica que não podemos dizer que são reais no mesmo sentido que objetos materiais). No contexto científico, a observabilidade é um dos critérios de realidade mais fortes (considerando o sentido geral comumente dado ao conceito de observabilidade), mas também se mostra bastante limitado. Observabilidade, segundo alguns filósofos que serão discutidos em seguida, não pode ser confundida com detectabilidade. *Observamos* ou *detectamos elétrons*? Questões como essa são especialmente importantes dentro do dRAC.

Segundo Pessoa Jr (2011d, p.44), podemos extrair ao menos quatro critérios básicos para decidir se um processo ou entidade científica é real. Não são critérios exaustivos, mas dão margem a um primeiro exercício de classificação e, se for o caso, à elaboração de critérios mais precisos. Além disso, foram pensados para objetos individuais. Para conjunto de objetos, assim como processos envolvendo objetos, não necessariamente os critérios de realidade serão os mesmos. Os critérios básicos para objetos individuais são:

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

I) *O objeto deve ser observável.* A observabilidade é um dos critérios mais básicos de realidade, porém, como bem se sabe, ela deve ser adotada de forma crítica tendo-se em mente algumas questões fundamentais. Uma delas é o papel das pré-concepções teóricas no processo de observação. Outra é a distinção entre observações *diretas* e observações *indiretas*, que deve ser levada em conta. Como Pessoa Jr (*idem*) salienta, se uma observação de um objeto é compartilhada, aumentamos a confiança em sua realidade. Mas em geral, tomando o critério da observabilidade isoladamente, podemos concluir (privadamente ou em conjunto) que certas coisas como miragens e arco-íris são reais (no mesmo sentido que objetos materiais), por isso normalmente vinculam-se à observabilidade (no sentido estrito à visão) outros critérios também básicos, como a tateabilidade (que entra no conceito de observabilidade no sentido amplo). A questão da observabilidade será melhor discutida ainda nesta subseção.

II) *O objeto deve ser invariante.* Na física teórica, a capacidade de um objeto permanecer invariante sobre transformações de coordenadas é um bom indício de que ele pode ser considerado real. Como será discutido em um capítulo posterior, a invariância sob Transformações de Lorentz é usada por alguns autores como critério de realidade no contexto da TRE. Esse critério apresenta certa arbitrariedade associada à escolha do tipo de transformações de coordenadas. Com as Transformações de Galileu, por exemplo, as dimensões espaciais de um objeto são invariantes, mesmo a altas velocidades, sendo assim, portanto, consideradas reais. Já com as Transformações de Lorentz, isso deixa de ser verdade, pois a altas velocidades as dimensões espaciais e as durações temporais associadas a eventos deixam de ser invariantes, e não seriam, portanto, reais.

III) *O objeto deve ser concebível.* Se a modelização teórica de um objeto, em geral inobservável, apresenta problemas, tende-se a não caracterizá-lo como real, ou, talvez no máximo como “ferramenta matemática útil”. Esse é o caso de alguns modelos de éter luminífero que surgiram no século XIX, os quais apresentam uma enorme dificuldade de concepção física por exigirem, ao mesmo tempo, características de sólidos e gases. Por outro lado, se um objeto se mostra teoricamente concebível, tanto intuitivamente como matematicamente (por exemplo, um sólido cristalino), isso pode significar que ele corresponda a algo real. E ainda, se ele aparecer em diferentes leis experimentais (e principalmente teóricas), aumentam suas chances de que ele possa corresponder a algo real.

IV) *O objeto deve ser causalmente potente.* A capacidade de um objeto causar efeitos, isto é, ter “poderes causais”, é um indício de que ele corresponda a algo real. Esse é um critério

caro para o filósofo da ciência Ian Hacking, cuja postura será discutida adiante. Na Física, muitas entidades inobserváveis parecem contemplar esse critério (a passagem dos elétrons causam choques elétricos, as oscilações dos campos elétrico e magnético na frequência micro-ondas causam o aquecimento da água, o campo gravitacional causa a tensão no cabo principal dos elevadores), o que aumenta a confiança dos físicos de que elas devem ser mesmo entidades reais. Contudo, a história da ciência mostra que muitas vezes se associou (erroneamente) relações causais a entidades e processos que posteriormente foram abandonadas (como o éter e o flogisto).

Esses critérios, ainda que elementares e frágeis em determinados pontos, compõem a base de conjuntos de critérios mais específicos e poderosos, que podem se mostrar mais precisos quando falamos de alguma teoria em particular. Mas de forma geral, mesmo com suas limitações, a observabilidade tende a ser o critério mais usado, dentro e fora da esfera científica; talvez por esta e outras razões, muitos autores estudaram-na por diversos pontos de vista, procurando suas implicações para a fundamentação do conhecimento científico.

Um desses autores foi o filósofo da ciência Norwood Hanson²³. Influenciado pelo pensamento de Wittgenstein, Hanson foi um dos pioneiros da ideia conhecida por “observação dependente de teorias” (*theory-laden* em inglês), isto é, de que nossas observações não são neutras e sim dependem de nossas pré concepções teóricas. Neste sentido, Hanson (1975 [1958]) defendia o amálgama entre *observação* e *interpretação* (*ibid.*, p.127). A ideia de “observação neutra”, criticada por Hanson, era algo comum em algumas correntes positivistas do início do século passado. Nestas correntes havia uma notável diferenciação entre observação e interpretação, sendo que a observação se daria “naturalmente”, isto é, os dados coletados de forma correta e precisa seriam “puros”. Ainda nesta concepção, dois “observadores científicos ideais” poderiam fazer a mesma observação, independente de seus valores e concepções prévias individuais (*ibid.*, p.129).

Todavia, Hanson defende que é ininteligível haver observação destituída de pré concepções teóricas. Ainda que, segundo Hanson, em algum nível fisiológico elementar possamos *ver* uma mesma coisa, nada garante que *observamos* (ou, *observamos-interpretamos*) a mesma coisa. Podemos usar um exemplo banal para ilustrar essa questão. No debate entre geocentristas e heliocentristas no século XVI, tanto o geocentrista como o heliocentrista *viam* o Sol nascer do horizonte no amanhecer e morrer, horas mais tarde, no entardecer. Contudo, o que o geocen-

²³Norwood Russell Hanson (1924-1967), filósofo da ciência estadunidense.

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

trista *observava-interpretava* com isso era que o Sol girava ao redor da Terra, enquanto que o heliocentrista *observava-interpretava* com isso que era a Terra que girava ao redor do Sol. Hanson coloca assim um papel central na linguagem de observação, sendo que, ainda que em tese nada óptico ou sensitivo se altere, nossas pré concepções teóricas podem alterar a “*estrutura daquilo que se observa*” (*ibid.*, p.132).

Na história da ciência, um dos exemplos mais conhecidos envolvendo a questão da observabilidade é aquele relativo às observações por telescópio de Galileu²⁴. O “argumento das montanhas lunares” de Galileu e sua recepção entre os estudiosos da época foram estudados por Feyerabend (2007 [1975]), que salienta em sua obra aspectos interessantes que muitas vezes fogem das histórias simplistas do episódio. Entre eles, está o fato de que a concepção aristotélica de que nossos sentidos estão “familiarizados” com a aparência dos “objetos sublunares” era bastante forte em grande parte do grupo de estudiosos dos fenômenos astronômicos da época (*ibid.*, p.131-5). Sendo assim, à época era “natural” se argumentar que observar corpos extralunares com instrumentos mediadores (como o telescópio refrator) não era algo razoável, por razões de princípio (baseadas na concepção aristotélica) e também por razões empíricas (os telescópios refratores da época apresentam fortes aberrações ópticas que levantavam dúvidas sobre a fidelidade daquilo que se enxergava por suas lentes)²⁵. Assim, à época a “observação” de Galileu de que havia montanhas lunares não procedia, pois isto não era entendido propriamente como uma observação. Isto é, a validade da observabilidade humana (direta ou indireta, como era o caso do uso de instrumentos ópticos) era tributária da posição do objeto ou processo no universo aristotélico e sua composição²⁶.

²⁴Galileu Galilei (1564-1642), astrônomo, matemático e filósofo italiano.

²⁵A noção daquilo que hoje chamaríamos de “experiência científica”, dentro da concepção aristotélica, se limitava à observar fenômenos naturais sem interferir neles. Com as obras de Francis Bacon e outros durante os séculos XV e XVI, tem-se uma outra concepção, na qual (dito de forma simplista) se é preciso “violentar” a natureza, isto é, interferir nos fenômenos, manuseá-los, dominá-los. Por essa e outras razões, Bacon é conhecido como uma espécie de “precursor” da era industrial, sendo considerado por alguns como o “pai” da filosofia moderna. As experiências com a bomba de vácuo de Robert Boyle (1627-1691) compõem um exemplo da “violentação” da natureza. Sobre o papel da experiência em Bacon e Boyle, ver Zaterka (2006).

²⁶Os desdobramentos da Física Moderna, com a introdução das teorias relativísticas e das teorias quânticas fomentaram (e ainda fomentam) as discussões sobre observabilidade. A questão da existência ou não dos “observáveis” em Mecânica Quântica compõe um das pautas centrais do debate entre interpretações realistas e antirrealistas da teoria. No contexto da relatividade especial, surgiu uma interessante discussão sobre a observabilidade do fenômeno de contração dos comprimentos. Para certas geometrias de objetos, e também para ângulos sólidos de visão suficientemente pequenos, a contração relativística é *mensurável* porém não (opticamente) *observável*, ou

Tomando os desdobramentos atuais do debate sobre observabilidade, muitos filósofos tentam delinear o conceito e suas implicações, sendo um deles van Fraassen (2007 [1980]). Para o filósofo, antes de tudo, o termo “observável” “*classifica entidades postuladas (que podem ou não existir)*” (*ibid.*, p.38). Cavalos-alados e aviões são observáveis, ainda que tenhamos muito mais certeza da existência dos últimos do que dos primeiros. A questão torna-se complicada, do ponto de vista filosófico, quando se vai aos limites (macroscópicos e microscópicos) da observação. Sumariamente, para van Fraassen “observável” significa “diretamente observável”, isto é, aquilo que a princípio pode ser *diretamente perceptível* sem o uso de recursos mediadores, como instrumentos ópticos. Esta definição é bastante próxima daquela do filósofo Anjan Chakravartty (2013, p.2), para quem “*observável é aquilo que pode, em condições favoráveis, ser percebido usando nossos sentidos sem auxílios [unaided senses]*”.

Sendo assim, para van Fraassen as estrelas distantes, embora não observáveis a olho nu, são obviamente observáveis se alguma pessoa estiver próxima a elas. Uma molécula de ADN, para van Fraassen, não é observável, pois a princípio ninguém pode observá-la diretamente sem a ajuda de potentes microscópios e outros recursos. O mesmo vale para os elétrons, as partículas elementares e outras entidades científicas diretamente inobserváveis. Por outro lado, van Fraassen salienta as diferenças entre observabilidade e detectabilidade: “[o] *cálculo da massa de uma partícula a partir de deflexão de sua trajetória em um campo de força conhecido não é uma observação dessa massa*” (VAN FRAASSEN, 2007 [1980], p.38). Assim, embora algumas entidades científicas como elétrons e nêutrons sejam detectáveis, não são diretamente observáveis na concepção de van Fraassen. Ainda sobre esta distinção, van Fraassen utiliza o exemplo da detecção de partículas em câmaras de bolhas:

Dar uma olhada nas luas de Júpiter através de um telescópio me parece ser um caso claro de observação, uma vez que, sem dúvida, os astronautas vão ser capazes de vê-las também de perto. Mas a suposta observação de micropartículas em uma câmara de vapor me parece um caso claramente diferente se estiver correta nossa teoria sobre o que ali acontece. A teoria diz que se uma partícula carregada atravessa uma câmara preenchida com vapor saturado, alguns átomos nas vizinhanças de sua trajetória são ionizados. Se esse vapor é descomprimido e, portanto, se se torna supersaturado, ele condensa em gotículas onde estão os íons, criando assim a trajetória da partícula. A linha cinza-prata resultante é similar (físicamente, assim como em aparência) à trilha de vapor deixada no céu quando um jato passa. Suponhamos que eu aponte tal trilha e diga: “Olhe, lá está um jato!”. Alguém poderia dizer: “Vejo a trilha de vapor, mas onde está o jato?”. Então, eu responderia: “Olhe

não distinguível do formato original do objeto (para alguns casos, o objeto aparenta visualmente uma rotação). Ver Terrel (1959), Penrose (1958) e Ostermann e Ricci (2002).

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

logo à frente da trilha,... lá! Você o vê?”. Ora, no caso da câmara de vapor, essa resposta não é possível. Assim, apesar de ser a partícula detectada por meio da câmara de vapor, e essa detecção estar baseada em observação, claramente, esse não é o caso de estar a partícula sendo observada (*ibid.*, p.41).

Está claro que a noção de observabilidade para van Fraassen é, em certo nível, “antropomórfica”, como o próprio autor coloca (*ibid.*, p.44): o “observável” seria “observável-para-nós”. Isso caracteriza em parte sua postura (antirrealista), uma vez que parece ser mais próprio de posturas realistas admitir a existência de coisas sem se limitar a “parâmetros humanos”. Por outro lado, essa não parece ser a noção de observabilidade utilizada pelos cientistas de forma geral. Ciente desta “carga antropomórfica” em sua noção de observabilidade, van Fraassen admite então que para ele observabilidade não é um critério central para a existência de entidades científicas (*ibid.*, p.45).

Neste trabalho, quando utilizarmos as noções “observável”, “inobservável” e similares, estaremos utilizando a noção de observabilidade de van Fraassen. Naturalmente, van Fraassen faz uso desta noção com o fim de defender sua própria postura (como será discutido sucintamente em subseção posterior). Contudo, mesmo considerando que essa noção não seja absoluta (no sentido de não conter fragilidades), e que se possa mostrar incompatível com algumas posturas, e ainda que seja demasiada “antropomórfica”, iremos utilizá-la para fins organizacionais, isto é, com o objetivo de caracterizar e diferenciar diferentes posturas realistas e antirrealistas.

É importante salientar que, embora usemos sua concepção de observabilidade, isso não significa que concordemos com a postura de van Fraassen. Usando a fundo sua concepção de observabilidade além do contexto científico, somos obrigados a concluir, entre outras coisas, que arco-íris são “alucinações coletivas”. Por essa razão, utilizaremos-la somente no contexto do conhecimento científico, para fins organizacionais na exposição de diferentes posturas filosóficas, sendo que não a estenderemos para além disto.

Resumindo, neste trabalho asserções do tipo “X é observável” devem ser entendidas como “X é *diretamente* observável (no sentido de van Fraassen)”. Analogamente, asserções do tipo “X é inobservável” devem ser entendidas como “X é *diretamente* inobservável (no sentido de van Fraassen)”.

3.2.2 (Anti) Realismo Ontológico e (Anti) Realismo de Entidades

A forma mais imediata de Realismo é aquela referente à crença na existência da “parte observável” do mundo exterior independentemente de nós (isto é, a crença na existência independente da parte do mundo que experienciamos diretamente). Essa crença, que podemos chamar de *Realismo Ontológico do Mundo Exterior*, é compartilhada por quase todos os realistas científicos e também os antirrealistas científicos, conforme afirma Niiniluoto (1999, p.37). Em geral, é sensato imaginar que praticamente todos os cientistas têm esta crença. A discordâncias existem quanto às “partes inobserváveis” deste mundo exterior. No contexto da ciência, estas partes inobserváveis seriam as entidades e processos científicos, como espaço-tempo, elétrons, quarks, troca de bósons entre outros.

Podemos entender a crença na existência objetiva de entidades inobserváveis e processos científicos inobserváveis como um *Realismo de Entidades*, isto é, um *Realismo Ontológico de Entidades e Processos Científicos Inobserváveis*. Daqui em diante, consideraremos que:

$$RE \approx RO,$$

sendo RE *Realismo de Entidades*, e RO *Realismo Ontológico de Entidades e Processos Inobserváveis*²⁷. Assim, cientistas realistas de entidades podem acreditar na existência de elétrons, quarks, orbitais moleculares, deformações do espaço-tempo entre outros, mesmo sem observá-los diretamente.

Um exemplo homônimo é o *Realismo de Entidades* de Ian Hacking (2012 [1983]). Para Hacking, se podemos manipular experimentalmente entidades tais como elétrons e pósitrons utilizando-as para obter um resultado a respeito de outro fenômeno, então estas entidades são reais. Em suas próprias palavras, “*se você pode bombardeá-los, então eles são reais*” (*ibid.*, p.84). Isto é, Hacking utiliza o poder causal dessas entidades (elétrons, pósitrons e outros) como critério de realidade mais relevante. Entidades sem poder causal semelhante, como os quarks, não atendem ao critério de Hacking, como o próprio filósofo salienta (*idem*). Como afirma Ribeiro (2009) “*para Ian Hacking, a física experimental constitui uma prova - a mais forte - em favor do realismo [de entidades]*” (*ibid.*, p.44). Seu critério de realidade é então resultado de uma prática, sendo por isso chamada de Filosofia Experimental (*idem*).

Em oposição ao Realismo Ontológico, o Antirrealismo Ontológico não é necessariamente

²⁷Ao longo deste trabalho, usaremos variações deste termo, como Realismo de Processos Inobserváveis. O sentido, contudo, continua em todos os casos o mesmo.

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

um Idealismo Ontológico, isto é, a negação da existência objetiva e independente dos objetos do mundo ou do próprio mundo (PESSOA JR, 2011b, p.1)²⁸. O bispo e filósofo irlandês George Berkeley²⁹, cuja máxima era *esse est percipi* (ser é ser percebido), poderia ser classificado hoje como antirrealista ontológico. Porém, na Filosofia da Ciência, o Antirrealismo Ontológico em geral é adotado para entidades ou processos inobserváveis (*Antirrealismo Ontológico de Entidades e Processos Científicos Inobserváveis*). Isto é, no contexto do conhecimento científico esta postura é um *Antirrealismo de Entidades*, ou, a descrença sobre a existência de entidades e processos ou a suspensão de juízo sobre a questão.

A suspensão de juízo foi adotada por alguns positivistas lógicos do início do século XX, como Moritz Schlick (1980 [1932]). Para este, a doutrina do Positivismo Lógico não negava a existência de um mundo externo e seus objetos, pois isso seria uma proposição tão metafísica quanto aceitá-la³⁰ (p.63). Isto é, não o nega mas também não o aceita (como o realista faz), e sim suspende seu juízo sobre a questão por ser destituída de sentido³¹ (NIINILUOTO, 1999, p.10). Como exemplo, a postura de van Fraassen, chamada pelo próprio autor de *Empirismo Construtivo*, caracteriza-se entre outros aspectos pela suspensão de juízo quanto à existência de entidades inobserváveis. Ao contrário dos realistas de entidades, Van Fraassen (2007[1980]) questiona o argumento da inferência da melhor explicação para o sucesso empírico, limitando sua aplicabilidade somente a entidades e processos observáveis (*ibid.*, p.46). Postura semelhante é a de filósofos como Ernst Mach, Pierre Duhem e Henri Poincaré, chamada por vezes de *Instrumentalismo* (ou melhor, *Instrumentalismo de Entidades*), pois embora eles admitissem entidades e processos inobserváveis como conceitos auxiliares nas teorias científicas, tratavam-

²⁸A extensão natural dessa postura é aquela que afirma que o mundo e seus objetos são criações individuais de um ser pensante, chamada de Solipsismo. Segundo Grégoire (1954), essa tese jamais foi defendida com seriedade por ninguém (*ibid.*, p.49).

²⁹George Berkeley (1685-1753), filósofo irlandês.

³⁰Schlick (1980 [1932]), na mesma obra, defende que o Positivismo Lógico não contradiz o que chama de Realismo Empírico (p.33). De fato, Schlick chamou de *Realismo Crítico* a (sua) postura que consiste na crença de que não podemos conhecer o real em si mesmo, e que a realidade de algo se resume à questão científica de saber se uma hipótese resiste a tentativas de refutação empírica.

³¹Uma das principais influências dos positivistas lógicos (principalmente do Círculo de Viena) foi a obra *Tractatus Logico-Philosophicus* de Wittgenstein, publicada em 1921. Nesta e principalmente em obras posteriores, Wittgenstein argumenta que proposições sobre a existência do mundo exterior independente não podem ser provadas. Ela (a existência do mundo) é na verdade um princípio fundamental que compõe uma visão de mundo, que possibilita por sua vez averiguar a “verdade” e a “falsidade” de outras proposições. Por isso, segundo Niiniluoto (1999, p.38) é enganoso, para Wittgenstein, afirmar que se *sabe* da existência do mundo exterior independente.

nas muitas vezes como “ficções úteis” sem interpretação física direta (NIINILUOTO, 1999, p.12).

Nas últimas décadas, o filósofo Hilary Putnam elaborou aquilo que o próprio autor chamou de *Realismo Interno*. Essa postura tem características bastante peculiares e, quando levada ao contexto da Ciência, permanece de certa forma próxima a um *Antirrealismo de Entidades* (embora o autor a chame de “Realismo”). Segundo Plastino (2000), Putnam propõe que abandonemos a dicotomia entre o “mundo-em-si” e aquilo que falamos ou pensamos dele (o que em si não é uma negação da existência do “mundo-em-si”), e afirma que os realistas não sabem do que falam quando dizem sobre as “coisas-em-si” (*ibid.*, p.80). Putnam adere à tese da *relatividade conceitual*, isto é, de que “a verdade e a referência de nossas expressões linguísticas são relativas ao esquema conceitual adotado, ou seja, são internas à perspectiva assumida” (*idem*). Em outras palavras, o fenômeno da relatividade conceitual ocorre, segundo Putnam, quando uma descrição verdadeira dentro de uma perspectiva torna-se falsa quando dentro de outra (*ibid.*, p.79). Putnam assim abandona a ideia de verdade como correspondência ao mundo externo e suas entidades, e a “verdade” e “realidade” tornam-se conceitos com referência interna. De certa forma, para ele o que é “real” e “verdadeiro” depende então de uma perspectiva conceitual, o que implicaria que o “mundo externo” no qual se apoia o realista ontológico ficaria em segunda mão.

3.2.3 (Anti) Realismo Epistemológico, (Anti) Realismo Axiológico e (Anti) Realismo de Teorias

Realismo Epistemológico é a crença de que o conhecimento sobre o mundo é possível, isto é, que as estruturas causais do mundo são inteligíveis. Segundo Niiniluoto (1999), o realista epistemológico afirmaria que “é possível obter conhecimento sobre a realidade independente da mente³²” (*ibid.*, p.79), o que implica então no *Realismo Ontológico do Mundo Exterior* de antemão. Essa última crença, como argumentamos na seção anterior, é compartilhada por realistas e antirrealistas científicos e por provavelmente quase todos os cientistas.

Realismo Axiológico é a crença de que a verdade é o objetivo principal da Ciência (*ibid.*, p.10). Algumas teses classificadas como Pragmatismo podem ser entendidas como correntes antirrealistas axiológicas. Pragmatistas, segundo Niiniluoto (*ibid.*, p.11), substituem o conceito

³²A título de desambiguação, cabe salientar que “independente da mente” refere-se a “realidade” e não “conhecimento”.

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

de “verdadeiro”, caro aos realistas axiológicos, por outros como “verificado”, “provado”, “coerente”, “assertibilidade garantida”, “consensual”, entre outros. As posturas de Kuhn, Laudan e van Fraassen podem ser classificadas de Antirrealismo Axialógico, pois em cada uma se elenca um substituto à verdade (respectivamente: a resolução de “quebra-cabeças”, efetividade com a resolução de problemas, e adequabilidade empírica) (PESSOA JR, 2011a, p.6).

No contexto do conhecimento científico, podemos entender a combinação de *Realismo Epistemológico* e *Realismo Axialógico* como um *Realismo de Teorias*, ou, a crença de que é possível conhecer as entidades e processos científicos inobserváveis por meio de teorias científicas, e que o objetivo da Ciência é que estas teorias sejam verdadeiras. Isto é, consideraremos daqui em diante:

$$RT \approx REp + RA,$$

sendo RT *Realismo de Teorias*, REp *Realismo Epistemológico* e RA *Realismo Axialógico*³³. Entendo-se desta forma, a priori não se impede que existam posturas mistas. Um antirrealista de teorias nega que o objetivo da ciência é a verdade, e que as teorias científicas podem dizer algo sobre a parte inobservável do mundo. Porém, esta mesma pessoa pode ser um realista de entidades, se usar, por exemplo, o critério de Hacking (poder causal) para entidades inobserváveis. Por outro lado, um antirrealista de entidades pode ser realista de teorias, isto é, acreditar que o objetivo da ciência é a verdade e que as teorias científicas podem dizer algo sobre o mundo, sem, contudo, por crédito à existência de entidades e processos inobserváveis.

Na história da filosofia, o Idealismo Transcendental de Kant³⁴, tentativa do filósofo alemão em sintetizar o racionalismo cartesiano com o empirismo da escola inglesa (Hume, Locke³⁵ e outros), pode ser entendido como um exemplo de Antirrealismo Epistemológico. Kant distinguia aquilo que chamava de “domínio fenomênico” (os fenômenos) do “domínio noumênico” (das coisas-em-si). Só teríamos acesso aos fenômenos, e de forma mediada pelas chamadas categorias de pensamento *a priori* (como a causalidade, e as noções de Espaço e Tempo inspiradas na doutrina newtoniana). A coisa-em-si “*deve sempre permanecer desconhecida de nós*” (KANT *apud* NIINILUOTO, 1999, p.88). Isto é, Kant permanecia um realista ontológico acerca do mundo, mas era antirrealista epistemológico por negar que o conhecimento sobre as coisas-em-si seria possível (*ibid.*, p.89). Como comenta Niiniluoto, a influência de Kant na filosofia moderna foi enorme, principalmente nas correntes filosóficas alemãs dos séculos XIX

³³A sigla RT será utilizada no capítulo 5 no sentido descrito no texto

³⁴Immanuel Kant (1724-1804), filósofo prussiano.

³⁵John Locke (1632-1704), filósofo inglês.

e XX, incentivando de forma positiva ou negativa filósofos como Mach e Cassirer³⁶ (*idem*). Se fôssemos traduzir a postura de Kant no contexto do conhecimento científico, poderíamos entender que um “cientista kantiano” acreditaria na existência de “objetos-em-si” científicos (realista de entidades), mas negaria que podemos os conhecer (ou conhecer suas características mais íntimas) de forma definitiva (antirrealismo de teorias) (*ibid.*, p.88-89).

No contexto da Ciência, um dos tipos de Realismo de Teorias mais conhecido é aquilo que é conhecido como *Realismo Convergente*. Realistas deste tipo não defendem de forma ingênua que o conhecimento científico atual é verdadeiro, mas que sua evolução de nossas teorias científicas “tende” à verdade, isto é, no limite, o nossas teorias científicas serão verdadeiras. Como aponta Lucas (2006, p.223), por mais que o conhecimento atual sobre o mundo seja robusto, realistas convergentes atribuem-lhe sempre um grau de corrigibilidade (a que pode afetar a crença realista sobre entidades). A postura de Karl Popper, que defendia que a Ciência tende a alcançar a verdade por meio da falsificação de teorias (CHALMERS, 1993, p.64), pode ser entendida como um exemplo de Realismo Convergente.

Uma corrente que também pode ser entendida como um Realismo de Teorias é conhecida como *Realismo Estrutural*. Postura atribuída a Poincaré e retomada décadas mais tarde pelo filósofo John Worrall, o Realismo Estrutural se caracteriza por um comprometimento não com a “carga ontológica” das teorias, mas sim às suas “estruturas matemáticas”, que parecem permanecer (diferentemente dos conceitos vinculados a elas) nos períodos de transição de ideias científicas. Worrall (1994), ciente de que o sucesso empírico das teorias atuais não pode ser considerado como argumento decisivo ao Realismo Científico, usa como exemplo a teoria do éter arrastado de Fresnel³⁷ para argumentar a favor de um comprometimento com as estruturas matemáticas e não com a ontologia das teorias (*ibid.*, p.336). Worrall argumenta que, ainda que a teoria de Fresnel esteja incorreta, ela seria “*estruturalmente correta*” (*ibid.*, p.340), uma vez que sua estrutura formal (mas não seu “conteúdo ontológico”) foi carregada pela teoria eletrodinâmica de Maxwell³⁸. Hoje, embora os físicos de uma forma geral não falem em éter, utilizam as equações atribuídas a Fresnel e Maxwell. Por fim, Worrall advoga que há progresso do conhecimento científico, mas no nível estrutural e não no ontológico (*ibid.*, p.341), isto é,

³⁶Ernst Cassirer (1874-1945), filósofo alemão.

³⁷Augustin Jean Fresnel (1788-1827), matemático francês.

³⁸James Clerk Maxwell (1831-1879), físico e matemático escocês. Segundo Pessoa Jr (2011e, p.42), Maxwell teria escrito em 1856 um trabalho de título “Analogias na Natureza”, no qual concebe uma postura filosófica muito próxima ao Realismo Estrutural, inspirado nas ideias do filósofo Sir William Hamilton (1788-1856).

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

não adere a um Realismo de Entidades.

Uma forma de Antirrealismo de Teorias já citada é aquela na qual se suspende juízo sobre a possibilidade de se conhecer o que está além do imediato, ou diretamente observável. Em especial, aquilo que é conhecido como *Operacionalismo Epistemológico* se caracteriza por evitar questões indecidíveis, proposições não testáveis e asserções sobre entidades inobserváveis (MARTINS, 1981, p.103). Conforme se discutirá em capítulo posterior, segundo alguns historiadores e filósofos, esta teria sido a postura de Einstein em 1905, o que gera controvérsia entre especialistas da história das teorias relativísticas.

Outro exemplo de Antirrealismo de Teorias é a postura da filósofa Nancy Cartwright. Assim como Hacking, Cartwright defende o Realismo de Entidades (NIINILUOTO, 1999, p.139), mas nega que as leis fundamentais e teorias da física sejam (ou possam em algum momento ser) verdadeiras. Para Cartwright, essas leis “mentem” sobre a natureza das entidades, e relação de verdade só pode ser estabelecida entre as leis e os modelos construídos, e não entre as leis e os referentes no mundo (*idem*). Dessa forma, pode-se entender que Cartwright defende uma postura mista, sendo realista de entidades mas antirrealista de teorias.

A postura historicista de Thomas Kuhn pode ser entendida como uma forma de Antirrealismo de Teorias e agnosticismo quanto a entidades. Em algumas de suas principais obras, ressalta a falta de convergência em alguns episódios históricos da ciência acerca do que as teorias científicas (ou “paradigmas vigentes”) dizem que existe no mundo e a suposta correspondência disso com o que de fato existiria. Partindo da tese de que não pode se dizer “o que há” sem o auxílio de qualquer teoria, Kuhn (1970, p.253) chama de “ilusória” essa suposta correspondência:

Parece-me que não existe maneira de reconstruir expressões como ‘realmente aí’ sem auxílio de uma teoria; a noção de um ajuste entre a ontologia de uma teoria e sua contrapartida ‘real’ na natureza parece-me ilusória por princípio (...) não tenho dúvidas, por exemplo, que a Mecânica de Newton aperfeiçoou a de Aristóteles e que a Mecânica de Einstein aperfeiçoou a de Newton enquanto instrumento para a resolução de quebra-cabeças. Mas não percebo, nessa sucessão, uma direção coerente de desenvolvimento ontológico. Ao contrário: em alguns aspectos importantes, embora de maneira nenhuma em todos, a Teoria da Relatividade Geral de Einstein está mais próxima da de Aristóteles do que qualquer uma das duas está da de Newton. Embora a tentação de descrever essa posição como relativista seja compreensível, a descrição parece-me equivocada. Inversamente, se esta posição é relativista, não vejo porque falte ao relativismo qualquer coisa necessária para a explicação da natureza e do desenvolvimento das ciências.

Nota-se o caráter antirrealista axiológico de Kuhn em sua menção das teorias de Aristóteles,

Newton e Einstein como “*instrumento[s] para a resolução de quebra-cabeças*”, e não como empreendimentos preocupados em algum nível com o grau de veracidade de suas asserções. A postura de Putnam, discutida na subseção anterior, parece também se manifestar no contexto da ciência como uma forma de Antirrealismo de Teorias. Partindo da ideia de relatividade conceitual, tem-se que nunca teremos um acesso epistêmico ao “mundo externo”, uma vez que, para Putnam, não há diferença entre o “mundo externo” e o que pensamos ou conceitualizamos dele. E pelo fato de o que pensamos do mundo depende de um determinado esquema conceitual, que por sua vez não permanece nas mudanças científicas, então nunca teríamos acesso “puro” ao “mundo externo em si”. A postura de Putnam é próxima àquela presente na citação de Kuhn. Para este, os “paradigmas” trazem um arquétipo conceitual que direciona vários níveis da atividade científica, desde a “resolução de quebra-cabeças” até a visão do mundo de uma forma geral. Isso fica claro na primeira fase da citação, onde Kuhn parece colocar a ontologia das entidades científicas como tributária das teorias, ou nas palavras de Putnam, dos esquemas conceituais.

3.2.4 Sociólogos da Ciência e Posturas Antirrealistas

Atualmente, muitas correntes advindas da Sociologia da Ciência, chamadas genericamente de *Relativismo*, têm ganhado espaço no dRAC. São caracterizadas por levantarem críticas e análises não lógicas sobre a ciência, sendo estas de natureza não só filosófica, mas também social, política, psicológica e moral. Têm parte de suas origens nas obras do historiador e sociólogo Robert Merton³⁹ na primeira metade do século passado, e também na abordagem historicista de Thomas Kuhn. Atualmente, uma boa parte do grupo das correntes sociológicas críticas à Ciência (chamadas também de “Novas Sociologias da Ciência”) compõe aquilo que é conhecido como *Social Studies of Science*, ou mais sinteticamente *Science Studies*, possuindo várias vertentes e tendo grande influência dentro e também fora da academia.

O *Science Studies* é caracterizado principalmente pelo rompimento com a “filosofia da ciência tradicional”, em especial com o Positivismo e Empirismo Lógicos na primeira metade do século passado. Estudiosos destas correntes recusam, por exemplo, a distinção de Reichenbach de *contexto da descoberta* e *contexto da justificação*, privilegiando abordagens locais ou contextuais e menos “cientificizantes” (VIDEIRA, 2006, p.38). Uma das principais vantagens advogadas a favor do movimento é sua capacidade de formular uma imagem de Ciência mais

³⁹Robert King Merton (1910-2003), sociólogo estadunidense.

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

próxima às práticas científicas (isto é, uma imagem menos idealizada) (*ibid.*, p.37). Entre as características do *Science Studies*, temos:

a) adoção de um moderado relativismo metodológico, o que permitiria evitar o comprometimento com a teoria científica em análise; b) *defesa de um realismo moderado, pois se aceita o construtivismo, ainda que não o social*; c) a biografia científica pode ajudar a esclarecer os processos de formação e transmissão do conhecimento científico; d) o conhecimento é produzido localmente, ou seja, em espaço e tempo específicos, sempre através das ações de sujeitos bem conhecidos; e) em seu local de formação, o conhecimento não é válido universalmente; sua universalidade é construída durante o seu processo de transmissão e recepção em outros locais; f) não existe método científico universal (*idem*, grifos nossos).

Por vezes correntes sociológicas se declaram “neutras” com relação ao Realismo, entretanto, na prática muitas delas se mostram implicitamente ou explicitamente próximas a posturas antirrealistas (CHAKRAVARTTY, 2013, p.18). De fato, segundo Videira (2006, p.38), algumas correntes do *Social Studies* podem implicar na descrença da existência de padrões epistemológicos, ontológicos e metodológicos válidos para qualquer contexto científico. Não raro, intelectuais críticos à ciência levam o “anticientificismo” ao extremo, e comparam-na (com o intuito de reduzir seu valor) a outras formas de conhecimento ou práticas humanas. A título de exemplo, o importante sociólogo contemporâneo Zygmunt Bauman⁴⁰ questiona (em tom cético e irônico) a eficiência da Meteorologia na previsão dos fenômenos climáticos:

Aeromancia, alectromancia, aritmancia, astrodiagnóstico, astrognose, astrologia, astromancia, austomacia, axinomancia - são estes os nomes dos antigos métodos de adivinhação do futuro e somente os que começam com a letra “a” (são muitas as letras do alfabeto). Todas essas práticas eram usadas por sábios respeitados e contavam com a aceitação de muitas pessoas que admiravam a visível autoconfiança e as evidentes habilidades de oráculos e adivinhos. Hoje, todos esses métodos caíram em descrédito e foram rejeitados ou esquecidos. Resta saber se a meteorologia não vai acabar entrando nessa lista em um futuro próximo... (BAUMAN, 2011, p.131-133).

Os *Science Studies* se ramifica em várias correntes e têm vínculos com diversas outras, cada uma com seus próprios métodos e implicações para a NdC. Entre elas, estão o *Programa Relativista e o Estudo de Controvérsias*, o *Programa Forte e a Teoria do Interesse*, o *Programa Fraco e a Meta-análise*, a *Etnografia e o Construtivismo Social*, a *Etnometodologia*, a *Análise de Discurso*, a *Administração Social dos Fatos*, entre outras (ver PESSOA JR, 1993, p.8-9). Em geral, em todas estas correntes se argumenta a favor do *Relativismo Epistêmico* (todas as formas

⁴⁰Zygmunt Bauman (1925-), sociólogo polonês.

de conhecimento estão enraizadas no social e cultural) e da ideia que o conhecimento científico não é válido universalmente, e sim apenas contextualmente ou localmente. Em vertentes mais extremas, se argumenta que não se pode distinguir em nenhum domínio natureza e sociedade, de forma que os “fatos naturais” seriam fatos produzidos socialmente (*idem*). Para sociólogos destas vertentes, noções como “verdade”, “referência” e “ontologia” são relativizadas. Isto ataca diretamente a crença realista de que o conhecimento científico se refere ao mundo exterior independente (CHAKRAVARTTY, 2013, p.19).

Embora variadas, a grande maioria das correntes citadas fazem uso frequente do termo “construção social”. Como comenta Boghossian (2012, p.34), poucos termos são tão recorrentes hoje no mundo acadêmico como este. Cita o livro de Hacking, *The Social Construction of What? (A construção social do quê?)*, no qual o autor lista diversos objetos que são tachados pelos construtivistas (termo genérico empregado por Boghossian) de “construtos sociais”, tais como conhecimento, realidade, emoções, cultural homossexual, doença, quarks, nacionalismo Zulu e diversos outros (*ibid.*, p.35). Desta forma, por classificar coisas de naturezas supostamente tão diferentes com um mesmo rótulo (construtos sociais), se advoga que este termo perde sua força por ser muito ambíguo e pouco significativo.

Boghossian (*ibid*) compreende os movimentos construtivistas (ou relativistas) como uma oposição ao “Objetivismo Clássico”, ou, à objetividade do conhecimento e do empreendimento científico na concepção clássica (referente às tradições filosóficas da primeira metade do século XX). Exemplifica algumas formas de *Construtivismo* (ou *Anti-objetivismo*) que negam o Objetivismo Clássico de diferentes maneiras:

Construtivismo [Anti-objetivismo] *sobre os fatos*: o mundo que tentamos compreender e conhecer não é o que é independentemente de nós e de nosso contexto social; ao contrário, todos os fatos são socialmente construídos de um mundo que reflete nossas necessidades e interesses contingentes.

Construtivismo [Anti-objetivismo] *sobre a justificação*: fatos do tipo “informação *E* justifica crença *C*” não são o que são independentemente de nós e de nosso contexto social; ao contrário, todos os fatos desse tipo são construídos de um modo que reflete nossas necessidades e interesses contingentes (*ibid.*, p.43).

O Construtivismo sobre fatos, conforme apresentado acima, nega que tenhamos acesso ao mundo independente. O Construtivismo sobre a justificação ataca os Realismos Epistemológico, Axiológico e Semântico, pois afirma que nossas justificações acerca do conhecimento refletiriam interesses e necessidades, e não diria nada sobre o mundo. Tomando ambas, temos

3.2 Formas de Realismo e Antirrealismo Científicos

que a postura construtivista descrita pelo autor é bastante próxima a um Antirrealismo de Teorias (Epistemológico e Axiológico). Como comenta Boghossian (2012, p.44), muitos estudiosos hoje são atraídos por concepções construtivistas, muito embora algumas destas contenham implicações extremas e bastante controversas.

Em razão de um polêmico episódio acadêmica há menos de vinte anos, eclodiu um acirrado e controverso debate entre muitos filósofos, sociólogos e cientistas sensíveis a questões metacientíficas. Trata-se daquilo que é chamado de “Guerras das Ciências”, termo que iconiza o conflito entre correntes “pós-modernistas” e “tradicionalistas”. O episódio polêmico que se viu de estopim foi a publicação do artigo de Gross e Levitt (1994), e, principalmente, o “trabalho emboscada” de Sokal (1996), um artigo de conteúdo propositalmente dúbio e complexo⁴¹ que foi publicado em uma revista de estudos sociais⁴². O chamado “caso Sokal” trouxe novo fôlego a muitos debates acerca da possibilidade e fundamentação do conhecimento científico, embora tenha trazido também conflitos que afastam ainda mais as chamadas ciências humanas das chamadas ciências exatas.

Visando ilustrar o clima provocativo e hostil atual na “trincheira” entre “defensores da Ciência” e “críticos da Ciência”, o historiador e sociólogo Steven Shapin (2012 [2010]) lista um conjunto de afirmações provocativas e extremas que comumente são atribuídas a “estudiosos anticientíficos” engajados nas Guerras das Ciências:

1. Não existe algo como Método Científico.
2. A ciência moderna vive somente em seu tempo e para o seu tempo; ela parece muito mais especulação na bolsa de valores do que uma busca pela verdade sobre a natureza.
3. Conhecimento novo não é ciência até que seja socializado.
4. Uma realidade independente no sentido físico comum não pode ser adscrita aos fenômenos nem às agências de observação.
5. A base conceitual da física é uma invenção livre da mente humana.
6. Os cientistas não encontram ordem na natureza, eles a colocam lá.
7. A ciência não merece a reputação que conquistou tão amplamente... a de ser completamente objetiva.
8. A imagem do cientistas como um homem de mente aberta, alguém que pese as evidências a favor de algo e contrárias a algo, é conversa fiada.
9. A física moderna baseia-se em alguns atos de fé intrínsecos (*ibid.*, p.5).

⁴¹Pode-se notar esta intenção no título do trabalho, *Transgressing the Boundaries: Towards a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity*, em português, *Transgredindo as fronteiras: em direção a uma hermenêutica transformativa da gravitação quântica*.

⁴²*Social Text*.

Contudo, como aponta Shapin, nenhuma dessas afirmações vem de “estudiosos anticientíficos”, mas sim de cientistas dos século XX, como Einstein (item 5) e Bohr (item 4) (*ibid.*, p.6). Essas atribuições de afirmações parecem emergir da grande hostilidade entre “críticos da ciência” e “defensores da ciência”. Sociólogos, filósofos e outros estudiosos da ciência que visam diminuir a imagem da Ciência afirmando-a como conjunto de crenças situadas contextualmente, são tachados de solipsistas e outros estereótipos extremos. Não raro são acusados por (supostamente) defender a tese filosófica radical e absurda da inexistência da realidade externa em todos os âmbitos. Por outro lado, em geral defensores da ciência contra-argumentam apontando o exagero de alguns ataques à ciência. Por vezes, também são tachados com estereótipos extremos, como se todos os cientistas acreditassem em um único Método Científico e que o acesso à realidade independe completamente de pré-concepções teóricas, entre outros.

Ainda que existam alguns cientistas e “anticientíficos” que parecem se enquadrar nestes estereótipos, muitos desentendimentos entre esses estudiosos surgem, como sugere Shapin, a partir de afirmações descontextualizadas (como a de Einstein e Bohr na lista acima), piorando desnecessariamente supostas “guerras” acadêmicas. Segundo Shapin, os “anticientíficos” também têm muito a aprender ouvindo os próprios cientistas sobre as práticas e saberes científicos, uma vez que estes próprios podem apontar críticas dentro da Ciência (*ibid.*, p.17). Da mesma forma, os cientistas também têm a aprender melhor sobre a própria disciplina com a qual tanto convivem com a ajuda de historiadores, filósofos e sociólogos da Ciência.

3.3 Alguns dos principais argumentos do debate

Dado que o dRAC é mais um dos “insolúveis” na Filosofia da Ciência segundo Niiniluoto (1999), é natural esperarmos que existam muitos argumentos de cada lado. E estes de fato existem, como pode ser visto em muitas obras que tratam do tema. Para resumi-las nesta seção, nos basearemos nos trabalhos de Newton-Smith (1996), Niiniluoto (1999), Okasha (2002), Ribeiro (2009) e Chakravartty (2013).

Iremos expor alguns dos principais argumentos realistas e antirrealistas, conhecidos por termos específicos na literatura especializada: o *argumento do sucesso empírico da ciência* (conhecido também como *argumento do milagre*, ou *inferência da melhor explicação*, ou ainda *argumento da abdução*); o *argumento histórico das entidades inobserváveis abandonadas*; o *argumento do milagre revisado*; o *argumento da subdeterminação das teorias pelos dados*; o

3.3 Alguns dos principais argumentos do debate

argumento da meta-indução pessimista; o argumento da simplicidade (ou argumento da escolha das teorias mais simples), e; o argumento anti-critérios transempíricos. A complexidade da articulação de alguns destes argumentos não permite que a discussão destes seja esgotada aqui, muito embora seja possível entender as principais tensões entre posições realistas e antirrealistas.

Um dos argumentos mais imediatos dos realistas confunde-se às vezes com uma premissa realista: *nossas melhores teorias apresentam um sucesso empírico extraordinário.* Como se atesta, as teorias científicas atuais possuem um grande poder de previsão e explicação, permitem uma manipulação experimental de diversos fenômenos e são corroboradas em experimentos de alta acurácia (CHAKRAVARTTY, 2013, p.6). Para os realistas, o que explica este sucesso é que de fato nossas melhores teorias são *verdadeiras* (ou *verossímeis*), isto é, estão realmente dizendo alguma coisa sobre o mundo. Assim, para eles seria improvável que as entidades e processos inobserváveis postulados pela teoria não fossem também verdadeiros ou reais, isto é, que não correspondessem a nada no mundo (NEWTON-SMITH, 1996, p.184). Seria um *milagre* (daí o termo *argumento do milagre*), ou uma enorme coincidência, que estas entidades e processos não fossem reais e ainda assim a teoria funcionasse tão bem.

Neste caso, ser antirrealista implicaria em acreditar neste milagre. Para Okasha (2002, p.63), obviamente é melhor não acreditar em um milagre se uma alternativa “não milagrosa” é disponível, no caso, a interpretação realista das teorias. Esse argumento reflete uma *inferência da melhor explicação* do sucesso empírico da ciência, sendo portanto um argumento *abduativo*⁴³ (daí o termo *argumento da abdução*). Para os realistas, ao se negar a interpretação realista, o sucesso empírico da ciência se tornaria um mistério sem explicações (*idem*), algo a ser explicado pelos antirrealistas.

Antirrealistas respondem de diversas formas este argumento. Uma delas faz uso da História da Ciência. Historicamente, existiram muitas teorias que, embora bem sucedidas do ponto de vista empírico à época, se mostraram falsas com o decorrer do tempo (NEWTON-SMITH, 1996, p.186). Conforme cita Okasha (2002, p.63), Larry Laudan, em um importante trabalho, lista mais de trinta teorias do passado que, embora aceitas e bem sucedidas empiricamente para os padrões de sua época, posteriormente se mostraram falsas. Tais teorias postulavam entidades

⁴³Um argumento abduativo pode ser entendido como uma inferência dos efeitos às causas (afirmação do subsequente). A inferência se basearia na “melhor explicação” dos efeitos. Como comenta Niiniluoto (1999, p.39), argumentos abduativos são usados no dia-a-dia e também na ciência. Não se trata de um raciocínio dedutivo, por isso não há garantias plenas sobre a certeza das conclusões via argumento abduativo.

inobserváveis como o flogisto, o calórico, o éter, entre outros. Realistas contra-argumentam afirmando que, por outro lado, algumas teorias do passado, cujas entidades e processos eram vistas com ceticismo, foram corroboradas tempos depois (NEWTON-SMITH, 1996, p.184), o que não justifica portanto que sejamos completamente céticos com as teorias atuais. Contudo, antirrealistas rebatem afirmando que a melhor postura quanto às teorias atuais é o agnosticismo, pois a rigor nada nos garante que elas também não se mostrarão falsas no futuro distante ou próximo (OKASHA, 2002, p.64).

Uma forma dos realistas responderem ao argumento histórico dos antirrealistas é por meio de uma sutil alteração no argumento do milagre (*idem*). Ao invés de se afirmar que o sucesso empírico de nossas melhores teorias é indicativo de que elas sejam *verdadeiras*, diz-se que na verdade se trata de um indicativo de que elas são *aproximadamente verdadeiras*. Sendo assim, o argumento do milagre torna-se mais modesto, de forma que os realistas podem até admitir junto aos antirrealistas (até certo ponto) que as teorias de hoje podem se mostrar (parcialmente) falsas no futuro (*idem*). Por outro lado, realistas podem se esquivar do argumento histórico antirrealista ao interpretarem “sucesso empírico” como não só a capacidade de lidar com os dados conhecidos mas também como a capacidade de prever fenômenos novos (o que não era muito comum nas antigas teorias que foram abandonadas) (*idem*).

Historicamente, um dos mais fortes argumentos antirrealistas é a tese subdeterminação da teoria pelos dados (NEWTON-SMITH, 1996, p.191). Ele remonta a trabalhos de Duhem e Quine, e por isso é também conhecida como *tese de Duhem-Quine*. Duhem, ao estudar questões relativas à confirmação de teorias, afirma que uma hipótese isolada não pode fazer previsões por si só, sendo necessárias hipóteses mais fundamentais, como a validade de princípios gerais, o funcionamento adequado de todo o aparato experimental, entre outros (CHAKRAVARTTY, 2013, p.10). Assim, em um teste empírico, não seria possível refutar de forma decisiva uma hipótese, pois a rigor não se sabe se o erro está nela ou em alguma das hipóteses mais fundamentais. Quine, anos depois, chegou a conclusões bastante parecidas, notando que nos processos de confirmação ou refutação, “crenças holísticas” são testadas, e não crenças individuais. Atualmente, se entende a tese de Duhem-Quine como a possibilidade lógica de que é sempre possível existir teorias rivais (ou interpretações rivais) que são concomitantemente confirmadas pelo mesmo conjunto de observações (BARRA, 1998, p.19).

Para os realistas, a tese de Duhem-Quine se mostra desafiadora à questão do processo de escolha de teorias. Em uma disputa de teorias empiricamente equivalentes, a escolha entre

3.3 Alguns dos principais argumentos do debate

elas estará impossibilitada, pois elas estarão subdeterminadas pelos dados (isto é, somente com base nestes nos dados a escolha não será possível empiricamente). Por outro lado, tem-se que teorias rivais que supõem diferentes entidades e processos inobserváveis podem ser ambas corroboradas por um mesmo experimento. Sendo assim, não faria sentido os cientistas serem realistas com uma determinada teoria se a outra rival é igualmente corroborada empiricamente (OKASHA, 2002, p.72). Isto cria um dilema aos realistas, pois estes têm como argumento mais imediato à veracidade de suas teorias e à realidade das entidades inobserváveis justamente o sucesso empírico da ciência (NEWTON-SMITH, 1996, p.191).

Como aponta Ribeiro (2009, p.22), realistas em geral têm ciência que as teorias nunca ficam completamente provadas por via empírica. Assim, não seria adequado reduzir a questão da veracidade das teorias e da realidade das entidades e processos inobserváveis à experimentação. De fato, realistas retalham a tese de Duhem-Quine argumentando que a corroboração de uma teoria (frente, por exemplo, a uma teoria rival empiricamente equivalente) não se dá somente pela observação ou experimentação, mas também por considerações teóricas (como a não violação de princípios fundamentais) (*idem*). Isto poderia eliminar o problema da equivalência empírica entre teorias rivais. Por outro lado, realistas tendem a argumentar que esta equivalência muitas vezes é ilusória, ou ao menos temporária, sendo que uma teoria pode acabar se reduzindo à outra (*idem*).

Outro importante argumento antirrealista é o da meta-indução pessimista, e remete a trabalhos de Laudan. Trata-se de um argumento com premissas empíricas que nasce da indução no nível metacientífico. Do ponto de vista do presente, a maioria das teorias do passado é considerada falsa (isto é, com o passar do tempo se mostrou falsa). Em geral, isso se mostrou verdadeiro em outras épocas (quando se olhava às teorias do passado). Sendo assim, por indução metacientífica, as teorias científicas, em qualquer momento na história, serão eventualmente substituídas e consideradas, portanto, como falsas do ponto de vista de alguém que olha do futuro (CHAKRAVARTTY, 2013, p.13). Novamente, nesse contexto não faria sentido os cientistas terem crenças realistas sobre as teorias e suas entidades inobserváveis postuladas se considerarem que provavelmente um dia elas serão substituídas e abandonadas.

Alguns realistas, que não acham plausíveis os argumentos da tese de Duhem-Quine e da meta-indução pessimista, argumentam que progresso da ciência e o processo de escolha das teorias podem ser entendidos com a adoção de critérios como simplicidade, consistência, entre outros (CHAKRAVARTTY, 2013, p.14). Teorias mais simples podem postular menos entidades

inobserváveis (ou também relações e propriedades) ou ser mais manejável do ponto de vista matemático. Teorias consistentes seriam mais simples, coerentes internamente e externamente, não ferindo ou sendo incompatível com outras teorias e princípios fundamentais (*idem*). O apelo à simplicidade das teorias científicas já foi feito de forma apaixonada por Einstein (nos anos de maturidade, “realista” segundo Holton (1968)), que afirmou que “*a natureza é a realização das ideias matemáticas mais simples concebíveis*” (GALISON, 2003, p.318)

Todavia, antirrealistas discordam dos realistas quanto ao uso de critérios transempíricos (isto é, que não são sugeridos diretamente pela via empírica) ou pragmáticos. Afinal, pode-se questionar: porque teorias mais simples têm mais chances de serem verdadeiras do que aquelas que não são? (OKASHA, 2002, p.74). Antirrealistas argumentam que estes critérios muitas vezes podem excluir teorias desnecessariamente, ou que podem acabar por não favorecer nenhuma teoria (CHAKRAVARTY, 2013, p.14). Por outro lado, o fato de termos como “simplicidade” admitir vários significados (simplicidade matemática, simplicidade ontológica, entre diversos outros) não agrada alguns antirrealistas (*idem*).

Estes são apenas alguns dos argumentos que são empregados em debates entre realistas e antirrealistas científicos. Em geral, eles tomam conotações sutilmente diferentes em função do autor que a defende. Nenhum argumento é conclusivo ou definitivo, pois todos são constantemente revisitados e debatidos, seja por motivações internas (da própria filosofia da ciência) ou externas (como os desdobramentos da ciência). Assim, não se pode dizer, com base neles, que o Realismo ou o Antirrealismo (ou alguma de suas variações) está “certo” ou “errado”. Como todo debate filosófico, este não se pretende à resolução, mas sim à elaboração cada vez mais crítica e coerente de suas possíveis posturas e argumentos.

3.4 Síntese e porvir

Neste capítulo apresentamos algumas das principais características do dRAC, um dos antigos e tradicionais dentro da filosofia da ciência. Como foi repetido ao longo do texto, não se pretendia um estudo exaustivo, mas esforços foram empreendidos no sentido deste capítulo servir de subsídio filosófico para estudos e análises nos capítulos seguintes. Demos destaque a algumas categorias filosóficas dentro do debate, em especial: Realismo Ontológico, Realismo Epistemológico, Realismo Axiológico, Realismo de Entidades e Realismo de Teorias. As duas últimas foram caracterizadas com mais detalhes, por serem aquelas com as quais algumas etapas da

3.4 Síntese e porvir

pesquisa de campo, descrita no capítulo 5, foram aplicadas. Exemplos de cada categoria foram dados, e os principais argumentos do debate, sejam provindos de realistas ou antirrealistas, foram brevemente discutidos na penúltima seção.

O capítulo seguinte é dedicado a um estudo panorâmico sobre a história e filosofia da TRE. Partindo do (pseudo) problema das disputas de prioridade da criação da teoria, e da questão da equivalência empírica e matemática das teorias de Einstein e Lorentz-Poincaré, discutimos a capacidade do formalismo matemático da teoria ser interpretável de diferentes pontos de vista científicos e filosóficos. Após de uma breve incursão no contexto das origens da teoria, discutimos quatro interpretações históricas que surgiram entre 1904 e 1907, cada uma relacionada a importantes nomes para a criação e desenvolvimento da TRE: Lorentz, Einstein, Poincaré e Minkowski. Para cada uma delas, discutimos os status ontológico dos fenômenos e entidades relativísticas segundo seus próprios trabalhos e estudos de comentadores, utilizando para isso as categorias elencadas nas seções anteriores. Os estudos realizados no próximo capítulo serviram de base para a construção de duas aulas aplicadas a estudantes de física que participaram da pesquisa de campo. Por outro lado, contém respostas teóricas à pergunta de pesquisa exposta na Apresentação.

4 História, Filosofia e a Teoria da Relatividade Especial

4.1 O “mito-Einstein” e a paternidade da Teoria da Relatividade Especial

No âmbito da física, o início do século XX ficou marcado pelo surgimento das teorias relativísticas (TRE e TRG) e da física quântica. Por vezes, encontra-se o termo “revolução” denominando o impacto que essas teorias tiveram na visão científica de mundo, salientando o caráter “contra-intuitivo” delas quando comparadas às noções clássicas da física. A situação hoje, principalmente nos laboratórios de altas energias e aceleradores, mostra, em particular, como a TRE (e também a física quântica) se tornou algo “natural” entre os físicos. Em termos de suposições diretivas de teorias de mudança científica (LAUDAN *et al*, 1993 [1986], p.29), podemos dizer que ao longo do século XX a TRE se tornou “ciência normal” ou “paradigma” (sentido de Kuhn), um programa de pesquisa progressivo (sentido de Lakatos), ou uma tradição de pesquisa bem sucedida (sentido de Laudan).

Mas, longe dos laboratórios científicos, questões relativas às teorias relativísticas e quânticas também são estudadas com enorme interesse por historiadores, filósofos e outros profissionais. Esse interesse pode ter surgido por vários fatores, por exemplo, em razão do forte caráter provocador e “contra-intuitivo” destas teorias, o ceticismo para com algumas de suas implicações, a possibilidade delas justificarem o que era até então coisas extraordinárias e inexplicáveis, entre diversos outros. Há muitos anos, estudos históricos e filosóficos são feitos sobre estas teorias.

Curiosamente, há um “fenômeno” que só se manifesta com as teorias relativísticas e não com a física quântica. Estudantes de física, após o primeiro contato com disciplinas de física moderna, são levados a perceber que a física quântica teve vários “pais” e “mães”, isto é, muitos

cientistas que contribuíram teoricamente, experimentalmente, ou até mesmo filosoficamente, para a construção inicial e desenvolvimento da teoria. Para às teorias da relatividade, muitas vezes se veicula que há um, e somente um, “pai”: Albert Einstein.

Há inúmeros estudos históricos, filosóficos, sociológicos e biográficos sobre Einstein, suas contribuições, sua vida, sua carreira científica, entre outras. Nota-se que a figura de Einstein goza de uma popularidade descomunal, quando comparada com a popularidade de qualquer outro cientista na história da ciência recente. Ao que indicam alguns estudos, Einstein se tornou uma figura pública a partir do ano 1919, e sua “fama” culminou na premiação póstuma de *Personalidade do Século* pela revista estadunidense *Time*. Na edição do dia 31 de dezembro de 1999, onde se menciona a premiação, lemos:

Ele era a encarnação da pura inteligência, o professor que andava aos farrapos com sotaque alemão, o cômico clichê em milhares de filmes. Imediatamente reconhecível, como os passos de Charlie Chaplin, o semblante de Einstein de cabelos despenteados era tão familiar às pessoas comuns como para matronas que esvoaçavam sobre ele em salões de Berlin a Hollywood. No entanto, era impenetravelmente culto - o gênio que entre suas genialidades descobriu, simplesmente pensando sobre isso, que o universo não era o que parecia (TIME, 1999).

O tom exagerado do discurso (“encarnação da pura inteligência”, “impenetravelmente culto”, “o gênio que entre suas genialidades descobriu”) elucida a popularidade de Einstein, que nunca apreciou positivamente como sua própria imagem era explorada. Tamanha foi (e ainda é) esta “fama”, que muitos estudos históricos apontam para o fato de que existem na verdade *dois* Einsteins: um deles é Albert Einstein, nascido em Ulm no Império Prussiano em 1879, que morreu em Princeton no Estados Unidos em 1955; o outro é o “mito-Einstein” que nasceu, segundo seu conhecido biógrafo Abraham Pais (1995 [1982], p.361), em novembro de 1919 em uma manchete histórica do célebre jornal inglês *The Times*, de título *Revolution in Science, New Theory of the Universe: Newtonian Ideas Overthrown (Revolução na Ciência, Nova Teoria do Universo: Ideias Newtonianas Superadas)*. A manchete anunciava que as ideias de um dos maiores cientistas britânicos de todos os tempos, Newton, haviam sido desbancadas por um alemão, Einstein.

Existem teorias sobre o nascimento do mito-Einstein em 1919. Uma delas, discutida por Kevles (2005), envolve razões históricas bem gerais, que fogem ao domínio acadêmico científico. A Primeira Grande Guerra havia acabado de terminar em 1918. Einstein e o astrônomo britânico Arthur Eddington¹ eram pacifistas antimilitaristas autodeclarados. Em 1919 Ed-

¹Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944), astrofísico britânico

4.1 O “mito-Einstein” e a paternidade da Teoria da Relatividade Especial

dington conduziu um experimento astronômico com o intuito de verificar uma previsão teórica de Einstein com base na TRG. O mundo pós-guerra teria então visto com bons olhos o fato de um inglês testar a teoria de um alemão. Durante a guerra, este tipo de associação era impensável ou irracional, haja vista, por exemplo, as propagandas de guerra difundindo estereótipos xenofóbicos incitando o ódio entre alemães e britânicos. Depois da guerra, ela virou símbolo da reconciliação e imparcialidade da Ciência. Desta súbita virada moral em um mundo fragilizado pela guerra, nasceu, segundo Kevles, o “mito-Einstein”, a imagem estereotipada e propagada pela fama.

Esta virada foi tão notável que até mesmo Einstein percebeu como sua imagem tinha se transformado rapidamente. Expressou isto de forma irônica em um artigo a convite da revista *The Times*²:

Foi de acordo com a antiga e orgulhosa tradição da ciência inglesa que cientistas ingleses dedicaram seu tempo e trabalho (...) para testar a teoria que fora concluída e publicada no país dos seus inimigos no decorrer da guerra. (...) Por meio de uma aplicação da teoria da relatividade aos gostos dos leitores, na Alemanha sou hoje chamado homem de ciência alemão, enquanto na Inglaterra sou apresentado como um judeu suíço. Se chegar a ser visto como uma *bête noire*, as descrições inverter-se-ão. Tornar-me-ei judeu suíço para os alemães e homem de ciência alemão para os ingleses! (EINSTEIN *apud* PAIS, 1995 [1982], p.365).

A presença do mito-Einstein (a imagem canonizada de Einstein) ainda é perceptível nos dias de hoje, tanto nos meios de comunicação em massa como dentro da academia. A imagem de um senhor de idade mostrando a língua com os cabelos despenteados virou um dos mais fortes símbolos populares da ciência a partir da segunda metade do século passado. O mito-Einstein reforçou um conjunto bem conhecido de estereótipos de cientista: homem, branco, excêntrico, desmedidamente inteligente, entre outros. O mito-Einstein também entrou nas escolas básicas e superiores, por vezes aparece em livros didáticos de forma tácita (NORONHA, 2011; NORONHA *et al*, 2013), e acaba fomentando outros mitos.

Um destes mitos, em particular, é justamente aquele de que Einstein teria sido o único “pai” da TRE. Como afirma Galison (2005 [2003]), os ecos do importante artigo de Einstein, *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*³, publicado em 1905 no importante periódico ale-

²Esse artigo foi publicado alguns dias depois do outro artigo mencionado anteriormente (*Revolution in Science*). Este é mais um exemplo da força simbólica que teve à época o experimento de Eddington. Durante o período de guerra, estaria fora de cogitação os britânicos permitirem um alemão redigir um artigo em um revista britânica do porte da *The Times*

³Título original em alemão: *Zur die Elektrodynamik bewegter Körper*.

mão *Annalen der Physik*, ainda perduram. Tornou-se, ainda segundo Galison, um dos artigos científicos mais conhecidos do século XX, e não raro é tido como um dos marcos revolucionários da ciência no início desse mesmo século (*ibid.*, p.15). Por vezes é aclamado como “artigo fundador” da TRE (PATY, 1993, p.52), contudo, o que os antecedentes históricos imediatos (e outros não tão imediatos) à data de 1905 sugerem, muitas vezes, algo não tão simples quanto um nascimento pontual (MARTINS, 2012b).

Praticamente desde poucos anos após a publicação deste artigo, o exercício de produção de histórias da teoria (suas origens e desenvolvimentos) se tornou lugar comum, tanto entre historiadores e filósofos como também cientistas. A bibliografia sobre histórias da relatividade é vastíssima, cobrindo desde obras de divulgação científica para públicos não especializados até trabalhos historiográficos minuciosos. Brush (1999, p.185), com base no índice bibliográfico de uma das mais importantes revistas de história da ciência⁴, relata que há milhares de trabalhos com tema relativo à recepção e aceitação das teorias relativísticas. Além disso, encontram-se também esboços de histórias da relatividade em livros didáticos de física, tanto no ensino básico como no ensino superior.

Como acontece com estudos históricos sobre outras teorias científicas, há muitas controvérsias históricas que orbitam o contexto de origem da TRE, como comenta o historiador John Stachel (1999, p.266), importante autoridade no assunto:

Dada a escassez de dados e a infinidade de possibilidades, não é de surpreender que não há consenso nas respostas a perguntas como: o que Einstein tinha lido em 1905 e como essas leituras o influenciaram? Seu trabalho foi principalmente guiado por um estudo detalhado da eletrodinâmica ou por considerações mais heurísticas (tais como sua conhecida *Gedankenexperiment* [experiência de pensamento] sobre a perseguição de um raio de luz)? Qual foi o papel das evidências experimentais, tais como a experiência de Michelson-Morley (mas não apenas ela), em seu pensamento? Considerações filosóficas desempenharam um papel importante, se sim, qual filosofia e qual o papel?

Outra destas controvérsias históricas é a suposta *antecipação* de Einstein por Lorentz e Poincaré, que elaboraram paralelamente uma teoria eletrodinâmica dos corpos em movimento matematicamente e empiricamente equivalente à teoria de Einstein, há muito estudada por historiadores da ciência (DORLING, 1968; ZAHAR, 1973a; 1973b). Por um lado, se sabe que parte considerável dos resultados obtidos por Einstein (principalmente as equações matemáticas) e expostos em seu artigo de 1905 já havia sido obtida por outros cientistas por meio de

⁴ISIS Cumulative Bibliography of the History of Science.

4.1 O “mito-Einstein” e a paternidade da Teoria da Relatividade Especial

outras abordagens, como foi o caso de Lorentz e Poincaré. De princípio, isso não necessariamente desmerece o esforço de Einstein, tão menos nos permite concluir que sua teoria careceria de autenticidade. Mas a atenção a este fato não deixa de instigar a crítica à visão ingênua de que Einstein teria chegado onde chegou sem nenhuma inspiração ou trabalho prévio, ou, à ideia de que não havia mais ninguém pensando na época nos problemas da eletrodinâmica dos corpos em movimento.

Sobre os resultados que já existiam à época, que hoje atribuímos à TRE, Martins menciona que já havia:

O princípio da relatividade; (...)

As transformações de Lorentz para o espaço e tempo; (...)

As transformações das grandezas eletromagnéticas; (...)

A maior parte da dinâmica relativística (...)

A equação da variação da massa do elétron com a velocidade; (...)

A relação entre fluxo de energia e densidade de momento; (...)

A relação entre massa e energia, em alguns casos específicos (sem formulação geral) (MARTINS, 2005a, p.22).

Cada ponto acima já havia sido analisado, de alguma forma, por pelo menos um autor antes de 1905. Talvez uma menção mais antiga e concisa ao que hoje chamamos de Princípio da Relatividade (para fenômenos mecânicos e também ópticos-eletromagnéticos) tenha sido a de Mascart⁵, em 1874. Voigt⁶, em 1887, foi o primeiro a propor uma versão primitiva do que hoje chamamos Transformações de Lorentz. Larmor, em 1900, foi o primeiro a alcançar as Transformações de Lorentz na forma exata (PAIS, 1995 [1982], p.137). Heaviside⁷, Thomson⁸, Searle⁹, e principalmente Lorentz encontraram relações que exprimiam a dependência dos campos elétrico e magnético com a velocidade e suas transformações entre referenciais (MARTINS, 1989, p.66). Grande parte da dinâmica relativística, assim como equações relacionando fluxo de energia a densidade de momento, já estavam parcialmente presente em trabalhos de Abraham¹⁰ e Lorentz até 1904 (MILLER, 1973, p.214-233). Relações que exprimiam a dependência da massa do elétron com a velocidade já haviam sido derivadas em 1896 por Searle, em 1901 por

⁵Éleuthère Élie Nicolas Mascart (1837-1908), físico francês.

⁶Woldemar Voigt (1850-1919), físico alemão.

⁷Oliver Heaviside (1850-1925), físico e matemático inglês.

⁸Sir Joseph John Thomson (1856- 1940), físico britânico.

⁹George Frederick Charles Searle (1864-1954), físico britânico.

¹⁰Max Abraham (1875-1922), físico alemão.

Kaufmann¹¹ e Wien,¹² em 1902 por Abraham, e em 1904 por Bücherer e Lorentz (MARTINS, 2005a, p.18-20). A relação entre massa e energia tem uma longa história, com diversas derivações independentes e interpretações diferentes (MARTINS, 1989; WHITTAKER, 1953, p.51), e envolve nomes como Thomson, Abraham, e principalmente Poincaré (MARTINS, 2005a, p.21; PAIS, 1995 [1982], p.182).

Como aponta o historiador Tetu Hirosige (1976), alguns historiadores e estudiosos da teoria, como Edmund Whittaker (1953), elencam Henri Poincaré como criador da teoria pelo fato de ter proposto o Princípio da Relatividade de uma maneira mais formal antes de Einstein. Contudo, isso não é consenso entre especialistas (MILLER, 1973, p.211). E por outro lado, as formas como foi concebido o princípio por Poincaré e Einstein foram bastante diferentes. Em primeira análise nota-se que essas formas provem de intuítos científico-filosóficos distintos, como será discutido neste capítulo.

Contudo, embora partissem de abordagens científico-filosóficas diferentes, historiadores confirmam como fato inegável que muitos dos resultados da teoria de Einstein são idênticos àqueles da teoria de Lorentz-Poincaré. Conforme afirma Martins (2012b), se levarmos em conta as contribuições de Lorentz e Poincaré até 1905 “(que (...) utilizaram resultados obtidos por vários outros pesquisadores), pode-se dizer que quase todas as equações obtidas por Einstein já haviam sido obtidas antes” (p.36). Isto é, do ponto de vista matemático, quase tudo que podemos obter com uma teoria pode ser obtido pela outra. Já do ponto de vista empírico, com relação ao que é observável, não há diferenças entre as previsões e descrições empíricas entre as teorias. Ainda segundo Martins, (*ibid*), “[n]ão pode ser feita uma experiência crucial para distinguir a teoria de Lorentz-Poincaré da relatividade de Einstein” (p.37).

Essa equivalência de teorias por vezes fomenta disputas entre historiadores acerca da “paternidade” da criação da teoria. Isto é, muitos fazem a pergunta: quem criou primeiro o que hoje chamamos de TRE? As questões sobre a prioridade histórica de criação de teorias ou descobertas experimentais sempre ocuparam os historiadores da ciência, muito embora se argumente, como Kuhn (2009 [1977], p.89), que o fenômeno de “descoberta simultânea” é muito comum em ciência. A consciência disto tornaria boa parte das discussões sobre prioridade de descoberta ou criação inúteis ou estéreis.

Outra pergunta (que embora parecida com a anterior, ataca o problema por outro lado), é esta: como puderam estas pessoas chegar de forma independente a teorias tão parecidas do

¹¹Walter Kaufmann (1871-1947), físico alemão.

¹²Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928), físico alemão.

4.1 O “mito-Einstein” e a paternidade da Teoria da Relatividade Especial

ponto de vista formal e empírico? Esta questão, aliada ao fato de que Einstein supostamente não conhecia os últimos trabalhos de Lorentz e Poincaré (MILLER, 1981, p.87), é bem mais interessante do ponto de vista histórico do que aquelas envolvendo disputa de prioridades (DARRIGOL, 2004). Por essa razão, não será procurado nas discussões seguintes nenhum “criador prioritário” da teoria.

Embora equivalentes, havia diferenças de interpretação física e filosófica. Martins (2012b) afirma que as principais diferenças entre elas era a aceitação da existência do éter (por parte de Lorentz, e por parte de Poincaré como “conceito útil”) e as diferentes abordagens epistemológicas adotadas (*Convencionalismo* por parte de Poincaré e *Operacionalismo Epistemológico* por parte de Einstein). Havia diferenças também metodológicas. Einstein classificava sua teoria como uma “teoria de princípios”, distinguindo-a de “teorias construtivas” (nas quais se enquadra a teoria de Lorentz-Poincaré). Esclareceu suas diferenças em um artigo seu publicado na *The Times* em novembro de 1919, de título *Tempo, Espaço e Gravitação*¹³:

Estas [as teorias construtivas] tentam construir uma imagem dos fenômenos complexos a partir de uma proposição relativamente simples. A teoria cinética dos gases, por exemplo, tenta relacionar o movimento molecular às propriedades mecânicas, térmicas e de difusão dos gases. Quando dizemos que compreendemos um conjunto de fenômenos naturais, queremos dizer com isto que encontramos uma teoria construtiva que apreende estes fenômenos. (...)

Estas [teorias de princípios] empregam o método analítico, e não o método sintético. O ponto de partida delas não é os constituintes hipotéticos, mas as propriedades gerais dos fenômenos observados empiricamente, princípios nos quais sua formulação matemática é deduzida de tal forma que eles se aplicam a todos os casos. Termodinâmica, por exemplo, partindo do fato de que o movimento perpétuo nunca ocorre, tenta deduzir disto, por um processo analítico, uma teoria a qual se aplicará a todos os casos. O mérito das teorias construtivas é sua compreensibilidade, sua adaptabilidade e clareza, e o das teorias de princípios é sua perfeição lógica e a segurança de seus fundamentos.

A teoria da relatividade é uma teoria de princípios¹⁴

A conclusão de Martins (*ibid*), que dá impulso às discussões seguintes neste capítulo, é de que “[p]ode-se dizer que, em vez de serem duas teorias diferentes, o que esses autores [Lorentz, Poincaré e Einstein] produziram foram duas interpretações diferentes da mesma teoria física” (p.37). Na próximas seções serão discutidas as diferenças e as semelhanças destas e outras interpretações da teoria.

¹³Título original em inglês: *Time, Space and Gravitation*.

¹⁴Disponível em: http://en.wikisource.org/wiki/Time,_Space,_and_Gravitation, acessado dia 25/10/13.

4.2 Equivalência matemática e empírica

As equivalências matemática e empírica das teorias de Lorentz-Poincaré e Einstein compõem um estigma que ainda aquece muitos debates sobre a HFC e NdC¹⁵. Levantam várias perguntas interessantes acerca da curiosa semelhança das estruturas destas teorias e da proximidade histórica de seus surgimentos. Seriam estas duas teorias, na verdade, uma só, como afirma Martins (2012b)¹⁶? Se apresentavam os mesmos resultados, porque hoje estudamos a teoria de Einstein e não a de Lorentz-Poincaré? Porque a teoria de Einstein prevaleceu sobre a teoria de Lorentz-Poincaré? Tratam-se de perguntas complexas, mas que não serão e nem poderiam ser respondidas neste trabalho.

Em dois importantes artigos, Zahar (1973a; 1973b), visando responder a última pergunta acima, discute as possíveis causas da vitória do programa de pesquisa (no sentido de Lakatos) de Einstein sobre o programa de Lorentz. Além de diferenças a nível metafísico e metodológico, Zahar argumenta que a explicação (bem sucedida) da teoria geral de Einstein para a precessão anômala do periélio de Mercúrio foi o fator decisivo em favor do programa einsteiniano. Brush (1999), em um estudo sobre a recepção da TRE no início do século passado, investigou quais teriam sido algumas das razões para aceitação das teorias relativísticas alguns anos depois de suas publicações. Analisando a recepção da teoria em diferentes países, academias e universidades, Brush conclui que houve pelo menos três fatores centrais para a aceitação: (i) os testes empíricos tanto da teoria especial como da geral (*ibid.*, p.186); (ii) fatores sociais e psicológicos, como a tendência de cientistas mais jovens da época a aceitar teorias novas e “revolucionárias” (*ibid.*, p.190), e; (iii) avaliações matemáticas e estéticas das teorias, como a elegância das equações (*ibid.*, p.191). Zahar (1973a; 1973b), assim como Abiko (2005), argumenta que o surgimento da física quântica, à qual o programa de Lorentz e Poincaré não pode se adaptar, foi também importante à saliência do programa de pesquisa de Einstein.

Nenhuma das teses acima, naturalmente, gera consenso entre historiadores, pois trata-se de

¹⁵É interessante esclarecermos um “problema semântico” associado à palavra “teoria”. Nos próximos parágrafos, enfatizamos que uma teoria não se reduz às suas previsões empíricas e fórmulas matemáticas. Contudo, nosso critério para caracterizar a equivalência de teorias não vai além desses dois pontos. Isso porque estamos considerando as teorias no *sentido amplo*; no *sentido estrito*, as teorias de Einstein e Lorentz-Poincaré são diferentes, pois partem de diferentes visões de mundo e hipóteses. Ao longo do texto esclarecimentos são feitos sobre qual sentido está sendo adotado.

¹⁶Utilizando a distinção apontada na nota anterior, temos que, no sentido estrito, não podem ser consideradas uma só teoria. Adotando o sentido amplo, entretanto, essa conclusão é possível.

4.2 Equivalência matemática e empírica

uma questão controversa. De qualquer forma, embora tenha existido uma proximidade formal entre as teorias de Lorentz-Poincaré e de Einstein, é importante salientar, como se sabe, que teorias científicas não se reduzem ao formalismo matemático e às suas consequências experimentais. Caso fosse assim, acarretariam em alguns problemas de natureza epistemológica, segundo Giannetto (1998, p.173) e também Paty:

Essas teorias [de Lorentz, em 1904, e Poincaré, em 1905] são equivalentes (...) [à teoria de Einstein] no que concerne às fórmulas e aos testes experimentais. (...) Mas uma teoria não se reduz somente às suas fórmulas. É feita igualmente do conteúdo físico das grandezas que ela faz intervir, e de sua organização, que constitui a estrutura da teoria (PATY, 2008, p.50).

De qualquer forma, muitos historiadores concordam que à época (os primeiros anos após 1905), “*não existia uma superioridade empírica da teoria da Relatividade, no sentido dela explicar algum dado que a teoria de Lorentz não conseguisse incorporar*” (VILLANI, 1981, p.6), ainda que exista uma profunda diferença conceitual entre elas (*ibid.*, p.7). De fato, até mesmo autores daquele contexto relatam sobre a equivalência entre as teorias (no sentido amplo) de Einstein e Lorentz-Poincaré. Um deles foi Max Von Laue¹⁷:

Preciso complementar que H. A. Lorentz modificou sua teoria em 1904, utilizando as experiências de Michelson e de Trouton e Noble, de forma a dar conta de todas as observações (...) *Não é possível, e isto de forma absoluta, decidir através da experiência, entre a teoria da Relatividade e a teoria de Lorentz completa* (apud VILLANI, 1981, p.7, grifos nossos).

Até mesmo Lorentz teria reconhecido que a epistemologia tem um papel central na diferenciação de sua teoria com a de Einstein (isto é, uma diferenciação a nível metacientífico), como ficou claro em seu discurso em uma conferência em 1913 sobre o tema (LORENTZ apud PAIS, 1995 [1982], p.193-4):

A aceitação destes conceitos [relativísticos] pertence sobretudo à epistemologia (...). É certo, contudo, que depende, em grande parte, do modo como seja mais atraído para uma ou outra interpretação. No que diz respeito ao conferencista [Lorentz], ele encontra certa satisfação nas interpretações mais antigas, de acordo com as quais o éter possui pelo menos alguma substância, o espaço e o tempo podem ser claramente separados, e podemos falar de simultaneidade sem mais especificações.

Conforme cita Hentschel (1990, p.171), alguns importantes historiadores e filósofos, como John Stachel e Arthur Fine, apontam que é um erro dizer que há “uma” teoria da relatividade

¹⁷Max von Laue (1879-1960), físico alemão.

(no sentido estrito, assim como é um erro dizer que há somente “uma” teoria quântica, isto é, uma interpretação desta teoria). De fato, existem várias interpretações daquilo que podemos chamar de *formalismo matemático mínimo* da teoria (no sentido amplo), que foram surgindo aos poucos e tendo as mesmas previsões e descrições empíricas. Segundo Stachel:

Assim como outro grande pilar da física teórica do século vinte, “a” teoria quântica, cada teoria da relatividade é na verdade um conjunto de variações de ideias físicas e formalismos matemáticos associados. Cada elemento do conjunto consiste de um núcleo de conceitos primários e princípios, e uma periferia composta de conceitos derivados, teoremas, modelos, etc. O conteúdo do núcleo e da periferia variam de interpretação a interpretação, e podem mudar com o tempo (...). Contudo, certas características são comuns a todos os elementos do conjunto, o que lhes dá direito a uma denominação comum (STACHEL, 1999, p.249).

O que poderia ser chamado de núcleo de conceitos primários e princípio da TRE? Como será discutido na seção seguinte, é possível encontrar esse núcleo dentro do formalismo matemático mínimo da teoria, presente em todas as formas de interpretação que existem e que podem surgir.

4.3 Formalismo matemático mínimo

Os filósofos da ciência Lucas e Hodgson (1990), estudando algumas das implicações filosóficas da TRE, ilustram em um denso diagrama (ver figura 4.1) um conjunto numeroso de derivações alternativas do formalismo da teoria. Como salientam, todas agregam as Transformações de Lorentz, seja como princípio, consequência ou argumento. O intuito do diagrama é ilustrar como estas compõem o “núcleo” do formalismo da teoria, apontado anteriormente por Stachel. Considerando o amplo quadro de derivações, a abordagem de Einstein é somente mais uma, embora relativamente mais simples do que grande parte das outras. Contudo, embora muito interessante do ponto de vista filosófico, esse diagrama segundo os autores pode fazer com que o “físico de profissão” se sinta exasperado, pois, segundo eles:

[p]ara ele, uma teoria é uma ferramenta a ser usada que o ajuda a entender o mundo, a fazer sentido os números que saem de suas medidas e a guiá-lo para futuros experimentos. Se uma teoria está funcionando bem, ele tende a não pensar muito e detalhadamente sobre sua justificação, exceto quando ele está dando aulas ou escrevendo um livro-texto. É apenas quando a teoria começa a falhar que ele irá começar escrutinar seus fundamentos com uma atenção inquieta. E até então a Teoria Especial [da Relatividade] não lhe falhou; seu sucesso é triunfante para qualquer precisão que ele consegue obter em suas medidas, e isso normalmente conta muito. Sendo assim ele é inclinado a

4.4 Interpretações do formalismo matemático mínimo

considerar todas essas derivações das Transformações de Lorentz como apenas brincadeira de filósofos ou físicos que lamentavelmente não conseguem pensar em nada melhor para fazer. (LUCAS & HODGSON, 1990, p.182)

Contudo, essa “*brincadeira de filósofos e físicos que lamentavelmente não conseguem pensar em nada melhor para fazer*” pode na verdade gerar um efeito oposto. Um “físico de profissão” mais paciente poderia, por exemplo, concluir do diagrama que as Transformações de Lorentz se comportam como uma “essência”, o que lhe daria uma “segurança racional” de que não é à toa que “as contas funcionam”. Isto é, segundo Lucas e Hodgson as transformações podem ser entendidas como um “requerimento racional” para outras visões de espaço, tempo e causalidade (*ibid.*, p.184). A exasperação pode ser atenuada por meio da compreensão que esse conjunto complexo de conceitos e seus diferentes usos pode ser entendido como um reflexo da coerência interna dessas diferentes formulações da teoria (*ibid.*, p.186)¹⁸.

Embora não tão conhecidas como os debates sobre as interpretações da física quântica, as discussões sobre interpretações das teorias da relatividade têm ganhado espaço em debates sobre os fundamentos do conhecimento científico. Pode-se entender como sinal disto a realização da primeira edição da conferência *Physical Interpretations of Relativity Theory (Interpretações Físicas da Teoria da Relatividade)*, organizada pela British Society for the Philosophy of Science, em 1988. A conferência se repetiu mais de uma dezena de vezes nos últimos anos. Ilustraremos em seguida as principais ideias de alguns estudos sobre as interpretações filosóficas da TRE e suas implicações.

4.4 Interpretações do formalismo matemático mínimo

A seguir ilustramos alguns trabalhos encontrados na literatura especializada que tratam das possíveis interpretações científico-filosóficas das teorias relativísticas. Essa breve revisão bibliográfica não pretende ser exaustiva, uma vez que existem diversos trabalhos sobre o tema em revistas especializadas, compêndios, anais de congressos, entre outros.

Estudando as diferentes abordagens presentes na história sobre o paradoxo do relógio (ou

¹⁸Existem também várias reformulações da TRE. Uma delas, em particular, é a *Doubly relativity*, teoria que tenta fundamentar transformações de coordenadas mais gerais do que aquelas de Lorentz de forma a manter invariante não só a velocidade da luz mas também o comprimento e o tempo de Planck. Ver Amelino-Camelia (2002). Para informações sobre outras teorias, ver: [http://en.wikipedia.org/wiki/Special_relativity_\(alternative_formulations\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Special_relativity_(alternative_formulations)), acessado dia 20/05/13.

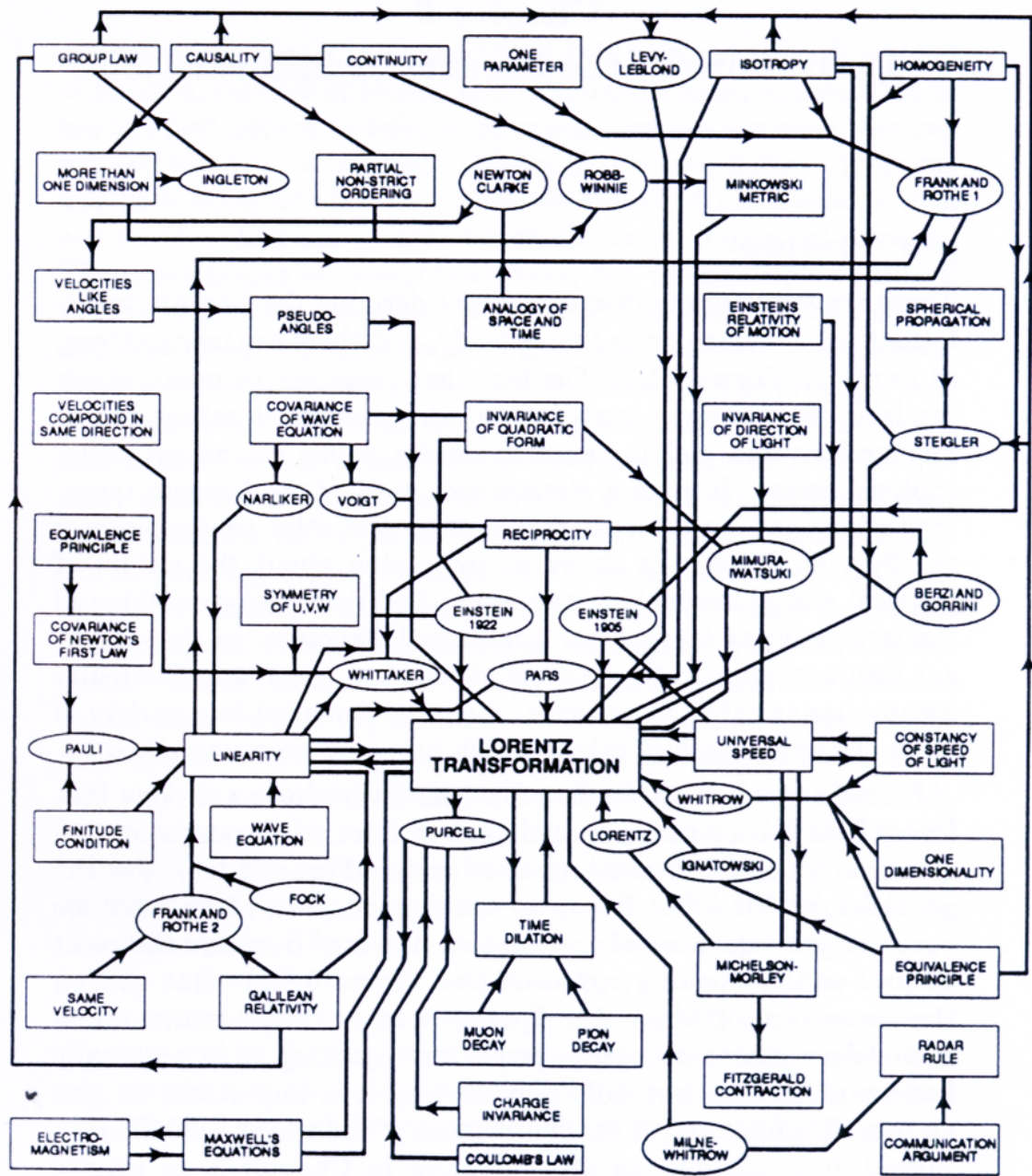


Figura 4.1: Diagrama de Lucas e Hodgson (1990, p.152). Trata-se de uma tentativa dos autores em ilustrar graficamente as diferentes formas de se derivar as equações de Lorentz. Os conceitos usados em cada derivação são ilustrados em boxes retangulares, já os autores estão em boxes elípticos. Lucas e Hodgson salientam que muitos conceitos, embora usados em derivações diferentes, têm interpretações diferentes, e que certamente há problemas em uma representação plana deste tipo. Um destes é o fato de um mesmo conceito aparecer em dois locais no diagrama (como “Princípio de Equivalência”).

4.4 Interpretações do formalismo matemático mínimo

paradoxo dos gêmeos), Szekely (2009) identifica e classifica algumas interpretações filosóficas distintas que se baseiam em diferentes considerações epistemológicas e ontológicas sobre os efeitos relativísticos: a “*abordagem matemático-platônica*”; a “*solução lorentziana-machiana*”; a “*interpretação instrumental-agnóstica*”, e a “*abordagem convencionalista*”. Usando as categorias presentes em Niiniluoto (1999), temos que a abordagem matemático-platônica se caracteriza por uma postura realista ontológica sobre o Espaço-Tempo, atribuindo a ele mais realidade que o mundo empírico diretamente sensível. A interpretação instrumental-agnóstica se aproxima de um Instrumentalismo (de teorias e entidades). A abordagem convencionalista, por considerar que “*a estrutura formal matemática da teoria física deixa espaço a interpretações e reformulações conceituais (um caso especial da tese da subdeterminação de Duhem e Quine)*” (SZEKELY, 2009, p.4), pode ser entendida como um Realismo Epistemológico “fraco”¹⁹. Szekely salienta que algumas destas abordagens traduzem filosoficamente a palavra “relativístico” em termos de “real” ou “aparente”, enquanto outras fazem uso de uma nova categoria ontológica, “relativamente real”. Conclui com seu estudo que as teorias relativísticas:

(...) deixam a porta aberta a um grande número de possíveis mundos [no sentido introduzido por Kuhn para diferenciar as visões de mundo de membros de comunidades com diferentes paradigmas] e o tratamento do paradoxo do relógio depende consideravelmente de qual destes se está conscientemente assumindo (*ibid*, p.7).

Pessoa Jr (2012) distingue duas grandes classes de interpretações da TRE: as interpretações einsteinianas, dominantes desde a 1ª Guerra Mundial, e as interpretações lorentzianas. Entre as interpretações einsteinianas, destaca: o “*relativismo relativístico*”, na qual se afirma que os processos relativísticos de contração e dilatação são reais mas dependem do referencial, isto é, são “relativamente reais”; o “*perspectivismo relativístico*”, na qual se afirma que o tamanho próprio e o tempo próprio é que são reais, sendo a contração espacial e dilatação temporal “efeitos de perspectiva” que surgem em razão do movimento relativo, e; o “*convencionalismo relativístico*”, interpretação na qual se defende que a tese de que a luz se propaga com a mesma velocidade é uma convenção arbitrária que não afeta as previsões empíricas da teoria. E entre

¹⁹Em uma situação onde existem várias teorias empiricamente equivalentes, nenhum experimento pode comprovar ou refutar definitivamente nenhuma delas. Frente a isto, podemos então entender que o convencionalista, conforme descrito por Szekely, não se compromete tanto com um Realismo Epistemológico (Realismo de Teorias), pois para ele não há indícios empíricos de que uma destas teorias “diz mais sobre a realidade” do que a outra. Assim, caso o convencionalista tenha em mãos somente estas duas teorias, qualquer crença de que o conhecimento sobre o mundo inobservável é possível fica comprometida.

as interpretações lorentzianas: “*relatividade relativa ao éter*”, interpretação na qual se defende a tese de um referencial inercial absoluto, aquele em repouso em relação ao éter, entidade universal que é responsável pelos efeitos de contração do espaço e mudança no ritmo de ciclos de medições de tempo, e; “*interpretação dinâmica das contrações e dilatações*”, que se propõem a descrever de forma “construtiva” os efeitos de contração do espaço e dilatação do tempo, a partir de considerações sobre a natureza da matéria (o que poderia incluir a física quântica), sem exigir um referencial privilegiado como na interpretação anterior.

Esta última, em especial, refere-se a interpretação do físico e filósofo Harvey Brown. Brown (2005) aponta fragilidades na estrutura das teorias de princípio (como a Termodinâmica e a TRE), e defende que uma compreensão mais plena dos fenômenos relativísticos deve vir por meio de uma teoria construtiva (como é a Mecânica Estatística para os fenômenos termodinâmicos), partindo da teoria quântica da matéria. Procurando abrir espaço para “explicações atômicas” dos fenômenos de contração e dilatação, Brown reinterpreta as noções de inércia, cinemática e dinâmica. As conclusões de seu trabalho ainda são pouco compreendidas, sendo relativamente bastante debatidas na literatura especializada atualmente.

Bain (2012) distingue ao menos duas interpretações básicas para a TRE: a “*interpretação substantivista do Espaço-Tempo*” e a “*interpretação dinâmica relacionista*” (*ibid.*, p.1-2). Cada uma tem um conjunto de premissas básicas próprias, que implicam em diferentes conclusões filosóficas acerca do status ontológico dos objetos e fenômenos físicos. A crença na existência no Espaço-Tempo de Minkowski²⁰ enquanto uma entidade independente é compartilhada pela primeira interpretação porém não pela segunda. Isto é, elas são, respectivamente, um Realismo Ontológico e um Antirrealismo Ontológico quanto ao Espaço-Tempo. Na interpretação substantivista, as contrações e dilatações relativísticas são meros efeitos cinemáticos “aparentes” (no sentido de serem sombras de um processo quadridimensional mais fundamental), enquanto que na interpretação relacionista eles são efeitos dinâmicos reais (*idem*). Segundo o autor, as interpretações são compatíveis com diferentes concepções sobre o tempo: a interpretação substantivista suporta o *Endurantismo* e o *Eternalismo*, já a interpretação relacionista suporta o *Perdurantismo* e o *Presentismo* (*ibid.*, p.3-5)²¹. Bain também distingue diferenças nas interpretações para a concepção filosófica de vir-a-ser (ou devir) (*ibid.*, p.9).

Mittelstaedt (2011), designando “interpretação” como um meio de conectar as expressões

²⁰Hermann Minkowski (1864-1909), matemático alemão.

²¹Uma discussão especializada sobre o debate da natureza do tempo pode ser encontrado em:

<http://plato.stanford.edu/entries/time/#PreEteGroUniThe>, acessado dia 25/2/13.

4.4 Interpretações do formalismo matemático mínimo

formais da teoria com os elementos da realidade física (*ibid.*, p.1668), de forma a tornar as primeiras menos não intuitivas, distingue duas interpretações básicas da TRE: *interpretação usual da troca de sinais luminosos*, e o que chama de *interpretação da ontologia relativística*. Primeiramente, Mittelstaedt atenta para o fato de que os resultados da teoria só são “não-intuitivos” em função de tomarmos certas hipóteses de forma tácita, como o Tempo e Espaço Absolutos. Em seguida, expõe as principais diferenças entre as interpretações. Para a interpretação usual da troca de sinais luminosos, “a teoria descreve a realidade física como aparece para nós, se nós a investigarmos por meio de troca de sinais luminosos”, o que, segundo Mittelstaedt, está longe de uma postura realista (*ibid.*, p.1670). Já na interpretação da ontologia relativística, se ataca as hipóteses tácitas de Espaço e Tempo Absoluto, de forma que ao abandoná-las, são elas justamente que se tornam hipóteses não intuitivas por não serem justificáveis racionalmente ou testadas empiricamente (*ibid.*, p.1671). Na ontologia relativística, os efeitos de dilatação do tempo e contração do espaço são “normais”, pois agora não há nada *a priori* que impeça que compreendamos intuitivamente estes efeitos.

Tonnellat (1971), com base em uma análise histórica e filosófica do princípio da relatividade, discute a questão das interpretações filosóficas da TRE. Primeiramente, Tonnellat defende que os observáveis comprimento espacial e intervalo temporal são grandezas mutiladas, incompletas (*ibid.*, p.255), e defende então que uma grandeza real na TRE é aquela que permanece invariante para todos os observadores (*ibid.*, p.254-255). Somente grandezas quadridimensionais têm essa propriedade. Logo, não poderíamos chamar mesmo os objetos cotidianos (como as mesas, pedras e cadeiras) de “reais”, a não ser que os consideremos em suas extensões em quatro dimensões (“quadrimesas”, “quadripedras” e “quadricadeiras”). Tonnellat ilustra o exemplo dos quadrivetores, que, em razão de sua estrutura intrínseca, são invariantes por definição (*idem*):

$$\mathbf{A} = A^\mu \mathbf{e}_\mu = A_\mu \mathbf{e}^\mu,$$

As componentes contravariantes e covariantes, A^μ e A_μ respectivamente, não são invariantes, e portanto não são reais mas apenas aparentes, projeções (“sombras”) do quadrivetor \mathbf{A} , invariante por Transformações de Lorentz. Essa interpretação Tonellat chama de “*realista*”. Também destaca outra interpretação, a *positivista*, na qual se defende que as grandezas observadas (comprimentos espaciais e intervalos temporais), assim como suas eventuais modificações em diferentes referenciais, são reais, pois são as únicas grandezas que são efetivamente acessíveis a nós (isto é, pelo fato de que não observamos diretamente objetos quadridimensionais) (*ibid.*, p.258).

Um importante estudo sobre interpretações históricas e filosóficas das teorias da relatividade é feito por Hentschel (1990). Com base em uma volumosa quantidade de documentos históricos, assim como de textos contemporâneos de cientistas e filósofos sobre as teorias, Hentschel identifica inúmeras interpretações dos formalismos matemáticos das teorias relativísticas que foram surgindo desde as suas publicações entre 1905 e 1915, muitas vezes baseadas em correntes filosóficas já consolidadas como o Convencionalismo, Empiricismo Lógico, Neokantismo, entre outras. Entre as vantagens de se estudar as interpretações da teoria, Hentschel cita o fato de que muitos interpretadores esclareceram muitas das facetas da teoria, ajudando a compreender seu significado assim como suas raízes históricas e desenvolvimentos. Cita os exemplos:

O operacionalismo de Bridgman²² focou sobre a definição operacional de Einstein da simultaneidade de eventos distanciados; o neokantismo de Cassirer enfatizou a mudança conceitual na constituição dos objetos físicos - não mais substâncias (materiais) clássicas, mas invariantes (matemáticos) formais do cálculo tensorial. Poincaré e os convencionalistas ajudaram a perceber a existência e a compreender o significado das convenções livres, por exemplo, na descrição da geometria do espaço; empiristas lógicos, mais além, clarificaram o relacionamento complexo entre termos teóricos e asserções observacionais, regras de correspondência e várias questões de base de teorias. Muitos grupos também propuseram as razões pelas quais a relatividade de Einstein foi historicamente preferida às suas alternativas. (*ibid*, p.174)

Além disso, as limitações de cada interpretação também podem ser bastante enriquecedoras para compreender ainda mais elementos das teorias relativísticas. Entretanto, como Hentschel salienta, não se pode chamar qualquer estudo filosófico sobre as teorias de “interpretação”. Depois de analisar inúmeras interpretações que surgiram entre os anos 1910 e 1930, Hentschel elenca pré-condições para interpretações, entre elas: modéstia, mente aberta e compreensão da linguagem matemática por parte do intérprete; boa vontade do intérprete em rever suas próprias hipóteses filosóficas; não transcender o papel de uma interpretação filosófica ao criticar os métodos, objetivos e resultados das teorias científicas, e; estudar interpretações rivais, ainda que não se concorde com elas (*ibid*, p.176-7). Segundo Hentschel, essas pré-condições podem ajudar a evitar distorções sobre as teorias, e também aquilo que chama de “*relativismo interpretacional*” (*ibid*, p.178), isto é, o “vale tudo” em termos de interpretações.

Diferentemente de Hentschel, cujas pré-condições se mostram rigorosas e necessárias aos propósitos de seu trabalho, elencaremos apenas dois critérios centrais, mais simples, daquilo que chamaremos aqui de “interpretação”: *equivalência empírica* (no sentido da equivalência

²²Percy Williams Bridgman (1882-1961), físico estadunidense.

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

de previsões e descrições empíricas), e; *equivalência matemática* (no sentido de que tudo que pode ser derivado de uma interpretação pode ser pelas outras). Neste trabalho o cumprimento desses dois critérios não serão “demonstrados” propriamente para cada interpretação discutida, e sim tomados como contemplados. De forma ainda mais geral, será considerado neste trabalho a noção de interpretação como um conjunto de teses que se agrega ao formalismo matemático mínimo de tal forma que não se afeta as previsões observacionais. Como salientado por Pessoa Jr (2003) em um trabalho sobre as interpretações da física quântica, essas teses em geral fazem afirmações sobre a realidade além dos fenômenos observados ou impõem normas sobre inadequações de se fazer tais afirmações.

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

Dentro do conjunto de possíveis interpretações da TRE, elencamos somente três interpretações básicas (e de certa forma, simplificadas do ponto de vista filosófico) para discussão neste trabalho: a *interpretação operacionalista de Einstein*, característica em seu “artigo fundador” de 1905; a *interpretação dinâmica de Lorentz e Poincaré*, enraizada na ideia do éter e na compressão material real dos objetos em movimento absoluto, e; a *interpretação substantivista do Espaço-Tempo de Minkowski*, baseada na concepção do Espaço-Tempo enquanto uma entidade universal fundamental, real e independente. As interpretações de Lorentz e Poincaré serão analisadas separadamente em um primeiro momento, por terem surgido em momentos diferentes (embora muito próximos historicamente). Claramente, não se pretende esgotar as discussões sobre essas interpretações, que a rigor se mostram extremamente complexas do ponto de vista conceitual e filosófico. A ordem de apresentação segue a ordem de publicação de artigos centrais dos autores nos quais se encontram características de sua própria interpretação do formalismo matemático mínimo da teoria. Para expor as principais características de cada interpretação, faremos uso de uma abordagem histórica e das categorias filosóficas discutidas no capítulo anterior.

Em geral, historiadores reconhecem que a TRE foi uma construção conjunta, de vários cientistas e pensadores, que levou certo tempo até ser criada e desenvolvida (MARTINS, 2012, p. 45; DARRIGOL, 1996). Um estudo minucioso da história da TRE e suas interpretações não pode, na maioria dos casos, ser dissociado de estudos da história da óptica, da eletricidade e do

magnetismo e de outras áreas da física, principalmente durante o século XIX (MILLER, 1981; DARRIGOL, 2000). Assim feito, pode-se elucidar que aquilo que hoje chamamos de TRE, em toda sua robustez, não nasceu pontualmente no trabalho de Einstein, mas sim teve uma longa fase de gestação e desenvolvimento, que contou com o esforço de muitos outros estudiosos da época, como apontado anteriormente. Como afirma Battimelli (2005) sobre o contexto de desenvolvimento da teoria:

Desde os esforços de Planck para esclarecer as questões fundamentais da teoria e em defendê-la de resultados experimentais contrários, porém duvidosos, passando pela construção de uma roupagem formal nova por Minkowski, chegando ao surgimento dos primeiros livros didáticos por von Laue na Alemanha e por Lewis e Tolman nos Estados Unidos, houve um esforço intrincado de muitas pessoas, nem sempre querendo dizer exatamente a mesma coisa, por certas vezes tentando carregar o mesmo sentido físico por diferentes linguagens, e por outras chamando pelo mesmo nome e encorpendo em um mesmo formalismo construções conceituais complementemente diferentes (*ibid.*, p.115).

Não somente Planck, Minkowski²³ e tantos outros estudiosos que contribuíram posteriormente para o desenvolvimento da teoria, mas também os grupos de pessoas que foram importantes para a gênese da TRE também devem ser minimamente mencionados. Em particular, os estudiosos dos fenômenos ópticos de corpos em movimento dos séculos XVIII e XIX compõem um desses grupos. Grosso modo, as tentativas de evidenciar o movimento absoluto da Terra por experimentos ópticos, aliadas ao auge do surgimento e desenvolvimento das teorias eletrodinâmicas em meados do século XIX, são alguns dos principais elementos que preparam o palco para a construção das teorias relativísticas.

Considerando que existem diferentes abordagens historiográficas, podemos dizer, de certa forma, que existem diferentes histórias das origens e dos desenvolvimentos da TRE. Darrigol (2004) fornece um exemplo disto. Em algumas “querelas históricas”, como as infrutíferas disputas de prioridade, os interesses e as metodologias dos historiadores da ciência podem fazer com que se tenha conclusões diferentes para um mesmo episódio histórico (*ibid.*, p.625). Darrigol distingue quatro “tendências” entre historiadores: *gradualista*, isto é, a tendência em maximizar as conexões entre ideias de diferentes personagens históricas, de modo que a sequência de fatos históricos pareça mais natural; *transculturalista*, ou, a tendência em analisar as condições externas ao cerne do episódio histórico estudado, visando identificar manifestações de um mesmo “fenômeno” em diferentes contextos; *construtivista*, ou, a tendência de se considerar que a rede sócio-intelectual no qual uma personagem está inserida determina parcialmente

²³Hermann Minkowski (1864-1909), matemático alemão.

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

seu trabalho científico, e; *cognitivista*, isto é, a tendência na qual se enfatiza a habilidade da personagem em dar “saltos cognitivos”, “não intuitivos” em situações de adversidade (*idem*).

Holton (1973) também distingue diferentes formas de se entender as origens da TRE. Segundo Holton, os estudos históricos sobre o episódio tendem a se enquadrar em duas grandes classes: *ruptura* com os trabalhos dos antecessores de Einstein, e *continuidade* com os trabalhos que estavam já em ação na época, por Lorentz e Poincaré e outros (*ibid.*, p.166). É de notar que essa tensão (que Holton traduz também como *descontinuidade metodológica* × *desenvolvimento histórico contínuo*) não transcende uma forma “internalista” (isto é, bastante ligada aos conceitos científicos) de entender pré-história da teoria, no sentido de que ela não agrega fatores externos como contextos políticos, econômicos e culturais da época.

Resumir o enorme conjunto de fatos que de alguma forma contribuíram historicamente para a gênese e desenvolvimento da TRE foge do escopo deste trabalho. Procurou-se trazer, mesmo que sumariamente, alguns dos principais elementos da pré-história da teoria, com o intuito de resgatar algumas raízes históricas conceituais e filosóficas de suas interpretações. Discutem-se brevemente os desenvolvimentos da óptica e da eletrodinâmica dos corpos em movimento no século XIX. Outras questões igualmente importantes, como o contexto social, político e cultural circundante à ciência, são também discutidas sucintamente nas seções destinadas às interpretações. Em termos das tendências expostas por Darrigol (2004), pode-se dizer fazemos neste trabalho uma combinação delas, não necessariamente privilegiando uma ou outra abordagem globalmente, mas sim enfatizando uma ou outra localmente em função do assunto em questão.

A justificativa básica de se estudar as interpretações (suas origens e desenvolvimentos históricos) é ver nelas possíveis formas de introduzir o dRAC no ensino de TRE, uma vez que elas carregam fortes características deste debate. No capítulo 5, foi possível notar com base nas análises realizadas que algumas características das interpretações se manifestam entre estudantes de física. Partindo da defesa da inclusão de tópicos não consensuais da NdC no ensino de ciências, pode-se traçar alguns subsídios de como esse interessante debate filosófico pode ser abordado no ensino de ciências básico ou superior, contribuindo para um ensino mais enriquecedor *sobre a Ciência*.

4.5.1 A tradição francesa na óptica dos corpos em movimento

4.5.1.1 Aberração estelar, experimento de Arago e a hipótese de arrasto parcial de Fresnel

É notável que muitos cientistas envolvidos com estudos da óptica dos corpos em movimento nos séculos XVIII e XIX eram franceses. Isto possivelmente está conectado à superioridade da ciência francesa nos primeiros anos do século XIX, e também à forma como a ciência foi (tardiamente) institucionalizada na França. Após os “anos agitados” da Revolução Francesa, a chamada era napoleônica foi profícua do ponto de vista científico-experimental quando comparada com outros “centros científicos” ingleses e alemães (PESSOA JR, 2001, p.3-5). Cabe mencionar que a importante (e famosa) *École Polytechnique*, instituição direcionada à formação da elite intelectual e militar da França, foi fundada em 1794, não tinha equivalentes nos (recém independentes) Estados Unidos, na Grã-Bretanha ou nos Reinos Prussianos (GALISON, 2003, p.51). Em especial, a tradição científica francesa do início do século XIX ficou marcada historicamente em razão da influência da chamada escola de Laplace²⁴, caracterizada principalmente pelo reducionismo da física à abordagem newtoniana de forças centrais. Por volta de 1830 a ciência francesa, principalmente no que se refere à ciência matematizada e teórica, mostrou-se decadente quando comparada aos outros centros científicos europeus. A tradição francesa passou a ser caracterizada pela valorização ao trabalho experimental (possivelmente uma influência do “espírito positivista”, que concretizou-se anos depois nos trabalhos de Comte²⁵) feito por “experimentalistas solitários” e seus poucos auxiliares.

O interesse pelos estudos de óptica pelos franceses era enorme, e só estavam abaixo da Mecânica Celeste em uma hierarquia teórica (PIETROCOLA, 1994, p.46). De forma geral, como afirma Pietrocola (*ibid.*, p.49), os resultados obtidos dos estudos sobre a óptica dos corpos em movimento parecem ter sido fundamentais para o desenvolvimento das teorias eletrodinâmicas dos corpos em movimento a partir da segunda metade do século XIX, sendo algumas destas precedentes quase imediatas à TRE²⁶. Paralelamente à realização dos experimentos, houve debates acerca da natureza da luz, da matéria e também do éter (MILLER, 1983, p.14).

Como aponta Miller (1981, p.14), grande parte das pesquisas sobre a óptica dos corpos

²⁴Pierre Simon Marquis de Laplace (1749-1827), matemático e astrônomo francês

²⁵Isidore Auguste Marie François Xavier Comte (1798-1857), filósofo francês.

²⁶É importante mencionar que outros vários e importantes experimentos ópticos, além dos que serão discutidos, foram realizados neste mesmo período (MARTINS, 2012a; PIETROCOLA, 1994; TONNELAT, 1971).

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

em movimento no século XIX se concentrava sobre três principais pontos: (i) o fenômeno da aberração estelar; (ii) a forma de propagação das ondas de luz, e; (iii) a relação entre a matéria ponderável e o éter. O fenômeno de aberração estelar foi observado e estudado por James Bradley e alguns colaboradores entre os anos 1725 e 1729, ao notar um efeito que dependia do movimento da Terra ao redor do Sol sobre a luz proveniente das estrelas “fixas”.

A existência deste efeito não concordava com as previsões da paralaxe estelar (PIETROCOLA, 1993, p.158). Com base no sistema heliocêntrico, na mecânica newtoniana e implicitamente na teoria corpuscular da luz (MARTINS, 2012a, p.57), Bradley propôs explicar o fenômeno, considerando para isso que a velocidade da luz era finita. Suas conclusões foram de que as velocidades dos feixes de luz proveniente das estrelas aparentavam ser as mesmas, independente da distância delas da Terra (MILLER, 1981, p.15)²⁷. À época, a teoria ondulatória de Huygens, baseada na ideia de um meio etéreo luminífero de propagação, se mostrava deficiente para interpretar o fenômeno de aberração (PIETROCOLA, 1993, p.161). O interesse pelo estudo deste fenômeno voltou na virada para o século XIX.

A história da óptica no início do século XIX ficou marcada, entre outros fatores, pelo retorno do interesse aos debates acerca da natureza da luz e pela proposta de éter luminífero estacionário por Thomas Young²⁸ em 1804. Young elaborou sua hipótese da natureza ondulatória da luz com base em suas pesquisas sobre interferência luminosa, realizadas a partir de 1802, e com ela propôs uma explicação ao fenômeno de aberração estelar, argumentando que o meio luminífero permearia os corpos materiais com pouca ou nenhuma resistência (MILLER, 1981, p.15). O éter de Young seria universal e estacionário, estando em repouso “com relação a si mesmo”, de forma que a Terra e outros corpos celestes o atravessam em razão de seus movimentos. Inicialmente Young acreditava que as ondas luminosas oscilavam longitudinalmente na direção de propagação pelo éter. Contudo, após estudar o comportamento da luz em meios birrefringentes, passou a defender que as ondas luminosas oscilavam transversalmente (PESSOA JR, 2001, p.11).

Como Pietrocola (1993) aponta, essa grande separação temporal entre as observações de Bradley e a hipótese de Young se deve à forte resistência aos trabalhos que seguiam a tradição de Huygens (isto é, teorias ondulatórias da luz), sendo que “*os próprios trabalhos de Young foram*

²⁷Bradley também realizou medidas da velocidade da luz que estavam em bom acordo com as medidas do astrônomo dinamarquês Ole Rømer (1644-1710) feitas anos antes por meio de eclipses dos satélites de Júpiter (MILLER, 1981, p.15)

²⁸Thomas Young (1773-1829), médico, matemático e egiptólogo inglês.

fortemente criticados na Inglaterra por partidários da teoria corpuscular que dominavam o cenário científico da época” (*ibid.*, p.161). Ainda que existisse um grande apoio à concepção corpuscular newtoniana, muitos trabalhos críticos a essa visão surgiram a partir da década de 1740 (entre eles um tratado de Euler²⁹ com base na concepção ondulatória), abalando seus alicerces conceituais (MOURA, 2008, p.172-6).

No mesmo período na França, impulsionados pelo programa reducionista de Laplace³⁰, os franceses Arago e Biot³¹ se propuseram e repetir experimentos que supostamente evidenciavam o fenômeno de aberração. A possibilidade de que a velocidade da luz das estrelas se propagava de forma constante no espaço ameaçava a teoria corpuscular (pois os valores de velocidade medidos na Terra deveriam variar, segundo a mecânica de Newton, em função do movimento do planeta), e logo o programa laplaciano. Em um experimento óptico realizado em 1806, obtendo medidas da velocidade por meio de refração da luz de várias estrelas, Biot e Arago confirmam a “constância da velocidade da luz” das estrelas “fixas”, apresentando o resultado na Academia de Ciências de Paris (PIETROCOLA, 1993, p.162). Sobre o resultado, Arago registrou posteriormente:

[A] luz move-se com a mesma velocidade, quaisquer que sejam os corpos de onde ela emana, ou que ao menos, se existem algumas diferenças, elas não podem, de nenhuma maneira, alterar a exatidão das observações astronômicas (ARAGO *apud idem*).

Em 1810, Arago realizou outros experimentos ópticos, procurando verificar o “princípio de Newton” (o que chamamos hoje de soma newtoniana-galileana de velocidades) por meio de desigualdades nas refrações da luz proveniente de estrelas ao passar por um prisma. Se houvesse essas desigualdades nas refrações, haveria desigualdade nas medidas de velocidade em razão ao movimento relativo da Terra com relação às estrelas. Os efeitos seriam de primeira ordem da razão v/c (PIETROCOLA, 1993, p.162). Arago não encontrou desigualdades nas refrações, isto é, obteve resultados “nulos”, o que fragilizava a concepção corpuscular da luz. Além disso, esse resultado também fragilizava a hipótese do éter luminífero estacionário de Young. Pode-se entender que, a partir de então, as portas começavam a se abrir para novas concepções ondulatórias da luz e teorias sobre o éter (*ibid.*, p.163).

Segundo Miller, em meados da década de 1810 Arago contatou Fresnel, que também já tinha realizado experimentos ópticos semelhantes, indagando-lhe se “*as observações poderiam*

²⁹Leonhard Paul Euler (1707-1783), matemático suíço.

³⁰Sobre o programa de Laplace, ver Pessoa Jr (2001).

³¹Jean-Baptiste Biot (1774-1862), matemático e astrônomo francês.

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

ser conciliadas mais facilmente com a teoria na qual a luz é considerada como sendo vibrações em um fluido universal” (ARAGO *apud* MILLER, 1981, p.16). Assim, durante os anos seguintes Fresnel desenvolve sua teoria ondulatória da luz, na qual, por hipótese, o éter (a princípio estacionário, como na teoria de Young) é parcialmente arrastado pela velocidade dos corpos ponderáveis. Acreditava ainda que a diversidade de outros fenômenos, como a eletricidade e o calor, poderiam ser explicados em um único fluido imponderável etéreo, ideia oposta àquela associada ao programa laplaciano de vários fluidos (PESSOA JR, 2001, p.12).

Por um lado, a teoria de Fresnel dava conta dos resultados encontrados por Arago, pois o movimento com relação ao éter acarretaria no acúmulo deste nos corpos, compensando a refração da luz de forma que não se verificasse desigualdades de refração e velocidade (DARRIGOL, 2000, p.315). E por outro lado, a hipótese do arrasto parcial do éter de também dava conta do fenômeno de aberração (o que não se tinha conseguido com a teoria corpuscular), dando novo fôlego às teorias ondulatórias (PIETROCOLA, 1993, p.165). Basicamente, segundo Fresnel, a velocidade da luz c' que se propaga dentro de um corpo, que se move com velocidade v em relação ao éter luminífero, seria dada por:

$$c' = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v, \quad (4.1)$$

sendo n é o índice de refração do corpo e c a velocidade da luz no éter sem arrasto. Como salienta Miller (1981), de acordo com a hipótese de Fresnel a velocidade da luz não obedecia a regra newtoniana de adição de velocidades (*ibid.*, p.18), isto é, sua teoria não era compatível com uma Teoria de Emissão da luz.

A teoria de Fresnel se mostrou profícua em interpretar os fenômenos ópticos à época, mas não era isenta de fragilidades internas. Uma delas advinha da exigência de oscilações transversais das ondas luminosas no éter. Só se conhecia propagações transversais em meios sólidos, e isso implicava que o éter de Fresnel deveria ser ao mesmo tempo rígido (para propagar ondas longitudinais) e elástico (em razão do arrastamento parcial) (PESSOA JR, 2001, p.13). Outra fragilidade era a dependência da quantidade de éter arrastado com o comprimento de onda da luz propagada. O próprio Fresnel se mostrou inseguro quanto ao raciocínio empregado na construção de sua fórmula. Segundo Pietrocola (1993), Fresnel apelava para que não se desse “*importância literal ao arrastamento do éter enquanto “substância”, mas que se considerasse apenas o arrastamento das ondas luminosas, representado pela fórmula de velocidades*” (*ibid.*, p.169).

Ademais as reservas de Fresnel quanto à própria teoria, ela não era isenta de críticas de

outros estudiosos. Do outro lado do Canal da Mancha, Stokes³² propôs em 1845 um modelo em que o éter luminífero era completamente arrastado pelo movimento da Terra (DARRIGOL, 2000, p.315), também conhecido como o modelo do “éter viscoso” de Stokes. A ideia de que uma grande quantidade de massa como a Terra fosse parcialmente permeável ao éter não agradava Stokes, que considerava a hipótese do arrasto parcial uma “hipótese violenta”. A teoria de Stokes, assim com a de Fresnel, dava conta de explicar tanto o fenômeno de aberração com os experimentos de Arago em primeira ordem de v/c , e também vários outros (MARTINS, 2012a). Sua teoria era mais popular entre os britânicos, e permaneceu assim anos depois quando físicos britânicos perceberam que a teoria eletromagnética da luz de Maxwell a suportava (*idem*). Acerca da impossibilidade de se detectar a velocidade da Terra com relação ao éter, Stokes pronunciou em 1846: “*Embora a Terra se mova através do éter e a luz seja transmitida pelo éter, os fenômenos ópticos, reflexão, refração e propagação retilínea, não permitem detectar esse movimento*” (STOKES *apud* MARTINS, 2012a, p.63). Anos mais tarde, Lorentz provou teoricamente que as hipóteses do éter de Stokes levavam a inconsistências.

4.5.1.2 Experimento de Fizeau, o “Princípio da Relatividade” de Mascart e o “celeuma óptico” no fim do século XIX

Como salientam Darrigol (2000, p.315) e Miller (1981, p.18), em 1851 Fizeau³³ obteve importantes resultados experimentais que corroboraram a hipótese de Fresnel. Estas experiências tinham como objetivo decidir a mais plausível hipótese acerca das relações entre o éter e corpos ponderáveis em movimento, entre as várias que existiam na época, como as de Fresnel e Stokes (PIETROCOLA, 1993, p.169). Estudando a influência da velocidade de um meio (no caso do experimento, água corrente) sobre a velocidade da luz medida no laboratório, Fizeau concluiu que os valores calculados para o arrasto a partir dos valores experimentais de velocidade eram muito próximos do valor do coeficiente de arrasto previsto pela teoria de Fresnel, sendo “quase idênticos” (FIZEAU *apud ibid.*, p.16). Contudo, enquanto a hipótese de Fresnel era bastante aceita na Europa continental (DARRIGOL, 2000, p.316), a confiança nos resultados de Fizeau não era tão grande no Reino Unido. A teoria de Stokes poderia ser modificada de forma a incluir esses resultados, mas isso a tornaria tão complexa quanto a teoria de Fresnel (*ibid.*, p.315). Entretanto, o próprio Fizeau questionou a capacidade de seus experimentos em confirmar a teoria

³²George Gabriel Stokes (1819-1903), matemático irlandês.

³³Armand Hyppolite Louis Fizeau (1819-1896), físico francês.

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

de Fresnel, e fez uma ressalva sobre o conteúdo conceitual de sua hipótese central:

O sucesso desta experiência parece-me resultar na adoção da hipótese de Fresnel, ou ao menos na lei que ele encontrou para exprimir a modificação da velocidade da luz pelo efeito do movimento dos corpos; pois ainda que esta lei seja considerada verdadeira, e forneça uma prova muito forte em favor da concepção da qual ela é somente uma consequência, talvez a concepção de Fresnel parecerá tão extraordinária, e, sob algumas relações, tão difícil de admitir, que exigirá ainda outras provas e um exame aprofundado da parte dos geômetras (matemáticos), antes de adotá-la como a expressão da realidade das coisas (FIZEAU *apud ibid.*, p.169-70).

Anos mais tarde, Eleuthère Mascart, seguidor da tradição de estudiosos franceses como Arago, Fresnel e Fizeau na investigação dos efeitos ópticos visíveis devido ao movimento da Terra em relação ao éter. Realizou experimentos durante década de 1860 visando identificar efeitos ópticos em razão do movimento orbital da Terra para fontes terrestres, para o Sol ou para a luz das estrelas distantes. Obteve, em todos os casos, “*resultados nulos*” (DARRIGOL, 2000, p.316), isto é, o movimento da Terra não causava efeitos ópticos. Por estas razões e por suas análises teóricas de modelos da época, conclui, em sua monografia *Modificações experimentadas pela luz devido ao movimento da fonte de luz e ao movimento do observador*³⁴ de 1874:

A conclusão geral dessa Memória será, portanto, [...] que o movimento de translação da Terra não tem nenhuma influência apreciável sobre os fenômenos de óptica produzidos com uma fonte terrestre ou com a luz solar, que esses fenômenos não nos dão um meio de apreciar o movimento absoluto de um corpo e que os movimentos relativos são os únicos que podemos atingir (*apud* MARTINS, 2012a, p.67, grifos nossos).

Juntamente com Veltmann³⁵, Mascart foi capaz de provar teoricamente que a hipótese de Fresnel, aliada aos princípios de Huygens³⁶ e de Doppler³⁷, implicava na incapacidade de se determinar opticamente a velocidade da Terra para primeira ordem de v/c . Ainda mais posteriormente, Mascart notou, contudo, que as explicações com base na hipótese de Fresnel não eram suficientes em alguns casos, como no estudo dos meios birrefringentes (que exigiam como explicação dois coeficientes de arrasto) (DARRIGOL, 2000, p.316).

³⁴Título original em francês: *Modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur.*

³⁵Wilhelm Veltmann (1832-1902), físico experimental alemão.

³⁶Christiaan Huygens (1629-1695), matemático, astrônomo e horologista holandês.

³⁷Christian Andreas Doppler (1803-1853), matemático austríaco.

Já no final do século XIX, os estudos experimentais sobre a óptica dos corpos em movimentos ficaram marcados pelos famosos experimentos interferométricos de Michelson. Os interferômetros, instrumentos inventados pelo próprio Michelson, trouxeram uma nova perspectiva experimental à óptica dos corpos em movimento. Em 1881 tentou medir a velocidade da Terra com relação ao éter, sem encontrar resultados satisfatórios. Foi incentivado a repetir seu experimento, e assim o fez em 1887. Em especial, os resultados do experimento interferométrico de Michelson e Morley de 1887 (que serão discutidos com mais detalhes nas seções posteriores), sensível para variações em segunda ordem de v/c (diferentemente dos experimentos de Fizeau, Arago e Mascart), foram aguardados com ansiedade pela comunidade científica à época. Seus resultados (“negativos” no sentido de se tentar verificar uma evidência óptica do movimento da Terra com relação ao éter) instauraram um celeuma científico: com os resultados do experimento de Fizeau e Arago (primeira ordem em v/c), corroborava-se a teoria de Fresnel e refutava-se as teorias de éter totalmente arrastado e éter estacionário (como as de Stokes e Young, respectivamente); com os resultados dos experimentos de Michelson e Morley de 1887 (segunda ordem em v/c), corroborava-se a teoria de éter totalmente arrastado (como a de Stokes) e refutava-se a teoria de Fresnel. Era esperado que todos os experimentos corroborassem uma mesma teoria, independentemente da ordem v/c em questão.

Esse “celeuma óptico” era também, na verdade, um “celeuma eletromagnético”, pois por volta de 1887 já havia consenso de que os fenômenos ópticos se reduziam a fenômenos eletromagnéticos. Como será visto em seções posteriores, os resultados dos experimentos de Michelson e Morley motivaram fortemente Lorentz, em especial, a elaborar uma teoria eletrodinâmica dos corpos em movimento que fosse capaz, ao mesmo tempo, de explicar satisfatoriamente os resultados experimentais em primeira e segunda ordem de v/c . O importante trabalho de Lorentz, que se encontra em uma intersecção das tradições científicas alemã e britânica da época, não seria possível sem o extraordinário desenvolvimento das teorias eletrodinâmicas e da óptica experimental ao longo do século XIX.

A tabela 4.1 sintetiza as relações dos resultados experimentais ópticos comentados acima em confronto com as previsões teóricas de algumas diferentes teorias de éter até o fim do século XIX (TONNELAT, 1971, p.92-3; PANOFSKY & PHILLIPS, 2005 [1955], p.282). Nas primeiras linhas da tabela, α é o coeficiente de arrasto do éter. Para as teorias corpusculares de propagação, não fazia sentido falar em arrasto do éter, sendo que para estas, portanto, $\alpha = 0$. Nas colunas, n é o coeficiente óptico de refração, ou, a razão entre as velocidades de propa-

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

gação da luz dentro do material e a velocidade com relação ao éter. Nota-se que, até antes do experimento de Michelson e Morley em 1887, somente a teoria de Fresnel não apresentava discordâncias com experimentos.

	Propagação ondulatória, teorias de éter não arrastado. Coeficiente de arrasto: ($\alpha = 0$).	Propagação ondulatória, teorias de éter parcialmente arrastado. Coeficiente de arrasto: $\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$	Propagação ondulatória, teorias de éter totalmente arrastado. Coeficiente de arrasto: $\alpha = 1$	Propagação corpuscular. Coeficiente de arrasto: $\alpha = 0$.
Aberração estelar (primeira ordem em v/c)	Para $n \neq 1$, discordância com o observado. Para $n = 1$, concordância com o observado.	Para $n \neq 1$, concordância com o observado. Para $n = 1$, concordância com o observado.	Para $n \neq 1$, discordância com o observado. Para $n = 1$, discordância com o observado.	Para $n \neq 1$, discordância com o observado. Para $n = 1$, concordância com o observado.
Experimento de Fizeau (1851) (primeira ordem em v/c)	Para $n \neq 1$, discordância com os resultados experimentais.	Para $n \neq 1$, concordância com os resultados experimentais.	Para $n \neq 1$, discordância com os resultados experimentais.	Para $n \neq 1$, discordância com os resultados experimentais.
Experimento de Michelson (1881) (primeira ordem em v/c)	Para $n = 1$, discordância com os resultados experimentais.	Para $n = 1$, concordância com os resultados experimentais.	Para $n \neq 1$, concordância com os resultados experimentais.	Para $n = 1$, concordância com os resultados experimentais.
Experimento de Michelson e Morley (1887) (segunda ordem em v/c)	Para $n = 1$, discordância com os resultados experimentais.	Para $n = 1$, discordância com os resultados experimentais.	Para $n = 1$, concordância com os resultados experimentais.	Para $n = 1$, concordância com os resultados experimentais.

Tabela 4.1: Relação de alguns resultados experimentais ópticos até o fim do século XIX em confronto com as previsões teóricas de diferentes teorias de éter. Adaptado de Tonnelat (1971, p.92-3) e Panofsky e Phillips (2005 [1955], p.282).

4.5.2 As tradições britânica e germânica na eletrodinâmica dos corpos em movimento

4.5.2.1 Forças à distância \times Ação contígua por campos

Como apontam Galison (2003, p.23-4) e Battimelli (2005, p.111), a segunda metade do século XIX foi, tanto para a ciência como para sociedade europeia, a época do triunfo da Termodinâmica e do Eletromagnetismo. Inovações tecnológicas como o dínamo, luz elétrica, trens elétricos, bondes e telégrafos alteraram consideravelmente o perfil das cidades, gerando também grandes mudanças no cotidiano dos cidadãos de grandes metrópoles. Assim, não sem

motivos que foi durante esta época que surgiram e floresceram diversas teorias e modelos sobre os fenômenos elétricos e magnéticos. Nesta seção descreveremos parcialmente o contexto científico que precedeu Hendryk Antoon Lorentz, considerado um dos grandes físicos teóricos do final do século XIX. Lorentz elaborou na virada para o século XX uma importante teoria eletrodinâmica dos corpos em movimento, que mais tarde foi fundamental às origens da TRE.

Na segunda metade do século XIX, a comunidade científica alemã assistiu a um debate sobre as teorias de forças centrais à distância, no qual se destacaram as figuras de Weber³⁸, Helmholtz³⁹ e Hertz⁴⁰. Já na Grã-Bretanha, os estudos sobre a dinâmica do éter e campos de ação contígua foram intensos até o início do século XX, principalmente por pesquisadores da Universidade de Cambridge, como Stokes⁴¹, Maxwell e Larmor⁴². A tradição científica britânica remonta aos trabalhos de Faraday⁴³, realizados a partir da segunda década do século XIX, e se baseavam fortemente na ideia de um meio universal etéreo, vista com ceticismo por muitos cientistas alemães. Já a tradição científica alemã partiu da concepção de fluidos elétricos, que remonta aos trabalhos de Weber, Gauss e outros, considerada “atrasada” pelos cientistas britânicos. Lorentz, como será discutido, levou a até certa altura uma espécie de fusão entre algumas características destas duas tradições, considerando ao mesmo tempo um éter imponderável que transmitiria as ações eletromagnéticas e também “átomos de eletricidade” (que chamou primeiro de *partículas carregadas* em 1892, *ions* em 1895 e depois *elétrons* em 1899) que seriam responsáveis por essas ações (DARRIGOL, 1996).

Faraday tinha um gênio experimental incomum. Construiu o primeiro motor elétrico em 1821, baseando-se na concepção de Ørsted⁴⁴ dos fenômenos eletromagnéticos, e o primeiro dínamo em 1831, baseado em sua própria descoberta da indução entre circuitos por correntes variantes (*ibid.*, p.258). Posteriormente, Faraday abandona a concepção de Ørsted, e passa a usar o termo “linhas de campo” para designar as linhas de força elétricas e magnéticas. Além disso, para ele os conceitos de carga e corrente eram secundários, *derivados* do conceito de campo (SILVA & MARTINS, 2003, p.402). Seus estudos sobre eletrodinâmica de corpos em movimento refletiam um forte interesse científico crescente à época (DARRIGOL, 1996, p.258).

³⁸Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), físico alemão.

³⁹Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), médico e físico alemão.

⁴⁰Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), físico alemão.

⁴¹Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), matemático e físico irlandês.

⁴²Sir Joseph Larmor (1857-1942), físico irlandês.

⁴³Michael Faraday (1791-1867), físico e químico inglês.

⁴⁴Hans Christian Ørsted (1777-1851), físico e químico dinamarquês.

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

É importante salientar que os fenômenos de indução eletromagnética para circuitos fechados dependiam apenas da *velocidade relativa* entre os condutores, como notou Faraday. Este resultado serviu como princípio para desenvolvimentos posteriores por outros autores sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento (*ibid.*, p.265).

Na parte continental da Europa, na mesma época, houve o surgimento de teorias matematicizadas sobre os fenômenos elétricos e magnéticos. A teoria eletrodinâmica de potenciais de Neumann⁴⁵ foi uma delas, sendo elaborada entre os anos 1845 e 1847. Esta se mostrou eficaz em derivar as leis de indução conhecidas até então (DARRIGOL, 1996, p.260), e carregava um forte caráter fenomenalista, sendo que em seu contexto a natureza microscópica da corrente elétrica era ignorada (*ibid.*, p.246-7). Neumann estudou os processos de indução magnética descobertos por Faraday e Henry⁴⁶, e construiu sua lei fundamental de forças entre circuitos fechados em termos de uma função potencial (próximo ao que hoje chamamos de potencial vetor). Com ela, foi capaz de derivar teoricamente a lei de indução de Faraday (ASSIS, 1995, p.23). Investigações sobre a função potencial vetor já vinham sendo feitas desde sua primeira menção em 1835 por Gauss, ao estudar a lei da indução eletromagnética de Faraday e a lei de forças entre correntes de Ampère⁴⁷ (ROCHE, 1999, p.147). Nos anos seguintes, a teoria de Neumann foi generalizada para incluir correntes abertas e efeitos de autoindutância, com contribuições de Kirchhoff⁴⁸, Lord Kelvin⁴⁹, Stokes e Heaviside (ASSIS, 1995, p.23). Diferentemente do caráter fenomenalista da teoria de Neumann, existiam também teorias eletrodinâmicas de caráter “construtivo” que não se limitavam ao estudo dos fenômenos macroscópicos. Uma delas foi a teoria de Weber, criada em meados do século XIX, também na Alemanha.

A teoria eletrodinâmica de Weber, publicada pelo autor em 1848, era uma teoria construtiva de ação à distância entre fluidos elétricos. Era caracterizada por uma lei fundamental de força radial de interação elétrica (construída analogamente às leis de atração gravitacional e eletrostática). Uma importante hipótese de Weber associada a esta lei era a do fluxo contrário de fluidos elétricos positivos e negativos nos fios. Por meio de sua lei de forças e desta hipótese, foi capaz de derivar as leis de indução de Neumann para circuitos fechados, sem contradizer as leis de Newton (DARRIGOL, 1996, p.247-8). Além disso, a lei se mostrou aplicável para circuitos abertos, o que era uma vantagem sobre a teoria (original) de Neumann (*ibid.*, p.261). A teoria

⁴⁵Franz Ernst Neumann (1798-1895), mineralogista, físico e matemático alemão.

⁴⁶Sir Humphry Davy (1778-1829), químico inglês.

⁴⁷André-Marie Ampère (1775-1836), físico, filósofo e matemático francês.

⁴⁸Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), físico alemão.

⁴⁹William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), físico, matemático e engenheiro britânico.

de Weber, que se tornou bem aceita na Alemanha até aproximadamente a década de 1870, foi a primeira a introduzir explicitamente quantidades físicas como forças e potenciais dependentes da velocidade e aceleração relativas (ASSIS, 1995, p.46).

Paralelamente, no Reino Unido, William Thomson (futuro Lorde Kelvin), por meio de analogias formais entre a teoria da propagação do calor de Fourier e a eletrostática, e entre a hidrodinâmica e a magnetostática, chegou a equações que descrevem as atrações eletrostáticas e interações entre correntes elétricas (SILVA & MARTINS, 2003, p.403). Inspirado na postura filosófica de Fourier, Thomson se preocupou em ser pouco especulativo sobre o que ocorre de fato fisicamente no nível microscópico com os fenômenos elétricos e magnéticos. Isso era algo que agradava os filósofos naturais (cientistas) britânicos da época, que tinham uma forte tendência no desenvolvimento de modelos mecanicistas (macroscópicos) para fenômenos eletromagnéticos (*ibid.*, p.404). Esses modelos mecanicistas, segundo Duhem (1989 [1893]), caracterizavam à época a tradição científica britânica. O uso de analogias, que em um primeiro momento tinha a finalidade de facilitar as derivações e soluções de equações, teve um papel central para Thomson, que passou a interpretar os fenômenos eletromagnéticos como fisicamente análogos a fenômenos mecânicos (SILVA & MARTINS, 2003, p.407). Stokes, Green⁵⁰ e outros estenderam essa abordagem ao “meio elástico universal”, e influenciaram toda uma geração de cientistas britânicos, em especial, Maxwell.

O que é chamado hoje de “teoria de Maxwell do eletromagnetismo” em muitos livros-texto de física é na verdade muito diferente (tanto do ponto de vista conceitual como do ponto de vista formal) do que de fato foi a teoria de Maxwell exposta em seu *Um Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo*⁵¹, sua importante e mais conhecida obra, publicada 1873 (DARRIGOL, 2005, p.2). Seguindo as ideias de Faraday, Maxwell propôs uma teoria fenomenológica sobre os estados macroscópicos de um meio contínuo, isto é, de um éter eletromagnético (*idem*). Em ressonância ao “espírito” da ciência britânica da época, Maxwell abandonou a “atrasada” concepção de fluidos elétricos, a substituindo pela ideia de campos de forças de Faraday (DARRIGOL, 1996, p.252). Dotou sua teoria de um caráter dinâmico, na qual todas as ações se propagavam de forma contígua pelo meio etéreo, e, além disso, introduziu conceitos de carga e corrente elétricas como *derivados* da noção de campo, isto é, como manifestações físicas do campo eletromagnético e não propriedades intrínsecas de corpos ou sistemas (*ibid.*, p.253).

Em publicações sobre eletrodinâmica datadas de 1861 e 1862, Maxwell expôs um conjunto

⁵⁰George Green (1793-1841), matemático e físico inglês.

⁵¹Título original em inglês: *A Treatise on Electricity and Magnetism*.

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

de vinte equações que representariam o estado macroscópico do éter, do campo eletromagnético e de suas manifestações (cargas e correntes). Utilizando o formalismo vetorial (que foi desenvolvido plenamente somente no fim do século XIX), dezoito das vinte equações se reduzem a oito⁵². Estas apareceram em conjunto em 1865, no em artigo de título *Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético*⁵³, no qual evidencia-se sua visão mecanicista do éter eletromagnético, herdada (porém, de forma simplificada) das concepções de Stokes e Lorde Kelvin (ROCHE, 1999, p.150-2). Contudo, o próprio Maxwell reconhecia que sua concepção parecia demasiada arcaica para ser verdadeira em todos os detalhes (DARRIGOL, 1996, p.251).

Em seu tratado de 1873, Maxwell pode mostrar teoricamente que para um meio isolante em repouso, suas equações implicavam na existência de propagações transversais acopladas de dos campos elétrico e magnético com velocidade constante $1/\sqrt{\epsilon\mu}$ (DARRIGOL, 2005, p.3). Essa previsão teve uma importância especial, pois não era feita pelas outras grandes teorias eletrodinâmicas da época. Pela proximidade do valor numérico dessa velocidade de propagação com o valor da velocidade da luz, já conhecido com certa precisão à época, identificou essas propagações eletromagnéticas com as ondas luminosas. Maxwell atribuiu a concepção de propagações transversais magnéticas a Faraday, e afirmou que sua teoria é em essência a mesma que este havia proposto na década de 1840 (MAXWELL, 1865, p.466). Sua derivação teórica instigou a unificação entre eletromagnetismo e óptica, feita por seus seguidores (DARRIGOL, 1996, p.254).

Comparando os fundamentos da teoria de Weber e Maxwell, é possível identificar duas visões de certa forma opostas sobre a natureza dos fenômenos eletromagnéticos. Para Weber, o que era fundamental eram as correntes de fluidos elétricos e sua lei de força, de forma que as noções de interação elétrica e magnética eram portanto *derivadas*. Já para Maxwell, o que era fundamental era o campo eletromagnético, de forma que as noções de cargas e correntes elétricas eram *derivadas*. Como afirma Darrigol (2005, p.3), a teoria de Maxwell, embora cultuada pelos físicos britânicos na segunda metade do século XX como a teoria eletromagnética mais superior do ponto de vista prático e filosófico, era praticamente desconhecida ou ignorada por grande parte dos físicos alemães que estudavam os mesmos fenômenos. Estes tinham suas próprias teorias de fluidos elétricos de ação à distância, como a teoria de Weber.

⁵²Maxwell, em sua obra de 1873, utilizou o formalismo dos quatérnions de forma simplificada (SILVA, 2002, p.79). Algumas propriedades desses números que não lhe agradavam (como o produto escalar negativo) não apareceram em sua obra (*ibid.*, p.81).

⁵³Título original em inglês: *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*.

Foi Helmholtz, uma das mais importantes figuras científicas da época, um dos poucos alemães que conheciam e estudavam a teoria de Maxwell, que iniciou a “tradução” da teoria de Maxwell à ciência continental. Motivado pela diversidade de teorias eletrodinâmicas diferentes à época, Helmholtz começou a desenvolver em 1870 a sua própria teoria eletrodinâmica de potenciais com um parâmetro ajustável. Esse parâmetro poderia assumir três valores, e para cada um deles a teoria de Helmholtz se reduzia ou à teoria de Weber, de Neumann ou de Maxwell (MILLER, 1981, p. 93). Essas três eram as que mais davam conta dos fenômenos elétricos e magnéticos conhecidos até então (WOODRUFF, 1968, p.300).

O ímpeto de Helmholtz partia, segundo Darrigol (1996), de um ideal de compreensão metafísica dos conceitos de matéria e energia, envolvendo a redução dos fenômenos físicos a pares de forças centrais entre pontos materiais, um sinal da visão mecanicista mundo já antes presente no programa laplaciano. Contudo, para os fenômenos eletrodinâmicos essa redução não era trivial, e Helmholtz então dava mais importância à validade geral do *Princípio da Conservação da Energia*, para conectar diferentes fenômenos e inferir novas leis e derivar outras já conhecidas, como a lei de Faraday de indução. A abordagem filosófica de Helmholtz é algo como uma união do fenomenalismo matemático com a ideia de teorias construtivas. Pelo fato de utilizar com convicção princípios gerais na compreensão dos fenômenos naturais, Darrigol (*ibid.*, p.248) comenta que Helmholtz teria dado luz ao que Einstein e Poincaré posteriormente chamaram de “física de princípios”.

Helmholtz, utilizando o Princípio da Conservação da Energia com seu potencial eletrodinâmico, foi capaz de demonstrar que existiam inconsistências para teorias do tipo de Weber. A teoria de Weber aparentemente violaria o princípio (*ibid.*, p.304), o que deu início a vários debates entre adeptos da teoria de Weber e aqueles simpáticos à teoria de Helmholtz (*idem.*, p.305). Uma vez descartada a teoria de Weber, para Helmholtz restava então decidir empiricamente entre a teoria de potenciais de Neumann e a teoria de Maxwell (MILLER, 1981, p.93). Para isso, propôs em 1879 que se buscasse um efeito previsto somente pela teoria de Maxwell: propagações (ondas) eletromagnéticas transversais.

Como salienta Woodruff (1968), a importância da eletrodinâmica de Helmholtz foi tornar a eletrodinâmica de Maxwell inteligível aos físicos alemães na segunda metade do século XIX. Muitos matemáticos e físicos continentais não podiam compreender plenamente a imagem que Maxwell fazia das ideias de carga e corrente, e, por outro lado, a terminologia em suas obras era confusa (*ibid.*, p.254; DUHEM, 1989 [1893], p.71). A compreensão da teoria de Maxwell

4.5 Breves considerações historiográficas e elementos da pré-história da Teoria da Relatividade Especial

via Helmholtz proporcionou um estímulo para a pesquisa experimental sobre a teoria, ainda que a interpretação de Helmholtz fosse mais complexa do que as próprias ideias originais de Maxwell (WOODRUFF, 1968, p.249). Hertz, que fora aluno de Helmholtz, é um exemplo dos físicos que se sentiram estimulados a realizarem estudos experimentais sobre as teorias eletrodinâmicas, e foi capaz de detectar ondas eletromagnéticas em laboratório, em 1887. À época, esse resultado foi entendido como uma prova da existência de ondas eletromagnéticas e também da existência do éter eletromagnético (MILLER, 1981, p.93). Lorentz, na Holanda, também aprendeu a teoria de Maxwell inspirado na análise de Helmholtz e posteriormente na de Hertz (DARRIGOL, 2005, p.7)

4.5.2.2 A “revolução intelectual” de Hertz

Hertz se propôs não só a verificar experimentalmente as propagações eletromagnéticas, como também a completar a missão de Helmholtz de “traduzir” de teoria de Maxwell à ciência continental (WOODRUFF, 1968, p.302). O resultado de seu esforço, a “teoria de Maxwell-Hertz”, está presente em sua obra de título *Investigações sobre a propagação da energia elétrica*⁵⁴.

Segundo Darrigol (1996), a visão e exposição de Hertz era tão eloquente e convincente entre matemáticos e físicos do continente que muitos adotaram sua visão, aceitando as suas ideias de carga e corrente como conceitos derivados das equações de campo. Importantes nomes como Boltzmann⁵⁵ e Drude⁵⁶ adotaram em alguma medida o minimalismo instrumentalista de Hertz (p.255-6). Em especial, Drude expõe sua visão sobre a natureza da carga, da corrente e dos campos na sua obra *Física do Éter*⁵⁷, publicada em 1894 e bastante apreciada na época. Drude tinha influência da filosofia de Mach, e era agnóstico quanto ao éter, quase o considerando como um mero nome, e chegando a sugerir que seria dispensável (*idem*)⁵⁸. Para Hertz, as especulações sobre a natureza da matéria e do éter eram ilegítimas, e atrapalhavam o progresso da ciência (MILLER, 1981, p.12).

Na construção de sua versão da teoria de Maxwell, Hertz primeiro tomou a validade das equações de campo de forma axiomática, sem derivá-las, afirmando que eram válidas no referencial em repouso com relação ao éter (MILLER, 1981, p.11). Além disso, retirou das

⁵⁴Título original em alemão: *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*.

⁵⁵Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), físico austríaco.

⁵⁶Paul Karl Ludwig Drude (1863-1906), físico alemão.

⁵⁷Título original em alemão: *Physik des Aethers*.

⁵⁸Algo importante a ser mencionado é que o livro de Drude foi umas das obras pelas quais Einstein teria tomado conhecimento mais aprofundado sobre as equações de Maxwell-Hertz (DARRIGOL, 2005, p.15).

equações fundamentais os potenciais ϕ e \mathbf{A} (eletrostático e magnetostático), interpretando estes como meros artifícios matemáticos, e escrevendo as equações somente em termos dos campos (ROCHE, 1990, p.154)⁵⁹. Ademais, Hertz interpretou os termos “carga” e “corrente”, como meros nomes, por não adicionarem conteúdo físico adicional à teoria, sendo que só não eram descartados por facilitarem a descrição dos resultados experimentais (DARRIGOL, 1996, p.255). Sobre as quantidades referentes aos campos elétrico e magnético (\mathbf{E} e \mathbf{B}), tomava uma postura operacionalista ao defini-los, visando assim fugir de ambiguidades e especulações sobre a natureza dos campos.

Para a eletrodinâmica dos corpos em movimento, Hertz tomou como axioma a validade a priori das equações em um referencial se movendo com velocidade \mathbf{v} com relação àquele em repouso ao éter. Segundo sua teoria, o éter mover-se-ia com a matéria, satisfazendo o que hoje chamamos de Princípio da Relatividade (STACHEL, 2005 [1998], p.122). Escreveu um sistema de equações em termos de componentes dos campos, que ficou conhecido historicamente como *equações de Maxwell-Hertz*. Escrevendo-as na linguagem vetorial moderna (em unidades gaussianas) (MILLER, 1981, p.13):

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= 4\pi\rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{D\mathbf{B}}{Dt} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \frac{D\mathbf{E}}{Dt} + \sigma\mathbf{E},\end{aligned}\tag{4.2}$$

sendo, na nomenclatura de Hertz, \mathbf{D} a polarização elétrica, \mathbf{B} a polarização magnética, \mathbf{H} a força magnética, \mathbf{E} a força elétrica, σ a condutividade específica e ρ a densidade de carga elétrica. O termo \mathbf{v} presente no operador derivada convectiva⁶⁰, seria a velocidade relativa entre os referenciais citados. A postura instrumentalista de Hertz sobre a teoria de Maxwell fica clara em uma conhecida afirmação acerca do que seria a teoria de Maxwell:

A teoria de Maxwell é o sistema de equações de Maxwell. Eu consideraria como uma forma, ou caso especial, da teoria de Maxwell qualquer teoria que conduzisse ao mesmo sistema de equações

⁵⁹Como salienta Roche, a postura de Hertz, compartilhada por Heaviside, contribuiu historicamente para a visão de que o vetor potencial carecia de sentido físico, embora isso não tenha feito com que se parasse de usá-lo heurísticamente nas teorias eletromagnéticas.

⁶⁰A derivada convectiva de um campo vetorial $\mathbf{F} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ é definida como:

$$\frac{D\mathbf{F}}{Dt} \equiv \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v} \cdot \mathbf{F}),\tag{4.3}$$

sendo ∇ o operador diferencial gradiente.

4.6 Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)

e, conseqüentemente, abarcasse os mesmos fenômenos possíveis (HERTZ *apud* PAIS, 1995 [1982], p.136).

Como comenta Pais (*idem*), pelo fato de existir diversas concepções de éter eletromagnético à época, e, pela possibilidade de se interpretar fisicamente as equações de diferentes formas, não é surpresa que tenha existido uma variedade de teorias pós-maxwellianas baseadas na ideia de um meio universal.

A “revolução intelectual” (*ibid.*, p.257) proporcionada pela abordagem de Hertz causou tamanha influência que muitos físicos e matemáticos, em especial alemães, se tornaram “maxwellianos”. Por outro lado, ela também fez com que muitos procurassem reviver a concepção weberiana de eletricidade enquanto substância, e conseqüentemente, a tradição de teorias construtivas dos fenômenos elétricos e magnéticos. Era crescente a suspeita de que a origem das propriedades elétricas e magnéticas se dava no domínio microscópico. Por outro lado, a ideia de ações propagadas por um meio, presente na teoria de Maxwell, era tida como “primitiva” (isto é, inadequada à visão de mundo científico-filosófica de) por boa parte dos físicos e matemáticos alemães. Por essa razão, muitos (entre eles Hertz) tentaram interpretá-la com base na ideia de ações retardadas (DARRIGOL, 1996, p.250).

4.6 Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)

4.6.1 A postura “dualística” de Lorentz

Entre os anos 1890 e 1904, Lorentz buscou estudar as implicações da chamada “teoria de Maxwell-Hertz” quando aplicada ao domínio microscópico, isto é, sobre entidades microscópicas inobserváveis que seriam (em tese) portadoras últimas das propriedades elétricas e magnéticas. A existência destas entidades gerava controvérsia à época, e dividia cientistas e tradições científicas. Por meio de seu escrutínio teórico, Lorentz construiu o que pode ser chamada de “teoria de Maxwell-Lorentz” do eletromagnetismo, que mais tarde culminou na sua “teoria do elétron” (eletromagnetismo microscópico). Esta última, concluída parcialmente em 1904, era internamente coerente, corroborada experimentalmente (em especial pelo chamado efeito Zeeman), e continha muitas das relações matemáticas que hoje encontramos no formalismo da TRE.

É curioso notar como Lorentz se encontra entre duas tradições científicas que têm suposições centrais quase opostas. Como comentado anteriormente, para Weber (tradição de forças

à distância), as noções de interações elétricas e magnéticas eram *derivadas* da ideia de correntes de fluídos elétricos e da lei de força central. Para os maxwellianos (tradição de campos de ação contígua), as noções de cargas e correntes elétricas eram *derivadas* da ideia de campo eletromagnético e tensões do éter (DARRIGOL, 2005). Lorentz, por sua vez, toma dois objetos como fundamentais: o conjunto de partículas carregadas e correntes elétricas, e o campo eletromagnético associado ao éter eletromagnético. Segundo Zahar (1973a, p.122), a ontologia física de Lorentz consistia na ideia de um meio universal (éter) preenchido de singularidades microscópicas esféricas nas quais as densidades de carga e massa seriam diferentes de zero (elétrons).

Diferentemente dos cientistas britânicos, Lorentz, inspirado em Hertz, a partir de determinado ponto em sua carreira abandonou as explicações mecânicas ao éter (STACHEL, 2005 [1988], p.26). O papel das partículas seria a de criar os campos (seja por sua carga ou por seu movimento pelo éter), estes modificavam o éter, que por sua vez influenciava o movimento das partículas por forças elétricas ou magnéticas (JANSSEN, 2002, p.423). Por outro lado, a postura dualística de Lorentz (STACHEL, 2005 [1988], p.26) o diferenciava também dos cientistas alemães, especialmente os influenciados pela *Naturphilosophie* e aqueles educados na doutrina filosófica monista-essencialista da natureza, movimentos populares na Alemanha no fim do século XVII e durante o século XIX. Segundo Darrigol (2000, p.323), Lorentz tinha uma filosofia pluralista, o que é incompatível com a adoção de uma só forma de visão de mundo.

Lorentz tinha origem alemã e compartilhava com os alemães o isolamento de ideias do continente, o que fez com que se instrumentalizasse em várias línguas (alemão, francês e inglês). Suas principais inspirações foram Helmholtz, Maxwell e Fresnel (em particular, sua hipótese do arrastamento parcial do éter), e desde cedo dava importância ao Princípio do Atomismo, bastante controverso à época (DARRIGOL, 2000, p.322). Seus primeiros trabalhos sobre eletrodinâmica (e também óptica) remontam às suas tentativas no fim da década de 1870 de construir uma teoria molecular de dispersão óptica baseada na ideia de cargas eletrizadas elásticas, ou “íons”, que vibrariam sob a ação de forças elétricas ou forças magnéticas (DARRIGOL, 2005, p.7). Durante mais de dez anos, Lorentz se dedicou a outros temas, voltando a se envolver com estudos da óptica e do eletromagnetismo no fim da década de 1880, inspirado pelos trabalhos de Hertz e pelos resultados dos experimentos interferométricos de Michelson.

Em 1881, Michelson realizou experimentos interferométricos em primeira ordem de v/c , visando detectar algum possível arrasto do éter por diferenças nas medidas da velocidade da luz.

4.6 Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)

Sua conclusão foi de que os resultados experimentais corroboravam a teoria de éter totalmente arrastado de Stokes (MILLER, 1981, p.24; ZAHAR, 1973a, p.97). Isto instaurou um celeuma entre os cientistas da época: os resultados do experimento de Fizeau (também em primeira ordem em v/c) realizado em 1851 corroboravam a teoria de Fresnel e refutavam as teorias de éter totalmente arrastado e éter estacionário (como as de Stokes e Young, respectivamente); os resultados deste experimento de Michelson (1881) corroboravam a teoria de éter totalmente arrastado (como de Stokes) e refutava-se a teoria de Fresnel.

Lorentz foi capaz de identificar um erro nos cálculos de Michelson, o que desclassificava a conclusão deste sobre os resultados experimentais. A acurácia experimental deixa de ser suficiente, o que “salva” a teoria de Fresnel da refutação experimental. Por outro lado, Lorentz demonstra em 1886 que a teoria de éter de Stokes apresentava inconsistências internas, de forma que as alterações necessárias a deixariam mais complicada que a teoria de Fresnel (*ibid.*, p.24-5). Neste mesmo ano, Michelson com a colaboração de Morley repete o experimento de Fizeau 1851 (primeira ordem de v/c), obtendo o mesmo resultado, isto é, corroborando a teoria de Fresnel.

Ciente deste resultado, Lorentz sugeriu a repetição do experimento de 1881, e em 1887 Michelson e Morley assim o fizeram, com um aparato experimental melhorado, sensível o suficiente para verificar desvios em segunda ordem de v/c . O resultado, para surpresa de muitos, corroborava teorias de éter arrastados ou estacionários. O “celeuma óptico e eletromagnético” que surgiu em 1881 retorna de forma mais dramática: para experimentos em primeira ordem de v/c , se corroborava a teoria de Fresnel; para experimentos em segunda ordem de v/c , se corroborava as teorias de Stokes e de éter estacionário (DARRIGOL, 2005, p.7). O desapontamento de Lorentz fica evidente em uma carta redigida a Lorde Rayleigh, em 1892:

A hipótese de Fresnel (...), que funciona admiravelmente bem para dar conta de todos os fenômenos observados, não o faz para o experimento interferométrico do Sr. Michelson, que, como você sabe, foi repetido depois que publiquei minhas considerações sobre seu formato original [1881], e que decididamente parece contradizer a teoria de Fresnel. Estou totalmente perdido em como resolver esta contradição, e acredito que se nós tivermos de abandonar a teoria de Fresnel, não teremos nenhuma teoria adequada, uma vez que as condições que o Sr. Stokes impôs ao movimento do éter são irreconciliáveis entre si. (...) Haveria algum ponto na teoria do Sr. Michelson sobre seu experimento que ainda não foi examinado com maior atenção? (LORENTZ *apud* MILLER, 1981, p.29).

Entre 1890 e 1904, Lorentz desenvolve progressivamente sua teoria eletromagnética tendo

em mente, a princípio, algumas restrições, como a de satisfazer os resultados experimentais de Michelson e Morley e também aquele de Fizeau (*ibid.*, p.30). Em 1892 publica dois trabalhos importantes, de títulos *A teoria eletromagnética de Maxwell e sua aplicação aos corpos em movimento*⁶¹ e *O movimento relativo da Terra com relação ao éter*⁶². Uma das hipóteses fundamentais de Lorentz é de que as fontes de campos elétricos e magnéticos seriam partículas microscópicas que se moviam pelo éter, e que no referencial em repouso com o éter valiam naturalmente as equações de Maxwell-Hertz (4.2) (*ibid.*, p.25), evitando assim potenciais inobserváveis (DARRIGOL, 2000, p.326). Como toda teoria de éter, na teoria de Lorentz a luz tinha velocidade constante no referencial do éter, isto é, sua velocidade independia da velocidade da fonte emissora (MILLER, 1981, p.27).

Em seus trabalhos, Lorentz estendeu a teoria de Maxwell-Hertz ao nível microscópico, onde as partículas interagiriam via éter, sendo esta a única maneira da matéria ponderável afetar o éter (*idem*). Este procedimento seria impensável para os maxwellianos, que consideravam os conceitos de carga elétrica como conceitos macroscópicos emergentes e também que as leis ao nível molecular seriam de natureza mecânica e não eletromagnética (DARRIGOL, 2005, p.7). Lorentz obteve um sistema de equações similar às equações de Maxwell-Hertz. Escrevendo-as em notação vetorial moderna (em unidades hertzianas) (*idem*):

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \mathbf{e} &= \frac{\rho_m}{c} \\
 \nabla \cdot \mathbf{b} &= 0 \\
 \nabla \times \mathbf{e} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} \\
 \nabla \times \mathbf{b} &= \frac{1}{c} \left(\rho_m \mathbf{v} + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} \right) \\
 \mathbf{f} &= \rho_m \left(\mathbf{e} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{b}}{c} \right),
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

sendo \mathbf{e} o campo elétrico microscópico, \mathbf{b} o campo magnético microscópico, c a velocidade da luz no vácuo, \mathbf{v} a velocidade com relação ao éter, \mathbf{f} a densidade de força sobre as partículas elétricas (o que hoje chamamos de *força de Lorentz*) e ρ_m a densidade de carga elétrica microscópica. Estas “equações microscópicas” ficaram historicamente conhecidas como *equações de Maxwell-Lorentz*.

A concepção de éter de Lorentz estava mais próxima daquela de éter estacionário do que

⁶¹Título original da publicação em francês: *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants*.

⁶²Título original em holandês: *De relatieve beweging van de aarde en den aether*.

4.6 Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)

o éter parcialmente arrastado de Fresnel, pelo fato da matéria ponderável não afetá-lo diretamente. Contudo, Lorentz foi capaz de derivar de sua teoria o coeficiente de arrasto de Fresnel (DARRIGOL, 2000, p.327). A teoria de Maxwell-Hertz não era capaz de derivá-lo, de forma que somente a teoria de Lorentz àquela época dava conta dos experimentos de Fizeau (1851) e Michelson (em 1881, e em 1887 em parceria com Morley) (MILLER, 1981, p.29). Em seus cálculos, Lorentz fez uso de uma mudança de variáveis $x \rightarrow x'$ e $t \rightarrow t'$, de um sistema real S para um sistema fictício S' (isto é, um mapeamento), com o intuito de manter a equação de onda eletromagnética invariante. Essa mudança envolve as seguintes relações de transformação de coordenadas (*ibid.*, p.28; DARRIGOL, 2000, p.328):

$$\begin{aligned}x' &= \gamma x \\t' &= \frac{t}{\gamma} - \frac{\gamma v x}{c^2},\end{aligned}\tag{4.5}$$

com:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},\tag{4.6}$$

que chamamos hoje de *fator relativístico*, sendo v a velocidade com relação ao éter e c a velocidade da luz com relação ao éter. Podemos entender estas relações com a forma “primitiva” do que hoje chamamos de Transformações de Lorentz. Muito embora neste momento para Lorentz as variáveis x' e t' não tivessem sentido físico, e sim somente x e t (referencial do éter) e as coordenadas que se relacionavam com estas por meio de uma Transformação de Galileu. Como comenta Miller (1973, p.220-221), em seus trabalhos Lorentz faz uso de três referenciais, S (referencial em repouso com relação ao éter), S_r (referencial que se move uniformemente com relação ao éter) e S' (referencial fictício, utilizando para transformar um problema de eletrodinâmica em um problema de eletrostática). S e S_r estavam, segundo Lorentz, relacionados por Transformações de Galileu:

$$\begin{aligned}x_r &= x - vt \\t_r &= t,\end{aligned}\tag{4.7}$$

já S e S' se relacionam pela forma “primitiva” das Transformações de Lorentz, ilustradas anteriormente.

Lorentz deduziu que em um sistema animado de uma velocidade \mathbf{v} com relação ao éter, os campos elétrico e magnético (macroscópicos e microscópicos) se transformam de tal forma que, em primeira ordem de v/c , as equações de Maxwell têm a mesma forma no referencial

fictício S' . Chamou este resultado de *Teorema dos Estados Correspondentes*. Por meio deste teorema, Lorentz justificava matematicamente a ausência de efeitos observáveis ópticos em primeira ordem de v/c (DARRIGOL, 2000, p.329-340). Para os efeitos de segunda ordem (como o experimento de Michelson e Morley de 1887), Lorentz teve de fazer uma hipótese audaciosa sobre o comprimento de objetos em movimento, já feita por FitzGerald⁶³ alguns anos antes (1889): a contração dos comprimentos na direção de movimento com relação ao éter.

Considerando que nenhum efeito do movimento da Terra é observável (em qualquer ordem de v/c), Lorentz supôs que corpos em movimento experimentam uma contração física em seus comprimentos na direção de comprimento. Desta forma, podia explicar o resultado do experimento de Michelson e Morley (de 1887), argumentando que há uma *contração fisicamente real* no comprimento de um dos braços do interferômetro, fazendo com o que o caminho óptico dos feixes do aparato se iguale, como foi observado. Essa hipótese (*ad hoc*), segundo Lorentz, poderia ser justificada se se supusesse que as dimensões dos corpos são determinadas completamente por forças moleculares, e que essas são de natureza eletromagnética, e que, portanto obedecem às suas equações de transformação (*ibid.*, p.330). Consentiu, entretanto, que se tratava de um efeito sem consequências diretamente observáveis, e que poderia não ser a explicação correta do experimento para o qual a hipótese foi criada (MILLER, 1981, p.31).

Três anos mais tarde (1895), Lorentz publica seu trabalho de título *Tentativa de uma teoria dos fenômenos elétricos e ópticos em corpos em movimento*⁶⁴, no qual procura de forma sistemática generalizar seus resultados obtidos em 1892 (MILLER, 1981, p.32). Neste trabalho, afirma que as coordenadas do referencial S em repouso com relação ao éter e S_r que se move com velocidade v com relação a S se relacionam não pelas equações (4.7), mas por (*ibid.*, p.35):

$$\begin{aligned}x_r &= x - vt \\t_r &= t - \frac{vx_r}{c^2},\end{aligned}\tag{4.8}$$

Trata-se de uma Transformação de Galileu modificada, sendo que a novidade está na transformação da coordenada do tempo t_r ⁶⁵. Lorentz chamou-a de “tempo local” (MILLER, 1973,

⁶³George Francis FitzGerald (1851-1901), físico irlandês.

⁶⁴Título original em alemão: *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*.

⁶⁵Como foi comentado anteriormente, esse conjunto específico de transformações de coordenadas já havia sido obtido por Voigt em 1887, sem conhecimento à época por Lorentz (PAIS, 1995 [1982], p.137). Posteriormente Lorentz reconhece a antecipação de Voigt, e faz as menções ponderadas sobre a prioridade da obtenção das equa-

4.6 Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)

p.220), sem dar-lhe uma interpretação física explícita. Com as transformações acima, Lorentz pode mostrar que as equações de Maxwell-Lorentz (sem fontes) mantêm a mesma forma para primeira ordem de v/c (Teorema dos Estados Correspondentes) (MILLER, 1981, p.35). Ainda era capaz de explicar os efeitos ópticos nulos de primeira ordem (derivando o coeficiente de Fresnel). Para efeitos de segunda ordem, utilizava a hipótese da contração na direção do comprimento, o que é exposto em um de seus artigos incluídos no livro, de título *A experiência Interferencial de Michelson*⁶⁶.

Em suma, Lorentz utilizava dois tipos de transformações de coordenadas para situações diferentes: entre S e S_r (referenciais físicos) usava a Transformação de Galileu modificada (4.8), utilizada para resolver problemas de óptica de corpos em movimento; entre S e S' (este último um referencial fictício) usava a forma “primitiva” das Transformações de Lorentz (4.5) para transformar problemas de eletrodinâmica em problemas de eletrostática. S' tinha apenas um função matemática instrumental de mapeamento, enquanto que entre S e S_r Lorentz utilizava relações clássicas, como a soma direta de velocidades newtoniana (*ibid.*, p.40). O uso desavisado destes três referenciais teria sido a causa de alguns erros em importantes artigos de Lorentz, segundo Miller (1973).

Entre 1892 e os primeiros anos do século XX, a teoria de Lorentz ganhou bastante popularidade, principalmente entre os alemães, pela clareza e simplicidade de suas hipóteses básicas e a abrangência empírica de suas previsões (DARRIGOL, 2000, p. 331). Contribuíram para sua ascensão os resultados experimentais de Zeeman⁶⁷ (1896, o efeito Zeeman, previsto teoricamente por Lorentz) e Thomson (1897, da razão e/m dos elétrons), que evidenciavam a existência de partículas minúsculas portadoras de cargas elétricas, uma hipótese central na teoria de Lorentz. No fim do século Lorentz ficou consagrado publicamente entre os alemães, sua Teoria do Elétron (como se passou a chamar em 1899) convenceu cientistas como Planck, antes bastante avessos ao Princípio Atomista (*idem*). Logo sua influência se estendeu também aos britânicos e franceses, seu tornando internacionalmente reconhecido, e sua teoria incitou a criação de outras teorias de elétron.

ções.

⁶⁶Título original em alemão: *Der Interferenzversuch Michelson's*.

⁶⁷Pieter Zeeman (1865-1943), físico holandês.

4.6.2 O início do século XX e a “engenharia do Elétron”

Desde os trabalhos de Thomson em 1881 sobre convecção elétrica se sabia que em uma partícula eletricamente carregada se manifestava uma “inércia eletromagnética” (DARRIGOL, 2000, p.360). Poucos anos depois, estudos de Heaviside e Searle apontavam para a dependência deste tipo de inércia com a velocidade (*idem*). Em 1898 e 1900, Lenard realizou medidas da razão e/m para raios Becquerel (raios β , elétrons), nos quais havia uma evidência, embora não conclusiva, de que a massa de seus constituintes variava com a velocidade (MARTINS, 2005a, p.17). Pouco tempo depois, em 1901 Kaufmann⁶⁸ realizou experimentos nos quais pode confirmar esta evidência. A inspiração teórica para estas investigações vinha das análises de Heaviside, Searle e Thomson, ao mostrarem que segundo as equações de Maxwell a “inércia eletromagnética” de um corpo cresceria com sua velocidade (MILLER, 1973, p.212; MARTINS, 1989, p.67).

Aliando estes resultados ao sucesso da teoria de Lorentz, houve impulsos por parte de físicos teóricos em elaborar então teorias de elétron que levassem em conta a dependência de sua inércia com a velocidade. Kaufmann comparou a previsão para a “massa eletromagnética” do elétron feita por Heaviside e Searle com seus dados experimentais, porém não encontrou concordância. Argumentou que por essa razão somente parte da massa dos elétrons seria de natureza eletromagnética (MARTINS, 2005a, p.17).

Abraham publicou, em trabalhos entre 1902 e 1903, a primeira teoria de elétron que parecia se adequar aos resultados de Kaufmann de 1901 (MILLER, 1973, p.213). Criticou a derivação de Kaufmann, e partiu das equações de Maxwell-Lorentz, fazendo duas suposições centrais: que a inércia do elétron seria de natureza *puramente eletromagnética*, e que o elétron seria um corpo rígido esférico indeformável (MILLER, 1973, p.215-216). Argumentou que uma imagem puramente eletromagnética do elétron só seria possível com a hipótese da forma esférica rígida (DARRIGOL, 2000, p.360). Abraham pode mostrar que a massa do elétron se manifestaria de duas formas diferentes (em função da natureza das forças que agem sobre a partícula) (MARTINS, 2005a, p.18): a “massa transversal” e a “massa longitudinal”, sendo ambas eram dependentes da velocidade.

Aparentemente, Abraham pode com estes resultados reduzir todas as propriedades mecânicas do éter a propriedades eletromagnéticas (MILLER, 1973, p.219). Sua teoria ganhou à época sucesso imediato, principalmente entre outros físicos e matemáticos de Göttingen como

⁶⁸Walter Kaufmann (1871-1947), físico alemão.

4.6 Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)

Sommerfeld⁶⁹, Schwarzschild⁷⁰, Hilbert e Minkowski (DARRIGOL, 2000, p.361). Seu prestígio provinha, entre outros, do caráter revolucionário de se desafiar a antiga visão mecanicista de mundo (*idem*).

Em 1902 Kaufmann realizou novamente experimentos com raios β , tomando medidas adicionais que foram analisadas à luz da teoria de Abraham (MARTINS, 2005a, p.18). Seu objetivo era novamente medir a razão e/m , analisando o comportamento dos pontos de incidência dos elétrons em placas fotográficas em função dos campos aplicados e da velocidade dos feixes. Publica um artigo no mesmo ano ilustrando os dados de seus experimentos e sua conclusão:

A massa dos elétrons que constituem os raios Becquerel é dependente da velocidade. A dependência pode ser demonstrada exatamente pela fórmula de Abraham. Portanto a massa dos elétrons é de natureza puramente eletromagnética (KAUFMANN *apud* CUSHING, 1998, p.214).

O reducionismo da física ao eletromagnetismo, que ficou conhecido como *visão eletromagnética de mundo*, se tornou bastante influente na época, principalmente na Alemanha entre físicos e matemáticos como Wien, Abraham, Hilbert e Minkowski. A ideia de que toda a matéria seria constituída apenas por partículas elétricas e que toda a inércia seria de origem eletromagnética já havia sido proposta em 1895 por Larmor, baseado em resultados que pareciam sugerir que parte da massa dos corpos era de natureza eletromagnética (MARTINS, 1989, p.67). Essa doutrina parecia a muitos oferecer uma abordagem mais promissora à unificação das forças da natureza do que a visão mecanicista de mundo, já considerada “atrasada” no continente (MILLER, 1973, p.213). Lorentz, de início, flertou com esta visão, porém não a adotou de forma definitiva (JANSSEN, 2002, p.426; STACHEL, 2005 [1998], p.27).

A teoria de Abraham, cuja versão revisada foi publicada em 1904 em um trabalho de título *Teoria da Eletricidade*⁷¹, motivou físicos a criarem teorias de elétron alternativas, como Bücherer e Langevin (MARTINS, 2005a, p.20). Lorentz, que foi a inspiração de Abraham, se inspirou em parte neste para construir sua própria teoria de elétron. Sua intenção era generalizar seus estudos teóricos anteriores incluindo os domínios microscópicos, de forma a criar uma teoria autoconsistente que se baseasse em hipóteses fundamentais, e não em hipóteses *ad hoc* (MILLER, 1973, p.222). Estas haviam sido criticadas por Poincaré⁷², o que motivou ainda mais Lorentz a aperfeiçoar seu trabalho (DARRIGOL, 2000, p.361). Em 1904 publica o artigo

⁶⁹Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), físico alemão.

⁷⁰Karl Schwarzschild (1873-1916), astrônomo e físico alemão.

⁷¹Título original em alemão: *Theorie der Elektrizität*.

⁷²Poincaré chamou as hipóteses *ad hoc* de Lorentz de “coup de pouce”, que pode ser traduzido como “ajuda”.

*Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz*⁷³, no qual parte de hipóteses fundamentais das quais deduz a covariância das equações de Maxwell-Lorentz (sem fontes) e a contração dos comprimentos (que deixava então de ser uma hipótese *ad hoc*).

Neste trabalho de 1904, Lorentz expõe sua teoria do elétron como uma extensão de seus trabalhos anteriores. A diferença central entre sua teoria e a de Abraham era que o elétron era deformável na direção de movimento, isto é, não era mais necessariamente esférico (não só no “referencial fictício” S' mas também em S_r). Uma novidade em seus trabalhos era que a contração, antes restrita aos corpos macroscópicos, também agora cabia aos elétrons, constituintes microscópicos (MARTINS, 2005a, p.20).

Como nos trabalhos anteriores, Lorentz trabalha com três referenciais: S (éter), S_r (referencial se movendo uniformemente com relação ao éter)⁷⁴ e S' (sistema fictício). Neste trabalho a relação entre as coordenadas de S' e S_r são dadas por transformações muito próximas do que hoje chamamos de Transformações de Lorentz:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma x_r \\t' &= \frac{t_r}{\gamma} - \frac{\gamma v x_r}{c^2},\end{aligned}\tag{4.9}$$

sendo v a velocidade relativa entre S e S_r e γ o fator dado por (4.6). É possível notar a assimetria entre as transformações para x' e t' , em razão disto, Lorentz só foi capaz de mostrar a covariância das equações de Maxwell-Lorentz para o espaço livre de cargas e correntes (MILLER, 1973, p.226). Somente com a remoção dessa assimetria, Poincaré conseguiu no ano seguinte chegar às Transformações de Lorentz na forma como hoje conhecemos (*ibid.*, p.225).

Considerando o Teorema dos Estados Correspondentes, o elétron deve manter-se esférico tanto em S como em S' . Contudo, com as transformações acima, Lorentz notou que o elétron sofreria uma contração em S_r mas também em S' (ambas somente na direção de movimento), isto é, uma alteração nos comprimentos proporcional a $1/\gamma$. Sendo assim, Lorentz argumentou que o elétron deveria sofrer uma “dilatação espacial fictícia” em S' de forma a manter sua forma esférica neste referencial fictício (*ibid.*, p.227). Assim, a hipótese da contração de Lorentz no seu trabalho de 1904 tem, na verdade, duas faces: uma contração *fisicamente real* em S_r

⁷³Título original da publicação em inglês: *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than light*.

⁷⁴Embora, como salienta Miller (1973, p.223), Lorentz não tenha usado essa nomenclatura em 1904, ele continuará a ser usada para fins explicativos.

4.6 Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)

(justificada pelas transformações de coordenadas), e uma dilatação *fisicamente fictícia* em S' (necessária para manter o Teorema dos Estados Correspondentes).

Com cálculos semelhantes àqueles de Abraham, Lorentz pode derivar os valores para a massa longitudinal e massa transversal do elétron para sua teoria (*ibid.*, p.229; MARTINS, 2005a, p.20). Ao comparar os dados experimentais de Kaufmann sobre a massa do elétron com sua previsão, Lorentz concluiu que, dada a precisão dos dados, estes eram compatíveis tanto com a teoria de Abraham quanto com a dele (MARTINS, 2005a, p.20). De fato, até segunda ordem as relações obtidas por Abraham e Lorentz são muito próximas. Entretanto, a teoria de Lorentz possuía problemas, alguns deles apontados por Abraham. Este, antes mesmo da publicação do artigo de Lorentz, já havia enfatizado que uma teoria de elétrons deformáveis (isto é, com contrações ou dilatações fisicamente reais) necessitaria da inserção de forças mecânicas para a estabilidade do elétron, uma vez que a repulsão coulombiana interna impediria deformações (MILLER, 1973, p.230). Em 1905, Abraham demonstrou que a energia total do elétron na teoria de Lorentz não poderia ser explicada com base apenas em forças eletromagnéticas, sendo necessária a inclusão de forças de coesão que explicariam então a quantidade faltante de energia (*ibid.*, p.231). A tarefa de explicar que forças seriam essas coube a Poincaré, neste mesmo ano.

De fato, muitas fragilidades da teoria de Lorentz foram corrigidas por Poincaré (porém, não todas). Assim sendo, o que chamamos de interpretação de Lorentz e Poincaré poderá ser mais bem entendida (do ponto de vista físico e filosófico, este último caro a este trabalho) com uma discussão apropriada das contribuições de Poincaré. É importante mencionar que, em um primeiro momento, a postura de Lorentz frente ao formalismo era algo próximo à “interpretação da relatividade relativa ao éter” apresentada por Pessoa (2012). Entre outros resultados, posteriormente Poincaré deu uma interpretação física para a variável t' da transformação de coordenadas temporal (4.9), assim como encontrou uma explicação coerente para a estabilidade do elétron na teoria de Lorentz. É curioso notar que, ao cabo do empreendimento de ambos às origens do que chamamos TRE, Lorentz foi mais “matemático” que Poincaré, enquanto Poincaré foi mais “físico” que Lorentz.

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

4.7.1 Influências científicas sobre Einstein

Uma forma de entender as origens da TRE conforme Einstein a concebeu é analisar suas próprias declarações sobre o tema. Em um dos últimos textos escritos por ele, *Notas Autobiográficas*⁷⁵, Einstein descreve um *gedankenexperiment* (experimento de pensamento) que teve aos 16 anos, que mais tarde teria contribuído à sua procura de um princípio físico geral (no caso, o Princípio da Relatividade). Claramente não podemos reduzir as origens da relatividade a isto. Serve-nos tão somente como uma pista do raciocínio de Einstein, que se mostrou bastante diferente de contemporâneos que atacavam problemas parecidos.

Em suas próprias palavras, seu experimento de pensamento consistiu na seguinte questão: “*se corrêssemos atrás de uma onda luminosa com [uma velocidade igual à] velocidade da luz, então encontraríamos um campo de ondas independente do tempo. No entanto, tal campo parece não existir!*” (EINSTEIN, 1949, p.55). Em outras palavras, se pudéssemos viajar com velocidade c (velocidade da luz no vácuo) lado a lado com um raio de luz, veríamos que não haveria oscilação temporal nos campos elétrico e magnético, embora veríamos uma oscilação espacial em ambos. Entretanto, como Einstein salienta, “*aparentemente não existe tal coisa, quer com base na experiência, quer de acordo com as equações de Maxwell*” (*idem*). Para Einstein, a resolução desse antigo problema, que lhe veio por meio abandono da hipótese tácita do Tempo Absoluto (e portanto da simultaneidade absoluta), foi um dos germes da TRE.

O aprofundamento de seu interesse pela óptica e eletrodinâmica dos corpos em movimento remonta aos anos de sua formação na Escola Politécnica de Zurique (conhecida pela sigla ETH⁷⁶), entre 1896 e 1900 (STACHEL, 2005 [1998], p.126-127). Einstein, como a maioria dos cientistas da época, acreditava no éter (PATY, 1993, p.70). Tentou inclusive, entre 1898 e 1901, elaborar um aparato experimental simples com o intuito de medir a velocidade absoluta da Terra. O experimento se baseava em conceitos simples de interferometria, contudo, a ideia não foi concretizada. Em uma de suas biografias, redigida por seu genro Rudolf Kayser, se afirma que o ceticismo de seus professores na ETH com sua ideia era muito grande, o que teria desmotivado-o (PAIS, 1995 [1982], p.151).

Durante sua formação em Zurique, Einstein aparentemente não teve contato direto com a

⁷⁵Título original do manuscrito em alemão: *Autobiographisches*.

⁷⁶Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

teoria de Maxwell (ou suas reformulações), e procurou, a partir de 1898, estudá-la por meio de alguns livro-textos da época (*idem*). Segundo Stachel (*ibid.*, p.128), há evidências diretas e indiretas de que por volta de 1892 Einstein já teria lido trabalhos de Drude, Helmholtz, Hertz, Lorentz, Voigt, Wien, Föppl, Boltzmann e Kirchhoff (MILLER, 1981, p.87). Há indícios de que Einstein lia regularmente as edições do periódico *Annalen der Physik*, no qual seu artigo sobre relatividade foi publicado, entre 1898 e 1901, e talvez tenha assim feito até 1905 (STACHEL, 2005 [1998], p.127).

Todavia, embora se especule as influências que teriam levado Einstein à criação da teoria, não há citações de outros trabalhos em seu “artigo fundador”, algo bastante incomum para artigos desde aquele tempo. Há somente ao final os agradecimentos a Michele Besso⁷⁷, seu colega no Departamento de Patentes de Berna. Miller (1981), com base em diversas fontes primárias e também secundárias, elaborou uma lista sobre o que Einstein (definitivamente, muito provavelmente ou talvez) sabia ou teve acesso antes de publicar seu artigo, desde jornais periódicos até livros e monografias. Entre os itens desta lista, encontramos:

A. Definitivamente lidos, e evidências

- 1) Os artigos de Lorentz (...) [*O movimento relativo da Terra com relação ao éter* de 1892 e *A Experiência Interferencial de Michelson* de 1895] (...).
 - 2) O trabalho de Hertz (...) [*Investigações sobre a propagação da energia elétrica* de 1892] (...).
 - 3) O livro de Föppl (...) [*Introdução à teoria da eletricidade de Maxwell* de 1894] (...).
- (...)

B. Muito provavelmente lidos

- 1) O livro de Drude (...) [*Física do éter* de 1900]: Em qualquer época existem certos livros que são comuns entre estudantes de física, e o livro de Drude era um deles; contudo, Einstein não o menciona.
- 2) O livro de Abraham e Föppl (...) [*Teoria da eletricidade* de 1904]: Como seu antecessor, Föppl (...) [de 1894], esse livro se tornou rapidamente um sucesso. Tendo lido Föppl, Einstein poderia ter dado ao menos uma olhadela na versão reescrita e atualizada pelo conhecido físico Abraham.

C. Talvez lidos

- 1) O artigo de Lorentz (...) [*Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz* de 1904]: As monografias de Lorentz muito bem referenciadas constituíam a mais completa exposição do estado da arte da teoria eletromagnética em 1904.

⁷⁷Michele Angelo Besso (1873-1955) foi um engenheiro suíço/italiano

2) O livro de Lorentz (...) [*Festschrift* de 1900]: Einstein (...) [em um trabalho de 1906] o cita. (MILLER, 1981, p.87)

Alguns indícios sobre o que Einstein já tinha conhecimento antes de 1905 aparecem explicitamente em seu artigo, como as menções (i) ao fenômeno de indução eletromagnética (logo no início do trabalho), (ii) aos experimentos elaborados para identificar os efeitos do movimento da Terra sobre fenômenos ópticos e elétricos, (iii) aos experimentos que sugeriam a dependência da massa do elétron com a velocidade, e (iv) aos experimentos e previsões de outras teorias relativas à pressão de radiação (*ibid.*, p.91). A menção (i) provavelmente refere-se ao livro de Föppl que Einstein teria lido. A menção (ii) é a mais polêmica do ponto de vista dos estudos históricos da teoria.

O livro de Föppl de 1894 que Einstein teria lido contém um capítulo específico sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. A primeira seção deste capítulo trata sobre a questão do movimento relativo e absoluto no espaço:

As discussões da cinemática, ou seja, da teoria geral do movimento, usualmente se baseiam no axioma de que na interação dos corpos só é importante o movimento relativo. Não se pode recorrer a um movimento absoluto pelo espaço pois não há meios de descobrir tal movimento se não há um objeto de referência disponível a partir do qual o movimento pode ser observado e medido (FÖPPL *apud* MARTINS, 2012a, p.24-25).

O exemplo de Föppl da impossibilidade de se descobrir o movimento absoluto é a indução eletromagnética em um condutor em razão do movimento relativo com um ímã (*idem*). Este é o exemplo com o qual Einstein inicia seu “artigo fundador” de 1905, problematizando a interpretação corrente da eletrodinâmica de Maxwell, o que sugere que houve alguma inspiração do livro de Föppl.

O indício (ii) vem do trecho em que Einstein (1983 [1905]a) cita “*as tentativas fracassadas em detectar qualquer movimento da Terra com relação ao ‘éter luminífero’*” (p.48), sem, no entanto, dizer quais. Como Miller aponta, Einstein possivelmente se referia tanto a experimentos com acurácia de primeira ordem (v/c) como de segunda ordem (v^2/c^2). Entre os de primeira ordem, encontram-se as observações de aberração por Bradley em 1728 e Arago em 1810, o experimento de Fizeau em 1851 e o primeiro experimento de Michelson juntamente com Morley realizado em 1887. Já entre os de segunda ordem, encontra-se o experimento de Michelson e Morley de 1887, e os experimentos ópticos de Lorde Rayleigh⁷⁸ em 1902 e Brace⁷⁹ em 1904

⁷⁸John William Strutt, Lorde Rayleigh (1842-1919), físico e matemático inglês.

⁷⁹DeWitt Bristol Brace (1859-1905), físico estadunidense.

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

(MILLER, 1981, p.91).

Como comenta Zahar (1973b, p.231), a não menção explícita de Einstein teria dado margem a muitas controvérsias históricas, como aquela referente ao suposto papel que os experimentos de Michelson e Morley (de 1887) teriam tido para o surgimento da TRE. Sobre o conhecimento de Einstein sobre estes experimentos, há indícios em falas pessoais, entrevistas e trechos de obras próprias que ele aparentemente de ele de fato os conhecia. Em seu importante trabalho, Holton (1978 [1973]) estuda o conhecido “folclore”, advindo de uma concepção de ciência que ele chama *experimentismo* (*ibid*, p.223), a qual estabelece uma equivocada *conexão genética* (*ibid*, p.204) entre os experimentos mencionados e o “surgimento” da teoria por Einstein de 1905. Em especial, Holton verifica que essa visão de ciência era compartilhada por reconhecidos cientistas, historiadores e filósofos da ciência, em especial, Reichenbach, um dos mais persistentes analistas das teorias relativísticas. Holton procura mostrar, principalmente por citações do próprio Einstein, que historicamente não houve a *conexão genética*, e que, embora Einstein soubesse dos experimentos, isso não lhe foi preponderante na construção da teoria. Entretanto, há aqui uma controvérsia advinda do fato de que Einstein se manifestou de forma diferente ao longo da vida sobre esta questão. Isso foi apontado por Pais (1995 [1982]), que põe como “verdade inquestionável” que Einstein sabia do trabalho de Michelson, e que isto influenciou de alguma forma a criação da TRE (*ibid*, p.146).

É razoável defender que Einstein ao menos conhecia os experimentos. Entretanto, deve-se salientar que essa influência não teria sido fundamental, e sim secundária. Por outro lado, Einstein menciona em mais de uma ocasião que teve influência mais concreta de outro experimento, o de Fizeau, realizado em 1851 (PAIS, 1995 [1982], p.135; STACHEL, 2005 [1998], p.129-30). Einstein teria afirmado que este poderia talvez ser considerado como o “*experimentum crucis*” para o surgimento da TRE (PATY, 1993, p.113), pois segundo ele próprio, o experimento de Fizeau mais o fenômeno da aberração estelar teriam sido “suficientes” à criação da teoria (PAIS, 1995 [1982], p.132). Para Pais (*ibid.*, p.133), esta teria sido a mais importante declaração feita por Einstein sobre as origens da TRE.

Embora os resultados de Fizeau sejam importantes historicamente por terem fragilizado as teorias de arrasto total de éter, influenciando em parte Einstein a adotar a teoria de Maxwell-Lorentz (PATY, 1993, p.113), é pouco conhecido qual teria sido seu(s) papel (éis) exato em seu pensamento. Uma hipótese é de que os resultados de Fizeau poderiam ter feito Einstein admitir que a lei (clássica) de soma de velocidades apresentava limitações, uma vez que eles eram

incompatíveis com a lei de Fresnel (4.1). Evidências para esta hipótese podem ser encontradas nos estudos sobre um manuscrito de Einstein não publicado de 1912, quando foi solicitado a ele um artigo de revisão da teoria (STACHEL, 2005, p.583).

O texto de Einstein possui vários trechos riscados e incompletos. Em uma seção de título *Aparente incompatibilidade do princípio da constância da velocidade da luz com o princípio de relatividade*, lemos:

[...] vimos até agora apenas que as três coisas seguintes são incompatíveis:

- a) o princípio de relatividade
- b) o princípio da constância da velocidade da luz (teoria de Lorentz) [Princípio da independência da velocidade da luz com relação a velocidade da fonte]
- c) as equações de transformação (...) [de Galileu], ou equivalentemente a lei do paralelogramo de velocidades [soma de velocidades galileana, ou newtoniana].

Chega-se à teoria conhecida como “teoria da relatividade” se forem mantidas a) e b), rejeitando-se c). A seguir mostraremos que este modo de proceder é *possível*. Mas qualquer um que não tenha se ocupado profundamente com a eletrodinâmica dos corpos em movimento estará certamente inclinado a manter a) e c) e abandonar b). Assim, partindo deste último ponto de vista, tirei algumas consequências, de forma a assim justificar o ponto de vista da teoria da relatividade (EINSTEIN *apud ibid.*, p.589).

Em seguida Einstein discute o experimento de Fizeau, e mostra que o Princípio da Constância da Luz e o Princípio da Relatividade só se mostram incompatíveis quando se supõe (tacitamente) a lei newtoniana-galileana de adição de velocidades (*ibid.*, p.591).

Tanto o experimento de Fizeau como o fenômeno de aberração remetem à questão da natureza da luz. Em geral, concepções corpusculares da radiação podem ser entendidas como Teorias de Emissão, como a teoria corpuscular newtoniana. Em teorias deste tipo, a velocidade da luz é somada diretamente com a velocidade da fonte. Por outro lado, concepções ondulatórias da radiação eram em geral vinculadas à ideia de um meio propagante das perturbações luminosas. O éter luminífero, o qual, por razão dos trabalhos de seguidores de Maxwell “fundiu-se” ao éter eletromagnético, seria este meio. Neste caso, a velocidade da luz não se somaria à velocidade da fonte, e sim seria constante com relação ao meio etéreo, isto é, independente da velocidade da fonte.

Segundo Stachel (2005 [1998], p.131), em um primeiro momento Einstein levou à sério a Teoria da Emissão, possivelmente em razão da sua hipótese heurística a respeito do quantum de luz, que foi exposta em outro artigo publicado também em 1905 no *Annalen der Physik* (*Sobre*

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz)⁸⁰. Provavelmente, outro motivo é de que a Teoria de Emissão é (aparentemente) compatível com o Princípio da Relatividade, (somente) no sentido de que o observador que acompanha a fonte não é capaz de identificar seu próprio movimento. Contudo, essa teoria permite que diferentes observadores (que não aquele junto à fonte) meçam diferentes velocidade para a luz (o que não é observado). A vantagem do Princípio da Constância da Luz é que ela é compatível com as equações de Maxwell-Lorentz (4.4), muito embora ela possibilitava violar o Princípio da Relatividade⁸¹.

O Princípio da Relatividade, conforme Einstein entendia, não discrimina nenhum referencial privilegiado, ao passo que o Princípio da Constância da Luz no vácuo parece exigir um referencial privilegiado. Não à toa que Einstein adverte o leitor, logo no início de seu artigo de 1905 de que considerará como postulado “*só aparentemente incompatível com o primeiro [Princípio da Relatividade] de que a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte luminosa*” (EINSTEIN, 1983 [1905]a, p.48). Em razão desta aparente contradição, Einstein teria ponderado, por algum tempo, sobre uma Teoria da Emissão.

Ao ter ciência do experimento de Fizeau e seus resultados, pode ter se deparado com o dilema entre o Princípio da Constância da Luz e a Teoria da Emissão. Segundo a lei de Fresnel (4.1), no referencial do meio que arrasta a luz (portanto, $v = 0$), a velocidade da luz é $c' = c/n$, isto é, a velocidade da luz nesse meio independe da velocidade do próprio meio, o que é uma evidência a favor da Teoria da Emissão. Entretanto, posteriormente abandona essa teoria para se ater ao Princípio da Constância da Luz, o qual fornece a mesma relação ($c' = c/n$) para o referencial do meio. Einstein teria estudado as consequências em se abandonar este último princípio, e teria percebido que isto seria infrutífero, e que a conciliação deste com o Princípio da Relatividade poderia ser possível por meio de uma análise crítica do conceito de simultaneidade à distância (STACHEL, 2005, p.594)

4.7.2 O analista de patentes e a “materialização” da simultaneidade

Entre os anos 1902 e 1909, Einstein trabalhou como perito técnico de terceira classe no Departamento de Patentes, em Berna. Foi seu primeiro emprego, arranjado por indicação do pai de

⁸⁰Título original em alemão: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.*

⁸¹Essa possibilidade só existe uma vez que se supõe um éter, isto é, o único meio onde a velocidade da luz é c .

seu colega, Marcel Grossmann. Com esse emprego, Einstein pode sustentar a si mesmo e sua família (seu primeiro filho nasceu em 1904). Conclui seu doutoramento em 1905 (publicado no ano seguinte), aos 26 anos de idade.

É relativamente corrente a ideia de que, no ambiente de trabalho, Einstein estava completamente distante da física teórica, seu verdadeiro interesse. O trabalho com análise de patentes parece, em primeira vista, não ter qualquer relação com os problemas que a física teórica enfrentava na virada do século XIX para o século XX. Na importante biografia científica de Einstein, Abraham Pais deixa transparecer a ideia de que Einstein estudava física nos seus “tempos livres”, isto é, quando não estava trabalhando com os pedidos de patentes:

Einstein portou-se bem no departamento de patentes. Levou a sério o trabalho e amiúde achava-o interessante. *Dispunha de tempo e energia suficientes para a física.* Em 1903 e 1904 publicou artigos sobre os fundamentos da mecânica estatística. Em 16 de setembro de 1904, a nomeação temporária tornou-se definitiva. A promoção seguinte, escreveu Haller [chefe do departamento à época], “teria de esperar até que dominasse completamente a tecnologia das máquinas; estudou física”. (...) Em 1º de abril de 1906 foi promovido a perito técnico de segunda classe (...) Agora sabia bastante sobre tecnologia e, escreveu Haller na época, “está entre os peritos mais estimados da repartição”. *Também encontrou tempo* para escrever notas bibliográficas para os *Annalen der Physik*. (...) No fim da vida, Einstein escreveu que a melhor coisa que Marcel Grossmann fez por ele foi tê-lo recomendado ao departamento de patentes com a ajuda do velho Grossmann. Sem dúvida. Os recursos de Einstein podem ter sido limitados, o casamento pode não ter sido perfeito, mas, *para o homem que desejava pensar em isolamento, os tempo de Berna foram os mais próximos do paraíso sobre a Terra* (PAIS, 1995 [1982], p.54, grifos nossos).

Fica evidente nos trechos grifados que Pais entende a atividade de Einstein no departamento como algo perpendicular às suas pesquisas em física teórica. Contudo, análises históricas recentes têm sugerido que o trabalho de Einstein em analisar e averiguar patentes teria fornecido muito mais que um salário bem-vindo à “subsistência” da família Einstein em Berna.

Para Galison (2003), o trabalho com pedidos de patentes teria influenciado Einstein em pelo menos dois sentidos: a metodologia sistemática necessária à análise dos documentos técnicos, e a análise propriamente dita do crescente número de pedidos de patentes de máquinas elétricas e eletromecânicas. E de fato, Einstein considerava o trabalho com patentes não como um fardo a interferir com o seu trabalho sobre física teórica, mas sim como um prazer produtivo. (...) *“Trabalhar sobre a formulação final de patentes tecnológicas foi uma verdadeira bênção de mim. Reforçava o pensamento multifacetado e também forneceu estímulos importantes para o pensamento físico”* (EINSTEIN *apud* PAIS 1995 [1982], p.54).

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

Curiosamente, durante a estadia de Einstein no departamento, houve dezenas de pedidos de patentes para sistemas de relógios elétricos (*ibid.*, p.247). Em especial, somente no ano de 1904 houve catorze pedidos, o mais alto número entre 1889 e 1910 (*idem*). Isso se explica em parte pelas aplicações entusiásticas de relógios elétricos a sistemas telegráficos, assim como pela crescente uso de relógios em locais públicos e privados. Cabos telegráficos, desde a metade do século XIX, cruzavam os mares em todo o mundo, estabelecendo as primeiras de formas de “comunicação elétrica à distância”. Curioso citar que no início do século XIX os relógios privados não tinham sequer ponteiros de minutos. Já nos últimos anos daquele século, a demanda social (na esfera privada e em particular na esfera industrial) por relógios precisos era tal que atrasos de quinze segundos eram inadmissíveis (*ibid.*, p.95). Como afirma Galison, a questão de coordenação ou sincronização de relógios se tornou central àquela época, ela aparecia em periódicos de filosofia, em periódicos de ciências físicas, e até mesmo em livros infantis de divulgação científica, alguns deles lidos por Einstein (*ibid.*, p.34).

Para Galison (*ibid*; 2005 [2003]), o estabelecimento da simultaneidade entre eventos distanciados e da sincronicidade entre relógios distanciados, centrais à abordagem de Einstein em seu artigo de 1905, foram também dois problemas que atraíram tanto físicos, como filósofos e engenheiros europeus no século XIX. O anseio por uma “materialização da simultaneidade”, nas palavras de Galison, movia fortemente as três irmãs (Física, Filosofia e Tecnologia). Por razões não só científicas, como também políticas (nas medidas dos governos em incentivar a construção de relógios públicos e privados), industriais (no controle de entrada e saída de operários, assim como na otimização da produção), militares (na mobilização sincronizada e precisa de tropas em regiões de conflito) e sociais (na sincronização de relógios de estações de trem, com o fim de se evitar acidentes por erros de sincronização):

A materialização da simultaneidade espalhou-se por um mundo que, na virada do século [XIX para o XX], era muito diferente do nosso. Era um mundo em que os limites mais importantes atingidos pela Física teórica se mantinham firmes, perante uma violante ambição moderna de estender, por todo o planeta, cabos por onde circulavam sinais horários, para fazer a coreografia da circulação de trens e para completar mapas. Era um mundo em que engenheiros, filósofos e físicos ombreavam lado a lado; em que o prefeito da cidade de Nova York discursava sobre o convencionalismo do tempo; em que o imperador do Brasil esperava, na margem do oceano, a chegada, por telégrafo, das horas europeias; e em que dois dos principais cientistas do século, Albert Einstein e Henri Poincaré, colocavam a simultaneidade nas encruzilhadas da Física, Filosofia e Tecnologia (GALISON, 2005 [2003], p.14).

A partir desta perspectiva, Galison (*ibid*) sugere que a visão corrente de Einstein, de um

“cientista-filósofo” distante de questões terrenas, *“perdido em teorias, enquanto ia distraidamente ganhando meramente o seu sustento no departamento de registro de patentes”* (p.257), pode ser complementada com outra visão, a de um Einstein “cientista-técnico (funcionário de patentes)”, *“refratando a metafísica subjacente da sua teoria da relatividade através dos mecanismos da modernidade mais simbolicamente tratados”* (*idem*). O contato de Einstein com os numerosos relógios de Berna é mencionado por Galison. Einstein morava na rua Kramgasse, no centro (hoje, o centro antigo) de Berna, onde se encontra uma das torres-relógio mais antigas e belas da cidade, o *Zytglogge*. Em seu caminho até a estação de bondes (da onde partia para o departamento) existiam vários relógios, muitos arquitetônicos, inclusive a torre-relógio da estação de trens de Berna:

Todos os dias Einstein saía de sua casa, virava à esquerda, e dirigia-se para o departamento de registro de patentes - uma caminhada que levava a um local de trabalho (...). Todos os dias tinha de passar a pé pelas grandes torres com relógios que, com as suas horas coordenadas, controlam Berna. Todos os dias passava pela miríade de relógios elétricos das ruas, ligados recentemente, e com orgulho, ao serviço central de telégrafo. Fazendo a sua volta desde a sua rua, a Kramgasse, até o departamento de registro de patentes, Einstein tinha de passar por vaixo de um dos mais famosos relógios da cidade [refere-se ao *Zytglogge*] (*ibid.*, p.245)

Em suma, a tese de Galison é de que Einstein estava submerso em um contexto de ânsia pela “materialização da simultaneidade”, isto é, de influência tecnocultural que tomava a atenção de filósofos, físicos e engenheiros, e isto teria tido algum papel mais relevante em sua produção científica: *“Einstein (...) deve ter tido em vista relógios coordenados enquanto andava às voltas com o seu artigo científico de 1905, tentando compreender o significado da simultaneidade à distância”* (*ibid.*, p.30).

O contexto em que viveu e trabalhou em Berna teria possibilitado a Einstein respirar essa “atmosfera tecnocultural”, principalmente pelo fato de situar-se em um país reconhecido pelas produções relojoeiras. Sua contribuição para o “problema da simultaneidade e da sincronização à distância” se daria então, de um ponto de vista mais geral no qual engloba-se a ciência no desenvolvimento social e material da sociedade, como uma etapa do processo da “materialização da simultaneidade” ocorrida ao longo de todo século XIX. A postura sistemática e operacional no seu “artigo fundador”, que será discutida na próxima seção, pode ser ainda melhor compreendida tendo em vista Einstein enquanto um “cientista-filósofo-técnico”.

4.7.3 O “artigo fundador”, Operacionalismo Epistemológico e influências filosóficas

O intuito de Einstein em seu “artigo fundador” parece ter sido o de unir a Mecânica e o Eletromagnetismo, mas de forma a não reduzir uma à outra (HIROSIGE, 1976, p.57). Inicia ele apresentando uma crítica à interpretação corrente das equações de Maxwell-Hertz, apontando para uma assimetria na teoria que parecia inerente ao fenômeno modelado. Em seguida, expõe os motivos de elencar os dois princípios (*Princípio da Relatividade e Princípio da Constância da Luz*), que sustentam toda sua teoria.

Exemplos deste gênero [assimetrias entre a mecânica e a eletrodinâmica de Maxwell], assim como o insucesso das experiências feitas para constatar um movimento da Terra em relação ao meio luminífero levam à suposição de que, tal como na Mecânica, também na Eletrodinâmica os fenômenos não apresentam nenhuma particularidade que possa fazer-se corresponder à ideia de um repouso absoluto. Pelo contrário, em todos os sistemas de coordenadas em que são válidas as equações da mecânica, também são igualmente válidas leis ópticas e eletrodinâmicas da mesma forma (...) Vamos erguer à categoria de postulado esta suposição (a cujo conteúdo chamaremos daqui em diante “Princípio da Relatividade”) (...) Essa teoria vai apoiar-se (...) na cinemática do corpo sólido rígido, *uma vez que as proposições de uma teoria deste gênero consistem na afirmação de relações entre corpos rígidos (sistemas de coordenadas), relógios e processos eletromagnéticos*. A insuficiente atenção a este fato é a raiz das dificuldades com que presentemente se defronta a eletrodinâmica dos corpos em movimento. (EINSTEIN, 1983[1905]a, p.48-9, grifos nossos)

Somente com estes dois princípios, sem hipóteses adicionais sobre a estrutura ou natureza dos constituintes da matéria (via tomada por Lorentz, Poincaré, Abraham e outros), Einstein é capaz de deduzir as Transformações de Lorentz na forma exata (para um sistema se movendo na direção do eixo x):

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma(t - vx),\end{aligned}\tag{4.10}$$

sendo x, y, z, t as coordenadas de um evento no sistema “em repouso”, x', y', z', t' as coordenadas do mesmo evento no sistema “em movimento”, e γ o fator relativístico:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\tag{4.11}$$

O artigo de Einstein é separado em duas partes, *Parte Cinemática* e *Parte Eletrodinâmica*. Nesta última, mostra a covariância completa das equações de Maxwell (com fontes) por Transformações de Lorentz (4.10), e que as transformações formam um grupo. Mostra que duas transformações seguidas levam à relação:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}, \quad (4.12)$$

sendo v a velocidade entre os referenciais medida em um referencial “em repouso” para qual dos sistemas de referências (S_1 e S_2) se movem respectivamente com velocidades v_1 e v_2 . O fato de definir velocidades relativas sem fazer referências a algum referencial privilegiado teria sido um dos fatores que levaram Einstein a considerar a introdução do éter supérflua. Einstein também pode mostrar que a relação:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2,$$

é invariante pelas transformações (4.10).

Ainda no mesmo trabalho, deduz as relações para o efeito Doppler relativístico e pressão de radiação. No último tópico, discute sobre a dinâmica do elétron. Mostra que, conforme a forma como se define a massa do elétron, poder-se-ia obter duas grandezas de valores distintos, “massa transversal” e “massa longitudinal” (compatíveis com os valores obtidos por Lorentz um ano antes). Como foi comentado anteriormente neste trabalho, não há no artigo de Einstein referências bibliográficas formais. Há somente, ao fim, o agradecimento a Michele Besso, “*pela sua colaboração nos problemas aqui tratados e pelas suas muitas e valiosas sugestões*” (EINSTEIN, 1983 [1905]a, p.85).

Dois pontos centrais neste trabalho importante de Einstein é sua abordagem axiomática e o pano de fundo filosófico que o guia nos impulsos iniciais. Sua interpretação do formalismo matemático mínimo daquilo que hoje chamamos de TRE é caracterizada pelo *Operacionalismo Epistemológico* adotado por ele em seu artigo de 1905. Como já foi mencionado anteriormente, esta postura se caracteriza por evitar questões indecidíveis, proposições não testáveis e asserções sobre entidades inobserváveis (MARTINS, 1981, p.103). No caso, as entidades inobserváveis são as medidas de comprimentos espaciais e intervalos de tempo entre eventos. Eles são ditos “inobserváveis” pois, nesta interpretação, podemos entender que os objetos não têm um “comprimento-em-si”, assim como os eventos não têm um “intervalo-temporal-em-si” entre eles, de forma que estes (comprimentos espaciais e intervalos temporais) só são definidos por meio de *operações* envolvendo réguas, relógios e trocas de pulsos luminosos.

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

Essa postura de Einstein fica parcialmente explícita em diferentes pontos de seu artigo. No primeiro tópico, de título *Definição de simultaneidade*, lemos a definição dada à noção de “Tempo”:

“Tempo” de um acontecimento será então a indicação, simultânea desse acontecimento, que é fornecida por um relógio que satisfaz às seguintes condições: está colocado em repouso, no local do acontecimento; é síncrono de um outro relógio em repouso, mantendo-se esse sincronismo em todas as determinações de tempo (EINSTEIN, 1983 [1905], p.52).

No tópico seguinte, *Sobre a relatividade de comprimentos e tempos*, Einstein expõe duas maneiras diferentes de se medir o comprimento de uma haste rígida em movimento, sendo que em ambas fica claro o caráter tributário do comprimento do objeto ser (em algum nível) tributário do processo de medida (com réguas):

Procuremos determinar o comprimento da haste *em movimento*, imaginando para isso as duas operações seguintes:

a) O observador acompanha no seu movimento a haste que pretende medir, levando consigo a régua anteriormente mencionada [com a qual a haste foi medida no referencial próprio], e mede diretamente o comprimento da haste sobrepondo-lhe a régua, exatamente como se haste, observador e régua estivessem em repouso.

b) O observador determina quais são os pontos do sistema em repouso que coincidem no instante t com a origem e a extremidade da haste, empregando para isso relógios síncronos, situados, em repouso, no sistema em repouso (...). A distância entre estes dois pontos, é igualmente um comprimento, que se pode designar por “comprimento da haste” (*ibid.*, p.53).

Como comenta Hirosige (1976), há uma proximidade entre as noções de Tempo e Espaço de Einstein em 1905 e aquelas presentes no sistema filosófico de David Hume (p.58). Einstein relatou que lia e debatia obras do filósofo em encontros casuais na chamada *Akademie Olympica*, grupo de reuniões científicas, filosóficas e políticas com seus colegas Conrad Habicht e Maurice Solovine⁸², quando residia em Berna (PAIS, 1995 [1982], p.153). Em *Notas Autobiográficas*, Einstein registrou:

A compreensão do axioma [de caráter absoluto do tempo] e do seu caráter arbitrário é o ponto essencial para a solução do problema [*Gedankenexperiment* que Einstein teve aos 16 anos, comentado anteriormente]. O tipo de raciocínio crítico necessário para a descoberta desse ponto central foi, no meu caso, enriquecido especialmente com a leitura das obras filosóficas de David Hume e de Ernst Mach (EINSTEIN, 1982[1949], p. 55-6).

⁸²Maurice Solovine (1875-1958), matemático romeno.

Mais especificamente, para Hume a ideia de tempo provém da sucessão de certos “objetos reais”, ou de “existências mutáveis” (HUME, 2000[1739], p.92), e argumenta que seria um engano afirmar que se possui tal ideia na ausência de existências mutáveis. Nosso acesso ao tempo se daria por uma *impressão de sensação*, para que assim “*possamos conhecer sua natureza e suas qualidades*” (*ibid*, p.93). De certa forma, a postura operacionalista de Einstein em 1905 é bastante próxima as ideias de Hume. No caso, intervalos de tempo são (operacionalmente) observáveis, isto é, por meio de uma operação envolvendo troca de sinais luminosos entre relógios sincronizados inicialmente. Tempo, no trabalho de Einstein em 1905, é aquilo que se *mede* (ou, aquilo que se *vê*, uma impressão de sensação) por meio de um relógio. Há também proximidade entre as noções de espaço de Einstein e Hume. Este último afirma que “*devemos sempre confessar que não possuímos nenhuma ideia de uma extensão real [ideia de espaço] se não a preenchemos com objetos sensíveis, e se não concebemos suas partes como visíveis e tangíveis*” (*ibid.*, p.92). Isto é, não teríamos ideia ou ciência do espaço se não detemos meios de fazê-lo visível e tangível, ou, de *medi-lo*. Para Einstein em 1905, falar em comprimento de um objeto no espaço significa realizar uma operação que envolve medidas de comprimento com réguas e sua comunicação a outros referenciais por meio de sinais luminosos.

Einstein também teve forte influência das ideias de Mach, sendo as principais aquelas relativas às críticas sobre os conceitos newtonianos de Espaço e Tempo Absolutos. Contudo, o próprio Einstein teria afirmado que as ideias de Hume teriam tido mais influência sobre ele do que aquelas de Mach (HIROSIGE, 1976, p.57), ainda que estas tenham sido de caráter bem geral (*ibid*, p.58). Muitos autores defendem que houve uma influência, muitas vezes direta, das ideias de Mach sobre Einstein, em especial Reichenbach e Holton (1968). De qualquer forma, é possível notar em algumas obras de Mach traços das concepções que mais tarde emergiriam de algumas interpretações dos formalismos da TRE e também da TRG.

Entre as críticas a Newton, entre elas a de que ele não foi fiel à sua postura de se ater aos fatos (MACH, 2012 [1883], p.223), Mach acusa a ideia de “Tempo Absoluto” independente de toda variação, defendendo que o tempo é uma “*abstração, à qual chegamos pela mudança das coisas*”, e que o “Tempo Absoluto” não poderia ser medido por comparação a nenhum movimento, não tendo assim qualquer valor prático e científico, e sendo, portanto, um ocioso conceito metafísico (*ibid*, p.224). Essa concepção de tempo é próxima àquela de Hume, e também à definição de tempo dada pela interpretação de Einstein segundo o Operacionalismo Epistemológico.

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

Acerca do Espaço, também há uma proximidade entre as concepções de Mach e aquelas presentes na abordagem de Einstein no artigo “fundador” de 1905. Mach (2012 [1883]), em sua obra *Desenvolvimento histórico-crítico da mecânica*⁸³, afirma que:

(...) ninguém pode dizer nada sobre o espaço absoluto e sobre o movimento absoluto, que não sejam meras abstrações, sem manifestação possível na experiência. Todos os nossos princípios da mecânica (...) são conhecimento experimental sobre posições e movimentos relativos dos corpos *ibid.*, p.229).

Novamente, a ideia de Mach de definir espaço pela via experimental é próxima ao procedimento operacional de Einstein quando da sua formulação da teoria. Essa correlação sugere, como defendem Hirosige (1976) e Holton (1968), uma influência das ideias machianas sobre o jovem Einstein.

É interessante notar também as semelhanças das posturas de Poincaré ao escrever em 1902 *Ciência e Hipótese*⁸⁴ e suas supostas influências sobre Einstein, em especial quanto à negação do Espaço e Tempo Absolutos. Como Pais afirma, Einstein provavelmente conhecia bem essa obra, o que é corroborado pelo relato de Solovine, um dos colegas do *Akademie Olympia*: “[este] livro nos impressionou profundamente e nos deixou sem respiração durante semanas e semanas” (SOLOVINE *apud* PAIS, 1995 [1982], p.153). De fato, há alguns elementos centrais no texto de Poincaré que poderiam ter influenciado profundamente o pensamento de Einstein antes e durante o ano de 1905. Em sua obra, afirma que os tratados da Mecânica não definem com precisão o que é experiência, o que é raciocínio matemático, o que é convenção e o que é hipótese. E também, que:

- 1.º - Não existe espaço absoluto e só concebemos movimentos relativos; contudo, enunciamos, quase sempre, fatos mecânicos como se houvesse um espaço absoluto como referência.
- 2.º - Não existe tempo absoluto; dizer que dois períodos de tempo são iguais é uma afirmação que não tem, nela própria, nenhum sentido e só pode vir a ter sentido por convenção.
- 3.º - Não só não temos a intuição direta de dois períodos de tempo, como também não temos, sequer, a da simultaneidade de dois acontecimentos que se dão em lugares diferentes; é o que expliquei num artigo intitulado *Measure du Temps* (POINCARÉ, 1984 [1902], p.81).

Talvez a questão da “não intuição direta” da simultaneidade tenha sido aquela que mais tenha interessado Einstein em suas leituras. Isto pelo fato de que a relatividade da simultaneidade

⁸³Título original em alemão: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*.

⁸⁴Título original em francês: *La Science et l'Hypothèse*.

é exatamente o primeiro tópico de seu artigo *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, e um dos argumentos utilizados para ferir o caráter absoluto da simultaneidade é o fato de não sabermos, sem medições de tempo em relógios (ou seja, não sabemos por *intuição direta*), se dois eventos distanciados são de fato simultâneos.

Certamente, a relatividade da simultaneidade foi um passo importante para o desenvolvimento da teoria conforme apresentada por Einstein, tendo sido a via inicial à construção dos postulados e as deduções que provém destes. Como Stachel ilustra, Einstein reconhece o importante papel da relativização do conceito de simultaneidade: “*Pela revisão do conceito de simultaneidade, que lhe concedia [à constância da velocidade da luz no vácuo] uma forma mais maleável, cheguei então à teoria da relatividade especial*” (EINSTEIN *apud* STACHEL, 2005 [1998], p.131).

4.7.4 A realidade dos fenômenos relativísticos na interpretação de Einstein

De forma geral, pode-se entender que para a interpretação de Einstein em 1905 os comprimentos espaciais e intervalos temporais entre eventos não são bem *definidos a priori*, mas são dependentes da velocidade relativa entre referenciais inerciais. O comprimento de um objeto, por exemplo, não seria uma propriedade *intrínseca* (ainda que medido no referencial próprio do objeto), mas sim uma propriedade *relacional* (MARTINEZ, 2007, p.214). Não estaria definido por si só de forma independente, seria *metrogênico*⁸⁵. Essa postura acarreta em certa dificuldade para se discutir a “realidade” dos efeitos relativísticos, como a dilatação temporal e a contração espacial, quando comparada com a postura referente à interpretação de Lorentz-Poincaré.

Em 1911, questionado sobre a realidade física da contração em sua teoria em comparação com a abordagem de Lorentz pelo matemático Varicak⁸⁶, Einstein afirmou que:

O autor injustificadamente afirma que há uma diferença entre a abordagem de Lorentz e a minha *quanto aos fatos físicos*. É confusa a questão de a contração de Lorentz existir ou não. Não existe realmente, na medida em que não existe para um observador que se move (com a régua); existe realmente no sentido em que pode, em princípio, ser demonstrada por um observador em repouso. (EINSTEIN *apud* PAIS, 1995 [1982], p.165).

⁸⁵*metro* (medida) + *gênico* (de gênese, passar a existir). Metrogênico é um adjetivo utilizado para aquilo que é desconhecido até que se faça uma medida ou teste. O termo foi utilizado pelo filósofo alemão Adolf Grünbaum (1923-).

⁸⁶Vladimir Varicak (1865-1942), físico e matemático croata.

4.7 Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)

Isto é, pode-se entender que para Einstein (no contexto desta última informação), a contração seria “relativamente real” (no sentido que ocorre para alguns observadores e para outros não). Há uma importante diferença entre as posturas de Einstein e Lorentz para os mesmos processos (contração e dilatação relativísticas). Como salienta Galison (1979, p.92), para Einstein, esses processos decorrem “naturalmente” da adoção axiomática dos princípios presentes em seu artigo de 1905. Já na interpretação de Lorentz-Poincaré, os processos não seriam “naturais”, e por isso deveriam ser explicados por mecanismos ou forças (introduzidos pelo éter) que fariam com que elétrons (e tudo aquilo que fosse constituído destes) fossem contraídos espacialmente na direção de movimento na proporção $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Posteriormente Minskowski, assim como Lorentz, considerou as Transformações de Lorentz como a explicação dos fenômenos, e não como uma consequência de nossos processos de medida de comprimentos e intervalos (*ibid.*, p.93).

Segundo Martins (2012b, p.44), a postura de Einstein em 1905 teria posteriormente motivado ou inspirado a postura de outros importantes físicos, como Heisenberg⁸⁷, no contexto do desenvolvimento inicial da Física Quântica. De certa forma, a interpretação ortodoxa (ou, interpretação de Copenhagem, ou ainda, interpretação da complementaridade) da física quântica é bastante próxima a um operacionalismo epistemológico⁸⁸. Nas décadas seguintes Einstein se tornou bastante crítico da postura operacionalista na física quântica, defendendo que a teoria à época fornecia uma descrição incompleta dos fenômenos da escala quântica. Do ponto de vista filosófico, Einstein, desde a “juventude” até a “maturidade”, teria realizado uma “peregrinação” de uma forma de Empirismo até uma forma de Realismo, como defende Holton (1968). Para Martins (2012b), teria se comportado de forma oportunista (do ponto de vista epistemológico, como ele mesmo se declarou) em cada etapa da sua carreira científica (p.44).

É importante salientar que não há consenso entre filósofos da ciência e estudiosos das teorias relativísticas se de fato Einstein tinha a postura operacionalista epistemológica em seu “artigo fundador”. Dieks (2010, p.318) argumenta que muitos entendem a postura de Einstein como operacionalista pelo fato da necessidade deste de *definir* conceitos físicos, como Espaço e Tempo. Contudo, mesmo depois de Einstein ter “peregrinado” ao Realismo, sua necessidade em definir conceitos físicos permanece, muito embora tivesse se tornado crítico ferrenho de concepções operacionalistas e empiristas das teorias relativísticas. Em suas *Notas Autobiográficas* de 1949, por exemplo, lemos:

É preciso se compreender claramente o que coordenadas espaciais e duração temporal entre eventos

⁸⁷Werner Karl Heisenberg (1901-1976), físico alemão.

⁸⁸Sobre o debate de algumas das interpretações da física quântica, ver Pessoa Jr (2003).

significam em física. A interpretação física de coordenadas espaciais pressupõe um sistema de referência fixo, o qual, contudo, pode estar em um estado mais ou menos definido de movimento (sistema inercial). Em um sistema inercial dado, as coordenadas [espaciais] significam os resultados de determinadas medidas como réguas rígidas (estacionárias) (...) Se, então, tenta-se interpretar o tempo de um evento de forma análoga, é preciso um meio para se medir a diferença no tempo (...) Um relógio em repouso relativo ao sistema inercial define o tempo local (EINSTEIN, 1949, p.55).

Zahar (1973a, p.108) defende que a ideia de que Einstein era em 1905 operacionalista (ou positivista) é um mito motivado pelo fato do postulado da velocidade da luz ser não intuitivo. Essa ilusão era também fomentada, segundo Zahar (*ibid.*, p.122), por comentadores que acreditavam que Einstein não fazia (à época) asserções metafísicas, sendo sua teoria uma mera descrição de operações físicas. Brown (2005, p.91) comenta que o Operacionalismo, importante para alguns positivistas lógicos, ganhou má fama ainda no início do século XX. Isto fez com que muitos filósofos e cientistas passassem a discutir, por um tempo, sobre a natureza das teorias relativísticas e do Espaço-Tempo sem fazer referência a “medidas com relógios e réguas”. Para Dieks (2010, p.321), foi somente com a queda do Empirismo Lógico que os filósofos da Ciência realmente compreenderam a concepção de Einstein sobre o status dos conceitos físicos. Nota-se que há conflitos entre as ideias de Dieks (*idem*) e Martins (2012b): os filósofos da ciência se equivocaram ao analisar a postura de Einstein em 1905? Ou Einstein era de fato um operacionalista e mudou gradualmente sua postura epistemológica com o passar dos anos? Neste trabalho, consideraremos esta última posição.

Com base nos estudos sobre interpretações da TRE, podemos afirmar que a interpretação de Einstein aqui discutida é próxima à “interpretação do Relativismo relativístico” apresentada por Pessoa (2012), à “interpretação usual da troca de sinais luminosos” apresentada por Mittelstaedt (2011), e à “interpretação positivista” apresentada por Tonnelat (1971). Usando as categorias de Niiniluoto (1999) e Hacking (2012 [1982]), podemos classificar a postura de Einstein em 1905 como Antirrealismo (Agnosticismo) de Entidades e Antirrealismo (Operacionalismo) de Teorias. Como discutido anteriormente, as asserções sobre Espaço e Tempo em seu artigo são quase sempre tributárias de “definições” ou “procedimentos” usando réguas, relógios, e pulsos eletromagnéticos. Se considerarmos que Einstein tinha uma postura empirista inspirada por Hume e principalmente Mach (HOLTON, 1968), pode-se dizer que “comprimento” e “duração” são, antes das medidas, “conceitos a determinar”. Quanto ao éter, a postura de Einstein também é o Agnosticismo, uma vez que não afirmou sua inexistência, mas sim que era *superfluo* (isto é, caso existisse, isso não interferiria em nada em sua teoria) (MARTINS, 1981, p.103). O

Antirrealismo de Teorias se deve ao fato de que, para Einstein em 1905, não podemos ter acesso a informações sobre coordenadas espaciais e temporais sem realizar medidas.

4.8 Interpretação Dinâmica de Poincaré (1906)

4.8.1 *Polytechnicien e grand savant*

Henri Poincaré foi um intelectual distinto, considerado como uma lenda em seu próprio tempo (MILLER, 1973, p.210). Era reconhecido dentro e fora da França, recebeu diversas honrarias, prêmios e medalhas. Na França, antes de completar 40 anos já havia recebido todas as principais formas de condecoração a intelectuais franceses (*ibid.*, p.211). Poincaré adorava viajar, foi o que hoje poderíamos chamar de internacionalista, pois explorava e cultivava as ciências de diferentes nacionalidades e filosofias. Escreveu mais de quinhentas memórias, trinta tratados, proferia diversas palestras em várias línguas. Seu currículo oficial, ao final de sua vida, era uma monografia que ultrapassava as cem páginas (*idem*).

Formou-se na prestigiada École Polytechnique de Paris na década de 1870, instituição que ainda hoje goza de um reconhecimento ímpar. Ingressou em um período estável para a França, que tinha acabado de sair derrotada (e humilhada) da Terceira Guerra Franco-Prussiana em 1871 (GALISON, 2005 [2003], p.51). Na École Poincaré teve sua formação científica e principalmente matemática, foi um dos principais *polytechnicien* da história da instituição. Posteriormente, durante sua carreira, trouxe várias contribuições importantes. Na matemática, se debruçou sobre topologia algébrica, teorias de sistemas dinâmicos, funções automorfas e abriu caminho para a teoria de funções de várias variáveis complexas. Na física, Poincaré teve contribuições importantes nas teorias de caos determinístico (inventou os Mapas de Poincaré), na mecânica celeste teórica, na astronomia e na eletrodinâmica dos corpos em movimento. Também se dedicava a questões metacientíficas. Publicou obras nas quais tratava, por vezes de forma entrelaçada, problemas científicos e tecnológicos e questões sobre filosofia da ciência. Tinha participações e interesses tão diversos de tal forma que hoje podemos classificá-lo como um *grand savant* do século XIX (*ibid.*, p.49-55).

A iniciação filosófica de Poincaré se deu no mesmo período de seu ingresso na École. O filósofo Emile Boutroux⁸⁹ casou-se com sua irmã, e com ele ingressou em debates filosóficos. Segundo Galison (2003, p.81), foi neste momento que Poincaré começou a flertar com

⁸⁹Étienne Émile Marie Boutroux (1845-1921), filósofo e historiador da filosofia francês.

o *Convencionalismo*, postura que anos depois lhe seria característica. Nos círculos filosóficos de Boutroux, posições extremas idealistas ou empiristas eram negadas, questões puramente metafísicas eram evitadas, e as ciências eram vistas como inevitavelmente ligadas às ciências humanas (*idem*). A “insegurança” com o puramente metafísico, ou com aquilo que está muito além das observações (o que não deixa de ser uma raiz no Empirismo), teria moldado a postura epistemológica de Poincaré sobre a objetividade da ciência. Isto fica parcialmente claro em citações de sua obra *O Valor da Ciência*⁹⁰, de 1904:

A ciência, em outros termos, é um sistema de relações. (...) os objetos exteriores, para os quais foi inventada a palavra *objeto*, são justamente *objeto*, e não aparências fugidias e inapreensíveis, porque não são apenas grupos de sensações, mas grupos cimentados por um liame constante. É esse liame, e só esse liame que neles é o objeto [em-si]⁹¹, e esse liame é uma relação (POINCARÉ, 1984 [1902], p.167).

Para Poincaré o objetivo da ciência “*não é as coisas-em-si, mas as relações entre as coisas; fora essas relações não há nenhuma realidade cognoscível*” (*apud* MILLER, 1973, p.235). Sua postura era próxima ao que hoje se denomina Realismo Estrutural na literatura filosófica (WORRALL, 1994). Podemos entender, com base nas categorias de Niiniluoto (1999), a postura de Poincaré como um *Realismo Epistemológico de relações* e um *Agnosticismo Ontológico de entidades e processos inobserváveis*. Nas categorias de Hacking (2012 [1983]), Poincaré seria um antirrealista (agnóstico) de entidades e um realista de teorias (por limitar a objetividade do conhecimento científico às relações entre objetos, expressas nas teorias físicas matematicamente).

Poincaré também era muito interessado em assuntos tecnológicos, como a questão da telegrafia sem fio, novidade na segunda metade do século XIX (DARRIGOL, 2000, p.352-353). Problemas envolvendo a coordenação e sincronização de relógios distantes também ocuparam sua mente por muito tempo. Estes estavam conectados a questão da telegrafia com fio, que teve seu ápice em meados do mesmo século, com a qual Poincaré lidou intensivamente durante sua estadia no Departamento de Longitudes de Paris (GALISON, 2003, p.40). Estes estudos diversos (matemática, física e tecnologia) parecem se entrelaçar no pensamento de Poincaré, quando, por exemplo, interpreta a variável “tempo de local” nas Transformações de Lorentz por

⁹⁰Título original em francês: *Le Valeur de la Science*.

⁹¹O termo “em-si” não aparece na edição traduzida para o português utilizada. Na citação de Miller (1973, p.235) do mesmo trecho, lê-se “object in itself”. No original em francês, lê-se “objet en eux”.

meio de um procedimento de sincronização de relógios análogo àquele empregado por cabos telegráficos (*ibid.*, p.211), como será discutido em seguida.

4.8.2 Longitudes, Física de Princípios e Convenções

Em 1893, Poincaré ingressou no Departamento de Longitudes de Paris. À época houve vários debates técnicos sobre convenções do Tempo, como a decimalização do Tempo e do Espaço (*Convention du Mètre*, ocorrido em Paris, 1875), meridianos (*International Meridian Conference*, em Washington, 1884), tempos regionais, entre outros (GALISON, 2003, p.174). A convenção sobre os meridianos era de especial interesse, uma vez que o problema da determinação de longitudes era um dos mais antigos, e tinha implicações para diversos fins, como Astronomia e Cartografia.

Uma forma de determinar a longitude localmente era por meio de eventos astronômicos (como eclipses de satélites de Júpiter, trânsitos de Vênus entre o Sol e a Terra), procedimento já bem conhecido dos astrônomos no século XIX (*ibid.*, p.182). Outra forma, possibilitada pelos cabos telegráficos que cruzavam os mares em todo mundo, seria por meio de trocas de pulsos eletromagnéticos, conforme notado por Poincaré quando trabalhava no Departamento de Longitudes (*idem*). A ideia central, tanto do procedimento por eventos astronômicos como por troca de sinais eletromagnéticos, era a *simultaneidade*. Para se determinar a longitude localmente, era preciso dois relógios *sincronizados* (um em um local de longitude conhecida, como Greenwich, e outro no local onde se quer determinar a longitude local). Os relógios seriam sincronizados por meio de “eventos simultâneos”, como a chegada da informação proveniente de um eclipse (de um satélite de Júpiter, por exemplo), ou a troca de sinais eletromagnéticos em cabos telegráficos.

Segundo Galison (2003, p.182), por volta de 1897 Poincaré, ainda no departamento, tinha ciência de que o procedimento de trocas de sinais era mais eficiente enquanto “padrão de simultaneidade” do que aquele por eventos astronômicos. Era claro, porém, que se fazia necessário neste procedimento levar em conta o tempo de propagação dos sinais nos cabos, o que já era feito com relativa precisão à época (*ibid.*, p.183). Todavia, esta precisão, para Poincaré, exigente quanto às medições, não era suficiente (GALISON, 2005 [2003], p.190). Quando os cabos eram utilizados para cartografia, erros de décimos de segundo (no processo de sincronização) acarretavam em erros da ordem de quilômetros nos mapas (*idem*).

Em 1898 Poincaré publica o artigo de título *A Medida do Tempo*⁹², no qual ataca a questão da simultaneidade com base no procedimento de trocas de pulsos eletromagnéticos. Como menciona Galison (*ibid.*, p.190-193), é um trabalho onde tecnologia, filosofia e física se cruzam. O raciocínio de Poincaré se pautava na relação de dupla via entre “sincronizar relógios” e “calcular o tempo de transmissão” (*ibid.*, p.185): para sincronizar relógios distanciados, precisa-se saber o tempo de transmissão, para saber o tempo de transmissão, precisa-se ter relógios distanciados sincronizados:

É difícil separar os problemas qualitativos da simultaneidade do problema quantitativo da mensuração do tempo; ou se utiliza um cronômetro, ou se tem em conta uma velocidade de transmissão, como a da luz, visto que não podemos medir tal velocidade sem *medir* um intervalo de tempo (POINCARÉ *apud* PAIS, 1995 [1982], p.145).

E conclui:

A simultaneidade de dois eventos, ou a ordem da sua sucessão, bem como a igualdade entre dois intervalos de tempo, tem de ser definida de modo que as exposições das leis naturais sejam tão simples quanto possível. Em outras palavras, todas as regras e definições resultam de um oportunismo inconsciente (POINCARÉ *idem*).

Desta forma, argumentando que “*não temos intuição direta da igualdade entre dois intervalos de tempo*” (POINCARÉ *apud ibid.*, p.144), Poincaré defende que a simultaneidade deve ser *definida* pela troca de sinais, sendo antes estabelecida por *convenção* a velocidade de ida e de volta das transmissões destes sinais. Isto é, a atribuição de simultaneidade a dois eventos distanciados fica tributária de uma convenção. Esta convenção é de que “*a luz tem velocidade constante, e, em particular, que esta velocidade é a mesma em todas as direções*” (DARRIGOL, 2005, p.11).

Ao lado de outras “regras da ciência”, como as leis de Newton e as leis da Termodinâmica, a simultaneidade, para Poincaré, era adotada não por ser *verdadeira*, mas por ser *conveniente*, e por não se conseguir imaginar uma alternativa mais simples (GALISON, 2005 [2003], p.193). Em mais de uma ocasião, Poincaré argumentou que os princípios da Mecânica, não obstante suas origens empíricas, tinham se tornado completamente irrefutáveis, acabando por se transformar em definições ou convenções (DARRIGOL, 2000, p.355). Extremamente notável foi seu uso da definição (ou convenção) de simultaneidade para interpretar a variável “tempo local” fictícia de Lorentz (isto é, o tempo no referencial S') (4.8). Como comenta Galison (2005

⁹²Título original em francês: *La Mesure du Temps*.

4.8 Interpretação Dinâmica de Poincaré (1906)

[2003], p.209), ao fazer isto Poincaré transpõe as barreiras entre tecnologia, filosofia e física, aplicando um procedimento técnico de sincronização de relógios para o seio da Física teórica.

No ano de 1900, em um evento comemorativo na Holanda dos vinte e cinco anos do doutoramento de Lorentz (*Lorentzfestschrift*), Poincaré apresenta o trabalho de título *A teoria de Lorentz e o princípio de reação*⁹³, no qual expõe sua interpretação do “tempo local” e aponta para a falha da teoria de Lorentz em violar a terceira lei de Newton (DARRIGOL, 2005, p.10). Utilizando pela primeira vez o procedimento de sincronização de relógios em movimentos relativos ao éter, Poincaré entende o “tempo local” como “*precisamente o ‘tempo’ que os relógios indicavam em um referencial em movimento quando eram coordenados pelo envio, de um para os outros, de um sinal eletromagnético*” (GALISON, 2005 [2003], p.209). Ainda em suas palavras:

Suponho que observadores colocados em pontos diferentes acertam os seus relógios por meio de sinais ópticos; que tentam fazer a correção destes sinais devida ao tempo de transmissão, mas que, ignorando o seu movimento de translação e acreditando, por consequência, que os sinais viajam à mesma velocidade em ambas as direções, se limitam a fazer o cruzamento das observações enviando um sinal de A para B, e depois outro de B para A. O tempo local t' é o tempo indicado por relógios acertados desta maneira (POINCARÉ *apud idem*).

A convenção da velocidade da luz ser a mesma em qualquer direção (para ambos os observadores A e B) era especial a Poincaré, pois era compatível com o Princípio da Relatividade (também uma “regra” conveniente), no sentido de que nenhum dos observadores poderá determinar a velocidade absoluta com relação ao éter pelo procedimento de trocas de sinais (DARRIGOL, 2005, p.11):

Todos os fenômenos que forem originados em A, por exemplo, irão ficar desajustados em atraso, mas ficarão todos atrasados da mesma quantidade, e o observador não será capaz de se aperceber disso porque o seu relógio estará atrasado; assim, como diria o *princípio da relatividade*, não há forma de se saber se ele está em repouso ou em movimento absoluto (POINCARÉ *apud GALISON*, 2003, p.217).

A variável t' , que não tinha interpretação física para Lorentz, passa a ter interpretação física com Poincaré. Contudo, Lorentz de início não comentou a interpretação de t' apresentada, se limitando a atacar o outro problema apontado. Em sua teoria o éter podia exercer força sobre os elétrons, enquanto que estes não podiam exercer qualquer força sobre o éter. Isto é, sua teoria

⁹³Título original em francês: *La théorie de Lorentz et le principe de la réaction*.

violava do princípio da ação e reação, conforme apontara Poincaré (GALISON, 2005 [2003], p.211).

4.8.3 A crise na Física na virada de século e a realidade do éter

Nos últimos anos do século XIX, Poincaré se dedicou ao estudo pormenorizado das principais teorias eletrodinâmicas da época. Na época, se tornou autoridade no assunto, sendo apreciado por seus conterrâneos, mas também pelos alemães e outros europeus (DARRIGOL, 2000, p.354). Como comenta Darrigol (*ibid.*, p.351), Poincaré teria notado uma “crise severa” na Física naquele momento, pois muitas destas teorias violavam o que considerava ser seus princípios gerais. A teoria de Lorentz, a mais mais bem sucedida empiricamente, violava a terceira lei de Newton (*idem*). Além disso, ela também parecia violar o Princípio da Relatividade em situações específicas, e para se aceitar isso Poincaré julgou que o custo seria “*uma modificação profunda em nossas ideias sobre eletrodinâmica*” (POINCARÉ *apud ibid.*, p.358).

Outras descobertas na virada de século abalavam a “Física de princípios”, aumentando a crise alertada por Poincaré. A Radiotividade, ou a emissão espontânea de partículas radiativas, parecia violar o Princípio da Conservação da Energia (chamado por Poincaré de *Princípio de Mayer*⁹⁴). A conservação da massa (chamado por Poincaré de *Princípio de Lavoisier*⁹⁵) estava sendo questionada por experimentos de raios β . Frente a esta situação, a esperança de Poincaré era alterar a teoria de Lorentz, pouco a pouco, até que pudesse ser satisfatória sem violar nenhum destes princípios fundamentais (GALISON, 2003, p.218). Para ele, abandonar algum destes princípios, como o Princípio da Relatividade, seria como “*privar-se de uma arma preciosa*” (POINCARÉ, 1984 [1902], p.133).

A manutenção ou não de um éter mecânico (no sentido de ser capaz de ações mecânicas) também compunha um dos pilares da crise, segundo Poincaré. As características eletromagnéticas do éter eram consenso, uma vez que eram invocadas nas principais teorias eletrodinâmicas da época (em especial a teoria de Lorentz). Em alguns momentos, para Poincaré a hipótese do éter parecia ser tão convencional quanto os princípios da Mecânica, conforme declarou entre 1887 e 1888:

Pouco importa se o éter existe realmente ou não; isto é uma questão para os metafísicos [filósofos].

O que é essencial para nós é que tudo ocorre como se ele realmente existisse, e que esta hipótese

⁹⁴Julius Robert von Mayer (1814-1878), médico alemão.

⁹⁵Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794). químico francês.

4.8 Interpretação Dinâmica de Poincaré (1906)

é conveniente para nós para a explicação dos fenômenos. Afinal, temos alguma razão em acreditar na existência de objetos materiais? Esta é também apenas mais uma hipótese conveniente; somente isso nunca vai deixar de ser válido, de forma que, sem dúvida, algum dia o éter será dispensado como inútil (POINCARÉ *apud* DARRIGOL, 2005, p.9).

Contudo, Poincaré nunca abandonou o éter (*idem*). A hipótese do éter possibilitava uma compreensão à propagação de ondas eletromagnéticas, e assim exprimia relações entre objetos. Assim, seguindo sua própria filosofia, o éter seria real e não uma convenção (MILLER, 1973, p.237). Por outro lado, teria percebido, segundo Darrigol (2000, p.356), uma gradual “desmaterialização” do éter desde Fresnel até Hertz, sendo que este último teria eliminado completamente sua materialidade. Assim, o éter enquanto um “fantasma” à matéria não deveria intervir em experimentos ópticos, como era de fato observado, por exemplo, no experimento de Michelson e Morley de 1887.

Por outro lado, os resultados do experimento de Fizeau realizado anos antes não sugeriam um éter “fantasma”. A concordância com este experimento, um critério importante para Poincaré, era alcançada somente pela teoria de Lorentz. A ideia de haver um arrasto parcial do éter poderia sugerir, intuitivamente, que o éter seria capaz de ações mecânicas (DARRIGOL, 2000, p.357). Por essa razão Poincaré comentou que no experimento de Fizeau “*parecemos estar tocando o éter com os dedos*” (POINCARÉ *apud idem*). Nota-se assim que a crise na Física da virada de séculos apresentava emaranhamentos complicados: a mais satisfatória teoria eletrodinâmica da época violava a terceira lei de Newton; desta se derivava relações (coeficiente de Fresnel), confirmadas experimentalmente, que sugeriam que o éter poderia realizar ações mecânicas; isto, por sua vez, poderia violar o Princípio da Relatividade. Esta última implicação poderia ser eliminada se supusesse que corpos em movimento com relação ao éter experimentam uma contração na direção de movimento, o que justamente acarreta na violação da terceira lei de Newton.

Como foi comentado em seções anteriores, Lorentz, inspirado pelas críticas de Poincaré, procurou em seu trabalho de 1904 (*Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz*) uma explicação comum para os efeitos ópticos em todas as ordens v/c . Contudo, implicitamente Lorentz admitiu a existência de forças de origem não eletromagnética que manteriam o elétron deformado em equilíbrio. Muitas conclusões de Lorentz dependiam de aproximações, e seus resultados eram complexos e muitas vezes seu raciocínio não era claro (*ibid.*, p.364). Ainda assim, Poincaré reagiu de forma entusiástica a este trabalho de Lorentz, e teria percebido que com algumas alterações na teoria se poderia

obter a invariância total (em todas as ordens de v/c) e uma concordância plena com o Princípio da Relatividade (*idem*).

4.8.4 A dinâmica do elétron segundo Poincaré

Em sua obra *O Valor da Ciência*, escrito em 1904 e publicado no início de 1905 (antes da publicação do “artigo fundador” de Einstein), é possível encontrar algo como o programa inicial daquilo que hoje chamamos de TRE. Poincaré nesta obra descreve, por exemplo, o que ele entende por Princípio da Relatividade:

(...) todas as tentativas em medir a velocidade da Terra em relação ao éter levaram a resultados negativos. *Desta vez a física experimental tem sido mais fiel ao princípio [da relatividade] do que a física matemática*; os teóricos, buscando satisfazer suas outras concepções gerais, não o pouparam; *mas a experiência tem sido insistente em confirmá-lo*. As maneiras pelas quais isso tem sido alcançado são variadas; de uma vez por todas, Michelson explorou a precisão aos últimos limites; nada foi detectado. (POINCARÉ, 1984 [1905], p.99, grifos nossos)

Na mesma obra, em um capítulo de título *O futuro da física matemática*, afirmou, frente à crise que a seus olhos a Física enfrentava à época, que:

[t]alvez também devemos construir toda uma mecânica nova que apenas entrevemos, onde, crescendo a inércia com a velocidade, a velocidade da luz se tornaria um limite intransponível. A mecânica vulgar, mais simples, permaneceria uma primeira aproximação, já que seria verdadeira para as velocidades que não fossem muito grandes, de modo que encontraríamos ainda a antiga dinâmica sob a nova. Não teríamos que lamentar ter acreditado nos princípios [da mecânica vulgar, isto é, newtoniana], e mesmo, como as velocidades demasiado grandes para as antigas fórmulas só seriam sempre excepcionais, o mais seguro, na prática, seria ainda fazer como se continuássemos a acreditar neles. São tão úteis que se deveria conservar-lhes um lugar (POINCARÉ, 1984 [1904], p.133).

Vendo do presente, essas citações soam como um curioso prelúdio do que estava para acontecer ainda nos meses seguintes à publicação desta obra. Para Miller (1981, p.79), do início de 1905 até o mês de junho daquele ano Poincaré parece ter sido o homem que estava mais próximo (ao lado de Einstein) do que chamamos hoje de TRE. Seu objetivo com a teoria de Lorentz era bem claro, e somente ela à época contemplava seus critérios do que deveria ser uma teoria eletrodinâmica completa, entre eles: a concordância em todas as ordens de v/c com os experimentos ópticos (em especial os de Michelson e o de Fizeau); a concordância com as medidas

4.8 Interpretação Dinâmica de Poincaré (1906)

experimentais da variação da massa do elétron com a velocidade (em especial os resultados de Kaufmann), e; a não violação de princípios (em especial o Princípio da Relatividade).

O esforço de Poincaré culminou em dois artigos, ambos de título *Sobre a dinâmica do elétron*⁹⁶. O primeiro, que contém uma espécie de resumo do que ainda seria publicado no segundo, foi publicado nos anais da Academia de Ciências de Paris no dia 5 de junho de 1905. Neste trabalho Poincaré apresenta os resultados que consegue obter dos seus estudos sobre a teoria de Lorentz. Em 30 de julho envia para publicação o segundo artigo, muito mais extenso que o primeiro, contendo as derivações dos resultados anunciados quase dois meses antes. Este só foi publicado em 1906, em um periódico italiano⁹⁷. Einstein enviou seu artigo *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento* ao periódico *Annalen der Physik* no dia 30 de junho, sendo publicado em setembro do mesmo ano. Sendo assim, Poincaré não tinha ciência deste artigo. Não se sabe se Einstein conhecia o primeiro artigo de Poincaré (*idem*).

No primeiro destes artigos de 1905, Poincaré (1905) inicia o texto comentando os experimentos ópticos de primeira e segunda ordem de v/c , concluindo que “*a impossibilidade de demonstrar o movimento absoluto* [parece ser] *uma lei geral da natureza*” (p.489). Em seguida, comenta a hipótese da contração feita por Lorentz para explicar os resultados encontrados por Michelson e Morley em 1887, citando seu artigo de 1904. Anuncia que realiza algumas modificações na teoria de Lorentz, com o fim de completá-la (p.490). A primeira delas refere-se às transformações de coordenadas que Poincaré batiza de *Transformações de Lorentz*:

$$\begin{aligned}x' &= kl(x + \epsilon t) \\y' &= ly \\z' &= lz \\t' &= kl(t + \epsilon x),\end{aligned}\tag{4.13}$$

sendo x, y, z, t as coordenadas no sistema em repouso com relação ao éter, x', y', z', t' as coordenadas transformadas, ϵ a velocidade com relação ao éter⁹⁸, l uma função de ϵ e k o que hoje chamamos de fator relativístico:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon^2}}\tag{4.14}$$

Estas são as Transformações de Lorentz na forma exata. Em seguida, comenta que para $l = 1$ (hipótese que Lorentz também havia feito em 1904), o conjunto destas transformações formam

⁹⁶Título original em francês: *Sur la Dynamique de l'Électron*.

⁹⁷*Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*.

⁹⁸Poincaré utiliza unidades tais que $c = 1$.

um grupo (grupo de Lorentz) (*idem*). Com elas, Poincaré demonstra a covariância completa das equações da eletrodinâmica (PAIS, 1995 [1982], p.148).

Uma importante diferença entre as abordagens de Lorentz e Poincaré foi que este eliminou o referencial S_r , utilizado por Lorentz para descrever um sistema que se move com velocidade constante em relação ao éter (MILLER, 1981, p.80). Para Poincaré, S' era um sistema fictício (como também era para Lorentz), mas para que o “elétron imaginário” permanecesse uma esfera neste sistema (o que era imposto pelo Princípio da Relatividade), o “elétron real” se movendo com relação a S deveria sofrer uma contração *real* na direção de movimento.

Poincaré também ilustra as equações referentes às quantidades densidade de carga e densidade de força (de Lorentz) transformadas, e mostra que são diferentes das que Lorentz havia obtido (o que impediu que Lorentz obtivesse a covariância das equações de Maxwell-Lorentz com fontes). Comenta então as teorias de elétron de Langevin e Abraham, afirmando que somente a teoria de Lorentz é compatível com a impossibilidade de se medir a velocidade absoluta (POINCARÉ, 1905, p.491).

No artigo publicado somente em 1906, Poincaré mostra que as Transformações de Lorentz mantém invariante a forma quadrática:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2, \quad (4.15)$$

e conclui assim que as transformações podem ser consideradas como rotações em um espaço quadridimensional com uma quarta coordenada imaginária, $x_4 = ict$ (DARRIGOL, 2005, p.12). Neste trabalho também deriva a lei de adição de velocidades para dois referenciais S_1 e S_2 em movimento relativo como produto de duas Transformações de Lorentz:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}, \quad (4.16)$$

a qual garante que a combinação das velocidades são sempre inferiores a c no referencial S do éter (*idem*).

Um ponto em especial (em ambos os artigos) é a explicação proposta por Poincaré para a estabilidade do elétron elipsoide (isto é, o elétron contraído em movimento) na teoria de Lorentz: “o elétron, deformável e compressível, é submetido a um tipo de pressão constante externa da qual o trabalho é proporcional às variações do volume” (POINCARÉ, 1995, p.491). Afirma que isto é possível “se se supõe que a inércia é um fenômeno exclusivamente eletromagnético” (*idem*) (se apoiando nos recentes experimentos de Kaufmann), e que, a não ser a pressão constante externa, “todas as forças são de origem eletromagnética” (*idem*).

4.8 Interpretação Dinâmica de Poincaré (1906)

Como comenta Darrigol (2000, p.393), Poincaré (também Lorentz) era cético quanto à visão reducionista total ao eletromagnetismo, o que explica a admissão de uma pressão externa ao elétron de origem não eletromagnética. Pode-se notar que Poincaré parece manter um sistema privilegiado para o espaço e tempo (éter), embora pelo Princípio da Relatividade este seja indetectável (*idem*). Somente neste sistema a velocidade da luz seria c , as coordenadas x', y', z' , e t' seriam “aparentes” no sentido de não estarem sendo medidas no referencial do éter, no qual se encontram as coordenadas “verdadeiras” x, y, z , e t (DARRIGOL, 2005, p.15).

Desta forma, a teoria de Lorentz (que agora poderíamos chamar de teoria de Lorentz-Poincaré) estava completa. Ela derivava o coeficiente de Fresnel (cujo valor havia sido verificado no experimento de Fizeau), a dependência da massa com a velocidade, e explicava a isotropia da velocidade da luz com base em um efeito dinâmico (contração dos comprimentos) *causado* pela interação da matéria (constituída por elétrons) com o éter (MILLER, 1981, p.85)⁹⁹. O efeito do atraso dos relógios (em S') para Poincaré pode ser entendido como um efeito cinemático, uma vez que surge somente em razão do movimento com relação ao éter, e não de interações físicas com este. Trata-se de um efeito *aparente* (pois somente os relógios parados com relação ao éter marcariam o tempo “real” ou “verdadeiro”), pois não se pode determinar empiricamente o atraso entre os relógios, e portanto *não real* (MILLER, 1973, p.243). Estes dois efeitos juntos acarretam na impossibilidade de se medir a velocidade absoluta com relação ao éter (Princípio da Relatividade), pois assim a velocidade da luz será sempre medida como c , independente do movimento com relação ao éter.

Na última parte de seus artigos, Poincaré procura estender a hipótese de Lorentz de que todas as forças (de qualquer natureza) devem ser afetadas pelo movimento à lei de gravitação de Newton. Assim, argumenta que para serem compatíveis com o Princípio da Relatividade, as interações gravitacionais (ou ondas gravitacionais, como o próprio Poincaré descreve) devem se propagar com a velocidade da luz (POINCARÉ, 1905, p.492). Isto leva a uma alteração na lei de Newton, que passa ser covariante por Transformações de Lorentz (DARRIGOL, 2005, p.12).

⁹⁹Poincaré obteve outros resultados relevantes. Mostrou que as quantidades $(\mathbf{f}, \mathbf{f} \cdot \mathbf{v})$ (que chamamos hoje de força de Minkowski, ou quadri-força), $(\rho \mathbf{v}, \rho)$ (que hoje chamamos de quadricorrente) e (\mathbf{A}, ϕ) (que chamamos hoje de quadripotencial) são covariantes por Transformações de Lorentz (MILLER, 1981, p.82). Também mostrou que a relação entre a energia total do elétron (incluindo termos de origem não eletromagnética) e sua massa (suposta de origem eletromagnética) é $m = E/c^2$ (MARTINS, 2005a, p21).

Tudo indica que Poincaré realizou seus trabalhos paralelamente àqueles de Einstein, sem ter ciência desses. Isso gera até hoje debates entre historiadores sobre a prioridade na elaboração do formalismo matemático mínimo da TRE. De qualquer forma, o que é relevante citar é que a teoria de Lorentz-Poincaré é empiricamente e matematicamente equivalente à teoria de Einstein. Como coloca Darrigol (2000, p.394), nenhum experimento já realizado ou a realizar pode decidir entre as compreensões de Poincaré e Einstein sobre o Princípio da Relatividade, uma vez que para Poincaré o éter era indetectável. Muito embora suas compreensões conceituais sobre o mesmo tema sejam muito diferentes (DARRIGOL, 2005, p.14). Uma delas, já citadas anteriormente, é de que para Einstein a explicação dos efeitos ópticos nulos decorria diretamente de seus dois axiomas, enquanto que para Lorentz e Poincaré esses resultados deveriam ser explicados com hipóteses sobre a interação da matéria com o éter (GALISON, 1979, p.92; ZAHAR, 1973a, p.108)

A postura de Poincaré, conforme foi estudada nessa seção, é próxima à “interpretação do convencionalismo relativístico” apresentada por Pessoa (2012), e às interpretações “agnóstica” e “convencionalista” apresentadas por Szekely (2009). Com base nas categorias de Niiniluoto (1999) e Hacking (2012 [1983]), podemos classificar a postura filosófica de Poincaré e Lorentz quanto à realidade das entidades e processos relativísticos. Como foi comentado anteriormente, a postura de Poincaré é bastante próxima ao que se conhece como Realismo Estrutural, caracterizado como um agnosticismo quanto à existência de entidades e processos (agnosticismo ontológico) e por um realismo das teorias. As relações entre os objetos, expressas matematicamente, são reais (ou verdadeiras), como citado de Poincaré.

Como comenta Martins (2012, p.44), a postura de Lorentz e Poincaré quanto éter era o Instrumentalismo (coerente com um agnosticismo quanto a sua existência), e era usado por ser um conceito útil e propiciar uma melhor compreensão dos fenômenos. O mesmo valia para a contração dos comprimentos, era uma hipótese útil que podia explicar melhor os resultados dos experimentos de Michelson e Morley de 1887, e também garantia o Princípio da Relatividade. Para Poincaré, cuja postura não fugia de uma raiz empirista (MILLER, 1973, p.233), afirmar a existência de algo diretamente inobservável (como o éter, a contração dos comprimentos e o atraso dos relógios) não seria cientificamente apropriado (esta questão cabe aos filósofos, como ele mesmo se refere), no máximo conveniente. Essa postura evasiva quanto à ontologia caracteriza seu pensamento, de forma que podemos classificá-lo, portanto, de agnóstico (antirrealista) ontológico e realista (estrutural epistemológico) de teorias.

4.9 Interpretação Substantivista do Espaço-Tempo de Minkowski (1907)

4.9.1 Minkowski, matemática e eletrodinâmica

Hermann Minkowski, que fora professor de Einstein na ETH, teve contribuições bastante importantes à TRE com trabalhos que datam desde 1907. Suas contribuições foram também importantes à formulação da TRG, mas Minkowski não viveu o suficiente para conhecê-la. Seu nome, assim como o de Poincaré, Lorentz e outros, é lembrado por vezes com mais um “coadjuvante” da grande obra intelectual de Einstein. Contudo, muitos historiadores apontam para a grande originalidade do pensamento físico-matemático de Minkowski que, embora seja reconhecido como matemático, deu passos talvez essenciais para a criação e consolidação de um conceito hoje central na física teórica: o Espaço-tempo. Por vezes se argumenta que, sem a contribuição de Minkowski, talvez se demorasse um pouco mais para que cientistas (entre eles Einstein) chegassem ao formalismo do que hoje chamamos TRG.

Minkowski teve formação na Universidade Königsberg com forte apelo humanístico (*ibid.*, p.119). Lá foi aluno de Weber e Voigt, e, além da habilidade com a matemática (reconhecida pelos colegas e professores, e também por prêmios que adquiriu), passou a ter um forte interesse por física experimental, em especial pelos trabalhos de Helmholtz, Thomson e Hertz. Em 1902, depois de alguns anos ministrando aulas na ETH, moveu-se para a Universidade de Göttingen a convite de Hilbert, onde permaneceu até sua morte em 1909 (GALISON, 1979, p.85-87).

Como aponta Galison (*ibid.*, p.88-89), desde a época de Gauss e Weber, Göttingen era um conhecido centro de estudos sobre fenômenos elétricos e magnéticos. Durante a estadia de Minkowski, muitos importantes físicos e matemáticos como Emil Wiechert¹⁰⁰, Arnold Sommerfeld, Max Abraham e Walter Kaufmann estiveram por lá. Em especial, Minkowski acompanhou os esforços de Kaufmann e Abraham na construção de uma teoria dinâmica do elétron, discutidos anteriormente. Segundo Max Born, que fora aluno de Minkowski, foi neste período (primeiros anos do século XX) que Minkowski começou a se interessar mais pela eletrodinâmica dos corpos em movimento, e quando também teria começado a formular suas ideias sobre relatividade, Espaço e Tempo. O seu interesse sobre as implicações das Transformações de Lorentz era, segundo Born, bastante claro (PETKOV, 2012, p.6).

¹⁰⁰Johann Emil Wiechert (1861-1928), físico e sismologista alemão.

Nos primeiros meses de 1905, Minkowski, que já era reconhecido internacionalmente como prodígio matemático (*ibid.*, p.2), organizou juntamente com Hilbert um seminário em Göttingen sobre teorias de elétron. O “artigo fundador” de Einstein ainda não havia sido publicado, assim como a versão completa de *Sobre a dinâmica do elétron* de Poincaré. O artigo de 1904 de Lorentz (*Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz*), que continha as transformações de Lorentz quase na forma exata, ainda começava a ser reconhecido (PETKOV, 2012, p.5). A realização do seminário é o primeiro registro documentado do envolvimento de Minkowski com teorias eletrodinâmicas de corpos em movimento (*idem*). Nos últimos meses de 1905, Minkowski se impressionou com o trabalho de Einstein sobre o tema. Revelou tempos depois a Born que à época já tinha chegado independentemente a alguns resultados semelhantes de seu antigo aluno, mas que não os tinha publicado pois queria primeiramente elaborar a estrutura matemática da teoria “*em todo seu esplendor*” (BORN *apud ibid.*, p.6).

4.9.2 O “Mundo Absoluto” de Minkowski e a Visão Eletromagnética de Mundo

O envolvimento mais explícito de Minkowski com a TRE ocorreu nos últimos meses de 1907. Em novembro, Minkowski proferiu uma palestra em Göttingen de título *O Princípio da Relatividade*¹⁰¹, e se referiu ao artigo de Poincaré de 1906 diversas vezes (MILLER, 1973, p.309). Em dezembro, publica um trabalho detalhado no qual explora o formalismo quadrivetorial aplicado à TRE, de título *As equações básicas para os processos eletromagnéticos em corpos em movimento*¹⁰². Neste, também cita o trabalho de Poincaré (*idem*).

No artigo de Poincaré Minkowski teria encontrado os importantes resultados sobre as Transformações de Lorentz e sua interpretação geométrica como uma rotação em um espaço abstrato de quatro dimensões (GALISON, 1979, p.94). Contudo, Poincaré não deu ênfase à natureza não euclidiana do espaço, como Minkowski o fez. Como comenta Petkov (2012, p.21) Poincaré não teria visto o caráter revolucionário na ideia de um *espaço físico real* de quatro dimensões (como viu Minkowski), uma vez que para ele a escolha de qual geometria utilizar para escrever as leis físicas seria mera questão de conveniência.

¹⁰¹Título original em alemão: *Das Relativitätsprinzip*.

¹⁰²Título original em alemão: *Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern*.

4.9 Interpretação Substantivista do Espaço-Tempo de Minkowski (1907)

A postura convencionalista de Poincaré sobre a geometria do espaço fica evidente em um trecho de sua obra *Ciência e Método*¹⁰³, publicada em 1908:

Parece que, de fato, seria possível traduzir nossa física para a linguagem da geometria de quatro dimensões. Tentar realizar tal tradução em si certamente daria muito trabalho para pouco benefício, e para mim basta mencionar a mecânica de Hertz, na qual um exemplo disto pode ser visto. E ainda, parece que a tradução seria sempre menos simples que o texto, e que ela nunca deixaria de parecer uma tradução, pois a linguagem das três dimensões parece a mais adequada para a descrição do mundo, ainda que esta descrição possa ser feita, em casos de necessidade, em outro idioma (POINCARÉ *apud* GALISON, 1979, p.95).

Entretanto, o fato de se poder escrever as leis da física em um espaço de quatro dimensões repercutiu de forma ímpar em Minkowski. Diferentemente de Poincaré, para Minkowski o formalismo quadridimensional não era só um instrumento satisfatório, e sim algo mais: para ele o mundo *seria de fato* uma variedade quadridimensional não euclidiana, uma forma ousada de apreender o Espaço e o Tempo (*ibid.*, p.96). Isto fica particularmente claro no parágrafo de introdução de seu texto *Espaço e Tempo*¹⁰⁴, proferido em um conferência em Colônia em 1908. É notável a forma entusiástica pela qual Minkowski se exprime:

Meus Senhores: As considerações sobre espaço e tempo que desejo expor-vos brotaram do terreno da física experimental. Aí reside a sua força. A sua tendência é radical. Daqui em diante os conceitos de espaço e tempo, considerados como autônomos, vão desvanecer-se como sombras, e somente se reconhecerá existência independente a uma espécie de união entre os dois (MINKOWSKI, 1983 [1908], p.93).

Como aponta Galison (1979, p.97), surpreende a afirmação de Minkowski de que suas considerações haviam brotado da física experimental, uma vez que seu trabalho tinha um algo teor teórico. Para Galison (*idem*), Minkowski teria se sentido obrigado a reconhecer o papel da física experimental em seu texto, ao menos na parte introdutória, para evitar assim a acusação de ser exageradamente especulativo. Ademais, é curioso o uso da frase “A sua tendência é radical”, cuja escolha das palavras, segundo Galison (*ibid.*, p.98), pareceria mais apropriada para um texto político e não uma discussão sobre física teórica à época. A última frase marca o nascimento do conceito de Espaço-Tempo: com Minkowski, o mundo passa ter em essência uma estrutura matemática, e suas leis físicas, escritas em termos geométricos, adquirem um novo status ontológico (*ibid.*, p.97).

¹⁰³Título original em francês: *Science et Méthode*.

¹⁰⁴Título original em alemão: *Raum und Zeit*.

Neste trabalho, Minkowski chama de “Universo” a multiplicidade de todos os “pontos de Universo” (x, y, z, t) . Também define o que chama de “substância” como aquilo que se apresenta (e se permeia) em todos os locais e em todos os instantes. Para Galison (1979, p.102), Minkowski faz alusão ao éter, conceito que resiste a descartar embora já se apresentava à época quase completamente ausente de qualidades e propriedades materiais. Em cada ponto de Universo, Minkowski argumenta que a “substância” apresenta-se em repouso (*ibid.*, p.99). Trata-se de seu “axioma fundamental” de que “[a] *substância que se apresenta num ponto de Universo qualquer pode ser sempre reduzida, por meio de uma definição apropriada do espaço e do tempo, ao estado de repouso*” (*ibid.*, p.100).

Em seguida, Minkowski enuncia um postulado que julga mais adequado aos resultados (e interpretações) que obtém do formalismo quadridimensional aplicado à eletrodinâmica dos corpos em movimento do que o Princípio da Relatividade de Einstein: o *Postulado do Universo Absoluto*. Argumenta que este postulado estende ao espaço o que Einstein e em menor escala Lorentz já havia feito para o tempo. Em suas palavras:

Tentar fazer para o conceito de espaço o que se fez para o tempo poderá ser considerado mera e temerária aventura matemática. No entanto, este passo parece-me indispensável para a verdadeira compreensão do grupo G_c ¹⁰⁵ e, depois de ele ter sido dado, a designação *Postulado da Relatividade* parece-me demasiado frouxa para o que é exigido por uma invariância com o grupo G_c . Como o conteúdo do postulado consiste na afirmação de que só um universo quadridimensional, formado de espaço e tempo, é revelado pelos fenômenos, ficando-nos porém uma certa liberdade para o projetarmos no espaço e no tempo, eu preferiria para esta proposição o nome de *Postulado do Universo Absoluto* (ou, abreviadamente, o de *Postulado do Universo*) (MINKOWSKI, 1983 [1908], p.103).

Pode-se entender seu postulado como nada mais do que o postulado da existência e unicidade do Espaço-Tempo. Para Minkowski, este postulado era de tamanha importância, tanto que a exigência de covariância das leis da teoria eletrodinâmica por transformações entre referenciais inerciais aparece depois deste enunciado (o que sugere que o Postulado do Universo seria mais fundamental do ponto de vista físico) (GALISON, 1979, p.96).

Assim, postulando primeiramente o Espaço-Tempo, exigindo a invariância do grupo G_c (que impõe um limite de velocidade) e adotando o axioma citado, Minkowski foi capaz de re-obter os resultados matemáticos de Lorentz, Poincaré e Einstein, assim como demonstrou, em outros

¹⁰⁵ G_c é o grupo de transformações relativísticas (de Lorentz) que mantém invariantes a velocidade da luz, o intervalo espaço-temporal e das quantidades físicas quadridimensionais no contexto da TRE (PATY, 1993, p.164).

4.9 Interpretação Substantivista do Espaço-Tempo de Minkowski (1907)

trabalhos, a covariância das leis da eletrodinâmica dos corpos em movimento e a invariância da relação:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$$

Segundo Petkov (2012, p.6), Minkowski nunca se importou sobre questões de prioridade, sempre reconhecendo os trabalhos de Einstein e outros. Isto fica evidente no último parágrafo do texto da palestra “Espaço e Tempo”. Neste mesmo parágrafo, em especial, também fica evidente a motivação filosófico-científica de Minkowski, similar àquela com a qual flertaram Poincaré e Lorentz: a visão eletromagnética de mundo.

A validade sem exceção do postulado do universo é, creio eu, o verdadeiro cerne da visão eletromagnética do Universo. Entrevista por Lorentz, e posta a descoberto por Einstein, fica agora por completo à luz do dia. Na exploração das suas consequências matemáticas encontrar-se-ão suficientes sugestões para verificações experimentais do postulado. Essas verificações, manifestando uma harmonia pré-estabelecida entre a matemática pura e a física, serão capazes de convencer até mesmo aqueles para quem o abandono de antigos pontos de vista seja antipático ou doloroso. (MINKOWSKI, 1983 [1908], p.114).

Segundo Galison, Minkowski tinha esperanças de que um dia seria possível explicar todos os fenômenos naturais com base na eletrodinâmica, de tal forma que não haveria mais matéria, mas somente eletricidade no mundo (GALISON, 1979, p.92). Aos seus olhos, seu trabalho contribuía para o programa eletromagnético de Lorentz, Einstein, Planck e Poincaré (*ibid.*, p.94), muito embora Einstein não compartilhasse desta visão (*ibid.*, p.92) e Lorentz e Poincaré não tivessem a aderido de forma plena. Na verdade, em um primeiro momento Einstein considerou o trabalho de Minkowski como “erudição supérflua”, embora reconhecesse o esforço de seu ex-professor (PETKOV, 2012, p.2). Ainda por volta de 1908, declarou que “*desde que os matemáticos invadiram a teoria da relatividade, eu mesmo não a entendo mais*” (*idem*). A postura de Einstein com relação ao papel da matemática mudou consideravelmente nos anos que se seguiram (HOLTON, 1968; PATY, 1993; PATY, 2008).

4.9.3 As explicações dos fenômenos relativísticos e a realidade do Espaço-Tempo

O Espaço-Tempo era central para a “explicação” de Minkowski para os efeitos relativísticos de dilatação do tempo e contração dos comprimentos. Para ele, o sentido físico da contração e

dilatação provinha simplesmente do fato de serem estes efeitos manifestações (“sombras”) tridimensionais da quadridimensionalidade da realidade (PETKOV, 2012, p.8). De forma análoga à interpretação de Einstein, no qual se considera estes efeitos como consequência dos processos de medição do espaço e tempo, na interpretação de Minkowski se considera estes efeitos como consequências da natureza quadridimensional do mundo (GALISON, 1979, p.93). A postura de Minkowski acerca da natureza dos efeitos relativísticos fica clara nas palavras de Born (1920 [1965]), que afirma que “*a contração é apenas uma consequência da forma como observamos as coisas e não uma mudança da realidade física*” (p.213).

Basicamente, a interpretação de Minkowski à relatividade da simultaneidade, à contração do espaço e à dilatação do tempo era de natureza geométrica. Dois observadores em movimento relativo no Espaço-Tempo de Minkowski¹⁰⁶ possuem diferentes (hiper) planos de simultaneidade (o que já informa que, para um mesmo par de eventos, os observadores não necessariamente concluirão igualmente que há simultaneidade), e “fenômenos quadridimensionais” (durações no Espaço-Tempo, que envolvem grandezas de espaço tridimensionais e de tempo unidimensionais) cruzam esses planos de simultaneidade de diferentes formas, gerando diferentes (hiper) seções de corte. Essas diferentes (hiper) seções representam diferentes volumes espaciais conforme é observado por cada observador (que concluem serem diferentes em razão da contração na direção de movimento) (JANSSEN, 2002, p.429).

Talvez a questão mais relevante do que chamamos de interpretação de Minkowski é a sua postura filosófica quanto à realidade do Espaço-Tempo. Como afirma Galison (1979, p.118-9) Minkowski acreditava que pelo pensamento matemático se poderia ir além das aparências (o tridimensional) até uma realidade superior (o quadridimensional), esta não acessível diretamente pelas “projeções tridimensionais”, estas sempre em mutação, meras “sombras”, ou “aparências”:

[E]stamos compelidos a admitir que é apenas em quatro dimensões que as relações aqui tomadas em consideração revelam sua essência na forma mais simples, e que, em um espaço tridimensional, forçado sobre nós a priori, elas lançam apenas uma projeção bastante complicada (MINKOWSKI *apud ibid.*, p.114).

Minkowski tinha ciência de que seria dificultoso a outros cientistas aceitar sua concepção (*idem*), mas insistia que o mundo quadridimensional absoluto, no qual as leis da física tomariam

¹⁰⁶Para alguns autores, como Petkov (2008), que adotam a interpretação substantivista de Minkowski, conceitos como velocidade e posição não têm referente real, pelo fato de serem objetos de nossa “linguagem tridimensional” usados para descrever “aparências” de objeto de quatro dimensões (p.184).

4.9 Interpretação Substantivista do Espaço-Tempo de Minkowski (1907)

suas formas definitivas, seria completo, simétrico, não mutável e independente de observadores, e não apenas um formalismo conveniente como propusera Poincaré (*ibid.*, p.119). Claramente, a postura de Minkowski é uma forma de Realismo, por crer de forma tão convicta na existência de uma entidade inobservável, o Espaço-Tempo, uma realidade além daquela que podemos perceber diretamente.

Pode-se notar que a postura de Minkowski, conforme aqui foi apresentada, assemelha-se muito à “interpretação substantivista” discutida por Bain (2012). Além disso, também é próxima à “interpretação matemático-platônica” apresentada por Szekely (2009), à “interpretação da ontologia relativística” apresentada por Mittelstaedt (2011), e à “interpretação realista” apresentada por Tonnelat (1971). Assim, usando os termos de Niiniluoto (1999) e Hacking (2012 [1983]), podemos entender a postura de Minkowski como um Realismo Ontológico do Espaço-Tempo (Realismo de Entidades). Do ponto de vista da epistemologia, Minkowski afirma que temos acesso à realidade por meio de critérios como a simetria, a generalidade e a invariância matemática (GALISON, 1979, p.112), sendo também portanto um realista epistemológico (Realismo de Teorias). Tonnelat (1971, p.256) classifica explicitamente a postura de Minkowski quanto ao Espaço-tempo quadridimensional de Realismo, ou *Interpretação Realista* da Relatividade Especial. Vale mencionar que alguns físicos de renome, como Einstein, Weyl¹⁰⁷ e Eddington, compartilharam a postura realista de Minkowski em diferentes momentos de suas carreiras.

Como foi mencionado, o “Einstein jovem”, relutante sobre a “erudição supérflua” do formalismo quadridimensional, deu lugar ao “Einstein maduro”, que passou a reconhecer o importante papel do trabalho de Minkowski para a generalização da TRE (*ibid.*, p.3; HOLTON, 1968). Atribuía a ele, e não a Poincaré, a demonstração de que as Transformações de Lorentz era uma rotação no sistema de coordenadas em um espaço quadridimensional (*ibid.*, p.17). Em uma obra de 1952 sobre as teorias relativísticas, a postura realista de Einstein fica evidente:

Uma vez que não existe nesta estrutura quadridimensional [Espaço-Tempo] seções que representem de forma objetiva o “agora”, os conceitos de *acontecendo* e *se tornando* não estão completamente eliminados, mas ainda complicados. Parece portanto ser mais natural pensar a realidade física enquanto uma existência quadridimensional, ao invés de, até como tem sido, a evolução de uma existência tridimensional (EINSTEIN *apud ibid.*, p.34, grifos nossos).

Weyl, importante matemático e físico que tentou a primeira unificação entre TRG e Eletromagnetismo, se expressou da seguinte forma sobre as implicações em se adotar a visão de

¹⁰⁷Hermann Klaus Hugo Weyl (1885-1955), matemático e físico alemão.

mundo relativística, em sua obra *Filosofia da Matemática e da Ciência Natural*¹⁰⁸ de 1927:

O mundo objetivo simplesmente *é*, ele não acontece. Apenas ao olhar da minha consciência, ras-tejando para cima ao longo da linha de mundo de meu corpo, uma seção deste mundo ganha vida como uma imagem efêmera no espaço a qual muda continuamente no tempo (WEYL *apud ibid.*, p.34, grifos nossos).

Eddington, que teve importantíssimo papel para a aceitação das teorias relativísticas no contexto pós-primeira guerra (KEVLES, 2005), também era partidário da visão realista de Minkowski, como fica claro em sua obra *Espaço, Tempo e Gravitação*¹⁰⁹) de 1920:

Por mais bem sucedida que a teoria de um mundo quadridimensional possa ser, é difícil ignorar a voz dentro de nós que sussurra: ‘no fundo de suas ideias, você sabe que a quarta dimensão é uma bobagem’. Imagino que essa voz teve frequentemente seu tempo ocupado na história passada da física. Que absurdo dizer que esta mesa sólida sobre a qual estou escrevendo é uma coleção de elétrons movendo-se com velocidades prodigiosas em espaços vazios, os quais relativamente às dimensões eletrônicas são tão grandes quanto os espaços entre os planetas do sistema solar! Que absurdo dizer que o ar está tentando esmagar o meu corpo com uma carga de 14 libras por centímetros quadrados! Que absurdo o aglomerado de estrelas que obviamente eu estou vendo agora pelo telescópio ser um vislumbre de uma era passada de 50,000 anos atrás! Não vamos ser seduzidos por essa voz. Ela é desacreditada (EDDINGTON *apud idem*, grifos nossos).

Como afirma Petkov (2012, p.29), a postura realista de Minkowski sobre o Espaço-Tempo, desde 1908, não foi (e ainda não é) consenso entre físicos e filósofos. Atualmente, o debate entre visões realistas e antirrealistas sobre o Espaço-Tempo se dá entre defensores de doutrinas substantivistas e defensores do relacionismo. Trata-se de um debate complexo e interessante, que não pode ser resumido em poucas linhas. Muitos questionam se de fato o Espaço-Tempo é uma entidade existente de forma objetiva e independente, outros questionam se ele de fato se curva ou torce na presença de energia e matéria, entre outros. Em suma, o importante legado de Minkowski, expresso de forma entusiástica na introdução de seu discurso da palestra “Espaço e Tempo”, está longe de ser fato científico consumado e levanta até hoje controvérsias entre cientistas e filósofos.

¹⁰⁸Título original em alemão: *Philosophie der Mathematik und der Naturwissenschaften*.

¹⁰⁹Título original em inglês: *Space, Time and Gravitation*.

4.10 Quadro síntese das interpretações estudadas

A seguir apresentamos um quadro-síntese no qual se expõe as principais características e diferenças entre as interpretações estudadas nos tópicos anteriores.

	Sobre o que se trata o formalismo matemático mínimo da teoria?	Qual a natureza do Espaço e do Tempo?	Qual a natureza dos fenômenos de contração e dilatação?
Interpretação Operacionalista de Einstein (1905)	Trata-se de uma teoria axiomática (<i>Princípio da Relatividade e Princípio da independência da velocidade da luz com relação à fonte</i>) sobre medidas com réguas e relógios entre referenciais com movimento relativo uniforme.	Proposições sobre a natureza do Espaço e do Tempo só fazem sentido se baseadas em medidas. Espaço e Tempo é “aquilo que se mede” com réguas e relógios (respectivamente).	As contrações e dilatações relativísticas são efeitos cinemáticos “relativamente reais” (no sentido de ocorrem para um determinado observador e não para outro) e decorrem <i>naturalmente</i> em razão dos dois princípios adotados.
Interpretação Dinâmica de Lorentz-Poincaré (1904-1906)	Trata-se de uma teoria construtiva da eletrodinâmica dos corpos em movimento com relação ao éter.	O Tempo é absoluto e independe do movimento com relação ao éter. O Espaço é preenchido pelo éter, e os movimentos relativos a ele são indetectáveis em razão da contração dos comprimentos e do processo de sincronização de relógios por troca de sinais.	A contração é um efeito dinâmico “real” <i>causado</i> pelo movimento relativo ao éter. A dilatação do tempo é um efeito “aparente” decorrente da sincronização de relógios em referenciais com velocidade relativa ao éter.
Interpretação Substantivista do Espaço-tempo de Minkowski (1907)	Trata-se de uma teoria acerca da estrutura do Espaço-tempo de Minkowski. A métrica (pseudo-euclidiana) do Espaço-tempo associada à definição de produto quadri-vetorial garantem a covariância das leis físicas e da velocidade da luz.	O Espaço e o Tempo não existem separados um do outro. O Espaço-Tempo é absoluto e existe de forma objetiva independentemente dos outros objetos físicos. Os comprimentos espaciais e os intervalos temporais são meras “sombras” de algo mais fundamental: o <i>intervalo espaço-temporal</i> .	As contrações e dilatações relativísticas são efeitos cinemáticos “aparentes” (no sentido de refletirem apenas aparências de um objeto quadridimensional mais fundamental) e decorrem <i>naturalmente</i> em razão do movimento relativo dos corpos no Espaço-Tempo de Minkowski.

Tabela 4.2: Comparação sumária entre as posturas filosóficas em cada interpretação. Inspirado em Bain (2012).

Embora a tabela não seja exaustiva, no sentido de apontar toda a riqueza de cada interpretação, ela é útil nas “diferenças essenciais” entre elas. Como será discutido no capítulo seguinte, uma versão adaptada desta tabela foi utilizada em um texto proposto a estudantes de física do curso bacharelado e licenciatura da Universidade de São Paulo como preparatório a uma aula sobre interpretações do formalismo matemático da TRE (ver apêndice E). Na literatura existem propostas de discussão das interpretações em sala de aula, como o trabalho de Levrini (2002). Ademais, os estudos das teorias relativísticas, sua história e filosofia, propiciam debates em diversos temas diferentes: o papel dos experimentos na “comprovação de teorias”; o processo

de escolha de teorias equivalentes; as dimensões sociológica e política presentes no processo de aceitação de teorias e visão de mundo; a capacidade da ciência apreender os processos causais da realidade; a realidade dos processos relativísticos; a realidade do Espaço-Tempo; teorias equivalentes e o papel da matemática na física; o papel da postura filosófica no contexto de criação de teorias; entre outras. Na pesquisa de campo privilegiamos o tema “ realidade dos processos relativísticos”, muito embora quase todos os outros foram discutidos em algum nível seja em sala de aula seja nos textos propostos.

4.11 Síntese e porvir

Este capítulo foi dedicado a um estudo panorâmico da história e filosofia da TRE. De início, ilustramos algumas controvérsias envolvendo a gênese da TRE assim como a aceitação (posterior à criação) das teorias relativísticas na segunda década do século passado. Em seguida, acentuamos o curioso fato do formalismo matemático mínimo da teoria (que argumentamos ser o conjunto de equações que leva o nome de Transformações de Lorentz) ser interpretável do ponto de vista científico e filosófico, argumentando para isso o que entendemos como interpretação de uma teoria. Comentamos alguns dos muitos estudos de historiadores e filósofos da ciência sobre as interpretações (históricas e atuais) do formalismo da TRE. Por meio de um estudo histórico da gênese e dos primeiros anos de desenvolvimento da TRE, exploramos com mais afinco quatro interpretações históricas: a de Lorentz (1904), a de Einstein (1905), a de Poincaré (1906) e a de Minkowski (1907). Usando alguns textos originais e um conjunto de estudos de comentadores, é possível notar diferentes características filosóficas em cada uma destas quatro interpretações. Ao final, expomos uma tabela síntese das características das interpretações estudadas. O intuito deste capítulo foi, além de possibilitar darmos respostas teóricas à pergunta de pesquisa, subsidiar alguns materiais de intervenção utilizados na pesquisa de campo, como os textos e slides das aulas, enunciados de questões e temas de debate.

O capítulo que segue contém a descrição e análise de uma pesquisa de campo realizada no primeiro semestre de 2013 com estudantes de física de licenciatura e bacharelado da Universidade de São Paulo. O objetivo da pesquisa foi de investigar as concepções filosóficas destes estudantes no que se refere ao dRAC no contexto da TRE. Era esperado que a pesquisa mostrasse uma gama ampla de diferentes tendências filosóficas, como ocorre com filósofos realistas e antirrealistas, dado que se trata de um debate controverso. A pesquisa foi aplicada ao longo de

4.11 Síntese e porvir

três etapas durante todo o semestre: aplicação de um questionário, com cada questão aplicada semana a semana; análise de duas resenhas com temas próximos ao dRAC e TRE, e; aplicação de um grupo focal com uma parcela dos estudantes. De início, oitenta estudantes começaram a participar respondendo ao questionário. Com o passar do semestre, muitos deixaram de responder todas as questões, e ao final somente vinte e um estudantes responderam completamente o questionário. As resenhas destes últimos foram analisadas, e com base em critérios descritos no capítulo, foram selecionados dez para participar da última etapa da pesquisa, o grupo focal. Oito compareceram ao encontro, que foi transcrito (apêndice H). Ao final da análise das tendências filosóficas dos estudantes, nos deparamos com tendências conflitantes, o que sugere que o debate se manifesta de forma controversa também entre eles. Uma vez que argumentamos no capítulo 2 pela não consensualidade, defendendo sua relevância no ensino de ciências por proporcionar uma visão mais rica da ciência, a pesquisa mostrou resultados “positivos” e estimulantes. Diversos elementos nas expressões textuais e nas falas dos estudantes nos possibilitaram construir respostas (“empíricas”) à pergunta de pesquisa que guiou esta dissertação.

5 Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

5.1 Introdução, contexto de pesquisa e objetivos

Pesquisas sobre concepções da NdC são bastantes comuns na área já há muito tempo, principalmente na forma de aplicação de questionários e análise de discurso de debates direcionados (VILAS BOAS *et al.*, 2013, p.307). O crescente interesse da inclusão da HFC no ensino de ciências instigou pesquisas sobre concepções de estudantes e professores sobre a NdC (LEDERMAN, 1992; LEDERMAN, 2007). Particularmente nos últimos anos, as pesquisas tendem a mostrar que os estudantes em geral possuem concepções inadequadas sobre a ciência e suas características (TEIXEIRA; FREIRE JR & EL-HANI, 2009, p.531; ABD-EL-KHALICK & LEDERMAN, 2000). Conforme afirmam Teixeira, Freire Jr. e El-Hani (2009, p.531), com o tempo consolidaram-se duas linhas de investigação sobre as concepções de NdC: avaliação de propostas curriculares visando a construção de concepções adequadas da NdC nos estudantes, e investigação da compreensão dos professores sobre a NdC.

Um dos tipos de questionários sobre concepções de NdC mais conhecidos chama-se VNOS (*Visions of Nature of Science*, Visões de Natureza da Ciência), elaborado por Lederman e colaboradores. Basicamente, estes questionários, em suas diversas formas, consistem de questões abertas que intentam levantar concepções de NdC de estudantes (VILAS BOAS *et al.*, 2013, p.307). Existem vários trabalhos na literatura que utilizam esses questionários e exploram sua validade e aplicabilidade (*idem*). Um dos argumentos utilizados em prol do VNOS refere-se ao fato de possibilitar a coleta de dados sobre visões de NdC de um grande contingente com uma ferramenta relativamente simples. Uma desvantagem é que as questões são às vezes bas-

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

tante abertas, o que dificulta a comparação de resultados de diferentes pesquisas (TEIXEIRA, FREIRE JR & EL-HANI, 2009, p.539). Além disso, os questionários VNOS tendem a ser amplos e contemplar diversos temas filosóficos ao mesmo tempo. Em pesquisas sobre concepções voltadas para um debate filosófico específico (como é o caso deste trabalho), esses tipos de questionários não se mostram interessantes.

Neste capítulo apresentamos a estrutura, a análise e os resultados de uma pesquisa de campo, aplicada com estudantes de física (bacharelado e licenciatura) de graduação do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, no primeiro semestre de 2013 no curso *Evolução dos Conceitos da Física*. Seu primeiro objetivo foi o de identificar concepções de NdC sobre o dRAC, em especial no contexto da TRE. Isto é, diferentemente da tradição de pesquisas que visam identificar um largo espectro de concepções de NdC (o que inclui questões como a influência externa sobre a ciência, a dependência teórica das observações, distinção entre lei e teoria, entre vários outros), neste trabalho selecionamos um aspecto específico. Por outro lado, os questionários VNOS elaborados por Lederman e colaboradores, assim como aqueles feitos por outros autores inspirados nestes, em geral tocam somente a questões consensuais da NdC, o que muitas vezes levavam a conclusões sobre a *adequabilidade* das concepções dos estudantes (LEDERMAN, 1992; ABD-EL-KHALICK & LEDERMAN, 2000; LEDERMAN *et al*, 2002; TEIXEIRA, FREIRE JR & EL-HANI, 2009; VILAS BOAS *et al*, 2013). Na pesquisa deste trabalho isto não ocorreu, haja vista que o tema foi um aspecto não consensual da NdC. As diferentes tendências filosóficas que emergiram dos estudantes foram interpretadas como reflexo da riqueza da diversidade de concepções filosóficas possíveis, e não como a existência de “posturas adequadas” e “posturas inadequadas” sobre o debate ou sobre a NdC.

Os subsídios teóricos para a construção desta pesquisa (para a elaboração das categorias de análise, textos de apoio aos estudantes e outros) são os capítulos 3 e 4. No capítulo 3 há a definição das categorias “Realismo de Teorias” (ou Realismo Epistemológico e Axiológico) e “Realismo de Entidades” (ou Realismo de Entidades e Processos Inobserváveis), que são aqui utilizadas para classificar as tendências filosóficas dos estudantes. No capítulo 4 encontram-se os subsídios históricos, filosóficos, e conceituais das duas aulas sobre história e filosofia da TRE aplicadas pelo proponente no curso *Evolução dos Conceitos da Física*, assim como dos textos de apoio fornecidos aos estudantes e de outros materiais de pesquisa.

O segundo objetivo desta pesquisa foi o de mostrar como um debate sobre um aspecto não consensual da NdC pode ser no mínimo tão rico e interessante do ponto de vista educacional

5.2 Metodologia

quanto um debate sobre aspectos consensuais. A não consensualidade do debate em questão refletiu-se na não homogeneidade das concepções dos estudantes, o que foi interpretado como um aspecto bastante positivo. Como não se considerou em nenhum momento alguma “postura adequada” ou “inadequada” sobre o debate, as discussões com os estudantes estiveram longe de uma “retórica de conclusões” ou de uma “maiêutica” em direção à consensualidade. A discordância entre visões, muito mais comum na filosofia do que na ciência, instigou bastante os estudantes da fase final a descobrirem e repensarem suas próprias tendências filosóficas. Em geral, os argumentos foram refletidos, isto é, apresentaram qualidade e coerência. Do ponto de vista prático, essa pesquisa também ilustra uma forma possível de abordar o dRAC com estudantes de física.

5.2 Metodologia

A pesquisa teve três etapas: (i) aplicação de questionário (apêndice A), (ii) análise de resenhas dos estudantes (apêndices F e G), e (iii) grupo focal (apêndice H). Em cada uma delas foram utilizadas diferentes estratégias de pesquisa. As respostas ao questionário eram de caráter opinativo sobre alguma determinada questão histórico-filosófica da ciência. As resenhas eram produções de textos próprios dos estudantes, que dissertavam sobre questões específicas solicitadas pelo enunciado das resenhas. Para o grupo focal estudantes foram convidados a discutir sobre questões determinadas pelo orador (proponente do trabalho), envolvendo HFC, TRE e o dRAC. Podemos entender a pesquisa como um todo como uma pesquisa qualitativa, muito embora tenhamos, como será descrito adiante, quantificado as respostas dadas ao questionário (LÜDKE & ANDRÉ, 1986). Ao final da aplicação das etapas, foi realizada a triangulação dos dados, a qual, em termos de pesquisa, teve como intuito verificar a consistência da própria metodologia utilizada, assim como de verificar a consistência dos dados coletados em cada etapa.

O público alvo, como mencionado, foi estudantes de física do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, matriculados no curso *Evolução dos Conceitos da Física*. Este curso, criado pelo Prof. Mário Schenberg¹ na década de 70 do século passado, apresenta uma ementa curricular bastante próxima a discussões da HFC. No contexto da pesquisa, os temas de cada aula do curso foram: i) *Mito e ciência grega*; ii) *Alquimia na idade média e suas influências na ciência moderna*; iii) *Os estudos sobre os gases e sua base tecnossocial*; iv) *Os modelos na*

¹Mário Schenberg (1914-1990), físico brasileiro.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

ciência e a teoria do calórico; v) A teoria do éter: entre matemática e experiência; vi) As raízes históricas da conservação de energia; vii) As origens do eletromagnetismo e as linguagens da criação científica; viii) Analogias formais e materiais no eletromagnetismo; ix) Diferentes interpretações para as origens da relatividade restrita; x) Diferentes interpretações sobre a relatividade restrita; xi) Quem descobriu a expansão do universo?; xii) Interpretações da física quântica; xiii) César Lattes e a física nuclear no Brasil & Lise Meitner e os modelos de núcleo, e; xiv) O bóson de Higgs.

A pesquisa foi aplicada ao longo da duração de todo o curso (cerca de quatro meses), inicialmente com oitenta alunos. Cinquenta estudantes fizeram o curso no período noturno, e trinta fizeram no período diurno. Uma fração destes declarou estar nos últimos semestres de graduação. A grande maioria já havia feito cursos sobre Teoria da Relatividade. Uma fração mínima já havia feito (ou estava fazendo) disciplinas sobre HFC oferecidas pelo instituto ou pela Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. As atividades de responder ao questionário e elaborar as resenhas eram obrigatórias e contribuíam à aprovação na disciplina. Oito estudantes participaram da etapa final de pesquisa, o grupo focal.

As questões do questionário foram aplicadas ao longo de todo o curso, uma a cada aula (isto é, semanalmente), nas turmas do diurno e noturno. Os dois conjuntos de resenhas analisadas foram entregues em meados do curso (aulas ix e x), uma em sequência à outra, e seus temas estão diretamente relacionados à história e filosofia da TRE. O grupo focal foi realizado após a conclusão do curso, com um grupo selecionado com base nas respostas ao questionário e na análise das resenhas. A análise dos dados das três etapas foram realizadas no segundo semestre de 2013. Ao total, foram computadas 944 respostas às questões do questionário, foram lidas 88 resenhas (das quais 16 foram analisadas a fundo), e cerca de 70 minutos de grupo focal foram gravados, transcritos e analisados.

Detalhes sobre cada etapa de pesquisa serão discutidos nas seções e subseções seguintes.

5.3 Questionário

5.3.1 Elaboração e aplicação das questões

O questionário elaborado contém catorze questões de respostas opinativas que foram aplicadas ao longo do curso *Evolução dos Conceitos da Física*. Cada questão foi aplicada imediatamente após cada uma das catorze aulas do curso em uma plataforma online da disciplina acessada pe-

5.3 Questionário

los estudantes (Moodle USP do Stoa)², de março a junho de 2013. Embora o enfoque das aulas não era sobre o dRAC (a não ser as duas aulas aplicadas pelo proponente, que serão descritas na próxima seção), procurou-se elaborar enunciados a estas questões pós-aula de tal forma que ao mesmo tempo tocassem o debate (foco da pesquisa) e o tema da aula antecedente. Assim, o dRAC era de certa forma “contextualizado” dentro do tema da aula transcorrida. Das catorze, sete questões eram relacionadas ao Realismo ou Antirrealismo de Entidades e Processos Científicos, e as outras sete relacionadas ao Realismo ou Antirrealismo de Teorias. A simetria do número de questões de cada tipo tem um intuito específico, que será descrito adiante.

As questões possuem uma estrutura básica que se manteve inalterada ao longo de toda aplicação. Primeiramente, cada uma delas era contextualizada, por meio da citação de fatos históricos, conhecimentos gerais e seguros e por vezes citações de outros autores. Todos esses estavam relacionados às discussões sobre o tema da aula antecedente. Logo após a contextualização, há uma afirmação que serviria de base às respostas opinativas dos estudantes. Na página Moodle da disciplina, foi disponibilizado aos estudantes um guia e um exemplo de questão antes do início da aplicação do questionário.

Contextualização: Do ponto de vista do que é possível observar daqui da Terra, o modelo planetário geocêntrico de Ptolomeu é equivalente ao modelo planetário heliocêntrico de Copérnico, isto é, eles têm praticamente as mesmas previsões empíricas.

Afirmação: *Contudo, por mais que o modelo de Ptolomeu funcione bem para prever a posição dos planetas, não se pode chamá-lo de “verdadeiro”.*

As questões foram propositalmente construídas de forma que suas afirmações fossem explicitamente parciais ou tendenciosas. As respostas possíveis dos estudantes às afirmações de todas as questões foram: *Concordo plenamente, concordo parcialmente, suspensão de juízo, discordo parcialmente, e discordo totalmente*. Trata-se de um escalonamento de respostas tipo Likert³ (escalas de Likert), neste caso com cinco subdivisões opinativas (SILVEIRA, 1979). Embora bastante comum em pesquisas de ciências humanas, o uso de escalas Likert é bastante criticado, principalmente em pesquisas que baseiam suas conclusões somente nesta metodologia. Além disso, sabe-se que as próprias subdivisões opinativas nem sempre são bem representativas, os enunciados em geral contém ambiguidades, e a plausibilidade da quantificação das subdivisões não é consenso entre pesquisadores de diferentes áreas (JAMIESON, 2004; CARIFIO & PERLA, 2008).

²[Http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=491](http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=491), acessado dia 19/11/13.

³Rensis Likert (1903-1981), sociólogo e psicólogo estadunidense.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

As questões, assim como os temas das resenhas, foram construídas com base nos temas das aulas antecedentes à publicação da questão na página Moodle da disciplina. Para cada aula existia uma bibliografia mínima, recortes de textos e artigos, que os estudantes deveriam ler antes de confeccionar as resenhas e responder as questões pós-aula. As afirmações são tendenciosas a alguma forma de Realismo ou Antirrealismo (de entidades ou de teorias) (ver apêndice A). Como exemplo, a questão referente à TRE:

Contextualização: Em 1911, questionado sobre a realidade física da contração em sua teoria em comparação com a abordagem de Lorentz, Einstein afirmou:

O autor injustificadamente afirma que há uma diferença entre a abordagem de Lorentz e a minha quanto aos fatos físicos. É confusa a questão de a contração de Lorentz realmente existir ou não. Não existe realmente, na medida em que não existe para um observador que se move [com a régua]; existe realmente no sentido em que pode, em princípio, ser demonstrada por um observador em repouso.

A questão da realidade dos fenômenos relativísticos causou (e ainda causa) estranhamento principalmente entre aqueles que não têm familiaridade com a física, ou mais especificamente, com as teorias relativísticas. Por outro lado, muitos físicos e estudiosos tentaram esclarecer a questão, colocando a questão da “realidade” em debate. Nestas ocasiões, os argumentos quase que naturalmente transcendem o conhecimento científico, tornando-se ao mesmo tempo um debate também filosófico.

Afirmção: As discussões acerca do debate da “realidade” da contração são complicadas e desnecessárias, sendo que é mais importante estudarmos matematicamente os efeitos relativísticos, não havendo a necessidade de acreditarmos ou não em uma “contração real”.

O enunciado foi elaborado de forma a ser tão neutro quanto possível, embora subjetivamente citações de cientistas famosos como Einstein possam influenciar os estudantes. A afirmação, por outro lado, é explicitamente tendenciosa para uma forma de Antirrealismo de Processos (Entidades) Científicos, no caso a contração dos comprimentos relativística. Os estudantes que concordaram (totalmente ou parcialmente) com esta afirmação, interpretamos como uma “resposta antirrealista de entidades e processos”. Já aqueles que discordaram (totalmente ou parcialmente), interpretamos como uma “resposta realista de entidades e processos”. Naturalmente, não se tratam de inferências lógicas, mas antes uma estratégia metodológica desta etapa da pesquisa de relacionar a resposta com as categorias pré-estabelecidas. Na nossa concepção, o fato de que estudantes com “tendências realistas” concordassem com a questão acima *não significa necessariamente que eles são de fato realistas*, mas antes que *naquele contexto da questão em particular*, eles apresentaram uma “tendência realista”. Nesta pesquisa não consideramos

5.3 Questionário

isto que chamamos de “tendência filosófica” algo que *há de forma preexistente* nos estudantes (como se a pesquisa a “desvelasse”), mas sim algo que *se manifesta de forma particular e contextual na pesquisa*.

De fato, essa metodologia apresenta limitações e fragilidades, como a questão do grau de ambiguidade dos enunciados e das afirmações. As questões foram construídas no intuito de serem o menos ambíguas possível, muito embora evitar totalmente a desambiguidade é impraticável. A questão da interpretação das questões e também das categorias opinativas foi levantada pelos próprios estudantes, que por vezes sentiram-se confusos ao opinarem sobre as afirmações (ver apêndice H, página LXXXIX). Entretanto, mesmo apresentando problemas, o uso de questionário com escalonamento Likert se mostra particularmente útil, em especial como etapa inicial da pesquisa de campo. Ainda que forneça identificações por vezes grosseiras, este instrumento permite distinguir posições opinativas extremas, e possibilitou construir o primeiro parâmetro de análise para a triangulação de dados.

5.3.2 Coleta, dados e variáveis

As respostas de cada estudante ao questionário são os dados desta etapa de pesquisa, que chamamos de rE (relativo às questões tocantes ao (Anti) Realismo de Entidades e Processos) e rT (relativo às questões tocantes ao (Anti) Realismo de Teorias). Para cada estudante teríamos um conjunto de catorze dados, sete rE e sete rT . Para o estudo estatístico, as respostas opinativas foram transformadas em valores (procedimento comum em pesquisas com escalonamento Likert, embora muitas vezes criticado), sendo que “*concordo totalmente*” foi considerado como ± 1 , “*concordo parcialmente*” como $\pm 0,5$, “*suspensão de juízo*” como 0, “*discordo parcialmente*” como $\mp 0,5$, e “*discordo totalmente*” como ∓ 1 . Os sinais dos valores numéricos atribuídos variam em função da tendência da questão respondida. Para questões cuja afirmação ao final do enunciado é tendenciosa a alguma forma de realismo, a “assinatura” utilizada foi (+, +, 0, -, -). Já para questões cuja afirmação era tendenciosa a alguma forma de antirrealismo, a “assinatura” utilizada foi (-, -, 0, +, +). Por exemplo, para uma questão cuja afirmação no enunciado é tendenciosa ao Antirrealismo de Entidades, caso o estudante responder *discordo totalmente*, será contabilizado $rE = 1$. Caso responda *discordo parcialmente*, então $rE = 0,5$. Mas se responder *concordo totalmente*, então $rE = -1$, e se responder *concordo parcialmente*, $rE = -0,5$. Contudo, se o enunciado fosse tendencioso ao Realismo de Entidades, os valores numéricos seriam invertidos pelo sinal.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

Uma vez em posse dos dados, definimos variáveis que chamamos de $TE =$ “tendência (anti) realista de entidades” e $TT =$ “tendências (anti) realista de teorias” para cada estudante. Em tese, os valores de TE e TT correspondem em alguma medida ao “grau de crença” do indivíduo (no contexto da aplicação da questão) quanto à existência objetiva e independente de objetos e processos científicos inobserváveis (Realismo de Teorias e Processos) e à possibilidade de apreensão do conhecimento sobre os fatos do mundo por meio das teorias científicas (Realismo de Teorias).

Com o fim de podermos representar graficamente essas tendências, calculamos a média aritmética das respostas às perguntas tendenciosas de cada categoria de (Anti) Realismo utilizada, em função do número de perguntas. Para o (Anti) Realismo de Teorias, temos:

$$TT(n_T) = \frac{1}{n_T} \sum_{i=1}^{n_T} rT_i, \quad (5.1)$$

sendo os rT_i os valores numéricos correspondentes às respostas dadas às questões referentes ao (Anti) Realismo de Teorias, e n_T é a quantidade destas questões. De forma análoga, para o (Antir) Realismo de Entidades e Processos:

$$TE(n_E) = \frac{1}{n_E} \sum_{i=1}^{n_E} rE_i, \quad (5.2)$$

sendo os rE_i os valores numéricos correspondentes às respostas dadas às questões referentes ao (Anti) Realismo de Entidades e Processos, e n_E é a quantidade destas questões. Nota-se portanto que os valores de TT e TE estão sempre entre 0 e 1.

Finalmente, com esses dois valores, pode-se definir um “vetor posição filosófico”⁴, ϕ :

$$\phi(n_T, n_E) = (TT, TE), \quad (5.3)$$

É possível ilustrar cada ϕ associado a um par (n_T, n_E) em um diagrama bidimensional, como será discutido na subseção seguinte. Para cada estudante teremos sete vetores filosóficos ($\phi(1, 1) = (TT(1), TE(1))$, $\phi(2, 2) = (TT(2), TE(2))$, $\phi(3, 3) = (TT(3), TE(3))$, $\phi(4, 4) = (TT(4), TE(4))$, $\phi(5, 5) = (TT(5), TE(5))$, $\phi(6, 6) = (TT(6), TE(6))$, e $\phi(7, 7) = (TT(7), TE(7))$). O fato de combinarmos as respostas dois a dois justifica a simetria das questões quanto ao teor de suas afirmações tendenciosas. Para cada questão referente ao Realismo de Teorias, há outra referente ao Realismo de Entidades. Isso se mostrará particularmente útil para uma visualização gráfica do vetor filosófica, descrita na próxima subseção.

⁴Naturalmente, não se trata de um vetor, nem no sentido matemático elementar usual, nem em qualquer outro sentido mais abstrato. Trata-se somente de uma apropriação bastante útil do termo para os fins desta pesquisa.

Naturalmente, não se pretende reduzir “posturas filosóficas” a grandezas quantificáveis. É por essa razão que utilizamos até então nesta seção a palavra “tendência” ao invés de “postura”. Ademais, haja vista as limitações da metodologia utilizada, não se pode dizer que estas quantidades correspondam a um “diagnóstico filosófico”, ou, mais ingenuamente, à *verdadeira* postura filosófica do estudante (supondo que ela existe, ou, que seja refletida como no caso dos filósofos pertencentes ao debate, ou ainda, que seja constante). Como será descrito na subseção seguinte, a motivação principal para a quantificação das respostas foi a de possibilitar a comparação entre as “tendências filosóficas” de diferentes estudantes, para que assim tivéssemos o primeiro parâmetro para selecioná-los à última etapa de pesquisa, o grupo focal.

5.3.3 Um diagrama como instrumento de ilustração

Com o fim de ilustrar graficamente os valores TT e TE , utilizamos um diagrama bidimensional com eixos relativos a posturas filosóficas implícitas nas afirmações presentes no final das questões. O diagrama utilizado está ilustrado na figura 5.1, e tem eixos “Antirrealismo de Teorias” ($\tilde{n}RT$) \times “Realismo de Teorias” (RT) e “Antirrealismo de Entidades” ($\tilde{n}RE$) \times “Realismo de Entidades” (RE), perpendiculares entre si. Outras propostas semelhantes de diagramas filosóficos utilizadas no ensino de ciências existem na literatura (LOVING, 1992; SCHRAW & OLAFSON, 2008; ROZENTALSKI, HENRIQUE & NORONHA, 2012)

Cabe salientar que o intuito maior não é utilizar o diagrama como *ferramenta de análise*, mas como um instrumento de representações gráficas para identificar visualmente diferentes “tendências filosóficas” entre os estudantes. Por outro lado, sabe-se da simplificação que os eixos acarretam frente a um debate com posturas tão ímpares e diversificadas. Entretanto, defendemos que, para o propósito da pesquisa, a simplificação não diminui seu valor enquanto instrumento de visualização e comparação das posições TE e TT dos estudantes. O procedimento para posicionar a postura de cada estudante com base em suas respostas será ilustrado com base no exemplo a seguir.

Suponhamos um questionário de quatro questões, de forma que a primeira questão contém uma afirmação tendenciosa ao Antirrealismo de Teorias, a segunda ao Antirrealismo de Entidades, a terceira ao Realismo de Teorias e a quarta ao Realismo de Entidades. Suponhamos então que um estudante opinou com relação às questões, respectivamente: “*concordo parcialmente*”; “*discordo parcialmente*”; “*concordo totalmente*”, e; “*concordo parcialmente*”.

Com quatro questões, pode-se construir então dois vetores posição filosófica, $\phi(1,1)$ e

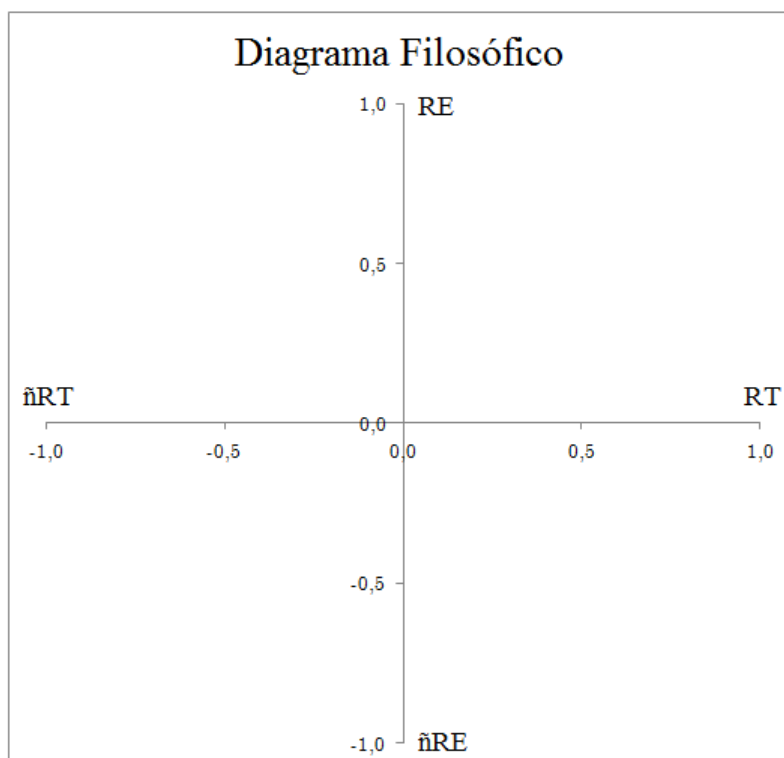


Figura 5.1: Estrutura do diagrama de tendências filosóficas. Sua utilização resume-se na intenção de ilustrar as “posições filosóficas” construídas com base nas respostas dos estudantes.

$\phi(2,2)$. Para localizar $\phi(1,1)$ no diagrama, devemos calcular $TT(1)$ e $TE(1)$ com base nas respostas dadas às primeiras duas perguntas (sendo a primeira referente ao (Anti) Realismo de Teorias e a segunda ao (Anti) Realismo de Entidades).

Para calcular $TT(1)$, temos então que $n_T = 1$ e que $rT_1 = -0,5$, pois o estudante opinou “*concordo parcialmente*” para uma afirmação de tendência antirrealista de teorias. Sendo assim, temos que:

$$TT(1) = \frac{1}{1} \sum_{i=1}^1 rT_i = \frac{-0,5}{1} = -0,5 \quad (5.4)$$

Analogamente calculamos $TE(1)$. Temos que $n_E = 1$ e que $rE_1 = 0,5$, pois o estudante opinou “*discordo parcialmente*” para uma afirmação de tendência antirrealista de entidades. Logo:

$$TE(1) = \frac{1}{1} \sum_{i=1}^1 rE_i = \frac{0,5}{1} = 0,5 \quad (5.5)$$

Desta forma, temos que o vetor filosófico $\phi(1,1)$, construído com base nas respostas do estudante para o primeiro par de questões, é:

$$\phi(1,1) = (TT(1), TE(1)) = (0,5, 0,5) \quad (5.6)$$

5.3 Questionário

O vetor posição filosófica $\phi(1,1)$ pode então ser ilustrado no diagrama, como na figura 5.2.

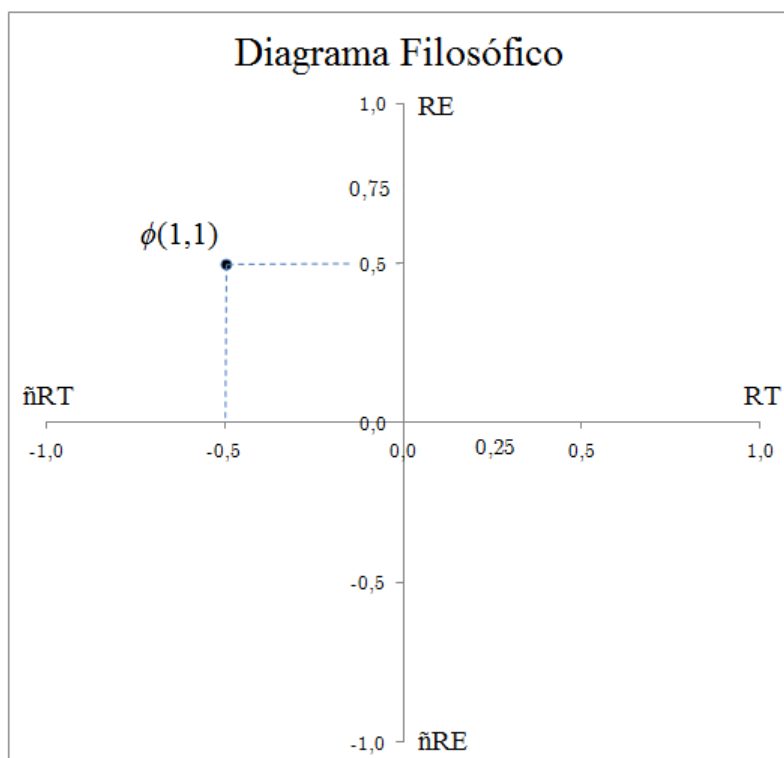


Figura 5.2: Ilustração do vetor posição filosófica para o primeiro par de questões.

Com as respostas dadas ao segundo par de questões pode-se construir $\phi(2,2)$. Os cálculos são análogos aos feitos acima. Para calcular $TT(2)$, temos que $n_T = 2$, $rT_1 = -0,5$, e que $rT_2 = 1$, pois o estudante opinou “*concordo parcialmente*” para uma afirmação (referente à terceira questão) de tendência realista de teorias. Sendo assim, temos que:

$$TT(2) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 rT_i = \frac{-0,5 + 1}{2} = \frac{1}{4} \quad (5.7)$$

Nota-se que o valor numérico de $TT(2)$ depende do valor de $TT(1)$. Isso surge do fato de se utilizar médias aritméticas para calcular $TT(n_T)$ e $TE(n_E)$, dados pelas fórmulas (5.1) e (5.2).

Para calcular $TE(2)$, temos que $n_E = 2$, $rE_1 = 0,5$, e que $rE_2 = 1$, pois o estudante opinou “*concordo parcialmente*” para uma afirmação (referente à quarta questão) de tendência realista de entidades. Sendo assim, temos que:

$$TE(2) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 rE_i = \frac{0,5 + 1}{2} = \frac{3}{4} \quad (5.8)$$

Portanto, temos que o vetor filosófico $\phi(2,2)$, construído desta vez com base nas respostas do estudante para o segundo par de questões, é:

$$\phi(2,2) = (TT(2), TE(2)) = (0,25, 0,75) \quad (5.9)$$

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

O vetor posição filosófica $\phi(2,2)$ do estudante pode ser ilustrado no como na figura 5.3.

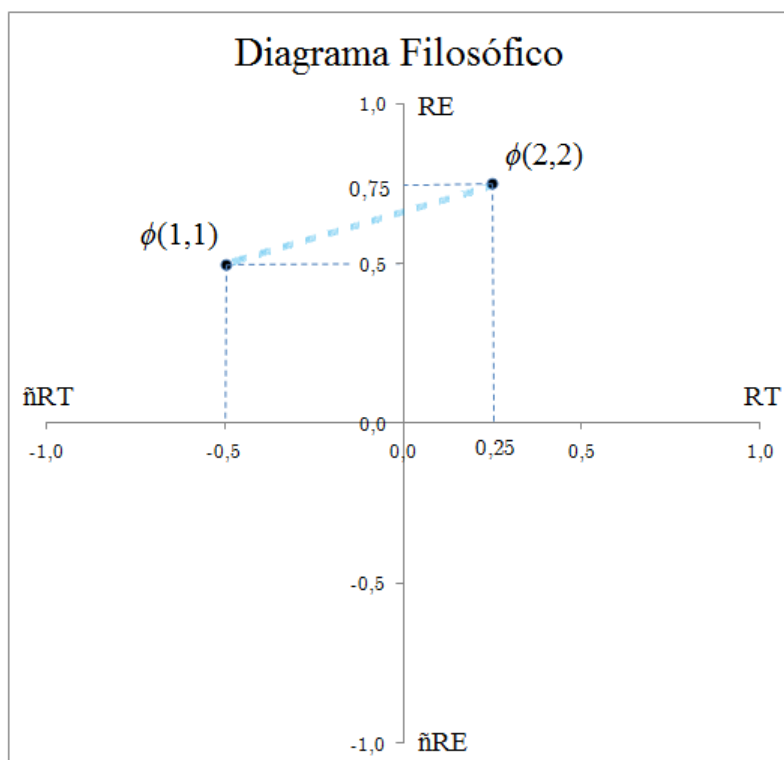


Figura 5.3: Ilustração do vetor posição filosófica para o segundo par de questões. A linha entre os pontos representa o que chamamos (com algumas ressalvas) de “evolução” da tendência filosófica.

Analisando a “evolução”⁵ do vetor filosófico do primeiro par de respostas ao segundo, podemos notar no exemplo acima que houve uma “tendência” em direção ao primeiro quadrante (Realismo de Teorias e Realismo de Entidades). É claro que esta inferência não é segura, tendo em vista que há apenas dois pontos a se considerar. Contudo, na análise da “evolução” dos vetores filosóficos construídos com base nos dados das respostas dos estudantes, em geral é possível notar “tendências filosóficas” mais evidentes que a fornecida neste exemplo. Esse é um dos principais aspectos positivos do diagrama, permitir a visualização e a comparação de diferentes tendências com base no parâmetro (eixos com formas de realismo), e não a inferência de uma postura. Por outro lado, também permite verificar como é a dinâmica no tempo da “reação filosófica” dos estudantes ao longo do curso e da aplicação das catorze questões.

De qualquer forma, mesmo com as suas limitações, este instrumento permite visualizar algo que nem sempre é notado em pesquisas similares nas quais há preocupação somente com

⁵Novamente, fazemos um abuso do termo, com fins à praticidade de expressão. Como “evolução” não pressupomos propriedades matemáticas como continuidade (evolução contínua) ou similares.

5.3 Questionário

o “resultado final” (ou “ponto final”): o comportamento do que chamamos aqui de “tendência filosófica” do estudante *ao longo da pesquisa*. Isto, por sinal, reforça a ideia de que não podemos fazer qualquer “diagnóstico filosófico” ao fim da “evolução” do vetor filosófico, pelo fato de que muitas vezes ao longo desta evolução os vetores passam por diferentes quadrantes, portanto, diferentes posturas filosóficas. Analisar somente o “ponto final” é negligenciar o que houve com a forma de ver questões filosóficas relativas ao dRAC pelo estudante. Por essas razões, é mais sensato considerar que se está analisando “tendências filosóficas” (que passa a ideia de algo em transformação, dinâmico) e não “posturas filosóficas” (que passa a ideia de algo fixo, pré-estabelecido). E, reforçando o que já foi afirmado anteriormente, o intuito principal dos diagramas é justamente verificar graficamente diferentes tendências, e usar isto como um dos critérios para a seleção dos participantes do grupo focal.

5.3.3.1 Análise de correlação (Anti) Realismo de Teorias × (Anti) Realismo de Entidades

Esta subseção descreve uma pesquisa, adicional à a pesquisa de campo descrita neste capítulo, feita com base nos dados do questionários e nos diagramas dos estudantes. Havia uma expectativa inicial da pesquisa de que uma parte considerável das posições filosóficas dos estudantes ficasse próxima à diagonal principal do diagrama, isto é, que eles apresentassem uma postura ou realista de teorias e de entidades ou antirrealista de teorias e de entidades. Uma hipótese para isso é a de que existe uma visão muito simplista do debate, onde não poderia haver posturas mistas, presentes no segundo e quarto quadrantes. Além disso, alguns autores defendem que o Realismo Epistemológico (próximo ao que consideramos como Realismo de Teorias) seria a “postura do senso comum” entre os estudantes da escola básica (COBERN & LOVING, 2008). Para investigar uma possível correlação entre (Anti) Realismo de Teorias × (Anti) Realismo de Entidades, uma análise estatística descritiva foi feita sobre os dados coletados pelo questionário aplicado aula a aula aos estudantes. Considerou-se somente os dados relativos aos estudantes que responderam a todas as questões (vinte e um estudantes). Porém, na pesquisa deste trabalho a correlação não ocorreu.

Uma hipótese de trabalho inicial razoável é de existiria algum tipo de correlação (a mais simples seria a *linear*) entre as posturas realistas e entre as antirrealistas (isto é, a hipótese de que é razoável de que um realista de entidades seja também realista de teorias, e de que um antirrealista de entidades seja também antirrealista de teorias). Pode-se corroborar essa hipótese calculando-se o coeficiente de Pearson ρ sobre os valores correlacionados de *TT* e

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

TE (uma vez que para cada pergunta sobre (Anti) Realismo de Teorias há uma pergunta sobre (Anti) Realismo de Entidades) de cada conjunto de respostas. O coeficiente de Pearson, ρ , nestas condições, é dado por:

$$\rho = \frac{\sum_{k=1}^n (TT_k - \overline{TT})(TE_k - \overline{TE})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (TT_k - \overline{TT})^2 \sum_{k=1}^n (TE_k - \overline{TE})^2}},$$

sendo que seus valores são adimensionais e estão entre -1 e 1 . Para $\rho = 1$, pode-se afirmar que há uma perfeita correlação linear crescente, e que as variáveis TT e TE são dependentes. Já para $\rho = -1$, pode-se afirmar que há uma perfeita correlação linear decrescente (anticorrelação), e que as variáveis são dependentes. Se TT e TE são independentes, então $\rho = 0$, sendo que a recíproca não é verdadeira, pois pode haver uma correlação não linear entre as variáveis. Para qualquer correlação verificada, o coeficiente não implica em causalidade. A figura 5.4 ilustra o comportamento de variáveis dependentes e independentes com o coeficiente de Pearson. As classificações para os coeficientes de Pearson utilizadas na pesquisa estão na tabela 5.1.

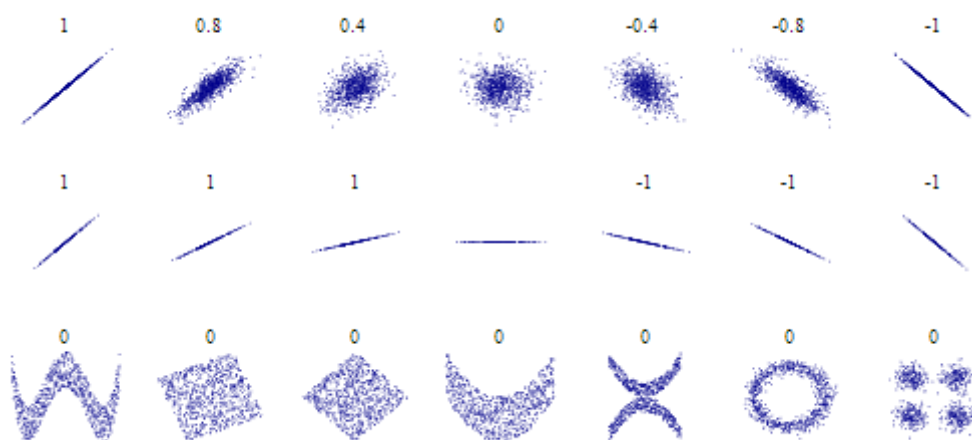


Figura 5.4: Exemplos de comportamento de variáveis dependentes e independentes. Os coeficientes de Pearson para cada caso dependem do comportamento entre as variáveis. Retirado de Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Correlation_examples2.svg, acessado dia 21/02/13.

É um fato importante que a correlação não implica que os valores das variáveis se concentrem próximos à diagonal principal do diagrama. Sendo assim, além do cálculo de ρ , é necessário o estudo da reta de tendência e do seu coeficiente angular. Em particular, se o valor do coeficiente angular estiver próximo a 1, pode se afirmar que os dados se dispersam ao redor

5.4 Aulas aplicadas e análise de resenhas

Coefficiente	Correlação
$\pm 1,00$	Muito forte
$\pm 0,75$	Forte
$\pm 0,50$	Moderada
$\pm 0,25$	Fraca
0	Nula

Tabela 5.1: Classificações dos coeficientes de Pearson

da diagonal principal. Entretanto, essa conclusão não é válida em casos em que existem valores atípicos, distantes da reta de tendência. Assim, é imprescindível também conferir individualmente cada conjunto de valores. Como elucidado anteriormente, era uma expectativa inicial da pesquisa que a dispersão das concepções dos estudantes se encontrasse próxima a diagonal principal, isto é, com os valores de ρ e do coeficiente angular próximos de 1.

O diagrama com o vetor filosófico final dos vinte e um estudantes que responderam as catorze questões está ilustrado na figura 5.5. O coeficiente de Pearson encontrado foi de $\rho \approx 0,25$, e a reta ajustada⁶, $y = 0,35x + 0,14$. Primeiramente, é importante atentar para o fato de que a inferência de correlação via coeficiente de Pearson é um método que funciona melhor para grandes conjuntos de dados, que não é o caso desta pesquisa. As conclusões sobre esses resultados encontrados, portanto, são parciais e não podem ser generalizadas. Em suma, o valor encontrado para o coeficiente de Pearson e ao coeficiente angular sugerem que não há necessariamente uma correlação entre os Realismos e os Antirrealismos. Disto pode-se concluir que o dRAC não pode ser simplificado a uma disputa “Realismo puro” \times “Antirrealismo puro”, o que dá força à relevância das categorias de Niiniluoto (1999) e Hacking (2012 [1983]), uma vez que há um número não desprezível de estudantes que permaneceram ao final das questões nos quadrantes “mistos” de Realismo e Antirrealismo.

5.4 Aulas aplicadas e análise de resenhas

A segunda etapa da pesquisa foi a análise de resenhas entregues pelos estudantes. Ao longo de todo o curso de *Evolução dos Conceitos da Física*, os estudantes entregaram catorze resenhas,

⁶Ajuste realizado no programa MS Excel.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

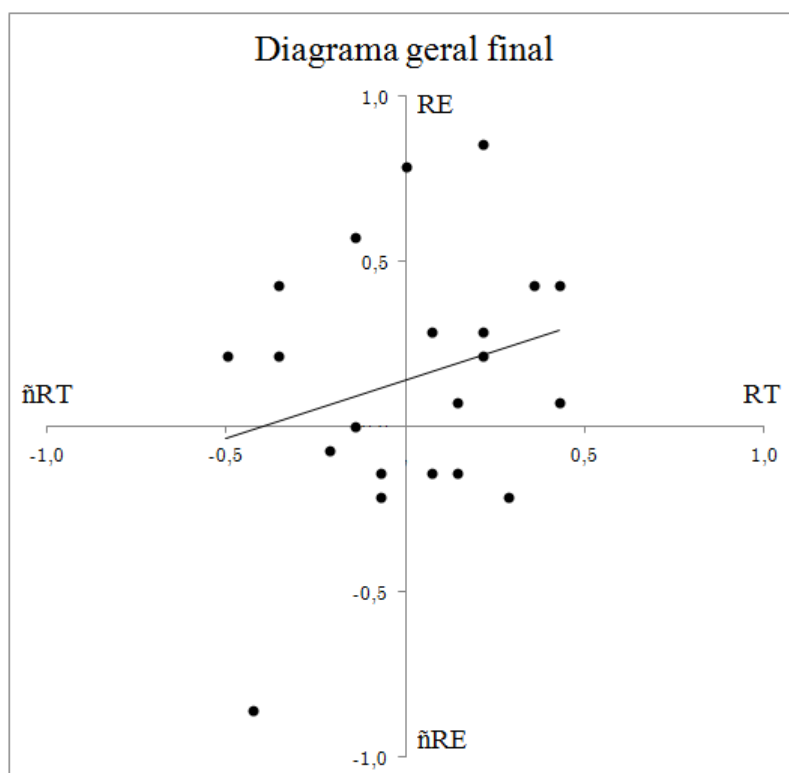


Figura 5.5: Ilustração do diagrama geral final. Os pontos representam o vetor filosófico final ($\phi(7,7)$) dos vinte e um estudantes que responderam todas as catorze questões. A reta de tendência é ilustrada na figura.

uma a cada aula. Duas destas resenhas tocavam questões históricas e filosóficas da TRE. As resenhas eram entregues antes da aula, e os estudantes deveriam se basear em leituras obrigatórias para redigi-las. A justificativa básica desta etapa da pesquisa seria, por um lado, a de ter uma compreensão mais detalhada dos resultados encontrados pela aplicação do questionário (HOLSTI *apud* LÜDKE & ANDRÉ, 1986, p.39). Contudo, as resenhas não raro se mostraram bastante ricas, pois os estudantes descreviam seus raciocínios e argumentos, de forma que não podemos considerar suas análises de forma secundária (ou como uma etapa da pesquisa que simplesmente “valida” os dados do questionário).

Intencionalmente, cada aula focou sobre um aspecto específico: a aula A (no curso chamada de *Aula #10*) foi sobre história da TRE, enquanto que a aula B (no curso chamada de *Aula #10'*), logo em seguida, foi sobre filosofia da TRE. Ambas foram elaboradas e aplicadas pelo proponente, assim como os enunciados das resenhas referentes às aulas. A leitura obrigatória para a aula A foram as seções 1.16 a 1.24 de Martins (2012). Neste texto o autor comenta as principais diferenças e semelhanças entre as teorias de Lorentz-Poincaré e Einstein. As intenções didáticas em utilizar especificamente esta obra se devem ao fato deste ser um texto

5.4 Aulas aplicadas e análise de resenhas

minimamente provocador, e também por ter sido redigido por um importante historiador da ciência brasileiro, sem deixar de mencionar que ele instrumentaliza minimamente os estudantes para pensar sobre o assunto. Entre algumas das seções, o autor discute a questão da realidade dos fenômenos relativos. O enunciado da resenha foi elaborado a partir deste ponto:

[Enunciado da resenha para aula A]

Discuta sobre quais são, segundo o autor, as diferenças entre as abordagens de Lorentz (e Poincaré) e de Einstein para aquilo que hoje chamamos de Teoria da Relatividade Especial.

(Releia a seção 1.21) Qual a sua interpretação pessoal sobre os fenômenos relativísticos? Você entende a contração e a dilatação relativísticas como “efeitos fisicamente reais”? Explique seu raciocínio.

Esperávamos que à primeira parte da questão os estudantes se apoiassem bastante sobre o texto, buscando nele o que o autor aponta como principais diferenças e semelhanças entre as abordagens de Lorentz e Poincaré e de Einstein. A segunda questão, mais pessoal, deveria ser respondida com base nos critérios de realidade de cada estudante. Assim, se esperava uma variação maior de respostas para esta parte da resenha.

O enfoque do material apresentado em classe na aula A foi, do ponto de vista da historiografia da ciência, bastante contextualista (ver apêndice C). A inspiração desta abordagem para o contexto das origens da TRE foi a obra de Galison (2003), principalmente. Galison inicia sua pré-história da TRE resgatando na segunda metade do século XIX um evento que, a princípio, parece não ter nenhuma relação com suas origens: o fim da 3ª Guerra Franco-Prussiana, em 1871. A vitória decisiva dos aliados prussianos foi fundamental à bastante comemorada unificação e formação do Império Prussiano, algo até então inédito à nação alemã. Por outro lado, a França, derrotada, entrou em um período de reestruturação política, motivada em recuperar o orgulho nacional frente às outras nações europeias. A intenção de Galison (e, conseqüentemente, da aula A) é nitidamente desenhar o pré-contexto sócio-político dos países de origem de dois dos principais contribuidores às origens da TRE: Einstein (Império Prussiano) e Poincaré (França). Enquanto Poincaré via seu país se mobilizar em direção à reorganização interna e à modernização urbana, o país de Einstein se via na tarefa de manter as fronteiras recentemente conquistadas. Em ambas estas situações, Galison argumenta que o problema da sincronização de relógios era central: a modernização urbana francesa incluía a instalação de relógios sincronizados nas cidades, a manutenção das fronteiras prussianas exigia a movimentação de tropas prussianas espalhadas de forma coordenada. Ademais, Einstein e Poincaré teriam vivido em

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

primeira pessoa a necessidade da sincronização de relógios, notando problemas na definição usual de simultaneidade. Einstein teria tido contato com pedidos de patentes para máquinas sincronizadoras no escritório de patentes em Berna, e teria notado também a importância da sincronização de relógios nas estações da cidade conhecida por seus relógios. Por outro lado Poincaré teria se deparado com a questão da sincronização de relógios distanciados com o problema das longitudes. Como explora Galison, cada um chegou à sua maneira ao formalismo matemático mínimo da TRE, interpretando-a, porém, de formas diferentes (ver figura 5.6). A intenção didática dessa abordagem foi de propiciar aos estudantes uma visão da pré-história da TRE que não raro é deixada de lado nos cursos de graduação. Outra intenção didática era deixar ainda mais explícita a proximidade entre as teorias de Einstein e Poincaré.

Durante a aplicação da aula, procurou-se seguir a sequência descrita anteriormente, dando particular ênfase à questão do contexto social, político, tecnológico e científico que circundava as origens da TRE. Os slides utilizados na aula se encontram no apêndice C. A discussão introdutória sobre historiografia da ciência foi inspirada em uma analogia feita por Kragh (2011 [1989]) entre ciência & natureza e historiografia & história. Ao final da aula, procurou-se salientar a questão da equivalência entre as teorias de Poincaré (e Lorentz) e de Einstein, não deixando de mencionar que suas abordagens para o mesmo problema foram diferentes, tratando-se portanto de duas interpretações diferentes para um mesmo formalismo.

Após a aula, os estudantes responderam à questão #9 do questionário (ver apêndice A). A afirmação era tendenciosa ao Antirrealismo de Entidades e Processos Inobserváveis (especificamente, a um Instrumentalismo de Entidades e Processos), no caso, o processo de contração relativística.

Para a aula seguinte (aula B, ou 10'), foi utilizado um texto elaborado pelos próprios autores (ver apêndice E), baseado fortemente nos estudos discutidos no capítulo 4. Procurou-se neste texto retomar a questão da equivalência empírica e matemática das teorias de Lorentz-Poincaré e de Einstein. Ilustrou-se o quadro de Lucas e Hodgson (1990, p.152, quadro ilustrado na página 86) com a intenção de mostrar aos estudantes a grande quantidade de derivações diferentes possíveis das Transformações de Lorentz. Em seguida, problematizou-se o “problema da realidade da contração relativística” por meio do Paradoxo do Submarino. O paradoxo não é solucionado no texto, mas ilustra-se ao fim como síntese um quadro descrevendo duas possíveis interpretações filosófico-científicas do fenômeno em questão. O quadro é uma versão simplificada do quadro 4.2 (página 157). A intenção didática do texto foi introduzir mais diretamente

5.4 Aulas aplicadas e análise de resenhas

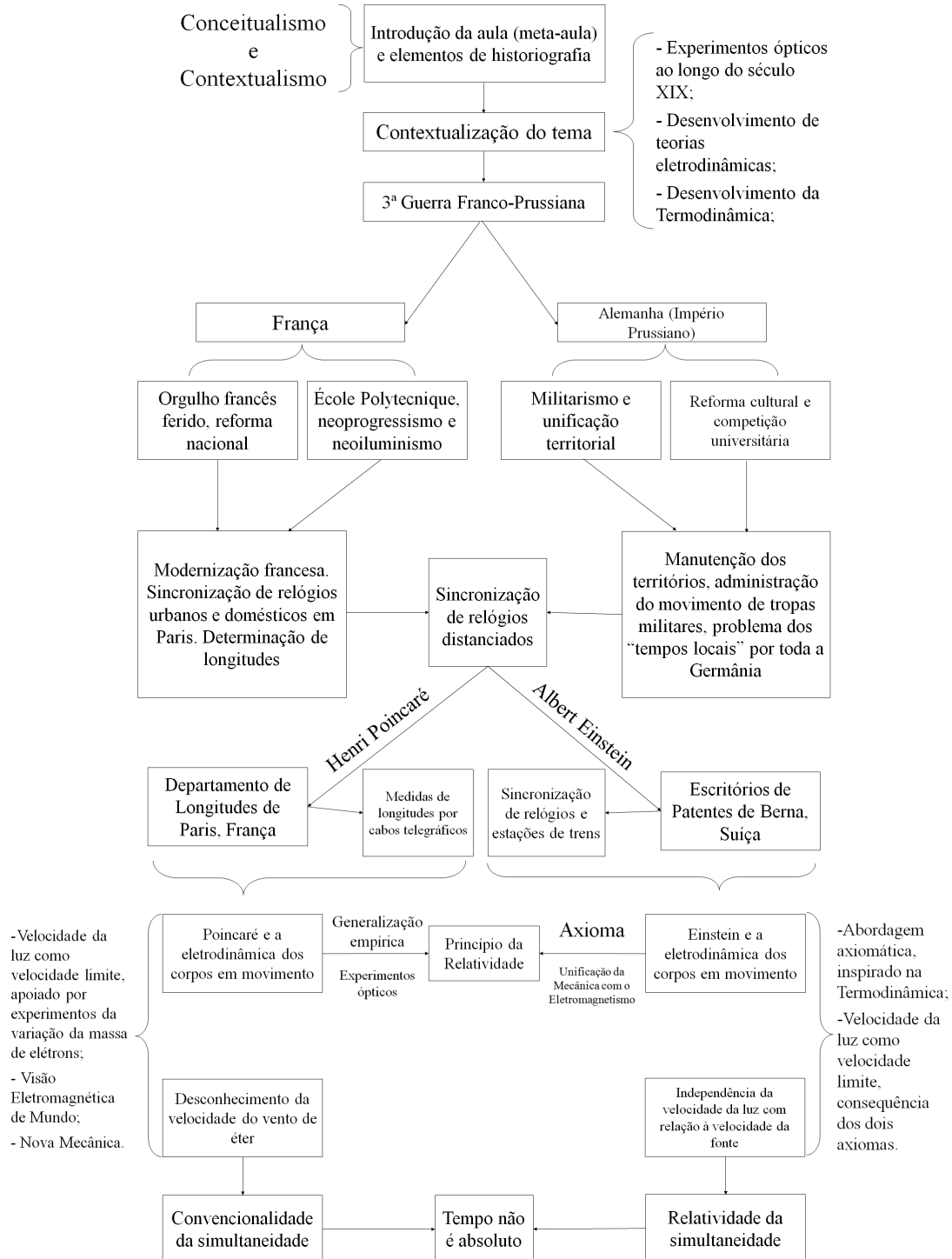


Figura 5.6: Quadro dos tópicos discutidos na aula A.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

aos alunos a possibilidade de se interpretar os fenômenos relativísticos e a própria teoria. Já a intenção do estudo do Paradoxo do Submarino foi de mostrar como um problema relativamente simples de conceber pode trazer profundas implicações filosóficas (seja um questão pontual como a realidade do espaço-tempo, seja o dRAC). O enunciado da resenha para esta aula foi:

[Enunciado da resenha para aula B]

Aponte e discuta sucintamente as semelhanças e diferenças entre as duas interpretações simplificadas expostas no texto.

Ainda que as interpretações ilustradas sejam versões simplificadas de teses mais complexas, procure responder detalhadamente: com qual delas você mais se simpatiza? Justifique.

Em sua opinião, qual delas um “físico de profissão” deveria adotar? Justifique.

O material apresentado em classe para a aula B teve um teor filosófico mais acentuado que o da aula A (ver apêndice D). Iniciou-se a aula retomando o quadro de Lucas e Hodgson (1990, p.152), ilustrado página 86, e o Paradoxo do Submarino. Depois, introduziu-se o critério de realidade de Tonnelat (1971), presente no texto da aula, distinguindo-se de início duas interpretações possíveis para o formalismo da TRE: interpretação realista e interpretação positivista. Em seguida, diferentes questões relativas à NdC foram discutidas, como o papel da observação na Ciência e alguns argumentos realistas e antirrealistas científicos (tese de Duhem-Quine, argumento da melhor explicação, entre outros). Também se discutiu alguns critérios de realidade (PESSOA JR, 2011). Apresentou-se uma versão do diagrama utilizado nesta pesquisa, contendo eixos “(Anti) Realismo Epistemológico” e “(Anti) Realismo Ontológico”, de forma que discutiu-se sucintamente o significado de cada um dos termos. Como será discutido posteriormente, na turma noturna do curso *Evolução dos Conceitos em Física* foi realizada uma pesquisa adicional ao fim da aula B. Solicitou-se aos alunos que preenchessem uma filipeta contendo o diagrama, na qual deveriam se posicionar nele conforme os próprios estudantes entendiam suas concepções próprias naquele momento. Por fim, foram expostos alguns diagramas de alguns estudantes, com a intenção de mostrar diferentes tendências filosóficas na sala (ver apêndice D).

Como ocorreu em todas as aulas da disciplina, após a aula B os estudantes responderam à questão #10 do questionário (ver apêndice A). A afirmação, construída de modo a transmitir a ideia central do argumento (realista) do milagre, era tendenciosa ao Realismo de Entidades e Processos Inobserváveis, tocando a questão da realidade do Espaço-Tempo (e outras entidades).

As resenhas de cada aula foram lidas e avaliadas. Nos apêndices F e G, estão expostas somente as resenhas dos estudantes que, ao final da disciplina, foram selecionados para com-

5.5 Grupo Focal

porem o grupo focal. Para o estudo das resenhas foram utilizados recursos básicos da teoria de análise de discurso, em especial os conceitos de *posto*, *pressuposto*, *subentendido*, *enunciador* e *locutor* presentes na chamada Análise Polifônica de Ducrot (*apud* INDURSKY, 1989). De forma resumida: *posto* é o que de fato está escrito no enunciado; *pressuposto* é o que está sendo dito implicitamente pelo locutor; *subentendido* é a interpretação deduzida do interlocutor sobre o que está enunciado; *enunciador* é aquele a quem o locutor atribui responsabilidade ao que se enuncia (*idem*). Embora sejam conceitos lançados já há alguns anos, eles serão mais que suficientes à análise pretendida nesta etapa de pesquisa.

5.5 Grupo Focal

A terceira e última etapa desta pesquisa de campo foi a realização de um grupo focal. Esta estratégia possibilita, em geral, a obtenção de dados mais ricos e significativos, além de viabilizar a triangulação de dados, última etapa de análise da pesquisa. O grupo focal foi realizado no dia 10 de julho de 2013, no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (ver apêndice H), com oito estudantes do curso *Evolução dos Conceitos em Física*.

É bastante reconhecido entre pesquisadores da área de ensino de ciências que intervenções muito pontuais ou restritas (como a aplicação de questionários com respostas escaladas) não são suficientes para se construir um diagnóstico preciso daquilo que se almeja investigar. De fato, não se pode *concluir* qual a postura filosófica dos estudantes por meio somente de suas respostas das questões em escala Likert, tão menos afirmar gratuitamente que houve mudanças ou “evoluções” em suas tendências. Por essas razões, optou-se por outras estratégias de intervenção e análise, como o estudo de resenhas elaboradas pelos estudantes, e, por fim, a realização de um grupo focal com uma fração dos estudantes.

A estratégia de grupos focais, tradicionalmente mais presente na academia em pesquisas em Ciências Sociais e Psicologia, vem sendo usada nas pesquisas em educação com mais forças nos últimos anos (GATTI, 2012, p.7). Powell e Single (*apud idem*) definem grupo focal como um conjunto de participantes selecionados previamente reunidos por pesquisadores para discutir e comentar um tema, que é objeto de pesquisa, a partir de sua experiência própria. Entre outros motivos mais específicos, esse uso crescente teria surgido da necessidade de se “triangular” os dados obtidos por métodos diferentes em uma mesma pesquisa, objetivo para o qual os grupos focais se mostram bastante úteis (*ibid.*, p.12). O intuito não é validar o “quantitativo” pelo

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

“qualitativo”⁷, ou vice-versa, mas sim, no caso deste trabalho, complementar resultados da pesquisa obtidos em diferentes etapas. Os grupos focais são ideais, como aponta Gatti (*ibid.*, p.10), para se compreender diferenças e divergências entre os participantes, contraposições e contradições.

Como afirma Gatti (*ibid.*, p.71):

[a] potencialidade mais enfatizada do grupo focal como meio de pesquisa está ligada à possibilidade que ele oferece de trazer um conjunto concentrado de informações de diferentes naturezas (conceitos, ideias, opiniões, sentimentos, preconceitos, ações, valores) para o foco de interesse do pesquisador.

Como toda estratégia, a realização de grupos focais tem pontos positivos e negativos. Entre os pontos positivos, temos: os grupos focais permitem captar, a partir da interação entre os participantes, reações e atitudes que dificilmente se manifestariam em outros métodos (*ibid.*, p.9); permite coletar uma quantidade de informação maior em um período de tempo menor (*ibid.*, p.10); pode ser usada para aperfeiçoar a compreensão de alguma variável de pesquisa já investigada por outros meios (*ibid.*, p.12). podem ajudar a ir além de respostas simplistas ou simplificadas, incitando à exposição detalhada e argumentada (*ibid.*, p.14)

Entretanto, muitos mitos surgiram sobre o uso da estratégia de grupos focais, apontam Morgan e Krueger (1993). Entre eles, ideia de que qualquer pessoa pode administrar o grupo, que este deve ser composto apenas de “estranhos” (pessoas que não se conhecem) (*ibid.*, p.6), que os participantes não vão ocasionalmente se expor (ou deixar de se expor) mais do que deviam, que o objetivo do grupo é necessariamente chegar a um consenso (*ibid.*, p.7), entre outros. Muitas críticas que surgem à aplicação de grupos focais provêm do uso desavisado de alguns destes “mitos”.

Muitos pontos negativos do uso de grupos focais provêm de suas limitações ou de suas “restrições”. Primeiramente, nunca há garantia plena de que os convidados compareçam ou participem ativamente em grupo. Se os participantes se conhecerem muito, isso pode induzir à criação de “subgrupos monopolizadores” que inibem a participação dos demais (GATTI, 2012, p.21). O fato de o pesquisador não ter um controle maior sobre os dados que advêm do grupo focal, comparado a outras estratégias (estudos quantitativos, entrevistas individuais, entre outros), também é entendido como uma limitação desta estratégia (*ibid.*, p.60)

⁷O uso destes termos gera bastante controvérsia entre pesquisadores especializados em metodologias de pesquisa. Essa controvérsia, embora importante, não será discutida neste trabalho.

5.5 Grupo Focal

O grupo focal não pode contar um número arbitrário de participantes, tão menos deve ter durações exageradas. Como afirmam Osborne e Collins (2001, p.444), a quantidade de participantes do grupo determina, em parte, quanto tempo cada um terá em média para contribuir ao debate, e também a quantidade de assuntos diversos que podem surgir, não necessariamente ligados ao tema central de discussão. Principalmente por essa razão, adotou-se a recomendação presente na literatura de se convocar de seis a oito estudantes, sendo o máximo doze, conforme apontado por Gatti (2012, p.22). Grupos maiores podem trazer complicações como monopólios durante a reunião, a não participação de todos os envolvidos, entre outros. Por outro lado, deve-se sempre contar com o elemento surpresa: convidados podem não aparecer em última hora, o que é algo relativamente comum (*ibid.*, p.23).

Por fim, o critério (principal) para a escolha dos participantes do grupo focal se deu com base nos diagramas filosóficos. Embora estes, como salientado anteriormente, não sejam “diagnósticos filosóficos” dos estudantes, eles ajudam a apontar diferentes “tendências filosóficas” entre eles. Primeiramente, somente os estudantes que haviam respondido às catorze questões teriam o diagrama completo (com os sete pontos), e, portanto, somente estes poderiam ser considerados como candidatos ao encontro. Vinte e um estudantes responderam a todas as questões pós-aula. Destes, dez foram convidados a participar do grupo focal, principalmente por apresentarem diferentes tendências filosóficas em seus diagramas. E destes, somente oito puderam participar, identificados neste trabalho pelos números 033, 893, 942, 872, 113, 201, 583 e 581.

O que chamamos aqui de “tendência filosófica” refere-se ao comportamento da evolução do vetor filosófico construído com base nas respostas dadas pelo estudante às questões pós-aula. Como pode ser visto no Apêndice C, alguns diagramas apresentam diferentes características ou tendências: permanência constante em algum quadrante (893 e 581); proximidade com o eixo principal do diagrama (942); mudanças graduais ou pequenas (033, 872, 113 e 583); mudanças bruscas (201). O intuito central ao unir estudantes com diferenças tendências apontadas por seus diagramas era tão unicamente suscitar o debate entre diferentes posturas. O próprio proponente fez o papel de moderador do grupo focal, e as gravações foram realizadas por um desconhecido aos participantes⁸. Com exceção de cerca de dez minutos finais, todo o grupo focal foi transcrito (ver apêndice H).

⁸Evandro Rozentalski.

5.5.1 Organização, materiais utilizados e considerações

A realização do grupo focal tem certas “regras” básicas que são importantes para que o encontro seja relevante tanto para o pesquisador como para os participantes. Primeiramente “os participantes devem ter alguma vivência com o tema a ser discutido” (GATTI, 2012, p.7). Como discutido anteriormente, os estudantes tiveram um aula específica sobre Realismo e Antirrealismo e Teoria da Relatividade, tendo assim alguma “vivência mínima” com os temas pretendidos para o grupo. Segundo, a adesão ao grupo deve ser voluntária e a carta precisa ser clara e convidativa (*ibid.*, p.13). Os convites foram feitos por email a doze estudantes da disciplina, das turmas do diurno e noturno.

[Título do email: *Convite para debate*]

Caros colegas, boa tarde!

Venho por meio deste email lhes fazer um “pedido-convite”.

Vocês foram escolhidos por mim e pelo Ivã entre dezenas de outros colegas do curso para participar de um debate fechado. Os critérios para escolha se basearam em suas respostas nas questões Moodle e também na exposição de suas ideias nas resenhas.

A ideia é debatermos algumas questões filosóficas sobre o conhecimento científico, nada muito além do que foi discutido ao longo das aulas.

A participação de vocês irá ajudar em muito em uma pesquisa que estou fazendo desde o começo do semestre com as produções de vocês feita durante todo esse tempo. Por essa razão é que agradeço desde já a disposição de quem puder participar.

Para os que aceitarem, temos combinaremos em conjunto uma data que seja acessível a todos (assim como um horário). Provavelmente, iremos marcar para as próximas semanas, antes do fim do semestre letivo (mas se for o caso podemos esperar passar as provas!). O debate não deve durar mais que duas horas, e terá comes e bebes. A discussão será gravada para análise posterior, seus nomes e outras informações pessoais não serão divulgadas sem permissão.

Não há problemas em declinar esse convite. Mas caso não possam participar, peço que me avisem, pois assim buscaremos outros candidatos para realizar a discussão.

Eu e o Ivã estamos à disposição maiores esclarecimentos sobre esse convite.

Agradeço desde já os colegas que puderem aceitar o convite, assim como aqueles que não puderem por qualquer razão. Espero o contato de vocês!

Att.,

André.

5.5 Grupo Focal

Em terceiro e último lugar, o grupo focal não deve ser realizado caso o objetivo das discussões seja chegar necessariamente a um consenso (*ibid.*, p.15; MORGAN & KRUEGER, 1993, p.7). De fato, o objetivo de realizar o grupo focal com estudantes com tendências filosóficas diferentes era de suscitar o debate entre eles, e não incitar à concordância ou ao consenso entre suas formas de entender as questões filosóficas discutidas.

Houve um planejamento sobre como o moderador deveria guiar as discussões durante o grupo focal. Em primeiro lugar, se apresentaria aos estudantes presentes no grupo como foram coletados dados sobre suas tendências filosóficas ao longo do semestre (tanto pela página Moodle da disciplina como pela leitura de resenhas específicas). Em seguida, se mostraria os diagramas filosóficos gerais das turmas (diurno e noturno), de modo explicitar e direcionar o debate ao tema em questão (Realismo Científico e posturas filosóficas). Em nenhum momento se informaria detalhes mais específicos do objeto de pesquisa, como sugere Gatti (2012, p.23), muito embora o objetivo de pesquisa seria esclarecido, como também é sugerido pela autora (*ibid.*, p.29).

Com base no discurso dos estudantes nas resenhas analisadas, elaborou-se uma lista de assuntos que seriam pertinentes de serem discutidos em grupo. Entre eles: Realismo Semântico, Relatividade Conceitual, Objetividade do conhecimento científico, Entidades inobserváveis contemporâneas, controvérsia das cordas, Critérios de Realidade, Fenomenalismo e Instrumentalismo, Valor (epistemológico) da Ciência e o papel da Matemática na Física.

Como “estímulo visual” aos debates, planejou-se utilizar imagens ou vídeos que transmitissem pontos centrais de alguns destes assuntos. Para o assunto “Objetividade do conhecimento científico”, utilizou-se a gravura em madeira, de autor desconhecido, ilustrada no livro de Camille Flammarion, *L’atmosphère: météorologie populaire* (1888) (ver figura 5.7). Para o assunto “Realismo Semântico”, utilizou-se a pintura de René Magritte, *La condition humaine* (1933) (ver figura 5.8). Para o assunto “papel da Matemática na Física”, utilizou-se uma imagem obtida na internet, autor desconhecido (ver figura 5.9). Para os assuntos “Entidades inobserváveis contemporâneas” e “Critérios de Realidade”, utilizou-se o recente vídeo elaborado por um grupo da IBM, de título *A boy and his atom* (ver figura 5.10)⁹.

Por fim, cabe citar o importante papel do moderador para a realização positiva do grupo focal. Em linhas curtas, o papel do moderador é fazer encaminhamentos sobre o tema e intervir

⁹O vídeo foi obtido do próprio site da IBM: <http://www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml>, acessado dia 27/6/13.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

no sentido de instigar o debate e manter o foco das discussões (GATTI, 2012, p.9). Ele não deve de forma alguma se posicionar, fazer sínteses, propor ideias ou criticar as ideias de algum participante (*idem*). De início, deve explicitar seu papel, propor questões, e evitar que as discussões fujam demasiadamente dos temas centrais (*ibid.*, p.29).

Em vários momentos do grupo focal, o moderador procurou dosar momentos de “descontração” com momento de “rigidez”, pois, como aponta Gatti (2012, p.31), há sempre riscos dos participantes não levarem o encontro a sério (quando se exagera com a descontração) ou não se sentirem muito a vontade a se expor (quando se exagera na rigidez). Em outros momentos, o moderador se viu na necessidade de ser flexível em adiantar alguns tópicos da discussão, e em outros em pedir para que os estudantes retomassem determinada discussão em momento posterior (*ibid.*, p.32).

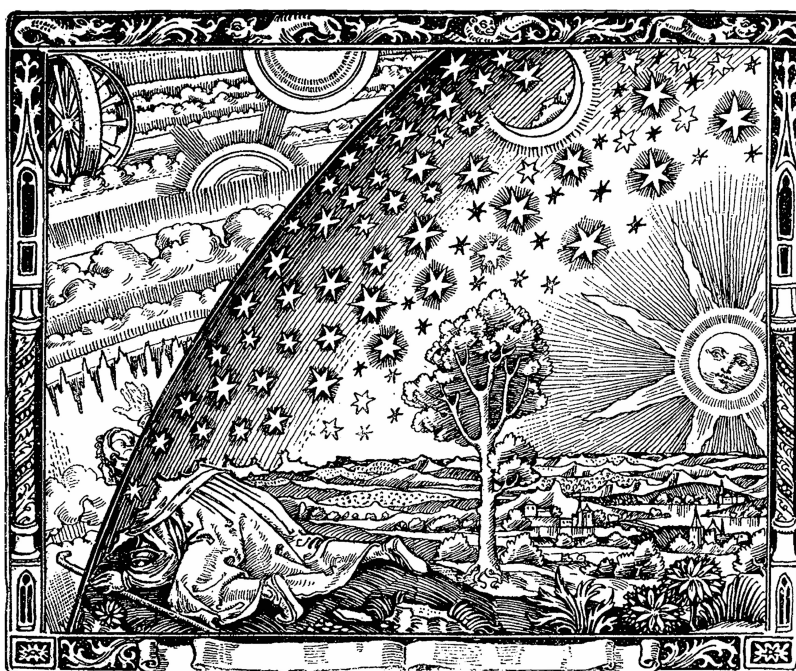


Figura 5.7: Gravura *L'atmosphère: météorologie populaire*. Obtido em http://en.wikipedia.org/wiki/Flammarion_Engraving, acessado dia 27/06/13.

Como aponta Gatti (2012, p.43), na análise de grupos focais se utiliza muitos procedimentos típicos das pesquisas em ciências humanas e sociais com dados qualitativos, entre elas, a análise de discurso, a análise de comportamento, a análise emocional, entre diversas outras. Não se utilizou com rigor nenhuma destas análises, senão uma forma mais trivial de análise de discurso das falas dos participantes.

5.5 Grupo Focal



Figura 5.8: Obtido em <http://blog.pasqunpeu.fr/exposition-magritte-a-vienne/>, acessado dia 27/06/13.

Um dos maiores perigos na análise do grupo focal, segundo Gatti (2012, p.47), é a generalização imprópria, ou, as interpretações forçadas dos dados. Estas devem ser evitadas, ainda que se saiba que a subjetividade na análise não é totalmente eliminável. Morgan (*apud ibid.*, p.49) defende que não se pode considerar o grupo como um todo e os indivíduos como “unidades de análise” separáveis, pelo fato de o que os participantes declaram dentro do grupo depende do contexto do próprio grupo. Gatti (*ibid.*, p.70) ainda aponta que os pontos de vista de cada um dos participantes não podem ser tomados como definitivos. Estes pontos reforçam a ideia de que a pesquisa de campo não visa realizar “diagnósticos filosóficos”, mas sim ver a “reação” dos estudantes ao dRAC no contexto da TRE. As interpretações, quando feitas, devem ser bem argumentadas e apoiadas por evidências claras e verificáveis nos dados (*ibid.*, p.73). Sugere-se que as interpretações de um determinado pesquisador devem ser confrontadas com as de outro, dando-lhes mais consistência (*ibid.*, p.72).

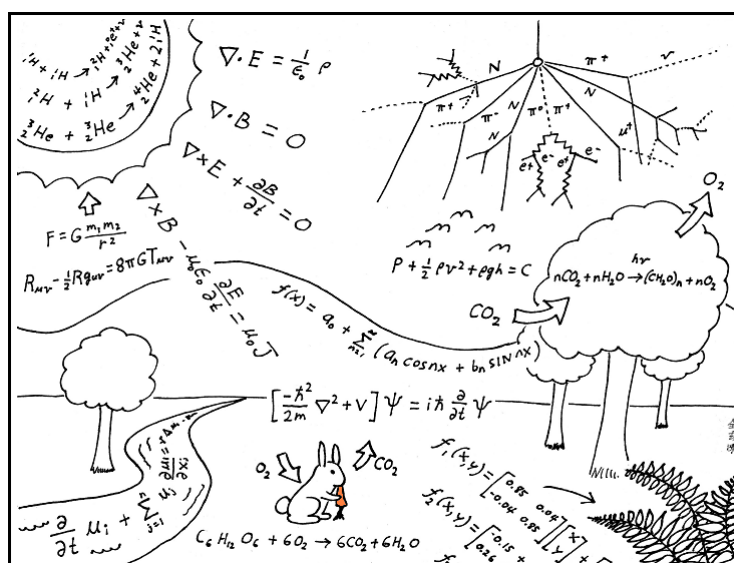


Figura 5.9: Imagem *Como o cientista vê o mundo*. Obtido em http://abstrusegoose.com/strips/all_i_see_are_equations.png, acessado dia 27/06/13.

5.6 Estudo e análise das concepções

Nas seções seguintes estão as análises das tendências filosóficas dos oito estudantes convidados ao grupo focal. Para cada caso, foi feita a triangulação dos dados entre as resenhas feitas pelos estudantes, as respostas ao questionário e as transcrições das falas no grupo focal. Em geral, na análise da tendência de grande parte destes estudantes notou-se correlação de argumentos e tendências filosóficas entre os diferentes dados. É particularmente interessante notar como, nas falas e nas exposições textuais dos textos, o dRAC se manifesta. Alguns estudantes utilizam alguns dos argumentos próximos àqueles entre filósofos realistas e antirrealistas discutidos no capítulo 3.

Naturalmente, as análises feitas nas subseções seguintes são passíveis de discussão e alteração. Por outro lado, há um conjunto de indicações que o leitor deve ter ciência antes de prosseguir às análises. A primeira delas é que o fato de todos os estudantes terem o primeiro ponto do diagrama nos quadrantes 2 e 3. Não trata-se de uma coincidência, e sim, o que é uma hipótese mais razoável, que a afirmação da primeira questão relativa ao Antirrealismo de teorias é exageradamente tendenciosa (ver questão inteira no apêndice A):

Afirmção: Entretanto, ainda que acreditemos que o mundo é “ordenado”, que ele possua leis inatas e imutáveis, nada nos garante de forma definitiva que é possível se conhecer a realidade deste mundo nos mais íntimos detalhes.

5.6 Estudo e análise das concepções

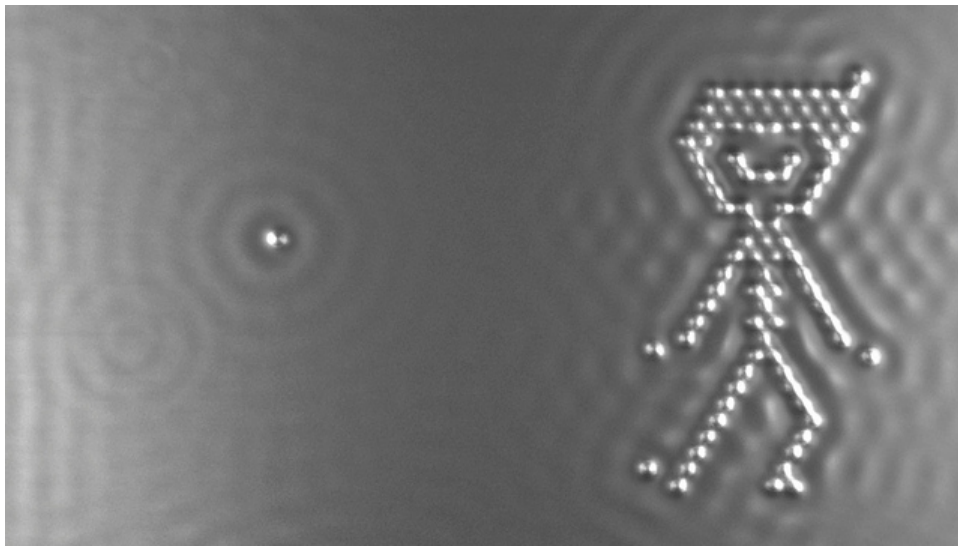


Figura 5.10: Imagem do vídeo *A boy and his atom*. Obtido em [http://en.wikipedia.org/wiki/File:A_Boy_and_His_Atom_\(still\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:A_Boy_and_His_Atom_(still).jpg), acessado dia 27/06/13.

Nenhum estudante respondeu “concordo parcialmente” ou “concordo plenamente”. As expressões “nada nos garante de forma definitiva” e “íntimos detalhes” teriam exagerado essa afirmação de forma que nem os estudantes que posteriormente mostraria uma “tendência realista” concordaram. Por outro lado, isso nos permite dizer que nenhum dos estudantes respondeu à questão de forma ingênua, isto é, ninguém se mostrou como um realista de teorias (epistemológico e axiológico) ingênuo.

É importante mencionar a fato de o curso ter influenciado (filosoficamente) os estudantes na confecção das resenhas, nas respostas ao questionário e nas falas do grupo focal. Por vezes isto fica evidente, como em uma fala de 893 no grupo focal (00:30:35) em que distingue a realidade com “R” e a realidade “r”. Em das aulas ministradas sobre História e Filosofia da TRE, foi utilizado um exemplo muito semelhante na discussão sobre historiografia (historia com “h” e história com “H”, ver primeiros slides no apêndice C), que teria influenciado então esse estudante. As aulas do professor da disciplina, o conteúdo e os textos selecionados também certamente influenciaram os estudantes em alguma medida. Estes são exemplos que ilustram como os resultados da pesquisa, assim como afirmações sobre as “tendências filosóficas”, estão contextualizadas em um arranjo maior, que inclui desde a própria estrutura do curso *Evolução dos Conceitos da Física* até o discurso do professor e do proponente nas aulas.

Muito embora a influência sobre os estudantes tenha sido inevitável, ela também é, neste caso, necessária. O dRAC não é (salvo raros casos) discutido com estudantes de física durante a graduação. E, embora advogemos que suas características se manifestem nos estudantes (como

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

de fato foi possível notar nas análises seguintes), estes precisam ser estimulados ou instigados para assim fazer.

Uma pesquisa adicional foi feita com os estudantes do noturno¹⁰. Foram distribuídas filipetas com um diagrama bastante semelhante ao ilustrado anteriormente (ver figura 5.11). Foi sugerido aos estudantes, depois de uma discussão sobre o significado de cada eixo, que se posicionassem em alguma região do diagrama com um ponto, assim como que apresentassem uma pesquisa justificativa. Pesquisa muito semelhante foi feita por Schraw e Olafson (2008), utilizando inclusive os mesmos eixos. O intuito de sua aplicação foi possibilitar a comparação da tendência apresentada no diagrama (construído com base nas respostas ao questionário) com a opinião do próprio estudante. Em muitos casos, embora a posição não coincidissem pontualmente, os estudantes se classificaram no mesmo quadrante no qual suas tendências filosóficas finais do diagrama convergiam. Isto sugere que os dados das diferentes etapas da pesquisa são coerentes entre si nestas situações, dando mais confiabilidade às conclusões sobre as tendências filosóficas dos estudantes no dRAC.

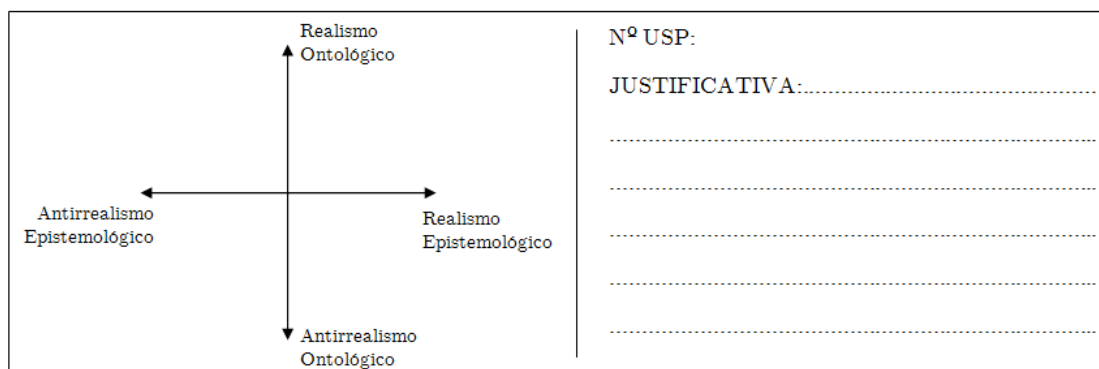


Figura 5.11: Filipeta com diagrama filosófico. Esta atividade foi realizada apenas na turma do curso noturno.

Por fim, é relevante citar que, levando em conta as condições de aplicação do questionário aos estudantes na pesquisa e o método de trabalho sobre os dados descritos anteriormente, temos que a distância temporal entre pares de pontos consecutivos no diagrama é (em geral) de duas semanas. Assim, para completar o diagrama de cada estudante (sete pontos) seriam precisos no mínimo catorze semanas, o que dá aproximadamente o tempo de um semestre de aulas na instituição na qual se deu a pesquisa

¹⁰Ela não foi feita com os estudantes do diurno por falta de tempo na segunda aula sobre História e Filosofia da TRE.

5.6.1 Estudante 033

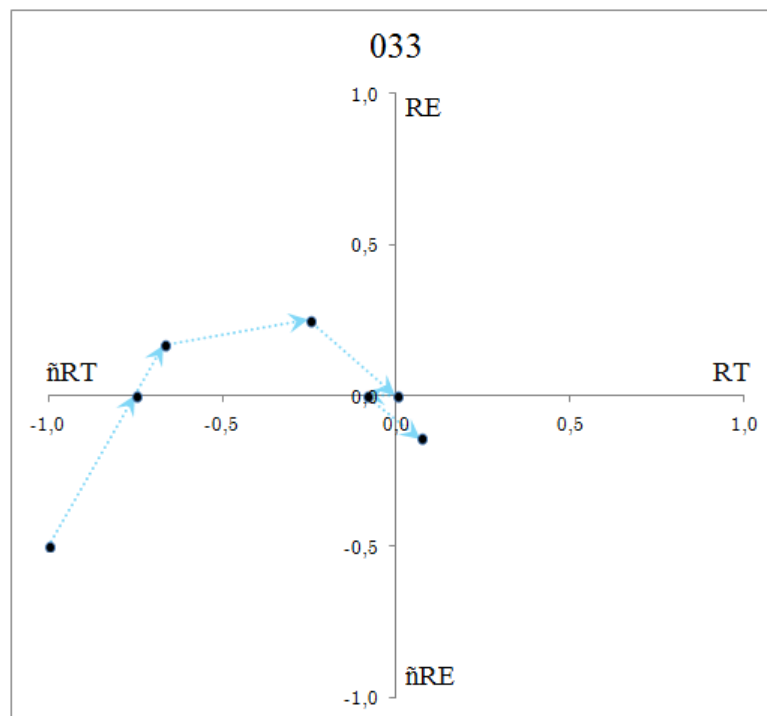


Figura 5.12: Diagrama do estudante 033, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

O estudante 033 fez as duas resenhas para a aula A e B (ver resenhas 033 nos apêndices F e G), porém infelizmente teve participação nula no grupo focal (ver apêndice H, momento 00:54:30). Seu diagrama mostra uma tendência convergente nos pontos finais à origem dos eixos, o que pode ser interpretado como uma “postura neutra” tanto de Realismo de Teorias como de Entidades e Processos Científicos Inobserváveis. Quanto à evolução dos pontos, percebe-se uma gradação do Antirrealismo de Teorias à origem, enquanto que no eixo de Realismo de Entidades nota-se uma variação de postura (principalmente entre o primeiro e o quarto pontos). Na análise de suas duas resenhas pode-se encontrar elementos que indicam sua tendência agnóstica quanto às diferentes formas de Realismo. Na resenha da aula A, esses elementos surgem principalmente entre as linhas 30 e 48, e na resenha da aula B, entre as linhas 16 e 32.

No intervalo de linhas mencionado da resenha A, 033 afirma de início que o estudo da TRE é “*muito complicado*” (l. 30), “*totalmente contra intuitivo*” (l. 31). E a palavra “*intuição*” se repete nas linhas 32, 34 e 35. O caráter não-intuitivo da teoria não o impede, contudo, de afirmar a realidade dos fenômenos relativísticos, como fica evidente na frase:

No entanto, alguns experimentos nos mostra que os efeitos da relatividade são reais, como os ex-

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

perimentos que detectam píons produzidos na exosfera e são detectados na superfície terrestre (l. 35-38, apêndice F).

Primeiramente, nota-se como critério de realidade a experimentação, ou a (suposta) verificação experimental de um efeito previsto pela TRE. Uma possível análise desta frase é a seguinte:

Posto - Os fenômenos relativísticos, em especial a dilatação do tempo, são verificáveis experimentalmente;

Pressuposto - A contagem desigual de partículas pión em altitudes mais baixas da superfície terrestre, em comparação à quantidade produzida na exosfera, só pode ser explicada à luz do conceito de dilatação temporal relativística;

Subentendido - A “intuição do dia-a-dia” não é suficiente para se compreender os fenômenos relativísticos. Apesar de totalmente não intuitiva (vide uso da expressão “*No entanto*”), a teoria *funciona* muito bem para explicar alguns fenômenos e experimentos.

A atribuição de realidade aos fenômenos relativísticos (Realismo de Processos), usando a “intuição do dia-a-dia”, estaria limitada. O fato de um fenômeno ser passível de descrição pela TRE (segundo a citação), faz 033 retirar de si a responsabilidade que teria ao crer em uma teoria (ou, em um processo) “*totalmente não intuitiva*” na situação em que não houvesse *nenhum amparo empírico*. Assim, a realidade dos fenômenos relativísticos “é culpa” da verificação experimental da TRE. Esse tipo de postura não implica necessariamente em uma crença realista sobre teorias ou sobre entidades e processos, e sim parece estar mais próxima a um instrumentalismo (tanto de teorias como de entidades e processos).

Nas linhas seguintes, 033 reforça o pressuposto, de forma categórica em um “discurso naturalizado”:

A explicação desse fenômeno [contagem desigual de píons] é dada pela relatividade: no referencial da terra, o tempo de decaimento dos píons é maior do que em um referencial parado em relação a ele. Já no referencial dos píons, o espaço se contrai; portanto a distância que ele precisa percorrer é menor (l. 40-43, apêndice F).

Logo em seguida, utiliza novamente a experimentação como critério de realidade, referindo-se desta vez aos experimentos realizados no LHC (*Large Hadron Collider*). Conclui a resenha A com a seguinte frase:

Talvez os efeitos não sejam reais no sentido defendido por Lorentz e Poincaré, mas são reais à medida que são mensuráveis (l. 46-48, apêndice F).

5.6 Estudo e análise das concepções

A experimentação, ou mensurabilidade experimental, enquanto critério de realidade re- parece neste trecho conclusivo. Por outro lado, 033 novamente coloca a responsabilidade da realidade dos fenômenos relativísticos não sobre uma crença pessoal, mas sobre o fato de que estes teriam sido verificados experimentalmente. O uso da palavra “*Talvez*” pode ser entendido como uma evidência desta atitude, pois 033 parece não descartar completamente a interpretação de Lorentz e Poincaré para os fenômenos relativísticos. A rigor, sua última frase seria válida tanto no contexto histórico atual como no início do século passado, isto é, tanto hoje como àquela época não se negaria a mensurabilidade destes efeitos (como houve com os resultados dos experimentos e Michelson e Morley de 1887). Isso pode sugerir que 033 efetivamente não toma partido sobre a realidade dos processos relativísticos e também da teoria, estando próximo então de um agnosticismo (região central do diagrama).

Também podemos encontrar na resenha B (ver apêndice G) diversos elementos que, interpretados propriamente, parecem estar em conformidade com a tendência filosófica de 033 ilustrada no diagrama da figura 5.12. Já de início, 033 destaca que as controvérsias sobre a explicação dos fenômenos relativísticos advém da “*natureza inacessível*” (l. 5) daquilo que a TRE se pretende explicar. Pode-se entender, em especial com o uso da palavra “*inacessível*”, uma postura relativamente cética quanto à capacidade de *acessarmos* a realidade, que se traduz como um ceticismo ao Realismo Epistemológico (e de certa forma, também ao Realismo de Teorias).

Nesta mesma resenha, 033 declara-se mais simpático à interpretação operacionalista do formalismo matemático da TRE do que à interpretação substantivista (l. 16). Isto porque entende substantivismo como uma “*visão mais conceitual do mundo*” ligada à “*natureza mais abstrata das teorias*” (l. 12-13), sendo que julga a “*comprovação experimental*” ser “*imprescindível a uma teoria consistente que se dispõe a entender e a explicar a natureza*” (l. 17-18). Como na resenha anterior, fica mais do que claro a experimentação como seu critério de realidade central. Contudo, na frase seguinte afirma que é “*dispensável*” o empirismo como base de teorias (l. 18-19), mas que em algum momento o “*exercício de comprovação*” experimental de um conjunto de ideias é necessário para que este se torne uma teoria.

Ao longo de todo o parágrafo entre as linhas 16 e 27, 033 procura justificar porque é mais simpático à interpretação operacionalista, argumentando que esta contempla melhor seu critério de realidade do que a interpretação substantivista. Porém, ao final, depois de esclarecer sua opinião sobre os objetivos do físico, “*entender e explicar a natureza*” (l. 28-29), argumenta

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

que ambas as interpretações contemplam esses objetivos, contanto que tenham o que chama de “*vínculos com a natureza*”. E conclui:

É possível acreditar no espaço-tempo de Minkowski como algo real, já que ele explica fenômenos observáveis e, portanto, tem um link com a natureza (l. 30-32, apêndice G).

Uma possível análise deste trecho é:

Posto - Acreditar no Espaço-tempo de Minkowski como algo real é aceitável, uma vez que com esta ideia pode-se explicar fenômenos observáveis;

Pressuposto - A explicação de fenômenos observáveis implica que a teoria possui algum link com a natureza;

Subentendido - É facultativo se acreditar no Espaço-tempo de Minkowski enquanto entidade física real (vide uso da expressão “*É possível*”). Qualquer entidade científica abstrata e inobservável pode ser considerada real contanto que seja de alguma forma *útil* em explicar fenômenos e experimentos.

O uso das expressões “*Talvez*” e “*É possível*” nos finais das resenhas de 033 parecem condizer com a “postura neutra” ilustrada no diagrama da figura 5.12. Isto é, se expressa um descompromisso em acreditar ou desacreditar em entidades inobserváveis (como o Espaço-tempo), o que não impede que seja úteis em explicar fenômenos e experimentos. Isso é condizente com a variação apresentada nas coordenadas dos pontos no eixo vertical (dois pontos estão completamente nos quadrantes de Realismo de Entidades e dois completamente nos quadrantes de Antirrealismo de Entidades). A tendência em direção ao Realismo de Teorias apresentado no último ponto é muito sutil para a análise em questão. Contudo, é interessante comparar isto com a tendência geral dos pontos em direção aos quadrantes do Realismo de Teorias, assim como com a declaração de 033 de que “*quantitativamente a relatividade especial mantém-se inviolável*” (l. 1-2, apêndice G). É curioso notar que o também sutil tendência em direção ao Antirrealismo de Entidades no último ponto é condizente com a escolha de 033 pela interpretação positivista do formalismo matemático da TRE.

5.6.2 Estudante 113

O estudante 113 fez as duas resenhas para a aula A e B (ver resenhas 113 nos apêndice F e G). Teve participação mínima no grupo focal, com cinco momentos de fala (00:50:46, 00:51:18, 00:52:37, 00:52:55 e 00:53:18, ver apêndice H). É possível notar em seu diagrama uma tendência em permanecer no quadrante de Antirrealismo de Entidades e de Teorias, salvo o terceiro

5.6 Estudo e análise das concepções

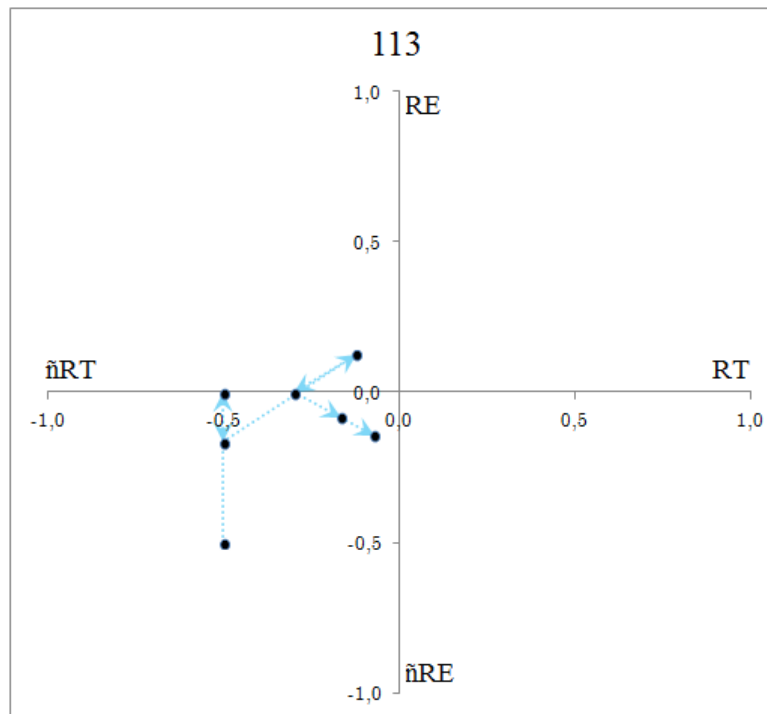


Figura 5.13: Diagrama do estudante 113, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

ponto. Ao final, os pontos tenderam à região da origem do diagrama. Analisando o diagrama de 113, podemos interpretar seu comportamento final como uma “postura neutra”, muito embora o estudante apresenta uma tendência antirrealista de teorias (não há nenhum ponto nos quadrantes de Realismo de Teoria). Em suas resenhas, é também possível notar essa tendência, muito embora 113 não se arrisque categoricamente em nenhuma postura.

Questionado pelo enunciado da resenha A sobre a realidade física dos fenômenos relativísticos, 113 argumenta que “*não é possível ter uma intuição a respeito destes efeitos*” pelo fato de serem “perceptíveis” somente a velocidades próximas da luz (l.16-17). A seguir, ao preferir, “*até o momento*” (l. 18-19), a interpretação de Einstein do que a de Lorentz e Poincaré, afirma que não considera os fenômenos relativísticos como “físicamente reais” (l. 20-21). Baseia-se no seguinte critério de realidade: “*estou assumindo que um fenômeno para ser chamado de “real” não possa depender de como eu o vejo (em qual referencial estou), que é exatamente o caso da dilatação/contração que depende da velocidade do referencial em questão.*” (l. 22-25). Entretanto, imediatamente após, 113 leva a questão ao nível metateórico, afirmando que sua resposta depende na definição dada aos termos “físicamente real” e “realidade física”. Afirma que, se considerarmos como real aquilo que observamos no nosso próprio referencial, então será “*necessário (...) considerar a dilatação/contração como fenômenos reais*” (l. 30). Ou seja,

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

a rigor 113 não dá uma resposta definitiva à questão da realidade dos fenômenos relativísticos, pois ela dependeria do critério de realidade adotado.

Na resenha B, 113 opta pela interpretação positivista da TRE, utilizando, curiosamente, um critério de realidade oposto àquele utilizado na resenha B: “*não acredito que seja necessário considerar que uma grandeza seja “real” apenas quando esta seja invariante para todos os referenciais*” (l. 19-21). Na verdade, o estudante parece adotar neste texto um critério empírico de realidade: “*Com as ciências físicas são baseadas na observação, acredito que seja possível considerar espaço e tempo, separadamente, como grandezas “reais”, já que são estas observadas*” (l. 22-24). Esta atitude do estudante demonstrou o que ele mesmo indicou na resenha anterior: dependendo da escolha do critério de realidade que se faz, há diferentes conclusões sobre a realidade dos fenômenos relativísticos. Ainda nesta resenha, afirma que “*a ideia de algo ser “real” e “não observável” (pelo menos como um todo, no caso do espaço-tempo) ainda não é clara*” (l. 24-26), o que é condizente com sua tendência geral em permanecer nos quadrantes de Antirrealismo de Entidades.

No grupo focal, 113 questionou o uso do termo “verdade” pelos outros participantes, apelando por uma definição. A discussão em questão era o papel da matemática na física, e procurando expor seu ponto de vista, utiliza um exemplo: “*Tem que definir o que é verdade. Você pode pegar o exemplo da luz, que você mede a amplitude, base e tudo mais. Mas será que não existe informação que a gente ainda não consegue alcançar?*” (00:51:18). Este último questionamento pode exprimir, no limite, uma postura cética quanto à possibilidade do conhecimento científico (Realismo Epistemológico, uma faceta do Realismo de Teorias). Em seguida, explica: “*Por causa que, talvez, a gente ainda não tem uma linguagem adequada pra isso.*” (*idem*). O uso repetido da palavra “*ainda*” pode remeter a ideia de progresso, sendo que sua omissão daria outro sentido às frases: existe informação que não conseguimos alcançar, e não temos linguagem adequada para alcançá-la. Essas afirmações seriam condizentes com um Antirrealismo de Teorias. Porém, o uso da palavra “*ainda*” sugere outra interpretação: 113 tende a ser agnóstico quanto à possibilidade do atual conhecimento científico apreender a realidade. Ela é condizente tanto com a tendência geral de 113 de ir do Antirrealismo de Entidades ao Realismo de Teorias como com a posição do último ponto em seu diagrama (próximo à origem).

Uma frase de 113 enunciada no grupo focal é passível de análise:

(...) a partir do momento que eu começo a criar operações pra tentar entender a lógica do Universo, eu posso deixar uma de fora e eu não consigo medir talvez uma outra propriedade da luz, e eu não posso falar que a luz é luz (00:51:18, apêndice H).

5.6 Estudo e análise das concepções

Posto - É possível que existam outras propriedades da luz que *ainda* não conhecemos;

Pressuposto - As propriedades que atualmente “conhecemos” da luz (amplitude, comprimento de onda, base e outras) são de fato da luz;

Subentendido - Não temos garantia de que sabemos como realmente a natureza é completamente, de como as entidades e processos científicos *inobserváveis* são, ou se nossas teorias de fato são *verdadeiras* (se dizem tudo sobre as entidades e processos do mundo).

A atitude de 113 solicitar dos outros participantes do grupo focal uma definição de verdade refletiria a falta de garantia de que o conhecimento científico pode apreender todas as propriedades da realidade inobservável. Na conclusão da resenha B, 113 afirma que um “físico de profissão” pode utilizar tanto a interpretação positivista como a substantivista para descrever os fenômenos relativísticos, sendo o único cuidado necessário “*não misturar os conceitos de “realidade” entre as interpretações*” (l. 30-32, apêndice G), sugerindo que o “conceito de realidade” precisa ser minimamente “definido” (ou escolhido). A tendência filosófica de 113 pode ser comparada, até certo ponto, com a postura de Putnam e o Realismo Interno, no qual se define o conceito de “verdade” e “realidade” em função do esquema conceitual (interpretação) considerado.

5.6.3 Estudante 201

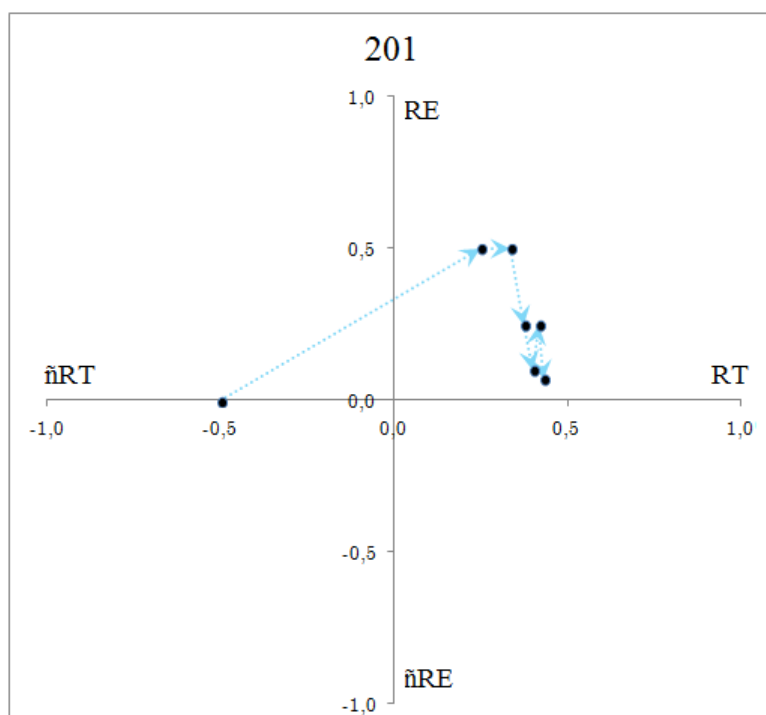


Figura 5.14: Diagrama do estudante 201, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

O estudante 201 fez as duas resenhas para as aulas A e B (ver resenhas 201 nos apêndices F e G), e teve participação intensa no grupo focal. Suas resenhas, contudo, careciam bastante de qualidade quando comparadas aos dos outros participantes, que em geral eram relativamente extensas e detalhadas. Seu diagrama mostra uma tendência clara ao quadrante de Realismos. Seu ponto final sugere um forte compromisso com o Realismo de Teorias, e um compromisso moderado com o Realismo de Entidades e Processos Inobserváveis. A partir do segundo ponto, sua tendência foi permanecer no primeiro quadrante, o que sugere ser um reflexo de uma “postura” relativamente estabelecida.

Em sua curta resenha A, 201 deixa claro sua crença na realidade física dos fenômenos relativísticos, usando como argumento que eles foram “*medidos com grande precisão*” (l. 5-6). Isto é, utiliza como critério de realidade a observação experimental, citando inclusive uma referência de uma corroboração experimental da TRE. Em seguida explicita seu entendimento da natureza desses fenômenos, afirmando que “*são decorrentes da interação dos corpos em movimento*”¹¹ com o espaço, pois essas propriedades (contração, dilatação) são na verdade pro-

¹¹A ausência do adjetivo “relativo” pode levar a uma compreensão conceitual errônea da TRE. Na correção da

5.6 Estudo e análise das concepções

priedades da geometria do espaço” (l. 8-11). Nota-se a menção explícita ao espaço, ou melhor, ao Espaço-tempo (de Minkowski, uma vez que se está no contexto da TRE). Argumentar utilizando de forma despreocupada uma entidade e suas propriedades, pode-se interpretar, é uma postura de realistas de entidades inobserváveis, o que está condizente com a tendência de 211 em seu diagrama.

Na resenha B, 201 declara sem delongas preferir a interpretação realista substantivista da TRE (l. 9-10). Ao justificar sua escolha, afirma que “*pensar que os fenômenos de contração e dilatação são propriedades do espaço é mais geral no sentido que se pensarmos em uma partícula e esta existe no espaço-tempo quando o e.t. [Espaço-tempo] se altera tudo que está nele, no caso, a partícula também se altera*” (l. 10-14). É notável que 201 argumenta contra a interpretação positivista utilizando a ideia de Espaço-tempo, reforça a suspeita de sua crença realista sobre esta entidade. Também argumenta que a interpretação substantivista leva a um “*entendimento melhor do formalismo 4-vetorial da RG [Relatividade Geral]*” (l. 16). A escolha de uma interpretação baseada em sua consistência conceitual e no melhor entendimento de uma teoria é próxima a alguns critérios transempíricos utilizados por realistas no dRAC, como a simplicidade (conceitual) e a consistência entre teorias. No trecho da resenha de 201 acima, fica subentendido que a interpretação positivista da TRE não seria consistente com a “*interpretação natural*” da TRG.

Como comentando anteriormente, 201 teve grande participação no grupo focal (cerca de cinquenta e sete falas). Uma primeira fala importante a se mencionar é aquela referente a sua reação ao quadro *L’atmosphère* (figura 5.7). Quando os participantes foram incentivados a argumentar se a mensagem contida no quadro seria uma metáfora aplicável também no contexto científico, 201 afirmou:

Você pode dizer que o avanço científico pode ser um cara que exploda todas as fronteiras, ou pode ser simplesmente o pessoal, na fronteira lá, empurrando, empurrando, empurrando até a hora que alguém passe (...) o número de cientistas só importa na rapidez com que isso vai acontecer. Quanto mais, mais rápido acontece. Se tiver pouco, vai demorar um pouquinho mais (00:13:28, apêndice H).

Um possível análise desta fala é:

Posto - O avanço científico é possível, podendo tardar mais ou menos para acontecer;

Pressuposto - O conhecimento científico é acumulativo e de fato se refere à realidade observável e inobservável;

resenha, assumiu-se que o estudante cometeu um deslize ao esquecer de esclarecer este ponto.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

Subentendido - O avanço científico (ou “*mudança de paradigma*” (00:11:14)) é ocasionalmente feito por grandes gênios (vide expressões “*pode ser um cara que exploda todas as fronteiras*”, “*até a hora que alguém passe*”), o progresso científico é linear e só depende do número de pessoas trabalhando na ciência (vide expressão “*Quanto mais, mais rápido acontece*”).

A concepção de 201 por vezes é bastante próxima a um Realismo ingênuo sobre a ciência. A ideia de avanço e progresso científicos, explícitas e subentendidas em sua fala, são condizentes com o Realismo de Teorias (o conhecimento científico não só é possível pelas teorias como é progressivo), sendo não raro utilizadas em defesa ao Realismo Científico. Em seguida à declaração acima, 201 afirmou, referente à existência de um limite à possibilidade do conhecimento científico, que: “*Que existe, sim eu acho que existe*” (*idem*). Contudo, minutos depois 201 aparentemente liga essa limitação a questões biológicas e cognitivas do ser humano, e não diretamente às teorias científicas ou à ciência (00:42:42 e 00:46:57).

Poucos instantes depois do quadro *La condition humaine* (5.8) ser mostrado ao grupo, 201 afirmou enfaticamente: “*É um quadro representando o que está fora da janela*” (00:20:40). Embora esta seja uma reação esperada à mensagem do quadro, é curioso notar a naturalidade com que se afirma sobre o que está atrás do quadro (ou, com o que é inobservável). Uma relação desta reação com sua tendência filosófica seria muito indireta. Por outro lado, minutos depois 201 muda de postura quando questionado se atrás do quadro na figura haveria realmente aquilo que estava pintado: “*Se você só pode ver o quadro você não tem como saber*” (00:23:07). Procurando contornar esse problema, sugere: “*Se você tiver alguma coisa, algum instrumento... por exemplo, você tem um periscópio, daí você o coloca o periscópio... e pode ver por cima, e daí você pode aferir*” (*idem*). Isto é, 201 usa a experimentação como critério de realidade de inobserváveis. Porém, na mesma fala afirma: “*eu particularmente acho que esse tipo de pergunta assim não é cabível, porque cada um vai interpretar de uma maneira certa. Não tem por que alguma ser preferencial que a outra*” (*idem*). Ou seja, nenhuma é preferencial a outra pois o critério de realidade adotado não é aplicável para inobserváveis diretos. Essa visão, tendenciosa a um agnosticismo quanto à entidades inobserváveis, não é muito condizente com a tendência de 201 em seu diagrama.

Na discussão sobre o papel da matemática na física, 201 afirma que as “*outras matemáticas*”, como as matemáticas indígenas, podem “*chegar no nível que a gente está*” (00:34:14). Ao tomar como exemplo uma matemática indígena fictícia de base 16, explica:

Eles vão conseguir chegar na mesma matemática que a gente. Os números vão dar um pouco estra-

5.6 Estudo e análise das concepções

nhos. Mas as contas vão ser as mesmas, eventualmente e tudo mais. (...) Então se elas cumprirem todas essas coisas [regras da nossa matemática], ela vai chegar no mesmo nível. Supondo que o nosso seja melhor. Da mesma forma, se uma outra civilização tiver uma matemática melhor e tiver certas regras, e a nossa matemática cumprir certas regras, dado tempo suficiente a gente vai chegar no nível deles (*idem*).

Em seguida, 201 conecta o desenvolvimento da matemática ao desenvolvimento da física, pelo fato da física usar aquela como linguagem. Uma possível análise do trecho acima é:

Posto - É possível que “outras matemáticas” e “outras físicas” alcancem a nossa matemática e a nossa física, dadas as condições para isso;

Pressuposto - A nossa matemática e a nossa física são superiores às “outras matemáticas” e “outras físicas” (vide expressão “*Supondo que o nosso seja melhor*”);

Subentendido - Existe uma “evolução natural” da matemática e da física, que são as ferramentas para descrever a realidade física, de forma que para seus desenvolvimentos basta um “*tempo suficiente*” e a adoção de um conjunto de regras.

Novamente estão implícitas as ideias de avanço e progresso linear científicos, que são a princípio condizentes com um Realismo (ingênuo) de Teorias, tendência presente no diagrama de 201. Poucos segundos depois admite que as “*interpretações [físicas] seriam outras. Alguém que tem uma base 16, por exemplo, talvez os números sejam todos estranhos, as constantes sejam loucas, talvez as coisas não caiam com r quadrado, mas sejam um número equivalente, mas seria tudo igual*” (00:35:31). O “tudo igual” poderia incluir as entidades e processos inobserváveis que, apesar de terem outras interpretações, seriam descritas com base em “constantes malucas” e leis matemáticas um pouco diferentes porém equivalentes. Essa visão por sua vez é próxima ao Realismo de Entidades e Processos, tendência também presente no diagrama de 201, embora de forma mais modesta. Questionado logo em seguida por 893 se essas diferentes interpretações descreveriam a “*mesma realidade*”, 201 responde afirmativamente, complementando que “*Não tem nenhum motivo para não ser. O resultado experimental vai ser o mesmo, só vai mudar os números*” (00:35:54). O fato de 201 afirmar de forma segura que os resultados seriam os mesmos reforça a hipótese de sua tendência realista de entidades e processos.

Por fim, na discussão sobre os “átomos atuais”, 201 afirmou que as cordas seriam “*o maior de todos*” (01:02:45), embora manifestou ter opinião contrária sobre o vácuo quântico (01:03:31). Por outro lado, poucos minutos depois afirma que as cordas “*é o que pode ser o que seria de verdade*” (01:04:43). Aparentemente, seu critério de realidade (experimental) o impede de afirmar a existência das cordas, o que não o distancia, porém, de uma postura rea-

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

lista (de teorias e de entidades) recorrente durante todo o grupo focal e característica notável na tendência apresentada em seu diagrama.

Como última parte da análise, comparamos a tendência apresentada no diagrama de 201 com a posição preenchida pelo próprio estudante em sala de aula (ver figura 5.15).

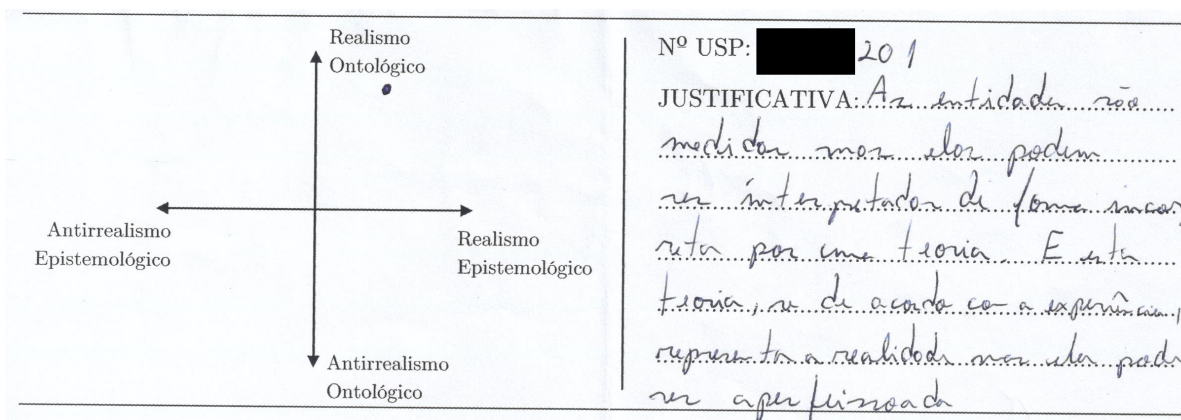


Figura 5.15: Diagrama de 201, segundo o próprio estudante.

Pode-se notar que 201 se colocou no quadrante Realista Epistemológico Ontológico, que corresponde ao quadrante Realismo de Teorias e de Entidades no diagrama, no qual se encontra os pontos finais de sua tendência filosófica. Essa correspondência pode ser entendida que 201 tem consciência e segurança de suas crenças filosóficas sobre o conhecimento científico. A descrição apresentada pelo estudante na filipeta apresenta coerência com o que escreveu nas resenhas e também com suas afirmações durante o grupo focal. Ao afirmar que “*As entidades são medidas*”, 201 está atribuindo realidade às entidades (observáveis e inobserváveis) com base no critério experimental. E para o estudante, uma teoria “*representa a realidade*” se está “*de acordo com a experiência*”, o que evidencia mais uma vez seu critério de realidade.

5.6.4 Estudante 581

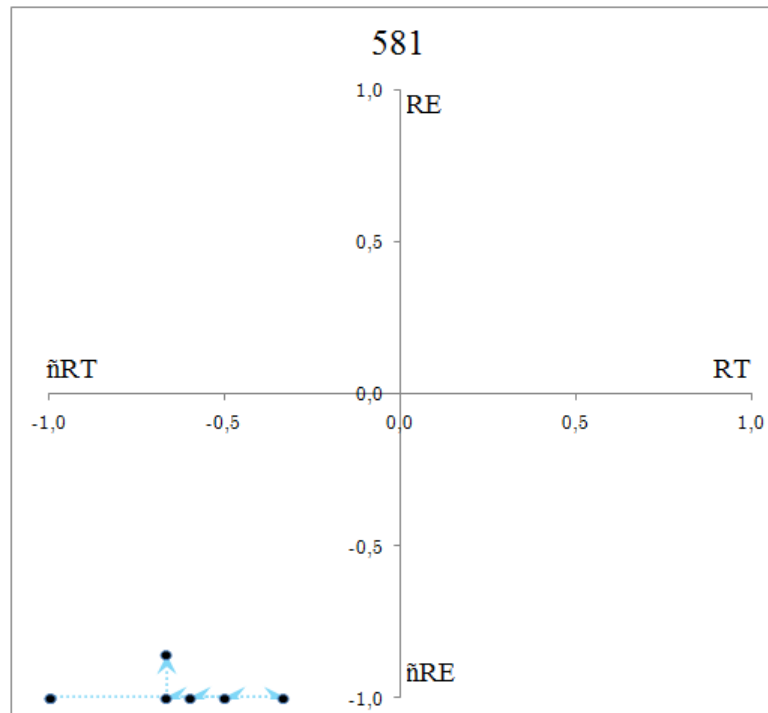


Figura 5.16: Diagrama do estudante 581, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

Diferentemente de todos os outros estudantes convidados para o grupo focal, 581 não fez as duas resenhas solicitadas. Como discutido anteriormente, a análise destas resenhas constituiu parte essencial para a análise das tendências filosóficas dos estudantes. Contudo, 581 apresentou um comportamento destacado em seu diagrama: todos os pontos estão no terceiro quadrante, o quadrante antirrealista de teorias e de entidades. Isto é, apresenta uma fortíssima tendência ao Antirrealismo de Entidades e ao Antirrealismo de Teorias. E, surpreendentemente, 581 assinalou uma posição muito próxima àquela correspondente das respostas ao questionário na filipeta entregue aos estudantes. Sendo assim, pela exclusividade deste comportamento em comparação a todos os outros diagramas obtidos, foi decidido que este estudante participaria do grupo focal. E felizmente sua participação foi muito ativa e enriquecedora ao debate, cerca de vinte e oito falas. Suas exposições pessoais sobre questões filosóficas foram claras (em geral, também mais soltas e por vezes descontraídas), o que facilitou muito na análise da transcrição de suas falas.

As afirmações de 581 no grupo focal foram em sua maioria bastante claras e objetivas, o que facilitou bastante o estudo de sua tendência filosófica. Uma primeira fala significativa

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

ocorreu quando 581 foi questionado sobre uma suposta limitação do acesso à realidade. Como comentado neste capítulo, a metáfora para essa limitação foi a abóbada celeste no quadro da figura 5.7. Sua resposta foi:

(...) acredito que exista sim um limite, mas não um limite estabelecido pela teoria, mas um limite físico da nossa capacidade de experimentar, compreender e até de imaginar. Por que a gente usa a matemática, o raciocínio lógico, mas nada assegura que o Universo funciona de forma lógica, ou da forma como a gente percebe. (...) Então nada implica em uma estrutura universal totalmente sujeita às leis da razão, que são nossa única ferramenta para raciocinar (00:17:44).

Fica claro nesta transcrição que 581 apresenta uma forte tendência ao antirrealismo de teorias, por ser cético à possibilidade do Universo (leis físicas) ser sujeito à razão. Trata-se de um argumento semelhante ao de muitos antirrealistas que defendem que o agnosticismo é a melhor postura às teorias científicas atuais, uma vez que não há certeza plena de que elas estarão equivocadas um dia (OKASHA, 2002, p.64). Por outro lado, 581 parece estar negando também o critério transempírico da simplicidade, utilizado por realistas no debate (*ibid.*, p.74).

581 apresentou durante todo o grupo focal opiniões filosóficas contrárias a boa parte dos estudantes presentes, em especial àqueles com tendências realistas como 942 e 201. Quando à afirmação deste último estudante de que atrás do quadro de Magritte (figura 5.8) deveria existir algo que é bastante bem representado pela imagem pintada, 581 contra-argumentou com ironia e ceticismo: “*Até onde se sabe pode estar o Alberto Caeiro rindo atrás ali em silêncio, e você não percebe*” (00:24:09). E logo em seguida, descreve o que entende como o “papel” das teorias científicas: “*eu acho que, no que esse quadro ajuda é a sua capacidade de prever. É isso que a teoria te oferece. Então, eu concordo, ali pode ter algo que não tem nada a ver com o quadro. Mas se, olhar para esse quadro te ajuda a prever, sei lá, se o dia está claro ou escuro, pra quem gosta de se vestir bem, então já tem alguma utilidade*” (*idem*).

Dar valor às teorias pela sua utilidade (“isso é o que elas oferecem”, e não uma suposta capacidade de dizer “o que está atrás do quadro de Magritte”) é uma postura próxima ao Instrumentalismo, uma das formas de Antirrealismo, o que está de acordo com a tendência apresentada no diagrama de 581.

Persistindo sobre o ceticismo sobre o que há atrás do quadro de Magritte, o estudante propõe um exemplo de teorias equivalentes empiricamente, com o intuito de mostrar que nestas situações somos incapazes de diferenciá-las ou escolher uma delas. É um argumento semelhante à tese de Duhem-Quine utilizado por antirrealistas (BARRA, 1998, p.19):

5.6 Estudo e análise das concepções

Pode não ter nada [atrás do quadro de Magritte]. Então se eu falo, a teoria de epiciclos de Aristóteles é horrível, por que os planetas não têm movimento retrógrado nem nada. Só que você consegue fazer previsões com a teoria dos epiciclos, e você consegue interpretar a teoria dos epiciclos. Você diz: cada ciclo maior é o primeiro harmônico de uma série de Fourier que aproxima a órbita. Cada epiciclo menor é o harmônico seguinte. Então é a lei de Newton, expandida em série de Fourier¹². Ou seja, o movimento é mais ou menos assim considerando mais ou menos precisão. Só que então vem Einstein e diz “não têm esses harmônicos, porque não existe essa força”. A diferença é que você não consegue diferenciar um do outro ontologicamente. Você não sabe se existe ação à distância ou se é curvatura do Espaço-tempo. O Einstein mesmo disse que a gente só consegue aceitar as teorias mais belas, no sentido de simplicidade. Mas não é porque as outras não sejam tão verdadeiras quanto. A gente consegue fazer contas com essa. Então porque o Universo seria tão simples quanto a gente consegue fazer contas? (00:24:09).

Uma possível análise de todo esse trecho é:

Posto - Teorias empiricamente equivalentes são indistinguíveis, e a escolha de teorias só é possível por fatores não epistêmicos como a simplicidade, o que não significa que sejam verdadeiras (tenha referência com objetos e processos inobserváveis no mundo). O valor das teorias está em sua utilidade (vide expressão “*a gente consegue fazer contas com essa*”). Nada garante que o Universo seja como pensamos que ele seja;

Pressuposto - A verificação experimental é o único processo de validação de uma teoria ou modelo, e também é o único critério aceitável na escolha de teorias;

Subentendido - O Espaço-tempo (como outras entidades e processos científicos inobserváveis) não é passível de verificação e, devido à equivalência empírica com outras teorias, não sabemos se de fato trata-se de uma entidade real na natureza (vide expressão “*você não sabe se existe ação à distância ou se é curvatura do Espaço-tempo*”).

A tendência antirrelista de teorias e entidades de 581 reflete-se também no preenchimento feito pelo próprio estudante ao diagrama:

A justificativa, embora pobre, mostra que a influência de 581 (Ernst Mach) é relativamente coerente com suas afirmações estudadas. Parte da postura filosófica de Mach foi discutida no capítulo 3, que é algo próxima ao Instrumentalismo de Entidades e ao Operacionalismo (Antirrealismo Epistemológico e Agnosticismo Ontológico).

¹²Zahar (1973a, p.102) menciona essa possibilidade em expandir a lei de Newton em termos de uma função harmônica. Comenta ainda que, ajustando os parâmetros dessa função, é possível descrever a precessão anômala do periélio de Mercúrio pela física newtoniana.

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

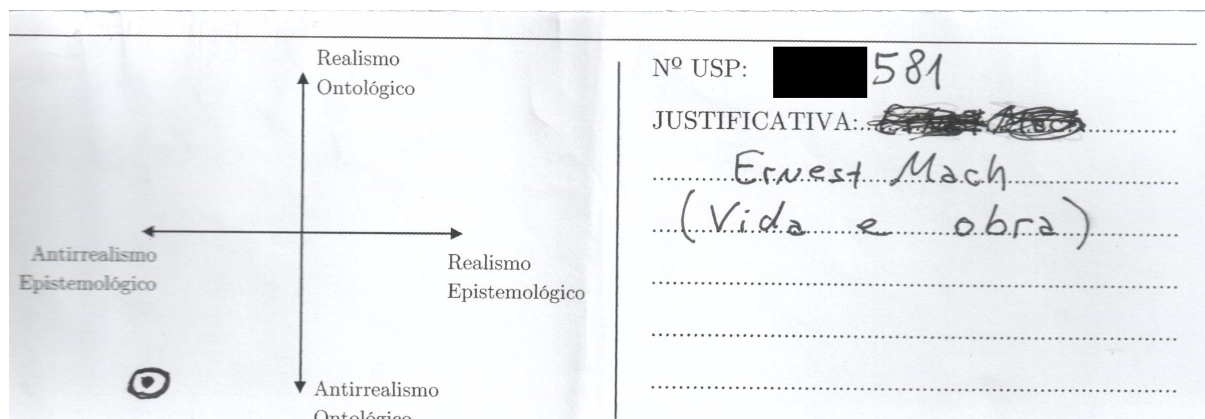


Figura 5.17: Diagrama de 581 segundo o próprio estudante.

5.6.5 Estudante 583

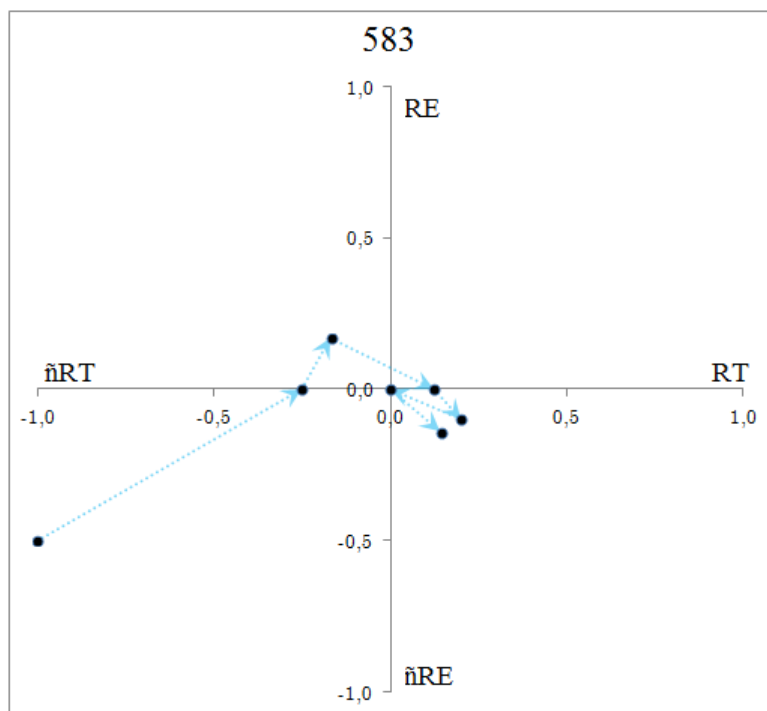


Figura 5.18: Diagrama do estudante 583, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

O estudante 583 fez as duas resenhas A e B (ver resenhas 583 nos apêndices F e G). Teve participação ativa no grupo focal, como cerca de doze falas. Seu diagrama sugere uma tendência explícita na direção positiva do eixo de Realismo de Teorias, enquanto sua tendência no eixo vertical foi oscilante, terminando em um quadrante antirrealista de entidades e processos. A análise das resenhas e das falas no grupo focal sugere que algumas crenças de 583 o aproximam

5.6 Estudo e análise das concepções

de um Realismo de Teorias, como mostra o diagrama de forma bastante modesta. Por outro lado, é possível em alguns pontos comparar a tendência filosófica de 583 ao Realismo Estrutural (WORRALL, 1994), postura que teria sido adotada por Poincaré.

O elemento mais importante na resenha A de 583 é a sua justificativa à realidade dos fenômenos relativísticos: “(...) *podemos analisar a contração e a dilatação como efeitos fisicamente reais, pois em princípio podem ser medidos, tornando-os reais*” (l. 24-27). Isto é, trata-se da experimentação como critério de realidade. Antes disso, 583 elabora uma metáfora onde o Universo é regido por um supercomputador “*externo à nossa realidade*” (l.19), no qual a velocidade da luz seria a máxima velocidade de processamento de informação, limite do qual decorreria todos os outros efeitos relativísticos.

Na resenha B, 583 argumenta de forma mais aberta e bem mais pessoal do que na resenha anterior. Levando em conta as principais características das interpretações destacadas da TRE, afirma: “*sou “obrigado” a me inclinar para a interpretação substantiva e tal se deve à maior proximidade desta com uma visão mais matematizada*” (l. 20-22). Curiosamente, embora tenha tomado esta decisão, 583 em nenhum momento a partir daí menciona “espaço-tempo”, muito menos defende sua existência. Sua principal justificativa à escolha prevalece até o fim da resenha B: a proximidade com uma visão matematizada, e não a crença na existência da entidade Espaço-tempo. É interessante comparar essa atitude de 583 com o comportamento dos pontos finais no seu diagrama, em especial no que se refere o eixo Antirrealismo de Entidades.

Embora tenha usado um critério de realidade experimentista para afirmar a realidade dos fenômenos relativísticos na resenha A, 583 na resenha B critica a forte necessidade da interpretação positivista da TRE em se basear em nossas experiências imediatas e nossa intuição: “(...) *vejo tal necessidade um tanto quanto limitada, pois me parece que tais interpretações julgam como sendo físico apenas as relações com a nossa experiência (cotidiana, talvez) e intuição*” (l. 27-31). A palavra “*intuição*” (e algumas de suas variações) é utilizada três vezes no mesmo parágrafo (l. 24, l. 27 e l. 31), todas com a intenção de mostrar os limites da interpretação positivista. Por criticar essas limitações desta interpretação, pode-se entender que 583 está defendendo que é preciso ir além da experiência imediata e da intuição comum, algo não raro sugerido por realistas científicos (ir além das aparências).

No último parágrafo da resenha B, 583 explora mais sua própria concepção filosófica acerca do conhecimento científico, trazendo afirmações profundas do ponto de vista filosófico:

(...) chegamos em um momento da física onde nossa nova “intuição” deve residir na matemática, e

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

dela tirarmos a noção de “realidade” e aspectos do mundo (...) Somos criaturas limitadas e precisamos depositar na matemática a nova maneira de ver a realidade (e abandonar as “esferas e molas”) escondida de nós (...) (l. 32-43).

Um possível análise de todo este trecho é:

Posto - O pensamento matemático deve preceder a intuição ordinária, o empirismo do cotidiano. A visão mecanicista (vide expressão “*abandonar as “esferas e molas”*”) deve dar lugar à visão matematizada da ciência;

Pressuposto - O pensamento matemático é realmente capaz de apreender aspectos da realidade;

Subentendido - Uma nova intuição da realidade física é possibilitada pelo pensamento matemático, que nos fornece, *por meio das teorias científicas, as relações matemáticas* (como as equações diferenciais) sobre os “aspectos do mundo”, seus objetos, entidades e processos inobserváveis (vide expressão “*nova maneira de ver a realidade (...) escondida de nós*”).

A proximidade com a matemática é declarada por 583 de forma explícita no grupo focal: “*eu gosto bastante dela, para falar a verdade, por isso talvez eu não seja muito imparcial quando for falar*” (00:48:46). Em seguida ao trecho acima, conclui a resenha afirmando que o “físico de profissão” deve escolher a interpretação substantivista, resposta que foi bastante rara nas resenhas. O apelo pela interpretação realista e pela visão matematizada da ciência é condizente com o Realismo de Teorias, tendência que 583 apresenta de forma modesta em seu diagrama.

Como comentado anteriormente, 583 teve participação ativa no grupo, e algumas de suas falas permitem análises interessantes sobre sua tendência filosófica ilustrada no diagrama. Entre elas, está suas considerações relativas à questão dos limites do conhecimento científico, metaforizada pela abóbada celeste na imagem *L’atmosphère* (figura 5.7).

O problema acho que é para definir essa abóbada. Falar: até aqui eu posso chegar. Se eu falar... que tem uma... que eu posso chegar até ela, então eu não vou poder atravessar. Se eu puder atravessar, então a que eu posso chegar está mais além. A questão é essa, se ela existe ou não. Se ela existir, então tem como passar (00:13:10).

Levando em conta o sentido da metáfora utilizada, uma possível análise deste trecho é:

Posto - Se existirem limites para o conhecimento científico, estes podem ser superados;

Pressuposto - O conhecimento científico sobre o mundo (observável e inobservável) é possível;

5.6 Estudo e análise das concepções

Subentendido - A ciência é fruto de um empreendimento progressivo e evolutivo (vide expressões “até aqui posso chegar”, “eu posso chegar até ela”, “a que eu posso chegar está mais além”). As teorias científicas cada vez mais apreendem a realidade, expandindo os horizontes científicos até algumas limitações (que podem ser superáveis).

O trecho destacado permite identificar um apelo ao Realismo Epistemológico (isto é, à possibilidade do conhecimento científico). A ideia de que há limites insuperáveis ao conhecimento científico é usada como argumento por outro integrante (581), ao qual 584 interroga enfaticamente: “Mas aí a minha pergunta: será que esse limite tem alguma coisa além dele?” (00:18:47). E alguns segundos mais tarde, ainda criticando esta ideia: “Vamos supor, a gente já sabe alguma coisa, e a gente nunca consegue passar dessa coisa. Só que aí eu vou afirmar: eu não consigo passar pela minha limitação? Ou, não consigo passar por que não tem como passar?” (00:18:55). À resposta de 581, de que não há como passar (“Por que o Universo é assim”), 583 questiona de forma irônica: “Por que acabou. É isso. E aí?” (00:19:13). Essa reação pode ser interpretada como uma reação ao cetiscismo epistemológico de 581, o que é condizente com a hipótese de 583 ter uma tendência ao Realismo de Teorias.

Outra interessante fala de 583 surgiu no momento em que todos discutiam o quadro de Magritte (figura 5.8) considerando a metáfora do quadro na pintura retratar algo inobservável (a paisagem atrás do quadro). Depois de concordar que diferentes teorias (isto é, teorias que partem de ontologias diferentes) podem ser equivalentes no domínio observável, 583 coloca:

Os resultados são os mesmos, aí que entra a realidade, se eu entendi o que está todo mundo falando aqui, eu acho. Aí mostrar que eu discordo parcialmente, que eu concordo é que a realidade está lá... Existe uma realidade e a realidade retorna isso. Agora, a realidade é o que está fora ali do quadro. Ali vamos dizer que é um experimento. Aí eu pego as condições de contorno da borda, faço igualzinho o que está ali e interpreto o meio. E aí eu falo que minha realidade é essa, e eu acho que é por causa disso. Aí o “eu acho que é por causa disso” cada um pode fazer a sua, contanto que estejam respeitando o que a realidade fala pra gente (00:29:23).

Neste trecho há elementos importantes que podem ajudar a entender a tendência de 583. Uma possível análise é:

Posto - É possível afirmar sobre a parte inobservável do mundo (o meio do quadro do quadro de Magritte), contanto que nós obedeçamos ao que a parte observável da realidade nos diz (vide expressão “contanto que estejam respeitando o que a realidade fala pra gente”);

Pressuposto - A observação da parte observável do mundo (fora do quadro do quadro de Magritte) é direta, sem intermédios, e não precisa ser *interpretada* como a parte inobservável

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

(vide expressão “*pego as condições de contorno da borda, faço igualzinho o que está ali e interpreto o meio*”);

Subentendido - A importância de se crer na realidade das entidades e processos inobserváveis científicos é secundária, sendo importante tomar como base o que a parte observável da realidade nos diz. A carga ontológica das teorias pode variar (vide expressão “*E aí eu falo que minha realidade é essa, e eu acho que é por causa disso. Aí o “eu acho que é por causa disso” cada um pode fazer a sua*”), as condições de contorno, por outro lado, são dadas (parte observável da realidade) e são mais fundamentais.

Interpretado desta maneira, esse trecho revela importantes traços da tendência filosófica de 583. O descompromisso (em termos de importância) com o que realmente está metaforicamente atrás do quadro de Magritte pode ser entendido como um descompromisso com a carga ontológica das teorias. Por outro lado, o apelo à visão matematizada, constante nas resenhas de 583 e em suas falas no grupo focal, pode ser entendido como algo que o aproxima a um Realismo de Teorias de uma forma peculiar. Em especial, as crenças filosóficas de 583 o colocam relativamente próximo à corrente conhecida como Realismo Estrutural. Como comentado no capítulo 3, essa forma de Realismo é caracterizada pelo comprometimento não com a “carga ontológica” das teorias (sendo portanto uma forma de Antirrealismo ou Agnosticismo de Entidades), mas sim às suas “estruturas matemáticas”, que parecem permanecer nos períodos de transição de ideias científicas (WORRALL, 1994). Poincaré seria um importante exemplo de realista estrutural.

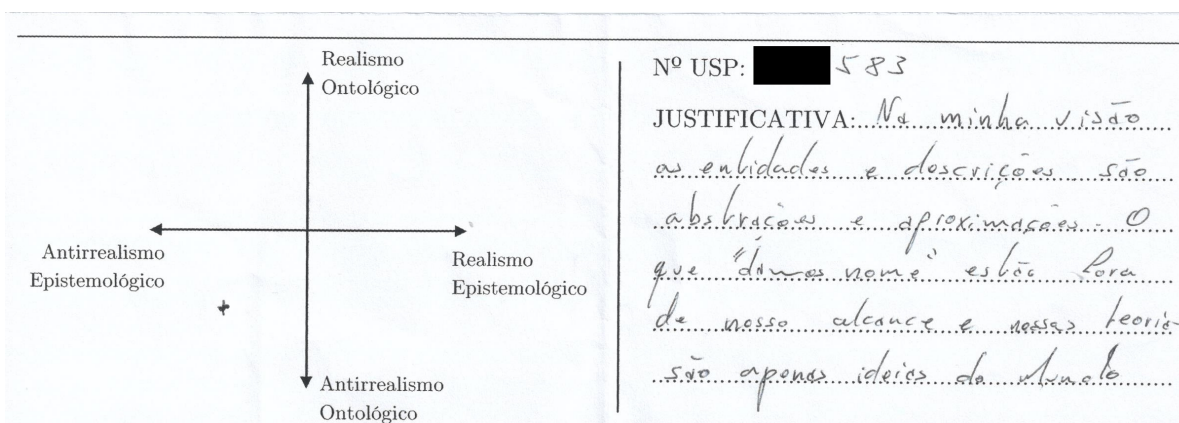


Figura 5.19: Diagrama de 583 segundo o próprio estudante.

Por fim, comparamos a tendência apresentada no diagrama de 583 com a posição preenchida pelo próprio estudante em sala de aula (ver figura 5.19). Como pode-se notar, as posições estão bastante diferentes, sendo que a tendência final no diagrama computado pelas respostas

5.6 Estudo e análise das concepções

ao questionário está sobre um quadrante diferente daquele escolhido pelo próprio estudante. Na justificativa, lemos: “*Na minha visão as entidades e descrições são abstrações e aproximações. O que “damos nome” estão fora de nosso alcance e nossas teorias são apenas ideias do mundo*”. O uso da palavra “aproximações” na primeira oração remete quase imediatamente à indagação: aproximação a o quê? No contexto de um Realismo Epistemológico, essa palavra faria sentido, uma vez que pressupõe-se que não só conhecimento do mundo é possível como ele se “aproxima” à realidade. Desta forma, podemos entender que o estudante se contradisse ao assinalar-se como antirrealista epistemológico ao mesmo tempo que afirma que as teorias são ideias (descrições) ou aproximações do mundo (o conhecimento é possível, ainda que por aproximações). Na segunda oração, sua afirmação sobre a realidade das entidades é condizente com a tendência apresentada em seu diagrama: as entidades inobserváveis estão “*fora do nosso alcance*”, são em última instância “*abstrações*”.

5.6.6 Estudante 872

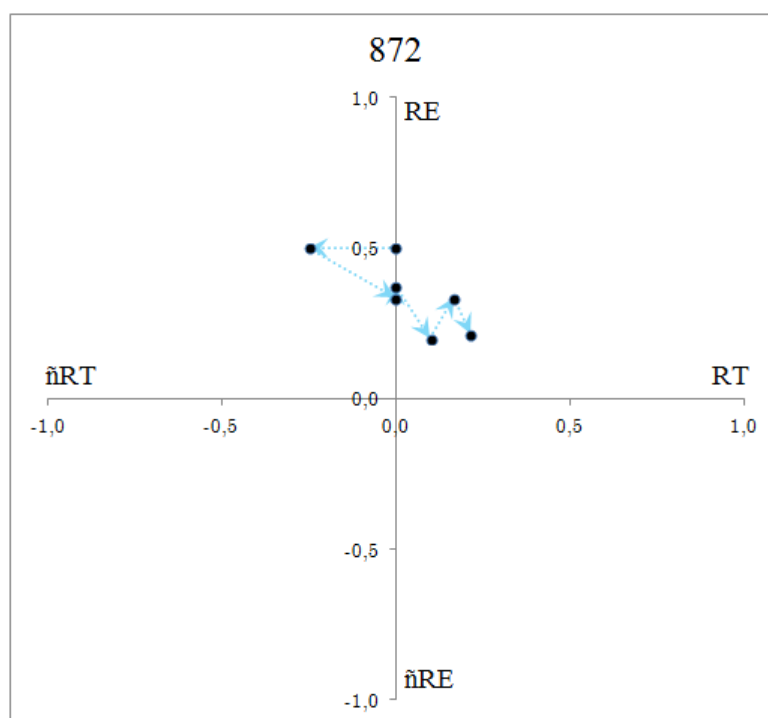


Figura 5.20: Diagrama do estudante 872, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

O estudante fez ambas as resenhas das aulas A e B (ver resenhas 872 nos apêndices F e G), e teve participação modesta no grupo focal (onze falas registradas). Infelizmente, suas falas no

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

encontro foram em sua maioria, comentários gerais, sem muita exposição (filosófica) pessoal, o que dificultou a análise da transcrição. Apresentou em alguns momentos comportamento oscilante no diagrama em ambos os eixos, tendo seu ponto final no quadrante realista (de teorias e de entidades). Nas resenhas 872 se mostrou em alguns momentos inseguro em tomar partido de uma ou outra postura filosófica, apresentando, contudo, tendências em direção aos realismos (de teoria e de entidades). Essa característica impossibilitou uma análise mais profunda das concepções filosóficas de 872.

Ao ser questionado sobre a realidade dos fenômenos relativísticos na resenha A, 872 discursa sobre as formas de concebermos a realidade, e afirma que para ele “*é construída a partir de nossas experiências, sejam elas vivenciais ou intelectuais*” (l. 31-32). Afirma em seguida que os *conceitos* de espaço e tempo, “*como os concebemos, são também construídos no contexto de tais experiências [vivencias ou intelectuais]*” (l. 32-33). Essa afirmação poderia ser interpretada como 872 explicitando que seu critério de realidade é a experiência, porém, essa hipótese é enfraquecida com a análise da resenha B.

Sem ainda responder de forma categórica sobre a questão, 872 indaga ao final do penúltimo parágrafo da resenha A: “*Existem experimentos sobre decaimento de múons que comprovam a dilatação temporal, mas será este efeito real ou é um resultado que está inserido e constituído dentro de um paradigma relativístico?*” (l. 44-46). A oposição feita ao fim (“efeito real” × “paradigma relativístico”) sugere que 873 considera possível que a aceitação atual sobre a TRE resume-se em um “fenômeno paradigmático” no sentido de Kuhn, o que significa que não necessariamente a teoria tem correspondência com a realidade¹³.

No último parágrafo da resenha A, 873 arrisca ser um pouco mais pessoal:

Deixo minha posição como suspensa e esclareço acreditar nas aplicabilidades da teoria da Relatividade Especial, mas não consigo conceber nenhuma relação dela com a realidade física propriamente dita (...) (l. 47-49).

Uma possível análise deste trecho é:

Posto - A teoria possui aplicabilidade (por exemplo, explicação sobre o fenômeno de decaimento de múons), isto é, se mostra eficiente ou útil à compreensão de fenômenos não explicáveis com teorias anteriores;

¹³Lembrar que Kuhn (1970, p.253), chamou de “ilusória por princípio” a suposta correspondência entre a ontologia de uma teoria e sua contrapartida ‘real’ na natureza.

5.6 Estudo e análise das concepções

Pressuposto - As confirmações experimentais da teoria são suficientes para atribuir a ela aplicabilidade e confiança (vide expressão “*esclareço acreditar*”);

Subentendido - A confiança e aplicabilidade atribuídas à teoria não são suficientes para afirmarmos com segurança a realidade dos fenômenos relativísticos, pois a realidade que concebemos experiencialmente em geral está fora dos regimes relativísticos.

873 coloca uma interessante questão nas últimas linhas da resenha A: “(...) *supondo que as experiências vivenciais de nós, que concebemos a realidade, estivessem submetidas aos regimes relativísticos, a conceberíamos de uma forma diferente?*” (l. 50-51). Ao por esta questão o estudante poderia estar reforçando a sua afirmação de que não vê relação entre a TRE e a realidade física: se fossemos seres “acostumados” às altas velocidades relativas, talvez nós poderíamos conceber a realidade de forma diferente, e o “problema” (filosófico) da realidade dos fenômenos relativísticos poderia deixar de ser um problema.

Na resenha B, na qual se exige um posicionamento mais explícito quanto à questão das interpretações da TRE, 873 se expõe de forma mais aberta, argumentando contra a interpretação positivista, “*devido a sua dependência extrema com o mensurável*” (l. 12), e a favor da interpretação substantivista. Contudo, é cauteloso neste último ponto, evidenciando fragilidades também na interpretação realista, “*pois concede a liberdade intelectual de abordar a natureza sem necessariamente mensurá-la, o que cria uma grande possibilidade de transcender conhecimentos*” (l. 19-21). Isto é, embora 873 prefira uma interpretação realista, mostra-se ponderado, sem ao final defender uma posição realista com mais vigor. A escolha do estudante pela interpretação substantivista do Espaço-tempo é coerente com a tendência final em seu diagrama, no quadrante dos realismos.

Embora aponte a interpretação substantivista com a qual se sente “*mais confortável*” (l. 18), 873 argumenta ao final da resenha B que “*a dinâmica científica necessita de ambas as interpretações*” (l. 22), e que um “*Físico de profissão não deva aderir, em seus extremos, nem uma, nem a outra interpretação*” (l. 27-28). Isso é condizente com a postura ponderada de 873 na resenha anterior acerca da realidade dos fenômenos relativísticos, e também com a tendência realista “modesta” apresentada no diagrama. Esse tipo de comportamento (posicionamento inseguro e não muito delimitado) foi recorrente entre os estudantes, tendo sido o tipo mais comum.

5.6.7 Estudante 893

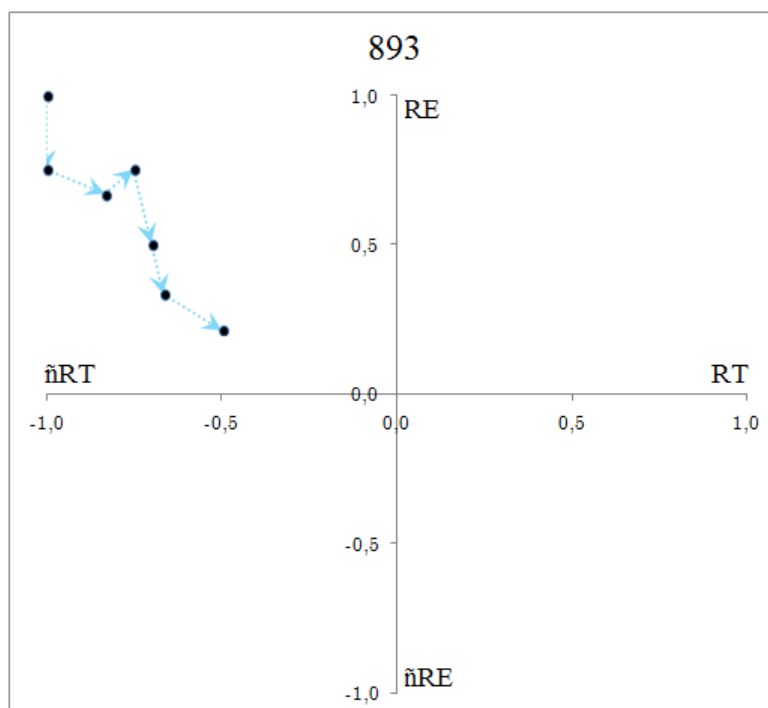


Figura 5.21: Diagrama do estudante 893, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

O estudante 893 fez as duas resenhas A e B (ver resenhas 893 nos apêndices F e G). Teve uma participação mínima no grupo focal, com menos de cinco falas. Contudo, em suas exposições expressou bem sua própria concepção filosófica sobre os assuntos debatidos. Além disso, em primeira análise esta sua postura explicitada no grupo focal é condizente com suas argumentações nas resenhas e também com a tendência apresentada no diagrama. As respostas de 893 ao questionário fizeram com que seus pontos no diagrama permanecessem sempre em um mesmo quadrante (Realismo de Entidades e Antirrealismo de Teorias), o que é uma característica bem notável quando comparado aos outros diagramas estudados.

Em ambas as resenhas, 893 se detém bastante nos textos base, deixando suas impressões pessoais para os últimos parágrafos, nos quais se expõe com afirmações seguras. Na resenha A, após explicar detalhadamente as principais diferenças entre as teorias de Einstein e de Lorentz-Poincaré, 893 afirma, concluindo: “*acredito que os efeitos relativísticos não sejam “físicamente reais”, mas sim relativos e dependentes do referencial no qual se encontra o observador (...)*” (l. 66-68). Isto é, trata-se de uma postura próxima à interpretação operacionalista de Einstein em 1905, que podemos interpretar com um Antirrealismo (Epistemológico) de Teorias. A pre-

5.6 Estudo e análise das concepções

ferência por esta interpretação é declarada explicitamente pelo estudante na resenha B. Desta maneira, a afirmação anterior de 893 é coerente com a tendência apresentada em seu diagrama.

O complemento de 893 à afirmação sobre a realidade dos fenômenos relativísticos merece análise própria:

(...) tomando como base que o conhecimento humano, que é construído, nunca se dá de forma direta como o mundo, mas é mediado através de signos e símbolos e, portanto, uma abstração do “real”, bem como admitindo que o éter não existe (l. 68-70).

Uma possível análise deste trecho, levando em conta também a afirmação que a precede, é:

Posto - O conhecimento científico (que é conhecimento humano) não é construído através de uma relação direta com o mundo, mas sempre intermediado com algum tipo de linguagem (vide expressão “*mediado através de signos e símbolos*”);

Pressuposto - O fato de não existir acesso direto à realidade não impede a crença ou descrença sobre entidades científicas inobserváveis (vide expressão “*bem como admitindo que o éter não existe*”);

Subentendido - As teorias científicas e suas entidades não necessariamente se referem à realidade física, sendo antes abstrações daquilo que chamamos de “real”.

Da hipótese da inacessibilidade direta à realidade, 893 conclui portanto que o conhecimento científico é uma “abstração do real”. Essa posição é retomada no início da resenha B: “*Uma teoria física nunca está sujeita a uma única interpretação, principalmente no que diz respeito aos seus aspectos históricos e filosóficos. Isto porque as formas de pensar e construir conhecimento são típicos de cada ser humano, este inserido em um contexto social e histórico-social*” (l. 1-4). Na última frase, 893 demonstra que, em sua concepção, uma teoria física deve mais ao contexto em que foi construída do que seu comprometimento ou correspondência à realidade física. Essa postura é coerente com a tendência apresentada em seu diagrama, no qual todos os pontos ficaram no quadrante referente ao Antirrealismo de Teorias, que carrega (conforme definimos) o Antirrealismo Epistemológico e Axiológico.

Na conclusão da resenha B, 893 expõe ainda mais um pouco suas concepções filosóficas. Questionado sobre qual interpretação um físico de profissões deveria adotar, o estudante afirma que ele deve “*inescrepulosamente e oportunisticamente como Einstein, diversas posturas filosóficas ao longo de sua carreira, visto que tanto as ideias e paradigmas da física quanto suas próprias ideias se transformam continuamente, portanto talvez seja necessário de tempos em tempos adotar a postura que mais lhe seja conveniente*” (l. 73-77). A menção ao termo “paradigma”

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

remeteria ao sentido kuhniano, contudo 893 não esclareceu esse ponto. De qualquer forma, a análise feita até então de suas tendências filosóficas levam de fato a uma proximidade com essa concepção das ideias de Kuhn, a qual classificamos anteriormente de Antirrealismo de Teorias. Em seguida, 893 afirma ser mais simpático “*com a interpretação operacionalista*”, por estar mais diretamente ligada ao seu “*mundo perceptível tridimensional*” (1.78-79), que é caracterizado como “*mais acessível, compreensível e dotado de mais sentido do que o apresentado pela interpretação substantivista*” (1. 80). Mais uma vez, 893 se expressa de uma forma coerente com a tendência apresentada em seu diagrama, sobre o eixo referente ao Antirrealismo de Teorias.

Embora tenha falado poucas vezes durante todo o grupo focal, 893 nestas poucas oportunidades se expressou de forma bastante pessoal suas concepções filosóficas. Uma das primeiras ocorreu cerca de vinte minutos depois do início do debate. Assim que foi mostrado a figura com o quadro de Magritte (figura 5.8), 893 afirmou, procurando responder o que poderia ser interpretado da figura para o debate em questão: “*Para entender que realidade e representação se fundem (...)*” (00:20:59). Isto é, o mundo (o que está atrás do quadro de Magritte) é o que a representação (quadro de Magritte, metáfora das teorias científicas) nos diz que ele é. Trata-se de uma concepção próxima ao Realismo Interno de Putnam e também às tradições filosóficas construídas com base nos trabalhos de Kuhn, Hanson e outros, pautadas na tese da observação dependente de teorias. Estas são entendidas como formas de Antirrealismo de Teorias, uma vez que o mundo é inacessível e que seu conhecimento não se dá de forma “pura”, isto é, as teorias não necessariamente tem correspondência com as estruturas inobserváveis da realidade física.

A menção mais interessante e importante de 893 aconteceu depois de trinta minutos do início do grupo focal:

Acho que cabe diferenciar a realidade com “r” minúsculo e a realidade com “R” maiúsculo. Em que a realidade com “R” maiúsculo seria aquela realidade que, vamos dizer assim, que está lá. E com “r” minúsculo aquela que a gente interpreta. Então, acho que dado o que vocês falam sobre as limitações tecnológicas, teóricas e experimentais, a gente têm um acesso à realidade com “R” maiúsculo até um certo limite. Na verdade, pra mim, não passa de uma série de interpretações que a gente faz do mundo (00:30:35).

Em seguida 893 é questionado por 581 se a realidade “r” está tendendo para a realidade “R”, e responde:

Não. Eu não estou preocupado se está tendendo ou não. Eu acho que, no final, vai ser sempre uma interpretação. (...) Ela [realidade “r”] pode fazer muitas coisas com essas interpretações, elas podem

5.6 Estudo e análise das concepções

ser as mais próximas possíveis, mas não necessariamente ela vai ser a mesma [que a realidade “R”]
(00:30:43).

O uso das expressões “r minúsculo” e “R maiúsculo” pode ter sido inspirado nos primeiros slides da aula sobre história TRE, nos quais, em uma discussão introdutória sobre historiografia, foram distinguidos a *história* e a *História* (ver figura 5.6 e apêndice C). Em conformidade como uma advertência no início deste capítulo, esse é um exemplo de que não podemos considerar o diagrama como um “diagnóstico verdadeiro” da “postura filosófica” dos estudantes, uma vez que não podemos desconsiderar que debates, textos e outros elementos podem ter influenciado fortemente os estudantes durante a aplicação da pesquisa.

Uma possível análise das transcrições das falas de 893 expostas acima é:

Posto - A realidade “R” não é diretamente acessível, a realidade “r” que temos acesso não corresponde a R necessariamente;

Pressuposto - Os cientistas não compartilham uma mesma realidade “r”, o que da margem a diferentes interpretações e visões de mundo;

Subentendido - Embora exista a realidade “R”, o que inclui um possível conjunto de entidades e processos inobserváveis, nada garante que as teorias científicas (interpretações dentro de “r”) não correspondam à realidade (“R”), tampouco que estão se aproximando dela.

Embora acredite que a realidade “R” “*está lá*”, o que pode incluir entidades e processos inobserváveis, 893 acredita que ela é até certo limite inacessível, e mesmo dentro deste limite, o que temos em mãos são apenas interpretações, que compõem realidade “r” (e não uma descrição fidedigna da realidade “R”), que estão sujeitas a mudanças de paradigma. Por isso a realidade para a ciência seria o que as teorias científicas nos dizem (“*realidade e representação se fundem*”), e não o contrário, como defendem realistas de teorias. Sobre essa óptica, as análises das transcrições e das resenhas de 893 mostram concordância com a tendência apresentada em seu diagrama.

5.6.8 Estudante 942

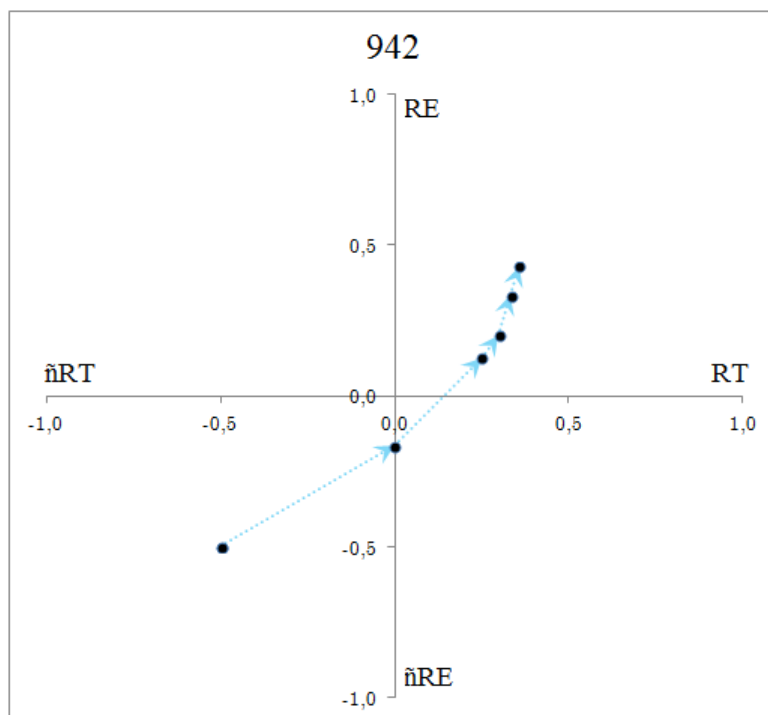


Figura 5.22: Diagrama do estudante 942, construído com base em suas catorze respostas ao questionário.

O estudante 942, como grande maioria dos colegas convidados ao grupo focal, fez as duas resenhas A e B (ver resenhas 942 nos apêndices F e G). Teve participação ativa no grupo focal, com falas bem articuladas e profundas do ponto de vista filosófico. Suas resenhas são muito bem detalhadas, o estudante se expressa de forma clara e compreensível ao longo do texto. Seu diagrama mostra uma tendência curiosa do ponto de vista analítico e também visual: uma “exponencial” convergindo ao quadrante dos realismos (de teorias e de entidades). As concepções de 942 nos diferentes materiais são em geral bastante coerentes entre si, e mostram um estudante convicto em uma visão científica realista. Isso é confirmado pelo diagrama preenchido pelo próprio estudante, no qual ele se colocou no primeiro quadrante no ponto máximo referente ao Realismo de Entidades e Realismo de Teorias (ver figura 5.23).

Na resenha A, ao esclarecer as diferenças entre as teorias de Einstein e Lorentz-Poincaré, 942 revela uma opinião de interesse à análise de sua tendência filosófica: “(...) *o que Einstein faz é se utilizar de dois postulados, como princípios fundamentais da natureza, se baseando numa postura epistemológica distinta da de Poincaré, de que os objetos físicos não observáveis podem ser excluídos da Física, postura que Martins chama de “empirista ou positivista”* - o

5.6 Estudo e análise das concepções

que particularmente não me agrada, uma vez que com isso descobri que sou positivista” (l. 13-17, grifos nossos). O fato de não agradar 942 se descobrir positivista pode revelar, por sua vez, que o estudante não se classificaria assim em outras circunstâncias. Isto é, que ele não se acha positivista, sendo que somente “se percebeu” assim em razão da classificação feita pelo autor do texto base¹⁴. De fato, 942 assim entendeu a questão pelo fato de não acreditar no éter, e não por desconsiderar entidades inobserváveis, como ficará claro na análise da resenha B.

Como conclusão da resenha A, 942 afirma estar “*em pleno acordo com Einstein nos seus artigos de 1905*” (l. 63-64) a respeito dos fenômenos relativísticos ao acreditar que “*uma entidade qualquer, se não for observável e se não trouxer quaisquer consequências diretas à interpretação de resultados experimentais, como era o caso do éter, pode ser considerada em uma teoria tanto quanto pode ser desprezada*” (l. 64-66). Aparentemente, 942 entendeu que o questionamento acerca da realidade dos fenômenos relativísticos implicava necessariamente a questão da realidade do éter, o que dá uma explicação razoável para sua forte aderência à interpretação de Einstein. A rigor, não respondeu diretamente a questão, e preferiu argumentar contra o éter enquanto objeto causador dos fenômenos relativísticos. Afirmou este ser “*irrelevante*” mas “*não necessariamente inexistente*” (l. 70), e que por simplicidade deve ser desconsiderado.

A resenha B de 942 foi uma das mais longas resenhas entregue pelos estudantes naquela ocasião. No texto, 942 procura esclarecer qual a sua visão filosófica sobre a questão da realidade do Espaço-tempo. De início, revela que concorda com a interpretação positivista, “*de que a realidade é aquilo que o observador, seja ela qual for, é capaz de ver e medir, de modo que tudo aquilo que não somos capazes de observar diretamente, como era o caso do éter visto na última aula, pode ser ignorado por não trazer qualquer dado relevante sobre nossa realidade*” (l. 66-70). Nitidamente o estudante utiliza o princípio da simplicidade, bastante comum nas defesas do Realismo Científico, para desconsiderar o éter. No entanto, afirma em seguida que, com o tempo, a matematização da teoria pode sugerir outra visão, algo relacionado a alguma “*parte da Natureza íntima do Universo*” (l. 74), que transcenda (embora não abandone) os “*problemas operacionais que originaram essa epopeia*” (l. 75), trazendo novos problemas e conceitos. Revela que este é o seu entendimento “*da evolução de uma teoria física*” (l. 77).

Dividido entre a interpretação operacionalista e a interpretação substantivista do Espaço-tempo, 942 argumenta: “*o Universo é aquilo que vemos dele: se uma teoria (ou uma concepção coerente de uma) nos apresenta o mundo de um modo, acredito que possamos dizer*

¹⁴A título de informação, trata-se do texto de Martins (2012b).

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

que o mundo é aquilo; a Natureza é aquilo que vemos dela, mantendo grandezas inobserváveis de fora, mas considerando que aquilo que interpretações substantivas [substantivistas] nos apresentam são elementos da realidade” (l. 88-92). Essa resposta, que inicia-se próxima ao positivismo (negando o éter) e termina no realismo (afirmando o Espaço-tempo), é similar ao entendimento do estudante da evolução de uma teoria física. Curiosamente, essa evolução (do operacionalismo positivista avesso às entidades inobserváveis até abstração realismo teórico-matemático de inobserváveis) é algo que parece se refletir no diagrama de 942, no qual a tendência filosófica se inicia no quadrante dos antirrealismos e converge no quadrante dos realismos. Complementando, em seguida 942 afirma que “na medida que caminhamos para interpretações substantivistas, nossa visão de mundo caminha e não ficamos mais tão presos a antigas questões operacionais (...)” (l. 98-100).

Neste mesmo parágrafo, o estudante afirma:

Dando a Relatividade Especial novamente como exemplo, podemos abandonar o éter porque ele é inobservável e irrelevante portanto para a construção de um teoria coerente com o experimento; por outro lado, essa nova teoria nos leva ao conceito de Espaço de Minkowski, não diretamente observável, que, sendo parte de um conjunto de descrições do mundo verificáveis e coerentes, pode ser entendido como realidade (l. 93-98).

Uma possível análise é:

Posto - O conceito do Espaço-tempo é “verificado” indiretamente e pode ser entendido como realidade, mesmo sendo diretamente inobservável (como o éter);

Pressuposto - As verificações experimentais da teoria e sua coerência interna permitem-nos (ver uso da palavra “*pode*”, dando sentido de conclusão) afirmar que suas entidades e processos inobserváveis são reais;

Subentendido - A TRE diz de fato sobre a realidade física, a teoria têm correspondência com a realidade, o Espaço-tempo de Minkowski não é somente um conceito teórico e sim uma entidade real da natureza.

Como já foi adiantado, a participação de 942 no grupo focal foi intensa e bastante rica. Uma das primeiras exposições bastante profundas feitas pelo estudante ocorreu antes da metade do debate, com as discussões motivadas pelos quadros de Magritte (figura 5.8) e da gravura em madeira (figura 5.7):

A descrição do Universo que a gente tenha, desde que ela seja experimentalmente verificável, tenha uma boa precisão... eu entendo que aquilo nos diz: o Universo é assim. Se eu tenho uma teoria,

5.6 Estudo e análise das concepções

muito bem verificada experimentalmente, que me diz, que a presença de uma massa no espaço produz uma curvatura no espaço tempo, no sentido que aquilo vai alterar a métrica... uma matriz identidade para algo diferente, então, eu não vejo isso como só uma teoria (...) Não, eu entendo que o Universo é assim. Se aquela equação, que é verificada experimentalmente, está me dizendo isso... ela está me dizendo que o Universo é dessa forma, com tanta precisão quanto eu conseguir verificar essa validade experimental (...) O que quadro [de Magritte] está me dizendo é que (...) por trás dele, se eu pudesse ver só a janela, eu viria isso (...) O quadro é, e sempre vai ser, uma aproximação, tão boa quanto a competência do pintor, do que está atrás dele. Mas como tudo que eu vejo é o quadro, eu digo: o Universo é assim, ou a minha descrição tende assintoticamente para a realidade inatingível (00:25:31).

A tendência realista de 942 mostra-se explícita nesta transcrição, principalmente pela repetição da expressão “*o Universo é assim*”, isto é, o Universo é aquilo que é de acordo com nossas melhores teorias (Teorias da Relatividade). A expressão utilizada ao final da transcrição, “*minha descrição tende assintoticamente para a realidade inatingível*”, reflete uma das características centrais do Realismo Epistemológico Convergente. Além disso, é curioso notar a importância dada à verificação experimental pelas suas repetidas menções (“*experimentalmente verificável*”, “*boa precisão*”, “*bem verificada experimentalmente*”, “*verificar essa validade experimental*”). A tendência realista de 942, ao mesmo tempo que não abandona critérios da interpretação positivista, defende a realidade de entidades decorrentes da TRE que são diretamente inobserváveis usando a verificação da teoria como argumento de base. A segurança em afirmar que na imagem de Magritte (a metáfora da ciência enquanto representação) há de fato a paisagem por trás do quadro, e que o pintor (ciência) a pinta tão fielmente quanto for sua competência (descrição assintótica), faz mais sentido dentro de uma concepção realista da ciência.

Outra fala significativa do ponto de vista filosófica de 942 ocorreu cerca de dez minutos da transcrição acima. O novo elemento introduzido ao debate desta vez referia-se à possibilidade de outras civilizações, como outras formas de pensar, chegarem à mesma matemática e à mesma física que atualmente temos. Motivado em partes pelo exemplo de 581 sobre a equivalência empírica entre a teoria de epiciclos e a gravitação relativística, 942 argumentou:

Eu entendo que a gente está tentando demonstrar aqui o teorema da existência e unicidade da realidade. Eu discordo completa e absolutamente do que o (893) falou, logo agora, quando ele faz uma divisão entre a realidade que a gente percebe e uma realidade transcendental, verdadeira, inatingível ou atingível (...). Eu estou dizendo o seguinte, quando eu falo que o que você diz que o mundo é, é o que de fato o mundo é. Por que dizer que o mundo é qualquer coisa que não aquilo, é afastado de nós, imperceptível e portanto inútil. E aí quando o (581) fala aquela história de outro modelo para

Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo

a gravitação, a minha primeira teimosia é dizer que em algum ponto essas teorias devem convergir para a mesma coisa, devem ser um desdobramento... Enfim, de uma pode se chegar na outra, o que eu entendo é que realidade é o que gente vê (00:36:03).

A discordância de 942 com 893 ajuda a entender algumas diferenças de concepções filosóficas entre esses dois estudantes. Como discutido anteriormente, 893 (que permaneceu no quadrante Realismo de Entidades e Antirrealismo de Teorias) “funde” representação e mundo, argumentando que nunca temos acesso não mediado com a realidade de “R” maiúsculo. Já 942, ao mesmo tempo que discorda desta tese, afirma que “o mundo é o que vemos dele”. Enquanto que para 893 as teorias *ditam* o que vemos na realidade “r”, para 942 as teorias *dizem* o que vemos na realidade que temos acessível. Por essa razão 893 argumenta que sempre temos interpretações da realidade (sendo que as teorias não necessariamente tem relação com ela), enquanto 942 argumenta que o Universo *é* o que vemos dele (as teorias estão dizendo “*de fato*” o que o Universo é). Esse conflito mostra algumas das diferenças entre as crenças de um realista de teorias e de um antirrealista de teorias.

A “teimosia” de 942 em aceitar a equivalência matemática e empírica defendida por 581 entre a teoria de epiciclos e a gravitação relativística pode ser entendida como uma “reação realista”. Aceitar essa equivalência pode implicar no abandono do argumento da inferência da melhor explicação, um dos principais e mais caros argumentos aos realistas científicos. O anseio de que as teorias equivalentes convirjam “*para a mesma coisa*” reflete exatamente um dos anseios realistas discutidos no capítulo 3, de que teorias equivalentes eventualmente se reduzem uma a outra (RIBEIRO, 2009, p.22).

Posteriormente, na discussão sobre o papel da matemática na física, 942 admitiu existir um limite humano para a apreensão ou conhecimento do mundo. Contudo, não trata-se diretamente de uma limitação nas teorias científicas (como 581 também argumentou), mas sim no próprio ser humano: “*Nossa intuição não se desenvolveu pra pensar partícula e onda [refere-se a dualidade onda-partícula], se desenvolveu pra fugir de mamute. Então, exatamente, a gente uma limitação aí*” (00:47:02). Contudo, diferentemente de 581 que é cético quanto a possibilidade do conhecimento sobre o mundo, o discurso de 942 parece sugerir que, para ele, se não fôssemos tão limitados pelo cérebro, poderíamos “ir mais longe”.

A última fala de 942 antes do fim da transcrição do grupo focal, dentro da discussão sobre quais seriam os “átomos” do século XXI, contém uma afirmação curiosa: “*Eu tenho um amigo que não acredita na relatividade (...) Aí, começou a ir atrás de alternativas da relatividade,*

5.6 Estudo e análise das concepções

e aí ele chegou em uma teoria de ilhas. É uma teoria bizarra, onde c não é uma constante, mas que dá o efeito de parecer ser uma constante” (01:04:01). O fato de 942 classificar uma teoria alternativa à TRE de “teoria bizarra” significa que o estudante confere um status superior às teorias relativísticas, isto é, dá valor a elas, mesmo sendo a teoria alternativa aparentemente equivalente (vide expressão restante, “onde c não é uma constante, mas que dá o efeito de parecer ser uma constante”). Essa é mais uma característica que reforça a tendência realista de 942.

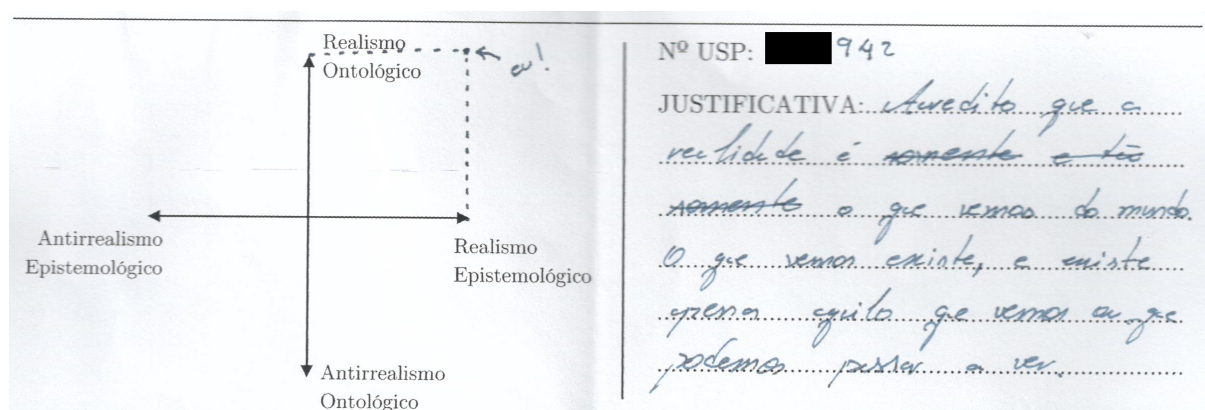


Figura 5.23: Diagrama de 942 segundo o próprio estudante.

Ao fim, resta comparar e analisar o diagrama preenchido pelo próprio estudante e a tendência apresentada na figura 5.22 referente às suas respostas ao questionário. De início nota-se que o estudante preencheu sua posição no mesmo quadrante ao qual sua tendência filosófica concentrou-se depois de responder ao questionário. Isso mostra a coerência entre as diferentes análises feitas, do questionário, da resenha e das falas transcritas do grupo focal. A justificativa contém argumentos que se repetiram nas resenhas e durante o grupo focal: “Acredito que a realidade é o que vemos do mundo”. Com base no material estudado, podemos inferir que para 942, “o que vemos do mundo” é na verdade tudo aquilo que as teorias científicas nos permitem ver. Assim, um realista diria que “vemos” a distorção do espaço-tempo quando vemos raios solares defletidos pela gravitação do Sol, ou, que “vemos” a dilatação do tempo quanto há contagens desiguais de múons na superfície terrestre em comparação ao chuva atmosférico de partículas. A segunda parte da justificativa, “O que vemos existe, e existe apenas aquilo que vemos ou que podemos passar a ver”, reflete a “base empírica” do qual 942 entende que parte a evolução das teorias científicas e também sua própria concepção, um espécie de realismo que não abandona características de uma postura positivista (principalmente quanto à questão da verificação experimental).

5.7 Síntese

Neste último capítulo apresentamos uma pesquisa de campo realizada com estudantes de física de licenciatura e bacharelado da Universidade de São Paulo, no primeiro semestre de 2012 no curso *Evolução dos Conceitos da Física*. Seus objetivos foram (i) investigar as concepções filosóficas dos estudantes quanto ao dRAC no contexto da TRE, e (ii) mostrar como o dRAC se manifesta e pode ser tão rico e interessante do ponto de vista educacional quanto a visão consensual da NdC. A pesquisa foi feita em três etapas: aplicação de um questionário de escala opinativa (Likert) durante todo semestre, com questões voltadas aos temas de aula do curso *Evolução dos Conceitos em Física* e ao debate, aplicadas semana a semana; análise de dois conjuntos de resenhas sobre história e filosofia da TRE feitas pelos estudantes (apêndices F e G), e; análise da transcrição de um grupo focal realizado com oito estudantes convidados (apêndice H).

A escala das respostas ao questionário foi quantificada, e foi possível realizar uma análise estatística. Utilizamos diagramas bidimensionais para ilustrar graficamente aquilo que chamamos de “tendências filosóficas” destes oito estudantes, com base em suas respostas ao questionário, que foram quantificadas de acordo com a tendência filosófica de cada questão.

Os conteúdos específicos das duas aulas dadas sobre história e filosofia da TRE foram organizados com base nos estudos do capítulo 4 (apêndices C e D), e um dos textos de leitura obrigatória aos estudantes foi elaborado por nós (apêndice E). Os temas das resenhas tocavam a questão da realidade dos fenômenos relativísticos (contração do espaço e dilatação do tempo) e do Espaço-tempo.

Com base nas tendências filosóficas dos estudantes, ilustradas graficamente pelos diagramas, e pela análise das resenhas, convidamos dez estudantes para realização da última etapa da pesquisa. Destes, oito compareceram ao grupo focal, que foi transcrito e analisado. Pela triangulação das três etapas, foi notável a concordância entre as interpretações dos dados de cada uma das etapas para boa parte dos estudantes que participaram das três etapas.

Constitui uma parte extremamente relevante neste trabalho o registro e a análise sobre os elementos que os próprios estudantes apresentaram sobre o dRAC e a TRE. Foi possível notar que boa parte dos estudantes mostraram argumentos refletidos do ponto de vista conceitual e filosófico, sendo pouco deles ingênuos ou contraditórios. Algumas características do dRAC manifestaram-se nos argumentos e nas falas dos estudantes. O argumento do sucesso

5.7 Síntese

empírico da ciência e da verificabilidade experimental foi muito recorrente (033, 201, 583), sendo este último um aspecto consensual da NdC (McCOMAS *apud* EL-HANI, 2006, p.6-7; MATTHEWS, 2012, p.10) e um dos critérios científicos de realidade mais elementares (PES-SOA JR, 2011d, p.44). Mas alguns estudantes também enunciaram outros argumentos, como uma versão do argumento histórico das entidades abandonadas (893), caro aos antirrealistas (NEWTON-SMITH, 1996, p.184). Um aluno utilizou o argumento realista transempírico da simplicidade (942), caro aos realistas (CHAKRAVARTTY, 2013, p.14). Por outro lado, houve estudantes que propuseram critérios diferentes da verificabilidade, com o critério de invariância de referenciais (113), utilizado por Tonnelat (1971, p.255) no contexto da TRE, e o de utilidade em previsões observáveis (581), presente tanto em posturas realistas como antirrealistas. Além disso, alguns estudantes apresentaram argumentos antirrealistas “polêmicos” no dRAC, como o ceticismo sobre a definição de verdade (113) e o argumento da inacessibilidade da realidade (581), semelhantes, por exemplo, ao Realismo Interno de Putnam (ver PLASTINO, 2000).

No capítulo seguinte, procuramos retomar os principais pontos da dissertação, assim como responder de forma mais objetiva à pergunta de pesquisa exposta na Apresentação.

6 Considerações finais

Na apresentação desta dissertação, ilustramos a pergunta de pesquisa que guiou os esforços empreendidos na produção deste trabalho:

Quais aspectos da Natureza da Ciência, relacionados ao debate Realismo e Antirrealismo, emergem quando consideramos a pré-história e a história da Teoria da Relatividade Especial, e quais deles têm potencial para promover debates no ensino de física?

A rigor, respostas a esta pergunta podem ser encontradas ao longo dos capítulos anteriores, de forma difusa, entre os estudos teóricos e a análise das tendências filosóficas dos estudantes. Antes de re-expô-las desta vez de forma clara, é interessante retomar o texto como um todo de forma bastante resumida. Assim o leitor pode lembrar das principais questões estudadas em cada capítulo.

Os principais objetivos do capítulo 2 (História e Filosofia da Ciência, Natureza da Ciência e Ensino de Ciências) resumiram-se a defender (i) a importância da aproximação da HFC ao ensino de ciências, e (ii) a relevância das questões não consensuais da NdC (ou Características da Ciência) para o ensino *sobre* as ciências. Embora o primeiro já seja consenso entre pesquisadores da área, julgamos oportuno lembrar os principais argumentos pró e contra a aproximação. Para o segundo tópico, nós incluímos numa parcela crescente de pesquisadores que concordam quanto às limitações da chamada visão consensual da NdC. O dRAC só pode ser relevante no ensino de ciências se entendermos de antemão a relevância de se mostrar a face controversa e não consensual da ciência, seja na sua dimensão histórica ou filosófica. A nosso ver, isso permite uma postura mais reflexiva e crítica sobre a ciência.

O capítulo 3 (Realismo e Antirrealismo Científicos) destinou-se a um estudo do dRAC. A pretensão deste capítulo foi propiciar uma visão panorâmica do debate, e não esgotar esse antigo e bastante complexo tema filosófico em várias de suas particularidades. Exploramos diferentes

Considerações finais

formas de Realismo e Antirrealismo com base em algumas categorias elencadas por filósofos, salientando suas diferenças e peculiaridades. Também foi discutido alguns dos argumentos utilizados no debate. Como o número de argumentos é expressivo, provavelmente proporcional ao número de filósofos com ideias genuínas dentro do debate, optou-se por discutir os principais, mais analisados e discutidos atualmente. As categorias de Realismo e Antirrealismo exploradas neste capítulo compõem o principal subsídio para os capítulos restantes do trabalho.

Em seguida, no capítulo 4 (História, Filosofia e a Teoria da Relatividade Especial), procuramos mostrar, entre outros tópicos, como o dRAC se manifesta nos estudos históricos e filosóficos sobre a TRE. As diferentes interpretações do formalismo matemático mínimo da teoria levaram a diferentes interpretações científico-filosóficas, muito ligadas à formação ou preferência filosófica de seus criadores. Lorentz manteve por boa parte da sua vida a crença na existência no éter (Realismo Ontológico de inobserváveis ou Realismo de Entidades). Poincaré é lembrado por sua postura convencionalista quanto às teorias e às entidades científicas, mas hoje alguns analisadores o classificam de realista estrutural (Agnosticismo Ontológico ou Antirrealismo de Entidades e Realismo Epistemológico-matemático). Muitos estudos mostram o “jovem” Einstein próximo à postura hoje chamada de Operacionalismo Epistemológico (Agnosticismo de Entidades e Antirrealismo Epistemológico), principalmente por influências das ideias de Mach, Hume e também de livros textos da época (entre eles o livro de Drude, também influenciado pela epistemologia machiana). Minkowski falava do Espaço-tempo como se pudesse tocá-lo, e o colocava como fundamento do Universo (Realismo Ontológico de inobserváveis ou Realismo de Entidades) e suas leis escritas na forma covariante (quadrivetores) (Realismo Epistemológico ou Realismo de Teorias). Hoje existe ainda debates sobre a ontologia das teorias relativísticas (Filosofia do Espaço-tempo, que remetem à discussão sobre a realidade do Espaço-tempo), o que mostra que esse estudo não está ultrapassado.

Por fim, no capítulo 5 (Pesquisa de campo sobre concepções filosóficas de estudantes de física acerca do debate Realismo e Antirrealismo) ilustramos uma pesquisa destinada a identificar as concepções de estudantes dos últimos anos de graduação em física (bacharelado e licenciatura) da Universidade de São Paulo sobre o dRAC, em especial no contexto da TRE. Existe um número consideravelmente grande de trabalhos na literatura especializada sobre concepções de NdC de estudantes de nível básico ou superior, porém, poucos foram encontrados relativos às concepções dentro deste debate. A pesquisa contou com metodologia múltipla (aplicação de questionário ao longo do semestre, análise de resenhas e grupo focal), e sua análise foi feita

pela triangulação dos dados. Dezenas de estudantes participaram das primeiras duas etapas, e, por requisitos da metodologia de pesquisa, oito deles participaram da última etapa. Havia uma expectativa inicial de que as concepções dos estudantes se mostrassem bastante diversas e próprias, como ocorre com os filósofos e estudiosos participantes do dRAC. Os resultados encontrados foram interpretados como bastante positivos, em especial devido à riqueza e à diversidade de tendências filosóficas entre os estudantes. A não consensualidade do debate se manifestou, pois, também entre eles (identificamos estudantes com diferentes tendências realistas e antirrealistas), o que foi entendido como algo bastante importante para este trabalho. As discussões entusiásticas, as profundas reflexões nas resenhas, e o evidente interesse dos estudantes sobre esse tema, que não raro é esquecido nos manuais universitários e no discurso de muitos professores, talvez não existiriam (ou pelo menos não seriam tão intensas) caso o tema em questão fosse um tópico consensual da NdC. É justamente a não consensualidade do debate (criticada por diversos autores que não veem com bons olhos discussões metacientíficas controversas em sala de aula) que propicia a discussão e o embate de ideias, fatores essenciais em qualquer proposta educativa participativa. A visão consensual da NdC, embora “segura” do ponto de vista filosófico, pode ser estagnante e, nos piores dos casos, virar retórica de conclusões (filosóficas) em sala de aula.

Feita a retomada do trabalho como um todo, podemos agora reexpor as respostas à pergunta de pesquisa de forma mais concisa. Primeiramente, com base no estudo teórico do capítulo 4, podemos elencar as seguintes respostas à pergunta:

I) *A possibilidade de diferentes interpretações científico-filosóficas de um mesmo formalismo matemático* (aspecto não consensual). Este talvez o tópico mais enfatizado neste trabalho. Com base no estudo histórico e filosófico, mostrou-se no capítulo 4 que o que hoje chamamos de TRE foi interpretado de diversas formas por diferentes pessoas. E, o que é caro à proposta deste trabalho, cada interpretação carregava um conjunto de crenças (realistas e antirrealistas) específico. A crença no éter era necessária para Lorentz, convencional para Poincaré, supérflua para Einstein, e (aparentemente) bem-vinda para Minkowski. A possibilidade de se conhecer a estrutura do espaço e do tempo era natural para Lorentz (o comportamento do espaço é dado pelo comportamento do éter, e não é preciso especificações sobre o tempo em diferentes referências), convencional para Poincaré (nossos acessos ao tempo e espaço são indiretos, não temos noção intuitiva da simultaneidade), limitada (a medidas de réguas e relógios, obedecendo a dois postulados fundamentais) para Einstein (em 1905), e *a priori* para Minkowski (por meio

da matemática).

II) *Os critérios de escolha entre teorias equivalentes* (aspecto não consensual). Como foi discutido, a teoria eletrodinâmica de Lorentz-Poincaré e a teoria especial de Einstein eram empiricamente e matematicamente equivalentes. Assim, em tese, nenhum experimento poderia ao mesmo tempo corroborar uma e falsear outra, como foi enfatizado tanto por cientistas à época como historiadores da ciência atuais. E, de fato, por algum tempo as teorias eram indistinguíveis, sendo chamada, por exemplo de “teoria de Lorentz-Einstein”. A teoria de Einstein também foi entendida, em um primeiro momento, como uma reinterpretação de caráter mais heurístico da teoria de Lorentz. Como foi explicado, as teorias partiam de bases diferentes (de ontologias diferentes, crenças científicas quase opostas), o que deixa a equivalência um fenômeno ainda mais curioso. Nestes casos, surge, entre outras, a seguinte questão: qual critério de escolha de teorias adotar em casos de equivalência empírica e matemática? Naturalmente, esta é uma pergunta bastante controversa, cuja complexidade a história da TRE é testemunha. Não há consenso pleno entre historiadores e filósofos sobre o que conferiu à interpretação de Einstein (e Minkowski) preponderância sobre as interpretações de Lorentz e Poincaré.

III) *O papel das influências filosóficas na criação do conhecimento científico* (aspecto não consensual). As influências filosóficas, no caso dos criadores da TRE apontados no capítulo 4, parecem ter sido tão importantes quanto as influências científicas, isto é, próprias do campo experimental ou matemático-teórico. O caso de Einstein é dos mais largamente estudados. Sua proximidade com a filosofia era confessa, e, aparentemente, também “posta em prática” em alguns momentos. Como discutido na subseção 4.7.3 (O “artigo fundador”, Operacionalismo Epistemológico e influências filosóficas), alguns autores defendem que a postura operacionalista de Einstein no “artigo fundador” de 1905 teria sido influência da leitura principalmente das obras de Mach e Hume. Os casos de Poincaré, Lorentz e Minkowski são mais sutis. O platonismo de Minkowski seria uma inspiração antiga, que se fortaleceu com o apego à matemática. O fato de usar a metáfora do espaço e tempo como “sombras” de algo maior pode remeter às “sombras” na caverna de Platão: meros reflexos do verdadeiro objeto (Espaço-tempo). Poincaré foi reconhecido ainda vivo por suas obras de conteúdo mais filosófico, e em sua “rotina acadêmico-científica” refletia muitas de suas concepções tão bem descritas. Na subseção 4.8.1 (*Polytechnicien e grand savant*) discutiu-se a formação filosófica inicial de Poincaré, caracterizada por evitar posições extremas empiristas ou idealistas, levando-o anos depois ao Convencionalismo. Considerava ainda que o objetivo da ciência não é a “coisa-em-si”, mas as relações

entre as coisas (consideração coerente com o Convencionalismo, e também com algumas de suas menções cautas sobre a realidade do éter), o que tornava a postura filosófica de Poincaré genuína, mesmo para comentadores atuais. Já Lorentz assumiu uma postura dualística, conforme discutido na seção 4.6.1 (A postura “dualística” de Lorentz), que era científico-filosoficamente estranha tanto à tradição britânica como à tradição germânica. Adotar que as duas “substâncias” da eletricidade e do magnetismo eram o campo e as partículas portadores de carga foi o diferencial do trabalho de Lorentz (e seu sucesso) em comparação a outros autores da época.

IV) *O papel do aspectos sociais, culturais e políticos na criação e aceitação de teorias científicas* (aspecto não consensual). Discutiu-se na subseção 4.7.2 (O analista de patentes e a “materialização” da simultaneidade) como o ambiente cultural, social, político e tecnológico teriam influenciado Einstein em alguns estágios da formulação da (sua interpretação da) TRE. Ao longo da seção 4.8 (Interpretação Dinâmica de Poincaré (1906)) mostrou-se como Poincaré deparou-se com o problema da simultaneidade de eventos distanciados por meio de problemas envolvendo a sincronização de relógios por meio de cabos telegráficos ou medidas astronômicas. A equação que hoje se conhece usualmente como “fórmula da dilatação do tempo” foi obtida por Poincaré quando analisava a possibilidade de troca de sinais em cabos telegráficos com velocidades de ida e volta diferentes (um modelo da situação de vento de éter, que era o caso dos experimentos interferométricos de Michelson). É curioso e provocante notar o ambiente de trabalho de cada um destes dois cientistas entre o final do século XIX e o início do XX: Einstein trabalhava em um escritório de patentes, e, provavelmente, estudou patentes de máquinas sincronizadoras, em alta na época; Poincaré trabalhava no Departamento de Longitude de Paris, sendo que o principal impasse na determinação da longitude, por cabos telegráficos, dependia da sincronização de relógios distanciados, e por medidas astronômicas, da determinação de eventos simultâneos. Com Lorentz e Minwoski este aspecto é bem menos evidente. Quanto à aceitação das teorias relativísticas, a influência de fatores “externos” é mais visível. Discutiu-se sucintamente na subseção 4.1 (O “mito-Einstein” e a paternidade da Teoria da Relatividade Especial) que o fato da teoria de um alemão (Einstein) ter sido testada por um britânico (Eddington), ambos pacifistas, logo depois da primeira grande guerra (na qual Alemanha e Inglaterra eram ferrenhos inimigos), aparentemente foi um dos fatores centrais à aceitação da TRE e da TRG a partir de 1919, em um clima pós-guerra de arrependimento e reconciliação. Esse tópico relaciona-se com o tópico II), por servir de exemplo com um episódio em que pesou na escolha entre teorias equivalentes (TRE e teoria de Lorentz-Poincaré) um critério “não-epistêmico”

(isto é, o peso do impacto da notícia no clima pós-guerra parece ter predominado sobre o peso da “comprovação experimental” de Eddington).

V) *O papel dos experimentos na comprovação de teorias científicas* (aspecto consensual). Este, presente nas listas de tópicos consensuais da NdC, é um tópico já bastante estudado e discutido, seja entre filósofos e historiadores, seja entre pesquisadores da área de ensino de ciências sensíveis às questões filosóficas. O principal exemplo deste quinto ponto é o papel dos experimentos de Michelson (e posteriormente juntamente com Morley) para o surgimento da teoria. Conforme discutiu-se na seção 4.6 (Interpretação Dinâmica de Lorentz (1904)), os resultados do experimento de 1881, conflitante com o experimento de Fizeau de 1851, teriam impulsionado Lorentz a construir sua teoria do elétron no fim do século XIX. Os experimentos de 1887 também foram importantes a Lorentz, que viu a necessidade de introduzir a hipótese da contração dos corpos em movimento. Para Poincaré, bastante interessado no trabalho de Lorentz, os experimentos também foram importantes, principalmente em evidenciar a validade do que chamava Princípio da Relatividade. Entretanto, para Einstein a influência teria sido mínima, como alguns importantes estudos de historiadores sugerem. É importante mencionar que, à época, os “resultados negativos” dos experimentos interferométricos de Michelson de 1881 e 1887, assim como os de vários outros realizados no período, não foram entendidos à época como evidências contra o éter. Pelo contrário, instigaram muitos cientistas a pensarem e pesquisarem teorias de éter que fossem compatíveis com os resultados até então obtidos. Hoje, pelo contrário, muitos livros didáticos atuais ainda apontam (implicitamente ou explicitamente) o “experimento de Michelson-Morley” com aquele “crucial” para desbancar o éter e dar origem à TRE. Como comentado na seção 4.7.1 (Influências científicas sobre Einstein), para Einstein o experimento de Fizeau foi mais influente do que qualquer outro, classificando-o inclusive como “*experimentum crucis*”, por sugerir fortemente as limitações da lei galileana de adição de velocidades.

Com relação à pesquisa de campo, também foi possível encontrarmos subsídios para responder à pergunta de pesquisa. Com base nas respostas aos questionários, na análise das resenhas, e na transcrição do grupo focal, destacamos pelos menos três respostas:

I) *A realidade dos processos e entidades científicas inobserváveis* (aspecto não consensual). Foi curioso notar como os estudantes que participaram de todas as etapas da pesquisa se comportaram de formas diferentes. Quanto à questão da realidade dos processos e entidades científicas não observáveis diretamente. Em especial, quanto ao Espaço-tempo de Minkowski e aos

fenômenos relativísticos de contração do espaço e dilatação do tempo. Nota-se, por exemplo, as opiniões filosoficamente divergentes. Enquanto alguns estudantes afirmam que os fenômenos relativísticos não são fisicamente reais (113 e 893) ou preferem não arriscar (033 e 872), outros afirmam que são reais com segurança (201 e 583) baseando-se em um critério empírico (experimental) de realidade. Por outro lado, enquanto alguns estudantes se mostram relativamente céticos quanto à realidade do Espaço-tempo (033, 581 e 893), outros a afirmam com naturalidade (201 e 942). Em geral, os estudantes apresentaram argumentos razoáveis (alguns deles pessoais) à posição escolhida, de forma que ninguém está “errado” ou “certo”. Trata-se, sim, de uma questão controversa contida no núcleo do dRAC, um aspecto não consensual da NdC que se manifestou de forma rica entre os estudantes que participaram da pesquisa.

II) *Os critérios científicos de realidade* (aspecto não consensual). Em diferentes momentos, os estudantes participantes da pesquisa procuraram defender suas posições com base em alguns critérios de realidade. O mais comum deles é o critério experimental, algo próximo ao que poderíamos chamar de verificacionismo ou experimentalismo. Como foi mencionado no capítulo 2, o caráter empírico da ciência é um aspecto consensual da NdC, o que não necessariamente vale, entretanto, com outros critérios. Para muitos dos estudantes, em especial os que apresentaram tendências realistas, a verificação experimental era suficiente para caracterizar um fenômeno real ou uma teoria verdadeira (033, 201, 583, 872 e 942). De fato, destes alguns mencionaram o conhecimento do experimento dos múons para justificar sua afirmação sobre os fenômenos relativísticos e a TRE (033 e 872). Por outro lado, outros estudantes exploraram outros critérios (113, 893 e 942), que foram discutidos avidamente durante a realização do grupo focal. Na análise da resenha B foi curioso notar que muitos estudantes não aderiram ao critério de realidade “exigido” pela TRE, a invariância por Transformações de Lorentz, muito embora aceitassem e utilizassem a teoria, o que mostra que a questão também é controversa entre eles.

III) *O papel da matematização do conhecimento científico* (aspecto não consensual). O papel da matemática na física (e também o da física para a matemática) é algo já há muito discutido por filósofos e historiadores da ciência. E, assim como o dRAC, trata-se de uma questão controversa. Não há consenso, por exemplo, sobre a carga de realidade a se atribuir às entidades matemáticas nas teorias científicas, sobre a capacidade do conhecimento científico matematizado em apreender a realidade, e sobre os próprios limites da matematização do conhecimento. E, como era esperado, a questão também não apresentou consenso entre os estudantes, como ficou particularmente durante a realização do grupo focal. Os estudantes defenderam diferentes

Considerações finais

teses, desde a ideia da matemática como possibilitadora legítima de um acesso mais profundo ao mundo (583) até a negação do raciocínio lógico e matemática para a compreensão do universo (581). A questão da ciência como representação da realidade e o papel da matemática para isso também foi debatida de forma controversa, com estudantes defendendo a tese da representação tendendo à realidade (201) enquanto outros a tese da representações não serem necessariamente aproximações da realidade (893).

Algumas outras importantes questões surgiram nas resenhas e no grupo focal, como o conceito de verdade, os limites biológicos e cognitivos do ser humano à apreensão do real, o objetivo das ciências, o papel de argumentos transempíricos na ciência, entre outras. Por falta de tempo, e também pelo fato de boa parte destas questões estarem relativamente longe do tema principal deste trabalho, não foram discutidas com mais atenção e afincado.

A alta recorrência do critério de realidade da verificabilidade entre os estudantes sugere que esse assunto pode ser uma promissora via de entrada do dRAC no ensino de física. Embora seja um aspecto consensual da NdC que a ciência é empírica, não há consenso sobre quais seria o conjunto de critérios científicos de realidade. A verificabilidade, embora extremamente presente na ciência (em especial nas ciências experimentais), foi um conceito largamente criticado por historiadores e filósofos da ciência a partir da década de 60 do século passado, isto é, ele possui limitações. Desta forma, aborda-lo criticamente em sala de aula pode ser uma forma interessante de provocar e instigar filosoficamente nos estudantes sobre o papel e os limites da experimentação científica, os limites da inferência empírica, entre outros temas dentro do dRAC.

Desta forma, apresentadas algumas das possíveis respostas à pergunta de pesquisa exposta na Apresentação desta dissertação, concluímos o trabalho. Boa parte das contribuições desta pesquisa como um todo estão difundidas ao longo dos capítulos, seja na defesa da aproximação de questões filosóficas ao ensino de ciências, na defesa da relevância das questões não consensuais da NdC, no estudo sintético e panorâmico sobre o dRAC e também da história e filosofia da TRE, e por fim, na proposta da pesquisa de campo aplicada. Um projeto de continuidade a esta dissertação de mestrado envolve a elaboração de uma proposta curricular para um curso de nível superior sobre as teorias relativísticas. Trata-se de uma iniciativa em tornar ainda mais concreto os apelos expostos em todo este trabalho, especialmente, aquele de aproximar questões históricas e filosóficas no ensino de relatividade.

Referências Bibliográficas

ABD-EL-KHALICK, Fouad & LEDERMAN, Norman G. (2000). Improving science teachers conceptions of nature of science: a critical review of literature. *International Journal of Science Education*, vol. **22** (1), pp. 665-701.

ABIKO, Seiya (2005). The Light-Velocity Postulate. *Science & Education*, vol. **14**, pp.353-365.

ACEVEDO, J.A.; VÁZQUEZ, A.; PAIXÃO, M.F; ACEVEDO, P.; OLIVA, J.M. & MANASSERO, M.A. (2005). Mitos da diática das ciências acerca dos motivos para incluir a natureza da ciência no ensino de ciências. *Ciência & Educação*, vol.**11** (1), pp.1-15.

AIKENHEAD, Glen (2006). *Science education for everyday life: Evidence-based practice*. New York: Teachers College Press.

ALLCHIN, Douglas (2004). Pseudohistory and Pseudoscience. *Science & Education*, vol. **13**, pp.179-195.

AMELINO-CAMELIA, Giovanni (2002). Relativity in space-time with structure governed by an observer-independent (Planckian) Length scale. *International Journal of Modern Physics*, vol. **11**, pp.35-60.

ARRIASSECQ, Irene & GRECA, Ileana M. (2002). Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio y polimodal. *Ciência & Educação*, vol. **8** (1), pp.55-69.

ARRIASSECQ, Irene & GRECA, Ileana M. (2012). A Teaching-Learning Sequence for the Special Relativity Theory at High School Level Historically and Epistemologically Contextualized. *Science & Education*, vol. **21**, pp.827-851.

ASSIS, André K. T. (1995). *Eletrodinâmica de Weber*. Campinas: Editora da Unicamp.

BAIN, Jonathan (2012). *Interpreting Special Relativity*. Notas de aula do curso PL2283-*Philosophy of Relativity*, ministrada na Polytechnic Institute of New York University, primeiro semestre de 2012. Disponível no site do autor:

<http://ls.poly.edu/~jbain/philrel/philrellectures/07.Consequences.pdf>. Tradução livre de trechos.

BARRA, Eduardo S. O. (1998). A Realidade do Mundo da Ciência: um desafio para a História, a Filosofia e a Educação Científica. *Revista Ciência & Educação*, vol. **5** (1), pp.15-26.

BATTIMELLI, Giovanni (2005). Dreams of a final theory: the failed electromagnetic unification and the origins of relativity. *European Journal of Physics*, vol. **26**, pp.111-6.

BAUMAN, Zygmunt (2011 [2010]). 44 cartas do mundo moderno líquido. Trad. Vera Pereira. Rio de Janeiro: Jorge Zahar.

BELL, John (1987). How to teach special relativity. In: *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, pp.67-80.

BESSELAAR, José V. D. (1972). *Introdução aos Estudos Históricos*. São Paulo: Editora Herder.

BORN, Max (1920 [1965]). *Einstein's Theory of Relativity*. Trad. Henry L. Brose. New York: Dover Publications

BRASIL, Ministério da Educação e Cultura (1998). *Parâmetros Curriculares para o Ensino Médio*. Brasília.

BRASIL, Ministério da Educação, Secretaria da Educação Básica (2006). *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais*. Brasília.

BRUSH, Stephen G. (1974). Should the History of Science Be Rated X? *Science*, vol. **183**, pp. 1164-72, 1974.

_____ (1995). Scientist as Historians. *Osiris*, vol. **10**, pp.214-231.

_____ (1999). Why was Relativity Accepted? *Physics in Perspective*, vol. **1**, pp.184-214.

CAPRIA, Marco Mamone (2002). A crise das concepções ordinárias de espaço e tempo: a teoria da relatividade. In: CAPRIA Marco Mamone (org.). *Construção da Imagem Científica do Mundo*. Trad. Luisa Rabolini e Jenner Barreto Bastos Filho. Coleção Ideias, vol.8. São Leopoldo: Editora Unisinos, pp.231-368.

CARIFIO, James & PERLA, Rocco (2008). Resolving the 50-year debate around using and misusing Likert scales. *Medical Education*, vol. **42**, pp.1150-1152.

CASTRO, Ruth S. & CARVALHO, Anna Maria P. (1992). História da ciência: investigando como usá-la num curso de segundo grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol. **9** (3), pp.225-237.

CHAKRAVARTTY, Anjan (2013). "Scientific Realism". ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Disponível em:

<http://plato.stanford.edu/archives/sum2013/entries/scientific-realism>, acessado dia 6/8/13.

CHALMERS, Allan (1993). *O que é Ciência, afinal?* Trad. Raul Filker. São Paulo: Editora Brasiliense.

CRASNOW, Sharon L (2000). How Natural Ontology Can Be? *Philosophy of Science*, vol. **67** (1), pp.114-132.

COBERN, William W. & LOVING, Cathleen C. (2007). An Essay for Educators: Epistemological Realism Really Is Common Sense. *Science & Education*, vol. **17**, pp.425-447.

CRUZ, Frederico F. S.; KAWAMURA, Maria R. D.; ABRANTES, Paulo C. C. & MARTINS, Roberto de A. (1988). Mesa-redonda: influência da história da ciência no ensino de física. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol. **5** (número especial), pp.76-92.

CUSHING, James T. (1998). *Philosophical Concepts in Physics. The historical relation between philosophy and scientific theories*. Cambridge: Cambridge University Press.

DARRIGOL, Olivier (1996). The Electrodynamical Origins of Relativity Theory. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. **26** (2), pp.241-312.

_____ (2000). *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford: Oxford University Press.

_____ (2004). The Mystery of the Einstein-Poincaré Connection. *Isis*, vol. **95** (4), pp.614-626.

_____ (2005). The Genesis of the Relativity Theory. *Séminaires Poincaré*, vol. **1**, pp.1-20.

DIEKS, Dennis (2010). Reichenbach and the conventionality of distant simultaneity in perspective. In: STADLER, Friedrich (ed.). *The present situation in the Philosophy of Science*. Dordrecht: Springer, pp.315-333.

DORLING, Jon (1968). Lorentz Contraction and Clock Synchronization: The Empirical Equivalence of the Einsteinian and Lorentzian Theories. *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. **19** (1), pp. 67-69.

DUHEM, Pierre (1989 [1893]). A escola inglesa e as teorias físicas (A respeito de um livro recente de W. Thomson). Trad. Pablo Rubén Mariconda. *Ciência e Filosofia*, vol. **4**, pp. 63-84.

DURANT, Will (1996 [1926]) *A História da Filosofia*. Trad. Luiz Carlos do Nascimento Silva. Col. Os Pensadores. Rio de Janeiro: Editora Nova Cultural.

EINSTEIN, Albert (1949). Autobiographisches - Autobiographical Notes. *In: SCHILPP, P.A. (ed.) (1949). Albert Einstein: Philosopher-Scientist.* New York, Evanston and London: Harper & Row, Publishers.

_____ (1983 [1905]a). Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. *In: LORENTZ, H.A.; EINSTEIN, A. & MINKOWSKI, H.: O Princípio da Relatividade.* Col. Textos Fundamentais da Física Moderna, vol.I, 3ª ed. Trad. Mário José Saraiva. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

_____ (1983 [1905]b). A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético? *In: LORENTZ, H.A.; EINSTEIN, A. & MINKOWSKI, H.: O Princípio da Relatividade.* Col. Textos Fundamentais da Física Moderna, vol.I, 3ª ed. Trad. Mário José Saraiva. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

EFLIN, Juli T., GLENNAN, Stuart & REISCH, George (1999). The Nature of Science: A Perspective from the Philosophy of Science. *Journal of Research in Science Teaching*, vol.36 (1, pp.107-116.

EL-HANI, Charbel Niño (2006). Notas sobre o ensino de história e filosofia da ciência na educação científica de nível superior. *In: SILVA, Cibelle C. (org.) Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino.* São Paulo: Livraria da Física, pp.3-22.

FEYERABEND, Paul K. (2007 [1975]). *Contra o método.* Trad. Cezar Augusto Mortari. São Paulo: Editora UNESP.

FREIRE, Paulo (2011 [1984]). O cientista em seu devido lugar. *In: FREIRE, Paulo & GUIMARÃES, Sérgio (Org.) Educar com a mídia: novos diálogos sobre educação.* São Paulo: Paz e Terra.

FORATO, Thais. C. M. (2009). *A Natureza da Ciência como Saber Escolar: Um Estudo de Caso a Partir da História da Luz.* Tese de Doutorado, Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo.

GATTI, Bernadete Angelina (2012). *Grupo focal na pesquisa em Ciências Sociais e Humanas.* Série Pesquisa. Brasília: Liber Livro Editora.

GALISON, Peter L. (2003). *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time.* New York: WW. Norton & Company Ltd. Tradução livre de trechos.

_____ (2005 [2003]). *Os Relógios de Einstein e os Mapas de Poincaré: Impérios do Tempo.* Trad. Nuno Garrido de Figueiredo. Lisboa: Gradiva.

_____ (1979). Minkowski's Space-Time: From Visual Thinking to the Absolute World. *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. **10**, pp.85-121. Tradução livre de trechos.

GIANNETTO, Enrico (1998). The rise of Special Relativity: Henri Poincaré's works before Einstein. *Atas do XVIII Congresso di Storia della física e dell'Astronomia*. Universidade de Milão, Milão, pp.171-207.

GIL-PÉREZ, Daniel; MONTORO, Isabel F.; ALÍS, Jaime C.; CACHAPÚZ, António & PRAIA, João (2001). Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Revista Ciência & Educação*, **7(2)**, pp.125-153.

GIL-PÉREZ, Daniel; GUIASOLA, Jenaro; MORENO, Antonio; CACHAPUZ, Antonio; CARVALHO, Anna Maria P. de; TORREGROSA, Joaquín Martínez; SALINAS, Julia; VALDÉS, Pablo; GONZÁLES, Eduardo; DUCH, Anna Gené; DUMAS-CARRÉ, Andrée; TRICÁRICO, Hugo & GALLEGU, Rómulo (2002). Defending Constructivism in Science Education. *Science & Education*, vol. **11**, pp.557-71.

GRÉGOIRE, François (1954). *Les Grands Problèmes Métaphysiques*. Col. Que sais-je? Paris: Presses Universitaires de France.

GUERRA, A., BRAGA, Marco & REIS, José C. (2007). Teoria da relatividade restrita e geral no programa de mecânica do ensino médio: uma possível abordagem. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. **29 (4)**, pp.575-583.

GUERRA, A., BRAGA, Marco & REIS, José C. (2010). Tempo, espaço e simultaneidade: uma questão para cientistas, artistas, engenheiros e matemáticos no século XIX. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. **27 (3)**, pp.568-583.

HANSON, Norwood R. (1975 [1958]). Observação e Interpretação. In MORGENBESSER, S. (org), *Filosofia da Ciência*. São Paulo: Editora Cultrix, pp.127-138.

HACKING, Ian (2012 [1983]). *Representar e Intervir: Tópicos Introdutórios de Filosofia da Ciência Natural*. Trad. Pedro Rocha de Oliveira, Rev. Antonio Augusto Passos Videira. Rio de Janeiro: EDUERJ.

HEHL, Friedrich W. (2010). On the changing form of Maxwell's equations during the last 150 years - spotlights on the history of classical electrodynamics. *UCL-HEP (University College London High Energy Physics) Seminar 2010*, University College London, Londres. Disponível online em:

<http://www.thp.uni-koeln.de/gravitation/mitarbeiter/hehl.html>, acessado dia 2/2/13.

HENRIQUE, Alexandre B. (2011). *Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia*. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências. Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação. São Paulo.

HENRIQUE, Alexandre B.; ZANETIC, João & GURGEL, Ivã (2012). Críticas à visão consensual da natureza da ciência e a ausência de controvérsias na educação científica: o que é ciência, afinal? *Anais do XIV Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*. Maresias, São Paulo.

HENTSCHEL, Klaus (1990). Philosophical Interpretations of Relativity Theory: 1910-1930. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol.2. Symposia and Invited Papers. Pp.169-179.

HESSE, Mary B. (2005 [1961]) *Forces and Fields, The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. New York, Mineola: Dover Publications, Inc.

HIROSIGE, Tetu (1976). The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity. *Historical Studies in Physical Sciences*, vol.7, pp.3-82. Tradução livre de trechos.

HOLTON, Gerald (1978 [1973]). Einstein, Michelson y el experimento “crucial”. In: *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid: Alianza Editorial, pp.204-93.

_____ (1973). On the Origins of Special Theory of Relativity. In HOLTON, Gerald (org.). *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*. Cambridge: Harvard University Press, pp.191-236.

_____ (1968). Mach, Einstein and the search for reality. *Daedalus*, vol. **97** (2), *Historical Population Studies* (Spring, 1968). MIT Press, pp.636-73.

HUME, David (2000 [1739]). *Tratado da Natureza Humana*. São Paulo: Ed. Unesp. Tradução de D. Danowski.

INDURSKY, Freda (1989). Relatório Pinotti: o jogo polifônico das representações no ato de argumentar. In: GUIMARÃES, Eduardo (org.) (1989). *História e sentido na linguagem*. Campinas: Pontes, pp.93-127.

IRZIK, Gürol & NOLA, Robert (2011). A Family Resemblance Approach to the Nature of Science for Science Education. *Science & Education*, vol. **20**, pp.591-607.

JAMIESON, Susan (2004). Likert scales: how to (ab)use them. *Medical Education*, vol. **38**, pp.1212-1218.

JAMMER, Max (1999). *Concepts of mass in contemporary physics and philosophy*. Princeton: Princeton University Press.

JANSSEN, Michael (2002). Reconsidering a Scientific Revolution: The Case of Einstein versus Lorentz. *Physics in Perspective*, vol. 4, pp.421-446.

JUNGNICKEL, Christa & McCORMMACH, Russel (1990). *Intellectual Mastery of Nature. Theoretical Physics from Ohm to Einstein: The now might theoretical physics 1870-1925*. Vol.2. Chigaco: University of Chicago Press.

KEVLES, Daniel (2005). Albert Einstein: Relativity, War, and Fame. In: *A Century of Books: Princeton University Press, 1905-2005*. Princeton: Princeton University Press, pp.115-24.

KÖHNLEIN, Janete F. & PEDUZZI, Luiz O. Q. (2005). Uma discussão sobre a natureza da Ciência no ensino médio: um exemplo com a teoria da relatividade restrita. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 22 (1), pp.36-70.

KRAGH, Helge (2011 [1989]). *Introdução à Historiografia da Ciência*. Trad. Carlos Grifo Babo. Porto: Porto Editora.

KRASILCHIK, M (1987). A evolução no ensino das ciências no período 1950-1985. In: KRASILCHIK, M. (org.) *O professor e o currículo das ciências*. São Paulo: EPU/EDUSP, cap. 1, pp.5-25

KUHN, Thomas. S. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chigaco Press.

_____ (2009 [1977]). A conservação da energia como exemplo de descoberta simultânea. In: *A Tensão Essencial*. Trad. Marcelo Amaral Penna-forte. São Paulo: EDUNESP, pp.89-126.

LAUDAN, Larry; DONOVAN, Arthur; LAUDAN, Rachel; BARKER, Peter; BROWN, Harold; LEPLIN, Jarrett; THAGARD, Paul; WYKSTRA, Steve (1993 [1986]). Mudança científica: modelos filosóficos e pesquisa histórica. *Estudos Avançados*, vol. 7 (19), pp.7-89.

LEDERMAN, Norman G.; ABD-EL-KHALICK, Fouad; BELL, Randy L. & SCHWARTZ, Renée S. (2002). Views of Nature of Science Questionnaire: Toward Valid and Meaningful Assessment of Learners' Conceptions of Nature of Science. *Journal or Research in Science Teaching*, vol. 39 (6), pp.497-521.

LEDERMAN, Norman G. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: a review of the research. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 26 (9), pp.771-

783.

_____ (2007). Nature of science: past, present and future. *In*: ABELL, S.K. e LEDERMAN, N.G. (eds), *Handbook of Research on Science Education*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, pp.831-880.

LEVRINI, Olivia (2002). The Substantialist View of Spacetime Proposed by Minkowski and Its Educational Implications. *Science & Education*, vol.11 (6), pp.601-617.

LUCAS, John R. (2006). *Reason and Reality*. Tradução livre de trechos. Disponível no site do autor:

<http://users.ox.ac.uk/~jrlucas/>, acessado em fevereiro de 2013.

LUCAS, J.R.; HODGSON, P.E. (1990). *Spacetime & Electromagnetism: An Essay on the Philosophy of the Special Theory of Relativity*. New York: Clarendon Press.

LÜDKE, Menga & ANDRÉ, Marli E. D. A. (1986). *Pesquisa em Educação: Abordagens Qualitativas*. São Paulo: EPU.

MACH, Ernst (2012 [1883]). As ideias de Newton sobre tempo, espaço e movimento. *In*: MACH, Ernst. Desenvolvimento histórico-crítico da mecânica. Trad. Osvaldo Pessoa Jr. Disponível online: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/Mach-4-Mecanica-Espaco-2.pdf>, acessado em novembro de 2012.

MARTÍNEZ, Alberto A. (2007). There is no pain in the FitzGerald contraction, is there? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 38, pp.209-215.

MARTINS, André F. P. (2007). Historia e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho... *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 24 (1), pp.112-131.

MARTINS, Roberto de Andrade (1981). Use and violation of operationalism in relativity. *Manuscrito*, vol. 5 (2), pp.103-15.

_____ (1986). Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo. *Cadernos de Historia e Filosofia da Ciência*, vol. 10, pp.89-114.

_____ (1989). A relação massa-energia e a energia potencial. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol. 6 (Número especial), pp.59-80.

_____ (2005a). A dinâmica relativística antes de Einstein. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 27 (1), pp.11-26.

_____ (2005b). El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poincaré. *In*: FAAS, Horacio; SAAL, Aarón; VELASCO, Marisa (eds.). *Atas do XV Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia*. Facultad de

Filosofia y Humanidades. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, pp.509-516.

_____ (2006). Introdução: a historia das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, Cibelle C. (org.) *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, pp.xvii-xxx.

_____ (2012a). O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818-1880). *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. **29** (1), pp.53-80.

_____ (2012b). *Teoria da Relatividade Especial*. Editora Livraria da Física: São Paulo.

MATTHEWS, Michael (1993). Constructivism and Science Education: Some Epistemological Problems. *Journal of Science Education and Technology*, vol. **2** (1), pp.359-370.

_____ (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge.

_____ (1995 [1992]). História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol. **12** (3), pp.164-214. Trad. Claudia Mesquita de Andrade.

_____ (2012). Changing the Focus: From Nature of Science (NOS) to Features of Science (FOS). In: KHINE, M.S.: *Advances in Nature of Science Research*. Dordrecht : Springer.

MAXWELL, James C. (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. **155**, pp.459-512.

McCOMAS, William F. (1998). The principal elements of the nature of science: Dispelling the myths of science. In: McCOMAS, William F. (ed.) *The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp.53-70.

_____ (2005). Teaching the Nature of Science: What Illustrations and Examples Exist in Popular Books on the Subject? Atas do *International History, Philosophy and Science Teaching Conference* (IHPST). University of Leeds. Leeds.

MILLER, Arthur I. (1981). *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*. Massachusetts: Addison-Wesley Publications Company Inc., Advanced Book Program.

_____ (1973) A study of Henri Poincaré's "Sur la Dynamique de l'Électron". *Archive for History of Exact Sciences*, vol. **10** (3-5), pp.207-328.

MINKOWSKI, Hermann (1983 [1908]). Espaço e Tempo. In: LORENTZ, H.A.; EINSTEIN, A. & MINKOWSKI, H.: *O Princípio da Relatividade*. Col. Textos Fundamentais da Física Moderna, vol.I, 3ª ed. Trad. Mário José Saraiva. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

MITTELSTAEDT, Peter (2011). The Problem of Interpretation of Modern Physics. *Science & Education*, vol. **41**, pp.1667-1676.

MOREIRA, Marco A.; MASSONI, N. T. & OSTERMANN, Fernanda (2007). “História e epistemologia da física” na licenciatura em física: uma disciplina que busca mudar concepções dos alunos sobre a natureza da ciência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. **29** (1), pp.127-134.

MORGAN, D. L. & KRUEGER, R. A. (1993). When to use focus groups and why. In MORGAN D. L. (ed.): *Successful Focus Groups: Advancing the State of the Art*. London: SAGE Publications, pp.2-19.

MOURA, Breno Arsioli (2008). *A aceitação da óptica newtoniana no século XVIII: subsídios para discutir a Natureza da Ciência no ensino*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física e Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo.

NEWTON-SMITH, William H. (1996). Realism. In: OLBY, R.C. (ed) *Companion to the history of modern science*. London: Routledge, 181-195.

NIINILUOTO, Ilka (1999). *Critical Scientific Realism*. Oxford: Oxford University Press.

NOLA, Robert & IRZIK, Gürol (2005). *Philosophy, Science, Education and Culture*. Dordrecht: Springer.

NORONHA, Andre B. & GURGEL, Ivã (2012). Ênfases histórias controversas sobre a Teoria da Relatividade Especial em Livros Didáticos. *Anais do XIV Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*. Maresias, São Paulo.

NORONHA, Andre B. & GURGEL, Ivã (2013). Questões não consensuais da natureza da ciência no ensino de ciências: discussões sobre o realismo e antirrealismo das teorias através do ensino de relatividade especial. *Anais do VIII Encontro de Pós-Graduação em Ensino de Ciências*. IQUSP, São Paulo.

NORONHA, André Batista (2011). *Reflexões Sobre Histórias das Origens da Teoria da Relatividade Especial*. Monografia de fim de curso (não publicado). Instituto de Física, Universidade de São Paulo. São Paulo.

NORRIS, Christopher (2007 [2005]). *Epistemologia, conceitos-chave em filosofia*. Trad. Felipe Rangel Elizalde. São Paulo: Editora Artmed. Tradução livre de trechos.

OKASHA, Samir (2002). *Philosophy of Science: A Very Short Introduction*. New York: Oxford Press.

OLIVEIRA, Rilavia A. & SILVA, Ana Paula Bispo (2011). A História da Ciência no Ensino: diferentes enfoques e suas implicações na compreensão da Ciência. *Atas do VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*, Campinas.

OSBORNE, Jonathan & COLLINS, Sue (2001). Pupils' views of the role and value of the science curriculum: A focus-group study. *International Journal of Science Education*, vol. **23** (5), pp.441-467.

OSTERMANN, Fernanda & RICCI, Trieste F. (2002), Relatividade Restrita no Ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. **22** (1), pp.9-35.

PAIS, Abraham (1995 [1982]). *Sutil é o Senhor...: a Ciência e a Vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira.

PANOFSKY, Wolfgang K.H. & PHILLIPS, Melba (2005 [1955]). *Classical Electricity and Magnetism*. 2ª ed. New York: Dover Publications, Inc.

PATY, Michel (1993). *Einstein Philosophe. La physique comme pratique philosophique*. Paris: Presses Universitaires de France.

_____ (2008). *Einstein*. Coleção Figuras do Saber. Trad. Mário Laranjeira. São Paulo: Editora Estação Liberdade.

PEDUZZI, Luiz O. Q. (2005). Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, Maurício (org.) *Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora*. 2ª ed. Florianópolis: EDUFSC, pp.151-170.

PENROSE, Roger (1958). The apparent shape of a relativistically moving sphere. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. **55** (1), pp.137-139.

PESSOA JR, Osvaldo (1993). Filosofia & Sociologia da Ciência. Aula ministrada na disciplina de HG-022 Epistemologia das Ciências Sociais do curso de Ciências Sociais da Unicamp, não publicado. Disponível online: <http://www.filch.usp.br/df/opessoa/Soc1.pdf>, acessado dia 25/2/13.

_____ (2001). *História da Física no Séc. XIX*. Notas de aula da disciplina FIS-724 *Tópicos Especiais de Ensino, Filosofia e História das Ciências*, ministrado na UFBA/UEFS (não

publicado).

_____ (2006). *Conceitos de Física Quântica*. Vols. I & II. Editora da Livraria da Física: São Paulo.

_____ (2011a). *Arquivo lexicográfico 3*. Notas de aula da disciplina *Teoria do Conhecimento & Filosofia da Ciência III*, ministrado na FFLCH-USP. Disponível no site do autor: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/TCFC3-11-Lexico-3.pdf>, acessado dia 21/1/13.

_____ (2011b). *Arquivo lexicográfico 5*. Notas de aula da disciplina *Teoria do Conhecimento & Filosofia da Ciência III*, ministrado na FFLCH-USP. Disponível no site do autor: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/TCFC3-11-Lexico-5.pdf>, acessado dia 21/1/13.

_____ (2011c). *A Controvérsia das Cordas*. Notas de aula da disciplina *Filosofia da Física*, oferecida pela FFLCH-USP e ministrada no IFUSP. Disponível no site do autor: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/Smolin-Polchinski-2.pdf>, acessado dia 21/1/13.

_____ (2011d). *A Ontologia do Eletromagnetismo*. Notas de aula da disciplina *Filosofia da Física*, oferecida pela FFLCH-USP e ministrada no IFUSP. Disponível no site do autor: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/FiFi-11-Cap08.pdf>, acessado dia 21/1/13.

_____ (2011e). *Contexto da Descoberta do Eletromagnetismo*. Notas de aula da disciplina *Filosofia da Física*, oferecida pela FFLCH-USP e ministrada no IFUSP. Disponível no site do autor:

<http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/FiFi-11-Cap07.pdf>, acessado dia 21/1/13.

_____ (2012). *Cinco Interpretações Básicas da Teoria da Relatividade Restrita*. Notas de aula da disciplina *FLF5044 Filosofia da Ciência (Filosofia da Física)*, oferecida pela FFLCH-USP, pós-graduação. Disponível no site:

<http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/TR-Interpretacoes-1.pdf>, acessado dia 22/3/13.

_____ (2013). *Sobre a natureza da “natureza da ciência”*. São Paulo: IFUSP (Seminário, XX Simpósio Nacional de Ensino de Física).

PETKOV, Vesselin (2008). Convencionality of Simultaneity and Reality. In: DIEKS, Dennis (ed): *The Ontology of Spacetime II*. Philosophy and Foundations of Physics, Vol. 4. Elsevier: Amsterdam, pp.175-185.

_____ (2012). *Space and Time. Minkowski's Papers on Relativity* (Introduction). Minkowski Institute Press: Montreal. Disponível em: <http://minkowskiinstitute.org/mip/>.

PIAGET, Jean & GARCIA, R (1984). *Psicogénesis e Historia de la Ciencia*. Cidade do México: Siglo Veintiuno.

PIETROCOLA, Maurício (1993). Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. **10** (2), pp.157-172.

_____ (1999). Construção e Realidade: O Realismo Científico de Mário Bunge e o Ensino de Ciências Através de Modelos. *Investigações e Ensino de Ciências*, vol.4 (3), pp.213-227.

_____ (2010). *Inovação Curricular e Gerenciamento de Riscos Didático-Pedagógicos: o ensino de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea na escola média*. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo (publicação interna), texto para concurso de professor titular. São Paulo.

PLASTINO, Caetano E. (1995). *Realismo e Anti-Realismo Acerca da Ciência: Considerações Filosóficas sobre o Valor Cognitivo da Ciência*. Tese de doutoramento, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo.

_____ (2000). Realismo metafísico e relatividade conceitual. *Cognitio. Revista de Filosofia*, vol. (1), pp.79-93.

POINCARÉ, Henri (1984 [1902]). *A Ciência e a Hipótese*. Trad. M.A. Kneipp. Brasília: EDUnB.

_____ (1904) *O Valor da Ciência*. Trad. Maria Helena Franco Martins. Rio de Janeiro: Contraponto.

_____ (1905) Sur la dynamique de l'électron. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, vol. **140**, pp. 489-493.

PRAIA, João, GIL-PÉREZ, Daniel & VILCHES, Amparo (2007). O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania. *Revista Ciência & Educação*, vol. **13**(2), pp. 141-156.

PSILLOS, Stathis (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. London e New York: Routledge. Disponível online em:

http://www.ciberdigital.net/books/Scientific_Realism_How_Science_Tracks_Truth.pdf, acessado em fevereiro de 2013.

RIBEIRO, Cláudia (2009). *Elétrons inobserváveis e estrelas invisíveis, em torno do problema do realismo em ciência: Bas C. van Fraassen versus Alan Musgrave*. Coleção Thesis 4. Lisboa: Centro de Filosofia das Ciências da Universidade de Lisboa.

ROCHA, Maristela do Nascimento & GURGEL, Ivã (2013). As visões consensual e pluralista da Natureza da Ciência vistas de uma perspectiva Wittgensteiniana: esclarecimentos para

o ensino de ciências. Instituto de Física da Universidade de São Paulo (divulgação e publicação interna).

ROCHE, J. John (1990). *A Critical Study of the Vector Potential*. In: ROCHE, J. John. *Physicists Look Back. Studies in the History of Physics*. Oxford, Linacre College: Adam Hilger, pp. 144-168.

ROZENTALSKI, Evandro; HENRIQUE, Alexandre B. & NORONHA, André B. (2012). Realismo e Antirrealismo Científicos: Pela pluralidade filosófica no Ensino de Ciências. Atas do II *International History and Philosophy of Science Teaching Group Latin America*, Universidad de Mendoza, Mendoza, pp.1-22.

SCHLICK, Moritz (1920). *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation*. Trad. Henry L. Brose. New York: Oxford University Press. Tradução livre de trechos.

_____ (1980 [1932]) Positivismo e Realismo. In: *Coletânea de textos/Moritz Schlick, Rudolf Carnap*. Trad. Luiz João Baraúna e Pablo Rubén Mariconda. São Paulo: Abril Cultural, pp. 39-62.

SHAPIN, Steven (2012 [2010]). *Nunca Pura. Estudos Históricos de Ciência como se Fora Produzida por Pessoas com Corpos Situadas no Tempo, no Espaço, na Cultura e na Sociedade e Que Se Empenham por Credibilidade e Autoridade*. Cap. 3: Como Ser Anticientífico. Trad. Erick Ramalho. Col. Scientia. Belo Horizonte: Fino Traço Editora.

SILVA, Cibelle C. (2002). *Da força ao tensor: evolução do conceito físico e da representação matemática do campo eletromagnético*. Tese de Doutorado, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade de Campinas.

SILVA, Cibelle C. & MARTINS, Roberto de A. (2003). William Thomson e o uso de analogias e modelos em eletromagnetismo. In: RODRÍGUEZ, Victor & SANVATICO, Luis (eds.). *Epistemología e Historia de la Ciencia. Selección de Trabajos de las XIII Jornadas*, vol. 9. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, pp. 401-408.

SILVEIRA, Fernando L. (1979). Construção e validação de uma escala de atitude em relação a disciplinas de Física Geral. *Revista Brasileira de Física*, vol. **9** (3), pp. 871-878.

SILVEIRA, Fernando L. & PEDUZZI, Luiz O. Q. (2006). Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. **23** (1), pp.26-52.

STACHEL, John (1999). History of Relativity. In: BROWN, Laurie M.; PAIS, Abraham & PIPPARD, Sir Brian (eds): *Twentieth Century Physics*, Volume I. New York: Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia and American Institute of Physics Press.

STACHEL, John (org. ed.) (2005 [1998]). *O ano miraculoso de Einstein. Cinco artigos que mudaram a face da física*. 2ª Ed. Trad. Alexandre Carlos Tort. Rio de Janeiro: EDUF RJ.

_____ (2005). O manuscrito de Einstein de 1912 como pista para o desenvolvimento da teoria da relatividade restrita. Trad. Osvaldo Pessoa Jr. *Scientia Studia*, vol. **3** (4), pp.584-596.

SZEKELY, Laszlo (2009). Brief reflections on the clock paradox in terms of “possible words”, “real” and “reality”, or “where is the cube”?. Atas do *Physical Interpretations of Relativity Theory: Mathematics, Physics and Philosophy In the Interpretations of Relativity Theory*. Budapeste, Hungria, pp.1-7.

SOKAL, Alan (1996). Transgressing the boundaries: towards a hermeneutics of quantum gravity. *Social Text*, vol. **46-47**, pp.217-252.

TEIXEIRA, Elder Sales; FREIRE JR, Olival & EL-HANI, Charbel Niño (2009). A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da ciência de estudantes de física. *Ciência & Educação*, vol.**15** (3), pp.529-556.

TERREL, James (1959). Invisibility of Lorentz Contraction. *Physical Review*, vol. **116** (4), pp.1041-1045.

TIME (1999). *Person of the century: Albert Einstein*. Disponível on-line: <http://www.time.com/time/printout/0,8816,993017,00.html>, acessado dia 24/06/12.

TONNELAT, Marie-Antoinette (1971). *Histoire du Principe de Relativité*. Paris: Flammarion éditeur.

VAN FRAASSEN, Bas (2007 [1980]). *A Imagem Científica*. Trad. Luiz Henrique de Araújo Dutra. São Paulo: Editora EDUNESP, Discurso Editorial.

VANNUCCHI, Andrea I. (1994). *História e filosofia da ciência: Da teoria para a sala de aula*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo.

VIDEIRA, Antonio A. P. (2006). Breves considerações sobre a natureza do método científico. In: SILVA, Cibelle. C. (org.): *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, pp. 24-40.

VILAS BOAS, Anderson; SILVA, Marcos Rodrigues; PASSOS, Marinez Meneghello & ARRUDA, Sérgio de Mello (2013). Historia da Ciência e Natureza da Ciência: Debates e Consensos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. **30** (2) pp.287-322.

VILLANI, Alberto (1981). *O Confronto Lorentz-Einstein e suas Interpretações IV - Uma Interpretação Sociológica*. São Paulo: Preprint IFUSP P-264, p.1-22.

VILLANI, Alberto & ARRUDA, Sérgio M. (1998). Special Theory Relativity, Conceptual Change and History of Science. *Science & Education*, vol. **7**, pp.85-100.

WHITAKER, M.A.B. (1979). History and quase-history in physics education. Partes I & II. *Physics Education*, vol. **14**, pp.108-112, pp.239-242.

WHITTAKER, Edmund T. (1953). *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Volume II. New York: Humanities Press.

WOODRUFF, A. E. (1968). *The Contributions of Hermann von Helmholtz to Electrodynamics*. *Isis*, vol. **59** (3), pp.300-311.

WORRALL, John (1994). How to Remain (Reasonably) Optimistic: Scientific Realism and the Luminiferous Ether. *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol.I. Contributed Papers, pp.334-342. ZAHAR, Elie (1973a). Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. **24** (2), pp.95-123.

_____ (1973b). Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II). *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. **24** (3), pp.223-262.

ZANETIC, João (1989). *Física também é cultura*. Tese de doutorado, Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo.

_____ (2007). *Evolução dos Conceitos da Física*. Notas de aula da disciplina Evolução dos Conceitos da Física, ministrada no Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Publicação interna.

ZATERKA, Luciana (2006). Corpuscularismo e experiência: Francis Bacon e Robert Boyle. In: ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria; BELTRAN, Maria Helena Roxo (org.): *O saber fazer e seus muitos saberes: experimentos, experiências e experimentações*. São Paulo: EDUC/FAPESP, vol. **1**, pp. 145-170.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA, INSTITUTO DE QUÍMICA, INSTITUTO DE
BIOCIÊNCIAS, FACULDADE DE EDUCAÇÃO

**INTERPRETANDO A RELATIVIDADE ESPECIAL:
Discutindo o Debate Realismo e Antirrealismo Científicos no
Ensino de Ciências**

André Batista Noronha

APÊNDICES

São Paulo

2014

A Questionário

O questionário está disponível online, mesmo para visitantes, na página Moodle da disciplina¹. Abaixo estão os enunciados das catorze questões do questionário na ordem de publicação na página.

Questão teste

Contextualização: Do ponto de vista do que é possível observar daqui da Terra, o modelo planetário geocêntrico de Ptolomeu é equivalente ao modelo planetário heliocêntrico de Copérnico², isto é, eles têm praticamente as mesmas previsões empíricas.

Afirmação: Contudo, por mais que o modelo de Ptolomeu funcione bem para prever a posição dos planetas, não se pode chamá-lo de “verdadeiro”.

Questão #1 (Antirrealismo de Teorias)

Contextualização: Logo nas primeiras páginas de seu livro Nuclear Physics, Heisenberg enuncia o que chama das condições essenciais para o surgimento da filosofia e da ciência entre os antigos gregos:

Primeiro, a questão acerca da origem de todas as coisas, segundo, a necessidade de solucionar tal questão de modo racional, sem a necessidade de explicações místicas e mitológicas, e terceiro, o postulado de que é possível reduzir toda a variedade de fenômenos observados, a um único princípio organizador.

Tales de Mileto, segundo Heisenberg, seguia essas condições e teria sido o “primeiro cientista da humanidade”, isto é, aquele primeiro indivíduo que teria obtido conhecimentos mais profundos sobre o mundo físico. Como discutido em aula, a hipótese (ou crença) de que o mundo é “ordenado”,

¹<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=491>

²Uma proposta para futuras reaplicações deste questionário é opor as teorias de Copérnico e Tycho Brahe (ao invés de Ptolomeu).

no sentido de possuir leis naturais inatas e imutáveis, parece ser minimamente razoável, e provavelmente era uma das bases do pensamento de Tales. Caso contrário, se as leis fossem mutáveis, talvez não houvesse filosofia e ciência na forma como conhecemos.

Afirmção: Entretanto, ainda que acreditemos que o mundo é “ordenado”, que ele possua leis inatas e imutáveis, nada nos garante de forma definitiva que é possível se conhecer a realidade deste mundo nos mais íntimos detalhes.

Questão #2 (Antirrealismo de Entidades e Processos)

Contextualização: Uma imagem comumente construída hoje em dia sobre Newton é aquela de um cientista (embora esse termo não existisse na época) estritamente racional, livre de especulações, crenças religiosas ou místicas, com asserções sempre apoiadas em fatos experimentais. Na verdade, o que muitos livros-texto de física fazem hoje é enxugar de Newton, tirando-lhe qualquer traço de Alquimia, Teologia e misticismo, que foram por vezes centrais nos argumentos de suas teorias.

De qualquer forma, é inegável que suas teorias (da dinâmica dos corpos pontuais e da gravitação) apresentam um sucesso empírico enorme, isto é, preveem e descrevem satisfatoriamente muitos fenômenos físicos.

Mas caso tivéssemos de ser verdadeiramente fiéis à física newtoniana, teríamos de aceitar, junto com o pacote de suas equações, ideias relacionadas a poderes ocultos, vitalismo da matéria, entre outras. Claramente, pouquíssimos ou nenhum físico atual aceitam essas ideias, restringindo-se a usar somente as equações.

Afirmção: De fato, não precisamos acreditar nas entidades e processos não diretamente observáveis postulados por teorias, tanto daquelas do passado (como o vitalismo da matéria, o calórico, etc) como das atuais (quarks, supercordas, etc). Basta que elas funcionem.

Questão #3 (Realismo de Teorias)

Contextualização: Zaterca, na conclusão de seu artigo Alguns aspectos da teoria da matéria: atomismo, corpuscularismo e filosofia mecânica, escreve:

Por fim, é interessante pensarmos que embora os termos átomo e atomismo tenham sido preservados ao longo da história, por mais de 25 séculos, eles possuem acepções e conotações completamente distintas. E não poderia ser diferente! Afinal, a visão de natureza e a perspectiva de ciência dos atomistas antigos é completamente diferente da dos modernos. (...) Enfim, percebemos que uma mesma palavra, um mesmo vocábulo ganha, ao longo da história, significados completamente distintos. Este é o caso do que ocorreu com o termo atomismo.

Em cada época parece ter se manifestado diferentes visões de natureza, de forma que o átomo dos antigos gregos não é o mesmo átomo dos modernos, que também não é o mesmo átomo com que os cientistas trabalham hoje em dia. Contudo, ao menos uma semelhança entre todas estas ideias de

átomo parece existir: todos (antigos atomistas, modernos e cientistas contemporâneos) se referem a átomo como algo muito pequeno, uma minúscula parte do mundo.

Afirmção: A história da ciência mostra que cada vez mais estamos conhecendo mais coisas sobre a estrutura do mundo (como nosso conhecimento sobre os átomos), o que nos permite concluir que cada vez mais nossas teorias estão sucessivamente se aproximando da verdade.

Questão #4 (Realismo de Entidades e Processos)

Contextualização: Muitas entidades e processos postulados por nossas teorias atuais são diretamente inobserváveis. Isto é, só conseguimos ver um elétron indiretamente, falamos que ele esteve numa câmara de bolhas em razão do rastro que deixa. O que sucede é que, grande parte dos cientistas de hoje têm confiança na existência dos elétrons, tanto por causa dos inúmeros experimentos em que ele está (em tese) envolvido como pela necessidade teórica que ele tem para teorias mais gerais, como o modelo padrão da física de partículas elementares. O calórico foi uma entidade por muito tempo considerada como existente por parte da comunidade científica nos séculos XVIII e XIX, principalmente pelo fato de descrever bem um bom conjunto de fenômenos térmicos. A Teoria do Calórico foi uma teoria que transcendia os fenômenos aparentes, isto é, se propunha a descrever fenômenos macroscópicos com base em uma entidade que não observamos diretamente. Seus adeptos tinham a pretensão de descrever a realidade do mundo. Como discutido em aula, o preço desse tipo de pretensão em explicar o que está além das aparências é o (tão temido) risco de estar errado. Atualmente, essa pretensão é adotada por teóricos das supercordas, teóricos da gravitação quântica em loop, entre outros.

Afirmção: Ainda que corramos certo risco de estarmos errados, podemos dizer que certas entidades diretamente inobserváveis como átomos e elétrons realmente existem, pois caso não existissem o grande sucesso empírico de nossas teorias seria um milagre (no sentido de que elas descreveriam coisas que não existiriam e ainda assim resultariam em boa concordância com os fatos).

Questão #5 (Realismo de Entidades e Processos)

Contextualização: Como se sabe, Einstein dispensou o éter eletromagnético em seu artigo de 1905, em parte por ele possibilitar a noção de movimento e repouso absoluto, conceitos que causavam-lhe aversão do ponto de vista filosófico. Esta aversão teria nascido em parte por suas ponderações sobre leituras de autores como Ernst Mach (1838-1916), Henri Poincaré (1854-1912) e David Hume (1711-1776). Entretanto, anos mais tarde, em um contexto científico e filosófico da vida de Einstein muito diferente daquele dos primeiros anos do século XX, ele retomou a ideia de éter na teoria generalizada, contudo, com um significado diferente daquele das teorias pré-relativísticas. Em uma carta a Lorentz datada de 1916, Einstein escreveu:

Eu concordo com você que a teoria geral da relatividade está mais próxima à hipótese do Éter que a teoria especial. Esta nova teoria do Éter, contudo, não viola o princípio

da relatividade, pois o estado deste $g_{\mu\nu} = \text{Éter}$ não deve ser aquele de um corpo rígido com um estado de movimento independente, mas sim cada estado de movimento deve ser uma função da posição determinado por meios materiais.

E quatro anos mais tarde, em uma palestra na Universidade de Leyden em razão de uma homenagem a Lorentz, Einstein proferiu ao final:

Recapitulando, podemos dizer que de acordo com a teoria geral da relatividade o espaço é dotado de qualidades físicas; nesse sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a teoria geral da relatividade espaço sem éter é impensável; pois em tal espaço não haveria propagação da luz, tão menos a possibilidade da existência de padrões espaciais e temporais (régua e relógios) e, portanto, nem intervalos espaço-temporais no sentido físico. Entretanto, esse éter não deve ser pensado como possuidor de qualidades características de um meio ponderável [...] A ideia de movimento não deve ser-lhe aplicada.

Afirmção: A postura de Einstein nos mostra que, desde que não firmamos leis fundamentais de nossas melhores teorias (como o princípio da relatividade das teorias relativísticas), podemos (com certa margem de segurança) admitir a existência de entidades diretamente inobserváveis na natureza, como o éter.

Questão #6 (Antirrealismo de Teorias)

Contextualização: Como discutido na última aula, o famoso discurso de Helmholtz sobre a Conservação da Força é por vezes tido como a gênese do Princípio de Conservação de Energia. Neste quadro, o que está por trás dos diferentes fenômenos naturais (térmicos, elétricos, magnéticos, mecânicos, etc) é algo que não é propriamente material, como um fluido ou partícula. A herança da filosofia natural para esse episódio histórico parece ter sido essa: o que une os diferentes fenômenos é algo não-mecânico, não-material, chamado Força (para nós hoje, Energia).

Mesmo hoje em dia, quando se procura uma definição razoável de Energia, não raro encontramos uma “definição matemática”, sugerindo esse seu caráter não-material. Richard Feynman (1918-1988), em uma passagem de *The Feynman Lectures on Physics*, afirma que “existe uma certa quantidade, que nós chamamos de energia, que não muda nas multiformes transformações da natureza”, ou, “existe uma quantia numérica que não se altera quando algo acontece”. Contudo, Henri Poincaré (1854-1912), há mais de cem anos, nos alertava para um possível problema no princípio, atacando o fato de que não dizemos o que a Energia é, mas como ela se comporta em transformações naturais:

Só nos resta um enunciado para o princípio da conservação da energia: existe alguma coisa que permanece constante. Sob essa forma, o enunciado está além do alcance da experiência e se reduz a uma espécie de tautologia (*La Science et l'Hyphothèse*, 1902).

De uma forma bastante simplificada, a visão de mundo de Poincaré se resumia na seguinte proposição: o mundo físico possui diferentes “objetos”, não podemos conhecê-los “em si” (por exemplo, saber de forma definitiva o que é um átomo), mas podemos muito bem saber, por meio da Ciência, como eles se relacionam entre eles (por exemplo, as relações entre átomos, interações interatômicas, moleculares).

Afirmção: Supondo que é razoável a tese de que não sabemos dizer o que precisamente é Energia sem fazermos menção a transformações ou defini-la simplesmente como uma “quantidade”, é sensato afirmar que a Ciência às vezes nos proporciona uma “visão manca” da realidade, por nos informar somente sobre as “relações entre objetos físicos” e não sobre “os objetos físicos em si”.

Questão #7 (Realismo de Teorias)

Contextualização: Como discutido em aula, muitas investigações mais concretas acerca da natureza dos fenômenos elétricos e magnéticos se deram nos séculos XVIII e XIX. Em alguns casos, como no programa de Laplace na França, se demandava inclusive uma “matematização dos fenômenos” por meio da modelagem teórica. Contudo, é curioso notar como os estudiosos dessas épocas apreendiam esses fenômenos criando conceitos bastante diferentes daqueles que hoje nós usamos.

Benjamin Franklin (1706-1790) e outros, por exemplo, concebia os fenômenos elétricos e magnéticos por meio da ideia de “fluidos” (“fluido elétrico” e “fluido magnético”), que estariam em maior ou menor quantidade em todos os corpos materiais. Hans Christian Oersted (1777-1851) usou ideias semelhantes, argumentando que uma “virtude magnética” manifestava-se entre os “pólos” de um fio, que interferia na orientação das agulhas magnéticas de bússolas nos arredores. André-Marie Ampère (1775-1836), por outro lado, construiu um modelo via formalização matemática da interação entre fios conectados a pilhas voltaicas. Sua fórmula é ainda utilizada (na verdade, usamos “versões atuais” dela, com outras notações e formalismo), porém não se interpreta os fenômenos como Ampère fazia.

Posteriormente, como se sabe, Maxwell (não somente ele) também modelou matematicamente os agentes primários dos fenômenos elétricos e magnéticos (o que hoje chamamos de campos). As “quatro” equações de Maxwell na verdade eram vinte, e só foram escritas na forma vetorial que hoje estamos habituados por Oliver Heaviside (1850-1925) (o mesmo da função θ de Heaviside). A interpretação de Maxwell dos fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos, se baseava na ideia de éter eletromagnético, sendo que a manifestação dos campos (\mathbf{B} e \mathbf{E}) e potenciais (ϕ e \mathbf{A}) se relacionavam às tensões desse meio. As equações de Maxwell ficaram, mas não sua interpretação.

Afirmção: Esses exemplos nos autorizam a concluir que os modelos matemáticos, além de úteis, nos permitem desvelar a fundo aspectos íntimos da realidade que não observamos diretamente, ainda que nossas interpretações sobre eles (modelos matemáticos) se mostrem inadequadas algum tempo depois.

Questão #8 (Antirrealismo de Teorias)

Contextualização: Como discutido em aula, as analogias formais e materiais tiveram um papel essencial no desenvolvimento de muitas teorias físicas, principalmente nos séculos XVIII e XIX. Os modelos mecânicos típicos dos físicos britânicos no século XIX são um forte exemplo do uso de analogias. Do outro lado do Canal da Mancha, um importante físico e filósofo francês, Pierre Duhem (1861-1916), era crítico tanto do “exagero interpretacional” dos modelos mecânicos como do “exagero algébrico”, típico de outras comunidades científicas da época (como a alemã e a francesa). Sem desmerecer o papel da matemática na física, Duhem reforçava que “o físico não é um algebrista”:

Uma equação não carrega em si somente letras; tais letras simbolizam magnitudes físicas que devem ser mensuráveis experimentalmente ou formadas por outras magnitudes mensuráveis. Portanto, se é dado ao físico somente a equação, ele não a apreende. Pois a essa equação precisam-se juntar regras pelas quais as letras que a equação carrega correspondam às magnitudes físicas que elas representam. (...) [O conjunto de regras] é a teoria que as equações resumem em uma forma simbólica: em física, uma equação, separada da teoria que leva a ela, não tem sentido (Duhem, 1902).

Entretanto, o físico parece muitas vezes preso entre o “exagero interpretacional” e o “exagero algébrico”. O exemplo do átomo fornece um indício disto.

Como visto em outras aulas, existiram outros modelos de átomo, inclusive alguns baseados em analogias materiais (minúsculas esferas perfeitas, bolas de bilhar, pudim de passas, entre outros). Pelo fato de não podermos observar diretamente os átomos, somos levados (ou, talvez obrigados) a criar “imagens” do que seria átomo. Dizer que o átomo é uma bola de bilhar é claramente um “exagero interpretacional”. Porém, o que acontece se, sendo muito rigorosos, tentarmos dizer “o que é átomo” sem fazer uso de analogias materiais? Entre outras possibilidades, tendemos a cair em equações, e no limite de um “exagero algébrico”, alguns de nós sentiriam tentação em dizer que o átomo de hidrogênio é:

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n(n+l)!}} e^{\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) Y_l^m(\theta, \phi)$$

Mas, segundo Duhem, essa equação não faz sentido sem uma teoria apoiando-a. Logo, ainda segundo Duhem, nossa concepção de átomo depende fortemente das teorias que estamos usando.

Afirmção: De forma geral, talvez nunca tenhamos um conhecimento estável sobre “o que é o átomo”, pois nossas teorias que o representam estão quase sempre sujeitas a mudanças, reformulações, adaptações, ou ao abandono.

Questão #9 (Antirrealismo de Entidades e Processos)

Contextualização: Em 1911, questionado sobre a realidade física da contração em sua teoria em comparação com a abordagem de Lorentz, Einstein afirmou:

O autor injustificadamente afirma que há uma diferença entre a abordagem de Lorentz e a minha quanto aos fatos físicos. É confusa a questão de a contração de Lorentz realmente existir ou não. Não existe realmente, na medida em que não existe para um observador que se move [com a régua]; existe realmente no sentido em que pode, em princípio, ser demonstrada por um observador em repouso.

A questão da realidade dos fenômenos relativísticos causou (e ainda causa) estranhamento principalmente entre aqueles que não têm familiaridade com a física, ou mais especificamente, com as teorias relativísticas. Por outro lado, muitos físicos e estudiosos tentaram esclarecer a questão, colocando a questão da “realidade” em debate. Nestas ocasiões, os argumentos quase que naturalmente transcendem o conhecimento científico, tornando-se ao mesmo tempo um debate também filosófico.

Afirmção: As discussões acerca do debate da “realidade” da contração são complicadas e desnecessárias, sendo que é mais importante estudarmos matematicamente os efeitos relativísticos, não havendo a necessidade de acreditarmos ou não em uma “contração real”.

Questão #10 (Realismo de Entidades e Processos)

Contextualização: A questão da realidade das entidades e processos físicos é antiga, estando presente em diversos momentos importantes da História da Física. Ela foi presente, por exemplo, no momento em que Copérnico propôs o modelo heliocêntrico. Sua interpretação realista foi contraposta ao instrumentalismo de Andreas Osiander (1498-1552) que defendia que se deveria fazer uso da teoria de Copérnico apenas para fins práticos, sem o comprometimento com a realidade ou não do modelo heliocêntrico. De modo semelhante, o realismo metafísico do espaço por Isaac Newton (1643-1727) se opôs ao ceticismo de Gottfried Leibniz (1646-1716), e o realismo sobre átomos de Max Planck (1858-1947) era uma postura diferente do empirismo sensualista de Ernst Mach (1838-1916). Outro exemplo são as críticas realistas de Albert Einstein (1879-1955) à interpretação ortodoxa da Mecânica Quântica originada por Niels Bohr (1885-1962).

Os momentos de grande mudança na História das Ciências (como os descritos anteriormente) em geral causam ceticismo, pois indicam que o que considerávamos real mudou. Assim, passamos a suspeitar de nossa capacidade em descrever a realidade. Contudo, um realista considera que a cada mudança estamos avançando na compreensão do que seja a realidade (mesmo aceitando que nunca poderemos a descrever completamente).

Afirmção: De fato, muitas entidades diretamente inobserváveis da física (como os elétrons, os quarks, o espaço-tempo e inúmeros outros) precisam ser consideradas como reais, pois caso contrário seria uma “incômoda coincidência” o fato do “uso teórico” destas entidades se mostrar tão adequado para se descrever os fenômenos físicos.

Questão #11 (Antirrealismo de Teorias)³

Contextualização: O professor Edward Harrison, em sua obra *Cosmology: The Science of the Universe* (1981), faz um alerta sobre o uso que comumente fazemos da palavra “universo”:

A palavra grandiosa Universo [...] quando utilizada sozinha, sem a especificação de que modelo de Universo temos em mente, pode passar a impressão de que o Universo é uma entidade conhecida.

Isto é, Universo com “U” se refere, nessa acepção, à realidade, a partir da qual nossa interação gera uma base empírica sobre a qual os diferentes modelos (teóricos) são construídos. Já universo com “u” refere-se a um modelo de Universo, criado num certo contexto, modificado pelos seres humanos, que um dia poderá ser eventualmente descartado. Sendo assim, podemos definir cosmologia como o “estudo de universos”.

Numa visão realista, o Universo é tudo o que existe. Já numa visão mais cética, o universo é tudo o que podemos conhecer, pois não temos acesso à realidade última. Se alguém levar o “Realismo de Universo” ao extremo, esta pessoa tenderia a acreditar que os modelos cosmológicos são a própria realidade, sem considerar que toda teoria científica é uma representação da natureza e não a própria natureza. Se alguém, por outro lado, levar o “ceticismo de universo” ao extremo, esta pessoa tenderia a acreditar que universo seria apenas uma ideia, um nome, ou uma invenção arbitrária dos seres humanos, sem qualquer relação segura com alguma suposta realidade externa.

Afirmção: Faz mais sentido falar em “universo” do que em “Universo”, pois provavelmente nunca seremos aptos para conhecer a fundo todos os inumeráveis mistérios do cosmos.

Questão #12 (Realismo de Teorias)

Contextualização: A teoria quântica sempre suscitou discussões sobre a realidade e a nossa capacidade de compreendê-la plenamente. Na interpretação ortodoxa da teoria, cuja criação é atribuída a Niels Bohr (1885-1962), a preocupação com a compreensão plena da realidade é secundária (quando não desprezada). Uma citação de Werner Heisenberg (1901-1976) de seu livro *Física e Filosofia* ilustra em parte esta postura:

[A] ideia de que um mundo objetivo real no qual suas menores partes existem objetivamente no mesmo sentido que pedras e árvores existem, independentemente se observamo-las [estas menores partes] ou não (...) é impossível.

³Na turma do noturno, essa questão foi aplicada na décima terceira aula, em razão da inversão dos temas de aula.

A postura de Heisenberg pode ser entendida como “antirrealista”. Isto é, segundo a interpretação ortodoxa (que nos é apresentada principalmente pelos livros didáticos), não faz sentido pensar em realidade (no “mundo quântico”) sem que ela seja de alguma forma observada. Uma visão quase diametralmente oposta era a de Albert Einstein (1879-1955), que no fim de sua juventude e durante seus “anos de maturidade” defendeu que a teoria quântica fornecia uma descrição incompleta da realidade:

Estou, de fato, firmemente convencido de que o caráter essencial estatístico da teoria quântica no estado em que ela atualmente se encontra deve ser atribuído exclusivamente ao fato de que ela [teoria quântica] opera com uma descrição incompleta dos sistemas físicos.

A postura de Einstein pode ser entendida como “realista”. Para o realismo de Einstein, faz sentido pensar em realidade (no “mundo quântico”) mesmo que ela não seja observada. E mais, essa realidade deve ser inteligível.

Uma forma de descrever de forma completa os sistemas físicos no regime quântico é por meio da introdução de variáveis ocultas (por exemplo, funções de posição e momento definidas para qualquer instante). Uma teoria quântica de variáveis ocultas foi construída na década de 1950 por David Bohm (1917-1992), inspirado pela interpretação de Louis de Broglie (1892-1987) da função de onda Ψ . Por algumas razões (entre elas, razões “não científicas”), a interpretação de Bohm é muito pouco praticada hoje em dia.

Em sua obra *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (uma tradução livre seria “O que se pode e o que não se pode falar em Mecânica Quântica”), John Bell (1928-1990) registrou sobre a teoria de Bohm:

(...) em 1952 eu vi o impossível ser feito. Estava nos artigos de David Bohm. Bohm mostrou explicitamente como parâmetros [ocultos] podiam ser de fato introduzidos na mecânica ondulatória não relativística, com a ajuda destes a descrição indeterminista poderia ser transformada em uma descrição determinista. E o mais importante, em minha opinião, era que a subjetividade da versão [interpretação] ortodoxa, a referência necessária ao observador, poderia ser eliminada.

Afirmção: É sensato esperar que um dia, uma teoria quântica de variáveis ocultas, ou um formalismo completamente diferente do que atualmente possuímos, nos dê uma compreensão mais fiel e pormenorizada das entidades e processos inobserváveis do “mundo quântico”.

Questão #13 (Realismo de Entidades e Processos)⁴

⁴Na turma do noturno, essa questão foi aplicada na décima primeira aula, em razão da inversão dos temas de aula.

Contextualização: César Lattes (1924-2005) foi, indiscutivelmente, um dos maiores cientistas brasileiros. Sua importância transcende a “ciência de laboratório”, tomando direções políticas, sociais e institucionais, como no desenvolvimento de Institutos de Física na Unicamp e UFMT⁵. Era bastante admirado por pessoas próximas, alunos e colegas. Ao final de sua vida, deu declarações polêmicas (não que não as tenha feito ao longo de sua vida) sobre a teoria da relatividade, acusando Einstein de plágio. Há também uma curiosa menção sobre os quarks em uma entrevista concedida ao Jornal da Unicamp, publicada em junho de 2002:

Não gosto dos quarks. Eles jamais foram detectados. São pura idealização. A gente aprende o que é natureza experimentando, não idealizando.

Naturalmente, muitas pessoas do meio científico reagiram negativamente à declaração de Lattes. Não é difícil imaginar que um dos argumentos mais comuns destas pessoas foi de que grande parte das inovações tecnológicas adveio, ainda que indiretamente, de muitas teorias científicas que envolvem um alto grau de “idealização”, como a Mecânica Quântica e a Relatividade Geral.

Afirmção: Ao contrário do que afirmou Lattes, de fato o (incrível) sucesso empírico da ciência atual nos permite dizer que quarks e outras entidades inobserváveis devem mesmo existir.

Questão #14 (Antirrealismo de Entidades e Processos)

Contextualização: O “espaço vazio” está sujeito a flutuações quânticas! Essa talvez seja umas das mensagens mais espetaculares e também mais misteriosas da física de partículas contemporânea.

O conceito de “vácuo quântico” tem suas origens na década de 1930, quando se tentou conciliar a teoria da relatividade restrita com a teoria quântica de campos. O trabalho dos físicos Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979), Julian Schwinger (1918-1994), Richard Feynman (1918-1988) e Freeman Dyson (1923-), que elaboraram o que hoje chamamos de Teoria da Eletrodinâmica Quântica (ou QED, como é conhecida em língua inglesa), foi fundamental para a consolidação do conceito de “vácuo quântico”, que passou a ser parte integrante da física a partir da segunda metade do século passado.

Impressionantemente, é possível “medir” experimentalmente manifestações dos “vácuos quânticos” (mar de quarks, mar de elétrons, mar de Higgs, entre outros). Uma destas manifestações causaria o que é conhecido como “Efeito Casimir”:

Em 1948, Hendrik Casimir previu um fascinante efeito cuja explicação envolve o conceito de vácuo quântico. O efeito envolve duas placas perfeitamente condutoras (mas sem carga elétrica) que são colocadas próximas e paralelas. A previsão é que haverá uma atração entre as placas, bem maior do que a atração gravitacional. A explicação é que a cavidade criada entre as placas suprime certos frequências de oscilação do vácuo,

⁵Vale adicionar, para futuras reaplicações, seu papel para o desenvolvimento da CBPF.

de forma que a pressão que o vácuo externo exerce sobre as placas acaba se tornando maior do que a pressão interna (onde certas ondas foram eliminadas pelas placas). Em 1997, Steven Lamoreaux confirmou experimentalmente o efeito Casimir. Tal efeito é hoje um problema para a construção de dispositivos de nanotecnologia. (Pessoa Jr.)

Como comenta ainda Pessoa Jr, a energia contida no vácuo poderia estar associada à “energia escura” prevista pelas teorias cosmológicas atuais. Discute-se também se seria possível extrair energia do vácuo para fins humanos, mas o consenso entre a maioria dos cientistas é que isso não é possível. De qualquer forma, estudos sobre os “vácuos quânticos” geram ainda muitas questões de fronteira na física contemporânea.

Outra questão importante, mas desta vez de natureza metacientífica, refere-se à crença que os físicos têm sobre essas entidades que não são observáveis de forma direta. É claro que muitas das previsões teóricas feitas por grandes teorias (como a Cromodinâmica Quântica e Eletrodinâmica Quântica) são verificadas experimentalmente, o que aumenta a confiança sobre a “verdade” delas. A suposta⁶ detecção do Bóson de Higgs seria um exemplo disso.

Contudo, ao longo da história da ciência, muitas entidades inobserváveis diretamente foram abandonadas, sendo que alguns “elementos essenciais” delas permaneceram. Um exemplo muito conhecido era o éter de Maxwell: este construiu suas equações, colocando os conceitos de carga e corrente de forma quase completamente tributária aos estados macroscópicos do éter. Como se sabe, o éter de Maxwell foi abandonado, mas suas equações (que seriam “elementos essenciais”) ficaram.

Afirmção: O conceito (bastante estranho) de “vácuo quântico” não precisa ser necessariamente levado a sério. É um conceito útil, no sentido de que tudo parece acontecer como se ele (“vácuo quântico”) estivesse realmente lá. Mas dizer, de forma segura, que essa entidade é real está além do que a Ciência pode afirmar.

⁶Em razão dos resultados anunciados por pesquisas no LHC sobre a detecção do bóson, a palavra ‘suposta’ parece ser inadequada. Para futuras reaplicações do questionário, é interessante reescrever a frase, por exemplo, como: “A detecção do Bóson de Higgs, anunciada após experimentos e estudos realizados no LHC, seria um exemplo disso”.

B Tabela de respostas dadas ao questionário

Os dados na tabela exposta a seguir foram coletados por meio do sistema Moodle, que gerava um arquivo planilha XLS (extensão do *MS Excel*) a partir das respostas dos estudantes realizadas online ao longo das semanas de aula. Em seguida, em função do caráter do enunciado da questão, as respostas opinativas foram quantificadas, conforme discutido no capítulo 5. Estão expostas somente as respostas dos vinte e um estudantes que responderam as catorze questões. Aqueles convidados para o grupo focal estão identificados por algarismos numéricos.

As siglas RT, ÑRT, RE e ÑRE significam, respectivamente, Realismo de Teorias, Antirrealismo de Teorias, Realismo de Entidades e Processos e Antirrealismo de Entidades e Processos. As questões 11 e 13 foram aplicadas em momentos diferentes para cada turma (diurno e noturno). Nas respostas quantificadas já se considera a assinatura, cuja regra de aplicação foi descrita no capítulo 5.

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
Identificação	ÑRT	ÑRE	RT	RE	RE	ÑRT	RT	ÑRT	ÑRE	RE	ÑRT	RT	RE	ÑRE
Estudante A	-1	0	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	1	1	0,5	-0,5	1	0,5	1
Estudante B	-0,5	-0,5	0,5	1	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-1	0,5	0,5	1	0,5	-0,5
581	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0
Estudante C	-0,5	0,5	1	1	1	-1	1	0,5	1	0,5	-0,5	1	1	1
Estudante D	-0,5	0,5	0,5	1	0,5	-0,5	0,5	0,5	1	1	-0,5	0	1	0,5
Estudante E	-1	0	0,5	1	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	1	0,5	1	0,5	-0,5
Estudante F	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	-0,5
Estudante G	-1	0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1	0,5	0,5	0,5	-0,5
Estudante H	-1	-0,5	-0,5	0,5	1	-1	-0,5	0,5	1	0	0	0	0,5	-0,5
033	-1	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	1	1	0,5	-1	-0,5	1	0	-1
Estudante I	-0,5	-0,5	0,5	0,5	1	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-1	1	-0,5	-0,5
583	-1	-0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	-0,5	-0,5	1	-1	0,5	-1
Estudante J	-1	-0,5	1	1	0	0,5	0,5	-0,5	0,5	1	-0,5	0,5	1	0,5
Estudante K	-1	-0,5	0,5	0,5	1	-1	0,5	-1	0,5	-0,5	-0,5	1	0	0,5
Estudante L	-0,5	1	0,5	0,5	0,5	-1	-1	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5
Estudante M	-1	-0,5	0,5	0,5	0,5	-1	1	-1	0,5	1	-0,5	-0,5	0,5	0,5
201	-0,5	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	1	-1
Estudante N	-1	-0,5	1	1	0,5	-0,5	1	1	1	1	0,5	1	0,5	-0,5
Estudante O	0	0,5	-0,5	0,5	0	0,5	0	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	1	-0,5
893	-1	1	-1	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5
Estudante P	-1	0	-0,5	-1	1	-1	0,5	-0,5	1	1	-0,5	0,5	0,5	-1
942	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	1
Estudante Q	-1	0,5	0,5	0,5	-1	-1	0,5	-1	-0,5	0,5	-0,5	1	0	-0,5
Estudante R	-1	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	1	-1	0,5	-1	0,5	1	-0,5	-0,5
Estudante S	-1	-1	0,5	1	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-1	1	-1	1	0,5	-1
Estudante T	-0,5	-0,5	0,5	1	-0,5	0,5	1	0,5	-0,5	0,5	-1	1	-1	-0,5
113	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	1	-1	1	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5
Estudante U	-1	0,5	0,5	1	0,5	-0,5	1	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0	1	0
Estudante V	-1	-1	0,5	0,5	0,5	-1	0,5	-1	0,5	-0,5	0,5	1	-0,5	-1

C Slides utilizados na aula A

Nas páginas seguintes encontram-se os slides utilizados na aula A (*Diferentes Interpretações para as Origens da Relatividade Restrita*), ministrada pelo proponente no curso *Evolução dos Conceitos da Física*, durante o primeiro semestre de 2013.

Aula #10 – Diferentes interpretações sobre as origens da Relatividade Restrita

André Noronha
Evolução dos Conceitos da Física
Maio de 2013

O que é história?

- Um jeito de ver as coisas:
- Existe a *História* (~ fenômenos físicos) e a *história* (~ física).
- Os historiadores estudam a *História*, construindo as *histórias*. É insensato dizer que alguma *história* é absoluta. Por outro lado, nunca vai se “conhecer realmente” a *História* (está a priori “inacessível” diretamente). Pode-se dizer que há *histórias* “melhores” que *histórias*.

2

O que é história?

- Existem *histórias* da Teoria da Relatividade Especial. A *História* da teoria é “inacessível” diretamente;
- A construção dessas *histórias* envolvem: “interesses historiográficos”, “interesses filosóficos” e muito uso de fontes primárias;
- Não se “testam” *histórias*. A objetividade da *história* não é a mesma da física.

3

Uma história das origens da TRE



- Peter Galison: “*Relógios de Einstein e Mapas de Poincaré*”
- Uma história “contextualista” das origens da teoria;
- Nosso ponto de partida: 3ª Guerra Franco-Prussiana e 2ª Revolução Industrial.

4

3ª Guerra Franco-Prussiana (1870-1871)



5

3ª Guerra Franco-Prussiana (1870-1871)

- França derrotada, orgulho nacional ferido;
 - École Polytechnique, onda neoprogredista e neo-iluminista (Positivismo de A. Comte);
 - “Ciência francesa” x “Ciência britânica”.
- Império Prussiano vencedor;
 - Militarismo político (Otto von Bismark);
 - Unificação territorial;
 - Reformas culturais (educacionais).

6

França pós-guerra

- Movimento político-ideológico de modernização;
- “Era” do eletromagnetismo, da “modernização elétrica”: criação do dínamo, iluminação das cidades, telégrafos, etc.;
- Um dos projetos: “estender” as medidas precisas de tempo dos astrônomos para além dos muros dos observatórios (para as casas e fábricas);

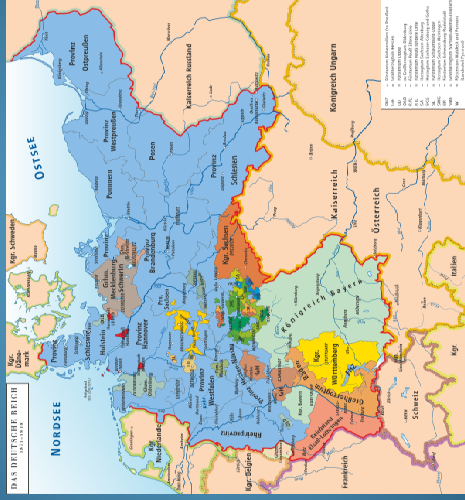
7

Império Prussiano pós-guerra

- Com a unificação, os prussianos se viram diante do problema da demarcação de territórios;
- Isso exigia um articulação muito bem organizada das tropas;
- Muitos sub-reinos foram anexados, com culturas, línguas, educações e tecnologias bem diferentes.

8

Império Prussiano pós-guerra



9

Modernização francesa

- Astrónomos e matemáticos franceses fazem parte do “comité científico” francês no projeto de sincronização dos relógios de toda Paris;
- Sistema “relógio-mãe”;
- Implementação fracassada de sincronização pneumática de relógios (dutos subterrâneos). Alternativa: a “recém” domesticada eletricidade;

10

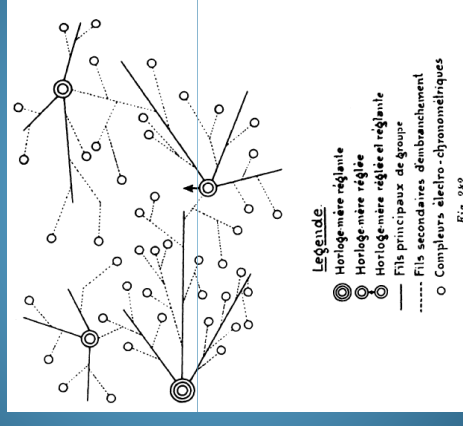
Relógios caseiros imprecisos



- Já na segunda metade do século XIX, atrasos de 15 segundos eram inadmissíveis nos relógios caseiros.

11

Modernização francesa



12

Modernização francesa

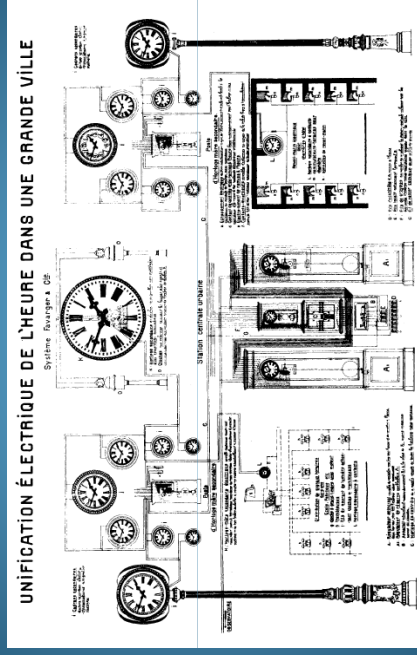


FIG. 1.—Unification électrique de l'heure dans une grande ville. From A. Favargen, *L'Électricité et ses applications à la chronométrie*, pp. 427-28, pl. 4.

13

Sistema “relógio-mãe”

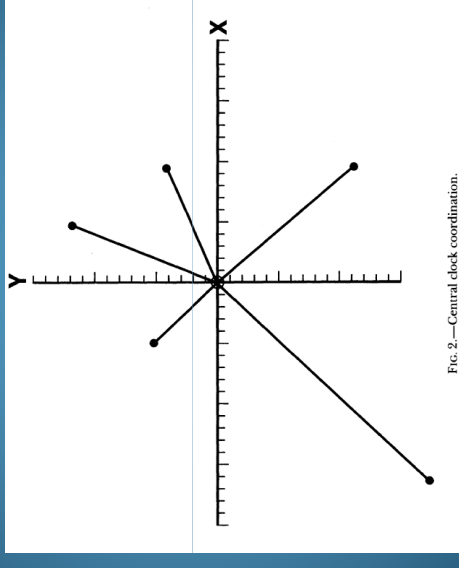


FIG. 2.—Central clock coordination.

14

Sistema “relógio-mãe” em Viena

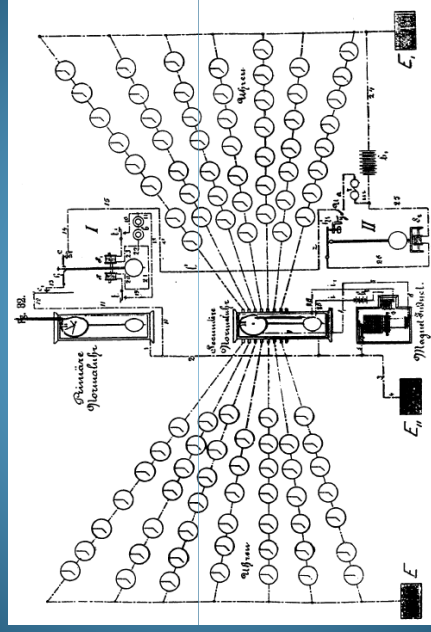


FIG. 20.—Time synchronization network II. From Ladislaus Fiedler, *Die Zeittelegraphen und die elektrischen Uhren vom praktischen Standpunkte* (Vienna, 1890), pp. 88-89.

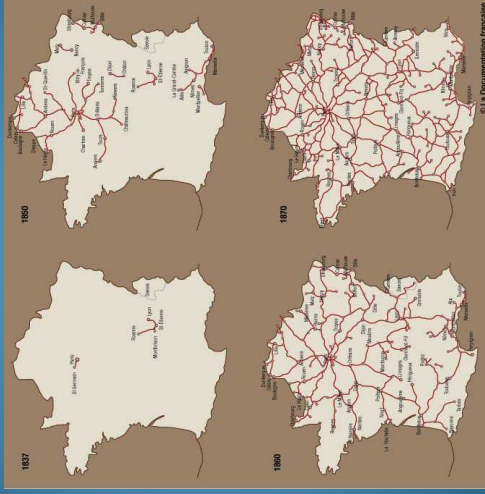
15

Expansão ferroviária

- Com as revoluções industriais vieram as máquinas térmicas e os primeiros aparelhos elétricos;
- A locomotiva, umas das principais invenções, passou de transporte de carga para transporte de pessoas;
- O que levava *meses* agora levava *dias!*
- Isso levou naturalmente a expansões ferroviárias em toda Europa;

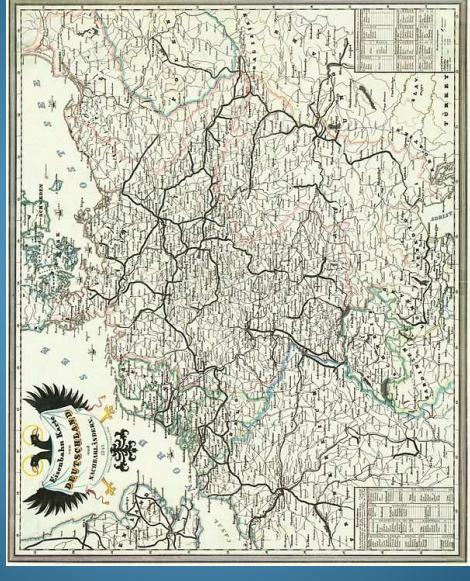
16

Expansão ferroviária francesa



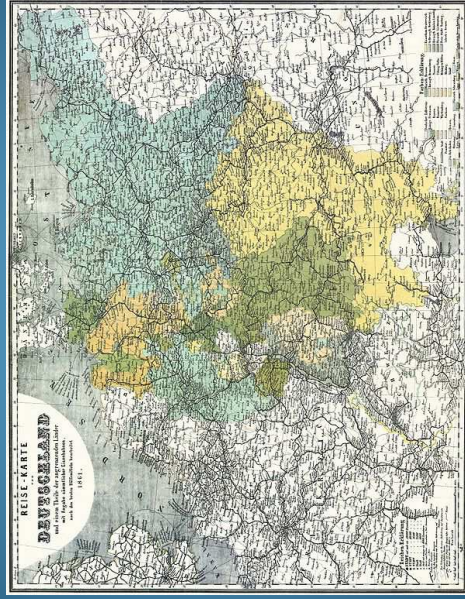
17

Expansão ferroviária prussiana



18

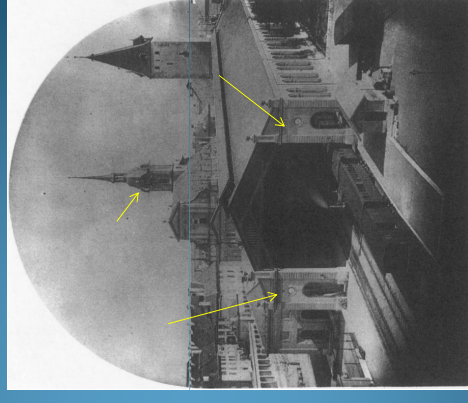
Expansão ferroviária prussiana



19

Estações precisam estar sincronizadas

- Mas, para o funcionamento correto de todas as estações ferroviárias europeias, precisa-se que seus relógios estejam todos sincronizados!



Estação ferroviária de Berna, Segunda metade do século XIX

20

Expansão ferroviária prussiana

- A expansão das ferrovias também trazia um problema importante ao Império Prussiano;
- Muitos territórios haviam sido anexados, e cabia, segundo a lógica imperialista militarista, garantir as suas posses;
- Para coordenação interna, os militares alemães teriam percebido a necessidade um “tempo absoluto alemão”;

21

Expansão ferroviária prussiana



Helmuth von Moltke
(1800-1891)

No norte da Alemanha, incluindo Saxônia, reconhecemos o tempo de Berlim; na Bavária, reconhecemos o tempo de Munique; em Vurtemberg, reconhecemos o tempo de Stuttgart; em Baden, vemos o de Karlsruhe, e em Renânia Palatinado reconhecemos o tempo de Ludwigshafen.

Meine Herren, unidade do tempo apenas aos trilhos de trem não afastará todas as desvantagens que citei a pouco; isto só será possível quando alcançarmos a unidade do tempo em toda a Alemanha, isto é, *quando todos os tempos locais forem varridos*.

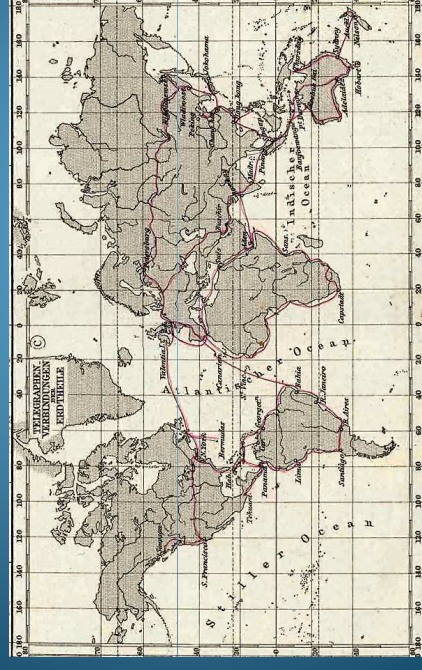
22

Como sincronizar à distância?

- Na sincronização dos relógios no sistema “relógio-mãe” não se considerava o tempo da transmissão nos fios;
- Para um sincronização de uma cidade, isso é razoável;
- Mas, e para sincronizar os relógios em todo um país (como o Império Prussiano)? E os relógios das colônias?
- Como levar o “tempo verdadeiro” aos quatro cantos?

23

Cabos telegráficos



24

Cabos telegráficos no Brasil



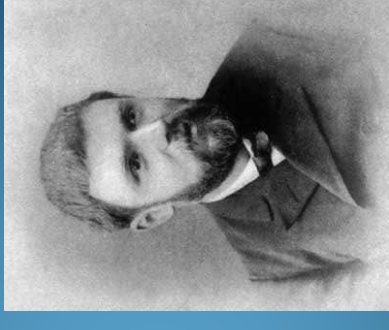
Pedro de Alcântara, João Carlos Leopoldo Salvador Bibiano Francisco Xavier de Paula Leocádio Miguel Gabriel Rafael Gonzaga (1825 - 1891)

Já se acha o cabo submarino no território da capital do Brasil. A electricidade começa a ligar as cidades mais importantes deste Império, como o patriotismo reúne todos os brasileiros no mesmo empenho pela prosperidade de nossa majestosa pátria. O Imperador saúde, pois, a Bahia, Pernambuco e Pará por tão fausto acontecimento, na qualidade de seu primeiro compatriota e sincero amigo. Até aos bons anos de 1874.

25

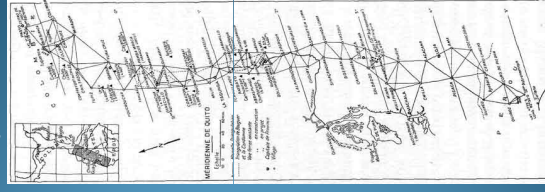
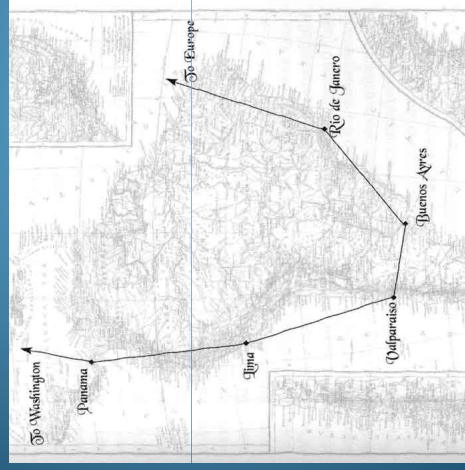
Poincaré e a telegrafia

- Henri Poincaré (Nancy, 1854 – Paris, 1912), conhecido por seus importantes trabalhos matemáticos e também filosóficos, se debruçou sobre muitos problemas “técnicos”, como a instalação de cabos telegráficos na América Latina;



26

Poincaré e a telegrafia



27

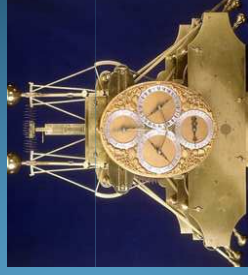
Poincaré e a cartografia

- Era um interesse científico (ideológico) da comunidade científica francesa criar padrões de medida (corrida científica contra os britânicos, *Metro* em 1875 × *Greenwich* em 1884). Outro interesse era cartografia. Nessa época Poincaré trabalhava no *Departamento de Longitudes de Paris*. Acompanhou de perto as instalações, e tomou nota de alguns problemas essenciais envolvendo a sincronização de relógios distanciados;

28

Determinar longitude?

- Determinar latitude é relativamente fácil (no hemisfério norte). E a longitude?
- Método da comparação dos relógios (posto em prática pelos *britânicos* no início do século XIX);
- Mas relógios atrasam...



Relógio marino de John Harrison (1793-1876), construído por volta de 1840.

29

Determinar longitude?

- Os melhores relógios marinhos britânicos atrasavam cerca de 15 segundos por mês. Como as viagens marítimas e expedições duravam *meses*, os erros nas longitudes podiam chegar na ordem de *quilômetros*;
- Alternativa da expedição francesa: utilizar os cabos telegráficos;

30

Tempo de propagação dos sinais?

- Para as dimensões dos cabos telegráficos não se pode mais desconsiderar o tempo de propagação dos sinais. Mas...
- *Para determinar o tempo de propagação dos sinais você precisa ter relógios sincronizados, contudo, para ter relógios sincronizados você precisa saber o tempo de propagação dos sinais!*

31

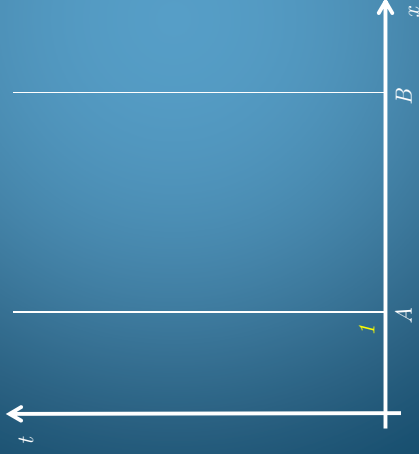
Convencionalismo

- Poincaré: Imaginem dois observadores sem movimento relativo. Suponha o caso mais geral, em que as velocidades de ida e de volta *são diferentes* (é o caso dos cabos e do *vento de éter*);
- Poincaré: o melhor método de sincronização é por meio da *troca de sinais luminosos* (e não o sistema “relógio-mãe”);

32

Exemplo de sincronização à distância

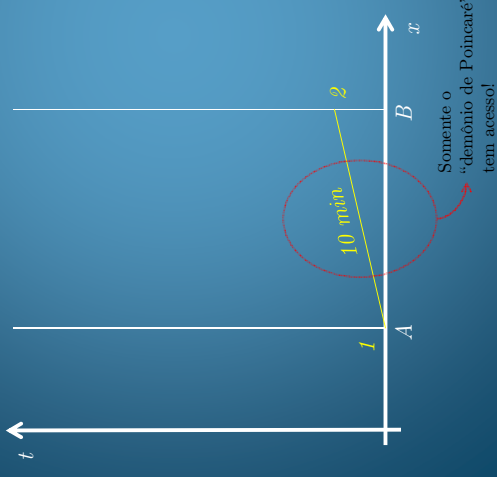
- A emite um sinal (1), sendo que neste instante seu relógio marca 10:00;



33

Exemplo de sincronização à distância

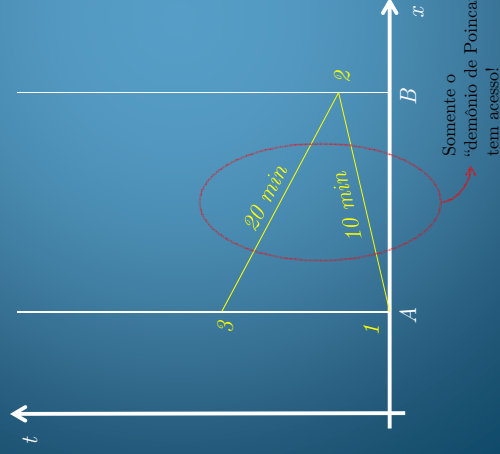
- A emite um sinal (1), sendo que neste instante seu relógio marca 10:00;
- (Depois de 10 min) B recebe o sinal (2), em seu relógio são 12:10, envia outro sinal para A informando seu horário;



34

Exemplo de sincronização à distância

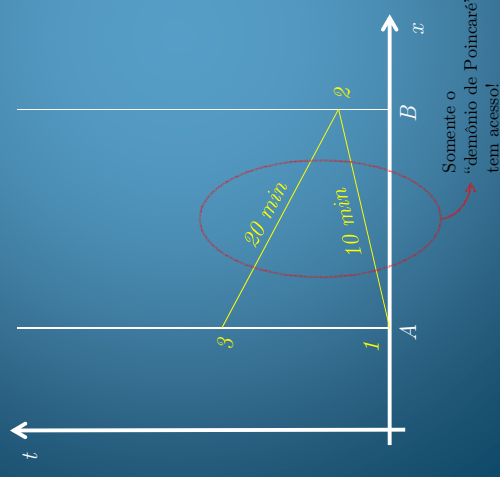
- A emite um sinal (1), sendo que neste instante seu relógio marca 10:00;
- (Depois de 10 min) B recebe o sinal (2), em seu relógio são 12:10, envia outro sinal para A informando seu horário;
- (Depois de 20 min) A recebe o sinal de B (3) e compara os horários (10:30 e 12:10);



35

Exemplo de sincronização à distância

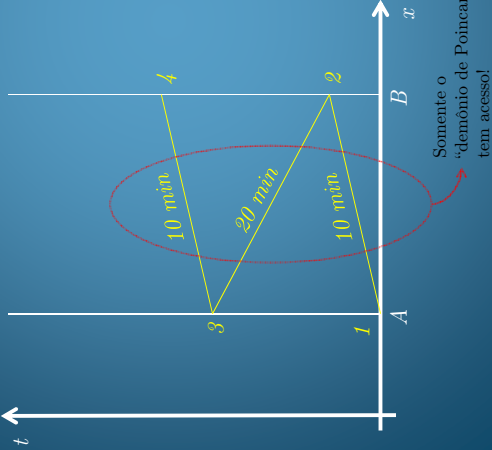
- A emite um sinal (1), sendo que neste instante seu relógio marca 10:00;
- (Depois de 10 min) B recebe o sinal (2), em seu relógio são 12:10, envia outro sinal para A informando seu horário;
- (Depois de 20 min) A recebe o sinal de B (3) e compara os horários (10:30 e 12:10);
- A convenciona que os tempos de ida e de volta são iguais, ajusta seu relógio para 12:25 e envia sinal para B ;



36

Exemplo de sincronização à distância

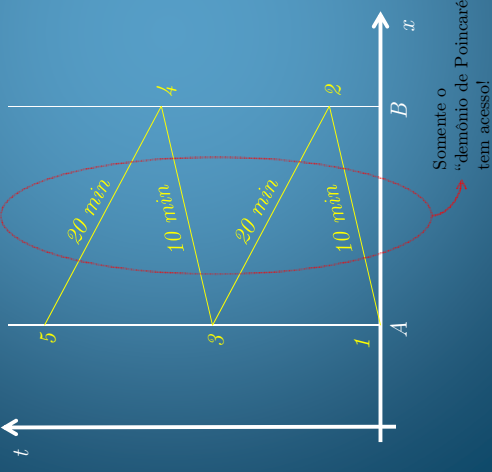
- A emite um sinal (1), sendo que neste instante seu relógio marca 10:00;
- (Depois de 10 min) B recebe o sinal (2), em seu relógio são 12:10, envia outro sinal para A informando seu horário;
- (Depois de 20 min) A recebe o sinal de B (3) e compara os horários (10:30 e 12:10);
- A **convenciona** que os tempos de ida e de volta são iguais, ajusta seu relógio para 12:25 e envia sinal para B ;
- (Depois de 10 min) B recebe o sinal (4) e adota a convenção de A , em seguida verifica que a sincronização foi estabelecida e manda o último sinal para A .



37

Exemplo de sincronização à distância

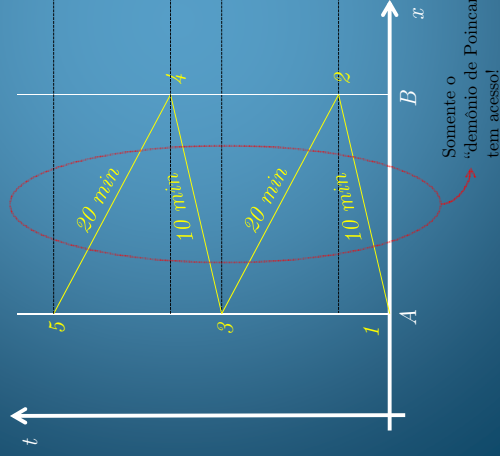
- (Depois de 20 min) A recebe o sinal (5), e constata que de fato a sincronização dos relógios foi estabelecida.



38

Exemplo de sincronização à distância

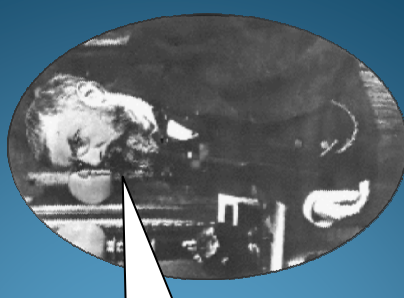
Relógio de A	Relógio de B	Atraso
12:55	13:00	00:05
12:35	12:40	00:05
12:25	12:30	00:05
10:10	12:10	02:00
10:00	12:00	02:00



39

Simultaneidade para Poincaré

É difícil separar os problemas qualitativos da simultaneidade do problema quantitativo da medida do tempo; ou se utiliza um cronometro, ou se tem em conta uma velocidade de transmissão, como a da luz, visto que não podemos medir tal velocidade sem medir um intervalo de tempo



40

Convencionalidade da simultaneidade

- Segundo Poincaré, se as velocidades (de ida e de volta) são ou não iguais está além do empírico. Adotamo-las como iguais por *conveniência*;
- Como os efeitos do vento de éter não são observáveis (experimentos de primeira e segunda ordem em v/c), resta concluir o *Princípio da Relatividade e convencionalidade da simultaneidade*;
- *O tempo não é diretamente acessível, logo não faz sentido atribuir-lhe caráter de absoluto!*

41

E Einstein?

- Albert Einstein (Ulm, 1879 – Princeton, 1955) trabalhou no coração de uma nação com tradição na construção de relógios: Suíça.
- Seu pai foi dono de uma empresa de equipamentos eletrotécnicos, alguns deles similares às *máquinas sincronizadoras de relógios distanciados*.

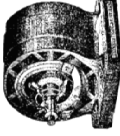


42

Elektrizitätszählern, Mess und Regulirapparaten

Elektrotechnische Fabrik
München.
J. Einstein & Cie.

Ausführung elektrischer Beleuchtungsanlagen in jedem Umfang.
Ausführung elektrischer Kraftübertragungsanlagen jeder Größe.



Dynamo-Maschinen
für Beleuchtung, Kraftübertragung und Elektrolyse, Bogenlampen, Elektrizitätszählern, Mess- und Regulirapparaten.

43

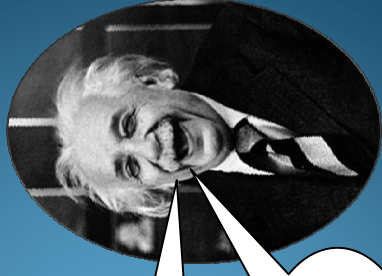
Einstein e as patentes

- Durante sua estadia em Berna, houve uma alta no interesse sobre sistemas de cronometragem elétrica (e máquinas de sincronização);
- De 1800 a 1900 houve de três a quatro aplicações do tempo elétrico por ano. A transmissão elétrica do tempo cresceu juntamente com o sistema de telegrafia, relógios coordenados começaram a ter papel cada vez mais presente em locais públicos e privados. Os números são: 1901, *oito* patentes; 1902, *dez*; 1903, *seis*, e então em 1904, *catorze* patentes;

44

O suposto "tempo livre" de Einstein

Trabalhar com a
formulação final de
patentes tecnológicas foi
uma verdadeira bênção
para mim. Isto me
instigou o pensamento
múltiplo e também me
proveu importante
estímulo ao pensamento
físico.



A relatividade
especial nasceu
na rua
Kramgasse, 49

45

Caminho de Einstein



IVÃ GURGEL

46

Caminho de Einstein



IVÃ GURGEL

47

Caminho de Einstein



IVÃ GURGEL

48

Caminho de Einstein



ARIOVALDO RIBEIRO

49

Caminho de Einstein



ARIOVALDO RIBEIRO

50

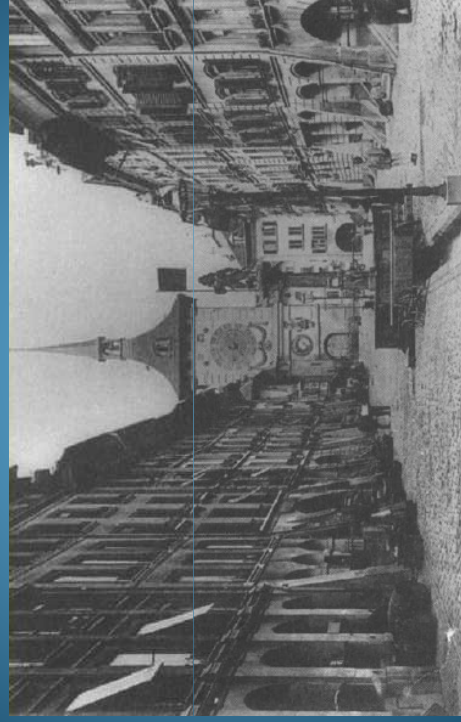
Caminho de Einstein



IVÃ GURGEL

51

Caminho de Einstein



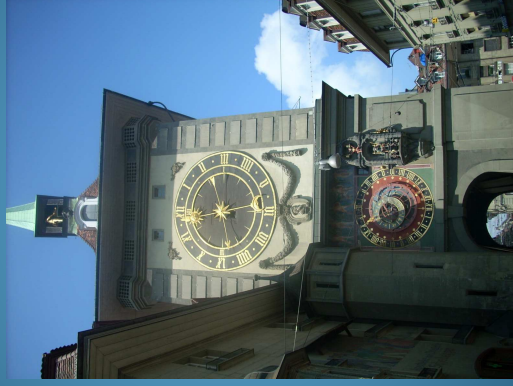
52

Caminho de Einstein



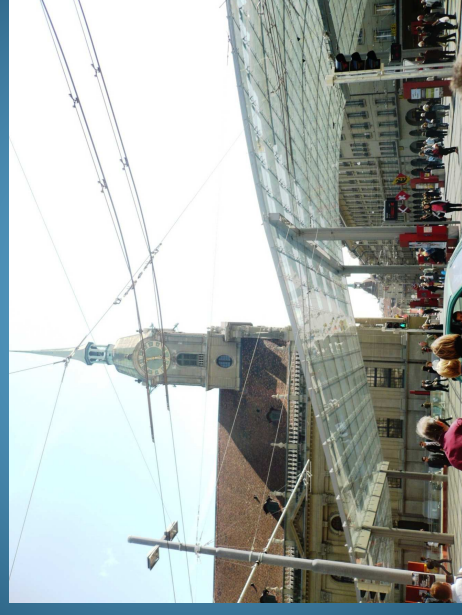
IVÃ GURGEL

Caminho de Einstein



IVÃ GURGEL

Caminho de Einstein



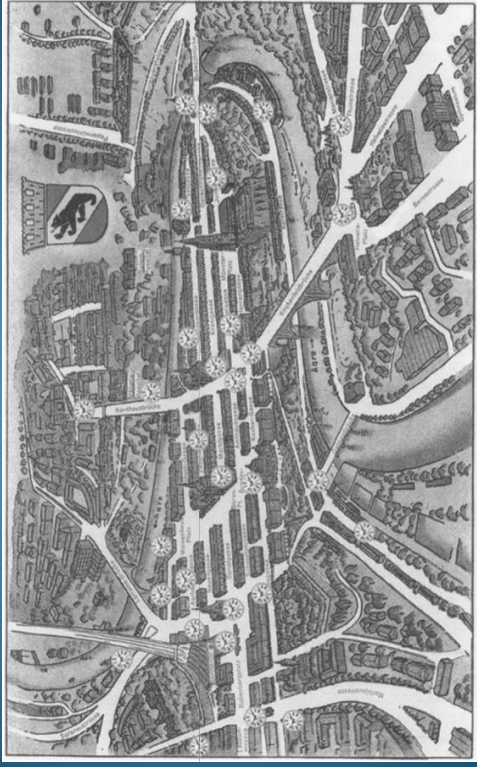
IVÃ GURGEL

Caminho de Einstein



IVÃ GURGEL

Berna por volta de 1900



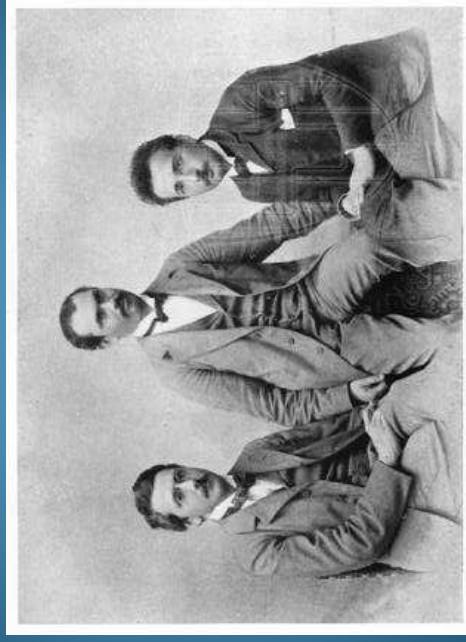
57

Einstein cientista-filósofo-técnico

- Einstein conhecia os trabalhos de Poincaré sobre o tempo (*La mesure du temps* e *Science et l'hypothèse*);
- Outras influências filosóficas: Ernst Mach (1838-1916), David Hume (1711-1776);
- Influências científicas: experimento de Fizeau (1851), Termodinâmica, eletrodinâmica de Lorentz (1892, 1895);

58

Akademie Olympia (1903)



59

Relógios de Einstein

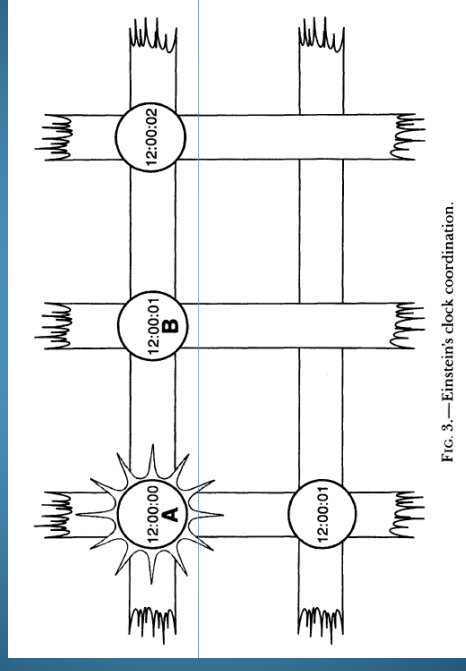


FIG. 3.—Einstein's clock coordination.

60

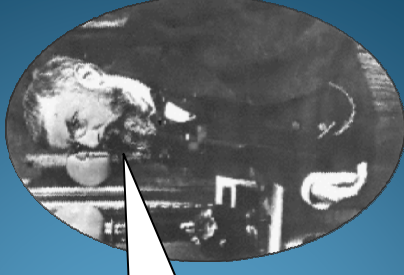
Relatividade da simultaneidade

- Segundo Einstein, as velocidades (de ida e de volta) *são iguais*. Adotamo-las assim de forma axiomática;
- Tempo e Espaço são aquilo que se mede com relógios e réguas. Toda asserção sobre um instante de tempo envolve eventos simultâneos.
- Pelo *Princípio da Relatividade* (tomado de forma axiomática) resta concluir a *relatividade da simultaneidade*;
- *O tempo é relativo, portanto não absoluto!*

61

1911

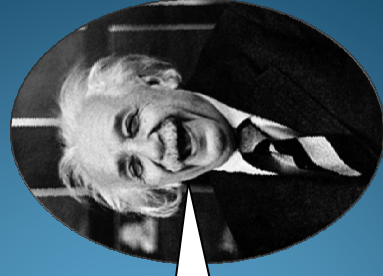
Monsieur Einstein é uma das cabeças mais originais que conheci; apesar da juventude, ocupa já uma posição muito honrosa entre os estudiosos mais importantes do seu tempo. Nele devemos admirar especialmente a facilidade com que se adapta a conceitos novos e habilidades para inferir deles todas as consequências. Não se mantém agarrado aos princípios clássicos e perante um problema de física rapidamente imagina todas as possibilidades.



62

1955

Espero que nessa ocasião [50º aniversário da relatividade restrita] haja o cuidado de homenagear apropriadamente os méritos de L.[Lorentz] e P.[Poincaré]



63



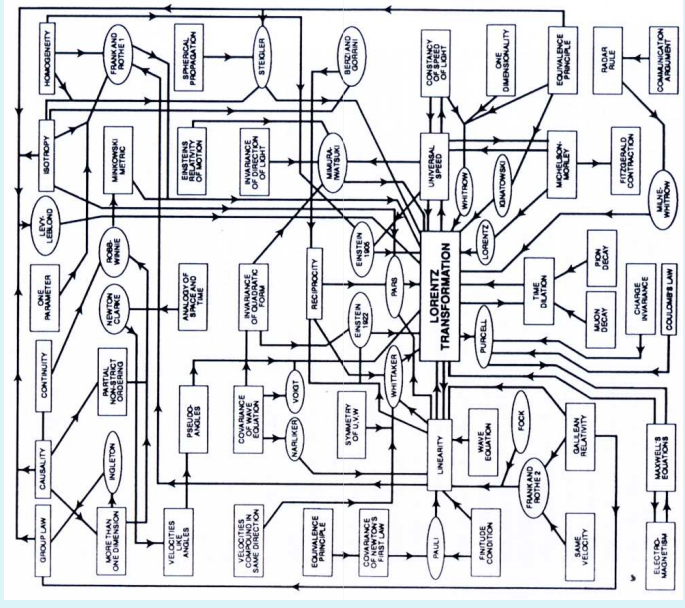
64

D Slides utilizados na aula B

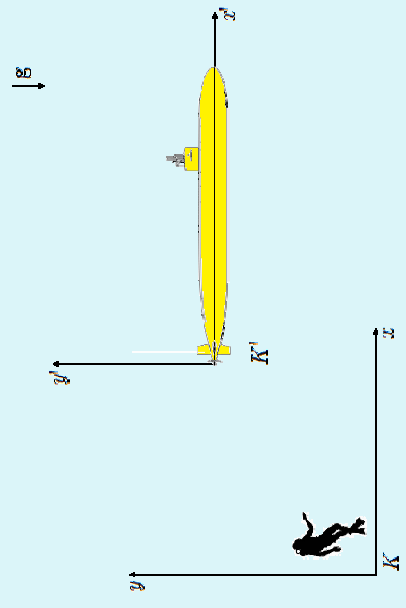
Nas páginas seguintes encontram-se os slides utilizados na aula B (*Diferentes Interpretações sobre a Relatividade Restrita*), ministrada pelo proponente no curso *Evolução dos Conceitos da Física*, durante o primeiro semestre de 2013.

Aula #10' - Diferentes interpretações sobre a Relatividade Restrita

André Noronha
Evolução dos Conceitos da Física
Maio de 2013



“Paradoxo do Submarino”



“Paradoxo do Submarino”

- Situação inicial (submarino sem movimento relativo, em repouso no oceano), tanto em K' como em K :

$$\begin{aligned} \mathbf{P} + \mathbf{E} &= \mathbf{0} \\ (m - V\rho)\mathbf{g} &= \mathbf{0} \\ V\rho &= m \end{aligned} \tag{1}$$

“Paradoxo do Submarino”

- No referencial do mergulhador K (oceano):

$$\begin{aligned}\mathbf{F}'_{Res} &= \sum_i \mathbf{F}_i \\ &= \mathbf{F}' + \mathbf{E}' \\ &= m' \mathbf{g} - V' \rho \mathbf{g} \\ &= \left(m \gamma - \frac{V \rho}{\gamma} \right) \mathbf{g}\end{aligned}$$

$$\mathbf{F}'_{Res} = m \left(\gamma - \frac{1}{\gamma} \right) \mathbf{g} \quad (2)$$

“Paradoxo do Submarino”

- No referencial do submarino K' :

$$\begin{aligned}\mathbf{F}''_{Res} &= \sum_i \mathbf{F}_i \\ &= \mathbf{F}'' + \mathbf{E}'' \\ &= m \mathbf{g} - V \rho'' \mathbf{g} \\ &= (m - \gamma^2 V \rho) \mathbf{g}\end{aligned}$$

$$\mathbf{F}''_{Res} = m (1 - \gamma^2) \mathbf{g} \quad (3)$$

Realismo × Positivismo

- Tonnelat (1971) propõe também duas interpretações básicas da Teoria da Relatividade Restrita (TRR);
- *Interpretação realista*: os “observáveis” comprimento espacial e intervalo temporal são grandezas “mutiladas”. Uma “grandeza real” na TRR é aquela que permanece invariante para todos os observadores. Somente grandezas quadridimensionais têm essa propriedade. Logo, não poderíamos chamar, mesmo os objetos cotidianos de “reais”, a não ser que os consideremos em suas extensões em quatro dimensões;

Realismo × Positivismo

- *Interpretação positivista*: as grandezas observadas (comprimentos espaciais e intervalos temporais), assim como suas eventuais modificações em diferentes referenciais, são “reais”, pois são as únicas grandezas que são efetivamente acessíveis a nós (não “observamos” diretamente objetos quadridimensionais).

Retomando o paradoxo

- Para a interpretação positivista, existe “submarino”, e nossas medidas sobre ele são “reais”, assim como suas eventuais modificações em razão da velocidade relativa;
- Não se faz hipóteses para que o está além das observações diretas. Espaço e tempo são o que medimos com régua e relógios. Não faz muito sentido para o positivista falar em Espaço-tempo. Não existe um “régua-relógio” para medi-lo. Se for útil, tem valor heurístico, se não, é descartável.

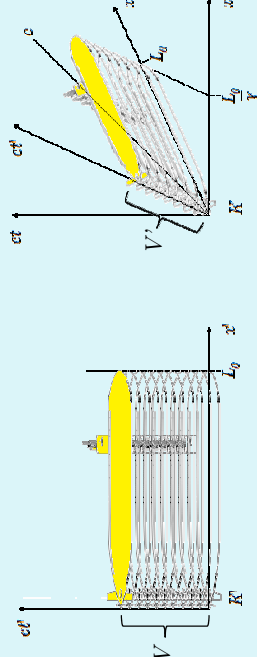
14/05/2013

Jornada de Filosofia da Física

9

Retomando o paradoxo

- Para a interpretação realista, não existe “submarino”, mas sim “quadrissubmarino” que vive no Espaço-tempo de Minkowski;
- Quadrivolume do quadrissubmarino é invariante por TL, logo é “real”. Os valores Δx e Δt (separados) são “aparentes”.



14/05/2013

Jornada de Filosofia da Física

10

Submarino ou Quadrissubmarino?

- Critério de realidade de Tonnelat: “real” é aquilo que é invariante por Transformações de Lorentz. Se aceitarmos isso, somos levados a concluir que os objetos do cotidiano de certa forma não são “reais”, e que nosso acesso ao mundo se dá de forma “mutilada”, incompleta;
- O que é “real”, o submarino ou o “quadrissubmarino”? Os efeitos de contração e dilatação são “reais”?
- Podemos chamar de “real” somente aquilo que medimos? É seguro irmos além das observações imediatas?

11

Submarino ou Quadrissubmarino?



George Matsas

A Teoria da Relatividade Geral não depende de você imaginar que o espaço-tempo é curvo [imagem que Einstein usou para explicar a gravidade], porque suas formulas são autocontidas e dão as respostas em números confirmados por experimentos. Mas é conveniente, dentro de todo o formalismo da Relatividade Geral, olhar para ela e pensar que o espaço e o tempo são curvos. Mas essa visão também deve mudar no futuro, quando surgirem teorias mais completas. Talvez o paradigma mude totalmente.

12

Qual o papel da observação?



13

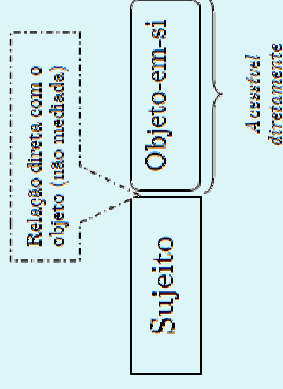
Acesso à realidade

- Somente a medição ou teste experimental nos dá acesso à realidade? “Sim e não?”. Há limites de várias naturezas:
- Instrumental e tecnológico;
- Lógico (*falácia da afirmação do consequente*): Se A, então B. Temos B, logo A (causa suficiente, mas não necessária);
- Metodológico (*tese de Duhem*): o que de fato estamos medindo em um experimento complexo?
- Epistemológico: e quando a observação afeta o objeto?

14

Acesso à realidade

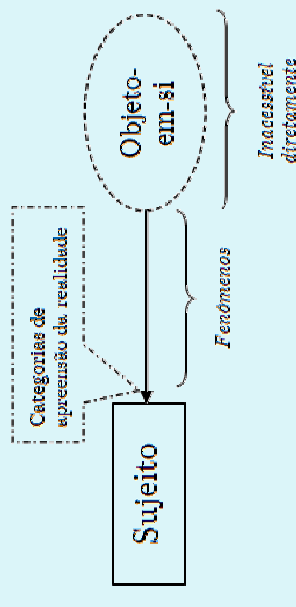
- A observação nos dá acesso *puro* à realidade? *Sim* - Versão primitiva:



15

Acesso à realidade

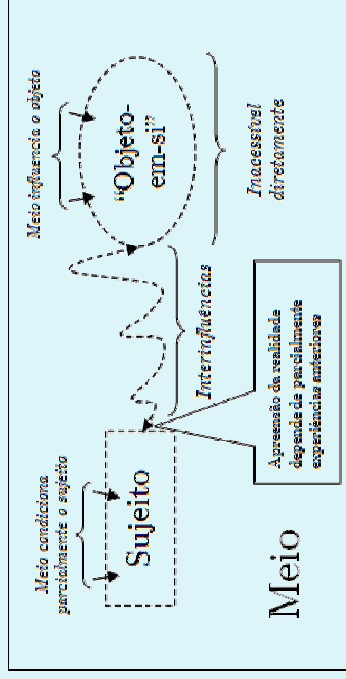
- A observação nos dá acesso *puro* à realidade? *Não* - Versão (super simplificada) kantiana:



16

Acesso à realidade

- A observação nos dá acesso *puro* à realidade? *Jamais* – Versão contemporânea:



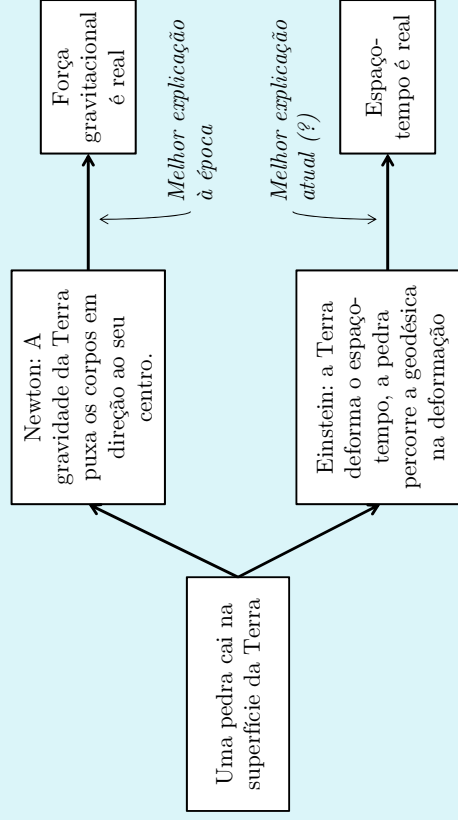
17

Efeitos relativísticos observáveis?

- Experimentos “provaram” a dilatação temporal dos muons:
 - Experimentos mostram uma contagem anormal de muons em determinada altitude. *Melhor explicação*: o tempo dos muons (para referencial da Terra) dilatou.
- Conclusão não imediata, há um passo não lógico entre:
 - Contagem anormal de muons a determinada altitude
 - Dilatação do tempo de vida dos muons
- A rigor, o que é diretamente observável é o que está na caixa a esquerda;

18

Efeitos relativísticos observáveis?



19

Crterios de Realidade

- Pessoa Jr (2011):
- *Observável (de preferência, diretamente observáveis);*
- *Invariante por transformações de coordenadas;*
- *Concebível (simplicidade);*
- *Causalmente potente;*
- Uma pedra é observável. É invariante (?). É claramente concebível. É causalmente potente. As entidades inobserváveis da física obedecem a esses critérios?

20

A realidade?

- Hipótese (filosófica) inicial de quase todos os físicos antes de entrar no laboratório: *existe uma realidade externa que independe a mim;*
- Essa crença é chamada de *Realismo Ontológico*;
- É bem sensato afirmar que o mundo existe independente de nós. Há quem afirme o contrário?
- Teses idealistas. G. Berkeley (~1700): *ser é ser percebido.*

21

A realidade?

- Realismo Ontológico serve para o *Mundo* como para as *entidades inobserváveis*;
- Um físico de cordas *realista ontológico* crê na existência das cordas. Nesse âmbito, um *antirrealista ontológico* ou não crê ou suspende juízo sobre as cordas.
- Na eletrodinâmica, um físico *realista ontológico* crê que os campos (talvez também os potenciais) são reais. Caso contrário, considera-os meras ferramentas.

22

Acesso à realidade?

- Outra hipótese (filosófica) inicial de muitos físicos: o mundo (já suposto real) é *acessível*, ou melhor, *inteligível, cognoscível*;
- Essa crença é chamada de *Realismo Epistemológico*;
- Desta vez não é tão imediato afirmar que o mundo é inteligível, principalmente nas suas “intimidades”;
- Teses antirrealistas epistemológicas: a ciência será *sempre* uma aproximação, e *nunca* descreverá a realidade como ela realmente é.

23

Acesso à realidade?

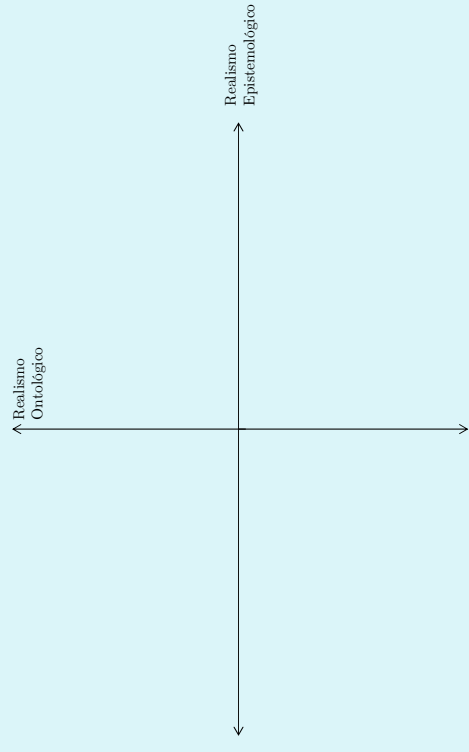
- O Realismo Epistemológico é usado para descrever a possibilidade de conhecer o mundo;
- Um físico *realista epistemológico* “radical” afirma que a ciência é capaz de desvendar todas as sutilezas do mundo;
- Um físico *realista epistemológico* “moderado” afirma que a ciência é aproximativa (com o tempo se aproxima mais);
- Um físico *antirrealista epistemológico* “crítico” afirma que as teorias funcionam bem mas que não apreendem o Mundo;

24

Estamos na caverna de Platão?

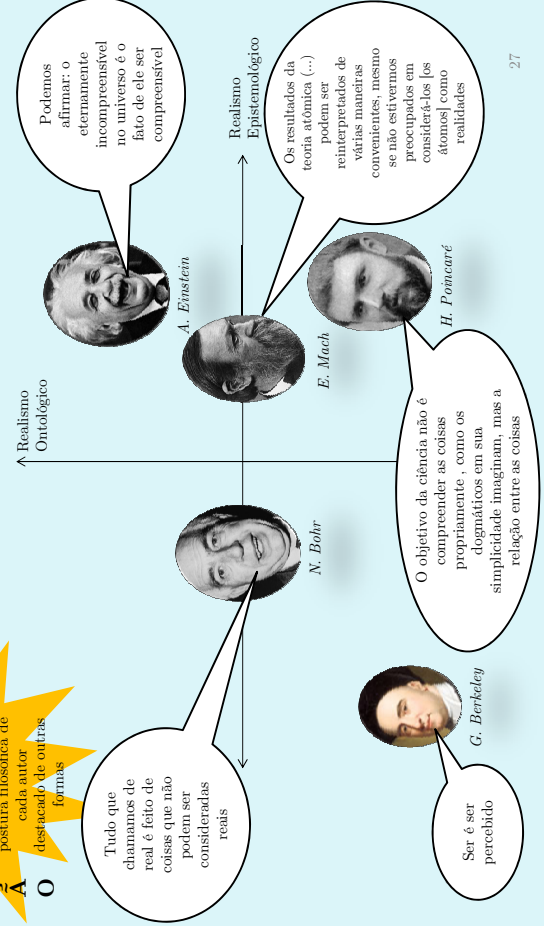


Diagrama filosófico



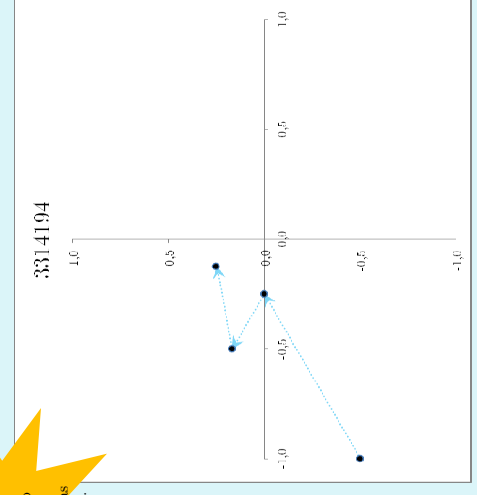
A T E N Ç Ã O
 As posições não são absolutas! Foram propostas com base em leituras de obras dos autores. Porém, é possível interpretar a postura filosófica de cada autor de maneira destacada de outras formas

Diagrama filosófico



A T E N Ç Ã O
 Os pontos não podem ser considerados como a "postura filosófica real" de cada um. Eles têm papel apenas ilustrativo da natureza das respostas dadas nas questões pós-aula.

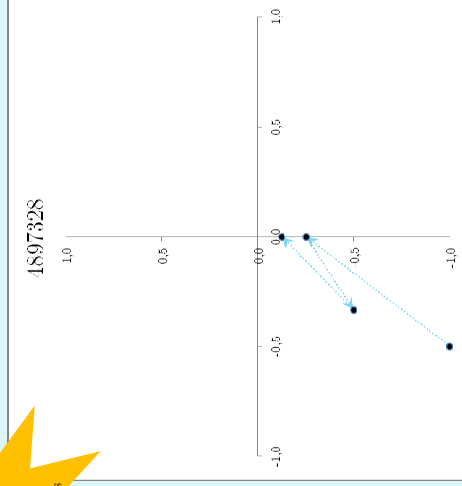
Diagrama filosófico



A
T
E
N
Ç
Ã
O

Os pontos não podem ser considerados como a "postura filosófica real" de cada um. Eles têm papel apenas ilustrativo da natureza das respostas dadas nas questões pós-aula.

Diagrama filosófico

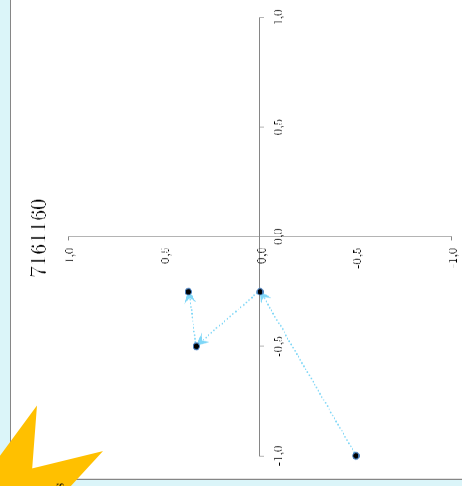


29

A
T
E
N
Ç
Ã
O

Os pontos não podem ser considerados como a "postura filosófica real" de cada um. Eles têm papel apenas ilustrativo da natureza das respostas dadas nas questões pós-aula.

Diagrama filosófico

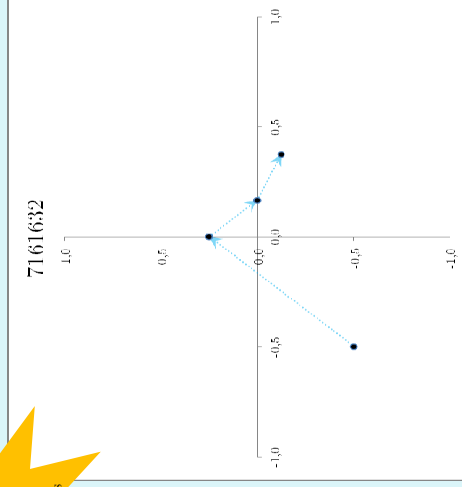


31

A
T
E
N
Ç
Ã
O

Os pontos não podem ser considerados como a "postura filosófica real" de cada um. Eles têm papel apenas ilustrativo da natureza das respostas dadas nas questões pós-aula.

Diagrama filosófico

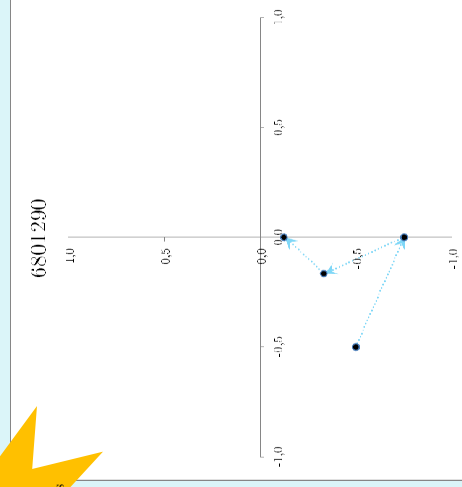


30

A
T
E
N
Ç
Ã
O

Os pontos não podem ser considerados como a "postura filosófica real" de cada um. Eles têm papel apenas ilustrativo da natureza das respostas dadas nas questões pós-aula.

Diagrama filosófico

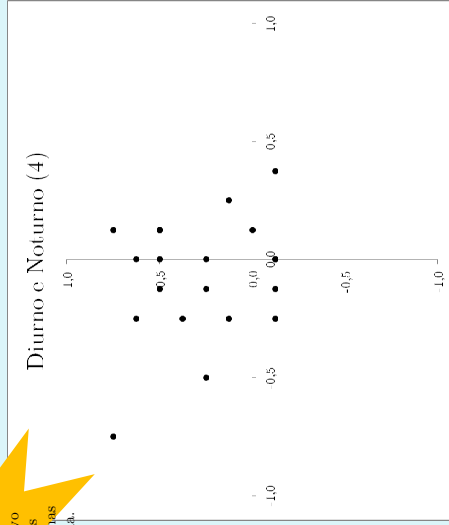


32

ATENÇÃO

Os pontos não podem ser considerados como a "postura filosófica real" de cada um. Eles têm papel apenas ilustrativo da natureza das respostas dadas nas questões pós-análise.

Diagrama filosófico



E Texto utilizado para a aula B

Nas páginas seguintes encontra-se o texto aplicado aos estudantes da disciplina *Evolução dos Conceitos da Física* para a aula B, elaborado pelo proponente. Como enfatizado no capítulo 5, a leitura do texto era obrigatória, pois sem ela os estudantes teriam pouca ou nenhuma base para redigir a resenha da aula (cuja entrega também era obrigatória). A elaboração do texto a seguir baseou-se nos estudos realizados no capítulo 4.

Reflexões sobre História e Filosofia da Teoria da Relatividade Especial

André Noronha*

Maio de 2013

1 Apontamentos sobre a pré-história da teoria

Praticamente desde poucos anos após a publicação do conhecido artigo de Albert Einstein, *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*, em 1905, o exercício de produção de histórias da relatividade se tornou lugar comum, tanto entre historiadores e filósofos como também cientistas. A bibliografia sobre histórias da relatividade é vasta, cobrindo desde obras de divulgação científica para públicos não especializados até trabalhos historiográficos minuciosos. Em segunda ordem, encontramos também esboços de histórias da relatividade em livros didáticos de física, tanto no ensino básico como no ensino superior. Em geral, em livros didáticos, obras de divulgação e em uma fração significativa de trabalhos historiográficos, o que prevalece é o que podemos chamar de “histórias conceituais” da Teoria da Relatividade Especial. Em poucas palavras, uma história conceitual é aquela na qual se preza preferencialmente aspectos internos à ciência, entre eles, as descobertas importantes, os chamados “experimentos cruciais”, o desenvolvimento do formalismo matemático, a evolução dos conceitos, as generalizações e unificações teóricas, entre outras características. Por outro lado, as “histórias contextuais” se ocupam de dimensões que transcendem a ciência, como as condições sociais, culturais, históricas, políticas e também por vezes psicológicas que influenciam direta ou indiretamente nos rumos do desenvolvimento histórico da ciência¹. Embora seja forte a ideia de que uma história da ciência genuína não deve conter só questões internas ou externas à ciência, esta divisão ainda se manifesta na literatura.

Considerando a “historiografia conceitual”, os estudos históricos das origens da Teoria da Relatividade Especial tendem a se enquadrar entre duas formas aproximadamente gerais: ideia de *ruptura* com os trabalhos dos antecessores de Einstein, ou ideia de *continuidade* com os trabalhos que estavam já em ação na época por Hendrik Lorentz, Henri Poincaré e outros². A teoria conforme foi concebida por Einstein em 1905 não teria sido uma simples continuação dos trabalhos anteriores. Um argumento para isso é o de que Einstein aparentemente não conhecia àquela época o importante artigo de 1904 de Lorentz³.

Ainda sobre as origens da teoria, há muitos anos historiadores têm alertado sobre a forte e quase generalizada correlação histórica estabelecida entre os resultados dos experimentos de interferometria de Albert Michelson (o primeiro realizado em 1881 e posteriormente repetido com a colaboração de

*andrefisica@usp.br

¹No caso da Teoria da Relatividade Especial, um exemplo de “história contextualista” é Peter Galison “*Einstein’s Clocks, Poincaré’s Maps: Empires of Time*”. New York: WW. Norton & Company Ltd, 2003.

²Gerald Holton, “On the Origins of Special Theory of Relativity”. In: *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*. Cambridge: Harvard University Press, 1973, p.166.

³Há evidências no texto de Einstein de 1905 (como uso de outras notações, nomenclaturas e passagens matemáticas próprias muito diferentes daquelas de Lorentz) que apontam para isto. *Ibid.*, p.177-8.

Edward Morley 1887) e o “surgimento” da teoria no artigo de Einstein. Do ponto de vista filosófico, essa conexão entre os experimentos e o surgimento da teoria estaria embasada, segundo o historiador da ciência Gerald Holton, numa *concepção experimentista*⁴ arraigada, culpada por manter vivo o “folclore histórico” de que Einstein teria criado a teoria para responder aos resultados nulos dos experimentos de Michelson e Morley. A importância dos experimentos de Michelson e Morley para o surgimento da teoria é um tema controverso entre historiadores. Einstein, aparentemente, conhecia os experimentos, por outro lado, a importância que ele teria dado aos seus resultados teria sido secundária⁵.

2 Formalismo matemático mínimo

Para alguns historiadores que defendem a tese histórica da *continuidade* (de uma forma não simplista), o trabalho de Einstein não trouxe muitos “novos resultados científicos” no seu artigo de 1905, ainda que sua abordagem axiomática tenha se mostrado mais simples que aquelas de seus antecessores e alguns contemporâneos⁶. De fato, segundo o historiador da ciência Roberto Martins, “*se considerarmos o trabalho conjunto de Lorentz e Poincaré (que (...) utilizaram resultados obtidos por varios outros pesquisadores), pode-se dizer que quase todas as equações obtidas por Einstein já haviam sido obtidas antes*”⁷. Já do ponto de vista empírico, com relação ao que é observável, segundo Martins, não há diferenças entre as previsões e descrições empíricas entre as teorias, ou seja, “[n]ão pode ser feita uma experiência crucial para distinguir a teoria de Lorentz-Poincaré da relatividade de Einstein”, e conclui, “[n]ão se pode decidir cientificamente qual delas é correta”⁸. Martins também afirma que as principais diferenças entre elas era a aceitação da existência do éter (principalmente por parte de Lorentz) e as diferentes abordagens epistemológicas adotadas (*convencionalismo* por parte de Poincaré e *operacionalismo* por parte de Einstein⁹). A conclusão de Martins é de que “[p]ode-se dizer que, em vez de serem duas teorias diferentes, o que esses autores [Lorentz, Poincaré e Einstein] produziram foram duas interpretações diferentes da mesma teoria física”¹⁰.

⁴Ou, a ideia de que *somente* os experimentos originam e fundamentam o conhecimento científico.

⁵Einstein lido sobre os experimentos de Michelson e Morley nos artigos de Lorentz de 1892 (*O movimento relativo da Terra com relação ao éter*) e de 1895 (*A Experiência Interferencial de Michelson*). Entretanto, as suas manifestações acerca da importância desses experimentos para seu pensamento muitas vezes foram dúbias ou contraditórias com outras manifestações anteriores. Ao final da sua vida, afirmou em uma entrevista: “[o] resultado de Michelson não teve influência considerável no meu desenvolvimento. Não me lembro mesmo se tinha conhecimento dele quando escrevi o primeiro artigo sobre o assunto”. Gerald Holton, “Einstein, Michelson, and the Crucial Experiment”. In: *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1973, p.236-289. Ver também a reverenciada biografia de Abraham Pais, “*Sutil é o Senhor...: a Ciência e a Vida de Albert Einstein*”. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1995.

⁶Roberto de A. Martins, “O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818-1880)”. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. **29** (1), 2012, p.58. Ver também Edmund T. Whittaker, “*A History of the Theories of Aether and Electricity*”. Volume II. New York: Humanities Press, 1973.

⁷*Ibid.*, p.36

⁸*Ibid.*, p.37.

⁹O convencionalismo por parte de Poincaré se caracterizava por uma postura instrumentalista sobre o éter. Isto é, para Poincaré, o éter era um “*conceito útil*”, sendo que sua utilidade se justificava uma vez que “tudo parecia funcionar como se ele estivesse lá”. Já o operacionalismo de Einstein em 1905 se caracterizava por evitar questões indecidíveis, proposições não testáveis e asserções sobre entidades inobserváveis. O éter era uma entidade inobservável, e a proposição “o éter existe” não é, a rigor, testável. Lembrar que em 1905 Einstein *dispensou* (como supérfluo) o éter, e não que afirmou sua *inexistência*. Roberto de A. Martins, “Use and violation of operationalism in relativity”. *Manuscrito*, vol. **5** (2), 1981, p.103.

¹⁰*Op. cit.* nota 6, p.37.

De fato, muitos importantes historiadores e filósofos da Teoria da Relatividade Especial apontam que seria um erro dizer que há “uma” teoria da relatividade. Interpretações daquilo que podemos chamar de *formalismo matemático mínimo* da teoria foram surgindo ao longo dos anos, tendo as mesmas previsões e descrições empíricas, similarmente ao que ocorreu com a Física Quântica¹¹. Mas o que podemos chamar de *formalismo matemático mínimo* da teoria?

Os filósofos da ciência John Lucas e Peter Hodgson, estudando as diferentes abordagens da Teoria da Relatividade Especial por diferentes autores, ilustram em um diagrama (ver figura 1)¹² um conjunto numeroso de derivações alternativas do formalismo da teoria. Como salientam, todas agregam as Transformações de Lorentz, seja como princípio, consequência ou argumento. Neste quadro, a abordagem de Einstein é somente mais uma, embora relativamente mais simples do que grande parte das outras. Mas embora muito interessante do ponto de vista filosófico, segundo os autores esse diagrama pode fazer com que o “físico de profissão” se sinta exasperado, pois:

[p]ara ele, uma teoria é uma ferramenta a ser usada que o ajuda a entender o mundo, a fazer sentido os números que saem de suas medidas e a guiá-lo para futuros experimentos. Se uma teoria está funcionando bem, ele tende a não pensar muito e detalhadamente sua justificação, exceto quando ele está dando aulas ou escrevendo um livro-texto. É apenas quando a teoria começa a falhar que ele irá começar escrutinar seus fundamentos com uma atenção inquieta. E até então a Teoria Especial [da Relatividade] não lhe falhou; seu sucesso é triunfante para qualquer precisão que ele consegue obter em suas medidas, e isso normalmente conta muito. Sendo assim ele é inclinado a considerar todas essas derivações das Transformações de Lorentz como apenas brincadeira de filósofos ou físicos que lamentavelmente não conseguem pensar em nada melhor para fazer¹³.

Contudo, essa “brincadeira de filósofos e físicos que lamentavelmente não conseguem pensar em nada melhor para fazer” pode na verdade gerar um efeito oposto. Um “físico de profissão” mais paciente poderia concluir do diagrama que as Transformações de Lorentz se comportam como uma “essência”, o que lhe daria uma “segurança racional” de que não é à toa que “as contas funcionam”, ou, que isso não seria uma mera coincidência. Pelo contrário, as transformações podem ser entendidas como um “requerimento racional” para outras visões de espaço, tempo e causalidade¹⁴. A exasperação pode ser atenuada por meio da compreensão que esse conjunto complexo de conceitos e seus diferentes usos pode ser entendido como um reflexo da coerência interna dessas diferentes formulações da teoria¹⁵. Por fim, parece sensato concluir, com base no trabalho de Lucas e Hodgson, que o conjunto das equações das Transformações de Lorentz e suas implicações matemáticas mais imediatas compõem o *formalismo matemático mínimo* da Teoria da Relatividade Especial. Por outro lado, também é sensato admitir, considerando que a teoria não se reduza às suas fórmulas, que seu formalismo matemático mínimo é sujeito a interpretações físicas¹⁶.

¹¹Klaus Hentschel, “Philosophical Interpretations of Relativity Theory: 1910-1930”. PSA: *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol.2. Symposia and Invited Papers, 1990, p.171.

¹²John R. Lucas & Peter Hodgson, “*Spacetime & Electromagnetism: An Essay on the Philosophy of the Special Theory of Relativity*”. New York: Clarendon Press, 1990, p.152.

¹³*Ibid.*, p.182.

¹⁴*Ibid.*, p.184.

¹⁵*Ibid.*, p.186.

¹⁶Existem também várias reformulações da Teoria da Relatividade Especial. Uma delas, em particular, é a *Doubly relativity*, teoria que tenta fundamentar transformações de coordenadas mais gerais do que aquelas de Lorentz de forma a manter invariante não só a velocidade da luz mas também o comprimento e o tempo de Planck. Ver Giovanni Amelino-Camelia, “Relativity in space-time with structure governed by an observer-independent (Planckian) Length scale”, *International Journal of Modern Physics*, vol. 11, 2002, p.35-60.

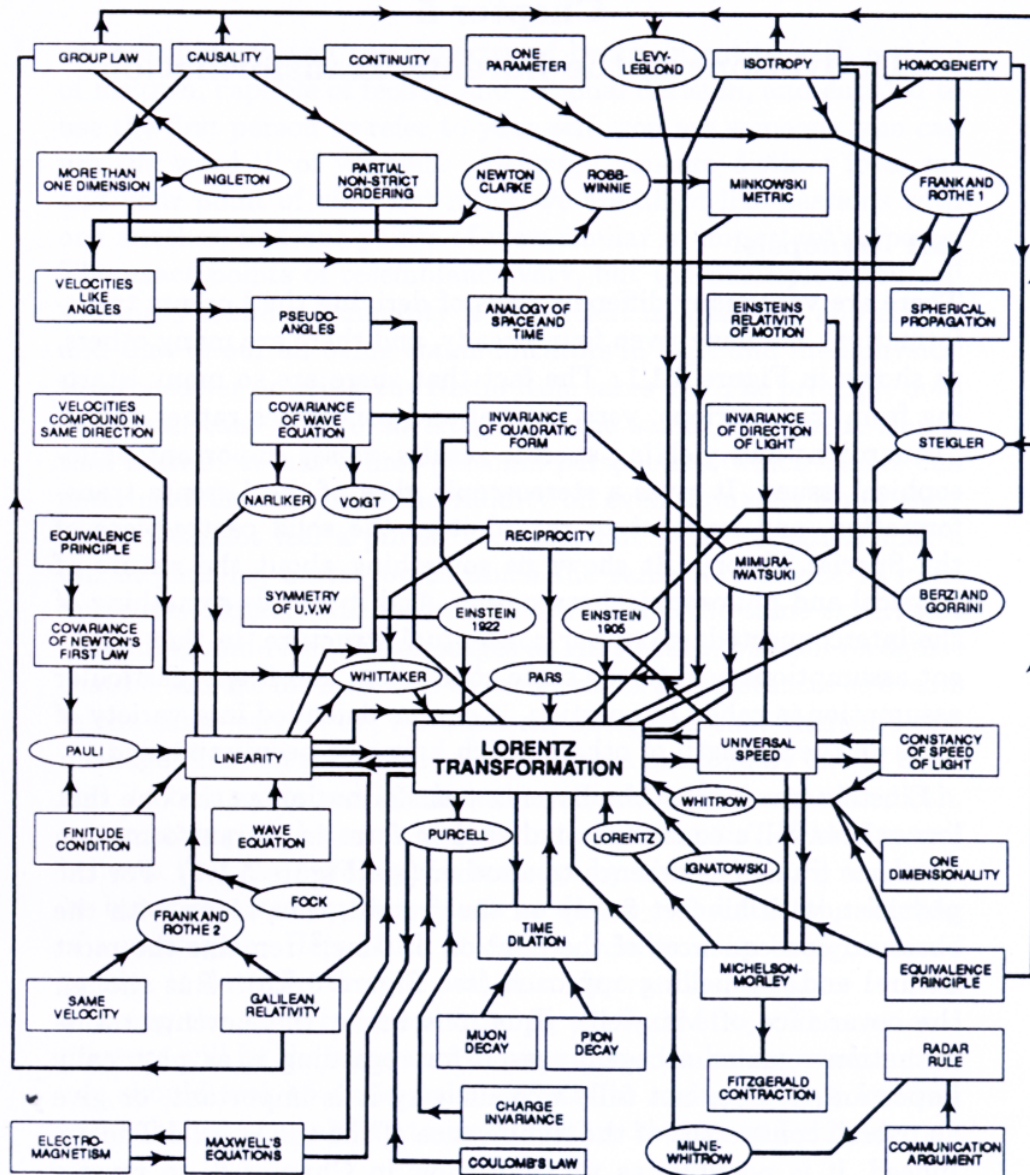


Figura 1: Diagrama de Lucas e Hodgson sobre diferentes formas de se derivar as equações de Lorentz. Os conceitos usados em cada derivação são ilustrados em boxes retangulares, já os autores estão em boxes circulares. Lucas e Hodgson salientam que muitos conceitos, embora usados em derivações diferentes, têm interpretações diferentes.

3 Apontamentos sobre aspectos filosóficos da teoria

Embora não tão conhecido como o debate entre interpretações da Física Quântica¹⁷, as discussões sobre interpretações das teorias da relatividade têm ganhado espaço em debates sobre os fundamentos do conhecimento científico¹⁸. O filósofo da ciência Osvaldo Pessoa Jr, ao estudar diferentes interpretações da Física Quântica, usa a noção de interpretação como um conjunto de teses que se agrega ao formalismo da Teoria Quântica que não afeta as previsões observacionais da teoria¹⁹. Adotaremos a mesma noção para as interpretações da Teoria da Relatividade Especial, salientando que todas as

¹⁷Ver Osvaldo Pessoa Jr, “*Conceitos de Física Quântica*”. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003

¹⁸Pode-se entender como sinal disto a realizações da conferência *Physical Interpretations of Relativity Theory* (PIRT), organizada pela British Society for the Philosophy of Science, desde 1988. A conferência se repetiu mais de uma dezena de vezes nas últimas décadas.

¹⁹*Op.cit.* nota 17, p.4-5. Essas teses, conforme descreve Pessoa Jr, fazem afirmações sobre a realidade além dos fenômenos observados ou impõem normas sobre inadequações de se fazer tais afirmações.

interpretações devem ser *empiricamente equivalentes*, no sentido da equivalência de previsões e descrições empíricas, e *matematicamente equivalentes*, no sentido de que tudo que pode ser derivado de uma interpretação pode o ser pelas outras. As raízes históricas das discussões sobre as interpretações da teoria se devem provavelmente às análises críticas de historiadores, filósofos e cientistas sobre as teorias relativísticas já alguns anos após a publicação dos artigos de Einstein. Ilustraremos em seguida as principais ideias de alguns estudiosos das implicações filosóficas da Teoria da Relatividade Especial.

Jonathan Bain, filósofo da ciência contemporâneo, distingue duas interpretações básicas para a Teoria da Relatividade Especial: a *interpretação substantivista* do Espaço-tempo e a *interpretação dinâmico-relacionista*²⁰. Cada uma tem um conjunto de premissas básicas próprias, que implicam em diferentes conclusões filosóficas acerca do status dos objetos e fenômenos relativísticos. A principal diferença entre elas refere-se à crença na existência do Espaço-tempo de Minkowski enquanto uma entidade real e objetiva (uma “substância”, no sentido filosófico), compartilhada pela primeira interpretação porém não pela segunda. A interpretação dinâmico-relacionista remonta à concepção de espaço de Leibniz, que se opunha à visão de Newton de Espaço Absoluto. Na interpretação substantivista, embora não haja o Espaço e o Tempo Absolutos, há o Espaço-tempo Absoluto de Minkowski. Nesta, as contrações e dilatações relativísticas são interpretadas como efeitos *cinemáticos*, enquanto que na interpretação dinâmico-relacionista eles são interpretados como efeitos *dinâmicos*²¹.

A historiadora e filósofa da ciência Marie-Antoinette Tonnelat, em uma rica obra sobre a história e a filosofia do princípio da relatividade, discute, entre diversos outros assuntos, a questão das interpretações filosóficas da Teoria da Relatividade Especial²². Primeiramente, Tonnelat defende que os “observáveis” comprimento espacial e intervalo temporal são grandezas “mutiladas”, incompletas, e defende então que uma “grandeza real” na Teoria da Relatividade Especial é aquela que permanece invariante para todos os observadores. Somente grandezas quadridimensionais têm essa propriedade. Logo, não poderíamos chamar, mesmo os objetos cotidianos, (mesa, pedra e cadeira) de “reais”, a não ser que o consideremos em suas extensões em quatro dimensões (“quadrimesa”, “quadripedra” e “quadricadeira”). Essa interpretação Tonellat chama de “*realista*”, e está de certa forma próxima à interpretação substantivista mencionada por Bain. Também destaca outra interpretação, a “*positivista*”, na qual se defende que as grandezas observadas (comprimentos espaciais e intervalos temporais), assim como suas eventuais modificações em diferentes referenciais, são “reais”, pois são as únicas grandezas que são efetivamente acessíveis a nós (não “observamos” diretamente objetos quadridimensionais)²³.

Recentemente, o físico e filósofo da ciência Harvey Brown desenvolveu uma nova interpretação do formalismo da Teoria da Relatividade Especial, inspirado na abordagem de George FitzGerald, Joseph

²⁰Jonathan Bain, “*Interpreting Special Relativity*”. Notas de aula do curso *PL2283-Philosophy of Relativity*, ministrada na Polytechnic Institute of New York University, primeiro semestre de 2012, p.1-2. Disponível no site do autor: <http://ls.poly.edu/~jbain/philrel/philreflectures/07.Consequences.pdf>

²¹*Idem*. Uma forma de compreender a principal diferença entre um efeito “cinemático” e um efeito “dinâmico” é por meio dos conceitos de “efeito natural” (que não precisa ser explicado) e “efeito causado” (que precisa ser explicado), baseados na ideia de *Ideal de Ordem Natural* do filósofo da ciência britânico Stephen Toulmin. Na física aristotélica, o movimento de queda (em direção ao centro do Universo, ou, da Terra) é “natural”, enquanto que o movimento retilíneo uniforme (na região sublunar) é “causado” por algum ímpeto (para Aristóteles, o *antiperistásis*). Na mecânica newtoniana, como se sabe, se considera algo que parece ser justamente o oposto, sendo “naturais” os estados de repouso e de movimento (relativo) retilíneo uniforme e “causados” os movimentos acelerados (por alguma força central ou pela força resultante). Sendo assim, para as interpretações destacadas, na interpretação substantivista se afirma que a contração e a dilatação relativísticas são “naturais”, enquanto que na interpretação relacionista se afirma que eles são “causados”.

²²Marie-Antoinette Tonnelat, “*Histoire du Principe de Relativité*” Paris: Flammarion éditeur, 1971.

²³*Ibid.*, p.258.

Larmor, Lajos Jánossy e John Bell²⁴ sobre a possível natureza dinâmica dos fenômenos relativísticos²⁵. Brown aponta fragilidades na estrutura das *teorias de princípio* (como a Termodinâmica e a Teoria da Relatividade Especial de Einstein), e defende que uma compreensão mais plena dos fenômenos relativísticos deve vir por meio de uma *teoria construtiva* (como a Mecânica Estatística), partindo da Teoria Quântica da matéria. Procurando abrir espaço para “explicações atômicas” dos fenômenos de contração e dilatação, Brown desenvolve noções novas de inércia, cinemática e dinâmica. As conclusões de seu trabalho ainda são pouco compreendidas, e levantam debates calorosos na literatura especializada.

Uma forma de compreender melhor as interpretações destacadas por Jonathan Bain e Marie Tonnelat é por meio de um estudo de caso. Dentro do conjunto de possíveis interpretações da Teoria da Relatividade Restrita, consideraremos a interpretação substantivista ilustrada por Jonathan Bain e a interpretação operacionalista (característica de Einstein em 1905), tomando-as de forma simplificada para uma rápida comparação sobre um estudo de caso do “paradoxo do submarino relativístico”. Claramente, não se pretende esgotar as discussões sobre essas interpretações, que a rigor se mostram bastante complexas.

4 Estudo de caso sobre o “paradoxo do submarino relativístico”

Consideremos a seguinte situação. Um submarino de comprimento próprio L , volume próprio V e massa m está submerso em um oceano e inicialmente em repouso na direção vertical (o que significa que há, inicialmente, um equilíbrio de forças). Chamemos de K o referencial de um observador-mergulhador submerso em repouso com relação ao oceano, e K' o referencial de um observador dentro do submarino. Vamos supor também que a densidade da água ρ é constante em todo ponto (no referencial do oceano), que não há arrasto da água, que a viscosidade da água não oferece resistência e que a aceleração gravitacional \mathbf{g} é constante e homogênea dentro do oceano (ver figura 2).

Nesta situação inicial, temos que a força peso é $\mathbf{P} = m\mathbf{g}$ e a força empuxo é $\mathbf{E} = -V\rho\mathbf{g}$. Aplicando a segunda lei de Newton, concluímos que:

$$\begin{aligned}\mathbf{P} + \mathbf{E} &= \mathbf{0} \\ (m - V\rho)\mathbf{g} &= \mathbf{0} \\ V\rho &= m\end{aligned}\tag{1}$$

O que acontece quando o submarino, depois de *acelerar suavemente*, passa a se mover com velocidade relativística v na direção x com relação ao observador-mergulhador?

Para o referencial K , o submarino sofre uma contração na direção de movimento. Isto é, a medida do seu comprimento na direção x não será L , mas L/γ , onde $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Essa contração irá afetar de alguma forma seu volume, e de fato, teremos que $V' = V/\gamma$. Por outro lado, o observador-mergulhador em K medirá uma massa diferente de m , que será $m' = \gamma m$ ²⁶. Dessa forma, pode-se

²⁴Bell, conhecido pelas “desigualdades de Bell” na Mecânica Quântica, tem um trabalho curioso sobre a Teoria da Relatividade Especial de título *How to teach special relativity*. Nele, Bell adota uma “pedagogia lorentziana”, e deriva as relações de contração e dilatação relativísticas aplicando as equações de Maxwell em um sistema atômico simples *suavemente acelerado*. John Bell, “How to teach special relativity”. In: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

²⁵Harvey R. Brown, “*Physical Relativity. Space-time structure from a dynamical perspective*”. Oxford: Oxford Press, 2005.

²⁶Muitos autores têm criticado a ideia de “massa relativística”, argumentando que é um conceito antigo e também errôneo. Com base nessas críticas, seria mais adequado falar em momento linear relativístico $p = \gamma(mv)$.

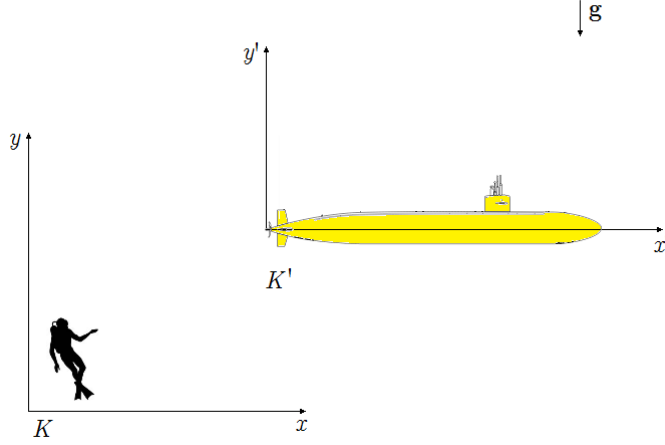


Figura 2: Representação da situação proposta.

mostrar que a densidade do submarino aumentará na proporção de γ^2 . As forças empuxo e peso irão ter módulos diferentes da situação inicial. Aplicando a segunda lei de Newton para esta nova situação:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}'_{Res} &= \sum_i \mathbf{F}_i \\
 &= \mathbf{P}' + \mathbf{E}' \\
 &= m'\mathbf{g} - V'\rho\mathbf{g} \\
 &= \left(m\gamma - \frac{V\rho}{\gamma}\right)\mathbf{g}
 \end{aligned}$$

usando a relação (1), chegamos a:

$$\mathbf{F}'_{Res} = m \left(\gamma - \frac{1}{\gamma}\right)\mathbf{g} \quad (2)$$

Para qualquer velocidade essa força será sempre na direção negativa do eixo y . Sendo assim, concluímos que para o observador-mergulhador no referencial K , o submarino irá *submergir*.

Para o referencial K' , o submarino está em repouso e é a água que se move com velocidade v no sentido negativo do eixo x' . Portanto, neste referencial será a água que sofrerá uma contração na direção x' , e as quantidades m , V e L referentes ao submarino não sofrerão efeitos relativísticos. Devido às alterações do volume e da massa da água (o volume será reduzido do fator γ , enquanto que a massa será multiplicada por esse mesmo fator), a densidade da água em K' será não mais ρ , mas $\rho'' = \gamma^2\rho$. Assim como em K , em K' os módulos das forças peso e empuxo serão diferentes da situação inicial. Sendo assim, aplicando a segunda Lei de Newton:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}''_{Res} &= \sum_i \mathbf{F}_i \\
 &= \mathbf{P}'' + \mathbf{E}'' \\
 &= m\mathbf{g} - V\rho''\mathbf{g} \\
 &= (m - \gamma^2V\rho)\mathbf{g}
 \end{aligned}$$

usando a relação (1), chegamos a:

$$\mathbf{F}''_{Res} = m(1 - \gamma^2)\mathbf{g} \quad (3)$$

Para qualquer velocidade essa força será sempre na direção positiva de y' . Desta forma, concluímos que para o referencial K' , o submarino irá *emergir*.

Como conciliar estes resultados excludentes? O que realmente ocorre? O submarino irá submergir ou emergir? Estas perguntas refletem a essência do “paradoxo do submarino”, proposto em 1989 pelo físico John Supplee e solucionado pelo físico brasileiro George Matsas em 2003²⁷. Contudo, para os propósitos deste trabalho, interessa mais a consideração central sobre a contração relativística utilizada por Supplee e Matsas do que propriamente a dissolução do paradoxo.

De fato, a consideração central é de que, tanto na derivação da força resultante em K como em K' , consideramos a contração relativística como uma *contração real* do comprimento do submarino, pois caso contrário não haveria alterações na força empuxo (que depende justamente das dimensões do objeto, ou quanta água ele deslocou). Cabe agora investigar o que estamos querendo dizer com isso. O que podemos chamar de “real” quando tratamos da Teoria da Relatividade Especial?

Uma maneira de responder é estudar as diferentes características das interpretações ilustradas por Bain e Tonnelat e ver como elas podem esclarecer na prática essa questão. Como discutido na seção anterior, as interpretações são empírica e matematicamente equivalentes, isto é, todas concordam com as relações utilizadas e com os efeitos representados por elas. As diferenças surgem quando examinamos suas explicações para efeitos relativísticos (ver tabela 1)²⁸.

	Sobre o que se trata a Teoria da Relatividade Especial?	Qual a natureza do Espaço e do Tempo?	Qual a natureza dos fenômenos de contração e dilatação?
Interpretação Operaciona- lista	Trata-se de uma teoria axiomática (Princípio da Relatividade e Princípio da independência da velocidade da luz com relação à fonte) sobre medidas com réguas e relógios entre referenciais com movimento relativo uniforme.	Proposições sobre a natureza do Espaço e do Tempo só fazem sentido se baseadas em medidas. Espaço e Tempo é “aquilo que se mede” com réguas e relógios (respectivamente).	As contrações e dilatações relativísticas são efeitos cinemáticos “reais” e decorrem (naturalmente) em razão dos dois princípios adotados.
Interpretação Substantivista	Trata-se de uma teoria acerca da estrutura do Espaço-tempo de Minkowski. A métrica (pseudo-euclidiana) do Espaço-tempo associada à definição de produto quadrive-torial garantem a invariância das leis físicas e da velocidade da luz.	O Espaço e o Tempo não existem separados um do outro. O Espaço-tempo é absoluto e existe de forma objetiva independentemente dos outros objetos físicos. Os comprimentos espaciais e os intervalos temporais são meras “sombras” de algo mais fundamental: o <i>intervalo espaço-temporal</i> .	As contrações e dilatações relativísticas são efeitos cinemáticos “aparentes” (no sentido de refletirem apenas aparências de um objeto em quatro dimensões mais fundamental) e decorrem (naturalmente) em razão do movimento relativo dos corpos no Espaço-tempo de Minkowski.

Tabela 1: Comparação sumária entre as posturas filosóficas em cada interpretação.

Com base na tabela, podemos construir as diferentes explicações das interpretações para um mesmo “fato”, por exemplo, a contração do submarino em K :

²⁷Uma nota de rodapé seria o lugar ideal para informar a dissolução do paradoxo. Mas isso não será feito aqui. Que a curiosidade do leitor o faça a descobrir por si só no denso artigo de Matsas (antes de fazer isso, é um exercício interessante ao leitor investigar se há “hipóteses frágeis” na apresentação do paradoxo). John Supplee, “Relativistic buoyancy”. *American Journal of Physics*, vol. **57**, 1989. George Matsas, “Relativistic Arquimedes law for fast moving bodies and the general-relativistic resolution of the “submarine paradox””. *Physical Review D*, vol. **68 (2)**, 2003. Do ponto de vista matemático, nossa abordagem aqui está mais simplificada que a de Supplee, e muitíssimo menos rigorosa que a de Matsas. Colocamos ao leitor outra questão: o que ocorreria, segundo o formalismo da teoria, com o mergulhador no referencial do submarino quando há movimento relativo?

²⁸Inspirado no trabalho de Bain, *op. cit.* nota 20.

- **Interpretação Operacionalista:** O observador-mergulhador realiza medidas simultâneas (em seu referencial) das extremidades do submarino em movimento, ciente de que está considerando (de forma axiomática) os princípios da relatividade e da independência da velocidade luz com relação à fonte. Após efetuadas e comparadas, essas medidas permitem o observador-mergulhador concluir que o submarino está contraído na direção de movimento;
- **Interpretação Substantivista:** A princípio, o observador-mergulhador tem ciência de sua crença de que o submarino é um objeto quadridimensional que existe no Espaço-tempo de Minkowski (um “quadrissubmarino”). Sabendo apenas a velocidade relativa do submarino, o observador-mergulhador conclui que aquilo que chama de “submarino contraído” é a “projeção” do “quadrissubmarino” no espaço tridimensional (ver figura 3).

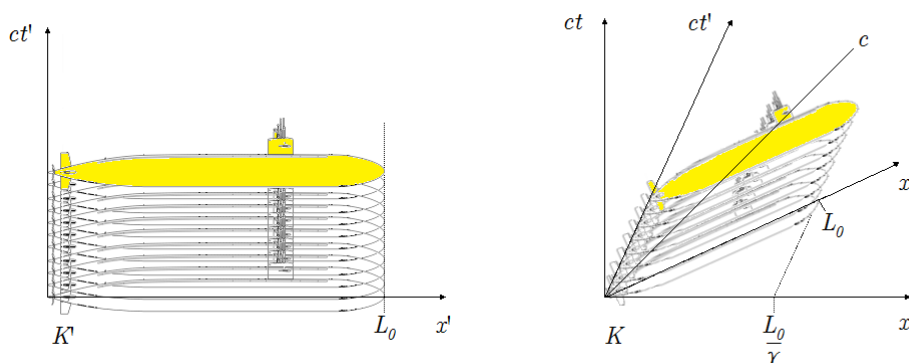


Figura 3: Representação do “Quadrissubmarino” nos referenciais K (a direita) e K' (a esquerda). Com base na interpretação substantivista, o submarino “perdura” (isto é, existe espaço-temporalmente de forma contínua), sendo portanto um objeto de quatro dimensões (as sobreposições de imagens na figura representam a “perduração” do “quadrissubmarino”). Abstendo-se das questões relativas à estrutura da matéria, podemos entender, nessa interpretação, que o “quadrissubmarino” ocupa um quadrivolume contínuo invariante por Transformações de Lorentz no Espaço-tempo de Minkowski.

Como é possível notar, as “cargas” filosóficas de cada interpretação são bem diferentes. A interpretação operacionalista é mais “empirista” que a interpretação substantivista²⁹, pois se fundamenta em procedimentos operacionais para definir comprimentos espaciais e intervalos temporais. Utilizando as definições de Tonnelat, podemos dizer que o operacionalismo é uma interpretação “positivista”, pelo fato de atribuir realidade ao comprimento somente por meio de sua medição. Por outro lado, a interpretação substantivista parte da ideia de um Espaço-tempo *a priori*, sendo nesse sentido mais “realista” que a interpretação operacionalista por lançar hipóteses sobre o que está além das observações imediatas.

Muitas vezes, alguns “físicos de profissão”, enquanto estão dando aulas, escrevendo, ou mesmo pesquisando, usam as interpretações de forma misturada, muitas vezes de forma desavisada ou sem ciência de suas intercontradições ou implicações filosóficas³⁰. Por exemplo, a interpretação operacio-

²⁹Há estudos sobre a suposta concepção filosófica de Einstein que o teria guiado na sua formulação da teoria eletrodinâmica dos corpos em movimento em 1905. Alguns autores, como Gerald Holton, defendem que Einstein carregava uma postura filosófica empirista influenciada em parte pela leitura de obras do físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916). Contudo, existe controvérsia, e muitos autores criticam a tese de Holton argumentando que Einstein, por lidar com questões envolvendo a constante de Avogadro e as dimensões atômicas e moleculares em seu doutorado, já tinha “aspirações realistas”. Gerald Holton, “Mach, Einstein and the search for reality”. *Daedalus*, vol. **97** (2). Massachusetts: MIT Press, 1968, p.636-673.

³⁰Isso em geral também ocorre com as interpretações da Física Quântica. Ver referência da nota 17.

nalista implica que, de certa forma, não faz sentido falar em comprimento de um corpo sem executar medidas das suas extensões³¹, ao passo que na interpretação substantivista os objetos “perduram” no Espaço-tempo, *tendo sempre comprimentos espaciais bem definidos para cada referencial*, mesmo que não sejam medidos. Além disso, um físico operacionalista tenderia a não concordar com a crença no Espaço-tempo por ser uma entidade diretamente inobservável e cuja existência não é “testável”, diferentemente de um físico substantivista que parte a princípio da existência do Espaço-tempo.

5 Considerações finais

É curioso notar como alguns físicos se manifestaram acerca da “realidade” da contração de Lorentz. Em 1911, questionado sobre a realidade física da contração em sua teoria em comparação com a abordagem de Lorentz, Einstein afirmou:

O autor injustificadamente afirma que há uma diferença entre a abordagem de Lorentz e a minha *quanto aos fatos físicos*. É confusa a questão de a contração de Lorentz ‘realmente’ existir ou não. Não existe ‘realmente’, na medida em que não existe para um observador que se move [com a régua]; existe ‘realmente’ no sentido em que pode, em princípio, ser demonstrada por um observador em repouso.³²

Uma diferença entre as posturas de Einstein e Lorentz para os mesmos processos (contração e dilatação relativísticas) é notável. Para Einstein, esses processos decorrem “naturalmente” da adoção axiomática dos princípios presentes em seu artigo de 1905. Já para Lorentz, os processos não seriam “naturais”, e por isso deveriam ser explicados por algum mecanismo (no caso, um momento introduzido pelo éter de origem não eletromagnética) que faria com que as moléculas, átomos e as partículas elementares fossem contraídos espacialmente na direção de movimento na proporção $1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Ainda que por alguns anos as teorias de Lorentz e Einstein fossem confundidas (sendo chamada de “teoria de Lorentz-Einstein”), com a aceitação das teorias relativísticas por volta de 1920, partidários da interpretação lorentziana foram sendo cada vez mais raros. Contudo, em 1921, Wolfgang Pauli em sua importante monografia *Teoria da Relatividade* (escrita quando tinha 21 anos), ao discutir as diferentes interpretações dadas por Einstein e Lorentz para a contração, afirma:

Deve-se (...) abandonar completamente qualquer tentativa de explicar a contração de Lorentz do ponto de vista atômico? Acreditamos que a resposta a esta questão é Não. A contração de uma régua não é um processo elementar, mas sim bem complicado. Esse efeito existe somente em razão da covariância com respeito ao grupo de Lorentz das equações básicas da teoria do elétron, assim como daquelas leis, que ainda desconhecemos, que determinam a coesão do próprio elétron³³.

Ninguém nega o poder matemático da Teoria da Relatividade Especial, nem os filósofos e historiadores que analisam a teoria “em terceira pessoa”, tampouco os físicos que o experenciam “em primeira pessoa” diariamente. Enquanto um “instrumento do dia-a-dia”, a teoria é utilizada com enorme sucesso em todos os laboratórios de altas energias e aceleradores. Enquanto corpo teórico, ela é utilizada

³¹A interpretação ortodoxa (ou, interpretação de Copenhagen, ou ainda, interpretação da complementaridade) da Física Quântica é, de certa forma, próxima à interpretação operacionalista. Na Física Quântica, contudo, o problema se agrava pelo fato do processo de medição interferir de forma significativa no “objeto quântico”. A interpretação ortodoxa pode levar ao ceticismo ou à suspensão de juízo com relação ao status ontológico do estado desse objeto entre duas medidas, isto é, quando não está sendo observado. No caso análogo para a interpretação operacionalista na relatividade especial, se suspende juízo sobre o status ontológico da extensão do objeto.

³²*Op. cit.* nota 5 (Pais), p.165.

³³*Op. cit.* nota 25, p.118.

muitas vezes para fundamentar, questionar ou averiguar outras teorias. Ela faz parte da “ciência normal”, usando o termo de Thomas Kuhn. Sua capacidade de descrever fenômenos, de prever resultados, e também sua elegância matemática fazem com que muitos físicos se sintam tentados a atribuir às entidades e processos diretamente inobserváveis da teoria certo “grau de realidade”. Outros preferem fazer um uso pragmático-instrumentalista da teoria, se abstendo de questões filosóficas complicadas e se limitando a “comparar os números” que saem da teoria e dos experimentos. Obviamente, existe um espectro bastante diversificado entre esses dois extremos.

Contudo, não se exige muito esforço para perceber que o formalismo matemático por si só não nos diz muita coisa. É exigido do físico uma atividade criativa (quicá imaginativa) de “ver além das equações”. É nesse âmbito que se defende a relevância do debate das interpretações do formalismo matemático mínimo da Teoria da Relatividade Especial. Além disso, o estudo das interpretações tem vários interesses, desde filosóficos e históricos até pedagógicos. Para a História e Filosofia da Ciência, esse estudo pode ser extremamente enriquecedor para se compreender melhor as origens e os desenvolvimentos históricos da teoria, assim como de seus detalhes conceituais, que por vezes são atropelados pelo “algebrismo exagerado”³⁴. Já no âmbito pedagógico, o fato de se ilustrar várias formas de entender um mesmo fenômeno pode ajudar a desmitificar um pouco o conhecimento científico, afastando a ainda bastante divulgada visão (exagerada) de que a ciência “apreende de *forma definitiva* a realidade”. Por fim, pode-se argumentar que o estudo das interpretações pode abrir espaço mesmo para os “físicos de profissão”, que muitas vezes se veem presos numa única forma de ver o mundo, a desenvolver novas ideias, teorias e hipóteses.

Isto é, se não pela paciência e pelo tempo, há mais que ganhar do que perder em se exasperar um pouco com as diferentes formas de interpretar uma teoria.

³⁴Esse argumento foi inspirado pelo trabalho de Hentschel. *Op. cit.* nota 11, p.178.

F Resenhas analisadas digitalizadas da aula A

Nas páginas adiante se encontram as resenhas A dos oito estudantes convidados para o grupo focal. As linhas foram numeradas para fins de análise de discurso textual.

Evolução dos

Prof. Ivã Gurgel

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

033

Resenha para aula #10¹

Discuta sobre quais são, segundo o autor, as diferenças entre as abordagens de Lorentz (e Poincaré) e de Einstein para aquilo que hoje chamamos de Teoria da Relatividade Especial.

(Releia a seção 1.21) Qual a sua interpretação pessoal sobre os fenômenos relativísticos? Você entende a contração e a dilatação relativísticas como “efeitos fisicamente reais”? Explique seu raciocínio.

1 O desenvolvimento da experimentação no século XIX fez com que fossem
2 possíveis diversos experimentos para a medição da velocidade da luz em diversas
3 configurações. Todos eles pareciam convergir para um único valor, independente em
4 que referencial estava se medindo e das características das fontes luminosas. Tais
5 resultados geravam questionamento por parte dos cientistas, pois violavam os conceitos
6 até então aceitos. Se a luz fosse uma onda ela deveria se propagar em um meio e sua
7 velocidade nesse meio seria constante, sendo possível medir alterações dessa velocidade
8 quando se medisse em um referencial com uma velocidade não nula em relação a esse
9 meio. Tal meio hipotético era conhecido como éter.

10 Diversos cientistas tentaram explicar a invariância da velocidade da luz e suas
11 consequências, entre eles destacam-se: Fresnel, FitzGerald. Porém, foi com o físico
12 holandês Hendrik Lorentz e o matemático francês Henri Poincaré que as explicações
13 ganharam um caráter mais formal e lógico; apoiados pelo conceito de éter. Foi apenas
14 em 1905 com a publicação dos artigos de Albert Einstein sobre a relatividade especial
15 que o assunto ganhou status de teoria.

¹ Texto: MARTINS, Roberto de Andrade. *Teoria da Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2012 [2008].

16 Os resultados apresentados por Einstein em 1905 são semelhantes a resultados
17 apresentados por outros cientistas anteriores a ele, sobre tudo por Lorentz e Poincaré.
18 Contudo, o conteúdo físico e filosófico dos artigos de Einstein muito difere dos seus
19 antecessores. Einstein apresenta seus resultados tendo como base dois postulados: o
20 princípio da relatividade, em que ele afirma que todos os referenciais inerciais são
21 equivalentes, ou seja, a física é mesma em todos os referenciais inerciais (princípio já
22 aceito desde a época de Newton) e a invariância da velocidade da luz, que seria igual
23 em qualquer referencial inercial. Nesses artigos ele nega a existência do éter, o que ia de
24 encontro às ideias de Lorentz e Poincaré, e com isso ele justifica a invariância da
25 velocidade da luz, pois a não existência do éter implica que não há um referencial
26 privilegiado em que a luz se propaga e, portanto, sua velocidade em qualquer referencial
27 deve ser igual. Diferentemente de Lorentz e de Poincaré, Einstein em seus artigos se
28 limitou a explicações quantitativas, deixando de lado explicações qualitativas, postura
29 semelhante a Isaac Newton na publicação do Principia.

30 O estudo da relatividade especial é muito complicado, pois na maioria das vezes
31 é totalmente contra intuitivo. Conceitos como a dilatação do tempo e a contração do
32 espaço vão de encontro a nossa intuição; além das altas velocidades necessárias para
33 que os efeitos relativísticos sejam perceptíveis. Por isso é dito que é necessário criar
34 uma nova intuição ao estudar relatividade (algo semelhante acontece quando se estuda
35 mecânica quântica, é a física do século XX bagunçando nossa intuição). No entanto,
36 alguns experimentos nos mostra que os efeitos da relatividade são reais, como os
37 experimentos que detectam píons produzidos na exosfera e são detectados na superfície
38 terrestre. Classicamente não seria possível medi-los, já que a meia vida deles é baixa
39 para que eles pudessem percorrer a distância que separa o solo terrestre da exosfera,
40 mesmo se eles tivessem uma velocidade igual a da luz. A explicação desse fenômeno é
41 dada pela relatividade: no referencial da terra, o tempo de decaimento dos píons é maior
42 do que em um referencial parado em relação a ele. Já no referencial dos píons, o espaço
43 se contrai; portanto a distância que ele precisa percorrer é menor. Além disso,
44 experimentos no LHC mostram que as linhas de campo elétrico de prótons acelerados se
45 acumulam na direção ortogonal a velocidade em que eles estão se propagando; resultado
46 previsto pela relatividade aplicada à eletrodinâmica. Talvez os efeitos não sejam reais
47 no sentido defendido por Lorentz e Poincaré, mas são reais à medida que são
48 mensuráveis.

Evolução dos C

Prof. J

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

113

Resenha para aula #10¹

Discuta sobre quais são, segundo o autor, as diferenças entre as abordagens de Lorentz (e Poincaré) e de Einstein para aquilo que hoje chamamos de Teoria da Relatividade Especial.

(Releia a seção 1.21) Qual a sua interpretação pessoal sobre os fenômenos relativísticos? Você entende a contração e a dilatação relativísticas como “efeitos fisicamente reais”? Explique seu raciocínio.

1 As abordagens feitas por Lorentz e Poincaré estavam baseadas na
2 existência (ou aceitação) do éter, sendo este um conceito útil no sentido de
3 promover uma maior compreensão dos fenômenos. A interpretação feita por
4 eles resultava na constância da velocidade da luz (em relação ao éter),
5 porém a velocidade em questão é aquela que pode ser mensurada. O
6 argumento utilizado era de que para medir a velocidade da luz era preciso
7 utilizar a própria velocidade da luz (para sincronização de relógios), logo
8 toda medida desta velocidade em qualquer referencial no éter teria o mesmo
9 valor. Einstein por sua vez negava a existência do éter, já que este não era
10 detectável, medido. Essa negação implica que todos os referenciais são
11 idênticos, isto é, se a velocidade da luz é isotrópica em um referencial ela
12 será isotrópica em todos os outros referenciais inerciais. Logo a diferença
13 entre as teorias está em seus princípios e não em seu resultado, isto é, a
14 diferença é vista na aceitação do éter por parte de Lorentz e Poincaré
15 enquanto que Einstein nega a existência deste “meio”.

¹ Texto: MARTINS, Roberto de Andrade. *Teoria da Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2012 [2008].

16 Como efeitos relativísticos somente são “perceptíveis” a velocidades
17 próximas da luz não é possível ter uma intuição a respeito destes efeitos.
18 Deste modo minha interpretação pessoal a respeito de tais fenômenos, até o
19 momento, se restringe àquela de Einstein, já que não conheço a teoria
20 desenvolvida por Lorentz e Poincarè. Isto é, não considero os fenômenos de
21 contração espacial e dilatação temporal como sendo “fisicamente reais”.
22 Como base desta última afirmação estou assumindo que um fenômeno para
23 ser chamado de “real” não possa depender de como eu o vejo (em qual
24 referencial estou), que é exatamente o caso da dilatação/contração que
25 depende da velocidade do referencial em questão. Talvez a questão mais
26 sensível aqui seja definir o que é “fisicamente real” ou “realidade física”:
27 aquilo que eu observo, no meu referencial, a respeito do mundo e associo a
28 fenômenos físicos ou o que o mundo me mostra, independentemente de como
29 eu o vejo (independente do referencial)? Se a resposta for a primeira é
30 necessário então considerar a dilatação/contração como fenômenos reais.
31 Porém no referencial com o “espaço contraído” o mesmo não é observado
32 contraído, o será somente para alguém fora deste referencial.

Resumo aula 10a

1 Segundo o autor a principal diferença é a acaitação
2 do ete. "A principal diferença entre as duas aborda-
3 ções era a acaitação (ou negação) do ete".
4

5 Os fenômenos relativísticos são mais e medidos com
6 grande precisão ("Optical clocks and relativity" -
7 C.W. Chou et al, Science - 24 setembro 2010), mas
8 entendimento desses fenômenos é que eles são decorrentes
9 da interação dos corpos em movimento com o espaço,
10 pois essas propriedades (contração e dilatação) são na
11 verdade propriedades da geometria do espaço.

Resenha 10.

1 Segundo o Texto "Einstein e depois de Einstein" a principal
 2 diferença entre os trabalhos de Lorentz-Poincaré e os de
 3 Einstein é existência ou não de um éter. Enquanto
 4 Einstein postulava a não existência do éter* sem maiores
 5 explicações físicas, apenas epistemológicas, Lorentz e Poincaré
 6 assumem sua existência baseado em várias resultados
 7 matemáticas e analogias com outras teorias. Também sabe
 8 que o trabalho de Einstein era baseado em certas po-
 9 tuladas das quais se derivavam seus resultados, enquanto
 10 os trabalhos de Lorentz-Poincaré tinham como base
 11 resultados do eletromagnetismo. Por fim, Lorentz-
 12 Poincaré preocupavam-se com as qualidades microscópicas
 13 dos corpos (na contração das mesmas) enquanto Einstein
 14 olhava para as qualidades macroscópicas.
 15 Visto a existência de um limite mínimo para as
 16 partículas, podemos supor que tal fato se deva de um
 17 "pixelamento" de matéria. Tal propriedade pode ser entenda
 18 da como nosso universo sendo uma simulação de um
 19 "computador" externo à nossa realidade e nossas leis
 20 sendo regras e limitações nessa simulação. Vendo por
 21 esta forma, a velocidade da luz seria a velocidade
 22 máxima de processamento de informações, enquanto
 23 outras consequências desta limitação são apenas limites
 24 desse processamento. Visto isso podemos analisar a contr
 25 ação e dilatação como efeitos fisicamente reais,
 26 pois em princípio podem ser medidos, tornando-os
 27 reais.

Evolução dos C

Prof.

1º Semestre de 2013,

872

Resenha para aula #10¹

Discuta sobre quais são, segundo o autor, as diferenças entre as abordagens de Lorentz (e Poincaré) e de Einstein para aquilo que hoje chamamos de Teoria da Relatividade Especial. (Releia a seção 1.21) Qual a sua interpretação pessoal sobre os fenômenos relativísticos? Você entende a contração e a dilatação relativísticas como “efeitos fisicamente reais”? Explique seu raciocínio.

1 A diferença crucial entre as duas teorias se refere ao modo como ambas
2 concebiam o éter. Enquanto Lorentz e Poincaré acreditavam na existência do éter,
3 Einstein a construiu negando a existência dele, e essa posição faz com que as
4 interpretações para os mesmos fenômenos em ambas as teorias possuam características
5 completamente diferentes e alguma delas com implicações profundas na raiz da teoria.
6 É importante ressaltar que apesar de apresentarem diferenças com relação ao éter e
7 também na interpretação de alguns fenômenos, ambas as teorias possuíam uma estrutura
8 matemática semelhante, todos os resultados que uma demonstra a outra também tem a
9 capacidade demonstrar.

10 Lorentz e Poincaré acreditavam no princípio da relatividade, no entanto, esta
11 crença que está fundamentada na teoria se consolida gradativamente de acordo com
12 observações experimentais, existe um éter, mas não é possível determinar o movimento
13 relativo da terra em relação a ele. Enquanto para Einstein a relatividade é um postulado,
14 está enraizado no corpo da teoria, de forma que qualquer medida da terra com relação
15 ao suposto éter derrubaria por completo a teoria de Einstein, assim como também
16 derrubaria a teoria de Lorentz e Poincaire, mas a reestruturação desta última seria mais
17 fácil de realizar, pois admite a existência do éter.

18 Outra diferença que podemos abordar é com relação a velocidade da luz em
19 diferentes referenciais. Lorentz e Poincaré acreditam sim, da mesma forma que

¹ Texto: MARTINS, Roberto de Andrade. *Teoria da Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2012 [2008].

20 Einstein, que a velocidade da luz independente do referencial adotado ou do movimento
21 relativo entre eles, no entanto, para os dois cientistas, esse é um fato de não termos a
22 capacidade de medir sua velocidade "real" com relação ao éter, tendo em visto que toda
23 medida realizada será "viciada" pelo fato de estarmos em seu interior utilizando arranjos
24 experimentais que estariam fadados e abordar essas medidas. Já para Einstein, como o
25 éter não existe, não há referenciais privilegiados, todos são iguais, portanto, se a
26 velocidade da luz é determinada em um referencial inercial, como são todos
27 equivalentes, essa medida será idêntica em todos os outros. Novamente, qualquer
28 inconsistência com esse pressuposto derrubaria ambas as teorias, mas uma reformulação
29 na teoria de Lorentz e Poincaré seria mais facilitada por admitir a existência do éter.

30 Permeando o segundo questionamento, entendo que a realidade, como a
31 concebemos, é construída a partir de nossas experiências, sejam elas vivenciais ou
32 intelectuais. Os conceitos de espaço e tempo, como os concebemos, são também
33 construídos no contexto de tais experiências. Kant(1980), por exemplo, afirma que
34 espaço e tempo são elementos essenciais de sensibilidade da realidade. Da forma como
35 sempre foram tratados, os conceitos de espaço e tempo eram considerados absolutos, e
36 entendo que essa interpretação surge também de tais experiências, sejam elas no século
37 XVII com a ascensão da mecânica Newtoniana, ou hoje da forma como uma criança
38 evolui e concebe tais conceitos, independente se há ou não a interpretação relativística.
39 Posta essa opinião em questão, em que é fundamentada a relatividade? A (re)construção
40 de tais conceitos surgem nos experimentos mentais de Einstein e das interpretações
41 mecânicas do éter sintetizadas por Lorentz e Poincaré. São consequências, na primeira,
42 de uma estrutura lógica e matemática e na segunda de uma mecânica aplicada em um
43 fluido que sequer se conhece suas origens ou propriedades e chega a se duvidar de sua
44 própria existência. Existem experimentos sobre decaimento de múons que comprovam a
45 dilatação temporal, mas será este efeito real ou é um resultado que está inserido e
46 constituído dentro de um paradigma relativístico?

47 Deixo minha posição como suspensa e esclareço acreditar nas aplicabilidades
48 da teoria da Relatividade Especial, mas não consigo conceber nenhuma relação dela
49 com a realidade física propriamente dita e, pensando nisto, coloco a seguinte questão:
50 *supondo que as experiências vivenciais de nós, que concebemos a realidade, estivessem*
51 *submetidas aos regimes relativísticos, a conceberíamos de uma forma diferente?*

As abordagens de Lorentz/Poincaré e de Einstein Para a Relatividade Especial

1 A relatividade é um princípio físico que foi e ainda é objeto de reflexão de muitos
2 pensadores, não só de Einstein. Mas, será que todos a interpretaram ou interpretam da
3 mesma forma? O texto de Roberto Martins nos convida a uma reflexão sobre as
4 abordagens de Lorentz/Poincaré e de Einstein acerca da Teoria da Relatividade Restrita,
5 procurando esmiuçar suas semelhanças, mas, sobretudo suas diferenças, de forma
6 provocativa.

7 No início do texto, o autor diz que considerando o conjunto de trabalhos realizados
8 por Lorentz e Poincaré é possível verificar que quase todas as equações obtidas por
9 Einstein já haviam sido obtidas anteriormente, sendo que não poderia ser feito um
10 experimento crucial para distinguir a teoria de Lorentz-Poincaré da de Einstein nem
11 mesmo decidir qual delas é correta. O fato é que, na verdade, ambas não são duas
12 teorias diferentes, mas sim duas abordagens diferentes para a mesma teoria física. Para
13 Lorentz e Poincaré o éter era um conceito útil que poderia propiciar a compreensão dos
14 fenômenos, mesmo que não fosse possível detectá-lo, ao passo que para Einstein o éter
15 era um conceito inútil, a princípio, pois não podia ser detectado. Posteriormente, no
16 entanto, ele mudou de postura e passou a defender a existência do éter.

17 **No que diz respeito ao Princípio da Relatividade nas duas abordagens**, Martins
18 salienta que para Lorentz e Poincaré aquele era a generalização de resultados
19 experimentais e, assim, passível de refutação. Já na abordagem de Einstein, o princípio
20 da relatividade era um postulado, de forma que se o éter não existe, é impossível
21 detectar movimentos em relação a ele e todos os referenciais inerciais são equivalentes.

22 **Quanto à constância da velocidade da luz**, é possível dizer que a base deste
23 postulado na abordagem de Einstein era teórica e não experimental. Em 1905, Einstein
24 propôs uma hipótese corpuscular para a luz, mas na relatividade ela foi tratada como
25 onda. Por outro lado, a constância da velocidade da luz era uma suposição natural e
26 indiscutível para os cientistas que aceitavam a teoria ondulatória da luz no século XIX,
27 cuja ideia estava vinculada à crença da existência do éter como substrato para a
28 propagação da luz e de outras ondas eletromagnéticas.

29 **Com relação à velocidade da luz em diferentes referenciais**, na abordagem de
30 Lorentz e Poincaré a velocidade só é isotrópica em relação ao éter. Em outros
31 referenciais que se movam em relação ao éter, sua velocidade "real" é diferente. Já na
32 abordagem de Einstein, todos os referenciais são idênticos, uma vez que não existe o

33 éter. Assim, existe uma diferença conceitual entre as duas abordagens, porém as duas
34 concordam que as medidas da velocidade da luz são sempre as mesmas em todos os
35 referenciais inerciais e, portanto, nenhum experimento de medida da velocidade da luz
36 poderia mostrar que uma das abordagens está certa e a outra está errada.

37 **Acerca do nível de análise**, a contração dos corpos seria “real” na abordagem de
38 Lorentz e Poincaré, visto que as forças moleculares se alteram quando um corpo
39 material se move através do éter e o objeto muda de tamanho e forma. Na abordagem de
40 Einstein, não há diferença entre contração real e aparente, posto que não existe éter,
41 sendo a contração um fenômeno relativo que depende somente dos processos de medida
42 adotados. Além do que, Einstein não explica a causa da contração, só deduz que ela
43 existe. No estudo de muitos fenômenos, tais como a contração dos objetos e a variação
44 de massa com a velocidade, a abordagem de Lorentz e Poincaré utiliza uma análise
45 microscópica, estuda todos os detalhes dos fenômenos e procura captar as causas dos
46 efeitos observados, sendo seus resultados deduzidos a partir do eletromagnetismo e de
47 análises detalhadas dos sistemas em movimento através do éter. No entanto, a
48 abordagem de Einstein utiliza uma análise principalmente macroscópica e
49 fenomenológica, sendo os resultados mais importantes deduzidos a priori, a partir de
50 experimentos mentais, sem detalhes do que ocorre dentro dos objetos estudados.

51 **Sobre a estrutura matemática e lógica**, Martins nos mostra que o trabalho de
52 1905 de Einstein é muito mais simples, claro e fácil de compreender. Seus pressupostos
53 são apresentados com mais clareza, as deduções são mais simples e claras tanto do
54 ponto de vista conceitual quanto matemático e sua metodologia é muito mais
55 conveniente, sendo tudo uma grande contribuição. Já os trabalhos de Lorentz e Poincaré
56 são mais difíceis de serem compreendidos, visto que os autores estavam apresentando a
57 construção gradual, por meio de várias tentativas, de uma teoria que ainda estava
58 sofrendo mudanças.

59 **Quanto à visão epistemológica**, por fim, o autor demonstra que a principal
60 diferença entre as duas abordagens é epistemológica, que se manifestava tanto em
61 aspectos da realidade dos efeitos relativísticos quanto em aspectos da aceitação ou
62 negação do éter. Poincaré, por exemplo, adota uma postura instrumentalista, ao passo
63 que Einstein adota uma postura positivista por um tempo, mas posteriormente (em
64 1920) passa a adotar diferentes posturas filosóficas em diferentes momentos, quando
65 conveniente para defender suas ideias.

66 Para concluir, acredito que os efeitos relativísticos não sejam “fisicamente reais”,
67 mas sim relativos e dependentes do referencial no qual se encontra o observador,
68 tomando como base que o conhecimento humano que é construído nunca se dá de forma
69 direta com o mundo, mas é mediado através de signos e símbolos e, portanto, uma
70 abstração do “real”, bem como admitindo que o éter não existe.

Evolução dos C

Prof. Ivã Gurgel

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

942

Resenha para aula #10¹

Discuta sobre quais são, segundo o autor, as diferenças entre as abordagens de Lorentz (e Poincaré) e de Einstein para aquilo que hoje chamamos de Teoria da Relatividade Especial.

(Releia a seção 1.21) Qual a sua interpretação pessoal sobre os fenômenos relativísticos? Você entende a contração e a dilatação relativísticas como “efeitos fisicamente reais”? Explique seu raciocínio.

1 Um ponto muito importante para essa discussão presente no texto de Roberto Martins
2 é a concordância entre os trabalhos de Einstein e de Lorentz e Poincaré, tanto em nível experimental
3 quanto em nível teórico. É dizer, assim como o autor declara logo de início, não houve no início do
4 século XX, tal como não há até hoje, qualquer experimento que verificasse qualquer discordância
5 entre as teorias da relatividade formuladas por esse grupo de físicos, uma de Einstein e outra de
6 Lorentz e Poincaré, tanto quanto não há qualquer discrepância nas previsões obtidas através dessas
7 teorias, projetando-as a diferentes limites. Ambas são, nesse sentido prático, uma mesma teoria,
8 embora fundamentalmente sejam distintas: ainda que os trabalhos analisados não possuam equações
9 diferentes ou produzam resultados diferentes, eles se baseiam concepções epistemológicas distintas.

10 Essa diferença fundamental reside principalmente, pelo meu entender, na assimilação
11 do conceito de éter pela teoria de Lorentz e Poincaré e pela sua ausência nos trabalhos de Einstein,
12 sem essa diferença estrutural produza resultados discrepantes. Para contornar esse aspecto
13 fundamental garantindo os mesmos fins, o que Einstein faz é se utilizar de dois postulados, como
14 princípios fundamentais da natureza, se baseando numa postura epistemológica distinta da de
15 Poincaré, de que objetos físicos não observáveis podem ser excluídos da Física, postura que Martins
16 chama de “empirista ou positivista” – o que particularmente não me agrada, uma vez que com isso
17 descobri que sou um positivista. O uso desses dois postulados por Einstein, diga-se o Princípio da

¹ Texto: MARTINS, Roberto de Andrade. *Teoria da Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2012 [2008].

18 Relatividade e o Princípio da Constância da Velocidade da Luz, servem justamente para preencher
19 o vácuo que há em sua teoria deixado pela não admissão do éter (aliás, o que o autor em alguns
20 momentos declara como sendo uma negação do éter no trabalho de Einstein eu entendo como sendo
21 apenas sua não afirmação, ou seja, ele parece não criticar tal conceito, mas apenas não o adota);
22 enquanto nos estudos de Lorentz e Poincaré os fenômenos descritos pela Relatividade são
23 entendidos a partir de comportamentos do éter, tal como a constância da velocidade da luz vir do
24 fato da velocidade de uma onda em um meio não dispersivo não depender da velocidade da fonte
25 com relação ao meio, como ocorre no ar ou na água e fato esse observável na equação de onda do
26 eletromagnetismo tanto quanto em qualquer outra, ainda que o éter não precise ser observável,
27 bastando que a teoria baseada nesse conceito seja coerente consigo mesma e com resultados
28 experimentais observáveis – segundo Poincaré, exatamente pelo éter não ser observável Einstein o
29 retira de sua teoria e coloca o que para Lorentz e Poincaré eram decorrências da natureza do meio
30 como postulados. No trabalho de Einstein, não há distinção entre o real e o aparente como há no
31 trabalho baseado no éter. A contração do espaço, por exemplo, que foi explicada por Lorentz como
32 resultado de forças moleculares alteradas devido ao movimento de um corpo em relação ao éter
33 (resultado de um atrito com o meio, pelo que suponho), sendo assim explicado por um modelo
34 mecânico (assim de acordo com a linha de pensamento de Thomson a respeito da necessidade de
35 tais modelos como esse para o entendimento de um fenômeno apresentada no texto da aula 9 e
36 fortemente presente durante o século XIX) segundo o qual aquele que se movimenta *realmente*² se
37 contrai e aquele que está parado *realmente* não altera seu tamanho, é explicada por Einstein como
38 “um fenômeno relativo, que depende apenas dos processos de medida adotados”. Os estudos de
39 Einstein não são dotados de explicações materiais microscópicas exatamente por não haver nelas tal
40 meio corpuscular, dando a explicação lugar à dedução da existência dos fenômenos.

41 Além dessas duas diferenças apontadas nas teorias da relatividade, a ausência de um
42 éter inobservável preenchida por princípios fundamentais postulados e o contraste entre o real e o
43 aparente mais marcante em uma interpretação que em outra, há uma diferença estrutural marcante
44 entre as teorias. Enquanto os trabalhos de Poincaré e Lorentz formavam o que entendi como um
45 mosaico de explicações de diferentes fenômenos estudadas por métodos diferentes, sem uma
46 organização clara com um conjunto de postulados, um ponto de partida e um método de deduções,
47 os artigos de Einstein apresentavam o contrário, uma estrutura baseada em seus dois princípios e
48 algumas outras coisas, seguida por deduções conceitual e matematicamente claras, contendo assim
49 uma “técnica geral de análise” bem mais simples do que a teoria de Lorentz e Poincaré, tendo sido,

² É interessante como o autor tem cuidado, nos primeiros dois parágrafos da página 42, ao utilizar-se das palavras real e realmente.

50 segundo o autor, esse o principal motivo pelo qual diversos pesquisadores passaram a seguir a
51 interpretação de Einstein em detrimento da alternativa, e não pela ausência de éter.

52 Antes de passar ao próximo tópico desta resenha, gostaria apenas de destacar algo que
53 foi absolutamente surpreendente para mim ao ler o texto de Roberto Martins. O postulado da
54 constância da velocidade da luz afirma que “a velocidade da luz não depende da velocidade da sua
55 fonte” (1º parágrafo da seção 1.19). Contudo, esse princípio pode ser interpretado de modos
56 distintos se o olharmos pela óptica de Einstein ou de Lorentz e Poincaré. Se admitimos um éter, a
57 velocidade da fonte mencionada refere-se a esse éter, mas se não o há, o princípio se mantém, só
58 que a velocidade da fonte passa a ser relativa ao referencial adotado!

59 (O único ponto da teoria de Einstein que gostaria que houvesse sido abordada no texto,
60 já que gostaria de saber como é abordado por Lorentz e Poincaré, é a relatividade do tempo: nas
61 duas teorias o tempo não era absoluto?)

62 Quanto à minha interpretação pessoal a respeito dos fenômenos relativísticos, como
63 disse de passagem alguns parágrafos acima, estou em pleno acordo com Einstein nos seus artigos de
64 1905 e acredito que uma entidade física qualquer, se não for observável e se não trouxer quaisquer
65 conseqüências diretas à interpretação de resultados experimentais, como era o caso do éter, pode ser
66 considerada em uma teoria tanto quanto pode ser desprezada. É uma espécie de *liberdade de gauge*, ***
67 mas não vejo razão para necessitarmos de um conceito na Física se ele não pode ser observável,
68 então, do mesmo modo como podemos escolher o gauge em que trabalhamos, tomando uma
69 constante com um valor arbitrário apenas por conveniência matemática, acredito que podemos
70 dizer que um inobservável é irrelevante, não necessariamente inexistente, e portanto desprezível em
71 nossas teorias, de tal modo que a consideração de tais inobserváveis esteja vinculada apenas com
72 simplificações de cálculos, organizações matemáticas apropriadas ou uma estreita correlação com
73 observáveis, como é o caso dos potenciais V e A do eletromagnetismo, de modo que o que valha
74 mesmo seja a coerência da teoria e sua simplicidade: se dá no mesmo, consideremos ou não um
75 inobservável em nossas descrições conforme isso as torne mais simples, embora eu creia que a ****
76 desconsideração, por reduzir o número de elementos na teoria, faça-a mais simples.

G Resenhas analisadas digitalizadas da aula B

Nas páginas adiante se encontram as resenhas B dos oito estudantes convidados para o grupo focal. As linhas foram numeradas para fins de análise de discurso textual.

Evolução dos C

Prof. Ivã Gurgel

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

033

Resenha para aula #10¹

Aponte e discuta sucintamente as semelhanças e diferenças entre as duas interpretações simplificadas expostas no texto.

Ainda que as interpretações ilustradas sejam versões simplificadas de teses mais complexas, procure responder detalhadamente: com qual delas você mais se simpatiza? Justifique.

Em sua opinião, qual delas um “físico de profissão” deveria adotar? Justifique.

1 Embora quantitativamente a relatividade especial mantém-se inviolável,
2 qualitativamente ela esta longe de ter uma explicação consensual. Isso em partes deve-
3 se as diferenças epistemológicas nos trabalhos dos seus principais criadores, Einstein,
4 Lorentz e Poincaré, que influenciaram linhas de pensamentos posteriores. Por outro
5 lado, sua própria natureza inacessível cria controvérsias sobre sua explicação. Dentre as
6 diversas linhas filosóficas de interpretação da relatividade especial, duas em particular
7 são curiosas por terem características distintas e terem influenciado importantes
8 cientistas: o operacionalismo e o substantivismo. O operacionalismo considera que um
9 determinado objeto é real se for mensurável; assim, o operacionalista tem uma visão
10 mais empirista sobre a ciência. Para ele a relatividade especial decorre dos postulados
11 de Einstein e, portanto, todos os resultados, contração do espaço, dilatação do tempo
12 etc, provém desses axiomas. Já o substantivista tem uma visão mais conceitual do
13 mundo, crendo na natureza abstrata das teorias. Para ele o espaço-tempo de Minkowski
14 é uma entidade real, onde fenômenos como contração do espaço e a dilatação do tempo
15 se manifestam.

¹ Texto: NORONHA, André. *Reflexões sobre História e Filosofia da Teoria da Relatividade Especial*. IFUSP (divulgação interna), 2013.

16 Particularmente sou mais simpático ao operacionalismo. Acho que a
17 comprovação experimental é imprescindível a uma teoria consistente que se dispõe a
18 entender e a explicar a natureza. No entanto, acho também que o empirismo, ainda que
19 importante como base de teorias, não é indispensável. É possível fazer ciência sem
20 necessariamente ter dados experimentais a priori disponíveis, apenas através de ideias e
21 suposições lógicas. Porém, para que essas ideias passem a figurar como uma teoria é
22 preciso de algum exercício de comprovação que envolva de alguma forma fenômenos
23 naturais; não necessariamente esse exercício precisa ser um experimento clássico em
24 um laboratório, pode envolver uma estrutura lógica, baseada talvez na comprovação de
25 outros experimentos, e arranjados estruturalmente como uma prova matemática.
26 “Teorias” que se baseiam apenas na matemática e dessa forma perdem o contato com a
27 natureza real, não são teorias.

28 Um físico não pode esquecer o seu verdadeiro propósito que é entender e
29 explicar a natureza. Acho que as duas linhas de pensamento podem levar a esse ideal,
30 mas para o substantivista é necessário algum vínculos com a natureza. É possível
31 acreditar no espaço-tempo de Minkowski como algo real, já que ele explica fenômenos
32 observáveis e, portanto, tem um link com a natureza.

Evolução dos (

Prof. Ivã Gurgel

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

113

Resenha para aula #10¹

Aponte e discuta sucintamente as semelhanças e diferenças entre as duas interpretações simplificadas expostas no texto.

Ainda que as interpretações ilustradas sejam versões simplificadas de teses mais complexas, procure responder detalhadamente: com qual delas você mais se simpatiza? Justifique.

Em sua opinião, qual delas um “físico de profissão” deveria adotar? Justifique.

1 As duas interpretações expostas são aquelas positivistas e a realista
2 de Marie-Antoinette Tonnelat. As semelhanças entre as interpretações são
3 que estas são matematicamente/empiricamente equivalentes, isto é, a partir
4 destas interpretações os resultados observados serão os mesmos
5 (equivalência emp.) e também é possível derivar uma interpretação da outra
6 (equivalência mat.). As diferenças entre estas interpretações se dá no âmbito
7 filosófico, ou seja, na interpretação realista (que no exemplo do submarino
8 reflete a visão substantivista) aquilo que é “real” precisa ser invariante para
9 todos os observadores e tal fato somente ocorre quando é considerado um
10 espaço-tempo absoluto (não observável em sua forma quadridimensional), de
11 Minkowski, onde o espaço (tridimensional) e o tempo (unidimensional) são
12 apenas projeções daquele espaço-tempo absoluto, por outro lado na
13 interpretação positivista tanto o espaço quanto o tempo são reais, pois estes
14 são as únicas coisas que podemos observar. No exemplo do submarino
15 examinado no texto, tem-se que a interpretação positivista é associada com

¹ Texto: NORONHA, André. *Reflexões sobre História e Filosofia da Teoria da Relatividade Especial*. IFUSP (divulgação interna), 2013.

16 a visão operacionalista e a interpretação realista está ligada à
17 substantivista.

18 Dentre estas duas visões apresentadas, a minha preferência pessoal é
19 a interpretação positivista simplesmente pelo fato de que não acredito que
20 seja necessário considerar que uma grandeza seja “real” apenas quando esta
21 seja invariante para todos os referenciais adotados, como no caso da
22 interpretação realista. Como as ciências físicas são baseadas na observação,
23 acredito que seja possível considerar o espaço e o tempo, separadamente,
24 como grandezas “reais”, já que são estas são observadas. Para mim a ideia
25 de algo ser “real” e “não observável” (pelo menos como um todo, no caso do
26 espaço-tempo) ainda não é clara.

27 Acredito que um “físico de profissão” deva adotar a interpretação na
28 qual lhe seja mais claro o entendimento da natureza, para que
29 posteriormente lhe seja possível descrever os fenômenos relativísticos de
30 maneira clara, sem ambiguidades. Tanto a interpretação realista quanto a
31 positivista podem ser utilizadas para este fim, sendo necessário apenas não
32 misturar os conceitos de “realidade” entre estas interpretações, o que deve
33 ser a causa do paradoxo do submarino (chute!). Logo, ao meu ver as duas
34 interpretações são passíveis de utilização por “físicos de profissão”.

1
2
3
4
5
6
7
8
Primeiramente os dados interpretados consideram que os observadores realizam medidas, na interpretação operacionalista o observador realiza medidas de espaço e tira suas conclusões a partir de suposições com relação a c . Na interpretação relativista o observador realiza medidas de velocidade e tira suas conclusões das propriedades do espaço e como elas se relacionam com objetos em movimento.

9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
Em síntese mais com a interpretação relativista, pois, pensam que os fenômenos de contração e dilatação são propriedades do espaço e mais geral no sentido que se pensarmos em uma partícula e esta existir no espaço-tempo quando o e.t. se altera tudo que está nele, no caso, a partícula também se altera. Outra motivação é que a interpretação leva a um entendimento melhor do formalismo 4-vetorial da RG mesmo sabendo que qualquer fenômeno relativístico que não envolva campos gravitacionais não precisa ser interpretado com RG.

20
21
22
23
Um "físico de profissão" deve adotar a mais conveniente para seu trabalho. Se ele se prender a alguma interpretação é possível que isso dificulte a entender muita de outras fenômenos correlatos.

Evolução dos C

Prof. Iva Gurgei

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

583

Resenha para aula #10¹

Aponte e discuta sucintamente as semelhanças e diferenças entre as duas interpretações simplificadas expostas no texto.

Ainda que as interpretações ilustradas sejam versões simplificadas de teses mais complexas, procure responder detalhadamente: com qual delas você mais se simpatiza?

Justifique.

Em sua opinião, qual delas um "físico de profissão" deveria adotar? Justifique.

1 Segundo o texto, temos que, em relação às duas interpretações
2 as semelhanças se resumem nos resultados, ou seja empírica
3 e matematicamente elas são indistinguíveis. Suas divergên-
4 ças encontram-se na estrutura da Teoria, as visões de espaço-
5 tempo e no conceito da "realidade" dos fenômenos como
6 contração e dilatação.

7 Na primeira temos que a operacionalista baseia-se em
8 axiomas, enquanto a Substantiva tem como base a estru-
9 tura matemática de um espaço distinto (Espaço-Tempo de
10 Minkowski), quanto às visões de espaço e tempo, a
11 operacionalista é essencialmente empírica, com Espaço e
12 tempo sendo "objetos" oriundos de uma medição, enquan-
13 to na Substantiva ambos são parte de uma e mesma
14 coisa mais fundamental (intervalo espaço-tempo).

¹ Texto: NORONHA, André. *Reflexões sobre História e Filosofia da Teoria da Relatividade Especial*. IFUSP (divulgação interna), 2013.

15 Por fim, na operacionalista as contrações e dilatações
16 são "reais" devido aos meios de medição, enquanto na
17 substantiva, elas são "aparentes", por serem projeções
18 de um espaço maior e decorrem do espaço-tempo já
19 mencionado.

20 Viso tais aspectos, sou "obrigado" a me inclinar para
21 a interpretação substantiva e tal se deve à maior proxi-
22 midade desta com uma visão mais matematizada.

23 É fácil ver que na operacionalista há uma forte
24 ligação com aspectos mais "intuitivos", digo: tal interpreta-
25 ção tenta ver os fenômenos como coisas pertencentes
26 unicamente à nossa experiência, trazendo explicações com
27 aspectos ligados à nossa intuição. Particularmente veja
28 tal necessidade um tanto quanto limitada, pois me
29 parece que tais interpretações julgam como sendo
30 física apenas as relações com a nossa experiência
31 (cotidiana, talvez) e intuição.

32 Tenho para mim que chegamos em um momento da
33 física onde nessa nova "intuição" deve residir na matemá-
34 tica e dela, tirarmos a noção da "realidade" e
35 aspectos do mundo. Nisto uso as palavras do texto "É
36 exigido do físico (...) 'ver além das equações'" e complemen-
37 to que não se deve substituí-las com descrições da
38 realidade (realidade essa que pode estar fora de nossa
39 compreensão no sentido do ser humano como "aparato
40 de medição"). Somos criaturas limitadas e precisamos
41 depositar na matemática a nova maneira de ver a
42 realidade (e abandonar as "estoras e malhas") escondida
43 de nós, máquinas ultrapassadas. Com isso justifi-firo, também
44 a visão que um físico de profissão deve ter.
43 Chega a hora de outra evolução das conceitas em
44 física. =]

Evolução dos C

Prof. Iva Gurgei

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

872

Resenha para aula #10¹

Aponte e discuta sucintamente as semelhanças e diferenças entre as duas interpretações simplificadas expostas no texto. Ainda que as interpretações ilustradas sejam versões simplificadas de teses mais complexas, procure responder detalhadamente: com qual delas você mais se simpatiza? Justifique. Em sua opinião, qual delas um “físico de profissão” deveria adotar? Justifique.

1 De forma sucinta podemos relatar que a interpretação operacionalista tem um
2 caráter que beira o empirismo, buscando relações diretas entre os fenômenos e medidas
3 observáveis, de um modo extremo, pode-se até afirmar que, como cita o autor, *"de certa*
4 *forma, não faz sentido falar em comprimento de um corpo sem executar medidas de*
5 *suas extensões."* p.11. Já a interpretação substantivista se mostra bastante distinta da
6 primeira, pois faz afirmações de entes de natureza inobservável, faz referência a um
7 caráter invariante na quadridimensão do espaço-tempo, além do mais, parte da ideia de,
8 como também cita o autor, *"um Espaço-tempo a priori."* p.9. Se relaciona bastante com
9 com uma postura realista, pois lança hipóteses sobre uma natureza que vão além de
10 observações imediatas.

11 Pela leitura aprofundada e reflexiva do texto, percebo no caráter operacionalista
12 uma fragilidade devido a sua dependência extrema com o mensurável, dentro desta
13 pode-se criar um grande ceticismo que pode levar a uma interrupção na construção de
14 qualquer conhecimento que esteja além da capacidade de mensuração. A preocupação
15 posta em questão se dá principalmente pelo contexto em que a ciência se insere
16 atualmente, onde grande parte dos objetos de estudo fogem completamente de qualquer
17 senso de realidade que construímos ao longo de nossa vida. Por este motivo, creio que
18 me sinto bastante confortável com a interpretação substantivista, desde que ela não seja

¹ Texto: NORONHA, André. *Reflexões sobre História e Filosofia da Teoria da Relatividade Especial*. IFUSP (divulgação interna), 2013.

19 | levada ao extremo, pois concede a liberdade intelectual de abordar a natureza sem
20 | necessariamente mensurá-la, o que cria uma grande possibilidade de transcender
21 | conhecimentos.

22 | No entanto, a dinâmica científica necessita de ambas interpretações, tanto o
23 | operacionalismo, com sua criteriosidade de operar sobre os entes observáveis de
24 | determinados fenômenos, quanto o substantivismo, com sua capacidade de lidar com o
25 | não observável e possibilitar a formulação hipóteses ad hoc que contribuam para a
26 | construção do conhecimento científico. Tendo em vista os argumentos colocados,
27 | entendo que o Físico de profissão não deva aderir, em seus e extremos, nem uma, nem a
28 | outra interpretação, mas deve sim ter a capacidade de conhecer ambas e se posicionar,
29 | utilizando uma delas ou até mesmo as duas, de forma coerente na sua tarefa de
30 | contribuir para a construção do conhecimento científico.

Interpretações Operacionalista e Substantivista na Teoria da Relatividade

1 Uma teoria física nunca está sujeita a uma única interpretação, principalmente no que
2 diz respeito aos seus aspectos históricos e filosóficos. Isto, porque as formas de pensar e
3 construir conhecimento são típicos de cada ser humano, este inserido em um contexto
4 social e histórico-cultural. Como nos mostra André Noronha, em seu texto, são várias as
5 interpretações históricas e filosóficas para a Teoria da Relatividade, assim nos convida a
6 uma reflexão sobre duas delas: a operacionalista e a substantivista.

7 Na primeira parte do texto, o autor faz alguns apontamentos sobre a pré-história da
8 teoria, destacando o prevalecimento de “histórias conceituais” dela, as duas formas nas
9 quais os seus estudos históricos tendem a se enquadrar: ideia de ruptura com os
10 trabalhos dos antecessores de Einstein ou a ideia de continuidade com os trabalhos que
11 já estavam em ação na época por Lorentz, Poincaré e outros, bem como a forte e quase
12 generalizada correlação histórica estabelecida entre os resultados dos experimentos de
13 interferometria de Michelson-Morley e o surgimento da teoria. Em seguida, destaca as
14 ideias dos filósofos da ciência, John Lucas e Peter Hodgson, de que diversas
15 interpretações sobre o formalismo matemático mínimo da teoria foram desenvolvidas ao
16 longo dos anos, no entanto todas agregaram as Transformações de Lorentz, seja como
17 princípio, consequência ou argumento.

18 Na terceira parte, Noronha faz alguns apontamentos sobre aspectos filosóficos da
19 teoria, dando ênfase ao fato de que as diversas interpretações da Teoria da Relatividade,
20 apesar de suas diferenças, devem ser empírica e matematicamente equivalentes. Assim,
21 nos apresenta as ideias de Jonathan Bain, filósofo da ciência que distingue duas
22 interpretações básicas para a teoria: a substantivista do Espaço-Tempo e a dinâmico-
23 relacionista; e as ideias de Marie-Antoinette Tonnelat, historiadora e filósofa da ciência
24 que discute as interpretações realista e positivista da teoria.

25 Na quarta e penúltima parte do texto, o autor nos traz para o auge do trabalho: as
26 diferenças entre as interpretações operacionalista e substantivista da Teoria da
27 Relatividade, tomando como base um estudo de caso sobre o “paradoxo do submarino
28 relativístico”. Neste estudo, um submarino de comprimento próprio L , volume próprio
29 V e massa m está submerso em um oceano e inicialmente em repouso na direção
30 vertical. Chama-se K , o referencial de um observador-mergulhador submerso em
31 repouso com relação ao oceano, e K' o referencial de um observador dentro do
32 submarino, de forma que se tem o seguinte problema: “o que acontece quando, o
33 submarino, depois de acelerar suavemente, passa a se mover com velocidade
34 relativística v na direção x com relação ao observador-mergulhador?”. Depois de uma
35 análise, chega-se a conclusão de que no referencial K o submarino sofre uma contração
36 e submerge, ao passo que no referencial K' é a água que sofre uma contração e o
37 submarino emerge. Este paradoxo leva em consideração que a contração relativística é

38 uma contração “real” do comprimento do submarino e foi resolvido pelo físico
39 brasileiro George Matsas. Para entendermos o que podemos chamar de “real” na Teoria
40 da Relatividade, Noronha nos sugere analisar as diferenças entre as interpretações
41 destacadas por Bain e Tonnelat para a explicação dos efeitos relativísticos:
42 operacionalista e substantivista.

43 Na interpretação operacionalista, a Teoria da Relatividade trata-se de uma teoria
44 axiomática sobre medidas com réguas e relógios entre referenciais com movimento
45 relativo uniforme, sendo que as proposições sobre a natureza do Espaço e do Tempo só
46 fazem sentido se baseadas em medidas, bem como as contrações e dilatações
47 relativísticas são efeitos cinemáticos “reais” e decorrem em razão dos dois princípios
48 adotados. Já na interpretação substantivista, a Teoria da Relatividade trata-se de uma
49 teoria acerca da estrutura do espaço-tempo de Minkowski, de forma que sua métrica
50 associada à definição de produto quadrvetorial garante a invariância das leis físicas e da
51 velocidade da luz. Além do que, o espaço e o tempo não existem separados um do
52 outro, o espaço-tempo é absoluto e existe de forma objetiva independentemente dos
53 outros objetos físicos, os comprimentos espaciais e os intervalos temporais são meras
54 sombras do intervalo espaço-temporal. Ademais, as contrações e dilatações relativísticas
55 são efeitos cinemáticos aparentes e decorrem em razão do movimento relativo dos
56 corpos no espaço-tempo de Minkowski.

57 No paradoxo do submarino, tomando como base as diferenças entre as duas
58 interpretações expostas acima, é possível notar que na interpretação operacionalista o
59 observador-mergulhador, após realizar medidas simultâneas das extremidades do
60 submarino em movimento, conclui que o submarino está contraído na direção do
61 movimento. Já na interpretação substantivista, o observador-mergulhador através de sua
62 crença de que o submarino é um objeto quadridimensional que existe no espaço-tempo
63 de Minkowski e da velocidade relativa do submarino, conclui que o que está contraído
64 é a projeção do quadrisubmarino no espaço tridimensional. Vemos, assim, que a
65 interpretação operacionalista é mais empirista do que a substantivista pois se
66 fundamenta em procedimentos operacionais para definir comprimentos e intervalos
67 temporais. Por outro lado, a interpretação substantivista é mais realista do que a
68 operacionalista pois lança hipóteses sobre o que está além das observações imediatas.

69 Levando em consideração as ideias presentes nas “considerações finais” do texto de
70 Noronha acerca da importância das diferentes interpretações da Teoria da Relatividade
71 para interesses históricos, filosóficos e pedagógicos, bem como as minhas próprias
72 ideias, acredito que um “físico de profissão” deva conhecer as diversas interpretações
73 sobre a Teoria da Relatividade de forma a adotar, inescrupulosa e oportunamente
74 como Einstein, diversas posturas filosóficas ao longo de sua carreira, visto que tanto as
75 ideias e paradigmas da física quanto suas próprias ideias se transformam continuamente,
76 portanto talvez seja necessário de tempos em tempos adotar a postura que mais lhe seja
77 conveniente. Ainda que, pessoalmente, eu simpatize mais com a interpretação
78 operacionalista que, ao meu ver, está mais diretamente ligada ao meu “mundo
79 perceptível tridimensional”, logo mais acessível, compreensível e dotado de mais
80 sentido do que o apresentado pela interpretação substantivista.

Evolução dos C

Prof. Iva Gurgei

1º Semestre de 2013, Instituto de Física da USP

942

Resenha para aula #10¹

Aponte e discuta sucintamente as semelhanças e diferenças entre as duas interpretações simplificadas expostas no texto.

Ainda que as interpretações ilustradas sejam versões simplificadas de teses mais complexas, procure responder detalhadamente: com qual delas você mais se simpatiza? Justifique.

Em sua opinião, qual delas um “físico de profissão” deveria adotar? Justifique.

1 Remetendo-se ao texto lido para a aula anterior, a décima, o autor do texto
2 ao qual a presente resenha se refere apresenta logo de início a coerência em
3 certos pontos entre as teorias da relatividade de Einstein e de Lorentz-
4 Poincaré, diga-se a presença de equações idênticas, a equivalência entre tais
5 teorias em previsões realizadas e a impossibilidade da realização de um
6 conjunto de experimentos que determine que uma delas esteja certa e a outra
7 errada, isto é, ambas as teorias igualmente coerentes com o que se pode
8 observar através de quaisquer experimentos realizados até hoje. As diferenças
9 entre as teorias da relatividade apresentadas e discutidas na última resenha
10 residem em interpretações e aspectos estruturais abordados anteriormente. De
11 modo semelhante, dentro da teoria de Einstein, quero dizer, se nos
12 preocupamos apenas com a Relatividade Especial sem nos prendermos ao
13 conceito de éter, podemos abordá-la a partir de diferentes interpretações
14 apresentadas no texto desta aula.

15 A Interpretação Operacionalista, que entende a teoria da Relatividade como
16 uma forma de relacionar medições de tempo e espaço realizadas por

¹ Texto: NORONHA, André. *Reflexões sobre História e Filosofia da Teoria da Relatividade Especial*. IFUSP (divulgação interna), 2013.

17 observadores que se movem com relação um ao outro, colocando os conceitos
18 de espaço (comprimento, nas medições) e tempo como independentes, já que
19 um mede-se através de uma régua e outro com o uso de um relógio, é uma
20 interpretação positivista, pelo meu entendimento, por atribuir uma realidade
21 somente e tão somente àquilo que o observador vê ou mede diretamente,
22 conforme apresentado sobre as ideias de Marie Tonnelat. A Interpretação
23 Substantivista, por outro lado, entendo como mais matemática, percebendo a
24 Relatividade Especial como a descrição da estrutura e das propriedades de um
25 espaço métrico dotado de um produto interno, denominados respectivamente
26 de Espaço de Minkowski e intervalo; em contraposição com a primeira
27 interpretação, mais pragmática e conservadora, positivista, os conceitos de
28 tempo e espaço não seriam independentes, pois não são definidos através de
29 medições, mas da própria estrutura do espaço métrico quadridimensional
30 dotado de tensores expressos através da combinação de tempo e espaço,
31 meras dimensões Espaciais que não se diferenciam senão por um sinal.
32 Enquanto no operacionalismo a realidade é definida a partir do que vemos, no
33 substantivismo o que vemos é uma sombra de elementos que transcendem a
34 nossa observação direta.

35 Comparando as duas interpretações, percebo a diferença que há em abordar
36 a Relatividade Especial em uma aula de Física II, quando começamos a
37 entender seus conceitos através da suposição de dois referencias, cada um
38 dotado de um relógio, um se movendo com relação ao outro com velocidade
39 $v \dots$ etc., de modo semelhante ao que é feito por L. Landau em *A Teoria do*
40 *Campo*, e abordá-la em uma aula de Grupos e Tensores, quando, já tendo tido
41 uma visão operacional, somos reintroduzidos à teoria de modo completamente
42 matemático: seja o espaço vetorial R^4 dotado do produto interno $\langle x, y \rangle =$
43 $x_\mu \eta^{\mu\nu} y_\nu$, para quaisquer $x, y \dots$ etc., nesse sentido que digo ser mais matemática.

44 Assim como em nosso aprendizado a interpretação operacional vem antes
45 da substantiva, e não apenas na Relatividade Especial, como o autor do texto
46 de referência menciona, uma vez que essa forma de ver a teoria ou de
47 entender o que ela nos diz a respeito do mundo é mais próxima de nossos
48 problemas quotidianos, é razoável que ela também venha primeiro na história;
49 como apresentado na última aula, o trabalho e Poincaré, um dos pioneiros da

50 relatividade, vem de um problema absolutamente operacional com relação a
51 como sincronizar relógios. Por outro lado, a interpretação substantivista
52 demanda uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos, uma vez que
53 toma como pilares conceitos abstratos e de uma complexidade matemática
54 maior e que ainda deve ser coerente com qualquer outra forma de entender a
55 teoria no que diz respeito a fatos observados (não pode haver divergências não
56 filosóficas).

57 Muito bem, a pergunta *com qual interpretação você mais simpatiza?*
58 *desdobro para qual forma de ver o mundo, ou qual forma de entender*
59 *realidade, decorrente de diferentes interpretações eu adoto para estudar o*
60 *universo?*, uma vez que em diversos momentos essas interpretações são
61 complementares, como para fins didáticos, e tomadas em conjunto, contanto
62 que sabendo-se quando estamos nos utilizando de qual, podemos assimilar
63 mais profundamente o que diz a teoria, tal como eu disse ocorrer na ordem
64 histórica. Tal questão, como olhar para a Natureza, me leva a um ciclo
65 paradoxal.

66 Em primeiro lugar, sou levado a concordar com a concepção positivista de
67 que realidade é aquilo que o observador, seja ele qual for, é capaz de ver e
68 medir, de modo que tudo aquilo que não somos capaz de observar
69 diretamente, como era o caso do éter visto na última aula, pode ser ignorado
70 por não trazer qualquer dado relevante sobre nossa realidade. Seguindo por
71 esse caminho, chegamos a uma teoria que descreve bem o bastante o que o
72 observador percebe para ser aceita, e com algum tempo e esforço vemos
73 depois que essa teoria pode ser apresentada de forma mais bem estruturada,
74 como parte da Natureza íntima do Universo, através de uma teoria bastante
75 mais matemática que contenha os problemas operacionais que originaram
76 essa epopeia mas sem tomá-los como ponto de partida. Pois bem, até aqui eu
77 não resumi apenas meu entendimento da evolução de uma teoria física, mas
78 também parte do texto e o esquema do bacharelado em Física.

79 Essa nova teoria substantivista, para ser aceita, deve ser redutível ao que
80 havia sido elaborado anteriormente e a resultados experimentais, sendo então
81 capaz de uma descrição bastante precisa e elegante do que lhe compete.
82 Agora, o que ocorre é que temos um entendimento novo sobre a realidade,

83 baseado em uma nova teoria matemática e sobre a qual novos problemas e
84 conceitos podem se desdobrar. Se voltamos à ideia positivista inicial, somos
85 levados a abandonar essa nova compreensão como uma descrição direta de
86 realidade, pois ela não é diretamente observável. Contudo, esse retorno ao
87 início eu não consigo aceitar, e prefiro assumir uma visão, talvez premeditada,
88 de que o Universo é aquilo que vemos dele: se uma teoria (ou uma concepção
89 coerente de uma) nos apresenta o mundo de um modo, acredito que possamos
90 dizer que o mundo é aquilo; a Natureza é aquilo que vemos dela, mantendo
91 grandezas inobserváveis de fora, mas considerando que aquilo que
92 interpretações substantivas nos apresentam são elementos da realidade.
93 Dando a Relatividade Especial novamente como exemplo, podemos abandonar
94 o éter porque ele é inobservável e irrelevante portanto para a construção de
95 uma teoria coerente com o experimento; por outro lado, essa nova teoria nos
96 leva ao conceito de Espaço de Minkowski, não diretamente observável, que,
97 sendo parte de um conjunto de descrições do mundo verificáveis e coerentes,
98 pode ser entendido como realidade. Dessa forma, na medida que caminhamos
99 para interpretações substantivista, nossa visão de mundo caminha e não
100 ficamos mais tão presos a antigas questões operacionais, numa espécie de
101 quebra espontânea de simetria, em que partimos de um ponto e chegamos a
102 outro, distinto, que contém a mesma física mas capaz de descrições distintas.
103 Outro exemplo dessa minha convicção acredito ser as equações de onda do
104 electromagnetismo: de problemas puramente operacionais, chegamos às
105 equações de Maxwell e a equações de onda, e ficamos um tempo considerável
106 procurando o meio em que essa onda se propaga para, apenas posteriormente,
107 mudarmos nossa compreensão e entendermos que os próprios campos são
108 espaços que admitem ondulações, isto é, que essas ondas são perturbações no
109 campo, o que leva a uma transformação nesse conceito de campo como algo
110 puramente algébrico, a razão entre a força de Coulomb e a carga de prova,
111 para um elemento da nossa realidade fundamental para nossa atual
112 compreensão do Universo.

H Transcrição do Grupo Focal

Nas páginas que seguem encontra-se a transcrição do grupo focal. O grupo foi realizado no dia 10 de julho de 2013, no Instituto de Física da Universidade de São Paulo. A transcrição contém as falas de todos os participantes (incluindo o proponente). O anexo DVD do caderno de apêndices contém o vídeo (legendado, que serviu de base para a transcrição) do grupo focal. Aspectos físicos e emocionais mais específicos, com a mudança do tom de voz, gestos com o corpo, expressões faciais, e outras manifestações não foram registradas na transcrição.

00:00:07 [André] Primeira coisa é agradecer vocês, pela presença, por ter vindo aqui neste dia morto na USP. Eu contei quantas pessoas eu vi até... caminhando até aqui do CRUSP... Não deu um número natural para vocês terem uma ideia.

00:00:19 [Risos]

00:00:21 [André] Daí eu só tenho a agradecer. A comidinha é para agradar pela barriga. E daí... Opa, isso aqui não pode, é spoiler. Não sei se vocês se conhecessem, ou.. já tem uma patota, (942), (201), (581)...

00:00:36 [942] A gente fez um monte de aula juntos.

00:00:38 [581] Eu nunca vi ninguém.

00:00:39 [Risos]

00:00:41 [André] Parece que o (872) é um cara... não sei se todo mundo conhece, o (872) é aluno... Não, o (872) sim... Acho que é mais o diurno e o... Do diurno só você não é (893)?

00:00:52 [893] Só eu.

00:00:53 [André] Eu ia vir o (632)¹.

00:00:54 [033] O (632) não está bem.

00:00:56 [André] E o (033).

00:01:02 [André] E... bom, vamos lá. A ideia não é a gente discutir nada novo, que eu tenha

¹Um dos estudantes convidados ao grupo que não pode comparecer.

que, sei lá, instrumentalizar vocês. São coisas que a gente já, por vezes, passou ao longo do curso, e em uma discussão ou outra, em determinada aula, ou em comentários das apresentações. Então não é para, assim, não é para caçar no fundo lá da suas ideias coisas para responder, é mais na espontaneidade mesmo, e também não é para durar tanto assim, é mais... É.. para, para... para a gente... sei lá, esclarecer algumas coisas. Basicamente o que eu vou fazer. Vou mostrar nos primeiros slides aqui, o que eu estava fazendo, por exemplo, com aquelas respostas que vocês faziam após a aula. As resenhas, que a gente leu todas... Deu quase quinhentas resenhas ao longo do curso.

00:01:56 [201] Se eu soubesse não teria feito algumas.

00:01:59 [André] E oitocentas questõezinhas pós-aula. Isso daí dá um nó na cabeça. Se bem que, na Experimental os caras lidam com muito mais que isso. Mas... Eu vou mostrar mais ou menos o que eu fiz com essas coisas, e por que eu escolhi vocês, não é. Na verdade não é por que vocês são especiais... ou por que eu gosto de vocês, ou por que tem alguma ou qualquer afinidade intelectual... Na verdade eu transformei vocês em números, e daí eu escolhi os números... e os números, por acaso, são vocês.

00:02:21 [581] Olha, eu não sou obrigado a ficar aqui ouvindo isso...

00:02:23 [Risos]

00:02:26 [André] E daí... Com base em algumas coisas que vocês colocaram nas resenhas, eu vou puxar alguns temas, de uma forma bem aberta, e daí a gente discutir e debater, sem... É claro que o objetivo é não sair muito do assunto, mas, eu não vou dar uma pergunta fechada, para a gente... “concordo”, que nem as questões pós aula, e... mas vou deixar uma coisa aberta... Inclusive eu não trouxe perguntas fechadas, eu... Do pouco conhecimento artístico que eu tenho, eu peguei algumas fotos, alguns vídeos, alguns quadros assim, que remontam mais ou menos ideia que eu quero passar e a partir deles a gente pode discutir. Assim pode trazer várias coisas, interpretações que vocês tenham. Então vamos lá. E tenho uns videozinhos também, engraçados. Vocês devem lembrar disso então. Todo dia depois da aula vocês iam nesse negócio aqui...

00:03:15 [201] Então... quinta-feira à tarde mas...

00:03:17 [André] Quinta-feira à tarde. Esse negócio super ambíguo, com perguntas... nem sempre... compreensíveis. Vocês clicavam nestes e gravavam as respostas. O que não aparecia para vocês era essa coisa aqui em cima. Era o debug, o cheater. É onde eu clicava, e abria essa... e aparecia a carinha dos caboclos aqui. Esse aqui votou “concordo parcialmente”, tem alguém

aqui? Acho que não tem ninguém aqui.

00:03:43 [201] Tem eu ali.

00:03:43 [André] Cadê? ... O (201) concordou parcialmente com essa pergunta. E ia aparecendo. E no fim dessa página tinha um negocinho para fazer download em Excel, muito prático. Ele baixava tudo, com as respostas, as transformavam em números. Jogava em uma planilha assim, em termos de números USP. Essas cores aqui são... são segredo, não posso dizer o que é isso. Mas, os 999 é quando não responde. Então, o amarelinho é quando o cara parou em determinado ponto. E eu fiz isso para todo mundo. Por isso que, para alguns, nas últimas aulas, eu insisti para que respondessem tudo, por que se faltasse um ou outro, ia acabar ficando pedante os dados. Se quiserem fazer pergunta já podem fazer. Só estou ilustrando por trás das cortinas.

00:04:30 [581] As cores são o quê? Não, estou brincando...

00:04:32 [Risos]

00:04:34 [André] Eu ia falar... agora eu vou!

00:04:37 [872] Agora estou curioso aqui.

00:04:39 [André] É então... O verdinho é só pra dizer quem fez tudo, e o amarelinho quem tava faltando uma ou outra. Por que na verdade essa planilha ia embora. Tinha cerca de 90 alunos. Então... Daí as cores ajudavam a localizar... Não parece sério isso, mas é, eu juro. A gente teve catorze perguntas, certo. A gente procurou dividir em sete perguntas, de uma determinada natureza filosófica, que agora... a gente não precisa discutir isso, pra cada duas perguntas respondidas eu construía um ponto nesse diagrama, que... em alguma altura do curso eu mostrei. Foi em Interpretações da Relatividade, segunda aula. Isso de certa forma ajudava a montar um perfil de vocês, individual ou geral. No caso vou mostrar o geral aqui. Como as perguntinhas... as primeiras pares de perguntas só tinha concordo parcialmente, ou discordo parcialmente. Eu transformei esse “concordo parcialmente” como 0.5, então parece que é tudo setorizado as respostas. Mas com o tempo, quando eu vou criando vetores, somando suas respostas, ele vão tomando espaços menores, e vão andando nesse diagrama.

00:05:57 [201] O “X” é o quê?

00:05:58 [André] O “X” é a média. Embora não necessariamente tenha algum sentido isso, tirar a média de todo mundo. Cada um é cada um. Só pra lembrar, não é a questão do encontro, mas o eixo horizontal é aquilo que chamei de “eixo epistemológico”. Tinha a ver com crença sua ou não de que o Mundo pode ser compreendido, que a gente pode descobrir as atividades

do mundo, e etc. E o vertical é o “eixo ontológico” que remetia à sua crença em determinados objetos. “Eu acredito que o Espaço-Tempo existe. Que as cordas existem. Que o vácuo quântico existe”... E por aí vai. A questão é que, com essas respostinhas eu montei um perfil de vocês, e por meio deste perfil que eu selecionei vocês. Vocês tinham os comportamentos mais diferentes um do outro. Tinha um fulano que ia pra cima, outro que ia mais pra baixo, outro que ficava mais esquerda, pra direita, então eu peguei... vocês como exemplares... um mais diferentes que o outro. Justamente para ter um pouquinho mais de debate, para vocês brigarem e discutirem, coisa do tipo. Bom, aqui em tese eu já deveria começar... Mas vocês têm alguma coisa a contar... se interessaram por alguma coisa a mais...

00:07:16 [942] Eu tenho... Eu não consegui qual a diferença entre “concordo parcialmente” e “discordo parcialmente”.

00:07:24 [André] Aconteceu a mesma coisa no diurno, e eu não consegui explicar direito... Mas é uma coisa assim, sabe... Se eu pergunto assim... Não é o mesmo exemplo, mas eu pergunto: (942), você está feliz hoje? Ou você diz sim ou não, certo, em um primeiro momento. Ou você diz um sim mais fraco. Por exemplo, você torce pro Corinthians e o Corinthians perdeu... “Eu estou feliz, mas...Corinthians perdeu” Então seria um análogo de “concordo parcialmente” com a afirmação (942) está feliz. Enquanto que o discordo, seria um caso assim... Você está realmente triste, só que o Corinthians goleou o São Paulo. Então percebe que, de fundo, tem uma coisa, só que tem o complemento que... ou diminui, ou abaixa. Mas realmente não... Quando testei comigo mesmo e com colegas, pra mim ficava claro quando eu concordo. Por que eu primeiro estratificava... está mais para o concordo do que o discordo... E daí eu decidia se é concordo parcialmente ou discordo parcialmente. Mas vocês ficaram todos com essa sensação que não tinha diferença nenhuma?

00:08:31 [942] Não, pra mim... eu tinha essa mesma sensação de que o “concordo parcialmente” está mais perto do “concordo” do que o “discordo”, e o “discordo parcialmente” mais perto do “discordo” do que o “concordo”, mas... Parando pra pensar um pouquinho... Espera aí, isso está meio esquisito, enfim. Eu consegui entender... Tinha esse sensação mas, não sabia se tinha um lógica mesmo por trás disso.

00:08:53 [872] Eu fui por me sentir meio confortável com o que estava lendo. Eu ia lendo, desde o começo, aí chegava na afirmação, se aquela afirmação me desse algum... sabe, eu acredito naquilo mas eu acho que essa afirmação não está me agrando... do jeito que ela está escrita. E, aí eu julgava isso um “concordo parcialmente”. Mas quando era uma coisa que... a

crença ou convicção estava implícita, pelo menos em mim, tanto na afirmação, quanto no que estava sendo abordado eu me jogava para o concordo...

00:09:27 [André] Em geral uma afirmação que você concordava parcialmente, pelo menos pra mim eu sentia, era aquela que... Falava uma coisa que... bom, realmente, eu acho isso só que esta afirmação está imprecisa, precisaria de coisas a mais. Esse é um “concordo parcialmente”. Enquanto que o “discordo totalmente” era assim, a afirmação... Não, que maluquice... mas está indo no caminho certo, tem uma... coerência. Mas não, o cara chutou o balde, é menos, menos, menos. Mas essa ambiguidade é intrínseca, inclusive, por isso que eu não chamo isso de um diagnóstico filosófico, eu chamo mais de um indicador, tanto que eu não usei eles pra classificar vocês, eu usei na verdade pra ver diferentes tendências. E na verdade seria aqui hoje que sai... uma coisa mais digna que eu chamaria, sei lá, de postura filosófica de cada um... Nem precisa ter realmente uma postura fixa. Então, daí com base nas perguntinhas, nas resenhas que a gente leu... Eu tenho aqui, um diagnóstico médico de cada um. Falei que não iria usar a palavra diagnóstico e acabei usando. Daí, como eu disse, em vez de usar perguntinhas chatas... eu vou usar imagens como a primeira que vocês já viram. Dá pra ver a imagem todo mundo aí? Bom, eu pensei em uma pergunta pra cada imagem, mas eu vou deixar primeiro vocês, sei lá, pensarem, rapidinho também pra não ficar muito chato. Sempre remetendo à essa questão do conhecimento científico, e à questão... de como o mundo é acessível, se a gente conhecesse o mundo como ele é, nossas capacidades de fazer isso ou não. E enfim. Vocês conseguem fazer alguma relação da imagem que está aí com esse tipo de coisa que estou falando.

00:11:14 [583] Parece que tem uma fronteira...

00:11:15 [201] Parece uma quebra de paradigma...

00:11:17 [872] É o universo aristotélico isso?

00:11:19 [André] Sim. A origem dessa imagem... eu foi talhada na madeira... e o autor ninguém sabe. Mas é... apareceu em um livro em mil quatrocentos e pouco... sobre fenômenos atmosféricos, alguma coisa assim, daí o cara colocou isso aí. Mas surgiram coisas legais. Quebra de paradigma... no sentido de que o cara está descobrindo uma coisa nova?

00:11:45 [201] Sim... Por exemplo, eu pensei naquele modelo de Universo que está tudo preso em uma esfera e parece que o cara está quebrando ele e vendo algo por trás.

00:11:53 [André] Ele está vendo até o próprio modelo de esferas... com a máquina lá em cima.

00:12:00 [201] Basicamente. Parece que... ele quebrou alguma coisa e está vendo algo por

trás que não estava acessível a ele antes.

00:12:07 [André] Sim. Alguém mais pensou assim?

00:12:10 [942] Eu pensei uma coisa bem diferente na verdade. Eu não discordo, acho que faz todo sentido isso, Talvez com mais sentido do que pensei. Mas o que me veio à cabeça na imagem foi a existência de uma... realidade transcendental, superior, enfim... Com certeza um pouco desconexa com o nosso mundo cotidiano, ao que entendo como isso que está abaixo da esfera das estrelas fixas.

00:12:38 [André] Sim, seria a realidade oculta, ou, sei lá... aquilo que está além do que é observável. É, podemos tomar esse caminho para discutir a seguinte questão. O quadrinho era para... Eu imaginei uma pergunta assim... Até que ponto vocês acham, que a gente consegue fazer isso? Agora pensando na prática científica, digamos, do cientista do dia-a-dia. Sei lá, a gente consegue atravessar essa abóbada mesmo? Ou a gente... por exemplo, quando a gente fala de átomos, vácuo quântico, essas coisas...

00:13:10 [583] O problema acho que é para definir essa abóbada. Falar: até aqui eu posso chegar. Se eu falar... que tem uma... que eu posso chegar até ela, então eu não vou poder atravessar. Se eu puder atravessar então a que eu posso chegar está mais além. A questão é essa, se ela existe ou não. Se ela existir, então tem como passar.

00:13:25 [201] Por definição se a gente está dentro dela a gente não percebe.

00:13:27 [Todos] É...

00:13:28 [201] Daí tem sempre aquele negócio. Você pode dizer que o avanço científico pode ser um cara que exploda todas as fronteiras, ou pode ser simplesmente o pessoal, na fronteira lá, empurrando, empurrando, empurrando até a hora que alguém passe. Pode ser dos dois jeitos. Pra mim, tanto faz assim, eventualmente acontece os dois... O número de cientistas só importa na rapidez com que isso vai acontecer. Quanto mais, mais rápido acontece. Se tiver pouco, vai demorar um pouquinho mais. Só isso. Mas... Dentro dela a gente não consegue ver, que a gente está dentro dela. Que existe, sim eu acho que existe.

00:13:58 [André] Enquanto a gente está dentro dela e não vê, como, sei lá, você acha que tem que... Todo mundo tem que falar... Senão não faz sentido. Eu vou cutucar uns daqui a pouco... Se a gente está dentro dela e não percebe... sei lá... Como a gente deveria se comportar? Por que, afirmar... Eu me preocupo com o cara que está dentro dessa abóbada... Ou, por exemplo, que não sabe que está lá, e ele precisa afirmar uma coisa que está além dela.

00:14:27 [872] Eu não sei se sou que estou enxergando isso, mas ele está com uma coisa na

mão...

00:14:30 [201] É uma bengala...

00:14:32 [872] E essa coisa está passando para o outro lado como se ele estivesse cutucando, meio que tentando... meio que tentando ver o que está do outro lado, entender o que está do outro lado.

00:14:46 [583] Não sei também se ele está cutucando, se não dá uma ideia de que ele se apoiava antes e agora não se apoia mais, e está tentando alcançar ali com a mão dele. Parece que na realidade dele ele se apoiava em alguma coisa, e agora ele está tentando avançar sem esse objeto, parece que simplesmente, está solto ali. Não vejo uma ação no braço dele, a ação está no outro braço.

00:14: 50 [201] Tentando alcançar.

00:15:05 [583] Tentando alcançar.

00:15:06 [872] Mas quando eu digo cutucar não digo no sentido realmente de... realizar a ação cutucar. Eu digo no sentido de ele coloca aquele negócio ali pra tentar ver o que está do outro lado. Pra ele tentar ter alguma percepção do que está além desta abóbada... O que tem por trás dela que ele consiga enxergar.

00:15:30 [942] Eu não vejo muito importância... Acho que nesse sentido a gente poderia acabar falando... então, qual o significado dessa roupa dele?

00:15:42 [872] No sentido... seria de transcender o conhecimento.

00:15:47 [201] Se a gente for pegar... dá pra ficar uma hora conversando só sobre as figuras. Pega um pontinho e ficar canalizando cada coisa... o que significa as casinhas no fundo, por exemplo... Dá pra fazer tudo isso... Se quiser também. Sol com rosto... Sol com rosto acho que era normal na época, todo mundo desenhava assim.

00:16:03 [André] Olhando para ele... É, sempre que eu trago essas imagens... vou tentar trazer a metáfora científica dessas coisas que a gente está discutindo. Na verdade o autor deve ter pensado mil e umas coisas, inclusive essa borda, com dragõezinhos.

00:16:23 [942] Da onde isso foi retirado, André?

00:16:25 [André] Então, isso aí foi encontrado, o autor é desconhecido. Era uma obra de um francês... era um... o cara que trabalha com meteorologia. E ele... e não sei porque diabos ele colocou. Era uma gravura em madeira e ele fez um desenho. Essa aí é...

00:16:42 [942] Isso estava... tinha um contexto... sabe se tinha um contexto específico isso?

00:16:48 [André] Então, o pessoal só sabe de um registro no livro. O cara disse que encon-

trou em uma gravura de madeira.

00:16:53 [201] E colocou lá.

00:16:54 [André] E colocou lá.

00:16:55 [201] Mas onde que estava essa gravura? Era um pedaço de madeira solto? Ou...

00:16:59 [André] É então, isso aí eu não sei. Acho que era solto, uma espécie de ornamento, assim, de casas...

00:17:03 [201] Então, pode ser qualquer coisa...

00:17:07 [André] É, pode ser qualquer coisa...

00:17:08 [201] Praticamente qualquer coisa...

00:17:10 [André] Mas a metáfora do francês seria justamente essa, com o cara preso em uma... digamos, nesse mundo interior, na abóbada. Seria a metáfora da gente aqui no nosso mundo cotidiano. E, realmente, o que está além dessa esfera... é o inatingível diretamente. Então, por exemplo... pode ser essas entidades que a gente fala, ou outros processos que a gente não observa diretamente. Tudo bem? Alguém quer comentar mais alguma coisa?

00:17:44 [581] Sim. Só para não fugir muito da pergunta, acredito que exista sim um limite, mas não um limite estabelecido pela teoria, mas um limite físico da nossa capacidade de experimentar, compreender e até imaginar. Por que a gente usa a matemática, o raciocínio lógico, mas nada assegura que o Universo funciona de forma lógica, ou da forma como a gente percebe. Então, eu tenho Determinismo. Mas eu também tenho o Caos, que é determinista, mas, eu não consigo fazer previsões pela minha impossibilidade de prever com precisão o sistema das condições iniciais. Conhecimento aproximado do presente não implica conhecimento aproximado do futuro, se eu tenho um fenômeno caótico, por exemplo. Da mesma forma que fenômenos quânticos existem limitações não só tecnológicas mas também teóricas do quanto eu posso compreender e calcular sobre isso, fazer previsões. Então, nada implica em um estrutura universal totalmente sujeita às leis da razão, que são nossa única ferramenta para raciocinar.

00:18:45 [André] O limite está no mundo, no próprio mundo?

00:18:47 [583] Mas aí a minha pergunta: será que esse limite tem alguma coisa além dele?

00:18:53 [201] Nada impede de não ter.

00:18:55 [583] Mas vamos supor que a gente alcança... A gente alcança esse limite com o conhecimento que a gente... “Olha, daqui a gente não passa”. Mas será que tem alguma coisa pra ver além? Vamos supor, a gente já sabe alguma coisa, e a gente nunca consegue passar dessa coisa. Só que aí eu vou afirmar: eu não consigo passar pela minha limitação? ou não consigo

passar por que não tem como passar?

00:19:12 [581] Por que o Universo é assim.

00:19:13 [583] Por que acabou. É isso. E aí?

00:19:15 [André] É uma boa. É um problema da quântica... De poder se falar alguma coisa, digamos, entre medições ou tal... Você fala... tem o Princípio da Incerteza aqui... Por que se fizer medição no momento eu vou perder informação sobre a posição. Mas será que... lá no fundo, ele tem uma posição...

00:19:32 [581] O que eu quis colocar é um pouco além disso. Por que assim... É como diziam na época de Von Neumann... não lembro quem foi que citou mas... Ele falou algo mais ou menos assim, depois que o Von Neumann morreu e ele ficou meio abalado com essa história de computação, os computadores estavam revolucionando a matemática...

00:19:45 [201] Quem falou isso?

00:19:47 [581] É, foi um amigo do Von Neumann, que casou com a esposa dele, eu não lembro. Então, ele falou o seguinte, assim como as brincadeiras são para as crianças preparações do que elas vão enfrentar posteriormente... Os meninos brincavam com brincadeiras mais agressivas e coletivas, as meninas brincavam de casinha... Assim como as crianças preparam os jogos para a vida adulta, talvez a matemática seja a preparação, ou seja uma brincadeira para uma espécie de raciocínio que nós ainda não entendemos.

00:20:18 [André] A coisa da matemática vai voltar. Pra gente se acelerar ... a questão do papel da linguagem da matemática para compreensão do mundo. Isso daí eu vou voltar. Essa aqui vocês estão conseguindo ver bem?

00:20:33 [942] É um cavalete na janela...

00:20:40 [201] Não, não. É um quadro representando o que está fora da janela.

00:20:44 [André] Dá para ver? Esse é o autor que o (581) gosta.

00:20:49 [581] Sim, eu ia perguntar se é Magritte.

00:20:51 [André] Na verdade esse cara tem várias coisas assim que... malucas que dá para usar.

00:20:55 [581] Mas é dele mesmo. Acho que é

00:20:56 [André] É ele mesmo. Acho que é A Condição Humana o nome do quadro.

00:20:59 [893] Para entender que realidade e representação se fundem...

00:21:03 [André] É por aí. Só uma descrição rápida, realmente, é um tripé aqui... Aqui você tem uma... sei lá... uma sugestão de paisagem aqui. E aqui o quadro dele. Daí a pergunta é

o seguinte... Muitas vezes em resenhas, quando vocês descreviam algum processo científico... Por exemplo... na resenha sobre espaço-tempo, com aquelas interpretações lá, muitas vezes algumas pessoas, não estou dizendo que foi vocês, mas... na verdade várias pessoas escreviam com uma naturalidade sobre o espaço-tempo, que a gente poderia inferir: esse cara, se ele fala assim com tanta segurança, ele atribui certa... sei lá... realidade a ela, não é só um mero instrumento. Mas, não bastasse isso, essa pessoa ela dava uma certa... por exemplo a descrição que a Relatividade Geral faz da curvatura do espaço-tempo por exemplo, ou de algum outro processo físico, ele dotava aquele processo como uma realidade tão quanto o próprio espaço-tempo. O que significa. As asserções teóricas, o que a teoria está te dizendo lá, ele fala, aquilo descreve realmente como o mundo é. Não é só, assim, o objeto que a teoria está sugerindo não é só, sei lá, as contas que parecem que estão certas, mas o próprio processo que a teoria sugere... A teoria sugere que na presença de matéria ou energia você tem uma curvatura lá, alguma coisa assim. E é nesse sentido... A metáfora ali seria, a teoria seria seu quadro, certo. Você não está vendo além... Digamos, é um domínio que foge da sua observabilidade, da sua capacidade de sentir diretamente, e você faz uma teoria ou modelo. A pergunta é... sei lá... Até que ponto realmente ali atrás tem uma arvorezinha, o fim do arbusto e a continuação da montanha?

00:23:07 [201] Se você só pode ver o quadro você não tem como saber. Mas... a partir do momento... vamos colocar a metáfora um pouco mais... Se eu tiver alguma coisa, algum instrumento... por exemplo, você tem um periscópio, daí você coloca o periscópio... e pode ver por cima, e daí você pode aferir. Mas aí tem outras coisas. Tem limitações tecnológicas, tem limitações teóricas, tem limitações... até ideológicas, pode ser que simplesmente o cara não quer olhar por cima por que tá confortável pra lá. Então realmente.. eu particularmente acho esse tipo de pergunta assim que não é cabível, por que cada um vai interpretar de uma maneira certa. Não tem por que alguma ser preferencial que a outra. Algumas podem ser... como é que eu vou dizer... Algumas podem ser mais... felizes assim do ponto de vista de evolução tecnológica, ou, evolução teórica mesmo, mas, de certo modo, tanto faz. É claro, que se todo mundo ficar só assim, você vai ter um pouco de... a evolução científica vai diminuir um pouco de velocidade. Mas...

00:24:09 [581] Eu concordo parcialmente com o (201). Ou discordo parcialmente. Até onde se sabe pode estar o Alberto Caeiro rindo atrás ali em silêncio, e você não percebe. Mas, eu acho que, no que esse quadro ajuda é a sua... capacidade de prever. É isso que a teoria te oferece. Então, eu concordo, ali pode ter algo que não tem nada a ver com o quadro. Mas se,

olhar para esse quadro, te ajuda a prever, sei lá, se o dia está claro ou escuro, pra quem gosta de se vestir bem, então já tem alguma utilidade.

00:24:45 [201] Toda teoria tem sua utilidade.

00:25:31 [942] A descrição do Universo que a gente tenha, desde que ela seja experimentalmente verificável, tenha uma boa precisão... eu entendo que aquilo nos diz: o Universo é assim. Se eu tenho uma teoria, muito bem verificada experimentalmente, que me diz, que a presença de uma massa no espaço produz uma curvatura de um espaço-tempo, no sentido que aquilo vai alterar a métrica... uma matriz identidade para algo diferente, então, eu não vejo isso como só uma teoria, de que... olha, não vamos pensar muito nisso... a realidade só atrapalha... Não, eu entendo que o Universo é assim. Se aquela equação, que é verificada experimentalmente, está me dizendo isso... ela está me dizendo que o Universo é dessa forma, com tanta precisão quanto eu conseguir verificar essa validade experimental. Mas eu entendo que... Quando eu olho esse quadro, eu penso o seguinte: o que a teoria está me dizendo é que o Universo é assim. O quadro está me dizendo é que atrás... por trás dele.. se eu pudesse ver só a janela, eu viria isso. Pode ter... o Alberto Caeiro, ou o Francisco Cuoco lá atrás. Tudo bem, só que... Nessa metáfora, eu entendo isso como discrepante com a realidade. O quadro é, e sempre vai ser, uma aproximação, tão boa quanto a competência do pintor, do que está atrás dele. Mas como tudo que eu vejo é o quadro, eu digo: o Universo é assim, ou... a minha descrição tende assintoticamente para a realidade inatingível.

00:27:33 [581] Certo. Mas, eu compreendo, e eu concordo, mas o André mandou a gente brigar. Então... Tudo bem que atrás do quadro por ter uma parede. Pode não ter nada ali. Você levanta o quadro: parede.

00:27:44 [201] Alguém derrubou ela...

00:27:48 [581] Pode não ter nada. Então se eu falo, a teoria de epiciclos de Aristóteles é horrível, por que os planetas não têm movimento retrógrado nem nada. Só que você consegue fazer previsões com a teoria dos epiciclos, e você consegue interpretar a teoria dos epiciclos. Você diz: cada ciclo maior é o primeiro harmônico de uma série de Fourier que aproxima a órbita. Cada epiciclo menor é o harmônico seguinte. Então é a lei de Newton, expandida em série de Fourier. Ou seja, o movimento é mais ou menos assim considerando mais ou menos precisão. Só que então vem Einstein e diz “não têm esses harmônicos, porque não existe essa força”. A diferença é que você não consegue diferenciar um do outro ontologicamente. Você não sabe se existe ação à distância ou se é curvatura do Espaço-tempo. O Einstein mesmo disse

que a gente só consegue aceitar as teorias mais belas. No sentido de simplicidade. Mas não é porque as outras não sejam tão verdadeiras quanto. A gente consegue fazer contas com essa. Então porque o Universo seria tão simples quanto a gente consegue fazer contas?

00:28:54 [942] Mas deixe eu perguntar uma coisa. Nesse exemplo que você está colocando. As previsões são as mesmas?

00:29:01 [581] As previsões são as mesmas, tanto a dos epiciclos...

00:29:03 [201] Até que precisão?

00:29:05 [581] Até quanto você conseguir desenhar ciclos lá. Seriam os infinitos termos da série de Fourier. Se você escrever uma série de Fourier para a força gravitacional você pode ter...

00:29:14 [942] Então... vamos dizer assim, para todos os fins práticos, as duas teorias são as mesmas. As duas teorias dão no mesmo.

00:29:23 [583] Os resultados são os mesmo, aí que entra a realidade. Se eu entendi o que está tudo mundo falando aqui eu acho. Aí mostrar que eu discordo parcialmente, que eu concordo é que a realidade está lá... Existe uma realidade e a realidade retorna isso. Agora, a realidade é o que está fora ali do quadro. Ali vamos dizer que é um experimento. Aí eu pego as condições de contorno da borda, faço igualzinho o que está ali e interpreto o meio. E aí eu falo que minha realidade é essa, e eu acho que é por causa disso. Aí o “eu acho que é por causa disso” cada um pode fazer a sua, contanto que estejam respeitando o que realidade fala pra gente.

00:30:03 [893] Acho que cabe diferenciar a realidade com “r” minúsculo e a realidade com “R” maiúsculo. Em que a realidade com “R” maiúsculo seria aquela realidade que, vamos dizer assim, que está lá. E com “r” minúsculo aquela que a gente interpreta. Então, acho que dado o que vocês falam sobre as limitações tecnológicas, teóricas e experimentais, a gente têm um acesso à realidade com “R” maiúsculo até um certo limite. Na verdade, pra mim, não passa de uma série de interpretações que a gente faz do mundo...

00:30:35 [581] Sim... É rápida. A realidade com “r” minúsculo está tendendo para a realidade com “R” maiúsculo, é isso que você acha?

00:30:43 [893] Não. Eu não estou preocupado se está tendendo ou não. Eu acho que, no final, vai ser sempre uma interpretação. Nunca vai corresponder a... Ela pode fazer muitas coisas com essas interpretações, elas podem ser as mais próximas possíveis, mas não necessariamente ela vai ser a mesma.

00:31:03 [André] Deixa eu tomar o gancho pra cortar vocês, porque o tempo está indo. Quanto à questão da realidade com “r” minúsculo e “R” maiúsculo, aproveitando o gancho, vou passar um videozinho. (201) vai gostar porque, é do Jornada nas Estrelas, o filme de 2009. Mas é uma cena curta, quando mostra um vulcano... Todo mundo conhece Jornada nas Estrelas? Estou falando grego aqui?

00:31:33 [Risos]

00:31:38 [André] Na verdade é uma cena que mostra o ensino médio lá em Volcano, está os menininhos estudando. E daí, como não tem legenda e o som está horrível, e só pra mostrar. O cara vai perguntando: qual o volume da esfera?... E no fundo tem um monte de equações diferenciais... tem perguntas, não só matemáticas, mas de cunho físico. Qual a constante gravitacional, tem coisas assim se não me engano. Você vê... ciclos de estruturas químicas ali no fundo. Eles vão respondendo... com seis anos de idade, com sete já são Ph.D em Astrofísica. A perguntinha é a seguinte... essa coisa de acessar a realidade ou não... vou trazer um outro eixo... Pensa em outra civilização assim, pegando uma obra que você deve conhecer, acho que é “Ao cair da noite” do Isaac Assimov...

00:32:43 [201] Por favor... em inglês...

00:32:46 [André] “Nightfall”. É uma civilização em outro sistema solar. Acho que, se não me engano, tem vários sóis e duas luas só, neste sistema que eles estão. E é uma civilização que desenvolve uma mecânica, digamos, newtoniana... eles falam: “existe uma força que depende do inverso do quadrado da distância”... O livro conta assim, os caras chegam em várias leis que hoje a gente... na vida real digamos, estamos acostumados a ver. A pergunta é a seguinte, que acho que pode ajudar vocês nessa discussão sobre se a gente chega na realidade ou não. Se existisse uma outra civilização com outra cultura, com outra, digamos, linha de evolução... mais tardar, eles iam chegar no conceito de átomo? Ou, próximo a isso? Ou, eles iam chegar nas mesmas equações que a gente chegou? Ou, próximo a isso?

00:33:35 [201] Talvez, porque... assim... Vamos pensar... Todo mundo sabe que tem uma tribo de índios... não sei qual lugar... que eles só têm três números: um, dois e muitos.

00:33:44 [581] Mundurucus.

00:33:45 [201] É, não é. Eu duvido e eu apostaria todo meu dinheiro que eles nunca iriam conseguir chegar na nossa matemática. Sério, eu apostaria todo o meu dinheiro. Dando o tempo infinito para eles.

00:33:54 [André] Você tem tanto dinheiro assim?

00:33:55 [Risos]

00:33:58 [581] Por isso ele está apostando.

00:34:00 [201] Mas assim, é... Se você pegar... deve ter, é que agora não sei qual o nome daquele termo da matemática que você não consegue...

00:34:10 [André] Gödel?

00:34:13 [581] Teorema da Incompletude.

00:34:14 [201] É da incompletude. Então, assim... você pode ter qualquer sistema matemático, se ele cumpre certas regras, talvez você consiga chegar no nível que a gente está. Vamos supor por facilidade que a nossa matemática é a melhor. Eu acho que é o jeito mais razoável, de pensar assim. Porque é a única matemática que a gente conhece que conseguiu chegar nesse dentro da Terra. As outras matemáticas, tipo desses sistemas de índio, eu acho que não dá... Agora vamos dizer que tem uma tribo de índio que tenha base 16. Eles vão conseguir chegar na mesma matemática que a gente. Os números vão dar um pouco estranhos. Mas as contas vão ser as mesmas, eventualmente, e tudo mais. Então qualquer outra civilização se ela tiver... se a matemática delas.. desculpa que eu realmente não sei o nome dessas coisas... então fica difícil falar pra vocês... me corrija alguém por favor. Então se elas cumprirem todas essas coisas, ela vai chegar no nosso nível. Supondo que o nosso seja melhor. Da mesma forma, se uma outra civilização tiver uma matemática melhor e tiver certas regras e a nossa matemática cumprir essas certas regras dado tempo suficiente, a gente vai chegar no nível deles.

00:35:20 [André] Isso do ponto de vista matemático.

00:35:22 [201] Do ponto de vista matemático.

00:35:23 [André] Da física?

00:35:23 [201] Assim... é que como a física usa a matemática como linguagem, então a física se expressaria por essa matemática.

00:35:29 [583] As interpretações seriam outras.

00:35:31 [201] As interpretações seriam outras. Alguém que tem uma base 16, por exemplo, talvez os números sejam todos estranhos, as constantes sejam malucas, talvez as coisas não caiam com r ao quadrado, mas sejam um número equivalente, mas seria tudo igual.

00:35:48 [893] Você achas que elas descreveriam essa.. essas novas formas elas descreveriam a mesma realidade?

00:35:54 [201] Sim, eu acho que sim. Não tem nenhuma motivo para não ser. O resultado experimental vai ser mesmo, só vai mudar os números.

00:36:03 [942] Eu entendo que a gente está tentando demonstrar aqui o teorema da existência e unicidade da realidade. Eu discordo completa e absolutamente do que o (893) falou, logo agora, quando ele faz uma divisão entre a realidade que a gente percebe e uma realidade transcendental, verdadeira, inatingível ou atingível. Se a gente for dar algum valor para o desenvolvimento das ciências humanas desde o começo do século XVIII até aqui, eu acho que a ideia de realidade transcendental ela é no mínimo inútil. Por que se ela é transcendental, se ela é superior, se a gente tende a ela assintoticamente, enfim, ela é uma coisa afastado de nós, e acho que nenhum sentido e necessidade de admiti-la. Ainda que qualquer teoria física vá ter erros, vá ser uma aproximação. Mas quando a gente coloca... enfim, se eu não acho que seja válido considerar uma realidade transcendental... quando a gente fala em populações diferentes, povos diferentes, culturas diferentes, enfim, tentando descrever o mesmo universo, se eles vão chegar na mesma coisa... Bom, o (201) fala de uma cultura que tem três números, um, dois e muitos, vai chegar? Também concordo com o (201), plenamente. Não vai chegar enquanto continuar com um, dois e muitos. Mas é perfeitamente cabível de chegar a partir do momento que certas transformações culturais que podem acontecer com eles, da mesma forma que aconteceu conosco, chegarem a um detalhamento maior. Eles vão chegar na mesma teoria? Eu acho difícil, possível, mas acho difícil. Mas acho que eles vão ver a mesma coisa. Se eles colocarem uma bolinha em cima do plano, eles vão ver a bolinha rolando da mesma forma como Galileu viu. Mas eu também não concordo que as interpretações serão... quer dizer eu não sei até que ponto eu concordo que as interpretações serão diferentes ou idênticas. Eu não sei se é possível dizer se... enfim, tem um exemplo concreto disso que é o seguinte. Uma vez estava em uma aula de Lab 3 e tive a seguinte breve discussão com o monitor. Meu irmão é engenheiro, ele trabalhava essa época no Amapá, e eu estava conversando com ele sobre aquela história do peixe, aquela, você vai mirar o peixe para cuar, você erra o peixe por causa do índice de refração da água. E meu irmão falou: “o [local] fala que você... você tem que mirar na alma do peixe”. E eu contei isso para o monitor para o Lab, ele falou: “isso em uma primeira aproximação, com o tempo você vai refinando isso, você vai chegar...” enfim, a ideia dele era que com uma evolução lógica, em direção à verdade, com V maiúsculo, você chegar no nosso modelo que está mais a frente do modelo dos caras que miram na alma do peixe. Eu não vejo nenhuma problema em falar que você tem que mirar na alma do peixe. Não vejo esse modelo melhor ou pior. Eu estou dizendo o seguinte, quando eu falo o que você diz que o mundo é, é o que de fato o mundo é, porque dizer que o mundo é qualquer coisa que não aquilo é afastado de nós, imperceptível, e portanto inútil,

e aí quando o (581) fala aquela história de outro modelo para a gravitação, a minha primeira teimosia... é dizer que em algum ponto essas teorias devem convergir para a mesma coisa, devem ser um desdobramento... enfim, de uma pode se chegar na outra, o que eu entendo é realidade é o que gente vê. Duas culturas vão ver diferentes realidades, mas não é possível dizer que uma é superior a outra, nem que uma vai chegar à mesma coisa... o que pode dizer é: os objetos que permeiam ela são os mesmos. Para gente, para os índios, para quem quer que seja, tem árvore, tem água, tem areia, mas o significado que tem aquilo são significados diferentes...

00:40:27 [201] E também, enquanto você estiver pescando peixes está tudo perfeito.

00:40:30 [942] É. Mas eu me perco um pouco quando penso em... interpretações diferentes? Não consigo dizer, acho que sim, acho que não, porque... enfim.

00:40:42 [581] Eu concordo no sentido de, acho que são duas coisas diferentes, primeiro a realidade, cada um tem uma interpretação, tudo bem que nenhuma interpretação está errada e nenhuma é melhor que a outra, outra coisa é a linguagem, matemática como linguagem. Então você tem lá os mundurucus, que contam um, dois e muitos, e você tem uma tribo mais antiga, bem mais antiga que os mundurucus, são os bacairis, que eles contam até sete, então eles tem lá os números um, dois três, um é ajé, dois é totalé, três é totalé-ajé... E, eles são um pouco mais antigos que os mundurucus, provavelmente era pra onde os mundurucus evoluíram matematicamente se eles tivessem tempo. (201), passa a grana. Então, eu concordo que eles poderiam chegar na mesma matemática, no mesmo desenvolvimento tecnológico, mas não acho que a interpretação necessariamente seria a mesma que a nossa.

00:41:28 [André] Só para emendar... isso aqui vou ter que pular, nosso teórico de cordas não veio hoje. Esse quadrinho vocês já viram?

00:41:36 [201] Sim. Eu quase imprimi uma camiseta com ele.

00:41:39 [André] É, sensacional...

00:41:40 [942] Está no Facebook “como o físico vê o mundo”.

00:41:42 [André] É, eu tirei a parte da pessoa normal.

00:41:45 [Risos]

00:41:48 [André] Isto é relacionado com o debate agora, mas pero no mucho, por que aqui estamos falando da matemática como um meio para gente chegar em uma compreensão do mundo. Aqui, sugere, pode sugerir isso, mas pode sugerir outra coisa, que o próprio mundo... usando a frase de Galileu, está escrito na linguagem matemática.

00:42:10 [201] Não tem como a gente saber disso. Tem a gente que vai bater a tecla que sim,

tem gente que não. Eu particularmente acho que deve ser alguma combinação linear... Mas, é uma daquelas coisas que realmente não dá pra saber, vai da crença de cada algum. Já chegou na parte que você está na parte da crença da pessoa, aqui com certeza deve ter alguém, uma pessoa pelo menos, se não estiver eu assumo esse papel, que vai achar que a matemática representa o mundo...

00:42:36 [André] Perfeito...

00:42:37 [942] Mas o Teorema da Incompletude não derruba isso?

00:42:42 [201] Então, é que é assim, talvez, voltando para esse negócio da linguagem matemática, a gente esteja com limitações biológicas já, talvez a limitação esteja no nosso cérebro.

00:42:50 [942] Isso eu concordo plenamente, mas, independente da... Mas é uma limitação biológica para descrever o mundo?

00:42:59 [201] Para descrever a matemática... pode ser.

00:43:01 [942] A gente não consegue, vamos supor... que com esse cérebro a gente não consiga desenvolver uma matemática necessária pra entender o que vem depois das cordas... Mas, independente disso você... quando a gente volta lá para Galileu que diz que: “a matemática é a língua com que Deus escreve as leis...” alguma coisa assim... Ele não conhecia ainda o Teorema da Incompletude... então, e ele pensa em um mundo determinista, preciso, tudo muito bem regido. Só que aquela mesma linguagem usada para descrever esse mundo muito bem regido, foi o que o (581) apresentou na apresentação dele, isso cai por terra a partir do momento que essa linguagem deixa de ser precisa... essa linguagem precisa...

00:43:52 [201] O Teorema da Incompletude não é sobre a precisão da matemática, mas é sobre a consistência dela. É assim, você tem uma teoria da matemática, ela não pode ser completa e consistente ao mesmo tempo, você tem que escolher uma das coisas. É assim? Resumindo é isso. É assim, basicamente. Se você conseguir modelar tudo, tudo da matemática, vai ter alguma coisa que você não vai poder provar. Você vai ter que falar, isto é isto. Da mesma forma, se você fizer ao contrário vai ter algo que você não vai conseguir provar. Se você conseguir provar, por exemplo, tudo, vai ter algo que não vai dar certo nas contas. Vai ter algum erro, vai ter alguma hora que nós vamos chegar em $1+1=3$.

00:44:37 [942] Então espere aí. Então você consegue usar perfeitamente a matemática para explicar o mundo com toda a coerência, precisão, exatidão, acurácia, tudo que a gente quer desde que você pegue uma ou duas, ou meia dúzia de coisas e fala de “princípio”. Princípio da Incerteza, Princípio da Constância da Luz... Então, não tem nenhuma problema com a

matemática.

00:45:01 [872] Esse é um cuidado que muita gente tem de dizer, de falar, “eu estou partindo desse pressuposto. Eu estou tomando isso como verdade a partir disso eu construo tudo”. Muita gente, muita gente faz isso, eu vejo por aulas que a gente tem, por teorias que de grande parte eu conheço. Eu parto desse pressuposto, e desse pressuposto eu vou em diante. Mas quem garante que esse pressuposto é...

00:45:25 [893] Acho que é mais ou menos por causa disso que acredito que tem essa separação das realidades, não sei se tem a ver com o próprio teorema...

00:45:30 [581] Então, o princípio da incompletude de Gödel ataca justamente essa ideia, por que ele diz o seguinte, ele usou o exemplo dos números richardianos e não-richardianos, mas o que ele fala em comum... é o seguinte, o exemplo de Deus. Deus é poderoso? Vocês respondem, sim. Deus pode fazer qualquer coisa? Pode. Deus pode criar uma pedra? Pode criar. Pode criar uma pedra pesada? Muito pesada? Pode. Uma pedra tão pesada que ele não pode levantar? Pode, ele é Deus, ele pode tudo. Então ele não pode tudo, porque ele não pode levantar aquela pedra. Ou seja, a matemática serviria para descrever todo o Universo, se não existir nada no Universo que a matemática não consiga contemplar logicamente. Então, tudo bem, você precisa de mais um princípio, você vai e expande a matemática, continua descrevendo o Universo. Mas o Teorema da Completude prevê que, se existir alguma coisa que não seja lógica, do ponto de vista da matemática. Do logos, que nem na Bíblia. “No princípio era o logos”... Então a partir desse logos o Universo evoluiu. Ou seja, quem escreveu a Bíblia, “no princípio era o logos”, estava falando “Newton manda neste negócio aí, a matemática lógica é o que define toda a existência”... A partir do logos, não é o princípio em si, mas a forma de raciocinar a partir do princípio.

00:46:57 [201] E isso, se é uma forma de raciocinar, a gente fica limitado ao nosso cérebro, sempre.

00:47:02 [942] Só comentar isso aqui, o xxx²... acho que é o xxx que falou isso, não lembro, mas... uma coisa que achei sensata. E quando a gente ouve tudo aquilo de... a quântica não é intuitiva... tem aquele chavão: “se você entendeu a quântica é porque você não entendeu, rá rá rá”. O xxx, acho que foi ele que falou isso, que... isso faz todo sentido, porque... Nossa intuição não se desenvolveu pra pensar em partícula e onda, se desenvolveu pra fugir de mamute. Então, exatamente, a gente tem uma limitação aí.

²Professor da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.

00:47:35 [201] Mas isso não significa que a gente não possa mudar isso. Assim, por exemplo... Alguém já tentou, por exemplo, ensinar relatividade para uma criança pequena? Dá, por incrível que pareça dá, e elas entendem, é só explicar geometricamente. E... é muito rápido o jeito delas aprenderem ... eu consegui com uma criança... eu digo criança, mas é um adolescente de treze anos.

00:47:57 [872] Mas a forma como a criança constrói o mundo seria da forma como...

00:48:02 [201] Ela entendia a geometria. Ela era uma menina bem inteligente.

00:48:05 [893] Quantos anos?

00:48:06 [201] Treze.

00:48:06 [893] Então tem que tomar cuidado porque, por exemplo, quando a gente estuda a psicologia do desenvolvimento da aprendizagem, a criança geralmente de treze anos já está com todas as operações, que a gente chama de operações formais, para poder entender coisas abstratas. Então talvez por isso ela tenha entendido. Se for tentar ensinar para uma criança de seis, sete anos você não vai conseguir.

00:48:24 [201] Tudo bem. Mas... por exemplo, se a gente aprende relatividade desse jeito... muita gente aqui aprendeu no colegial, eu só tive contato na faculdade. Talvez... mesmo com treze anos você já consegue construir todas as entidades abstratas, então se você começar ensinar isso, talvez ela tenha uma bagagem melhor quando encarar coisas como quântica. Isso talvez seja evolução de pensamento.

00:48:46 [583] Estava desenvolvendo, mas só para pontuar... Eu vejo a matemática... eu gosto bastante dela, para falar a verdade, por isso talvez eu não seja muito imparcial quando for falar. Mas o que eu percebo é que, primeiro a gente tem como nosso meio de comunicação as palavras, e nas palavras a gente usa a lógica, o nosso meio de interpretar as coisas. Só que chega um ponto que com as palavras... havia uma grande dificuldade de interpretar o mundo, então a matemática de um certo modo, pega essas palavras e compacta em símbolos. As ideias, e compacta de uma certa forma. Então, a matemática nada mais é como uma linguagem nossa, nesse sentido, que a gente pega o Universo... e compacta as nossas interpretações, as nossas palavras, nossos dizeres nela. E além disso, a gente consegue... superar nossa intuição com a matemática. Porque ao compactar... pelo menos é uma visão um pouco de cima... ao compactar essas informações e símbolos, em coisas que a gente consegue mexer, trazer e fazer às vezes até sem pensar, que o que a gente normalmente faz nesse curso, faz as contas sem nem saber o que está fazendo, mas... tem as regras e a gente sabe obedecer as regras. E aí a gente chega em um

resultado que talvez a nossa intuição diz “não, espere aí, está errado, mas matematicamente está certo. Baseado nessas regras que nos servem e dizem isso não possa acontecer, ela acontece. E aí eu vou tentar verificar, e talvez eu mude minha intuição, talvez eu esteja certo, talvez eu esteja errado...” e com a matemática a gente consegue avançar um pouco nessa intuição. Voltando com aquela ideia... “o mundo foi escrito matematicamente”, ou a gente está tentando interpretar ela assim, eu acho que não. Na questão de querer colocar a ideia de que a matemática é só mais uma linguagem nossa, talvez nós desenvolvamos uma linguagem ainda mais avançada que a matemática.

00:50:34 [581] A questão é, a nossa linguagem tem a ver com a lógica do mundo ou não? Não necessariamente?

00:50:38 [583] Lógica do mundo... O que é lógica do mundo?

00:50:42 [581] É a forma como as coisas são de verdade. Elas obedecem à lógica do mundo...

00:50:45 [583] E como elas são de verdade?

00:50:46 [113] O que é ser de verdade?

00:50:48 [942] Só um exemplo. A gente consegue medir... Eu entendo o que o (581) está querendo dizer, é o seguinte. A gente consegue medir uma onda eletromagnética, perfeitamente, a gente vai lá e mede propriedades dela. Amplitude, frequência, comprimento de onda... A gente têm uma teoria que descreve isso. A gente têm lá a interpretação de d’Alembert das ondas. O que entendo que o (581) está falando é: tudo bem, nossa linguagem está descrevendo bem isso que a gente mede?

00:51:13 [583] Acho que sim. Mas será que não tem mais coisa? É aí o que acho...

00:51:18 [113] É, exatamente quando ele coloca o que é de verdade... Tem que definir o que é verdade. Você pode pegar por exemplo o exemplo da luz, que você mede a amplitude, base e tudo mais. Mas será que não existe informação que a gente ainda não consegue alcançar? Por causa que, talvez, a gente ainda não têm uma linguagem adequada pra isso. E cai no que o (583) falou. Pelo que eu entendi, que ele quis dizer, a matemática é um instrumento pra você tentar entender o que seria a lógica do Universo, que o (581) está falando. Então, mas a partir do momento que eu começo a criar operações pra tentar entender a lógica do Universo, eu posso deixar uma de fora e eu não consigo medir talvez uma outra propriedade da luz, e eu não posso falar que a luz é luz. Não sei se todo mundo entendeu...

00:52:10 [581] Tudo bem, mas é que são coisas diferentes. Por exemplo, eu falo português

e o Universo está escrito em alemão. Eu tenho que ir aproximando pra conseguir entender. Agora, eu falo...

00:52:19 [André] Alemão é sacanagem...

00:52:20 [201] Tem línguas piores...

00:52:22 [581] Agora outra coisa é eu falo português e o Universo é escrito em uma linguagem que não pode ser estruturada com sintaxe processável pela nossa mente.

00:52:35 [201] A gente duas alternativas, ou a gente aproxima...

00:52:37 [113] O que você está falando, então, eu tenho o Universo...

00:52:43 [583] Então pode ter uma realidade?

00:52:46 [581] Sim.

00:52:46 [583] Existe uma realidade absoluta?

00:52:48 [581] Sim.

00:52:49 [583] E que ela é escrita de outra forma?

00:52:50 [201] Não necessariamente. O que ele diz é que ela pode estar.

00:52:54 [583] Tudo bem, então ela pode estar...

00:52:55 [113] Mas só se você pode fazer essa tradução, não é?

00:52:59 [581] Estou definindo realidade como a gente percebe.

00:53:02 [583] Então não faz sentido que está escrito em alemão, ela está escrito em português, porque eu percebo ela em português. Então eu já faço parte da lógica do mundo que só faz sentido falar que a lógica do mundo é a minha lógica, por que senão... Eu tenho que admitir que é uma coisa além, concreta...

00:53:18 [113] Você só pode entender uma coisa quando você está acostumado com isso.

00:53:21 [581] Sim, mas tem passagens faltando nessa história. Por exemplo, eu percebo matéria escura, mas eu não sei descrever. Porque? Porque está escrito em uma linguagem que eu não conheço, ou porque está escrito em linguagem que não existe dentro das minhas capacidades?

00:53:35 [942] Eu não vejo nenhum problema em dizer que a realidade é aquilo que você vê, e dizer ao mesmo tempo que você tem que mudar sua mente. Eu acho que as coisas são... se completam essas teses. E quando você vê uma coisa que você não entende, você vê matéria escura e energia escura, por exemplo. Que... vamos admitir que as duas de fato estejam... que existam mesmo, matéria escura e energia escura. É, que não seja erro de conta, ou erro de interpretação. Acho que isso é uma pedida de mudança de mente, mas que... eu preciso então

umentar um pouco o vocabulário. Preciso colocar uma palavras novas no dicionário, botar uma sintaxe nova.

00:54:20 [581] Sim mas a... capacidade da mente se adaptar é infinita?

00:54:24 [201] Aí isso já não se sabe. Aí chegou em um negócio que a gente não sabe.

00:54:27 [André] (033), fale uma besteira também.

00:54:30 [033] Uma besteira? Concordo, acho que... acho que a limitação que a gente tem... desculpa eu perdi... depois eu volto.

00:54:52 [872] Essa questão do dicionário que você colocou, então a gente parte do pressuposto que com o nosso dicionário a gente vai conseguir decifrar o resto. A gente pode necessariamente criar um dicionário que diga que exista uma coisa além da matemática que a gente conhece, que consiga descrever... a matéria escura e a energia escura.

00:55:14 [942] Olha, se existe uma coisa além da matemática que explica a matéria escura, energia escura, e eventualmente um monte de coisa que a gente nem sabe da possível existência ainda, pra isso ser de uma validade, isso tem que continuar explicando todo o resto... A aceleração da gravidade, a lei do inverso do quadrado das distâncias ... enfim, todo o resto que a gente já têm hoje. Então isso tem que ser, no limite, a nossa matemática tal como ela é. Se a gente transforma, pega todos os números, e transforma em uns objetos, sei lá... os números são glóbulos, não são números. Essas coisa em um limite tem que voltar a ser número. A não ser que eu pegue... e jogue toda a matemática e fora e comece de novo, só por conveniência.

00:55:59 [201] Acho que nem é um limite, é uma transformação. Você tem que conseguir transformar, não é um limite.... A gente pode fazer uma conta enorme, ou a gente pode ler a conta em voz alta. Você está transformando os símbolos em palavras, é uma transformação.

00:56:12 [872] Mas na hora de fazer a transição, o que será que a gente faz? A gente parte do nosso dicionário e tenta traduzir esse novo mundo, ou a gente busca esse novo mundo e tenta trazer para o nosso dicionário?

00:56:24 [583] Adiciona palavras no dicionário. Imagine que você pegue as palavras... matemática pode começar a ficar mais compacta, de tal forma que a gente consiga explicar de uma nova maneira. Por exemplo, a gente explica coisas matematicamente... são contas extremamente difíceis que a gente não consegue resolver. Então talvez o nosso jeito de fazer matemática tem que aprimorar. A gente que pegar as palavras matemáticas agora, que são símbolos, transformar em outra coisa, juntar mais informação, tal qual eu consiga manipular e chegar em resultados que sejam concretos pra mim. Ou então desenvolvo uma super máquina

que faz as coisas para mim...

00:56:58 [201] Já tem coisas dessas que você usa. Se você procurar, tem um negócio chamada Grupo de Butcher, é basicamente um monte de símbolos que representam operações diferenciais, e você vai desenhando as operações diferenciais. E é só um jeito...

00:57:11 [581] Diagrama de Feynman também.

00:57:12 [201] É que esse Grupo de Butcher é realmente... parece alienígena. Você escreve uma linha de contas, você fala... Meu Deus... vou sumonar um demônio com esse negócio. E é realmente um negócio bem bonito. Quando você entende as passagens principais, você vê que cada desenho tem uma construção bonita... E forma realmente desenhos, suas contas viram desenhos. Elas só funcionam para aquelas contas do Butcher, mas é algo interessante, algo que dá pra fazer com a matemática normal. Se você sentar um dia, e falar O.K. vou transformar todas as operações de relatividade geral em desenhos. Talvez seja um trabalho para a vida inteira, talvez você consiga ver uma coisa diferente. Agora, tem que ter vontade, tem que ter apoio... principalmente se você...

00:57:54 [André] Bolsa.

00:57:55 [201] Bolsa... E principalmente você não pode para só porque vai dar errado, porque se você quer transformar todas as operações da relatividade em desenho, cara você vai errar muito. Te garanto.

00:58:06 [André] Deixem eu cortar vocês pra emendar com outra coisa. Vinculada à matemática, a linguagem da matemática pra descrever o mundo, mas... agora... usando uma curiosidade histórica. várias vezes... Não, ela já vai se mover... O que vocês está vendo aqui? Virou uma sessão de psiquiatria. Por vezes na história da ciência, a matemática, por si só, sugeriu certas entidades... certos processos que não eram compreensíveis de imediato, ou mesmo não são observáveis imediatamente. Essa velha história que a gente está voltando aqui, quase incessantemente. Por exemplo, as cordas do século XIX... eram os átomos. Isso a gente tem material disponível, que é legal, para agente ver o debate, por exemplo, entre ícones da época... com Planck, sempre acerca da realidade dos átomos. Hoje em dia, se você entrar na física e dizer que não acredita em átomos, provavelmente apanha, vai ser bulinado intelectualmente. Não sei se vocês viram, cerca de dois meses atrás a IBM fez o menor filme do mundo.

00:59:21 [942] A IBM fez o quê?

00:59:22 [André] O menor filme do mundo. Um filme com átomos. Você viu (201)? Então, pra quem ainda de dúvida de átomos, dá uma olhadinha. É legal as ondinhas, ao redor dos

átomos.

01:00:44 [201] Deve ser pelo método de medida que eles usaram.

01:01:00 [André] Tem que ter o IBM no fim. E daí...

01:01:04 [581] Mas para mim era um anúncio bem pequenininho.

01:01:13 [201] Como eles fizeram isso, com aquele de agulha mesmo?

01:01:16 [André] Eu acho que é.

01:01:17 [581] É o de força atômica.

01:01:19 [201] É o de agulha, não é.

01:01:21 [André] Só para ilustrar... Se eu mostrasse um coisa dessa para Mach, no fim do século XIX, provavelmente ele não iria acreditar, iria achar que é um monte de ficção... Agora para direcionar mais concretamente a pergunta. Hoje dia tem muitos átomos, átomos entre aspas, que são discutíveis... Por exemplo, no século XIX, a questão de se introduzir átomos ou não, principalmente entre os químicos... o Evandro (Rozenalski) é químico ... Muitos o utilizam com base na questão da utilidade. Por que a gente vai introduzir essas partículas que a gente nem observa, e que na verdade ela só diz o que a gente já sabe? Por exemplo, na teoria de Maxwell, pelo menos na primeira formulação dela, ela descrevia os campos como comportamentos de objetos macroscópicos. O primeiro que começou a misturar entidades minúsculas portadoras de cargas fundamentais foi o Lorentz. Que, inclusive, usava letras minúsculas para escrever o campo elétrico. O campo elétrico dele era o E minúsculo, para diferenciar do campo de Maxwell, que era o E maiúsculo, macroscópico. Hoje em dia o que estes átomos são? Daí vou precisar da ajuda de vocês. Deve ter muita gente que faz pesquisa nessas áreas. Eu diria que as cordas é um átomo...

01:02:45 [201] É o maior de todos.

01:02:47 [André] ... O maior de todos. Mas, eu não sei... eu fiz uma perguntinha do vácuo quântico na última aula do xxx³, porque eu vi que pelo menos de noite chocou mais o pessoal do que no diurno. Chegou ao cúmulo da galera dar risada a cada frase que o xxx falava... o vácuo é assim...

01:03:05 [581] Legal foi ele parar “pessoal, tudo bem?”.

01:03:08 [872] “É com isso que eu ganho na vida”.

01:03:12 [André] Você trabalha com teoria quântica de campos, não (942)?

01:03:16 [942] Eu? Quem sou eu pra trabalhar com teoria quântica de campos. Não. Pre-

³Professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

tendo chegar lá um dia.

01:03:21 [André] Você colocaria o vácuo quântico nesse hall de entidades meio suspeito, ou não?

01:03:30 [942] Não.

01:03:31 [201] Acho que já saiu disso.

01:03:33 [581] É detectável.

01:03:35 [942] Se me perguntar de cordas, eu vou falar: talvez. Eu não acredito que a teoria de cordas esteja certa. Mas...

01:03:41 [201] Acho que cordas, quântica em loop... Já caiu quase em esquecimento, mas ainda está aí. Tem várias coisas erradas nela, mas tem alguns acertos, então não saiu do páreo. Tem aquela relatividade termodinâmica maluca, e aquela quântica termodinâmica.

01:04:01 [942] Tem uma coisa também... Teoria de Ilhas, já ouviram falar? Eu tenho um amigo que não acredita em relatividade... ele não acredita em relatividade, acha que essa coisa está errada. Aí... começou a ir atrás de alternativas da relatividade, e aí ele chegou em uma teoria de ilhas. É uma teoria bizarra, onde c não é uma constante mas que dá o efeito de parecer se uma constante.

01:04:30 [201] Aquele negócio lá do português de Oxford. Como é o nome?

01:04:38 [André] É o português, para quem o comprimento de Planck e o tempo de Planck são invariantes também.

01:04:43 [201] Ele é super maluco, tem umas coisas bem malucas. Mas faz sentido o que fala, eu vi o documentário inteiro do Discovery... caramba isso faz sentido. Desses átomos assim, acho que por mais que eles não gostem, Cordas é o que tem mais... é o que pode ser o que seria de verdade. Mas só por causa da conjectura de Maldacena.

01:05:05 [André] “Eles” aí é pessoal?

01:05:10 [581] Conjectura de Maldacena é uma conjectura...

01:05:13 [942] É o que equivale ao princípio de correspondência?

01:05:14 [581] Sim, é um conjectura que nunca foi provada e que nunca vai ser...

Cerca de dez minutos finais do Grupo Focal foram perdidos em razão do mal funcionamento do aparelho gravador. Nesse intervalo, os participantes concluíram o debate sobre a realidade das cordas, e, por fim, discutiram rapidamente sobre o papel do pragmatismo na atividade científica.