

# A física clássica de cabeça para baixo: Como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial\*

(Turning classical physics head over heels: How Einstein discovered the special theory of relativity)

Jürgen Renn

*Instituto Max Planck para a História da Ciência, Berlin, Alemanha*

Albert Einstein por duas vezes alterou de maneira profunda nossos conceitos de espaço e tempo com a sua teoria da relatividade: primeiro no âmbito da teoria especial de 1905 e depois com a teoria geral de 1915. Como foi o jovem Albert Einstein capaz de dar início a esta revolução?

**Palavras-chave:** história da física; teoria da relatividade.

Albert Einstein twice changed our concepts of space and time with his theory of relativity in a profound way: first with the special theory of 1905 and later with the general theory of 1915. How was the young Albert Einstein capable of starting such a revolution?

**Keywords:** history of physics, relativity theory.

## 1. Introdução

De acordo com a teoria da relatividade especial, relógios e réguas que se movem em relação a um referencial inercial comportam-se de maneira diferente daqueles que se encontram em repouso em relação a este mesmo referencial. Relógios em movimento funcionam mais devagar e réguas se encolhem ao longo da direção do movimento. Enquanto que na física clássica espaço e tempo fornecem, em cada teoria ou experimento, um alicerce absoluto e imutável de qualquer processo físico, na teoria especial este alicerce depende do sistema de referência no qual um processo físico particular é medido e, na teoria geral, ele depende até mesmo da distribuição de massa e energia no universo. Mas a mudança dos conceitos de espaço e tempo já na teoria especial contradiz nossas experiências do dia-a-dia. No entanto, foi apenas através desta mudança que foi possível a Einstein reconciliar dois princípios que, em função de uma longa história, haviam se mostrado irrefutáveis: o princípio da relatividade e o princípio da constância da velocidade da luz. O princípio da relatividade diz que toda lei física não muda quando se passa de um laboratório em repouso para outro que se mova de maneira retilínea e uniforme com relação ao primeiro. O princípio da constância da velocidade da luz é uma lei deste tipo; ela diz que a velocidade da

luz é igual em todos os sistemas inerciais, ou seja, um raio de luz emitido de um trem que se move com velocidade  $v$  terá, em relação a uma pessoa parada na plataforma da estação, uma velocidade  $c$  e não uma velocidade  $v + c$ . Só através de uma revolucionária mudança dos conceitos clássicos de espaço e tempo esta contradição pode ser solucionada.

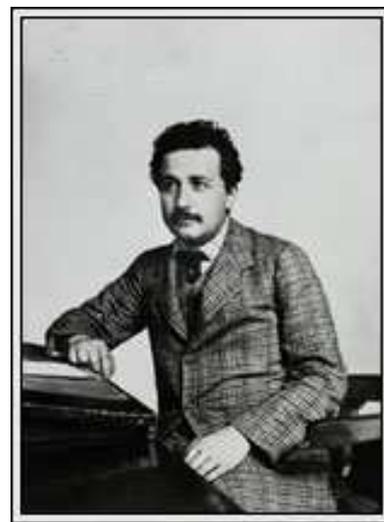


Figura 1 - Albert Einstein (1879-1955) quando funcionário do Escritório de Patentes de Berna, cerca de 1906.

\*Este artigo é a versão resumida de uma palestra proferida pelo autor em 15 de janeiro de 2004 no âmbito dos Seminários Einstein da Universidade de Ulm [1], e será publicado em sua versão completa na forma de livro. Na presente forma foi publicado na revista *Physik Journal* **3**, 49 (2004) da Sociedade Alemã de Física, com o título *Die klassische Physik vom Kopf auf die Füße gestellt. Wie Einstein die Spezielle Relativitätstheorie fand*. Tradução de Sílvio R. Dahmen, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## 2. Uma conversa em maio

Após a conclusão da licenciatura em física na Escola Politécnica de Zurique, Einstein vivia e trabalhava desde 1902 em Berna. E foi ali que, numa bela manhã de maio, ele se levantou e, como podemos depreender de relatos posteriores [3], foi visitar seu amigo e colega do Escritório de Patentes Michelle Besso, para com ele discutir novamente a respeito de seu assunto favorito: a eletrodinâmica dos corpos em movimento, uma área aparentemente remota da física de então e essencialmente voltada para os problemas das cargas em movimento e da interação entre campos elétrico e magnético. Besso, que não era físico mas engenheiro, era no entanto um leigo interessado em problemas da física e fazia parte de um grupo de companheiros de discussão pelo qual Einstein tinha um especial apreço. Como podemos imaginar este encontro entre Einstein e Besso? Einstein não se cansa de mais uma vez explicar detalhadamente a seu amigo seu problema da eletrodinâmica dos corpos em movimento. Ele admite que está prestes a desistir. Apesar disto ele se motiva a mais uma vez descrever sua situação sem saída. Quem sabe Besso tenha uma idéia. “Eu o amo pela sua inteligência afiada e sua simplicidade”, escreveu certa vez Einstein a sua esposa Mileva [4].

Besso segue, como sempre paciente e atencioso, as explicações de Einstein, mesmo que muitos dos detalhes estejam além de seu horizonte de leigo. Mas desta vez Besso interrompe Einstein continuamente com perguntas, mais do que de costume, a ponto da discussão proceder num vai-e-vem e retornar sempre ao ponto de partida. Eles discutem o comportamento de corpos em sistemas inercias que se movem um com relação ao outro e tecem considerações sobre quais mudanças nas grandezas elétricas e magnéticas poder-se-ia medir em tais sistemas inerciais. Einstein não acredita, por questões de princípio, que o movimento relativo e uniforme entre dois observadores possa ser detectado por medidas de manifestações eletromagnéticas ou ópticas. Porém a criação de uma teoria onde qualquer processo físico fosse em princípio equivalente para todos os sistemas em movimento relativo mostra-se uma tarefa extremamente árdua. Não que para isto faltasse uma teoria convincente que explicasse, para todos os referenciais em movimento relativo uniforme, praticamente todos os processos eletromagnéticos ou ópticos conhecidos, muito pelo contrário. Havia a teoria desenvolvida desde a década de 80 do século XIX pelo holandês e grande mestre da física Hendrik Antoon Lorentz, a qual porém não satisfazia a concepção de Einstein a respeito da equivalência dos referenciais inerciais para processos eletromagnéticos. Justamente por isto a teoria de Lorentz tem um importante papel na conversa entre Einstein e Besso naquele decisivo dia de maio de 1905. Mesmo nas explanações de Einstein, que a esmiuçou nos mínimos detalhes, a teoria era tão complexa que Besso

a todo o momento o desafiava com perguntas. O que significa esta ou aquela grandeza exatamente? Pode-se medi-la diretamente?



Figura 2 - Amigo e colega de Einstein no Escritório de Patentes, Michelle Besso, um engenheiro (1873-1955, aqui com sua esposa Anna), foi o mais importante companheiro de discussões de Einstein durante o nascimento da teoria da relatividade especial.

Perguntas aparentemente ingênuas como esta eram típicas de Besso. Foi ele também que, durante os anos compartilhados em Zurique, chamou a atenção de Einstein para a obra do físico, filósofo e historiador da ciência Ernst Mach, que pretendia excluir da física todo conceito que não fosse baseado na experiência empírica [5]. E o que também se pode dizer de positivo a respeito da bem sucedida teoria de Lorentz é que ela não era pobre na quantidade destes conceitos. Em particular nela se podia encontrar aquele obscuro conceito do éter, imaginado como sendo o portador dos fenômenos eletromagnéticos e deste modo também da luz, em analogia aos meios portadores das ondas de som ou ondas no mar; havia também uma variável auxiliar para o tempo, o chamado tempo local, não diretamente acessível à verificação experimental e necessária em um teorema - e com o auxílio da qual era possível calcular os fenômenos magnéticos em corpos em movimento. Havia também a hipótese de um estranho encurtamento no comprimento de corpos na direção de seu movimento em relação ao éter. Essas hipóteses tiveram que ser incorporadas por Lorentz à sua teoria para que ele assim pudesse explicar o motivo pelo qual o famoso experimento de Michelson e Morley não era capaz de fornecer a menor indicação do movimento da Terra pelo éter. Einstein e Besso conversavam à exaustão. Repentinamente, uma luz se fez no semblante de Einstein, mas ele se cala e parte, com uma desculpa esfarrapada. Besso suspira, desconcertado, mas ele conhece seu amigo o suficiente para não tomar aquela atitude como uma ofensa pessoal. No dia seguinte, Einstein retorna com um sorriso maroto e, antes de cumprimentá-lo, diz laconicamente:

“- Graças a você solucionei completamente meu problema”. Aproximadamente cinco semanas depois, no dia 30 de junho de 1905, Einstein submeteu aos *Annalen der Physik* o artigo que, sob o título “Acerca da eletrodinâmica dos corpos em movimento”, inauguraria uma era e fundaria a teoria especial da relatividade. O trabalho não traz quaisquer referências - apenas um agradecimento a seu fiel amigo e colega do Escritório de Patentes Michelle Besso [6].

Infelizmente, relatos históricos que narrem o momento da criação da teoria da relatividade de maneira tão plástica não existem. Mas mesmo que fosse possível reconstruir em detalhes tal conversa, quem sabe talvez dos relatos de uma empregada, em que contribuiria tal narrativa para nossa compreensão de uma revolução científica como foi a teoria da relatividade?

Neste trabalho procuraremos tornar essa revolução científica compreensível através de uma abordagem que, partindo de fontes de conhecidos detalhes biográficos, coloca-a dentro do contexto de mudanças dos sistemas de conhecimento, como o fazemos no Instituto Max Planck para a História da Ciência. Tais sistemas de conhecimento mudam tipicamente numa escala de tempo de longa duração, nos quais não apenas o conhecimento científico mas também outros níveis do conhecimento participam. Neste cenário a pergunta a respeito da criação da teoria da relatividade deixa de ser apenas uma pergunta sobre as circunstâncias da “Eureka” de Einstein naquele maio de 1905 mas sim uma pergunta sobre como os *insights* teóricos de Einstein se relacionam com os outros níveis de conhecimento, em particular com aquele nível que determina nossa compreensão diária dos conceitos de tempo e espaço.



Figura 3 - Também Mileva Marić (1875-1947), antiga colega de universidade de Einstein, com quem se casou em 1902, foi inicialmente uma companheira intelectual deste - certa vez ele referiu-se até mesmo ao “nosso trabalho acerca do movimento relativo” - antes de cada vez mais compelida ao papel de dona-de-casa e mãe (Foto: Biblioteca Nacional Suíça de Berna).

### 3. Problemas de fronteira da física clássica

Mas como teria sido possível que uma conversa entre Einstein e Besso naquele maio de 1905 possa ter dado início a um processo de consequências tão amplas para a mudança dos sistemas de conhecimento? Naturalmente tal conversa representou apenas um ponto final de um longo processo. Einstein havia se envolvido praticamente desde sua juventude com problemas da eletrodinâmica - afinal sua família fabricava equipamentos elétricos. Já com dezesseis anos o jovem Albert escreve um texto acerca do éter como intermediador dos fenômenos eletromagnéticos e ópticos [7]. No ano seguinte ele se pergunta como uma onda de luz pareceria para um observador que se movesse ele próprio com a velocidade da luz na direção da propagação desta onda [8]. Deveria se observar uma espécie de onda estacionária, mas algo assim parecia não existir. Este *Gedankenexperiment* juvenil traz também à tona a questão a respeito de qual seria a velocidade da luz medida por tal observador. A resposta a esta pergunta parecia depender basicamente do modelo adotado como base para o éter. Em um éter em repouso, ou seja, que não fosse arrastado pelo sistema em movimento e pelo observador, a velocidade da luz relativa ao sistema em movimento deveria sempre mudar.

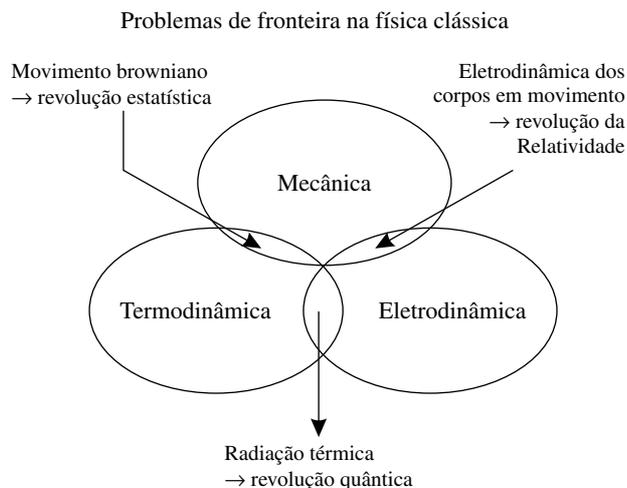


Figura 4 - É apenas por meio do estudo de problemas da fronteira da física clássica que se pode averiguar quão compatíveis são os conceitos das diferentes áreas. A descoberta de incoerências conceituais à margem de um problema concreto serve de motor à inovação científica.

Este *Gedankenexperiment* deixa claro que os problemas com os quais Einstein se ocupou eram de um tipo muito especial e estavam relacionados com a estrutura interna dos sistemas de conhecimento da física clássica. Problemas como o da propagação de ondas em referenciais em movimento se encontram - como na verdade os problemas da eletrodinâmica de corpos em movimento - na região fronteira entre a eletrodinâmica e a mecânica e pertencem assim à classe de problemas com

os quais a mudança da física clássica para a moderna se concretizou.

A física clássica divide-se primordialmente em três áreas, cada qual com conceitos próprios: a mecânica, a teoria do calor e o eletromagnetismo. Nas fronteiras entre estas áreas encontravam-se aqueles problemas nos quais diferentes conceitos básicos se sobrepunham. Só através do estudo destes problemas de fronteira é que se poderia saber até que ponto os diferentes conceitos das três diferentes áreas eram coerentes entre si. Por outro lado, o descobrimento de incoerências conceituais quando associado a um problema concreto funciona, tipicamente, como motor de inovações científicas, pois toda tentativa de resolver um problema concreto obriga concomitantemente a que repensemos os conceitos envolvidos e pode, pela transformação destes conceitos ou de teorias inteiras, abrir novos horizontes.

Por este motivo os problemas de fronteira da física clássica puderam se tornar os pontos de partida para a superação destas mesmas fronteiras. O problema da radiação térmica do corpo negro em equilíbrio, no qual Max Planck houvera trabalhado, era um problema deste natureza por se encontrar na fronteira entre a teoria do calor e a teoria da radiação do eletromagnetismo. Este problema tornou-se um dos cerne da mecânica quântica em grande parte devido estar ele no centro de um trabalho publicado por Einstein de 1905 além de seus outros três trabalhos revolucionários [9]. O problema do movimento browniano, este também objeto de um trabalho de Einstein no seu *annus mirabilis* [10], encontrava-se na fronteira entre a mecânica e a teoria do calor e veio a ser um ponto de partida da moderna mecânica estatística. Finalmente a eletrodinâmica dos corpos em movimento, o brinquedo preferido de Einstein, engloba, como já mencionado, problemas de fronteira entre a mecânica e o eletromagnetismo, e dela desenvolveu-se a teoria da relatividade. Em outras palavras, todas as mudanças conceituais importantes da física do início do século XX tiveram sua origem em problemas nas fronteiras da física clássica.

Do surgimento da teoria da relatividade especial pode-se vislumbrar um exemplo de como tal mudança se concretiza como resultado da interação entre o conhecimento disponível da física de então com o ponto de vista individual de um pesquisador. Independente do que a perspectiva de Einstein em pontos específicos possa ter determinado, ela necessariamente contribuiu para que sua atenção fosse desviada para aqueles problemas de fronteira da física clássica. Esta perspectiva se desenvolve, como mostraremos a seguir, em três etapas:

- Fase da experimentação
- Fase da teorização
- Fase da reflexão

Em um certo sentido todas as três fases foram revolucionárias. As duas primeiras, no caso de Einstein especialmente, foram na verdade apenas subjetivas, ao passo que somente a terceira fase, a fase da reflexão, foi motivo de uma revolução na história do conhecimento na física.

#### 4. A fase da experimentação

A fase da experimentação foi marcada sobretudo pelos incessantes esforços de Einstein em corroborar, experimentalmente, o movimento da Terra pelo éter, contribuindo assim com um ambicioso espírito de pioneirismo em uma área então no estado-da-arte da pesquisa. Isto é um fato, embora o material disponível não permita que tiremos conclusões sobre estes experimentos. Já no verão de 1899 ele planejou experimentos sobre radiação com seu antigo professor Conrad Wüest em Aarau, um dos pioneiros na pesquisa dos raios-X na Suíça [11]. Destes experimentos, em parceria com Wüest, Einstein esperava primeiramente obter uma resposta à pergunta sobre qual das duas grandes correntes da teoria da eletricidade de então correspondia à realidade física: a interpretação atomística da eletricidade, como era amplamente difundida no continente, ou a visão calcada na tradição maxwelliana que tinha por base a existência de um meio contínuo da eletricidade. A realização dos experimentos planejados foi no entanto postergada. O diretor da Escola de Aarau, o reitor Wüest, tinha aparentemente outras prioridades [12]. Mas logo, no final do verão de 1899, Einstein teve uma idéia acerca de um estudo: determinar a influência que o movimento relativo de corpos com relação ao éter luminífero teria sobre a velocidade de propagação da luz em corpos transparentes [13]. Um forte argumento a favor do repouso deste éter luminífero era o fenômeno da chamada aberração (Fig. 5).

Quando se observa a posição de uma estrela ao longo do ano de diferentes posições ao longo da órbita de nosso planeta, constata-se que ela sofre oscilações regulares. Se a estrela observada está muito distante, estas flutuações em sua posição aparente não podem ser resultado da paralaxe, quer dizer da variação do ângulo sob o qual ela é observada. Ela poderia sim, como já houvera notado Bradley no início do século XVIII, estar muito mais relacionada à composição da velocidade da luz emitida pela estrela com a velocidade do movimento da Terra, de modo que a velocidade da luz da estrela pareceria vir de diferentes direções em função do movimento terrestre [14].

Em uma análise mais pormenorizada do problema da aberração surgem no entanto duas dificuldades: primeiro, se por hipótese toma-se a luz como sendo um movimento ondulatório num meio como o éter, a adição de velocidades vale somente se for feita a hipótese adicional de que este meio luminífero se encontra em repouso – caso contrário surgem várias complicações.

Einstein lembrar-se-á mais tarde que considerações sobre o problema da aberração o acompanharam em seu caminho até a teoria da relatividade especial [15]. De qualquer maneira elas estavam em concordância com

sua convicção, expressa em uma carta no verão de 1899, de que não fazia sentido falar sobre um movimento do éter [16].

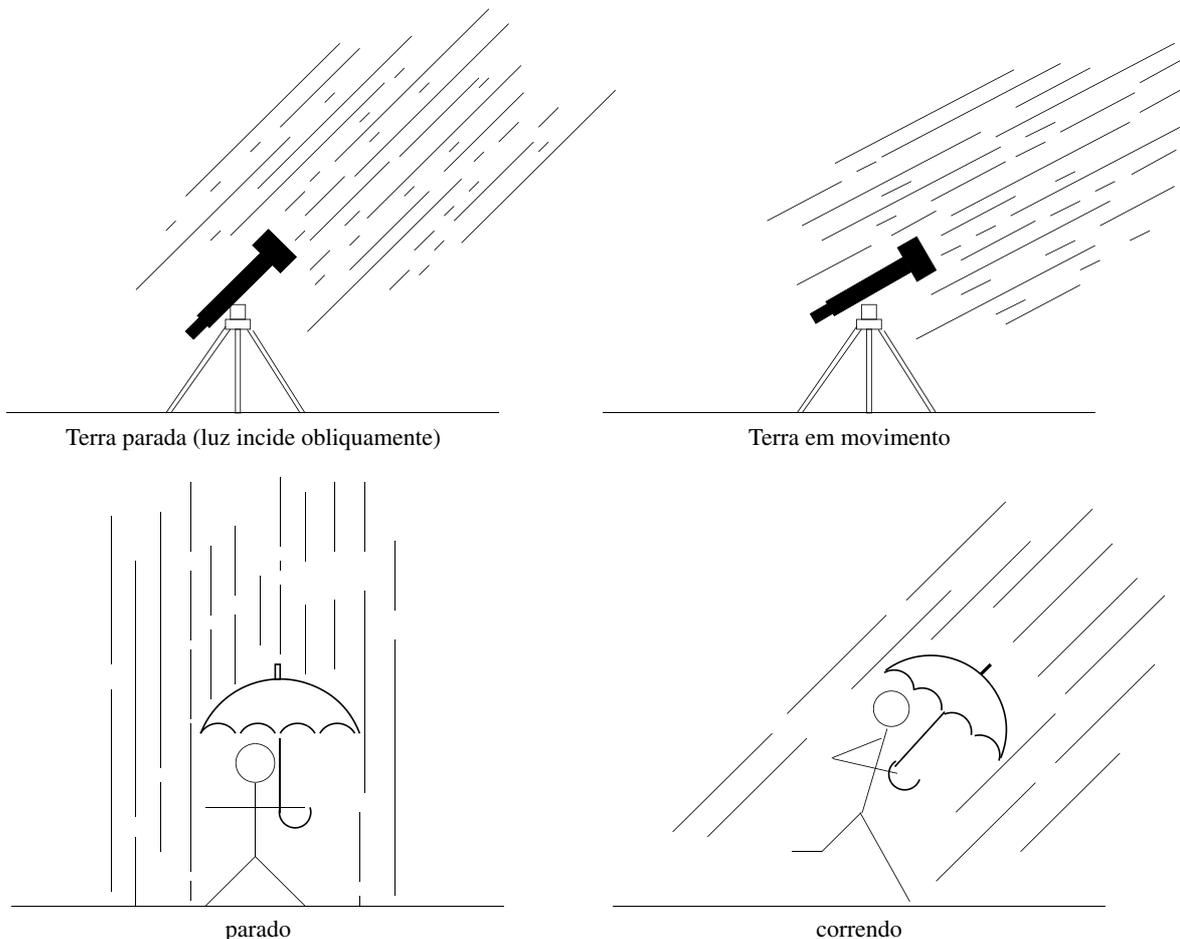


Figura 5 - A aberração pode ser explicada pela superposição das velocidades da luz e da Terra: dependendo da direção do movimento terrestre em sua órbita a luz de uma estrela parece vir de diferentes direções. No nosso dia-a-dia experimentamos também um fenômeno análogo: quando o movimento vertical de queda da chuva se combina com o movimento de um pedestre, ele se verá obrigado a inclinar ligeiramente o guarda-chuva para a frente para não se molhar. Para ele, a chuva cai obliquamente (baseado em Hoffman e Banesh, *Relativity and its Roots*, Dover 1983, p. 59).

A segunda dificuldade para se compreender a aberração surge do fato que, em se considerando que para observar estrelas é necessário recorrer ao uso de telescópios, é necessário levar em conta não apenas a propagação da luz num pressuposto éter mas também em um meio óptico transparente como, por exemplo, no vidro. Porém, em tais meios, a luz se propaga com uma velocidade menor que no éter, de modo que assim o efeito da aberração deveria sofrer alterações quando um meio transparente entrasse no processo. As observações contudo mostravam que a aberração era totalmente independente do fato da luz ter ou não atravessado um meio. Este fato já havia sido explicado em 1818 por Fresnel com a hipótese de que meios que se movem com a Terra pelo éter em repouso, arrastam este junto consigo com uma certa fração de sua velocidade.

Mas qual o significado exatamente deste “arrasto

do éter” para um meio em movimento? Seria talvez possível verificar diretamente este fato ou seria ele apenas uma compensação hipotética para explicar a ausência das flutuações na aberração normal? Esta pergunta guarda uma estreita relação com o experimento de Einstein acerca da influência que o movimento de corpos em relação ao éter luminífero tem na velocidade de propagação da luz em corpos transparentes. Um experimento como o planejado por Einstein poderia provavelmente produzir evidências diretas deste arrasto.

Tal experimento fora já no entanto feito algumas décadas antes, em 1851, por Fizeau e confirmado, de maneira aproximada, a existência do coeficiente de arrasto de Fresnel. Não sabemos o quão familiarizado Einstein estava com estes desenvolvimentos e se era sua pretensão ele mesmo refazer os experimentos de Fizeau

de maneira mais precisa ou utilizando uma variante deste. Einstein não se deixa abater pelas dificuldades e debruça-se, com entusiasmo, sobre um artigo de revisão de Wilhelm Wien, no qual se discute os mais importantes experimentos a respeito da questão da participação do éter luminífero no movimento dos corpos [17].

Até aproximadamente o outono de 1901 há evidências a respeito dos esforços experimentais de Einstein. Não há aqui praticamente quaisquer resultados empíricos dignos de nota mas é provável que isto tenha reforçado nele a crença de que a eletrodinâmica dos corpos em movimento continuava, como antes, uma área com muitas questões em aberto, em particular no que tangia ao duvidoso papel o éter, cujo movimento em relação à Terra aparentemente não era experimentalmente corroborável. Ao final de sua fase de experimentação, Einstein se tornou ciente que todos os fatos empíricos necessários a uma eletrodinâmica de corpos em movimento encontravam-se sobre a mesa.



Figura 6 - Armand Fizeau (1819-1896) conduziu em 1851 um experimento sobre o arrasto do éter e chegou a uma confirmação aproximada do coeficiente de arrasto de Fresnel.

## 5. A fase da teorização

Ao final de sua fase de experimentação, Einstein sentiu-se encorajado a pensar em uma eletrodinâmica sem o éter. Com este objetivo inicia-se a sua segunda fase de envolvimento com a eletrodinâmica dos corpos em movimento, a fase da teorização. A postura de Einstein é caracterizada nesta fase pela procura de uma fundamentação conceitual de toda a física, que

ele espera encontrar com o auxílio de uma espécie de atomismo interdisciplinar [18]. Muitas das suas elucubrações, que nos chegaram através de suas cartas, são na realidade baseadas em tentativas de abordagens microscópicas que expliquem a interrelação de fenômenos físicos aparentemente díspares como, por exemplo, a relação entre as condutividades térmica e elétrica dos metais.

O atomismo interdisciplinar de Einstein o leva, entre os anos de 1900 e 1905, a romper radicalmente com a tradição da óptica e da eletrodinâmica do século XIX. Este rompimento porém não pode ser ainda comparado à revolução causada pelos trabalhos de 1905. Ele representa acima de tudo a tentativa de concluir uma caminhada dentro do âmbito conceitual da física clássica que havia sido em grande parte já percorrida na fase anterior mas que fora interrompida. Einstein decidiu-se por trabalhar numa teoria corpuscular da radiação, análoga àquela que Newton havia criado no século XVII – não obstante as evidências indiscutíveis que desde o começo do século XIX apontavam para uma teoria ondulatória da luz. A teoria corpuscular de Einstein para a radiação parecia conter a chave para um grande número de fenômenos com os quais ele se ocupara durante seus tempos de estudante, entre eles os processos de geração e transformação da luz, para os quais novos resultados experimentais estavam disponíveis. Ela coincide também com uma época na qual a questão “onda ou partícula” se apresentava sob nova roupagem – na realidade não necessariamente em relação à luz, mas por exemplo para os recém-descobertos processos radioativos como a radiação de Röntgen [19].

De qualquer maneira para Einstein deve ter sido um argumento contundente o fato que uma teoria corpuscular da luz permitiria olhar simultaneamente um grande número de problemas por um novo ângulo, entre eles o problema da radiação do corpo negro para o qual Planck houvera proposto sua fórmula e que, sem dúvida, representava “o problema” da fronteira entre a teoria do calor e a teoria da radiação eletromagnética. Partindo da hipótese que a radiação na cavidade do corpo negro pudesse ser encarada, sob a ótica da teoria corpuscular, como um apanhado de partículas de luz, então o equilíbrio termodinâmico desta radiação poderia ser determinado pela teoria cinética dos gases de maneira a se obter uma espectro de radiação que concordasse, com um altíssimo grau de precisão, com os resultados experimentais. A teoria corpuscular especulativa de Einstein para a luz foi, na realidade, a base heurística comum aos seus trabalhos sobre a hipótese do quantum de luz e a sua eletrodinâmica dos corpos em movimento. Foi graças ao seu interesse na possibilidade de se construir pontes entre áreas específicas da física por meio do atomismo que seus trabalhos do miraculoso ano de 1905 sobre o movimento browniano e a determinação de dimensões moleculares devem sua existência.

Também a eletrodinâmica dos corpos em movimento ganha uma nova face quanto olhada sob esta perspectiva, pois era de se esperar que para esta nova teoria corpuscular da luz as leis da mecânica, em particular o princípio da relatividade de Galileu e a conhecida composição de velocidades continuassem válidas. A teoria corpuscular proporcionava também a explicação mais simples imaginável para a aberração como consequência da composição das velocidades da luz e da Terra, sem necessidade de recorrer à hipótese da existência de um éter, sobre cujo movimento poder-se-ia quando muito apenas especular. Em uma teoria corpuscular da luz, construída sobre os fundamentos da mecânica, a velocidade da luz não pode ser mais uma constante como na teoria do éter em repouso, mas deveria ser uma função da velocidade da fonte da mesma maneira que a velocidade de um projétil depende da velocidade do canhão que o dispara.

Porém, ao passo que a teoria do éter em sua forma lorentziana explicava praticamente todos os fenômenos ópticos e eletromagnéticos, a teoria corpuscular encontrava-se, quando muito, no berço e, já quando confrontada com problemas simples como a reflexão da luz por um espelho, se via obrigada a lançar mão das mais estranhas premissas. Em outras palavras, também nesta segunda fase de seu trabalho Einstein se encontrava num caminho sem saída. Enquanto o resultado principal da primeira fase fora o de que todos os fatos experimentais relevantes estavam dispostos sobre a mesa, o resultado da segunda fase era que, de uma certa maneira, o mesmo se poderia dizer com relação aos *insights* teóricos para uma eletrodinâmica – e estes levavam por um caminho que não passava pela teoria de Lorentz.

## 6. A fase da reflexão

No centro da terceira e decisiva fase do nascimento da teoria da relatividade especial se encontra a reinterpretação da teoria de Lorentz por Einstein. Tecnicamente não havia praticamente nada em que essa teoria pudesse ser melhorada. Até mesmo aquelas transformações com as quais os fenômenos em um referencial em movimento podem ser deduzidos a partir das conhecidas leis num referencial em repouso já tinham sido obtidas por Lorentz, primeiramente em 1895 de maneira aproximada e então em 1899 de maneira exata. Em 1904 Lorentz finalmente apresentou uma teoria sistemática e abrangente e pôde, com a ajuda de suas transformações, explicar em princípio todos os fenômenos da eletrodinâmica de corpos em movimento [21]. O matemático francês Henri Poincaré chamou estas, que se tornariam posteriormente uma das peças centrais da teoria da relatividade, de transformações de Lorentz. Em sua formulação, a teoria de Lorentz abrangia uma série de estranhos fenômenos, pelos quais a teoria da relatividade é hoje conhecida: a contração

do comprimento bem como a retardação de processos como função do sistema inercial do observador, e até mesmo o aumento da massa de um corpo com sua velocidade.

No entanto, Lorentz associou a suas transformações uma interpretação que difere fundamentalmente daquela da futura teoria da relatividade. Para Lorentz não se tratavam de transformações que tinham por objetivo garantir que as leis que valessem num referencial fixo também valessem num que se movesse com velocidade uniforme, fazendo assim justiça ao princípio da relatividade clássica. Para ele valiam ainda, acima de tudo, as transformações de Galileu da física clássica, que porém só garantem o princípio da relatividade na mecânica. As transformações criadas por Lorentz eram, para ele, de maneira alguma uma alternativa às transformações clássicas, mas um complemento a estas. Elas pertenciam primordialmente à eletrodinâmica e eram parte de um teorema por ele chamado teorema dos estados correspondentes, o qual permitia, através da introdução de certas grandezas auxiliares, a predição de processos eletrodinâmicos para corpos em movimento. Segundo Lorentz, estes processos estavam sujeitos a leis completamente diferentes daquelas que os mesmos processos obedeciam num éter em repouso. Através da introdução de suas sofisticadas grandezas auxiliares lhe foi possível porém achar uma explicação do motivo pelo qual estas outras leis não se refletiam em fenômenos observáveis, como por exemplo no experimento de Michelson e Morley. Lorentz considerava que estas grandezas auxiliares – como por exemplo o tempo local – não eram diretamente observáveis.

A teoria de Lorentz se sobressai não apenas pelo seu excepcional sucesso empírico com também pela sua complexidade e argumentação labiríntica, razões de seu sucesso. Ela propiciou assim um ponto de partida natural para um processo de reflexão, que sempre se observa em momentos decisivos da história da ciência, e que forma o cerne da terceira fase do desenvolvimento de Einstein. Este processo permite que elementos periféricos de uma estrutura de conhecimento complexa e marcada por tensões internas se tornem pontos de partida de uma reconstrução que, embora levando ao estabelecimento de uma nova e ampla estrutura, ainda está assentada sobre fundamentos já antes disponíveis – de maneira análoga a que vemos na história da arquitetura ou das construções. Usando uma metáfora histórico-filosófica pode-se caracterizar este processo como um “colocar de cabeça para baixo” ou – numa metáfora histórico-científica – podemos descrevê-lo como um processo coperniano, pois processos de ruptura conceitual se completam de maneira semelhante à revolução de Copérnico, que também criou um novo sistema de mundo a partir da colocação, no centro, de uma estrela antes periférica, o Sol, mas que para isto fez uso do complexo maquinário da astronomia já então desenvolvido ao invés de iniciar por uma *tabula*

rasa.

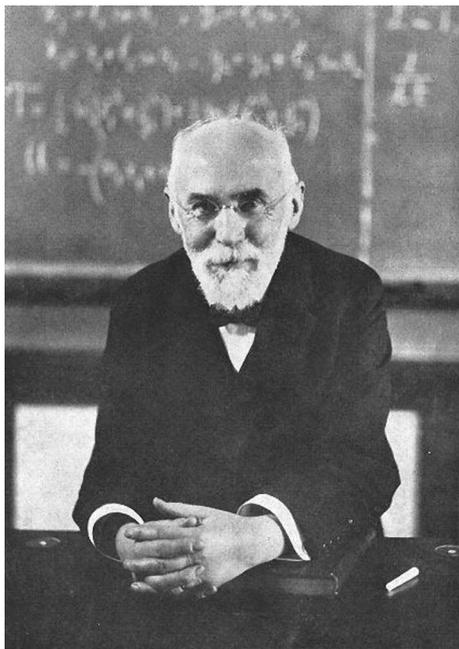


Figura 7 - O físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) criou uma teoria tecnicamente complexa, que explicava praticamente todos os fenômenos ópticos e eletromagnéticos. Sua reinterpretação em termos de um “processo coperniano” foi a chave para a teoria da relatividade de 1905 (Foto: Museu Boerhaave, Leiden).

Para a teoria lorentziana o éter era um conceito central e as novas variáveis para o tempo e o espaço apenas grandezas auxiliares. Na teoria da relatividade, ao contrário, o éter não desempenha qualquer papel, ao passo que as variáveis auxiliares de Lorentz tornam-se os novos e fundamentais conceitos de tempo e espaço. O maquinário dedutivo, em particular as transformações de Lorentz entre sistemas inerciais em movimento uniforme relativo, permaneceram intocados por esta mudança do centro conceitual. Embora para uma geração mais jovem seja mais fácil completar este processo de reflexão, não necessariamente o processo está ligado a uma mudança de gerações. Em todo caso ele estabelece uma mudança de perspectiva. Einstein tinha a seu dispor tal perspectiva nova, principalmente pelo seu envolvimento com os problemas acima mencionados da fronteira da física clássica. Pelo seu trabalho com o problema da radiação térmica ele chegou neste caso à conclusão de que a hipótese de um éter contínuo era incondizente com a existência de um equilíbrio térmico da radiação. Este *insight* teve duas consequências revolucionárias: ele legitimou uma teoria quântica da luz, inicialmente desenvolvida por Einstein de forma apenas especulativa e transformou sua negação do conceito do éter, a princípio também especulativa, em uma condição indispensável do seu modo de pensar. A teoria da relatividade especial de 1905 nasceu do encontro dos pontos de vista únicos de Einstein acerca da crise dos fundamentos da física clássica com a abrangente

resposta de Lorentz ao problema da eletrodinâmica de corpos em movimento.

Pela perspectiva de Einstein a situação era muito mais crítica que pela de Lorentz. Enquanto para Einstein o éter como portador dos fenômenos eletromagnéticos não era mais uma questão a ser tratada, faltava a ele ainda - ao contrário de Lorentz - não apenas uma base para a interpretação física das grandezas auxiliares de Lorentz como também a fundamentação da premissa decisiva de que a velocidade da luz no éter era uma constante. Por outro lado a aberração e o experimento de Fizeau legitimavam o uso de um tempo local, introduzido por Lorentz, como algo fundamentalmente correto. A perspectiva einsteiniana deslocou justamente para o centro da sua atenção estes elementos que guardavam a chave para uma solução final. Diferentemente de Lorentz, para Einstein o princípio da relatividade e a constância da velocidade da luz eram igualmente importantes, embora não fossem naquele momento reconciliáveis - ao menos enquanto se tomasse a adição clássica de velocidades como base da teoria.

Os elementos da teoria de Lorentz que se mostraram particularmente problemáticos tinham em comum o fato de terem uma origem cinemática. Do ponto de vista de Einstein isso torna uma mudança de nível plausível - da eletrodinâmica para a cinemática. Quais eram assim as implicações da eletrodinâmica de Lorentz no comportamento cinemático de corpos em movimento? Evidentemente dela poderia se concluir que corpos e processos em um referencial em movimento uniforme comportar-se-iam de maneira diferente de quando estivessem em repouso. Se fosse possível explicar este comportamento estranho não mais em nível da eletrodinâmica mas sim da cinemática, talvez estivesse aí a chave para o problema.

Até este ponto praticamente cada etapa do raciocínio de Einstein foi resultado obrigatório do encontro de seu ponto de vista especial com a teoria eletrodinâmica de Lorentz. Mas agora uma fase de reflexão que fosse substancialmente além desta teoria se fazia necessária ou, melhor dizendo, retrocedesse para antes dela. Pois agora trata-se de lidar com a questão de como é possível, em primeiro lugar, verificar este comportamento estranho de corpos e processos em referências móveis. “Como se comportam então escalas e relógios em tais sistemas?”. “O que significa exatamente quando se diz que um evento acontece simultaneamente a outro evento ou como se pode determinar isto?”. É bem possível que tenha sido Besso quem tenha feito essas astutas perguntas de criança para Einstein, naquela manhã de maio de 1905.

Tais perguntas permitiram a Einstein reconhecer no problema da simultaneidade de eventos em dois sistemas em movimento relativo o passo fundamental para a solução de seu problema. Estas perguntas encontraram ressonância em suas leituras sobre filosofia, em particular nos escritos de David Hume e Ernst Mach,

os quais ele havia anteriormente estudado de maneira intensiva com seus amigos da Academia Olímpia, um grupo de leitura e discussão fundado por Einstein em Berna. Do pano de fundo destas leituras torna-se claro que o conceito de tempo não é uma coisa que possa ser vista com algo pré-estabelecido, mas é antes de tudo uma construção complexa - e a determinação da simultaneidade de eventos em diferentes lugares requer uma definição baseada num método prático. O método descoberto por Einstein - a sincronização por sinais de luz de relógios espacialmente separados - tinham inicialmente pouco a ver com o complicado problema físico com o qual ele se deparava. Ele é antes de tudo um método coerente com nossa visão diária de medidas de tempo e de intervalos temporais e era até uma prática comumente utilizada então, como Einstein bem o sabia de suas leituras de revistas de popularização da ciência [22].

O recurso a este método prático expõe uma certa arbitrariedade na determinação da simultaneidade em referenciais que se movem uniformemente entre si. Pois o método pensado por Einstein valia inicialmente apenas dentro de um referencial - estivesse ele parado ou se movendo. Partindo deste *background* torna-se assim pela primeira vez concebível pensar até que ponto o comportamento de relógios e réguas poderia depender do movimento relativo de um referencial, como parecia dizer a teoria de Lorentz.

A arbitrariedade na relação entre as definições de tempo em diferentes referenciais, da qual Einstein se tornou desta maneira ciente, poderia ser dirimida apenas de duas maneiras. Poder-se-ia introduzir a hipótese que a determinação da simultaneidade pelo método de Einstein deveria levar ao mesmo resultado, independentemente do estado cinemático do referencial - e assim concluir pelo caráter absoluto do tempo, como na física clássica - ou poder-se-ia introduzir a hipótese que não o tempo, mas a velocidade da luz, independentemente do movimento do referencial, deveria permanecer a mesma, uma hipótese a qual Einstein privilegiou em função do sucesso da eletrodinâmica de Lorentz, apesar de suas consequências não intuitivas. Pois, aceitando esta última hipótese, tem-se como resultado a relatividade da simultaneidade como função do movimento do referencial e todas as consequências intrigantes da teoria especial da relatividade.

## 7. O início de uma revolução

A partir do pano de fundo desta reconstrução pode ser que, ao final, a conversa de Einstein com Besso em maio de 1905 tenha sido realmente o momento decisivo da criação da teoria especial da relatividade. Ela pode ter ajudado Einstein nas reflexões cruciais pelas quais ele conseguiu unificar dois níveis do conhecimento - o teórico e o prático - de uma forma inovadora. Pois como pudemos ver suas cogitações sobre os funda-

mentos do conceito de tempo ligaram sim um modelo fundeado no conhecimento prático sobre a medida de tempo em diferentes locais com uma previsão teórica sobre a propagação da luz, cujas bases se encontravam em estudos especializados da eletrodinâmica de corpos em movimento. Foi apenas depois desta ligação que estes estudos retroagiram sobre nosso conceito de tempo e espaço e os trabalhos de Einstein de 1905 tornaram-se o ponto de partida de uma revolução científica que não se restringiu a sua área específica nas ciências. A emergência desta revolução a partir da interação entre dois níveis de conhecimento explica também sua especificidade histórica, ou seja a razão pela qual a reflexão sobre o tempo por um Hume ou até mesmo um Aristóteles não levou ao reconhecimento da relatividade da simultaneidade. Pois o postulado da constância da velocidade da luz, sobre o qual está baseado o conceito de tempo einsteniano, foi fruto de um desenvolvimento de longa duração dos sistemas de conhecimento da física clássica e representam a quintessência da eletrodinâmica do século XIX e de seus problemas na fronteira com a mecânica.

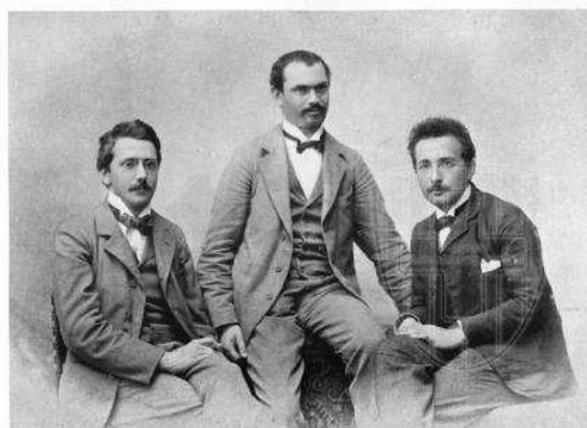


Figura 8 - A "Academia Olímpia" - Conrad Habicht, Maurice Solovine e Albert Einstein liam conjuntamente literatura de cunho primordialmente científico e temática ultradisciplinar, como Mach, Hume, Spinoza, Helmholtz e Poincaré, mas também Sófocles, Dickens e Cervantes (Foto: arquivo da ETH de Zurique).

\*

## 8. Nota do Tradutor

O tradutor gostaria de expressar seu agradecimento ao autor pelo apoio à iniciativa desta tradução e a disponibilização de seu trabalho na rede mundial de computadores, tornando-o assim acessível a um amplo público de língua portuguesa. Os artigos [23, 24, 25, 26, 27], constantes ao final da bibliografia, são aqueles não explicitamente citados ao longo do texto mas que serviram, nas palavras do autor, de importante estímulo ao seu trabalho.

## Referências

- [1] Programa no sítio [www.physik.uni-ulm.de/dpg-tagung2004/veinstein.html](http://www.physik.uni-ulm.de/dpg-tagung2004/veinstein.html)
- [2] Citações referem-se a J. Stachel *et al.* (eds.), *Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE), v. 1: *The Early Years 1897-1902*; v. 2: *The Swiss Years: Writings 1900-1909* (Princeton University Press, Princeton, 1987 e 1989).
- [3] Palestra de Einstein em Kyoto no dia 14 de dezembro de 1922, *cf.* também a nota editorial em CPAE 2, p. 253-274.
- [4] A. Einstein para Mileva Marić, 30 de agosto ou 6 de setembro de 1900, em: CPAE 1, Doc. 74, p. 258; *cf.* J. Renn e R. Schulmann (eds.), *Albert Einstein/Mileva Marić. As cartas de amor 1897-1903* (Piper, Munique, 1994).
- [5] Michelle Besso para Aurel Stodola, 22 de agosto de 1941, Biblioteca Central ETH Zurich, Hs. 496:5.
- [6] A. Einstein, *Annalen der Physik* **17** (1905). Em: CPAE 2, Doc. 23, p. 275-317.
- [7] A. Einstein, Verão(?) 1895, em: CPAE 1, Doc. 5, p. 6-9.
- [8] A. Einstein, *Notas Autobiográficas* (Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1982).
- [9] A. Einstein, *Annalen der Physik* **17** (1905), em: CPAE 2, Doc. 14, p. 149-169.
- [10] A. Einstein, *Annalen der Physik* **17** (1905), em: CPAE 2, Doc. 16, p. 223-236.
- [11] Albert Einstein para Julia Niggli, 28 de julho de 1899, em: CPAE 1, Doc. 48, p. 218-219. Veja também de Albert Einstein para Mileva Marić, 10(?) de agosto de 1899, em: CPAE 1, Doc. 52, p. 225-227.
- [12] Albert Einstein para Mileva Marić, 28(?) de setembro de 1899, em: CPAE 1, Doc. 57, p. 233.
- [13] Albert Einstein para Mileva Marić, 10 de setembro de 1899, em: CPAE 1, Doc. 54, p. 229-231.
- [14] Também para o que segue M. Janssen e J. Stachel, *The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies*, em: John Stachel Going Critical, Kluwer, Dordrecht (no prelo).
- [15] “Mas também... o fenômeno da aberração levou-me...” Mensagem de Albert Einstein para R.S. Shankland, em: CPAE 2, p. 253-274.
- [16] Albert Einstein para Mileva Marić, 10(?) de agosto de 1899, em: CPAE 1, Doc. 52, p. 226.
- [17] W. Wien, *Ann. d. Phys. u. Chem.* **65** (1898), n. 3 (Beilage), p. xvii.
- [18] Albert Einstein para Marcel Grossmann, 14 de abril de 1901, em: CPAE 1, Doc. 100, p. 290-291. Veja também J. Renn, *Einstein’s Controversy with Drude and the Origin of Statistical Mechanics*, em: D. Howard and J. Stachel (eds.), *Einstein: The Formative Years 1897-1909* (Birkhäuser, Boston 2000), p. 107-157.
- [19] B.R. Wheaton, *The Tiger and the Shark, Empirical Roots of Wave-Particle Dualism* (Cambridge University Press, Cambridge 1983), p. 17.
- [20] J. Renn, *Einstein as a Disciple of Galileo: A Comparative Study of Concept Development in Physics*, em: M. Beller, R.S. Cohen and J. Renn (eds.), *Einstein in Context* (Science in Context, v. 6), Cambridge University Press, Cambridge, 1993, p. 311-341. Veja também J. Büttner, J. Renn and M. Schemmel, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* **34**, 37 (2003).
- [21] M. Janssen e J. Stachel, *The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies*, em: John Stachel Going Critical, Kluwer, Dordrecht (no prelo). Veja também M. Janssen, PhD Dissertation, Univ. of Pittsburgh (1995)
- [22] A. Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher (Livros Populares de Ciências Naturais)* (Wohlfelie Gesamt-Ausgabe, Bd. 4, Duncker, Berlin, 1869), 3a. ed., p. 88-98. Bernstein descreve a sincronização eletromagnética de relógios através de um “Relógio Mestre” que envia sinais elétricos (p. 91), trazendo à tona a questão da simultaneidade de acontecimentos em locais diferentes (em particular p. 94 e p. 96). Einstein leu os livros populares de Bernstein entre os anos de 1892 e 1894: CPAE 1, p. lxi-lxiii, em particular Nota 54.
- [23] M. Wertheimer, *Produktives Denken* (Kramer, Frankfurt/Main, 1957).
- [24] R. Rynasiewicz, *The Construction of the Special Theory: Some Questions and Considerations*, em: D. Howard and J. Stachel (eds.), *Einstein - The Formative Years, 1879-1909* (Einstein Studies v. 8), (Birkhäuser, Boston, 2000), p. 159-202.
- [25] J. Stachel, *What Song the Syrens Sang: How Did Einstein Discover Special Relativity?*, em: John Stachel, *Einstein from “B” to “Z”* (Einstein Studies v. 9) (Birkhäuser, Boston, 2002), p. 157-171.
- [26] P. Gallison, *Einstein’s Clocks, Poincaré’s Maps. Empires of Time* (W.W. Norton and Co., New York, 2003).
- [27] J.D. Norton, *Einstein’s Investigation of Galilean Covariant Electrodynamics prior to 1905* (preprint).