

A visão eletromagnética e a relatividade: I. A gênese das teorias de Lorentz e Einstein.

Alberto Villani^{1,*}

¹*Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*

Este trabalho pretende utilizar os resultados das pesquisas baseadas num enfoque mais fenomenológico, onde é possível não somente perceber com maior clareza o significado das teorias de Lorentz e Einstein no contexto científico da época, mas também caracterizar de maneira singular a interação entre os vários pesquisadores envolvidos com estas teorias, para mostrar que ambas as teorias, do Elétron e da Relatividade, podem ser consideradas como “revoluções científicas”, na medida que envolvem a proposta de uma visão de mundo diferente da visão mecanicista que dominava desde o triunfo da mecânica newtoniana e o sucesso da reformulação lagrangiana e que os pesquisadores que se envolveram com o “programa” eletromagnético e relativístico, colaborando para seu desenvolvimento, não necessariamente estavam comprometidos com o “paradigma” correspondente, gerando situações dificilmente esquematizáveis no contexto das “reconstruções” racionais. Neste trabalho descreveremos sinteticamente a gênese da Teoria do Elétron de Lorentz e da Teoria da Relatividade de Einstein mediante as teses de que a primeira foi o passo final de uma grande revolução científica, iniciada antes da metade do século XIX, que levou a Física a abandonar o mecanicismo e a elaborar uma visão de mundo baseada nas propriedades do éter eletromagnético e que a segunda nasceu como um primeiro passo após o questionamento da visão eletromagnética rumo a elaboração de uma nova teoria da matéria capaz de superar o dualismo campo-partícula.

Publicado originalmente em Revista de Ensino de Física, volume 7, número 1, Junho de 1985.

CONTEÚDO

| | |
|---|---|
| I. Introdução | 1 |
| II. A gênese das teorias do elétron e da relatividade | 2 |
| II.1. A revolução eletromagnética | 2 |
| II.1.1. Os primeiros golpes ao mecanicismo | 2 |
| II.1.2. A teoria do elétron de Lorentz | 3 |
| II.1.3. As dificuldades com a visão eletromagnética | 6 |
| II.2. A gênese da teoria de Einstein | 6 |
| II.2.1. A nova teoria da luz | 7 |
| II.2.2. A proposição da teoria da relatividade | 8 |
| II.3. Conclusões | 9 |
| Referências | 9 |

I. INTRODUÇÃO

As origens da Teoria da Relatividade (TR) têm sido objeto de numerosas análises históricas e filosóficas, não somente pela importância e atualidade da teoria, mas também pela abundância de dados históricos disponíveis, que tem permitido enfoques e interpretações diferentes.

Um ponto fundamental que tem chamado atenção de historiadores e epistemólogos é a relação entre a TR e a Teoria do Elétron (TE) de Lorentz. As análises têm oscilado entre dois extremos, sendo que de um lado estariam as que sustentam o aspecto da continuidade entre as duas teorias e, de outro lado, as que focalizam as diferenças entre as mesmas, chegando a privilegiar a TR como uma Revolução Científica.

No primeiro caso, a tese fundamental¹ é que a TR representa uma síntese interessante das idéias de Lorentz e Poincaré com uma contribuição original de Einstein constituída pela eliminação do éter. No segundo caso, a tese básica² é que a TR constituiu um novo paradigma [4] ou um novo programa de pesquisa [5] com um conteúdo conceitual e metodológico inteiramente novo.

Entretanto, a abundância dos dados históricos, a complexidade do problema e a riqueza cultural do período analisado – o início do século XX – têm permitido e estimulado um enfoque mais fenomenológico por parte de alguns historiadores³; neste enfoque é possível não somente perceber com maior clareza o significado das teorias de Lorentz e Einstein no contexto científico da época, mas também caracterizar de maneira singular a interação entre os vários pesquisadores envolvidos com estas teorias.

Este trabalho pretende utilizar os resultados das pesquisas baseadas neste enfoque [mais fenomenológico], para mostrar:

1. Ambas as teorias, do Elétron e da Relatividade, podem ser consideradas como “revoluções científicas”, na medida que envolvem a proposta de uma visão de mundo diferente da visão mecanicista que dominava desde o triunfo da mecânica newtoniana e o sucesso da reformulação lagrangiana.
2. Os pesquisadores que se envolveram com o “programa” eletromagnético e relativístico, colaborando para seu

¹ Os adeptos mais convictos dessa tese são Whittaker [1] e Keswani [2, 3]

² Inúmeros são os autores que compartilham esta tese, às vezes por razões diferentes. Os mais conhecidos são G. Holton, S. Goldberg, T. Hirose, E. Zahar, K. Schaffner, G. Battimelli e A. L. Miller.

³ Partilham desse enfoque: McCormach, Brouwer, Illy e, em parte, Hirose.

* avillani@if.usp.br

desenvolvimento, não necessariamente estavam comprometidos com o “paradigma” correspondente, gerando situações dificilmente esquematizáveis no contexto das “reconstruções” racionais [6].

A abordagem destes dois pontos constituirá as duas partes deste trabalho; na primeira analisaremos a formação das idéias eletromagnéticas e relativísticas, dando um destaque especial à apresentação da visão eletromagnética (EM) da natureza; na segunda parte abordaremos o desenvolvimento dos programas EM e relativístico, dando uma ênfase especial à interação entre os vários pesquisadores e a oscilação dos mesmos entre as visões eletromagnéticas, quântica e relativística da natureza. Na tempestade conceitual e experimental das primeiras décadas do século XX, no qual, além da Teoria do Elétron e da Relatividade, se colocavam as bases para a Teoria Quântica e a Relatividade Geral, e o não comprometimento com uma visão de mundo talvez fosse um auxílio para a sobrevivência científica.

A abordagem do primeiro ponto será feita analisando principalmente o período entre 1892 e 1906, período no qual a Teoria do Elétron chega ao máximo de seu apogeu, e a Teoria da Relatividade dá os primeiros passos junto com a Teoria Quântica da Radiação. O segundo ponto será discutido focalizando o período histórico que vai de 1907 até 1920, no qual as várias tentativas de encontrar uma Teoria da Gravitação mais precisa do que a de Newton levam à Teoria da Relatividade Geral e o modelo quântico da matéria se afirma com segurança, ao passo que as tentativas de ampliar a abrangência da visão eletromagnética, apesar de conduzidas de várias maneiras e por vários pesquisadores, fracassam, levando a comunidade científica a abandonar o correspondente “programa” de pesquisa.

II. A GÊNESE DAS TEORIAS DO ELÉTRON E DA RELATIVIDADE

Nesta primeira parte do nosso trabalho tentaremos descrever sinteticamente a gênese da Teoria do Elétron (TE) de Lorentz e da Teoria da Relatividade (TR) de Einstein mediante a apresentação das seguintes teses:

1. A TE foi o passo final de uma grande revolução científica, iniciada antes da metade do século XIX, que levou a Física a abandonar o mecanicismo e a elaborar uma visão de mundo baseada nas propriedades do éter eletromagnético, e definida pelas equações do campo EM⁴.
2. A TR nasceu como um primeiro passo após o questionamento da visão EM, incapaz de explicar a radiação do corpo negro e de satisfazer a critérios de perfeição, rumo a elaboração de uma nova teoria da matéria capaz de superar o dualismo campo-partícula⁵.

⁴ Na exposição dessa tese seguiremos de perto o trabalho de R. McCormach [7].

⁵ Esta tese é defendida principalmente por McCormach [8] e Klein [9].

II.1. A revolução eletromagnética

No final do século XIX a visão mecanicista da natureza, segundo a qual os últimos constituintes da realidade física eram massas inerciais, discretas ou contínuas, que se movimentavam segundo as leis da mecânica, sob influência de forças de contato ou à distância, estava sendo rapidamente suplantada pela visão eletromagnética da natureza. Segundo esta nova visão, as únicas realidades físicas eram o éter eletromagnético e as cargas elétricas, e as leis da natureza eram redutíveis às leis do campo eletromagnético, a partir das quais tentava-se estabelecer as propriedades do éter e de sua interação com as cargas. A versão mais radical desta maneira de conceber a natureza chegava a identificar as partículas carregadas como estruturas em movimento ou singularidades do éter, apontando então este último e as suas perturbações como a realidade fundamental de toda a natureza. Tiveram grandes papéis no desenvolvimento da visão EM os cientistas Lorentz e Larmor, com suas teorias eletrônicas da matéria. A teoria de Lorentz é a mais conhecida, a mais clara, a mais analisada e a que exerceu maior influência na comunidade científica, e por isso nossa exposição versará principalmente sobre ela.

Na execução do projeto de tornar a teoria EM teoria básica da Física, sobretudo na solução dos problemas relativos à influência do movimento absoluto, Lorentz e colaboradores afastaram-se progressivamente da visão mecanicista newtoniana, completando um processo que tinha começado bem antes. Nossa exposição da gênese e desenvolvimento da Teoria do Elétron será feita em três etapas: em primeiro lugar, esboçaremos um quadro sintético apontando para os primeiros golpes contra a visão mecanicista; em seguida, mostraremos como a Teoria do Elétron constitui o coroamento deste processo; finalmente, na terceira etapa, apresentaremos as dificuldades que a teoria encontrou para ser mais abrangente e se tornar uma teoria microscópica da matéria.

II.1.1. Os primeiros golpes ao mecanicismo

Uma exposição sintética do progressivo afastamento da visão mecanicista da natureza pode ser realizada seguindo duas vertentes fundamentais: de um lado, ao nível das idéias físicas, a modificação ou o abandono de algumas leis da mecânica newtoniana; de outro lado, ao nível da constituição do éter, o abandono do modelo no qual o éter seria formado de partículas finíssimas interagindo por contato ou a curta distância, e a adoção de um éter contínuo, que preencheria todo o espaço, permitindo a transição contínua das forças eletromagnéticas e “moleculares”.

O começo da Revolução Eletromagnética pode ser localizado na primeira metade do século XIX, com a proposta, sobretudo por parte dos cientistas da escola de Cambridge, de um éter EM com características diferentes da matéria ordinária. Neste éter, abandonava-se a composição “granular” ou molecular da matéria, e assumia-se uma constituição contínua, pensada como o limite de um sólido ideal. Esta continuidade permitia que, de um lado, o meio pudesse transmitir ondas transversais luminosas com velocidade altíssima, de-

vendo então possuir grande rigidez, e de outro lado pudesse ser atravessado facilmente pelos planetas e pelos corpos celestes, sem que se detectasse nenhum “vento” de éter, devendo então possuir extrema fluidez. Neste novo modelo temos então o abandono das propriedades da matéria comum, na qual rigidez e fluidez se opõem, e a adoção de novas propriedades do sólido contínuo ideal, que se fundem e se identificam com as do fluido ideal. Entretanto, a fusão destas propriedades, aparentemente ditada por razões experimentais, não é sem consequências teóricas de longo alcance, pois marca o início da especulação sobre as leis que regulam o comportamento de tal meio ideal.

Uma contribuição paralela fundamental, sempre no sentido de propor um meio diferente da matéria ordinária, foi a descoberta de Faraday de que o espaço privado de matéria ordinária seria ainda capaz de ação física elétrica e magnética, transmitindo ondas e induzindo corrente elétrica a partir de um ímã em movimento. Após uma primeira tentativa de explicar estas ações mediante um éter composto de partículas contíguas (próximas umas das outras) interagindo à distância, ele foi obrigado a procurar uma alternativa para este modelo, pois nele o vácuo agiria como condutor e isolante. Estimulado pelas pesquisas experimentais, que o conduziram à descoberta do diamagnetismo e da rotação óptica, e confortado pelas discussões iluminantes bem como pela correspondência frequente com H. Thomson (Lord Kelvin), que o ajudara a desenvolver a metodologia das “analogias físicas” [10] e a elaborar e aprofundar a idéia das linhas de força, Faraday chegou à sua nova concepção de éter. Este seria um meio contínuo, que permearia todo o espaço e todo o corpo, cheio de linhas de força elétricas e magnéticas, as quais, com suas vibrações, transmitiriam as ações eletromagnéticas e luminosas [11].

Ambas as concepções, do éter sólido elástico e do éter cheio de linhas de força, se defrontaram com o problema de representar a transmissão da ação através de um meio não-material em termos diferentes dos utilizados na mecânica, dominada pelas idéias de partículas e de força de contato e gravitacional, e de explicar a relação e o tipo de interação entre éter e matéria ordinária. Durante meio século de esforços foram produzidos o modelo de Thomson do átomo como vórtice num *plenum* etéreo, a teoria eletromagnética de Maxwell e suas reflexões sobre a natureza do éter e da matéria, e finalmente em 1893, após várias concepções alternativas, a síntese de Larmor das teorias óptica, eletromagnética e atômica na primeira teoria eletrônica da matéria [11]: nela a matéria era pensada como uma perturbação dinâmica singular no éter, a carga elétrica como uma tensão nesta perturbação, e a massa como produto da interação éter-carga elétrica⁶.

Do ponto de vista do afastamento das leis newtonianas, devemos registrar o questionamento de Laplace da lei da

gravitação universal no começo do século XIX ao propor um modelo de transmissões da força gravitacional através de um fluido “gravífico”, que se propagaria com velocidade milhões de vezes superior à da luz, e introduziria na fórmula de Newton um efeito de aberração semelhante ao da luz, porém muito mais reduzido e de difícil verificação experimental. A idéia de Laplace não foi aperfeiçoada pelos seus sucessores, mas deixou como herança a possibilidade de modificação das leis newtonianas.

O passo significativo neste sentido foi dado em 1846 por Weber, quando ele propôs uma teoria da eletricidade baseada numa força elétrica entre as cargas, força esta dependente não só da distância entre as cargas, como também de sua velocidade e aceleração. Sua fórmula foi sucessivamente modificada por Riemann, Clausius e Neumann, sempre no sentido de afastamento do mundo clássico newtoniano dominado por forças independentes do movimento. Entre 1865 e 1880 são propostos: a violação do princípio de ação e reação nos fenômenos eletromagnéticos, a propagação das forças com velocidade finita, a conservação da energia elétrica, o limite superior na velocidade das partículas e a variação da massa com a velocidade.

Neste mesmo período temos também o início da utilização simétrica das coordenadas espaço-temporais, vislumbrando o abandono da peculiaridade da coordenada temporal.

O impacto das idéias de Weber foi grande também para quem trabalhava em gravitação; a utilização por parte de Tisserand (1872) de uma fórmula gravitacional análoga à lei da ação eletrodinâmica weberiana [12], e envolvendo termos corretivos proporcionais à velocidade e à aceleração, encontrou grande incentivo, pois conseguia explicar uma parte da anomalia observada no movimento do periélio de Mercúrio. Em seguida, a utilização da fórmula de Clausius melhorou ainda mais o acordo com os dados experimentais.

Todas estas idéias eram um sintoma de uma tendência geral que antecipava uma concepção diferente da newtoniana; entretanto, boa parte delas somente se tornaria um conjunto coerente e unitário na Teoria do Elétron e da Relatividade, na opinião de McCormach [7, pág. 472].

II.1.2. A teoria do elétron de Lorentz

A Teoria do Elétron de Lorentz constitui o coroamento de um grande esforço científico de síntese entre a teoria eletromagnética de Maxwell e a concepção atômica da matéria. O resultado deste esforço, como notamos anteriormente, foi a concretização de uma nova visão de mundo diferente da mecanicista. Isso aparece com evidência ao analisarmos as várias formulações da Teoria do Elétron, de 1892 até 1906: nelas encontramos o progressivo desaparecimento das noções mecânicas, como fundamentais, substituídas pelas noções eletromagnéticas.

Na primeira versão de sua teoria, em 1892, Lorentz tenta combinar a ação contínua através do éter com a concepção atômica da eletricidade. A sua teoria ainda se apresenta como uma mistura: de um lado, tenta uma explicação mecânica das leis do eletromagnetismo, mas, de outro lado,

⁶ Para dar maior credibilidade à sua teoria, Larmor achou necessário acompanhá-la com um modelo mecânico que demonstrasse a possibilidade da existência da construção mental elaborada. Ironicamente o modelo induziu alguns físicos do Continente a considerar a sua teoria do éter como mecânica numa época na qual a visão mecanicista era destinada ao esquecimento; por isso foi abandonada sua concepção de átomo e de campo [11].

envolve elementos não mecânicos como a natureza última da carga e do éter e a propagação da ação eletromagnética com velocidade finita, com conseqüente abandono da ação à distância [e instantânea].

A teoria de 1892 se fundamenta em seis hipóteses, suficientes para uma dedução mecanicista [7, pág. 463] das equações de campo:

1. As partículas carregadas possuem massa inercial e peso, mantendo então sua submissão às leis da mecânica; no entanto, o éter que ocupa todo o espaço, interage unicamente com as cargas e não é afetado pelo movimento da matéria. O éter pode ter movimentos internos que o caracterizam como substância essencialmente dinâmica; causas externas (cargas) podem modificar seu estado, inclusive no interior das partículas, introduzindo um deslocamento elétrico \vec{D} e uma força magnética \vec{H} .
2. A energia potencial de um sistema eletromagnético é constituída pela energia elétrica, identificada a partir do deslocamento elétrico. Este último satisfaz a equação de Maxwell $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$, onde ρ é a densidade de carga em cada ponto do éter.
3. As partículas carregadas se comportam como corpos rígidos, mantendo a mesma densidade ρ independente do movimento.
4. A corrente elétrica total envolve o transporte de carga elétrica e a corrente de deslocamento, de maneira que a eletricidade possa ser pensada como um fluido incompressível com uma correspondente equação de continuidade.
5. A energia cinética é constituída pela energia magnética, com a força magnética obedecendo as equações de Maxwell correspondentes.
6. Finalmente, a localização de cada ponto do éter que participa do movimento de um sistema eletromagnético é determinada pela posição de todas as partículas carregadas, e pelos valores do deslocamento elétrico \vec{D} em todos os pontos do éter. No entanto, o movimento de cada ponto do éter não é determinado unicamente por esta hipótese; uma generalização da análise de Maxwell aplicada à corrente em três dimensões a partir dos princípios mecânicos de d'Alambert, permite a dedução da equação de movimento de cada ponto do éter:

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (1)$$

Também a força do éter sobre as partículas carregadas pode ser deduzida por raciocínio “mecânico” a partir das hipóteses: a “força de Lorentz” depende do deslocamento elétrico criado pelas outras partículas carregadas, da força magnética e do movimento da partícula em relação ao éter.

Além dessas hipóteses, com as quais consegue explicar os fenômenos da aberração estelar e do arrastamento parcial dos

raios luminosos num meio transparente em movimento, Lorentz, para poder dar conta do resultado do experimento de Michelson-Morley, introduz a hipótese da contração dos corpos na direção do movimento. A hipótese, na opinião de Lorentz, não é absurda, se as forças moleculares, que são responsáveis pelo tamanho e pela forma dos corpos, se propagarem através do éter com velocidade finita, de maneira análoga às forças elétricas. Com essa hipótese, a Teoria do Elétron, pela primeira vez, envolve também o mundo da física não eletromagnética e, com uma conseqüência totalmente estranha, a visão mecânica da natureza.

No trabalho de 1895 – sobre a influência do movimento da Terra nos fenômenos elétricos e ópticos – Lorentz dá mais alguns passos na direção da emancipação da visão mecanicista. Em primeiro lugar, abandona a derivação mecânica das equações básicas do eletromagnetismo considerando-as como hipóteses suficientemente estabelecidas e auto-consistentes. Uma possível razão disso foi a percepção de que a sua teoria violava a terceira lei de Newton: se, de um lado, o éter interagindo com suas cargas exercia força sobre as partículas, de outro lado, sendo estacionário, não podia sofrer o efeito de nenhuma força.

A constatação é importante, pois é a primeira vez que em um conflito entre princípios eletromagnéticos e mecânicos, estes últimos são desprezados.

Neste mesmo tratado é introduzido o princípio dos Estados Correspondentes, segundo o qual existe uma relação entre os campos \vec{D} , \vec{H} e \vec{E} num dielétrico em repouso e os campos \vec{D}' , \vec{H}' e \vec{E}' no mesmo dielétrico em movimento: esta relação assegura a invariância das equações básicas de Maxwell de maneira que o movimento em relação ao éter não altera os fenômenos eletromagnéticos observados. Junto com o princípio dos Estados Correspondentes é introduzido o tempo “local”, cujo significado é difícil de entender no contexto da obra, mas que mais parece um conceito auxiliar do que a revisão da noção de tempo. Somente com a contribuição de Poincaré, o tempo “local” será associado à sincronização de relógios mediante pulsos de luz.

Finalmente é nesta obra que Lorentz incorpora à sua teoria, de forma definitiva, a analogia entre forças elétricas e moleculares. Após 1895 Lorentz continua sua pesquisa consolidando sua teoria no sentido de uma revisão da dinâmica clássica.

Em 1899 estende o princípio dos Estados Correspondentes a sistemas compostos de elétrons e de matéria ponderável, a hipótese das forças moleculares torna-se parte integrante da sua teoria de maneira a permitir a contração na direção do movimento para sistemas carregados e não-carregados; a transformação das forças é acompanhada da transformação de coordenadas, as que têm o seu nome, através das quais aparece não somente a contração das distâncias mas também o tempo local. Isso confirma o afastamento da mecânica newtoniana, mas também introduz um elemento de tensão na própria Teoria do Elétron: as forças eram calculadas através dos campos contínuos de Maxwell, porém aplicadas às partículas puntiformes, que obedeciam as leis da mecânica newtoniana. As implicações dessa ampla fundamentação se refletiam nas conseqüências não-newtonianas da síntese lorentziana entre campo e partícula. E como conseqüência das transformações

das forças e das coordenadas, as massas das partículas, derivadas da relação força-aceleração, tornavam-se dependentes da velocidade. Esta nova relação, que era previsível quando aplicada ao elétron (pois sua massa efetiva dependia do estado do éter que, por sua vez, dependia do movimento do elétron), tornava-se universal e levava à conclusão de que a mecânica newtoniana não se aplicava totalmente a nenhuma partícula.

A dependência do movimento da massa efetiva de uma esfera carregada era um resultado teórico conhecido, obtido a partir da aplicação das equações de Maxwell, mas o resultado de Lorentz era totalmente novo, pois estendia o efeito a qualquer massa e levava a uma nova fundamentação da dinâmica [7, pág. 473]. Por isso, resultados experimentais sobre esta relação massa-velocidade tornaram-se objeto de pesquisa intensa no começo do século XX, a partir dos experimentos com raios catódicos e do deslocamento das linhas espectrais do sódio num campo magnético; conhecer a fórmula exata da dependência entre a massa do elétron e sua velocidade era imperativo para poder resolver se existia ou não alguma massa newtoniana. Os resultados favoráveis do experimento de Kauffman e de outros experimentos encorajaram Lorentz a acreditar na validade de sua pesquisa; assim, a partir de 1900, ele começou a trabalhar com equações para elétrons individuais e não mais com equações para os corpos macroscópicos, considerados como uma média da ação de muitos elétrons. Consequentemente, a teoria atômica tornou-se o seu desafio pois era considerada como campo de ampliação natural da sua Teoria do Elétron. Se considerarmos que, para Lorentz as forças químicas tinham origem eletrônica, e as forças moleculares se propagavam como as elétricas, somente as forças gravitacionais estavam fora do alcance da Teoria do Elétron sobretudo porque os fatos astronômicos, interpretados no modelo do Laplace, pareciam indicar uma velocidade de propagação muito maior do que a da luz.

Em 1900, Lorentz conseguiu uma primeira vitória, na tentativa de incorporar as forças gravitacionais à sua teoria, sugerindo uma possível solução para o problema de sua velocidade de propagação. Desenvolvendo algumas idéias da teoria gravitacional de Mossotti, para o qual a gravitação era devida a pares de átomos elétricos opostos presentes no corpo ponderável, cuja atração era maior que a repulsão, Lorentz, substituindo os átomos por elétrons iguais e de sinal contrário que se interpenetravam, e introduzindo o éter como substrato para a propagação do campo dos elétrons, conseguiu provar que a presença de um outro par implicava numa atração recíproca entre os dois pares. O modelo representava um avanço: se o campo dos elétrons positivos e negativos fosse o eletromagnético usual, a gravitação seria reduzida às forças eletromagnéticas; se, ao contrário, o campo resultante fosse diferente, então sua maneira de propagação seria análoga à das forças eletromagnéticas. Em ambos os casos, a força de atração resultante seria coerente com a lei de Newton, quando não existisse movimento entre os corpos ponderáveis, e recuperaria termos dependentes da velocidade análogos aos das fórmulas de Weber, Riemann e Clausius, conseguindo explicar, em parte, o movimento secular do periélio de Mercúrio. De qualquer forma em seu modelo o éter era o substrato universal responsável pela propagação de todas as forças conhe-

cidas – eletromagnéticas, moleculares e gravitacionais – com velocidades não superiores à da luz, uma idéia realmente nova na tradição da mecânica.

A teoria de Lorentz, como já se observou, estava em desacordo com a terceira lei de Newton, e isso criava um problema. Na mecânica ordinária o princípio de ação e reação podia ser deduzido junto com a conservação da energia e com o princípio do movimento relativo (entendido como significando que o potencial é função da posição relativa dos corpos); no entanto na teoria de Lorentz a energia era conservada, o princípio de relatividade válido, mas o princípio de ação e reação era violado.

Poincaré resolveu o impasse introduzindo um momentum eletromagnético carregado pelo éter e capaz de preservar a conservação do momentum linear na interação éter-matéria e explicar a variação da força ao passar de um sistema de referência para outro em movimento retilíneo uniforme.

A idéia teve um impacto profundo pois representava mais um elemento fundamental não-mecânico. Com isso tomava corpo o ambicioso projeto de construir uma teoria eletromagnética que explicasse também as leis mecânicas. A versão mais radical deste projeto era sustentada por Abraham, que construiu uma dinâmica na qual o momentum linear e angular eletromagnéticos dependiam da história anterior do movimento dos elétrons, e não eram linearmente proporcionais à sua velocidade. Além disso considerava o elétron como corpo rígido não deformável, não sujeito à contração de Lorentz; dessa forma não precisava de outras forças não eletromagnéticas para garantir a estabilidade do elétron, forças que eram necessárias no modelo de Lorentz para explicar o aumento de energia eletromagnética derivada da contração do elétron. A diferença entre os dois modelos aparecia no cálculo da variação da massa longitudinal (m_l) e transversal (m_t) com o movimento: por isso, a medida exata (até a segunda ordem em v/c) da razão entre m_l e m_t era um desafio experimental com consequências importantes.

O modelo de Lorentz recebeu a sua forma completa em 1904 [13, 14], baseando-se nas seguintes hipóteses:

1. O elétron esférico em movimento se deforma como qualquer corpo.
2. Todas as forças não-elétricas são influenciadas pelo movimento da mesma maneira que as forças eletrostáticas entre elétrons.
3. A massa do elétron é totalmente de origem eletromagnética e o único momentum linear existente é o momentum eletromagnético.
4. A influência do movimento sobre as dimensões dos corpos é somente na direção do movimento.
5. As massas de todas as partículas variam da mesma maneira que a massa do elétron.

Os problemas que deixava em aberto eram: a natureza das forças não-eletromagnéticas que compensavam a repulsão eletromagnética, mantendo o elétron estável, como uma partícula, a incorporação das forças gravitacionais ao

programa eletromagnético e a relação entre elétron e a termodinâmica da radiação.

Apesar de Lorentz não conseguir a solução destes problemas, deixando inacabado o programa eletromagnético, a Teoria do Elétron constituiu uma fase extraordinariamente importante no desenvolvimento da física: além de liberá-la da sua fundamentação mecanicista, tornando-a potencialmente mais capaz de se desenvolver, estabeleceu o campo como uma realidade independente e distinta da matéria ordinária, e deixou para o futuro a relação entre campo contínuo e partículas discretas, abrindo os problemas para as sucessivas revoluções científicas da relatividade e da teoria quântica.

II.1.3. As dificuldades com a visão eletromagnética

Lorentz considerava que sua teoria dos elétrons tivesse validade universal, podendo ser estendida também à termodinâmica da radiação: assim, dever-se-ia obter as leis de Boltzmann e Wien sobre a radiação a partir das propriedades do elétron e das equações básicas de sua teoria [7, pág. 485]. As fórmulas de Boltzmann e Wien envolviam uma função $f(\nu, T)$, que constituía a razão entre a emissão e a absorção da radiação de frequência ν por um corpo à temperatura absoluta T , e também caracterizava o estado do éter numa cavidade tipo corpo negro; no entanto, para poder relacionar esta função com as propriedades do elétron e do campo eletromagnético era necessário fazer suposições sobre o mecanismo de emissão e absorção, que era desconhecido.

Foi somente em 1903 que Lorentz se convenceu da possibilidade de haver pelo menos um mecanismo de transformação da energia radiante; chegou a esta conclusão através da teoria dos metais que na época estava na moda, pois juntava três grandes áreas da física: eletromagnetismo, termodinâmica e teoria cinética; e tinha conseguido resultados relevantes sobretudo com o modelo de Drude. Neste modelo um condutor contém um grande número de elétrons livres, que se movimentam como as moléculas num gás, de maneira que a aplicação de um campo elétrico resulta num movimento unidirecional superposto ao movimento randômico; o movimento randômico, então, é responsável pela condutividade elétrica, característica do metal, e pode ser analisado mediante o teorema de equipartição da energia da mecânica estatística.

Um resultado experimental da mesma época – a medida da absorção e da reflexão nos metais para longos comprimentos de onda – no qual se estabelecia que estas propriedades dependiam unicamente da condutividade elétrica do metal, sugeriu a Lorentz que o mecanismo de condução da corrente proposto por Drude fosse o mesmo que regulasse a absorção e a emissão de radiação de longo comprimento de onda. Em outras palavras, Lorentz vislumbrou que os elétrons de condução do metal, cujo movimento fundamental era randômico, poderiam ser responsáveis pela absorção e pela emissão de radiação por parte do metal.

Utilizando então o teorema de equipartição da energia, pelo qual a energia se distribui segundo os graus de liberdade existentes, Lorentz conseguiu encontrar a razão entre o poder emissivo e absorptivo de uma parede metálica, dada pela

função:

$$f(\nu, T) \propto \nu^4 T, \quad (2)$$

a qual representava também a energia de radiação entre ν e $\nu + d\nu$ de um corpo negro à temperatura T .

Esta fórmula coincidia com a de Planck para as baixas frequências, mas diferia dela para altas frequências e além disso, era divergente. Assim, foi o próprio Lorentz quem descobriu os limites de sua teoria discutindo as idéias físicas incorporadas na fórmula de Planck; ele não via como, a partir da Teoria do Elétron, se pudesse chegar à fórmula de Planck para altas frequências. Na sua teoria, o elétron acelerado deveria emitir radiações de todas as frequências, e este resultado era incompatível com a hipótese dos quanta de energia cuja grandeza dependia do comprimento de onda.

O problema da natureza das forças não-eletromagnéticas, que mantinham o elétron estável durante sua deformação, desencadeou uma outra frente de batalha para a teoria de Lorentz; a hipótese de Abraham, que o elétron fosse indeformável, preservava a essência do programa EM de reduzir todas as forças às eletromagnéticas, e por esta razão era considerada uma idéia mais moderna e mais fecunda do que a de Lorentz, que não conseguia a unificação total da Física. O ponto crucial, como já foi acenado, era a razão entre m_t e m_l , massas transversal e longitudinal, que na teoria de Abraham (e também de Langevin) tinha um valor, e na teoria de Lorentz (e também de Einstein) tinha outro valor, apesar da diferença ser muito pequena.

Durante um período de mais de cinco anos vários experimentos que utilizavam raios catódicos defletidos em campos eletromagnéticos foram executados com resultados ambíguos e alternativos.

Quando a teoria de Abraham apareceu como derrotada, em torno de 1910, a teoria de Einstein já tinha recebido várias contribuições que a tornava mais flexível do que a de Lorentz, pois não fazia nenhuma hipótese sobre a estrutura do elétron, a distribuição de sua carga e a origem de sua massa. Desta forma era possível, ficando com o princípio de relatividade e a invariança da velocidade da luz como postulados, escapar ao confronto com a teoria de Planck, e se dirigir para a Gravitação e a Relatividade Geral.

II.2. A gênese da teoria de Einstein

A reconstrução da gênese da Teoria da Relatividade não é muito simples, por duas razões fundamentais: a primeira é que a teoria foi proposta por um único cientista, numa formulação já final, e de certa maneira, em contraste com as idéias dominantes da época; a segunda razão é que as informações a respeito do seu processo de amadurecimento na mente do autor são fragmentárias e às vezes conflitantes.

Para McCormach [8] e em parte para Klein [9] a reconstrução do processo se deve fazer pelos seguintes passos:

1. Einstein trabalhou, antes de 1905, na Teoria do Elétron e ficou insatisfeito com ela por não fornecer resultados

válidos sobre a radiação do corpo negro. Por isso ele propôs uma hipótese sobre a luz, diferente da teoria vigente: a hipótese do quantum de luz.

2. Einstein também não estava satisfeito com o dualismo entre campo contínuo e partícula discreta e com a simetria interna da teoria de Lorentz; por isso ele propôs uma teoria de “princípio” que recuperasse todos os resultados desta última sem se comprometer com a estrutura microscópica da matéria.

II.2.1. A nova teoria da luz

Einstein desde cedo ficou preocupado com o problema da radiação e trabalhou nele muito tempo, apesar de publicar muito pouco a respeito.

É conhecido o paradoxo que o perturbou, na idade de 16 anos, quando tentava imaginar qual seria a visão da luz para um observador em repouso em relação a ela; e não ficou satisfeito com a resposta que a teoria EM fornecia: um campo EM estático senoidal sem nenhum tipo de distribuição de carga que o justificasse.

Existem também informações sobre as suas tentativas, quando estudante, de construir uma teoria da luz pensada como uma onda num meio elástico quase-rígido; mas a sua atividade mais intensa se deu no campo das teorias moleculares e da teoria cinética do calor. Em 1903 entrou em contato com o livro de Poincaré – *Ciência e Hipótese* – e manifestou sua intenção de aprofundar o conhecimento da teoria do elétron de Lorentz, que para Poincaré representava a teoria mais promissora para o futuro. A sua aproximação efetiva [8, pág. 42] com a teoria da radiação se deu em 1904, quando ele começou a pensar a radiação como um sistema termodinâmico em equilíbrio e tentou aplicar-lhe seus conhecimentos e resultados de Termodinâmica.

O primeiro passo foi reforçador. Ele tinha obtido um resultado interessante que relacionava a flutuação quadrática média $\langle \Delta^2 \rangle = \langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle$ da energia térmica de um sistema molecular, e a variação da energia com a temperatura, $d\langle E \rangle/dT$:

$$\langle \Delta^2 \rangle = \frac{d\langle E \rangle}{dT} k_B T^2. \quad (3)$$

Este resultado não era desconhecido, mas era considerado de pouca utilidade, pois a constante k_B de Boltzmann⁷ tornava a flutuação quadrática média extremamente pequena para poder ser medida. Einstein olhou para ele de forma diferente, focalizando o fato que tinha sido obtido sem nenhuma hipótese específica ou modelo particular sobre o sistema molecular analisado: deveria ser possível aplicar esta fórmula a um sistema não-mecânico, como a radiação EM em equilíbrio térmico e, em particular, a radiação do corpo negro, uma cavidade evacuada com radiação em equilíbrio e paredes mantidas a uma

determinada temperatura. No caso do corpo negro, o mecanismo da flutuação era conhecido e, em particular, se o volume ocupado pela radiação tivesse as dimensões lineares de um comprimento de onda da radiação, a flutuação da energia seria da ordem de grandeza da própria energia presente no volume⁸. Neste caso, utilizando sua fórmula e a lei de Stefan-Boltzmann para a energia total do corpo negro, Einstein obteve facilmente que a dimensão linear da cavidade deveria ser inversamente proporcional à temperatura, e conseqüentemente também ao comprimento de onda. Precisamente este é o comportamento do comprimento de onda característico no qual o espectro do corpo negro tem um máximo, e constituiu a lei do deslocamento de Wien, sendo que a constante empírica da lei de Wien era bem próxima à calculada por Einstein mediante sua fórmula da flutuação. Isso não significava uma nova derivação da lei de Wien, mas a coincidência dos resultados constituía uma confirmação parcial das flutuações previstas e da aplicabilidade da sua fórmula à radiação pura, e conseqüentemente da relevância das idéias subjacentes à teoria mecânico-molecular do calor para a radiação. Isso abria espaços para aproximar mais sistemas moleculares e radiação eletromagnética.

Einstein enfrentou diretamente a questão da natureza da radiação EM em 1905 no seu artigo sobre os quanta de luz.

O trabalho consistiu na generalização da aplicação que Drude fez do teorema de equipartição da energia a um conjunto de moléculas e elétrons; Drude, como vimos, em 1900 tinha aplicado a teoria dos elétrons de Lorentz à teoria dos metais, unificando eletromagnetismo e mecânica estatística.

Einstein aplicou o mesmo teorema da equipartição a um contexto físico diferente: um conjunto de moléculas, elétrons livres e radiação. Ele imaginou que o espaço que contém o gás de moléculas e os elétrons fosse fechado como paredes refletoras, emitindo e absorvendo radiação EM por meio de elétrons ligados ou “osciladores”. O teorema da equipartição previa que a média da energia cinética das moléculas conhecida pela teoria cinética dos gases deveria ser igual à média da energia cinética dos elétrons ligados e oscilantes. Esta última estava relacionada à energia radiante por unidade de volume da cavidade a uma dada frequência. A fórmula resultante que ele obteve constituía a densidade de energia da radiação de um corpo negro, e não coincidia com os resultados experimentais, além de implicar numa energia total infinita para o corpo negro.

Alguns anos antes, Rayleigh tinha chegado à mesma conclusão, e Lorentz tinha trabalhado com o problema análogo da radiação de metais, com resultados na mesma direção, como já foi visto anteriormente; Einstein, no entanto, não conhecia estes trabalhos que teriam sido uma valiosa ajuda para ele.

Einstein percebeu, então, que o teorema de equipartição, bem adequado para um sistema de elétrons e moléculas, pois descrevia a situação de equilíbrio, não permitia chegar a conclusões análogas quando aplicado a radiação de um oscilador:

⁷ “O verdadeiro significado de k_B , para Einstein, era que ela determinava a estabilidade térmica, ou, em outras palavras, fixava a escala na qual se verificam as flutuações” [9, pág. 511].

⁸ Esta relação pode ser vista qualitativamente utilizando-se o princípio de incerteza $\Delta p \Delta x \geq h$: se $\Delta x \approx \lambda$ então $\Delta p c \approx h\nu$, ou seja, a flutuação da energia é da mesma ordem de grandeza da própria energia.

“no nosso modelo não tem lugar para uma distribuição definida da energia entre éter (radiação) e matéria” [15].

O questionamento de Einstein foi radical: não era o teorema de equipartição a fonte das dificuldades, mas o modelo eletromagnético no qual a radiação era explicada como um fenômeno especialmente contínuo [15].

O teorema de equipartição, que negava a possibilidade de um equilíbrio na distribuição de energia entre éter contínuo e matéria, conduziria a resultados compatíveis se a luz, da mesma forma que as moléculas e os elétrons, tivesse somente um número finitos de graus de liberdade.

Einstein mostrou, com argumentos puramente termodinâmicos, que a entropia da radiação numa determinada frequência tinha as mesmas propriedades que a entropia de um gás ideal contido num determinado volume. Na interpretação estatística de Einstein, a entropia de um gás de moléculas dependia fundamentalmente da hipótese de movimentos independentes das moléculas, assim sendo a radiação também deveria ser constituída de partículas com movimentos independentes.

É importante notar que o raciocínio de Einstein para estabelecer a hipótese do quantum de luz era diferente do de Planck. Este último inventou a quantização da energia do oscilador como uma possível explicação para o espectro do corpo negro; Einstein interpretou a quantização como uma necessidade decorrente da lei da radiação [16] que exigia a quebra do modelo contínuo de luz, pois esta, nas altas frequências se comportava termodinamicamente como se consistisse de “um número finito de quanta de energia que são localizados em pontos do espaço, que se movem sem se dividir e que podem ser produzidos e absorvidos como unidades completas” [8].

Esta conclusão vinha ao encontro de uma preocupação ainda mais básica que há algum tempo perturbava a visão de Física de Einstein: o reconhecimento de que Mecânica e Eletromagnetismo andavam totalmente separadas, e precisavam de uma unificação.

A mesma distinção existia entre éter contínuo e matéria ponderável composta de moléculas e átomos discretos; a própria linguagem matemática expressava esta diferenciação: equações a derivadas parciais para o campo EM e equações a derivadas ordinárias para o movimento das partículas.

A hipótese do quantum de luz e da descontinuidade da radiação indicava um caminho para a unificação, sugerindo que a nova teoria EM deveria abandonar o formalismo da teoria de campo, sendo que as propriedades ondulatórias da luz deveriam resultar de uma média de comportamentos dinâmicos dos quanta de energia.

A teoria de Lorentz, na opinião de Einstein, estava destinada a ser abandonada, pois ela estava mergulhada no dualismo partícula-campo: ela admitia lado a lado, os elétrons discretos, com suas cargas e o éter contínuo, dividindo a natureza de maneira irremediável. O resultado era a impossibilidade de se obter uma fórmula adequada para a radiação do corpo negro, e as dificuldades de entender o mecanismo de absorção e emissão, até a produção de foto-elétrons.

A unificação dos conceitos deveria chegar a eliminar este dualismo: mas, apesar de Einstein ter alguma sugestão a respeito, no sentido de privilegiar os elementos

básicos discretos, a situação não era ainda madura para uma nova teoria unificada da matéria e da luz.

II.2.2. A proposição da teoria da relatividade

A percepção de que a situação global da Física não estava ainda em condições de oferecer um modelo suficientemente completo e detalhado para englobar todos os resultados recentes, sugeriu a Einstein o abandono do enfoque “construtivo”; tomando como modelo a Termodinâmica, partiu para uma reformulação da teoria do elétron com base em princípios de validade universal.

A Termodinâmica, tão familiar a Einstein, era uma teoria que se baseava no postulado da impossibilidade do movimento perpétuo; deste postulado eram tiradas todas as consequências que, evidentemente, não estavam comprometidas com nenhum modelo particular de interações moleculares.

Analogamente Einstein formulou a sua nova teoria sobre dois princípios: o da relatividade, segundo o qual as mesmas leis são válidas em todos os sistemas de referências inerciais, e o da independência entre a velocidade da luz e a da fonte emissora. É interessante notar que estes dois princípios podem ser formulados de forma análoga ao da impossibilidade do movimento perpétuo: o princípio da relatividade afirma que é impossível detetar o movimento absoluto pois ele não tem significado físico; o princípio da invariância da velocidade da luz afirma que é impossível medir a velocidade da luz numa direção de forma independente, pois isso implicaria em ter uma sincronização absoluta dos relógios (impossibilidade de uma sincronização absoluta).

Existia também uma outra razão básica para o princípio da relatividade e o abandono do éter: a perfeição interna das teorias físicas.

Para Einstein a teoria EM era imperfeita pois ela dava explicações diferentes para resultados experimentais análogos. No movimento entre uma espira condutora e um ímã, a corrente induzida na espira dependia unicamente da velocidade relativa entre os dois; no entanto na teoria do éter de Lorentz a explicação desse fato variava conforme o movimento (absoluto) fosse da espira ou do ímã ou dos dois.

Einstein estava convencido que a força de Lorentz, que agia numa partícula carregada em movimento num campo magnético era de natureza elétrica e não tinha nada a ver com o éter. O princípio da Relatividade de Einstein, abandonando o movimento absoluto e o éter, eliminava a assimetria das explicações, e deixava lugar somente para o movimento relativo.

Em resumo, podemos dizer que Einstein escreveu sua TR consciente das suas relações com a hipótese quântica sobre a luz. Ele tinha concluído que a nível microscópico, a energia da luz não poderia ser descrita por funções espaciais contínuas, em contraste com o modelo de éter contínuo da Teoria do Elétron. A eliminação do movimento absoluto tornava supérfluo o éter contínuo, deixando espaço para os conceitos mecânicos de relatividade e de partícula serem aplicados também ao eletromagnetismo. Por isso a TR e a teoria quântica da luz pareciam aos físicos da época como um passo

reacionário, uma volta ao predomínio das idéias mecânicas⁹. Mas, na realidade, não foi bem esse o significado mais profundo da teoria de Einstein. A TR se opunha também, e mais radicalmente, à visão mecanicista. Com a eliminação da simultaneidade absoluta, a ação à distância entre partículas também perdia sentido físico; a dedução da variação da massa com a velocidade modificava totalmente o conceito mecânico da massa.

Neste aspecto, Hirosige [17] vai ainda mais longe. Para ele o afastamento de Lorentz e Poincaré da visão mecanicista foi somente parcial, pois, apesar de não tentar uma explicação mecânica das equações do EM, os conceitos fundamentais de espaço e tempo ainda estavam ligados de maneira privilegiada às leis da Mecânica, e os próprios referenciais inerciais, ligados ao éter, na prática das medidas físicas, eram localizados mediante a invariância das leis mecânicas¹⁰.

Ao contrário, Einstein colocou na mesma hierarquia a Mecânica e o Eletromagnetismo, que ele tentou unificar, podendo, conseqüentemente, abandonar os conceitos de simultaneidade absoluta, tempo absoluto e espaço absoluto.

Por isso, na opinião de Hirosige, Lorentz e Poincaré não puderam chegar a Teoria da Relatividade: sua confiança na primazia da Mecânica na estrutura epistemológica da Física impedia o abandono definitivo de uma visão de mundo ainda ligada em parte ao mecanicismo.

Para McCormach, Einstein fundamentalmente frisou os limites da teoria vigente. Baseando-se nas equações de Maxwell, a teoria de Lorentz representava adequadamente a realidade macroscópica, mas não estava em condições de fornecer um modelo adequado da realidade microscópica: em primeiro lugar, porque não podia tratar a radiação como quantizada; em segundo lugar, porque não sabia expressar as simetrias da natureza, e em terceiro lugar, porque não especificava a natureza fundamental da carga elétrica que constituía um apêndice da teoria do elétron.

A teoria dos quanta era um passo a frente na concepção microscópica, e a TR mostrava que a carga de um corpo era um invariante relativístico: assim, independentemente do elétron ser pontual ou com dimensões finitas sua carga era invariante. Era algo de análogo à propagação da luz: independentemente da luz ser um fenômeno discreto ou contínuo, sua velocidade era invariante. Além disso, a relação entre massa e energia e sua equivalência constituía um passo a frente na unificação

dos conceitos mecânicos e eletromagnéticos. No final de 1905, utilizando a sua descoberta anterior de que a energia da luz variava com o movimento do observador, da mesma forma que a frequência do efeito Doppler, Einstein concluiu que se um corpo perde ou adquire energia com a radiação, então sua massa também deve variar de uma quantidade correspondente igual à energia dividida pelo quadrado da velocidade da luz. O conceito mecânico de massa perdia o seu isolamento, tornando-se uma forma de energia, característica tanto da radiação quanto da matéria ordinária.

Para Einstein, uma teoria microscópica deveria englobar todas estas conclusões como decorrentes de suas premissas fundamentais. Mas tal teoria ainda não existia.

II.3. Conclusões

Na segunda parte deste trabalho veremos como Einstein tentou encontrar esta nova teoria: o caminho que ele seguiu foi, surpreendentemente, dar continuidade ao programa EM privilegiando uma visão de campo que pudesse realizar uma unificação radical; veremos também como Lorentz e outros pesquisadores colaboraram neste esforço.

A proposta de nossos autores é interessante, pois ela consegue recuperar uma racionalidade do processo histórico de desenvolvimento da Física sem a eliminação das rupturas conceituais, e também sem uma absolutização das mesmas. O objeto fenomenológico de análise privilegia a racionalidade “dinâmica” da procura de soluções, na qual dominam as ligações profundas entre as intuições dos pesquisadores. O programa de Lorentz, fruto e coroamento de um processo de afastamento de uma visão mecanicista, revela nisso sua profunda continuidade, apesar das frequentes modificações de sua teoria. O programa de Einstein é dominado pela exigência de unificação e pela insatisfação com relação às teorias vigentes que o levam a privilegiar uma maneira de fazer física baseada em intuições profundas (princípios), e um não-comprometimento com os detalhes dos modelos. Na segunda parte veremos, como na procura de um modelo mais abrangente, as barreiras teóricas entre pesquisadores se quebram e os resultados são interpretados de maneira surpreendente.

[1] E. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume II. Thomas Nelson and Sons, 1953.

⁹ “Uma das razões mais prováveis do fato que a hipótese dos quanta de luz de Einstein teve no começo um suporte tão escasso é que muitos físicos naquele tempo estavam convencidos que o caminho para a unificação da física passava pela teoria de campo contínuo. A proposta de Einstein pareceu um passo atrás para o tempo no qual a mecânica das partículas era o modelo para toda a Física” [8].

¹⁰ Ainda em 1912, Poincaré defendeu a necessidade de um referencial fundamental cuja definição se reduzia à proposição de que a forma das equações da dinâmica não deveria se alterar pela transformação das coordenadas.

[2] G. H. Keswani. Origin and concept of relativity (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, 15(60):286–306, 1965. URL <http://www.jstor.org/stable/686536>.

[3] G. H. Keswani. Origin and concept of relativity (II). *The British Journal for the Philosophy of Science*, 16(61):19–32, 1965. URL <http://www.jstor.org/stable/686136>.

[4] T. S. Kuhn. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, 1970.

[5] I. Lakatos. Falsifications and methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos and A. Musgrave, editors, *Criticism and Growth of Knowledge*, pages 91–195. Cambridge, 1970.

[6] Elie Zahar. Mach, Einstein, and the rise of modern science. *The*

- British Journal for the Philosophy of Science*, 28(3):195–213, 1977. URL <http://www.jstor.org/stable/686806>.
- [7] R. McCormach. H. A. Lorentz and the electromagnetic view of nature. *Isis*, 61(4):459–497, 1970. URL <http://www.jstor.org/stable/229459>.
- [8] R. McCormach. Einstein, Lorentz, and the electron theory. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 2:41–87, 1970. URL <http://www.jstor.org/stable/27757304>.
- [9] M. J. Klein. Thermodynamics in Einstein’s thought. *Science*, 157(3788):509–516, 1967. URL <http://www.jstor.org/stable/1721684>.
- [10] R. Kargon. Model and analogy in Victorian science: Maxwell’s critique of the french physicists. *Journal of the History of Ideas*, 30(3):423–436, 1969. URL <http://www.jstor.org/stable/2708567>.
- [11] B. G. Doran. Origins and consolidation of field theory in nineteenth-century Britain: From the mechanical to the electromagnetic view of nature. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 6:133–260, 1975. URL <http://www.jstor.org/stable/27757342>.
- [12] E. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume I. Thomas Nelson and Sons, 1951.
- [13] A. Einstein and F. A. Davis. *The Principle of Relativity*. Dover, 1932.
- [14] H. A. Lorentz. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)*, 6:1903–1904, 1904. URL <http://www.dwc.knaw.nl/DL/publications/PU00014148.pdf>.
- [15] A. Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6):132–148, 1905. URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.19053220607>. Consulte <http://einsteinpapers.press.princeton.edu> para traduções e informações adicionais.
- [16] M. Klein. The beginning of the quantum theory. In C. Weiner, editor, *History of Twentieth Century Physics: Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi Course 57*, pages 1–39. Academic Press, 1977.
- [17] Tetu Hirose. The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7:3–82, 1976. URL <http://www.jstor.org/stable/27757354>.