

Poincaré e o princípio da relatividade: uma tradução comentada do ensaio “Sobre a dinâmica do elétron”

*Poincaré and the relativity's principle: A commented
translation of the essay “On the dynamics of the electron”*

Clair de Luma Capiberibe Nunes¹ | Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
ricardo.capiberibe@ufms.br
<https://orcid.org/0000-0002-6536-3131>

Wellington Pereira de Queirós | Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
wellington.queiros@ufms.br
<https://orcid.org/0000-0002-9734-7136>

RESUMO Em 1905, Poincaré publicou um breve ensaio intitulado “Sobre a dinâmica do elétron”, onde antecipava alguns resultados da teoria da relatividade especial que apareciam nos trabalhos de Einstein e Minkowski, e tentava conciliar o princípio da relatividade com a teoria da gravitação newtoniana. Visando elucidar as contribuições de Poincaré para a relatividade especial, apresentamos uma tradução comentada do ensaio “Sobre a dinâmica do elétron”, de 1905, modernizando as equações, contextualizando seu trabalho, traçando paralelos com as obras de seus contemporâneos, como Lorentz e Einstein, além de discutir aspectos sobre a construção do conhecimento científico e a natureza da ciência.

Palavras-chave teoria da relatividade especial – Henri Poincaré (1854-1912) – história da ciência – covariância de Lorentz – princípio da relatividade.

ABSTRACT In 1905, Poincaré published a brief essay entitled “On the dynamics of the electron”, where he anticipated some results of the theory of special relativity which appeared in the works of Einstein and Minkowski, and tried to reconcile the principle of relativity with the newtonian gravitation theory. In order to clarify the Poincaré's contributions to special relativity, we present a commented translation of the essay “On the dynamics of the electron”, from 1905, modernizing the equations, contextualizing

1 Nome civil: Ricardo Capiberibe Nunes. A autora é mulher travesti.

his work, drawing parallels with the works of his contemporaries, such as Lorentz and Einstein, and discussing aspects of the construction of scientific knowledge and the nature of science.

Keywords *special theory of relativity – Henri Poincaré (1854-1912) – history of science – Lorentz covariance – principle of relativity.*

Introdução

Pesquisas sobre o ensino de ciências têm destacado que a inclusão de elementos de história e filosofia da ciência atuam como uma importante ferramenta didática para uma compreensão mais adequada sobre a construção do conhecimento científico e a natureza da ciência (Sherratt, 1982, 1983; Langevin, 1992; Gama, 1992; Matthews, 1994, 1995; Freire Jr., 2002; Silva Filho, 2002; Duarte, 2004; El-Hani, 2006; Beltran, Saito, Trindade, 2014a; Boss et al, 2016; Beltran, Trindade, 2017). Inicialmente, a interface entre ensino e história da ciência viu-se dificultada devido a “falta de material didático adequado” (Martins, 2006, p. XXIII), porém, nos últimos anos, periódicos científicos de ampla circulação como, por exemplo, a *Revista Brasileira de Ensino de Física*,² o *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, a *Revista Brasileira de História da Ciência* e as coleções editadas pela Livraria da Física, como a coleção *História da ciência: tópicos atuais* (Beltran, Saito, Trindade, 2010a, 2010b, 2014b, 2016, 2017) e a coleção *Contextos da Ciência* (cf. Silva, Guerra, 2015; Silva, Silveira, 2018a, 2018b) contribuíram para o enfrentamento dessa demanda e proporcionam fontes e subsídios de textos de história da ciência para estudantes e professores.

Por outro lado, ainda não se encontra em língua portuguesa tradução e discussão de alguns textos que marcam a memória e a história da teoria da relatividade especial, como os ensaios de Henri Poincaré sobre a dinâmica do elétron. Tendo em vista a carência desse material histórico, propomos este ensaio que apresenta uma tradução comentada do artigo “Sobre a dinâmica do elétron”, de Henri Poincaré, publicado em 5 de junho de 1905.³ Escolhemos a nota de Poincaré devido a sua importância capital para a história da ciência, pois anunciou “importantes avanços matemáticos e físicos no que hoje chamaríamos de Relatividade Especial, eletrodinâmica relativística e gravitação relativística” (Damour, 2017, p. 559).

Escolhemos a modalidade tradução comentada, pois a leitura de fontes primárias pode envolver uma série de dificuldades que podem tornar difícil a sua compreensão, como um vocabulário exótico, o uso de conceitos que já foram rejeitados ou que ganharam uma conotação

2 Em março de 2005, a *Revista Brasileira de Ensino de Física* publicou a “Edição especial dedicada a Einstein no Ano Mundial da Física”, onde quatro artigos discorrem sobre as contribuições de Einstein a relatividade especial, a saber: “1905 e tudo o mais” (Stachel, 2005); “A dinâmica relativística antes de Einstein” (Martins, 2005a); “A física clássica de cabeça para baixo: como Einstein descobriu a teoria da relatividade” (Renn, 2005); “Sobre o princípio da relatividade e suas implicações” (Einstein, 2005). Essa edição especial pode ser acessada em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/indice.php?vol=27enum=1>.

3 Outro ponto importante que devemos salientar é que existem duas versões desse ensaio: a curta (de cinco páginas), que foi apresentada, em 1905, na Academia Francesa de Ciências; e uma versão longa (de 57 páginas), que foi submetida em julho à revista italiana *Circolo Matematico di Palermo*, mas foi apenas publicado em janeiro de 1906, devido a um erro editorial (Auffray, 1998). Essencialmente, o artigo curto é uma apresentação objetiva dos resultados, discutidos detalhadamente no artigo de 1906 (Damour, 2017). Por questões de praticidade e objetividade, optamos em apresentar a tradução do ensaio curto, mas destacando nos comentários e nas seções complementares contribuições que só aparecem na versão longa (de 1906).

diferente, o uso de símbolos arcaicos e o fato de que muitas vezes o texto era pouco inteligível, até mesmo para seus contemporâneos (Boss et al., 2016). Além disso,

As evidências de que ler e entender traduções de fontes primárias é uma tarefa difícil não se limitam aos graduandos. Os próprios autores deste trabalho, por vezes, enfrentam dificuldades no processo de tradução e de estudo das fontes primárias. Não é raro nos depararmos com fontes primárias e traduções que exigem certo esforço para que possam ser compreendidas. Conclui-se, a partir deste breve relato, que é preciso buscar meios para que este tipo de material seja inteligível para os sujeitos envolvidos no processo educativo, i.e., graduandos e professores, caso contrário será inócuo em relação aos objetivos educacionais e ao potencial que a História da Ciência tem para a formação do futuro professor (Boss et al., 2016, p. 177-178).

E a nota de 1905 de Poincaré (bem como sua versão estendida, publicada apenas 1906⁴) não é exceção:

Por um lado, a nota [de 1905] [...] é muito curta, muito modesta e muito incompleta para transmitir uma ideia clara das realizações de Poincaré. Por outro lado, as memórias de Palermo são escritas de forma bastante obscura, o que esconde alguns dos novos resultados mais importantes de Poincaré em meio a derivações muito técnicas. Como consequência, parece que as realizações de Poincaré permaneceram essencialmente despercebidas até que Minkowski as estudou, extraiu seu núcleo essencial e generalizou-as, em 1908 (Damour, 2017, p. 555).

Por essa razão, a fim de tornar mais inteligível a leitura da nota de Poincaré, optamos por uma tradução comentada seguindo as orientações de Boss et al. (2016), que sugere dois tipos de comentários em forma de nota de rodapé:

Um deles versa sobre aspectos conceituais e factuais relacionados à época dos originais traduzidos, cujo objetivo é fornecer subsídios ao leitor para o entendimento dos conceitos, fenômenos e experimentos descritos nos textos a partir dos elementos do período histórico em questão. O leitor passa a ter acesso às informações referentes à época em que o texto foi escrito e que são fundamentais para o entendimento da obra, mas que não estão disponíveis nos originais. [...] Um segundo tipo de comentário é aquele que discute fenômenos descritos nos originais a partir do ponto de vista da “física atual” (Boss et al., 2016, p. 181-182).

Além disso, também optamos por apresentar as equações utilizando as notações contemporâneas, familiares aos licenciandos em física e por apresentar algumas seções contextualizando e problematizando as concepções e contribuições de Poincaré entre 1895 e 1905 e o seu ensaio “Sobre a dinâmica do elétron”.⁵ Assim, o trabalho foi estruturado da seguinte forma: a seção 1

4 Como afirmamos na nota anterior, optamos por apresentar a nota curta. Comentários sobre a versão longa desse ensaio de Poincaré podem ser vistas em: Schwartz (1971, 1972a, 1972b), Miller (1973, 1986), Logunov (2004) e Popp (2020). Sobre o princípio da mínima ação eletromagnética e relativística, apresentadas por Poincaré, ver Bracco e Provost (2009).

5 Embora tentemos contextualizar nos comentários da tradução qual era o estado da arte da eletrodinâmica e da relatividade em 1905, é desejável que o leitor consulte ensaios que abordam a história da teoria da

- discute as concepções epistemológicas e físicas de Poincaré e como elas se conectam com as suas contribuições para eletrodinâmica de Lorentz e a relatividade especial; a seção 2 - faz uma breve apresentação de "Sobre a dinâmica do elétron" e quais novidades ele trazia em relação aos trabalhos de Lorentz; a seção 3 - é a tradução propriamente dita da nota de Poincaré; na A seção 4 - acrescentamos alguns comentários e reflexões sobre o ensaio de Poincaré, sobretudo suas hipóteses de gravitação, que constituem a primeira tentativa de se estender o princípio da relatividade à gravitação e é pouco discutida na literatura.⁶ Nas considerações finais, discutimos as diferenças e semelhanças entre a abordagem de Poincaré e a abordagem de Einstein, evitando conflitos de prioridade.⁷

Quanto à utilização desse material, nós sugerimos que leitor faça duas leituras da seção 3 (tradução): a primeira ignorando os nossos comentários nas notas de rodapé; a segunda leitura consultando essas observações. A primeira leitura visa que o leitor adquira familiaridade com a nota de Poincaré e tenha uma visão mais holística, enquanto a segunda leitura opera na dimensão analítica.

As concepções epistemológicas e físicas de Poincaré⁸

Antes de abordarmos o ensaio de 1905 de Poincaré, é importante contextualizar o leitor sobre o quadro de referência teórica que orientou as pesquisas de Poincaré até 1905 e qual foi seu papel para a gênese da teoria da relatividade. Inicialmente, convém observar que Poincaré adotou uma postura epistemológica conhecida como *Convencionalismo*.

Coube a Henri Poincaré exprimir com maior vigor as implicações de um ponto de vista convencionalista dos princípios gerais das ciências. Poincaré dissociava a crença de Whewell de que certas leis científicas realmente são verdades *a priori*, da epistemologia kantiana à qual Whewell apelou para justificar o *status a priori* destas leis. Para Poincaré nem se trata da existência de um conjunto de ideias imutáveis que de algum modo investem as leis científicas com a necessidade. Para Poincaré, o fato de que uma lei científica se tem por verdadeira, independentemente de qualquer apelo à experiência, meramente reflete a decisão implícita dos cientistas de usar a lei como uma convenção que especifica o significado

relatividade. A seguir apresentamos uma seleção de obras (todas em língua portuguesa): sobre a história geral da relatividade especial: Villani (1981a, 1981b, 1981c, 1981d, 1985), Arruda e Villani (1996), Martins (1989, 1998a, 2005a, 2010, 2012, 2015). Para uma discussão sobre as diversas abordagens historiográficas sobre a teoria da relatividade, ver Noronha e Gurgel (2012). Sobre as concepções epistemológicas de Poincaré, ver Castro (2001), Paty (2001, 2010), Vecchio Jr. (2005), Crossi Filho (2012), Paz (2013) e Príncipe (2015). Sobre alguns mitos e alguns erros conceituais em livros didáticos e manuais técnicos, ver Ostermann e Ricci (2002, 2004), Nunes e Queirós (2020a, 2020b) e Nunes, Queirós e Cunha (2021a, 2021b, 2022).

- 6 Miller (1973), discutiu seção por seção da versão longa de "Sobre a dinâmica do elétron", exceto a última seção, a saber, as hipóteses sobre a gravitação de Poincaré, prometendo ao leitor que o faria em um ensaio separado. Infelizmente, ele nunca o fez.
- 7 O conflito de prioridade na relatividade consiste no controverso debate se foi Einstein ou Poincaré que criou a relatividade especial. Nós partilhamos da mesma perspectiva historiográfica e epistemológica de Martins (2015) de que as teorias são construções coletivas, portanto a própria controvérsia sobre prioridade (ou paternidade) é desprovida de sentido.
- 8 Para uma discussão mais detalhada sobre Poincaré e suas concepções físicas e epistemológicas, ver: Langevin (1913a) e Duplantier e Rivasseau (2015).

de um conceito científico. Se uma lei é verdadeira *a priori* é porque foi enunciada de modo tal que nenhuma evidência empírica pode contar contra ela (Losee, 1979, p. 182).

Ainda sobre o caráter *convencional* das leis científicas, Losee esclarece que

[...] seria incorreto atribuir a Poincaré a opinião de que leis científicas gerais nada mais são do que convenções que definem conceitos científicos fundamentais. Estas leis têm uma função legítima como convenções, mas têm outra função legítima como generalizações empíricas. [...] Poincaré notou que, no decorrer do desenvolvimento da ciência, certas leis vêm a exibir ambos os aspectos. Inicialmente essas leis são utilizadas unicamente como generalizações experimentais. Por exemplo, uma lei poderia enunciar uma relação entre os termos A e B. Levando em conta que a relação aplica-se apenas aproximadamente, os cientistas podem introduzir um termo C que, por definição, tem a relação A expressa pela lei. A lei experimental original foi agora subdividida em duas partes: um princípio *a priori* que enuncia uma relação entre A e C, e uma lei experimental que enuncia uma relação entre B e C (Losee, 1979, p. 183-184).

A orientação convencionalista de Poincaré fez com que ele submetesse as teorias físicas, em particular a mecânica newtoniana, a uma profunda crítica.⁹ Essa crítica levou Poincaré a rejeitar os conceitos de espaço e tempo absolutos.¹⁰ Em *A ciência e a hipótese*, publicado em 1902, Poincaré declara que:

1. Não há espaço absoluto e só concebemos o movimento relativo; e, no entanto, na maioria dos casos, a ciência e a hipótese dos fatos mecânicos são enunciados como se houvesse um espaço absoluto ao qual eles podem ser referidos. 2. Não há tempo absoluto. Quando dizemos que dois períodos são iguais, a afirmação não tem significado e só pode adquirir significado por uma convenção. 3. Não apenas não temos intuição direta da igualdade de dois períodos, mas nem mesmo intuição direta da simultaneidade de dois eventos ocorrendo em dois lugares diferentes. Expliquei isso em um artigo intitulado “La mesure du temps”¹¹ (Poincaré, 1902, p. 111).

A abordagem convencionalista de Poincaré também o levou a defender, desde 1900, o princípio da relatividade como uma lei exata que deveria se aplicar a todos os campos da física¹²

9 Mach também havia submetido a mecânica newtoniana a um exame crítico, denunciado as concepções metafísicas e sem justificativas empíricas (Jammer, 2010, 2011), porém, a orientação de Mach era positivista, enquanto a de Poincaré era convencionalista.

10 Alguns autores alegam, equivocadamente, que Poincaré defendeu o conceito de espaço absoluto. Isso ocorre porque estes autores ainda confundem o éter com o espaço absoluto. É fato que a maioria dos pesquisadores associava o éter ao espaço absoluto, porém, Poincaré descartou essa possibilidade (Darrigol, 1995, 2005) A bem da verdade, Poincaré também era cético em relação à existência do éter. Em *A ciência e a hipótese*, Poincaré (1902) compara o éter ao calórico: um conceito que foi útil para os estudos sobre temperatura e a transferência de calor, mas que em um estágio mais avançado de desenvolvimento se tornou inútil e foi descartado. Poincaré acreditava que em algum momento, os físicos acabariam por superar o éter.

11 “La mesure du temps” (Poincaré, 1898) “pode ser considerado a primeira monografia moderna sobre o conceito de simultaneidade” (Jammer, 2006, p. 100).

12 Sobre a formulação do princípio da relatividade por Poincaré, ver Scribner (1964), Schwartz (1965), Darrigol (1994, 1995, 1996, 2004, 2005), Paty (1996), Logunov (2004), Reignier (2004), Bellac (2010), Martins (2015), Damour (2005, 2017), Brown (2010). Sobre as implicações gerais do princípio da relatividade, ver Langevin (1922, 1923).

(Poincaré, 1900a, 1902, 1904, 1905a, 1905b, 1906).¹³ Embora, o *princípio da relatividade* seja o conceito fundamental para elaboração da teoria da relatividade especial,¹⁴ Poincaré não desenvolveu uma pesquisa de exploração como Einstein, mas tentou ajustá-las às teorias correntes.

As principais contribuições de Henri Poincaré ao desenvolvimento da teoria da relatividade ocorreram em resposta aos artigos de outros pesquisadores – especialmente Larmor e Lorentz. Estudando esses trabalhos, Poincaré apontou alguns erros, aperfeiçoou vários pontos e propôs complementações às ideias apresentadas, ajudando a construir uma teoria mais clara e coerente (Martins, 2015, p. 128-129).

Isso ajuda a entender por que em diversos ensaios e conferências, Poincaré minimiza suas contribuições, inclusive atribuindo algumas, equivocadamente, a Lorentz (Lorentz, 1921; Goldberg, 1970). Outra preocupação de Poincaré era apresentar um significado físico da teoria de Lorentz.¹⁵ Poincaré cumpriu esse objetivo combinando suas reflexões sobre a natureza do espaço, tempo e simultaneidade, o *status* ontológico das leis físicas e experiências pessoais com sincronização de relógios e a medida da geodésica da Terra (Galison, 2003; Martins, 2015).

Em 1900, mostrou que o tempo local de Lorentz era o equivalente ao tempo medido por relógios sincronizados por sinais luminosos (ou ondas eletromagnéticas de qualquer tipo). Em 1904, publicou um trabalho no qual mostrava que as transformações de Lorentz implicavam uma quebra de sincronização dos relógios em diferentes referenciais, e que o resultado obtido era exatamente igual ao que se obtém fazendo a sincronização com o uso de sinais luminosos e assumindo também que, em relação a todos os referenciais, a velocidade da luz é a mesma (Martins, 2015, p. 129).

Não é absurdo supor que Einstein tenha tomado emprestado o princípio da relatividade e as discussões sobre simultaneidade de Poincaré¹⁶ (Auffray, 1998; Gianneto, 1999; Galison, 2003;

13 Entre 1900 e 1905, Poincaré apresentou diversas definições, todas equivalentes, para o *princípio da relatividade*. A definição que ele apresentou em 1904, durante a conferência de Saint Louis, é bastante semelhante àquela proposta por Einstein, em 1905: “O princípio da relatividade, segundo o qual as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, quer para um observador fixo, quer para um observador em movimento de translação uniforme; de modo que não temos, nem podemos ter, nenhum meio de discernir se somos ou não levados num tal movimento” (Poincaré, 1904, p. 306).

14 Tanto que na abordagem de Einstein, o princípio da relatividade é um dos postulados fundamentais.

15 Como observou Lorentz (1921), Whittaker (1953) e Martins (2015), embora Lorentz fosse físico e Poincaré tivesse uma inclinação maior à matemática, Lorentz tratava as transformações que, posteriormente, levaram seu nome, como simples truques matemáticos. Foi Poincaré que apresentou uma interpretação física.

16 É bem sabido que Einstein e seus colegas estudaram detalhadamente o livro *A ciência e a hipótese*, onde Poincaré também enuncia princípio da relatividade e faz uma breve discussão sobre a relatividade da simultaneidade (Darrigol, 1994, 1995, 1996, 2004, 2005; Auffray, 1998; Gianneto, 1999; Galison, 2003; Martins, 2015). Galison (2003) sugere que Einstein e seus colegas podem ter lido a versão alemã de *A ciência e a hipótese*, que apresentava uma nota adicional (nota 43), na qual o editor faz uma discussão mais ampla sobre a questão da simultaneidade e traz algumas passagens de “A medida do tempo”. Gianneto (1999) sugere que talvez Einstein e seus colegas possam ter lido também o livro *O valor da ciência* que reproduz integralmente “A medida do tempo” e a conferência de Saint Louis de 1904. Em um artigo de 1906, Einstein cita o trabalho de Poincaré de 1900, no qual ele deduz a relação massa-energia para a radiação, enuncia o princípio da relatividade, discute o problema da sincronização de relógios e o significado físico do tempo local de Lorentz. Darrigol (1995) e Miller (1997a) não descartam a hipótese de que Einstein possa ter estudado este trabalho antes de escrever seu ensaio de 1905.

Darrigol, 2004). Seja como for, como observou Goldberg (1967), as interpretações de Poincaré e Einstein sobre o princípio da relatividade eram diferentes: Poincaré o utilizou para solucionar a crise do paradigma vigente¹⁷ enquanto Einstein propôs que o princípio da relatividade fosse ele próprio um paradigma que superaria o anterior.¹⁸

Alguns comentários introdutórios sobre o ensaio de Poincaré

Em 5 de junho de 1905, Poincaré apresentou à Academia Francesa de Ciências uma breve nota de cinco páginas, intitulada “Sobre a dinâmica do elétron”, contendo uma síntese de suas últimas pesquisas. Apesar da brevidade, esse artigo pode ser considerado como sua publicação mais relevante para teoria da relatividade.

O artigo de Poincaré de 1905, “Sobre a dinâmica do eletron”, foi o ápice de seus esforços para defender o princípio da relatividade e incorporá-lo à física, ainda que ele o tenha discutido posteriormente em suas aulas e textos de divulgação. Em seu artigo, ele construiu uma nova física relativística que se aplicava a todas as forças conhecidas na época, as do eletromagnetismo e da gravitação, e que garantia a impossibilidade de detectar o movimento absoluto, ou seja, o movimento relativo ao éter. Devido ao seu compromisso com o princípio da relatividade, ele rejeitou a visão de mundo eletromagnética.¹⁹ Ainda que sua nova física relativística tenha se originado da teoria eletromagnética, ele reinterpretou o princípio da relatividade para excluir os efeitos do movimento em relação ao éter e para manter as equações de Maxwell invariantes sob uma transformação que acabou sendo a transformação de Lorentz (Katzir, 2005a, p. 288).

Esse ensaio foi uma resposta a um ensaio de Lorentz de 1904, intitulado “Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz”. Poincaré apresentou uma parte fundamental desse trabalho em, pelo menos,²⁰ três cartas que enviou à Lorentz em maio de 1905.²¹ O próprio Poincaré (1905b, 1906) dizia que seu trabalho

Uma pesquisa conduzida por Keswani e Kilmister (1983) revelou que a palavra *relatividade* empregada pelas línguas germânicas tinha um sentido diferente daquele proposto por Einstein e Poincaré. Com base nesse estudo semântico, os autores sustentam que é bastante provável que Einstein tenha conhecido o princípio da relatividade a partir de Poincaré. Por fim, Auffray (1998) sugere que Einstein teve acesso a uma cópia de “Sobre a dinâmica do elétron” (Poincaré, 1905a) no escritório de patentes do qual era funcionário. Entretanto, não há qualquer fonte primária que corrobore essa afirmação.

- 17 Que Poincaré (1904) chamou de física dos princípios e teria como expoentes maiores a mecânica clássica e o eletromagnetismo.
- 18 Para uma comparação entre a abordagem de Poincaré e Einstein, além do já citado ensaio de Goldberg (1967), recomendamos consultar Darrigol (2004) e Martins (2015, p. 247-263).
- 19 Uma epistemologia da física que sustenta que todos os fenômenos físicos são de origem eletromagnética.
- 20 Até o presente momento, só temos acesso a cinco cartas que Poincaré enviou a Lorentz. Sabemos que Lorentz respondeu a pelo menos uma dessas cartas (Poincaré menciona ter recebido a resposta de Lorentz), porém o documento ainda não foi localizado.
- 21 Poincaré enviou, ao menos, cinco cartas a Lorentz em 1905. A primeira carta sugere que Poincaré gostaria de discutir pessoalmente com Lorentz, o ensaio “Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light” [“Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz”], já que Lorentz estaria em Paris para participar uma conferência. Porém, a

apenas complementou os resultados obtidos por Lorentz, em 1904, “em alguns detalhes”. Por outro lado, o trabalho de Poincaré também trazia contribuições originais.

Este artigo contém vários outros resultados importantes. Embora a maioria deles já tenha sido discutidas por outros autores, Lorentz em particular, Poincaré foi o primeiro a apresentar uma abordagem coerente e exaustiva deles. Seu artigo contém: [1] a lei de composição para velocidades (correta, embora a escrita por Lorentz em 1904 não fosse); [2] as leis de transformação dos campos elétrico e magnético $\{\vec{E}, \vec{B}\}$ e dos potenciais $\{\phi, \vec{A}\}$, bem como das correntes $\{\rho, \vec{j}\}$ (mesma observação acima); [3] notação quadridimensional e a métrica de Minkowski $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$, [3] os invariantes relativísticos $\{E^2 - B^2, \vec{E} \cdot \vec{B}\}$; [4] um princípio variacional para o eletromagnetismo; [5] a necessidade de levar em consideração a simetria de Lorentz em todos os fenômenos físicos, incluindo a gravitação (Bellac, 2010, p. 333).²²

Alguns destes resultados mencionados por Bellac (2010) só aparecem de forma explícita na versão longa. É difícil saber porque Poincaré omitiu em sua apresentação para a Academia Francesa. Podemos especular que, como o limite de páginas era cinco (Auffray, 1998, p. 43), Poincaré priorizou os resultados mais sólidos, e menos abstratos, como assumir que as transformações de Lorentz são rotações em um espaço 4-dimensional que preserva a forma quadrática, $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$. Porém, mesmo com essas omissões, o trabalho de Poincaré foi bastante inovador em seu contexto,²³ mesmo aqueles que consideram que a relatividade foi um programa inaugurado por Einstein concordarão que o ensaio de Poincaré foi um prelúdio fortuito para a nova física relativística.

“Sobre a dinâmica do elétron”: tradução comentada²⁴

Parece à primeira vista que a aberração da luz e os fenômenos ópticos associados proporcionam um meio de determinar o movimento absoluto da Terra, ou melhor, seu movimento, não em relação a outras estrelas, mas em relação ao éter.²⁵ Este não é o caso: os experimentos em que consideramos apenas os efeitos de primeira ordem da aberração foram inicialmente

segunda carta revela que Poincaré não pode receber Lorentz devido a problemas de saúde. Assim, ele optou em apresentar suas considerações em três cartas. Posteriormente, estas considerações iriam compor “Sur la dynamique de l’électron” [“Sobre a dinâmica do elétron”].

- 22 Destes resultados, Bellac (2010, p. 333) diz que o mais significativo para os físicos contemporâneos foi a criação do Grupo de Lorentz (SO (1,3)) e sua respectiva álgebra de Lie (so (1,3)) que desempenha um papel fundamental na mecânica quântica e nas teorias de calibre. Sobre as implicações do grupo de Lorentz, além de Bellac (2010), ver Hsu e Zhang (2001) e Hsu e Hsu (2006).
- 23 Recorde que o ensaio de Einstein seria submetido no dia 30 de junho, 25 dias depois da publicação do ensaio de Poincaré, e apenas publicado em setembro de 1905.
- 24 Poincaré, H. Sur la dynamique de l’électron. *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, t. 140, p. 1504-1508, 5 juin 1905.
- 25 A teoria eletromagnética proposta por Maxwell assumia que todas as grandezas eletromagnéticas deveriam ser referidas em relação a um observador em repouso em relação ao éter (Lorentz, 1895; Poincaré, 1902; Whittaker, 1953; Darrigol, 1994, 2000; Miller, 1997a; Martins, 2005a, 2015). Quando esses fenômenos eram estudados da perspectiva de um observador em movimento em relação ao éter, ficou constatado que essas equações não eram covariantes em Galileu (em outras palavras, não satisfaziam a formulação mecânica do princípio da relatividade), portanto, seria possível evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter (e, também em relação ao espaço absoluto). Para detalhes, ver Miller (1997a, p. 18-23).

malsucedidos e uma explicação foi facilmente encontrada,²⁶ mas Michelson, que imaginou um experimento através do qual os termos que dependem do quadrado da aberração poderiam ser medidos, também não teve sorte.²⁷ Parece que essa incapacidade de demonstrar movimento absoluto é uma lei geral da natureza.²⁸

Uma explicação foi proposta por Lorentz, que introduziu a hipótese de uma contração de todos os corpos na direção do movimento da Terra; essa contração explicaria o experimento Michelson-Morley e todos os que foram conduzidos até aquela ocasião,²⁹ entretanto havia

26 Em 1893, o físico britânico Joseph Larmor tentou conciliar as equações de Maxwell com esses resultados nulos (Darrigol, 1994, 2000; Miller, 1997a; Martins, 2015) e apresentou seus resultados em um ensaio intitulado “A dynamical theory of the electric and luminiferous médium” (Larmor, 1893). Nesse trabalho, Larmor (1893) apresenta o estado da arte da teoria eletromagnética e sugere que os resultados nulos dos experimentos poderiam significar que as leis do eletromagnetismo também fossem covariantes. Em 1895, Poincaré publicou um artigo onde discutia as ponderações de Larmor e nas conclusões, sugeriu que “é impossível medir o movimento absoluto da matéria em relação ao éter: tudo o que podemos evidenciar é o movimento da matéria ponderável em relação à matéria ponderável” (Poincaré, 1895, p. 412). Ainda em 1895, H. Lorentz propôs sua eletrodinâmica dos condutores em movimento em relação ao éter (Lorentz, 1895; Miller, 1997a; Darrigol 2000; Martins, 2015; Provost, Bracco, 2016). Nesse trabalho, Lorentz (1895), usou duas premissas: que as transformações do espaço deveriam respeitar a covariância de Galileu e que as leis do eletromagnetismo deveriam ser covariantes para todos referenciais inerciais, para uma aproximação de primeira ordem em v/c (Lorentz, 1895; Miller, 1997a; Darrigol, 2000, Martins, 2015; Provost, Bracco, 2016) e obteve as seguintes transformações (válidas em primeira ordem) para os campos elétricos e magnéticos (Lorentz, 1895, p. 35):

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{B}' = \vec{B} - \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c^2}$$

Essas premissas, levaram Lorentz a obter uma nova transformação para tempo, dada por (Lorentz, 1895, p. 49):

$$t' = t - \frac{vx}{c^2}$$

Lorentz chamou essa transformação de *tempo local* (Lorentz, 1895, p. 82) e não lhe atribuiu um significado físico, considerando-a apenas uma transformação matemática conveniente (Lorentz, 1895; Martins, 2015; Provost, Bracco, 2016). Foi Poincaré, em 1900, em um ensaio intitulado “La theorie de Lorentz et le principe de la reaction” (Poincaré, 1900a), que identificou o tempo local de Lorentz com o processo de sincronização de relógios entre observadores em movimento relativo, usando sinais luminosos (Poincaré, 1900a; Miller, 1997a; Darrigol, 2000; Bellac, 2010; Martins, 2015; Provost, Bracco, 2016; Popp, 2020). Para detalhes sobre o trabalho de Lorentz de 1895 ver: Miller (1997a, p. 30-38) e Provost e Bracco (2016).

27 Trata-se do famoso experimento de Michelson-Morley (M-M) realizado em 1887.

28 Como vimos, essa conclusão já era sugerida por Larmor (1893) e por Poincaré (1895, 1900a). Também convém observar que na versão longa, Poincaré chama essa lei geral de *postulado da relatividade*: “Parece que essa impossibilidade de demonstrar experimentalmente o movimento da Terra é uma lei geral da natureza; somos naturalmente levados a admitir essa lei, que chamaremos de *Postulado da Relatividade*, e a admiti-la sem restrições” (Poincaré, 1906, p. 129; destaque nosso).

29 Na verdade, a hipótese da contração de Fitzgerald (proposta em 1889, mas com pouco impacto) e de Lorentz (proposta em 1892, que teve maior repercussão) apresentava uma explicação exata para os resultados do experimento de M-M (Lorentz, 1892; Darrigol, 1994; Miller, 1997a; Martins, 2015). Lorentz tentou justificar essa contração como uma ação do éter sobre as moléculas na direção longitudinal do movimento (Lorentz, 1892; Darrigol, 1994; Miller, 1997a; Martins, 2015); entretanto, Poincaré (1899) criticou essa hipótese considerando-a *ad hoc* (Poincaré, 1900b; Lorentz, 27 May 1904; Martins, 2015). Em 1900, Larmor (1900) conseguiu deduzir transformações válidas até a segunda ordem em v/c . Posteriormente, Lorentz (27 May 1904) e Poincaré (1905) obtiveram as transformações exatas e podemos observar que as transformações do espaço e do tempo que Larmor deduziu (como uma aproximação de segunda ordem) eram exatas. Porém, o trabalho de Larmor não pode ser considerado como uma antecipação das transformações de Lorentz, porque “essas equações só se tornam úteis, no eletromagnetismo, quando são acompanhadas pelas transformações corretas de grandezas

possibilidade que outros experimentos ainda mais delicados e mais facilmente concebidos do que os executados pudessem detectar o movimento absoluto da Terra. Mas, se a impossibilidade de tal descoberta é considerada altamente provável, pode-se prever que essas experiências, se elas puderem ser realizadas, darão um resultado negativo. Lorentz procurou complementar e alterar sua hipótese³⁰ de modo a ajustá-la ao postulado da impossibilidade total de determinar o movimento absoluto. Isso ele conseguiu fazer em seu artigo intitulado “Fenômenos eletromagnéticos em um sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz” (Lorentz, 27 maio 1904).³¹

A importância dessa questão me incentivou a retomá-la; e os resultados obtidos concordam em todos os pontos importantes com os de Lorentz; eu só fui levado a modificá-los e completá-los em alguns pontos específicos.³²

eletromagnéticas (campo elétrico, campo magnético, densidade de corrente etc.) e Larmor não conseguiu chegar a esse conjunto de transformações” (Martins, 2015, p. 126).

- 30 Hipótese da contração de 1892 que Poincaré (1900b) criticou como hipótese artificial (*ad hoc*).
- 31 Poincaré deixa implícito que Lorentz estava buscando e teria alcançado a covariância das equações do eletromagnetismo em seu ensaio de 1904. Porém, isso não é verdade (Lorentz, 1921; Keswani, 1965a, 1965b; Mehra, 2001; Damour, 2017). Como observaram o próprio Lorentz (1921), Keswani (1965a; 1965b) e Goldberg (1970), Poincaré costumava atribuir a prioridade de algumas de suas pesquisas (e de outros pesquisadores) à Lorentz, minimizando sua própria contribuição original. O trabalho de 1904 de Lorentz não buscava obter a covariância das leis do eletromagnetismo em consonância com o princípio da relatividade (Lorentz, 27 May 1904, 1921; Keswani, 1965a, 1965b; Goldberg, 1969; Cormmach, 1970; Dugas, 1988; Mehra, 2001; Logunov, 2004), mas possibilitar uma explicação para os resultados do experimento de M-M e estudar a mudança da inércia de um elétron acelerado. A covariância de Lorentz foi demonstrada, independentemente por Poincaré (1905, 1906. Ver: Lorentz, 1921; Whittaker, 1953; Keswani, 1965a, 1965b; Goldberg, 1969; Dugas, 1988; Giannetto, 1999; Mehra, 2001; Logunov, 2004, Damour, 2005, 2012, 2017; Katzir, 2005a; Bellac, 2010) e Einstein (1905a. Ver: Lorentz, 1921; Keswani, 1965a, 1965b; Goldberg, 1967, 1969, 1970; Cormmach, 1970; Dugas, 1988; Miller, 1997a, Popp, 2020).
- 32 Novamente Poincaré minimiza a sua contribuição para a eletrodinâmica de Lorentz. Em 1905, Poincaré enviou pelo menos quatro cartas para Lorentz, sendo que em três delas, ele discute o trabalho de Lorentz de 1904. Na segunda carta, escrita em maio de 1905, Poincaré (1905c) adverte Lorentz que as transformações da densidade de carga são incompatíveis com a conservação da carga elétrica. Poincaré também considera a determinação da função l (que depende da velocidade relativa e Lorentz determinou que seria igual a identidade, i. e., 1) é insatisfatória. Na terceira carta, Poincaré (1905d) anuncia a Lorentz que usando um outro método (teoria de grupos), ele determinou de forma rigorosa que a função l deve ser igual a identidade. Porém, Poincaré (1905d) ainda diz que não conseguiu formular um argumento que sustente a fórmula de Lorentz para variação da inércia do elétron acelerado. Na quarta carta, Poincaré (1905e), finalmente anuncia que conseguiu superar todas as dificuldades anteriores: “Meus resultados confirmam totalmente os seus, pois a compensação perfeita (que impede a determinação experimental do movimento absoluto) só pode ser feita completamente sob a suposição $l = 1$ ” (Poincaré, 1905e) e que esse resultado exige a existência de forças de natureza não elétricas, que hoje chamamos de Tensões de Poincaré. Para uma discussão acerca das três cartas de Poincaré, veja: Miller (1997b) e Popp (2020). Para uma discussão sobre as Tensões de Poincaré, veja o capítulo 28 de Feynman, Leighton e Sands (2008). Por essa pequena digressão, percebemos que as investigações de Poincaré foram mais do que simples ajustes. Poincaré aplicou um procedimento original, envolvendo teoria de grupos e álgebras de Lie, para tentar deduzir a função l que poderia coincidir ou não com o resultado de Lorentz. Além disso, Poincaré comparou a proposta de Lorentz com a proposta de Langevin e buscou um argumento que permitisse decidir qual modelo era o mais adequado já que as medidas sobre a variação de massa do elétron acelerado, realizadas por Kauffmann, eram compatíveis com os modelos de Lorentz, Langevin e Abraham. Posteriormente, ainda em 1905, Einstein chegaria ao mesmo resultado utilizando um argumento de simetria física.

O ponto essencial, estabelecido por Lorentz, é que as equações de campo eletromagnético não são alteradas por uma certa transformação (que doravante chamarei pelo nome de Lorentz³³), que tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} x' &= \gamma l(x - \beta t) & y' &= ly \\ t' &= \gamma l(t - \beta x) & z' &= lz \end{aligned} \quad (01)$$

x, y, z são as coordenadas [espaciais] e t o tempo antes da transformação, x', y', z' e t' [são as coordenadas] após a transformação. Além disso, β ³⁴ é uma constante que define a transformação:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

E l é uma função arbitrária de β .³⁶ Pode-se ver que, nesta transformação, o eixo x desempenha um papel particular, mas obviamente pode-se construir uma transformação em que esse papel seria desempenhado por qualquer linha reta que passe pela origem.³⁷ O conjunto de todas essas transformações, juntamente com o conjunto de todas as rotações do espaço, deve formar um grupo;³⁸ mas para que isso aconteça, precisamos de $l = 1$; portanto devemos assumir $l = 1$ e essa é uma consequência que Lorentz deduziu de outra forma.³⁹

Seja ρ a densidade elétrica do elétron, v_x, v_y, v_z ⁴⁰ a velocidade antes da transformação; obtemos as mesmas quantidades ρ', v'_x, v'_y, v'_z após a transformação

33 Foi Poincaré que cunhou o termo transformações de Lorentz (Bassalo, 2006; Martins, 2015). O termo transformações de Galileu foi cunhado em 1909 pelo físico Philip Frank (Bassalo, 2006).

34 Na notação de Poincaré, ele utiliza a letra ϵ . β é definido como a razão entre a velocidade relativa entre os sistemas inerciais e a velocidade da luz no vácuo; em notação moderna:

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Nesse trabalho Poincaré escolheu um sistema de coordenadas onde a velocidade da luz no vácuo é igual a unidade, *i. e.*, $c = 1$.

35 Na notação de Poincaré, a letra utilizada é o k . Que ficou conhecido como fator gama de Lorentz ou, simplesmente, fator de Lorentz.

36 A função l corresponde à função $\varphi(v)$ empregada por Einstein em seus dois ensaios sobre o princípio da relatividade (Einstein, 1905a, 1907, 2005).

37 Essa propriedade decorre da isotropia do espaço. Poincaré abordou essa questão em diversos ensaios, com destaque para o capítulo 4 e 5 de *A ciência e a hipótese* (Poincaré, 1902).

38 Esse foi o procedimento metodológico que Poincaré adotou para estabelecer a covariância de Lorentz e que é sumarizado na segunda carta a Lorentz (Poincaré, 1905c). Na versão estendida desse artigo, publicada em 1906, Poincaré delinea esse procedimento na seção 4 (Poincaré, 1906, p. 144-146).

39 Como vimos pelas três cartas de Poincaré (1905c, 1905d, 1905e), a dedução de Lorentz não era satisfatória. Foi Einstein, usando um argumento de simetria física, que propôs um método alternativo, mas igualmente rigoroso para deduzir o valor de l , a saber: "Por razões de simetria, é agora evidente que o comprimento de uma dada haste [que Einstein denota pela letra l] movendo-se perpendicularmente ao seu eixo, medido no sistema estacionário, deve depender apenas da velocidade e não da direção e do sentido do movimento. O comprimento da haste móvel medido no sistema estacionário não muda, portanto, se v e $-v$ forem trocados, daí segue que $l/\varphi(v) = l/\varphi(-v)$, ou $\varphi(v) = \varphi(-v)$. Segue-se desta relação e da encontrada anteriormente que $\varphi(v) = 1$ " (Einstein, 1905a, p. 901-902).

40 Na notação de Poincaré as componentes da velocidade são: ξ, η, ζ . Em seus ensaios, Poincaré não emprega a notação vetorial de Gibbs-Heaviside, embora estive familiarizado com este formalismo (Walter, 2007).

$$\begin{cases} \rho' = \frac{\gamma}{l^3} \rho (1 - \beta v_x) & \rho' v'_x = \frac{\gamma}{l^3} \rho (v_x - \beta) \\ \rho' v'_y = \frac{\rho v_y}{l^3} & \rho' v'_z = \frac{\rho v_z}{l^3} \end{cases} \quad (02)$$

Essas equações diferem um pouco daquelas que foram encontradas por Lorentz.⁴¹

Seja agora f_x, f_y, f_z e f'_x, f'_y, f'_z as três componentes da força antes e depois da transformação, e a força é expressa por unidade de volume; eu encontrei

$$\begin{cases} f'_x = \frac{\gamma}{l^5} (f_x - \beta \vec{f} \cdot \vec{v}) \\ f'_y = \frac{f_y}{l^5} \\ f'_z = \frac{f_z}{l^5} \end{cases} \quad (03)$$

Estas fórmulas são ligeiramente diferentes das de Lorentz;⁴³ o termo adicional em $\vec{f} \cdot \vec{v}$ nos lembra de um resultado obtido anteriormente por Liénard.⁴⁴

Se denotarmos agora por F_x, F_y, F_z e F'_x, F'_y, F'_z as componentes de uma força, não expressa por unidade de volume, mas pela massa unitária do elétron, obtemos

$$\begin{cases} F'_x = \frac{\gamma}{l^5} \frac{\rho}{\rho'} (F_x - \beta \vec{F} \cdot \vec{v}) \\ F'_y = \frac{\rho}{\rho'} \frac{F_y}{l^5} \\ F'_z = \frac{\rho}{\rho'} \frac{F_z}{l^5} \end{cases} \quad (04)$$

41 Em seu ensaio, Lorentz definiu a densidade de carga, como (Lorentz, 1904, p. 813): $\rho' = \frac{\gamma}{l^3} \rho$ E a transformação das velocidades como (Lorentz, 1904, p. 813):

$$v'_x = \frac{1}{\gamma} v_x, \quad v'_y = \frac{1}{\gamma} v_y, \quad v'_z = \frac{1}{\gamma} v_z$$

Porém, substituindo a transformação da densidade de carga elétrica deduzida por Poincaré (02), obtemos as transformações (relativísticas) da velocidade

$$v'_x = \frac{(v_x - \beta)}{(1 - \beta v_x)}, \quad v'_y = \frac{v_y}{\gamma(1 - \beta v_x)}, \quad v'_z = \frac{v_z}{\gamma(1 - \beta v_x)}$$

que diferem com as deduzidas por Lorentz.

42 Poincaré denota as componentes da força pelas letras X, Y, Z.

43 As equações obtidas por Lorentz foram (Lorentz, 27 May 1904, p. 835):

$$f'_x = \frac{f_x}{l^2}, \quad f'_y = \frac{f_y}{\gamma l^2}, \quad f'_z = \frac{f_z}{\gamma l^2}$$

44 Trata-se dos potenciais Liénard-Wiechert que descrevem o movimento de uma carga elétrica pontual a partir dos potenciais escalar e vetorial do campo eletromagnético. O trabalho que Poincaré menciona é o ensaio "Champ électrique et magnétique produit par une charge concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque" (Liénard, 1898).

Lorentz também foi levado a assumir que o elétron em movimento assume a forma de um esferoide oblato; essa é também a hipótese feita por Langevin,⁴⁵ no entanto, enquanto Lorentz assumiu que dois eixos do elipsoide permanecem constantes, o que é consistente com a hipótese $l = 1$, Langevin assumiu que o volume permanece constante. Ambos os autores mostraram que essas duas hipóteses são consistentes com os experimentos de Kaufmann, bem como a hipótese original de Abraham (elétron esférico). A hipótese de Langevin teria a vantagem de ser autossuficiente, porque basta considerar o elétron como deformável e incompressível, e explicar que ele toma uma forma elipsoidal quando se move. Mas eu provei, em concordância com Lorentz, que essa hipótese [de Langevin] é incompatível com a impossibilidade de se detectar o movimento absoluto a partir de um experimento. Como eu disse, isso ocorre porque $l = 1$ é o único caso para o qual todas as transformações de Lorentz formam um grupo.⁴⁶

Mas como com a hipótese de Lorentz, a concordância entre as equações não é autossuficiente;⁴⁷ devemos atribuir, simultaneamente, uma possível explicação para a contração

45 Os estudos de Lorentz e Zeeman sobre as propriedades do elétron, que levaram a concepção do efeito Zeeman, permitiram, em 1897, aos físicos determinarem o valor da razão e/m (carga do elétron/massa do elétron) (Whittaker, 1953; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Em 1898 e 1900, Phillip Lenard, que havia sido assistente de Hertz, determinou a razão e/m para os raios beta, que alcançavam velocidades de até 1/3 da velocidade da luz, constatando que havia uma variação na inércia do elétron (uma vez que nessa época já era consenso entre os pesquisadores que a carga elétrica é um invariante) (Whittaker, 1953; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Em 1901, o físico alemão Walter Kauffmann estudou cargas elétricas com velocidades iguais à $0,8c$ e $0,9c$ confirmando a variação da razão e/m detectada por Lenard (Whittaker, 1953; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). O próprio Kauffmann derivou uma função para inércia do elétron em função de v/c , porém, em 1902, sua análise foi criticada pelo seu compatriota, o físico Max Abraham, pois sua equação não apresentava uma boa concordância com os resultados empíricos (Whittaker, 1953; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Abraham procurou uma nova formulação teórica, tomando como premissa que os elétrons são análogos a esferas rígidas não deformáveis e a partir da introdução do vetor momento eletromagnético, ele provou que a variação da inércia do elétron depende da direção em que a força eletromagnética atua sobre ele (Whittaker, 1953; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Assim, Abraham definiu dois tipos de inércia para o elétron: a *massa longitudinal*, que é a variação que a inércia do elétron sofre quando a força atua paralela a direção do seu movimento; e a *massa transversal*, que corresponde à variação sofrida pela inércia do elétron quando a direção da força é perpendicular ao movimento do elétron (Miller, 1997a; Darrigol, 2000). As funções derivadas por Abraham apresentavam boa concordância com os dados empíricos (Whittaker, 1953; Miller, 1997a; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Em 1904, Lorentz derivou a partir de seu modelo eletrodinâmico novas funções para as massas longitudinal e transversal do elétron e que eram compatíveis com os dados experimentais (Lorentz, 27 May 1904, p. 828-830; Miller, 1997a; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Na hipótese de Lorentz (27 May 1904) o elétron, idealizado como esférico, deveria sofrer uma contração, assemelhando-se a um elipsoide oblato. A única restrição que Lorentz exigiu é que os eixos do sistema de referência se mantivessem constantes. Porém, essa hipótese foi criticada por Abraham, que mostrou que caso isso realmente acontecesse, o elétron não poderia manter a sua estabilidade (Miller, 1973, 1986, 1997a; Darrigol, 2000). Langevin (1905) tentou contornar esse problema, supondo que o elétron pudesse ser deformado, mas desde que seu volume se mantivesse constante. Para detalhes sobre o modelo de Abraham ver: Martins (2005a) e Miller (1997a, p. 51-57). Sobre os dados de Kaufmann, conferir Miller (1997, p. 57-62). Sobre as críticas de Abraham a Lorentz, ver Miller (1997a, p. 70-73).

46 Como Poincaré observou na segunda carta a Lorentz (Poincaré, 1905c), o modelo de Langevin exigia que l fosse igual a $\sqrt[3]{\gamma}$. O modelo de Abraham (que Poincaré não credita explicitamente) exige que l seja igual a γ , porém essa escolha leva “a *consequências inaceitáveis*” (Poincaré, 1905c).

47 Pois, como alegou Abraham, as forças eletromagnéticas são incapazes de preservar a estabilidade do elétron (Miller, 1997a, p. 70-73).

do elétron, que consiste em supor que o *elétron, deformável e compressível, é submetido a uma pressão externa*⁴⁸ constante, cujo trabalho é proporcional às mudanças de volume.⁴⁹

Eu mostrei, aplicando o princípio de mínima ação, que, nessas condições, a compensação é completa, assumindo que a inércia é um fenômeno exclusivamente eletromagnético⁵⁰, como geralmente é admitido desde os experimentos de Kaufmann e, com exceção da pressão constante que acabei de mencionar e que atua sobre o elétron, todas as forças são de origem eletromagnética.⁵¹ Temos, portanto, a explicação da impossibilidade de demonstrar o movimento absoluto e a contração de todos os corpos na direção do movimento terrestre.⁵²

48 Como apontou Miller (1973, p. 300), Poincaré cometeu um pequeno equívoco: esta pressão constante é *interna*. Esse erro foi corrigido na versão ampliada de 1906.

49 Trata-se das tensões de Poincaré, que são forças de natureza não elétrica que atuam distendendo o elétron. Segundo Miller (1973, p. 300-301), Poincaré fez uma analogia entre o elétron e uma massa fluidica em equilíbrio dinâmico, tema que Poincaré investigou exaustivamente. Para mais detalhes sobre as tensões de Poincaré e sua importância para física moderna e contemporânea, ver Cuvaj (1968).

50 Em 1895, Larmor sugeriu que a matéria fosse formada de cargas elétricas e, por essa razão, toda inércia fosse de origem eletromagnética. Em 1897, Thompson evidenciou a existência do elétron e a hipótese de Larmor parecia corroborada: toda a inércia da matéria era de origem eletromagnética (Miller, 1997a; Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Por outro lado, a partir dos estudos sobre a variação de inércia do elétron com a velocidade, em 1901, Kaufmann propôs que o elétron apresentaria duas massas: uma de origem mecânica, que é invariável, comporia cerca de 2/3 da massa total do elétron, chamada de massa real; e outra de origem eletromagnética, compondo o 1/3 restante da massa total, e que varia com a velocidade, e era chamada de massa aparente (Miller, 1997a, Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Em 1901, Abraham criticou a análise de Kaufmann e mostrou que toda a massa do elétron era de origem eletromagnética (Miller, 1997a, Darrigol, 2000; Martins, 2005a, 2015). Ainda não estava claro porque a massa eletromagnética variava com a velocidade. Em 1905, Albert Einstein, explorou o conceito de massa eletromagnética transversal e longitudinal e deduziu novas funções para a variação da inércia eletrônica (Einstein, 1905a; Miller, 1997a; Martins, 2015). A dedução de Einstein está incorreta, pois Einstein usou dois referenciais inerciais distintos, como se fossem um único, para fazer análise (Cullwick, 1981, p. 171-173; Miller, 1997a, p. 307-312), porém, em 1906, Planck corrigiu a dedução de Einstein, mostrando que ela era idêntica à obtida por Lorentz (Miller, 1997a, p. 310-311; Martins, 2015, p. 238-240). Apesar da incongruência, Einstein fez uma importante previsão: “observamos que esses resultados quanto à massa também são válidos para pontos materiais ponderáveis, pois um ponto material ponderável pode ser transformado em elétron (no nosso sentido da palavra) pela adição de uma carga elétrica, por menor que seja” (Einstein, 1905a, p. 919). Em outras palavras, Einstein estabeleceu que a variação de inércia com a velocidade era uma propriedade que poderia ser evidenciada para qualquer corpo material. Outra hipótese importante de Einstein, aparece em seu “A inércia de um corpo depende do seu conteúdo energético”? (Einstein, 1905a). Embora esse ensaio apresente algumas incongruências (Planck, 1907; Ives, 1952; Martins, 2015, p. 239-240), Einstein (1905b) sugeriu que a energia apresenta uma inércia e por essa razão, corpos em alta velocidade apresentariam um conteúdo inercial maior, pois haveria um aumento da inércia de sua energia cinética. Hoje sabemos que essa equação não se aplica a todas formas de energia e nem a corpos extensos submetidos a tensões (Planck, 1907; Martins, 1989, 2012, p. 120-128, 2015, p. 239-240). Sobre a inércia da energia, recomendamos ver: Martins (1989, 2012, p. 120-128, 2015, p. 239-240), Langevin (1913b) e Lorentz (1912).

51 Esse é um resultado importante: Abraham e alguns físicos alemães defendiam que as leis da física deveriam ser todas reduzidas aos fenômenos eletromagnéticos (Whittaker, 1953; Miller, 1997a; Darrigol, 2000; Martins, 2015). “Poincaré, no entanto, mostrou que isso era impossível e que era necessário introduzir forças que não tinham natureza eletromagnética na teoria do elétron” (Martins, 2015, p. 158).

52 Há outra implicação importante, envolvendo as tensões de Poincaré: a inércia da radiação. Em 1904, Abraham calculou a variação de pressão exercida pela radiação em um refletor (espelho) ideal em movimento e concluiu que quando espelho se aproxima do feixe, há um aumento da pressão, e quando ele se afasta, há uma redução da pressão (Miller, 1997a, p. 298-303; Martins, 2015, p. 142). Em 1904, Hasenöhrl provou, estudando a distribuição de forças, que uma caixa totalmente espelhada em movimento e cheia de radiação teria uma inércia maior do que uma caixa idêntica em movimento e sem radiação (Martins, 2015, p. 141-142). Abraham mostrou que embora o aumento da inércia ocorresse, o valor previsto por Hasenöhrl estava incorreto (Fadner,

Mas isso não é tudo: Lorentz, no trabalho citado, considerou necessário completar sua hipótese ao assumir que todas as forças, qualquer que seja sua origem, são afetadas pela translação da mesma maneira que as forças eletromagnéticas e, conseqüentemente, o efeito produzido em suas componentes pela transformação de Lorentz ainda é definido pelas equações (04).⁵³

Era importante examinar essa hipótese mais de perto e, em particular, examinar quais mudanças ela exigiria que fizéssemos sobre a lei da gravitação.⁵⁴ É isso que eu procurei determinar; inicialmente, fui levado a supor que a propagação da gravitação não é instantânea, mas acontece com a velocidade da luz. Isso parece estar em desacordo com os resultados obtidos por Laplace, que anunciou que esta propagação é, se não instantânea, pelo menos é muito mais rápida que a da luz.⁵⁵ Mas, na realidade, a questão colocada por Laplace difere consideravelmente daquilo que nos ocupa aqui. A introdução de uma velocidade finita de propagação foi a única mudança que Laplace introduziu para a lei de Newton. Aqui, ao contrário, essa mudança é acompanhada por várias outras; é possível, e é o que acontece de fato, que ocorra uma compensação parcial entre elas.

1988; Martins, 2015, p. 141-142). Em 1905, Hasenöhl corrigiu seu cálculo e mostrou que o aumento de inércia devido a radiação era de $(4/3).E/c^2$. Abraham, fazendo considerações sobre o momento da caixa, também concluiu que o aumento da inércia era de $(4/3).E/c^2$ (Fadner, 1988; Martins, 2015, p. 142-143). Todos estes cálculos estão corretos, porém, eles são incompletos (Martins, 2015, p. 143). Tanto Hasenöhl quanto Abraham incluíram apenas as contribuições de origem eletromagnética, porém, é necessário levar em conta o trabalho negativo resultante das tensões de Poincaré e que é igual à $(1/3).E/c^2$. Desta forma, o aumento total da inércia da caixa espelhada em movimento e cheia de radiação será:

$$\Delta m = \frac{4}{3} \frac{E}{c^2} - \frac{1}{3} \frac{E}{c^2}$$

$$\therefore \Delta m = \frac{E}{c^2}$$

que é a relação massa-energia usual da teoria da relatividade especial. Para mais informações sobre a relação massa-energia, ver: Ives (1952), Martins (1989, 2005a) e Fadner (1988).

- 53 Como observamos anteriormente, Lorentz não exigiu um princípio de covariância, essa exigência foi feita por Poincaré, por meio do princípio da relatividade (Lorentz, 1921; Keswani, 1965a, 1965b; Mehra, 2001) e parcialmente por Einstein em 1905, já que ele só manifestaria preocupação de estender esse princípio para os fenômenos gravitacionais à partir de 1912 (Mehra, 2001; Katzir, 2005a).
- 54 Poincaré nos proporciona a primeira tentativa de construção de uma teoria relativística da gravitação (Katzir, 2005b).
- 55 Laplace (1805) determinou que a lei da gravitação newtoniana exigiria que a velocidade de propagação da gravidade fosse maior ou igual à $7,45.10^6$ c. Esse valor também era previsto pela teoria cinética da gravitação como a proposta por Le Sage. Para detalhes sobre o cálculo de Laplace, ver: “Laplace on the speed of gravity” (Brown, s.d.). Sobre a teoria cinética da gravitação ver: Martins (1998b, 2002a, 2002b), Edwards (2002) e Whittaker (1953, p. 144-152).

Quando falamos da posição ou velocidade do corpo atraente, será a posição ou a velocidade no momento em que a *onda gravitacional*⁵⁶ deixa o corpo;⁵⁷ quando falamos sobre a posição ou a velocidade do corpo atraído, será a posição ou a velocidade no momento em que esse corpo foi atingido e atraído pela onda gravitacional que emana do outro corpo; é claro que o primeiro instante precede o segundo.

Então, se x, y, z são as projeções nos três eixos do vetor que une as duas posições, se a velocidade do corpo atraído for v_x, v_y, v_z e a do corpo atraente v_{1x}, v_{1y}, v_{1z} , as três componentes da atração (que eu ainda posso chamar de F'_x, F'_y, F'_z) são funções de $x, y, z, v_x, v_y, v_z, v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}$. Perguntei-me se era possível determinar essas funções de forma a serem afetadas pela transformação de Lorentz de acordo com as equações (04) e chegar à lei comum da gravitação, sempre que as velocidades $v_x, v_y, v_z, v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}$ são suficientemente pequenas para que se possa negligenciar os quadrados em relação ao quadrado da velocidade da luz.

A resposta foi afirmativa. Verificou-se que a atração corrigida consiste em duas forças, uma paralela ao vetor x, y, z , a outra à velocidade x, y, z .

A diferença para a lei comum da gravitação, como eu disse, é da ordem v^2 se assumirmos, como fez Laplace, que a velocidade de propagação é a da luz, essa discrepância é de ordem \bar{v} , isto é, 10.000 vezes maior. Não é absurdo, portanto, à primeira vista, assumir que as observações astronômicas não são precisas o suficiente para detectar uma diferença tão pequena quanto a que imaginamos. Mas isso é algo que somente uma discussão completa nos permitirá decidir.⁵⁸

56 As narrativas populares afirmam que Einstein foi o primeiro pesquisador a prever a existência de ondas gravitacionais, em 1916, porém trata-se de um mito (Nunes, Queirós, 2020b, p. 552-555). O termo onda gravitacional já aparecia na literatura científica e referia-se a qualquer teoria da gravitação onde a velocidade de propagação da gravidade fosse finita (Nunes, Queirós, 2020b, p. 552-555). Poincaré tem o mérito de ser o primeiro pesquisador a reconhecer que uma das implicações do princípio da relatividade era que a gravidade deveria se propagar à velocidade da luz (Katzir, 2005a, 2005b; Walter, 2007). Por outro lado, a previsão de ondas gravitacionais pela teoria da relatividade geral foi feita por Einstein em 1916, porém, em 1917, Levi-Civita provou que esta dedução estava incorreta, e Einstein chegou ao cálculo correto apenas em 1918 (Cattani, Maria, 1993). É importante salientar que em nenhuma dessas previsões, Einstein provou que a velocidade das ondas gravitacionais deveria ser igual à velocidade da luz, esse mérito coube a sir Arthur Eddington que, em 1922, publicou um ensaio chamado "The propagation of gravitational waves" (Eddington, 1922). Para detalhes sobre Einstein e as ondas gravitacionais ver Cattani e Maria (1993) e Nunes e Queirós (2020b, p. 552-555).

57 Sobre o conceito de onda gravitacional, Walter (2007, p. 14) explica que: "embora Poincaré tenha escrito livremente sobre uma "onda gravitacional" (*onde gravifique*), ele se absteve de especular sobre a natureza do campo aqui referido. Como um dos primeiros teóricos (com FitzGerald e Lorentz) a empregar potenciais retardados na eletrodinâmica maxwelliana, Poincaré deve ter cogitado a possibilidade de introduzir um 4-potencial gravitacional correspondente. Mas do jeito que as coisas estavam quando Poincaré submeteu este artigo para publicação em julho de 1905, ele não estava em posição de elaborar a física dos campos em termos quadridimensionais, uma vez que não possuía um 4-potencial nem um 6-vetor."

58 Em seu ensaio estendido, de 1906, Poincaré deriva diversos resultados importantes: primeiro, ele desenvolve um método de construção de invariantes relativísticos e grandezas físicas quadrimensionais (Walter, 2007). Ele também previu um avanço do periélio do planeta Mercúrio, porém o valor previsto por Poincaré era 1/3 daquele observado experimentalmente (Martins, 2015, p. 131; Katzir, 2005b). Por fim, é importante enfatizar que Poincaré não derivou apenas uma lei para gravitação, mas duas; sendo que a primeira se assemelhava às equações do campo elétrico e a segunda, às do campo magnético (Poincaré, 1906, p. 175). Para detalhes sobre a teoria gravitacional de Poincaré, o leitor poderá consultar Katzir (2005b) e Walter (2007).

Outras observações sobre o ensaio de Poincaré

A nota de Poincaré de 1905 antecipa certos aspectos da teoria da relatividade, que apareciam apenas com Einstein e Minkowski, como a construção de uma física subordinada ao *princípio da relatividade*, a rejeição do espaço absoluto, o grupo de Lorentz, a expressão (correta) das transformações de Lorentz e a primeira tentativa de estender o *princípio da relatividade* para a gravitação. Poincaré também expôs as *tensões de Poincaré*, um resultado que não aparece na exposição de Einstein e nem de Minkowski (Cuvaj, 1968). Porém, o trabalho de Poincaré não foi devidamente apreciado, pois a “escolha do meio de publicação não ajudou a divulgar a novidade dos [seus] resultados” (Damour, 2017, p. 555)⁵⁹ e a teoria da relatividade despertou pouco interesse em 1905 (Walter, 2011).⁶⁰

Algumas das contribuições de Poincaré, que hoje consideramos como resultados fundamentais da teoria da relatividade, somente aparecem em seu ensaio estendido, porém obscuro, de 1906. São elas (Damour, 2017, p. 559):

1. A lei relativística de adição de velocidades;
2. A lagrangiana relativística do elétron;
3. O entendimento das transformações de Lorentz como “rotações” em um “espaço 4-dimensional” com coordenadas “ $x, y, z, tv - 1$ ” e o desenvolvimento de um método que permite a construção de invariantes relativísticos a partir destas “rotações”;
4. A álgebra de Lie do grupo de Lorentz;
5. Uma descrição mais explícita da classe das leis da força gravitacional relativisticamente invariante, de ação à distância, entre duas massas (movendo-se arbitrariamente) e os efeitos associados a propagação de “ondas gravitacionais” entre os corpos que estão interagindo.

Da perspectiva de Poincaré, os resultados mais importantes de seu ensaio eram (Poincaré, 1905a, 1906; Damour, 2017):

1. Uma derivação dinâmica da contração de Lorentz dos elétrons em movimento (em particular, as tensões de Poincaré) (Damour, 2017, p. 555-557);
2. A definição de uma classe de leis da força gravitacional invariante relativista (Damour, 2017, p. 557-558).

Enquanto as contribuições de Poincaré para eletrodinâmica foram assimiladas e complementadas pelos trabalhos de Einstein, Sommerfeld, Minkowski e congêneres (Goldberg, 1967, 1969; Miller, 1986, 1997a; Darrigol, 2000; Walter, 2007), as hipóteses de Poincaré sobre a gravitação foram relegadas ao ostracismo com a aceitação e o sucesso da teoria da relatividade geral. Como a nota de Poincaré é bastante vaga sobre esse tópico, gostaríamos de discutir alguns aspectos delas.

59 Uma análise sobre as publicações de Poincaré mostra que alguns de seus ensaios eram publicadas em revistas de baixo impacto e voltados para a engenharia e não para a física, o que diminuía o alcance de suas publicações.

60 Um estudo cientométrico realizado por Walter (2011, p. 230-231) mostrou que a teoria da relatividade só começou a se popularizar a partir de 1912 - ano em que Poincaré faleceu -, principalmente entre os alemães, que acabaram por popularizar a abordagem de Einstein e Minkowski.

Inicialmente, convém destacar que foi em suas hipóteses sobre gravitação que Poincaré interpretou as transformações de Lorentz como rotações em um espaço quadrimensional, de forma que a forma quadrática $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ e, a partir dessas considerações, desenvolveu um método que permite a construção de invariantes relativísticos e grandezas físicas 4-dimensionais (Poincaré, 1906; Logunov, 2004; Damour, 2017). Embora Poincaré não tenha notado, ele derivou as transformações do 4-momento e da massa maupertuisiana⁶¹ (Logunov, 2004). A impressão que temos ao ler as hipóteses da gravitação é que Poincaré ainda não tinha entendido completamente os próprios resultados (Damour, 2017, p. 558).

Isso pode ter ocorrido porque Poincaré incluiu essas hipóteses sobre gravitação de última hora,⁶² ele sabia que Laplace havia mostrado que o paradigma newtoniano exigia que gravitação se propagasse com uma velocidade milhões de vezes maior que a velocidade da luz no vácuo e isso era uma forte objeção *ao princípio da relatividade*.⁶³ Sendo um minimalista, é bastante provável que Poincaré tenha incluído essa discussão, com todas as suas incongruências, para garantir a exatidão do *princípio da relatividade* (Katzir, 2005b). Pode ser também que Poincaré não tenha “planejado bem seu artigo, mas encontrava novos resultados à medida que avançava em seus desenvolvimentos técnicos, e os incorporava sem voltar e reescrever os primeiros parágrafos uma maneira mais lógica” (Damour, 2017, p. 558).

Seja qual for a explicação, o fato é que o programa gravitacional de Poincaré é a parte mais sensível de seu trabalho, apresentando algumas incongruências. Por exemplo, em sua análise, Poincaré considerou a massa gravitacional como tendo uma natureza da massa inercial. Essa hipótese era plausível, porque “em 1905, quando Poincaré elaborou seu exame da gravitação, a relação entre a massa inercial e a gravitacional na matéria radioativa ainda não havia sido examinada em laboratório” (Katzir, 2005b, p. 27). Entretanto, em 1907, Planck teorizou que a inércia da energia também era uma forma de massa gravitacional (Whittaker, 1953). Ainda em 1907, Einstein estabeleceu o princípio da equivalência e previu que a gravidade alteraria o período dos relógios e o comprimento de onda da luz (Einstein, 1907, 2005). E, em 1909, Eötvös, Pék e Feeke forneceram evidências sobre a equivalência entre massa inercial e massa gravitacional ao estudar emissões radioativas, pesquisa que foi agraciada com o prêmio Göttingen de 1909⁶⁴ (Whittaker, 1953; Katzir, 2005b). Outro problema da teoria gravitacional de Poincaré reside no fato de que ela não pode ser falsificada (no sentido popperiano). As equações gravitacionais que Poincaré derivou apresentam dois parâmetros livres e, por essa razão, cada um desses parâmetros podem ser variado de forma que todas as anomalias sejam absorvidas pela teoria (Katzir, 2005b; Walter, 2007).

Essas incongruências, a falta de clareza, o desinteresse em Poincaré desenvolver melhor suas hipóteses e a exigência de que uma teoria relativística da gravitação deveria ser de campo “em

61 A massa maupertuisiana é a massa associada ao momento linear. Para detalhes, ver Langevin (1913b) e Martins (1989, 2012, p. 110-118).

62 Um fato a favor dessa hipótese é que em nenhuma das três cartas que Poincaré endereçou a Lorentz, em maio de 1905, ele menciona suas investigações sobre a gravitação. Por outro lado, pode ser que Poincaré tenha endereçado outras cartas a Lorentz, discutindo os problemas gravitacionais, porém que estes documentos tenham sido perdidos.

63 Poincaré discutiu essa questão explicitamente em sua conferência de 1904.

64 Embora o comitê tenha concedido o prêmio para Eötvös, Pék e Feeke pela indicação experimental de que havia uma equivalência entre a massa inercial e gravitacional, os dados ainda não eram conclusivos (Katzir, 2005b). Foi apenas em 1922 que Eötvös, Pék e Feeke conseguiram obter dados precisos (Katzir, 2005b).

vez de meramente uma lei de propagação da atração em tempo finito como nos tratamentos de Poincaré e Minkowski” (Katzir, 2005b, p. 29),⁶⁵ levaram os físicos a abandonar as hipóteses sobre a gravitação de Poincaré. Do ponto de vista histórico e epistemológico, podemos dizer que o programa de Poincaré para a gravitação não foi refutado (ou falsificado), mas degenerou (no sentido lakatosiano), enquanto a teoria da relatividade geral apresentou um maior potencial heurístico, apesar de também apresentar incongruências.⁶⁶

Também é interessante notar que o próprio Poincaré contribuiu para degeneração de seu programa de gravitação. Ainda que ele tenha discutido suas hipóteses sobre a gravitação com seus alunos da Universidade de Sorbonne (Walter, 2007), ele nunca publicou outro ensaio expandindo suas hipóteses sobre a gravitação. Segundo Katzir (2005b), isso ocorreu porque Poincaré não estava interessado em romper com o paradigma newtoniano, mas reformá-lo:

Como sua principal preocupação era resolver a contradição entre a força e o princípio da relatividade (em sua interpretação eletrodinâmica), Poincaré se contentou com uma lei (ou leis) de força indefinida. Isso pode explicar por que ele não a comparou detalhadamente com os dados astronômicos, nem desenvolveu uma teoria independente. Em vez disso, ele se contentou em asseverar a concordância geral destas leis com as observações e em fundamentá-las com base na teoria newtoniana (Katzir, 2005b, p. 30).

Como Poincaré faleceu prematuramente em 1912, ele não acompanhou os programas alemães que buscaram construir uma nova teoria da gravitação e que alcançaram seu auge com Einstein e a formulação da teoria da relatividade geral. Por isso não sabemos como ele reagiria a esse movimento, se abandonaria suas hipóteses sobre a gravitação, rendendo-se à relatividade geral, ou as reformularia para concorrer com os seus contemporâneos alemães. Seja como for, apesar do programa de Poincaré ter degenerado, não podemos negar que seus trabalhos foram úteis para a consolidação da relatividade (Lorentz, 1921; Feyerabend, 1974; Darrigol, 1994, 1995, 1996, 2004, 2005; Giannetto, 1999; Martins, 2005b, 2012, 2015; Damour, 2005, 2012, 2017) e estudá-los ajuda a compreender o processo de construção científico e a própria natureza da ciência.

Considerações finais

Nessa tradução, tentamos apresentar as contribuições de Poincaré para a eletrodinâmica de Lorentz e a teoria da relatividade, e o estado da arte das pesquisas em 1905. Desde a publicação de Whittaker (1953), que atribui a criação da teoria da relatividade especial à Lorentz e Poincaré, os historiadores da ciência têm debatido se a prioridade pertence a Einstein ou a Lorentz-Poincaré (Darrigol, 2004). Do ponto de vista epistemológico, tanto a abordagem de Einstein quanto a de Lorentz-Poincaré são quantitativamente equivalentes (Feyerabend, 1974; Darrigol, 2004; Martins, 2005b; Bellac, 2010).⁶⁷ Por isso, não deve nos surpreender que, no começo do século XX, a escolha entre as duas abordagens era mais uma questão de conveniência:

65 Essa exigência era principalmente dos físicos alemães, que estavam à frente da reestruturação da teoria gravitacional (Katzir, 2005b; Walter, 2007).

66 Sobre essas incongruências, algumas ainda presentes, ver Nunes e Queirós (2020b).

67 Isso significa que todas as previsões quantitativas feitas pela abordagem de Einstein apresentam uma

A abordagem de Einstein tinha um aspecto epistemológico que parecia fundamental para alguns cientistas da época – a rejeição (que não era sistemática ou completamente coerente) de entidades inobserváveis. Desse ponto de vista, a abordagem de Einstein era preferível à de Lorentz e Poincaré para os empiristas. A abordagem de Lorentz e Poincaré tinha um aspecto epistemológico que parecia fundamental para outros cientistas da época – as explicações causais, que utilizavam o éter. Desse ponto de vista, a abordagem de Lorentz e Poincaré era preferível à de Einstein (Martins, 2005b, p. 515).

Por outro lado, do ponto de vista qualitativo, as duas abordagens são incomensuráveis:

Alguns dos conceitos básicos e deduções de uma teoria não têm contrapartida na outra. Alguns comentaristas, ignorando essa incomensurabilidade, interpretaram mal as relações entre as duas teorias e concluíram que a abordagem de Poincaré era basicamente inconsistente. Outros, em vez disso, exageraram a incomensurabilidade e, conseqüentemente, subestimaram as semelhanças entre as duas teorias (Darrigol, 2004, p. 615).

Por essa razão, muitas das tentativas de justificar a superioridade da abordagem de Einstein sobre a abordagem de Lorentz-Poincaré são insatisfatórias e inconsistentes. Por isso, ao invés de defrontar essa questão complexa, correndo o risco de cair em dois extremos incongruentes, iremos nos limitar a discutir as diferenças entre as intenções de Poincaré e Einstein. Inicialmente, convém apontar que o trabalho de Poincaré tinha um caráter mais reformador:

Ele [Poincaré] era agnóstico em relação às questões ontológicas levantadas por sua nova física relativística, incluindo aquelas envolvendo espaço e tempo. Para Poincaré, o princípio da relatividade era a única base e justificativa para sua nova física relativística. Ele não formulou nenhuma teoria independente, mas apenas usou o princípio da relatividade para mostrar como as teorias atuais da eletrodinâmica e da gravitação tiveram que ser modificadas para serem compatíveis com ele. A teoria de Lorentz e a teoria de Newton permaneceram como as bases fundamentais da eletrodinâmica e da gravitação (Katzir, 2005a, p. 288).

Enquanto o trabalho de Einstein tinha um caráter mais revolucionário.⁶⁸

Do ponto de vista estritamente prático, os resultados de Lorentz e Poincaré são equivalentes aos de Einstein para dinâmica e eletromagnetismo. Mas eles não se beneficiaram da revolução conceitual trazida por Einstein, a da equivalência de todos os referenciais inerciais. No que diz respeito a Poincaré, essas obras marcaram um ponto final em sua compreensão do eletromagnetismo relativístico, enquanto para Einstein representaram um ponto de partida para avançar em direção a outros resultados fundamentais: a “equivalência” massa-energia, o princípio da equivalência e a relatividade geral (Bellac, 2010, p. 333).

Por outro lado, Katzir (2005b) considera que a ausência de uma discussão sobre as implicações do princípio da relatividade na gravitação, no ensaio de 1905 de Einstein, favorecia a abordagem de Poincaré.

contrapartida na abordagem de Lorentz-Poincaré e vice-versa (Darrigol, 2004; Martins, 2005b; cf. Zahar, 1973a, 1973b, 1978; Prokhovnik, 1974; Feyrabend, 1974).

68 No sentido de kuhniano, isto é, de romper com o paradigma vigente (newtoniano).

A relatividade geral de Einstein pode ser vista como uma resposta a um problema similar: incorporar a gravitação em uma teoria relativística. Ainda assim, a ausência de qualquer tratamento da gravitação na teoria de Einstein de 1905 torna sua discussão da simultaneidade e, portanto, de toda a teoria, aberta a dúvidas e objeções, como aquelas que Poincaré levantou em 1904. O tratamento da gravitação tornou a teoria relativística de Poincaré de 1905 mais completa que a teoria de Einstein do mesmo ano (Katzir, 2005b, p. 30).

Porém, se a abordagem de Poincaré era mais “completa”, por que ela acabou degenerando, enquanto a de Einstein progrediu? A esse respeito, Katzir (2005b, p. 30) faz uma importante observação:

O fato de uma teoria ser mais completa do que outra não é necessariamente uma vantagem. Poincaré sugeriu uma teoria relativística simples do movimento uniforme que inclui a gravitação e concorda com os dados observacionais. O objetivo de Einstein era muito mais ambicioso e, a longo prazo, mais bem-sucedido. A consolidação da gravitação na teoria da relatividade de Poincaré poderia ter desencorajado os físicos a buscar uma teoria alternativa. Os requisitos de força de Poincaré eram o mínimo necessário para torná-la compatível com o princípio da relatividade e os dados empíricos conhecidos. Os físicos que viram na inclusão da gravitação na nova física relativística uma questão em aberto tinham requisitos adicionais que eventualmente levaram a uma teoria muito mais bem-sucedida. Sendo mais completa, menos revolucionária e com melhor adequação [empírica] com a teoria clássica do que a visão da gravitação de Einstein, o caminho de Poincaré não teria levado à teoria geral da relatividade. Eles poderiam se satisfazer com sua lei de força indefinida de atração que se propaga através do espaço.

Aqui está uma importante lição histórica sobre a natureza da ciência: a construção do conhecimento científico não é acumulativa e uma teoria ser mais completa do que a outra não significa que ela tenha um potencial heurístico maior. O processo de consolidação de uma teoria científica é um processo complexo, que excede os elementos empíricos-lógicos, e está longe de ser o fruto de um “método científico universal”.

[Por essa razão] é necessário estudar o contexto científico, as bases experimentais, as várias alternativas possíveis da época, e a dinâmica do processo de descoberta (ou invenção), justificação, discussão e difusão das ideias. Apenas desse modo é possível aprender como uma teoria foi justificada e por que foi aceita. Ao mesmo tempo, aprende-se muito sobre a natureza da ciência. Isso, no entanto, não pode ser feito recorrendo-se apenas a livros populares sobre história da ciência. É preciso estar informado sobre as melhores pesquisas historiográficas, para poder conhecer os inúmeros detalhes relevantes (Martins, 2006, p. XXVII).

Com este ensaio, esperamos contribuir para enriquecer as pesquisas historiográficas sobre a relatividade em língua portuguesa, fornecendo um material acessível para acadêmicos, pesquisadores e professores da educação básica e superior. Obviamente, este ensaio não abrange toda a complexa discussão histórica sobre a teoria da relatividade especial, ele é antes de tudo um convite e uma breve introdução ao tema, por essa razão, optamos por trazer um número amplo de referências bibliográficas para que o leitor possa se aprofundar neste tema.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/Ministério da Educação (UFMS/MEC), Brasil.

Referências bibliográficas

- ARRUDA, S.M.; VILLANI, A. Sobre as origens da relatividade especial: relações entre quanta e relatividade em 1905. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 13, n. 1, p. 32-47, 1996.
- AUFFRAY, J.-P. *O espaço-tempo*. Lisboa: Instituto Piaget, 1998.
- BASSALO, J. M.F. *Eletrodinâmica quântica*. 2ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006.
- BELLAC, M. The Poincaré Group. In: CHARPENTIER, E.; GHYS, E.; LESNE, A. (eds.). *The scientific legacy of Poincaré*. Rhode Island: The American Mathematical Society, 2010. p. 329-351.
- BELTRAN, M.H.R.; SAITO, F.; TRINDADE, L.S.P. (orgs.). *História da ciência: tópicos atuais*. São Paulo: Livraria da Física, 2010a.
- BELTRAN, M.H.R.; SAITO, F.; TRINDADE, L.S.P. (orgs.). *História da ciência: tópicos atuais 2*. São Paulo: Livraria da Física, 2010b.
- BELTRAN, M.H.R.; SAITO, F.; TRINDADE, L.S.P. *História da ciência para formação de professores*. São Paulo: Livraria da Física, 2014a.
- BELTRAN, M.H.R.; SAITO, F.; TRINDADE, L.S.P. (orgs.). *História da ciência: tópicos atuais 3*. São Paulo: Livraria da Física, 2014b.
- BELTRAN, M.H.R.; SAITO, F.; TRINDADE, L.S.P. (orgs.). *História da ciência: tópicos atuais 4*. São Paulo: Livraria da Física, 2016.
- BELTRAN, M.H.R.; TRINDADE, L.S.P. *História da ciência e ensino: abordagens interdisciplinares*. São Paulo: Livraria da Física, 2017.
- BELTRAN, M.H.R.; SAITO, F.; TRINDADE, L.S.P. (orgs.). *História da ciência: tópicos atuais 5*. São Paulo: Livraria da Física, 2017.
- BOSS, S.L.B.; CALUZI, J.J.; ASSIS, A.K.T.; SOUZA FILHO, M.P. A utilização de traduções de fontes primárias na formação inicial de professores: breves considerações sobre dificuldades de leitura e entendimento. In: GATTI, S.R.T.; NARDI, R. (org.). *A história e a filosofia da ciência no ensino de ciências: a pesquisa e suas contribuições para a prática pedagógica em sala de aula*. São Paulo: Escrituras, 2016. p. 20-38.
- BRACCO, C.; PROVOST, J.-P. De l'électromagnétisme à la mécanique: le rôle de l'action dans le "Mémoire" de Poincaré de 1905. *Revue de Histoire des Sciences*, v. 62, p.457-493, 2009.
- BROWN, K. Laplace on the speed of gravity. *Mathpages*, s.d. Disponível em: <https://www.mathpages.com/home/kmath690/kmath690.htm>. Acesso em: 10 maio 2021.
- BROWN, K. *Reflections on Relativity*. Morrisville: Lulu, 2010.
- CASTRO, E. *Divulgação e filosofia da ciência na obra de Henri Poincaré*. Dissertação (Mestrado em História e Filosofia da Ciência e da Tecnologia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2001.
- CATTANI, C.; MARIA, M. Conservation laws and gravitational waves in general relativity (1915-1918). In: EARMAN, J.; JANSSEN, M.; NORTON, J.D. (eds.). *The attraction of gravitation new studies in the history of general relativity*.

- Boston: Birkhäuser, 1993. p. 63-87.
- CORMMACH, R.M. Einstein, Lorentz, and the electron theory. *Historical Studies in the Physical Sciences*, v. 2, p. 41-87, 1970.
- CROSSI FILHO, O. *A epistemologia de Henri Poincaré: para além do convencionalismo e do realismo estrutural*. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2012.
- CULLWICK, E.G. Einstein and special relativity: Some inconsistencies in his electrodynamics. *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 32, n. 2, p. 167-176, 1981.
- CUVAJ, C. Henri Poincaré’s mathematical contribution to relativity and the Poincaré stress. *American Journal of Physics*, v. 36, p.1102-1113, 1968.
- DAMOUR, T. Poincaré, relativity, billiards and symmetry. In: Symposium Henri Poincaré, 2004, Brussels. *Proceedings [...] Brussels: Université Libre de Bruxelles*, 2005. p. 1-28.
- DAMOUR, T. Poincaré et la théorie de la relativité. *Conférence Henri Poincaré*. Paris: Académie des Sciences, 6 nov. 2012.
- DAMOUR, T. Poincaré, the dynamics of the electron, and relativity. *Comptes Rendus Physique*, v. 18, p. 551-562, 2017.
- DARRIGOL, O. The electron theories of Larmor and Lorentz: A comparative study. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 24, n. 2, p. 265-336, 1994.
- DARRIGOL, O. Henri Poincaré’s criticism of fin de siècle electrodynamics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 26, n. 1, p. 1-44, 1995.
- DARRIGOL, O. The electrodynamic origins of relativity theory. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 26, n. 2, p. 241-312, 1996.
- DARRIGOL, O. *Electrodynamics from Ampere to Einstein*. New York: Oxford University, 2000.
- DARRIGOL, O. The mystery of the Einstein-Poincaré Connection. *Isis*, v. 95, n. 4, p. 614-626, 2004.
- DARRIGOL, O. The genesis of the theory of relativity. *Séminaire Poincaré*, v. 1, p. 1-22, 2005.
- DUARTE, M.C. A história da ciência na prática de professores portugueses: implicações para a formação de professores de ciências. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 3, p. 317-331, 2004.
- DUGAS, R. *A history of mechanics*. New York: Dover, 1988.
- DUPLANTIER, B.; RIVASSEAU, V. (eds). Henri Poincaré, 1912-2012. *Poincaré Seminar 2012*. Basel: Springer, 2015.
- EDDINGTON, A.S. The propagation of gravitational waves. *Proceedings of the Royal Society, series A: mathematical and physical sciences*, v. 102, n. 716, p. 268-282, 1922.
- EDWARDS, M.R. (ed.). *Pushing gravity: new perspectives on Le Sage’s theory of gravitation*. Montreal: Apeiron, 2002.
- EINSTEIN, A. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, v. 17, p. 639-641, 1905a.
- EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, v. 17, p. 891-921, 1905b.
- EINSTEIN, A. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, v. 4, p. 411-462, 1907.
- EINSTEIN, A. Sobre o princípio da relatividade e suas implicações. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 37-61, 2005.
- EL-HANI, C.N. Notas sobre o ensino de história e filosofia da ciência na educação científica de nível superior. In: SILVA, C.C. (org.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. 3-21.
- FADNER, W.L. Did Einstein really discover “ $E = mc^2$ ”? *American Journal of Physics*, v. 56, n. 2, p. 114-122, 1988.
- FEYERABEND, P. Zahar on Einstein. *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 25, n. 1, p. 25-28, 1974.

- FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M. *Lições de física de Feynman - edição definitiva*. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- FREIRE JR., O. A relevância da filosofia e da história das ciências para a formação dos professores de ciências. In: SILVA FILHO, W.J. (org.). *Epistemologia e ensino de ciências*. Salvador: Arcádia, 2002. p. 13-30.
- GALISON, P.L. *Einstein's clock and Poincaré's map: empires of time*. New York: Norton, 2003.
- GAMA, R. (org.). *Ciência e técnica: antologia de textos históricos*. São Paulo: T.A. Queiroz, 1992.
- GIANNETTO E. The rise of special relativity: Henri Poincaré's works before Einstein. In: Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia, 18., 1999, Milano. *Atti [...]* Milano: Istituto de Física Generale Applicata/Centro Volta de Vomo, 1999. p. 171-207.
- GOLDBERG, S. Henri Poincaré and Einstein's theory of relativity. *American Journal of Physics*, v. 35, p. 934-944, 1967.
- GOLDBERG, S. The Lorentz theory of electrons and Einstein's theory of relativity. *American Journal of Physics*, v. 37, p. 982-994, 1969.
- GOLDBERG, S. Poincaré's silence and Einstein's relativity: The role of theory and experiment in Poincaré's physics. *British Journal for the History of Science*, v. 17, p. 73-84, 1970.
- HSU, J.-P.; ZHANG, Y.-Z. *Lorentz and Poincare invariance: 100 years of relativity*. New Jersey: World Scientific, 2001.
- HSU, J.-P.; HSU, L. *Broader view of relativity: General implications of Lorentz and Poincare invariance*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, 2006.
- IVES, H. Derivation of the mass-energy relation. *Journal of the Optical Society of America*, v. 42, n. 8, p. 540-543, 1952.
- JAMMER, M. *Concepts of simultaneity*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2006.
- JAMMER, M. *Conceitos de espaço*. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2010.
- JAMMER, M. *Conceitos de força*. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2011.
- KATZIR, S. Poincaré's relativistic physics and its origins. *Physics in Perspective*, v. 7 p. 268-292, 2005a.
- KATZIR, S. Poincaré's relativistic theory of gravitation. In: KOX, A.J.; EISENSTAEDT, J. (eds.). *The universe of general relativity*. Boston: Birkhäuser, 2005b. p. 15-38.
- KESWANI, G.H. Origin and concept of relativity (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 15, p. 286-306, 1965a.
- KESWANI, G.H. Origin and concept of relativity (II). *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 16, p. 19-32, 1965b.
- KESWANI G.H.; KILMISTER C.W. Intimations of relativity before Einstein. *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 34, n. 4, p. 343-354, 1983.
- LANGEVIN, P. La physique des électrons. *Revue Générales des Sciences*, v. 16, n. 257-276, 1905.
- LANGEVIN, P. Henri Poincaré, le physicien. *Revue de Métaphysique et de Morale*, n. 5, p. 675-718, 1913a.
- LANGEVIN, P. L'inertie de l'énergie et ses conséquences. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, v. 3, n. 1, p. 553-591, 1913b.
- LANGEVIN, P. *Le principe de relativité*. Paris: Étienne Chiron, 1922.
- LANGEVIN, P. *La physique depuis vingt ans*. Paris: Gaston Doin, 1923.
- LANGEVIN, P. O valor educativo da história das ciências. In: GAMA, R. (org.). *Ciência e técnica: antologia de textos históricos*. São Paulo: T.A. Queiroz, 1992. p. 8-29.
- LAPLACE, P.S. *Traité de mécanique céleste (tome IV)*. Paris: Imprimerie de Crapelet, 1805.
- LARMOR, J. A dynamical theory of the electric and luminiferous medium. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 54, p. 438-461, 1893.

- LARMOR, J. *Aether and matter*. Cambridge: St. John's College University Press, 1900.
- LIÉNARD, A. Champ électrique et magnétique produit par une charge concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque. *Éclairage Électrique*, v. 16, n. 27-29, p. 5-14, 53-59, 106-112, 1898.
- LOGUNOV, A. A. *Henri Poincaré and relativity theory*. Ithaca: Cornell University Library, 2004.
- LORENTZ, H.A. La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, v. 25, n. 363-552, 1892.
- LORENTZ, H.A. *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leiden: E.J. Brill, 1895.
- LORENTZ, H.A. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light. *Proceedings of the KNAW*, v. 12, p. 986-1009, 27 May 1904.
- LORENTZ, H. Sur la masse de l'énergie. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, v. 2, p. 139-154, 1912.
- LORENTZ, H.A. Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique. *Acta Mathematica*, v. 38, p. 293-308, 1921.
- LOSEE, J. *Introdução histórica à filosofia da ciência*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1979.
- MARTINS, R.A. A relação massa-energia e energia potencial. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 6, n. especial, p. 56-80, 1989.
- MARTINS, R.A. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica 2: física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 15, n. 3, p. 265-300, 1998a.
- MARTINS, R.A. The search for gravitational absorption in the early 20th century. In: GOEMMER, H.; RENN, J.; RITTER, J. (eds.). *The expanding worlds of general relativity*. Boston: Birkhäuser, 1998b. p. 3-44.
- MARTINS, R.A. Majorana's experiments on gravitational absorption. In: EDWARDS, M.R. (ed.). *Pushing gravity: New perspectives on Le Sage's theory of gravitation*. Montreal: Apeiron, 2002a. p. 219-238.
- MARTINS, R.A. Gravitational absorption according to the hypotheses of Le Sage and Majorana. In: EDWARDS, M.R. (ed.). *Pushing gravity: New perspectives on Le Sage's theory of gravitation*. Montreal: Apeiron, 2002b. p. 239-258.
- MARTINS, R.A. A dinâmica relativística antes de Einstein. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, p. 11-26, 2005a.
- MARTINS, R.A. El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poincaré. In: FAAS, H.; SAAL, A.; VELASCO, M. (eds.). *Epistemología e historia de la ciencia: selección de trabajos de las XV Jornadas*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba/Facultad de Filosofía y Humanidades, 2005b. p. 509-516.
- MARTINS, R.A. Introdução: a história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, C.C. (ed.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. XXI-XXXIV.
- MARTINS, R.A. Espaço, tempo e éter na teoria da relatividade. In: KNOBEL, M.; SCHULZ, P.A. (orgs.). *Einstein: muito além da relatividade*. São Paulo: Instituto Sangari, 2010. p. 31-60.
- MARTINS, R.A. *Teoria da relatividade especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2012.
- MARTINS, R.A. *A origem histórica da relatividade especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2015.
- MATTHEWS, M.R. *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. New York: Routledge, 1994.
- MATTHEWS, M.R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.
- MEHRA, J. *The golden age of theoretical physics*. v. 1. Singapore: World Scientific Publishing, 2001.
- MILLER, A.I. A study of Henri Poincaré's "Sur la dynamique de l'électron". *Archive for History of Exact Sciences*, v. 10, p. 207-328, 1973.

- MILLER, A.I. *Frontiers of physics: 1900-1911: Selected essays*. New York: Springer, 1986.
- MILLER, A.I. *Albert Einstein's special theory of relativity: emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*. New York: Springer, 1997a.
- MILLER, A.I. A glimpse into the Poincaré archives. *Philosophia Scientiæ*, t. 2, n. 3, p. 51-72, 1997b.
- NORONHA, A.B.; GURGEL, I. Reflexões sobre diferentes ênfases históricas do episódio das origens da teoria da relatividade especial e implicações para o ensino de ciências. In: Seminário Nacional de História da Ciência e Tecnologia, 13., 2012, São Paulo. *Anais [...] São Paulo: SBHC; USP, 2012.*
- NUNES, R.C.; QUEIRÓS, W.P. Visões deformadas sobre a natureza da ciência no conteúdo de relatividade especial em livros didáticos de física. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 19, n. 2, p. 295-319, 2020a.
- NUNES, R.C.; QUEIRÓS, W.P. Doze mitos sobre a teoria da relatividade que precisamos superar. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 37, n. 2, p. 531-573, 2020b.
- NUNES, R.C.; QUEIRÓS, W.P.; CUNHA, J.A.R. Análise histórica do conteúdo de relatividade especial nos livros didáticos de física do PNL D 2018. *História da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces*, v. 24, p. 112-153, 2021a.
- NUNES, R.C.; QUEIRÓS, W.P.; CUNHA, J.A.R. A aparência visual da contração relativística nos livros de física aprovados no Programa Nacional do Livro Didático 2018. *Revista de Enseñanza de La Física*, v. 33, n. 3, p. 101-113, 2021b.
- NUNES, R.C.; QUEIRÓS, W.P.; CUNHA, J.A.R. Conceito de massa e a relação massa energia no conteúdo de relatividade especial em livros didáticos de física. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 34, n. 1, p. 9-21, 2022.
- OSTERMANN, R.; RICCI, T.F. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. v. 19, n. 2, p. 176-190, 2002.
- OSTERMANN, R.; RICCI, T.F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 21, n. 1, p. 83-102, 2004.
- PATY, M. Poincaré et le principe de relativité. In: GREE, J.-L. HEINZMANN, G. LORENZ, K. *Congrès International Henri Poincaré*. May 1994, Nancy, France. Berlin: Akademie Verlag; Paris: Albert Blanchard, 1996. p. 101-143.
- PATY, M. A criação científica segundo Poincaré e Einstein. *Estudos Avançados*, v. 15, n. 41, p. 157-192, 2001.
- PATY, M. Pensamento racional e criação científica em Poincaré. *Scientiæ Studia*, v. 8, n. 2, p. 177-193, 2010.
- PAZ, M. O convencionalismo de Poincaré contextualizado: origem e significado. *Kairos: Revista de Filosofia e Ciência*, v. 7, p. 151-166, 2013.
- PLANCK, M. Zur Dynamik bewegter Systeme, *Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften*, v. 29, p. 542-570, 1907.
- POINCARÉ, H. A propos de la théorie de M. Larmor. *Éclairage Électrique*, v. 3, p. 5-13, 1895.
- POINCARÉ, H. La mesure du temps. *Revue de Métaphysique et de Morale*, v. 6, n. 1, p. 1-13, 1898.
- POINCARÉ, H. La théorie de Lorentz et le principe de réaction. *Archives Néerlandaises Des Sciences Exactes et Naturelles*, v. 5, p. 252-278, 1900a.
- POINCARÉ, H. Sur les rapports de la physique expérimentale et de la physique mathématique. In: GUILLAUME, C.-É.; POINCARÉ, L. (eds). *Rapports présentés au Congrès International de Physique réuni à Paris en 1900 [...] Paris: Gauthier-Villars, 1900b. p. 1-29.*
- POINCARÉ, H. *La science et l'hypothèse*. Paris: Flammarion, 1902.
- POINCARÉ, H. L'état et l'avenir de la physique mathématique. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, v. 28, p. 302-324, 1904.
- POINCARÉ, H. *La valeur de la science*. Paris: Flammarion, 1905a.
- POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. 140, p. 1504-1508, 5

- juin 1905b.
- POINCARÉ, H. [Carta] maio 1905. Paris [para] LORENTZ, H. Leiden. 3f. Poincaré aponta algumas incongruências na *memoir* de Lorentz de 1904. H.A. Lorentz papers, inv. nr. 62. Haarlem: Noord-Hollands Archief, 1905c.
- POINCARÉ, H. [Carta] maio 1905. Paris [para] LORENTZ, H. Leiden. 2f. Poincaré informa a Lorentz a descoberta do Grupo de Lorentz, porém informa que ainda não conseguiu conciliar o modelo de Lorentz com a dinâmica do elétron. H.A. Lorentz papers, inv. nr. 62. Haarlem: Noord-Hollands Archief, 1905d.
- POINCARÉ, H. [Carta] maio 1905. Paris [para] LORENTZ, H. Leiden. 2f. Poincaré informa a Lorentz a descoberta do Grupo de Lorentz, porém informa que ainda não conseguiu conciliar o modelo de Lorentz com a dinâmica do elétron. H.A. Lorentz papers, inv. nr. 62. Haarlem: Noord-Hollands Archief, 1905e.
- POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, v. 21, p. 129-176, 1906.
- POPP, B.D. *Henri Poincaré: electrons to special relativity: translation of selected papers and discussion*. Cham: Springer Nature, 2020.
- PRÍNCIPE, J. A epistemologia de Poincaré à luz de Kant: convenções e o uso regulador da razão. *Scientiæ Studia*, v. 13, n. 1, p. 49-72, 2015.
- PROKHOVNIK, S.J. Did Einstein's Programme supersede Lorentz's? *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 25, n. 4, p. 336-340, 1974.
- PROVOST, J.-P.; BRACCO, C. The 1895 Lorentz transformations: historical issues and present teaching. *European Journal of Physics*, v. 37, p. 1-10, 2016.
- REIGNIER, J. De l'éther de Fresnel à la relativité restreinte. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, v. 29, n. 1-2, p. 21-55, 2004.
- RENN, J. A física clássica de cabeça para baixo: como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 27-36, 2005.
- SHERRATT, W.J. History of science in the science curriculum: an historical perspective. Part I. *School Science Review*, v. 64, n. 227, p. 225-236, 1982.
- SHERRATT, W.J. History of science in the science curriculum: an historical perspective. Part II. *School Science Review*, v. 64, n. 228, p. 418-424, 1983.
- SCHWARTZ, H.M. A note on Poincaré's contribution to relativity. *American Journal of Physics*, v. 33, n. 2, p. 170, 1965.
- SCHWARTZ, H.M. Poincaré's Rendiconti Paper on relativity. Part I. *American Journal of Physics*, v. 39, n. 7, p. 1287-1294, 1971.
- SCHWARTZ, H.M. Poincaré's Rendiconti Paper on relativity. Part II. *American Journal of Physics*, v. 40, n. 6, p. 862-872, 1972a.
- SCHWARTZ, H.M. Poincaré's Rendiconti Paper on relativity. Part III. *American Journal of Physics*, v. 40, n.9, p. 1282-1287, 1972b.
- SCRIBNER JR., C. Henri Poincaré and the principle of relativity. *American Journal of Physics*, v. 32, p. 672-678, 1964.
- SILVA, A.P.B.; GUERRA, A. (orgs.). *História da ciência e ensino: fontes primárias e propostas para sala de aula*. São Paulo: Livraria da Física, 2015.
- SILVA, A.P.B.; SILVEIRA, A.F. (orgs.). *História da ciência e ensino: fontes primárias e propostas para sala de aula*. v. 2. São Paulo: Livraria da Física, 2018a.
- SILVA, A.P.B.; SILVEIRA, A.F. (orgs.). *História da ciência e ensino: fontes primárias e propostas para sala de aula*. v. 3. São Paulo: Livraria da Física, 2018b.
- SILVA FILHO, W.J. (org.). *Epistemologia e ensino de ciências*. Salvador: Arcádia, 2002.
- STACHEL, J. 1905 e tudo o mais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 5-9, 2005.
- VECCHIO JR., J.D. *A filosofia de Henri Poincaré: a natureza do conhecimento científico e os paradoxos da teoria dos*

conjuntos. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

- VILLANI, A. O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações. I: A revolução einsteiniana. *Revista de Ensino de Física*, v. 3, n. 1, p. 31-45, 1981a.
- VILLANI, A. O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações. II: a teoria de Lorentz e sua consistência. *Revista de Ensino de Física*, v. 3, n. 2, p. 55-75, 1981b.
- VILLANI, A. O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações. III. A heurística de Einstein. *Revista de Ensino de Física*, v. 3, n. 3, p. 23-41, 1981c.
- VILLANI, A. O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações. IV. Uma interpretação sociológica. *Revista de Ensino de Física*, v. 3, n. 4, p. 27-45, 1981d.
- VILLANI, A. A visão eletromagnética e a relatividade: a gênese das teorias de Lorenz e Einstein. *Revista de Ensino de Física*, v. 7, n. 1, p. 51-72, 1985.
- WALTER, S. Breaking in the 4-vectors: the four-dimensional movement in gravitation, 1905-1910. In: RENN, J.; SCHEMMEL, M. (eds.). *The genesis of general relativity*. v. 3: Theories of gravitation in the twilight of classical physics. Part I. Dordrecht: Kluwer, 2007.
- WALTER, S. Henri Poincaré, theoretical physics, and relativity theory in Paris. In: SCHLOTE, K.; SCHNEIDER, M. (eds.). *Mathematics meets physics: A contribution to their interaction in the 19th and the first half of the 20th century*. Frankfurt: Harri Deutsch, 2011. p. 213-239.
- WHITTAKER, E.T. *A history of the theories of aether and electricity*. v. 2. New York: American Institute of Physics, 1953.
- ZAHAR, E. Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 24, n. 2, p. 95-123, 1973a.
- ZAHAR, E. Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (II). *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 24, n. 3, p. 223-262, 1973b.
- ZAHAR, E. Einstein's debt to Lorentz: A reply to Feyerabend and Miller. *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 29, n. 1, p. 49-60, 1978.

Recebido em março de 2022

Aceito em maio de 2023