

Análise Histórica do Conteúdo de Relatividade Especial nos Livros Didáticos de Física do PNLD 2018

Ricardo Capiberibe Nunes
Wellington Pereira de Queirós
Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha

Resumo

O uso adequado história das ciências pode servir como ferramenta didática para complementar e oportunizar o ensino de física. Porém, o fato de educadores não terem instrumentalização em história e filosofia das ciências e a dificuldade de encontrar boas fontes históricas em linguagem acessível, tem criado obstáculos para um uso adequado desse instrumento didático. A fim de contribuir para a construção de interfaces entre história das ciências e ensino, propusemos a realização de uma análise histórica do conteúdo de relatividade especial nos 12 livros didáticos de física aprovados do PNLD 2018. Para apreendermos a análise, realizamos uma leitura do material e construímos seis categorias históricas a posteriori. Essas categorias nortearam uma vasta revisão de literatura em fontes primárias e na história da relatividade especial que culminou na construção de textos de apoio que, em seguida, foram usados para avaliar o conteúdo histórico apresentados nos livros didáticos. A análise apontou que esses livros didáticos apresentam diversas incongruências e anacronismos. Com base nesses resultados, tecemos reflexões e concluímos que é necessário de uma maior aproximação entre educadores científicos e historiadores das ciências para a construção de interfaces entre história e ensino de ciências.

Palavras-chave: Ensino de Ciências, História e Filosofia das Ciências, Relatividade Especial.

Abstract

The proper use of the history of sciences can serve as a didactic tool to complement and provide opportunities for the teaching of physics. However, the fact that educators are not instrumental in the history and philosophy of science and the difficulty of finding good historical sources in accessible language has created an adequate use of this didactic instrument. In order to contribute to the construction of interfaces between the history of science and teaching, we proposed to carry out a historical analysis of the special relativity content in the 12 relaxed physics textbooks of the PNLD 2018. In order to apprehend the analysis, we read the material and we built six historical categories a posteriori. These categories guided a vast review of the literature in primary sources and in the history of special relativity, which culminated in the construction of supporting texts that were then used to assess the historical content distributed in textbooks. The analysis pointed out that these textbooks have several inconsistencies and anachronisms. Based on the results, we reflect and conclude that a closer relationship between scientific educators and science historians is necessary for the construction of interfaces between history and science teaching.

Keywords: Science Teaching, History and Philosophy of Science, Special Relativity.

INTRODUÇÃO

As pesquisas sobre ensino de ciências sugerem que o uso adequado de episódios históricos tem um efeito positivo sobre a aprendizagem^{1 2 3 4}. Por isso, uma questão que tem sido debatida tanto por educadores como por historiadores é o que seria um uso adequado das histórias das ciências^{5 6 7 8 9 10}. Por essa razão, “existe uma inegável tensão entre eles. [Embora] raramente os dois grupos se [critiquem] formalmente (em publicações)”¹¹.

Por um lado, os historiadores denunciam que não é raro que os livros didáticos façam uma abordagem caricata e distorcida, não apresentando as inter-relações entre a ciência, tecnologia e sociedade, reduzindo a história da ciência como o esforço de grandes gênios ou por insights isolados de indivíduos brilhantes^{12 13}, reduzindo em um último tipo de história radicalmente anacrônica e simplista, denominada de história *whig*^{14 15 16} (Martins 1998, 2006, 2012), cientificista e domesticada¹⁷ (Maia 2013). Por essa razão,

os historiadores da ciência criticam os trabalhos produzidos por pesquisadores em educação que não possuem uma formação historiográfica adequada, porque estes apresentam uma história da ciência linear, simplificada e triunfalista (*whig*), ocultando a

¹ Sherratt, William. J. “History of science in the science curriculum: an historical perspective.” *School Science Review*, 64, nº 227 (1982): 225–36.

² Sherratt, William. “History of science in the science curriculum: an historical perspective.” *School Science Review* 64, nº 228 (1983): 418–24.

³ Matthews, Michael. R. *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. (New York: Routledge, 1994).

⁴ Stinner, Arthur, Barbara A. McMillan, Don Metz, Jana M. Jilek, & Stephen Klassen. The Renewal of Case Studies in Science Education. “*Science & Education*” 12 (2003): 617–643.

⁵ Sherratt, “History of science,” 1982.

⁶ Sherratt, “History of science,” 1983.

⁷ Matthews, “Science teaching”.

⁸ Stinner, McMillan, Jilek, Klassen, “The Renewal”.

⁹ Martins, Roberto de Andrade. “Introdução. A história das ciências e seus usos na educação,” in *Estudos de História e Filosofia das Ciências: Subsídios para Aplicação no Ensino*, ed. Cibele. C. Silva. (São Paulo: Livraria da Física, 2006): XXI-XXXIV.

¹⁰ Martins, Roberto de Andrade. “A fundamentação histórica da lei da inércia: um exemplo de conflito entre educadores e historiadores da ciência no uso da história da ciência no ensino de física,” in *Encontro de Pesquisas em Ensino de Física* (Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2012).

¹¹ Martins, “A fundamentação,” 02.

¹² Martins, “Introdução.”

¹³ Boss, Sérgio L. B., João J. Caluzi, André K. T. Assis, & Moacir P. Souza Filho, “A utilização de traduções de fontes primárias na formação inicial de professores: breves considerações sobre dificuldades de leitura e entendimento,” in *A História e a Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências: a pesquisa e suas contribuições para a prática pedagógica em sala de aula*, org. Sandra Gatti R. T. & Roberto Nardi. (São Paulo: Escrituras, 2016): 20–38.

¹⁴ Martins, Roberto de Andrade. “Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica 2 - Física moderna,” *Caderno Catarinense de Ensino de Física* 15, nº 3 (dez. 1998): 265-300.

¹⁵ Martins, “A fundamentação”.

¹⁶ Martins, “Introdução”.

¹⁷ Maia. Carlos. A. *História das Ciências: Uma História de Historiadores Ausentes* (Rio de Janeiro: Editora da UERJ, 2013).

complexidade histórica e distorcendo aspectos importantes da natureza da ciência. É claro que não são apenas os educadores que cometem equívocos e distorções quando tentam escrever sobre a história da ciência: qualquer pessoa sem um treino adequado incorrerá em erros graves quando tentar escrever sobre algo que só conhece superficialmente (Martins, 2001).¹⁸

Por outro lado, uma história radicalmente diacrônica, não é desejável, do ponto de vista educativo^{19 20}. Testifica a esse favor o fracasso do Harvard Project Physics (HPP), “um esforço heroico para ensinar física [secundária] inteiramente usando sequências de contextos históricos”²¹, que foi desenvolvida na década de 1960, e seguia uma abordagem radicalmente histórica. Os diretores do projeto foram o educador científico F. James Rutherford, o historiador da ciência e físico Gerald James Holton e o pedagogo Fletcher G. Watson e ainda contou com a colaboração do historiador da ciência e físico David C. Cassidy. Além disso,

Muitos educadores se sentem desconfortáveis com os trabalhos produzidos pelos historiadores da ciência porque estes são tão detalhistas e complexos que parecem impossíveis de serem aplicados ao ensino. Sem dúvida, é correto afirmar que os melhores trabalhos dos historiadores da ciência são extremamente detalhados e extensos.²²

Desta forma instala-se um verdadeiro nó górdio, pois,

Educadores que utilizam uma má historiografia da ciência (pseudo-história) para apresentar um produto simples, agradável e palatável aos estudantes fazem um desserviço à educação. Não apenas descrevem uma história falsa, mas também – e esse é o problema principal – transmitem uma visão equivocada sobre a natureza da ciência. Por outro lado, a historiografia da ciência desenvolvida por historiadores experientes pode ser considerada bastante confiável e transmite uma visão adequada sobre a natureza da ciência. No entanto, ela não é adequada para uso educacional direto, pois é complexa, sofisticada, exigindo o conhecimento detalhado da história e uma discussão epistemológica para a qual os professores e os estudantes não estão preparados..²³

¹⁸ Martins, “A fundamentação,” 04.

¹⁹ Kragh, Helge, *Introdução à historiografia da ciência* (Porto: Porto Editora, 2001).

²⁰ Stinner, McMillan, Jilek, Klassen, “The Renewal”.

²¹ Stinner, McMillan, Jilek, Klassen, “The Renewal”, 624.

²² Martins, “A fundamentação,” 04.

²³ Martins, “A fundamentação,” 10.

Embora o quadro não seja dos melhores, é possível revertê-lo.

Existe uma solução, que depende da colaboração entre historiadores e pesquisadores em educação. A história da ciência desenvolvida pelos historiadores precisa ser adaptada ou transposta para o ambiente educacional – e um historiador da ciência pode não ter a habilidade adequada para isso. Por outro lado, o pesquisador em educação tem um conhecimento que pode permitir uma adaptação do resultado da pesquisa histórica à educação.²⁴

Por isso, tendo em vista contribuir para uma superação das dificuldades para levar a história das ciências para a sala de aula, propusemos essa pesquisa. Inspirados pelo trabalho de Santos²⁵ que avaliou as abordagens históricas sobre Lavoisier apresentadas em livros didáticos de química, decidimos avaliar como os livros didáticos de física aprovados no Programa Nacional do Livro Didático de 2018 abordam a história da relatividade especial. Para executar a pesquisa, optamos por uma abordagem qualitativa e o desenvolvimento de categorias *a posteriori*. Por meio do estabelecimento das categorias, realizamos ampla revisão de literatura em produções historiográficas sobre teoria da relatividade especial. A partir dessa revisão, analisamos o conteúdo dos livros. Estes detalhes são apresentados e discutidos nos Resultados e Análises. Desta forma, esperamos poder auxiliar educadores a levarem a história da relatividade para a sala de aula, evitando as incongruências apontadas por Martins^{26 27 28} e as detectadas em nossa análise.

METODOLOGIA

Para consecução deste trabalho, optamos por realizar uma pesquisa qualitativa. O material de análise (*corpus*) foram os 12 livros didáticos de física aprovados no PNLD-2018 (apresentados na Tabela 1). O *escopo* da pesquisa foram os capítulos que discutem a Teoria da Relatividade. A pesquisa foi executada em três momentos.

²⁴ Martins, “A fundamentação,” 11.

²⁵ Santos, Ana. F. “Lavoisier e a História da Química: Uma Análise de Livros Didáticos,” in *História da ciência e Ensino: Abordagens Interdisciplinares*, org. Beltran, Maria H. R. & Lais dos S. P. Trindade (São Paulo: Livraria da Física, 2017).

²⁶ Martins, “Como distorcer”.

²⁷ Martins, “A fundamentação”.

²⁸ Martins, “Introdução”.

Tabela 1: Livros didáticos submetidos à análise²⁹

Código	Título
A	Física 3: Eletricidade, Física Moderna ³⁰
B	Física: Eletromagnetismo, Física Moderna ³¹
C	Física 3: Interação e Tecnologia ³²
D	Física 3: Eletromagnetismo, Física Moderna ³³
E	Compreendendo a Física: Eletromagnetismo e Física Moderna ³⁴
F	Física para o Ensino Médio 3: Eletricidade, Física Moderna ³⁵
G	Física em Contextos 3 ³⁶
H	Física por Aula 3: Eletromagnetismo – Física Moderna ³⁷
I	Conexões com a Física 3: Eletricidade – Física do Século XXI ³⁸
J	Física, Ciência e Tecnologia 3: Eletromagnetismo, Física Moderna ³⁹
K	Ser Protagonista – Física 3 ⁴⁰
L	Física 3: Contexto & Aplicações ⁴¹

²⁹ Fonte: Autoral.

³⁰ Biscuola, José. G. Bôas, Newton. V. Boas, & Ricardo H. Doca. *Física 3: eletricidade, física moderna* (São Paulo: Saraiva, 2016).

³¹ Guimarães, Osvaldo. José R. Piquiera, & Wilson Carron. *Física: eletromagnetismo e física moderna* (São Paulo: Saraiva, 2016).

³² Gonçalves Filho, Aurelio & Carlos Toscano. *Física 3: interação e tecnologia* (Rio de Janeiro: Leya Brasil, 2016).

³³ Bonjorno, José. R. et al. *Física 3: eletromagnetismo, física moderna* (São Paulo: FTD, 2016).

³⁴ Gaspar, Alberto. *Compreendendo a Física: eletromagnetismo e física moderna* (São Paulo: Ática, 2017).

³⁵ Yamamoto, Kazuhito & Luís F. Fuke *Física para o Ensino Médio 3: eletricidade, física moderna* (São Paulo: Saraiva, 2017).

³⁶ Pietrocola, Maurício P. et al. *Física em Contextos 3* (São Paulo: Editora do Brasil, 2016).

³⁷ Barreto Filho, Benigno & Claudio X. Silva. *Física aula por aula 3: eletromagnetismo, física moderna* (São Paulo: FTD, 2016).

³⁸ Martini, Glorinha et al. *Conexões com a Física 3: eletricidade, física do século XXI*. (São Paulo: Moderna, 2016).

³⁹ Torres, Carlos. M. A. et al. *Física, Ciência e Tecnologia 3: eletromagnetismo, física moderna* (São Paulo: Moderna, 2016).

⁴⁰ Válio, Adriana B. M. et al. *Ser Protagonista – Física 3*. (São Paulo: SM Brasil, 2016).

⁴¹ Máximo, Antônio, Beatriz Alvarenga, & Carla da Costa Guimarães. *Física 3: Contexto & Aplicações* (São Paulo: Scipione, 2016).

No primeiro momento, realizamos uma leitura do material visando a construção de categorias analíticas *a posteriori*. A partir da primeira leitura, construímos seis categorias *a posteriori*, correspondendo a eventos históricos que foram abordados em pelo menos uma das obras analisadas. A Tabela 2, apresenta as categorias construídas:

Tabela 2: Categorização dos eventos históricos encontrados nas obras analisadas⁴²

Categoria	Episódio Histórico
1	O princípio da relatividade de Galileu.
2	O conceito de éter.
3	O experimento de Michelson-Morley.
4	A interpretação de Lorentz e Poincaré.
5	Os postulados de Einstein
6	Contribuições posteriores à Einstein.

⁴² Fonte: Autoral.

Após a construção dessas categorias, iniciou-se o segundo momento. Nessa etapa, realizamos uma ampla pesquisa histórica, em fontes primárias⁴³ e secundárias⁴⁴ sobre Teoria da Relatividade. Para

- ⁴³ Einstein, Albert. "Zur Elektrodynamik bewegter Körper," *Ann. Phys.* 17 (1905): 891-921.
- Einstein, Albert. "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen," *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4 (1907): 411-462.
- Einstein, Albert. "How I created the theory of relativity," *Physics Today* (August, 1982): 45-47.
- Einstein, Albert. *Collected Papers of Albert Einstein Volume 2: The Swiss Years Writings, 1900-1909*, ed. John Stachel, David Cassidy, Jürgen Renn, and Robert Schulmann (New Jersey: Princeton University Press, 1989).
- Einstein, Albert. *Collected Papers of Albert Einstein Volume 7: The Berlin Years: Writings, 1918-1921*, ed. Michael Janssen, Robert Schulmann, József Illy, Christoph Lehner, & Diana K. Buchwald (New Jersey: Princeton University Press, 2002).
- Einstein, Albert. *A Teoria da Relatividade Geral e Especial* (Farroupilha: Contraponto, 2007).
- Langevin, Paul. "L'inertie de l'énergie et ses conséquences." *J. Phys. Theor. Appl.* 3, nº 1 (1913): 553-591.
- Langevin, Paul. *Le Principe de relativité* (Paris: Éditions Étienne Chiron, 1922).
- Larmor, Joseph. *Aether and Matter* (Cambridge: John's College University Press, 1900).
- Laue, Max Von. *Das Relativitätsprinzip* (Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1911).
- Lorentz, Hendrik A. *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* (Leiden: Brill, 1895).
- Lorentz, Hendrik A. "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light," *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 6 (1904): 809-831.
- Lorentz, Hendrik A. "Deux Mémoires de Henri Poincaré sur la Physique Mathématique," *Acta Mathematica*. 38, (1921): 293-308.
- Mascart, M. "Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur," *Annales scientifiques de l'É.N.S* 2, tome 1 (1872): 157-214.
- Minkowski, Hermann. "Raum und Zeit," *Jahresberichte der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, 18 (1909): 75-88.
- Poincaré, Jules H. "A propos de la théorie de M. Larmor. Éclairage électrique," 3 (1895): 5-13.
- Poincaré, Jules H. "La mesure du temps. Revue de métaphysique et de morale," 6 (1898): 1-13.
- Poincaré, Jules H. "La théorie de Lorentz et le principe de réaction," *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 5 (1900): 252-278.
- Poincaré, Jules H. *La Science et l'Hypothèse* (Flammarion, Paris, 1902).
- Poincaré, H. "L'état et l'avenir de la Physique mathématique," *Bulletin des Sciences Mathématiques* 28 (1904): 302-324.
- Poincaré, Jules H. *La Valeur de la Science* (Flammarion, Paris, 1905).
- Poincaré, Jules H. "Sur la dynamique de l'électron," *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 140 (5 juin 1905): 1504-1508.
- Poincaré, Jules H. "Sur la dynamique de l'électron," *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* 21 (1906): 129-176
- Voigt, Woldemar, "Über das Doppler'sche Princip," *Nachr. Ges. Wiss. Goettingen*, 41 (1887): 41-51.
- ⁴⁴ Abiko, Seya. "On Einstein's distrust of the electromagnetic theory: The origin of the light velocity postulate." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 33 nº 2 (2003): 193-215.
- Arabatzis, Theodore & Kostas Gavroglu. "Myth 18. That the Michelson-Morley Experiment Paved the Way for the Special Theory of Relativity", in *Newton's Apple and Other Myths About Science*, org. Ronald L Numbers & Kostas Kampourakis (Cambridge: Harvard Press, 2015): 149-156.
- Auffray, Jean-Paul. *O Espaço-Tempo* (Lisboa: Flammarion, 1998).
- Born, Max. *Physics an My Generation* (Oxonía: Pergamon Press, 1968).
- Cormmach, Russell Mc. "Einstein, Lorentz, and the Electron Theory," *Historical Studies in the Physical Sciences* 2 (1949): 41-87
- Cuvaj, Camillo. "Henri Poincaré's Mathematical Contribution to Relativity and the Poincaré Stress," *American Journal of Physics* 36 (1968): 1102-13.

- Damour, Thibault. "Poincaré, Relativity, Billiards and Symmetry," *Proceedings of the Symposium Henri Poincaré* (Brussels, 8-9 October 2004).
- Damour, Thibault. "Poincaré et la Théorie de la Relativité," *Conférence «Henri Poincaré», Académie des Sciences* 6 (novembre 2012).
- Damour, Thibault. "Poincaré, the dynamics of the electron, and relativity," *C. R. Physique* 18 (2017): 551-562
- Darrigol, Olivier. "The Electron Theories of Larmor and Lorentz: A Comparative Study," *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 24, n° 2 (1994): 265-336
- Darrigol, Olivier. "Henri Poincaré's Criticism of Fin de Sicle Electrodynamics," *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 26, n° 1 (1995): 1-44.
- Darrigol, Olivier. "The Electrodynamical Origins of Relativity Theory," *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 26, n° 2 (1996): 241-312.
- Darrigol, Olivier. *Electrodynamics from Ampere to Einstein* (New York: Oxford University, 2002).
- Darrigol, Olivier. "The Mystery of the Einstein-Poincaré Connection," *Isis*, 95, n° 4 (December 2004): 614-626
- Darrigol, Olivier. "The Genesis of the Theory of Relativity," in *Einstein, 1905-2005: Poincaré Seminar*, org. Thibault Damour, Olivier Darrigol, Bertrand Duplantier, Vincent Rivasseau (Basel: Birkhäuser Verlag, 2006): 1-22.
- Galison, Peter. L. *Einstein's Clock and Poincaré's Map: Empires of Time* (New York: Norton, 2003).
- Giannetto, Enrico. "The Rise of Special Relativity: Henri Poincaré's Works Before Einstein," *Atti del Diciottesimo Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia* (Universita' di Milano, Milano, 1999): 181-216.
- Goldberg, Stanley. "Henri Poincaré and Einstein's Theory of Relativity," *Am. J. Phys* 35 (1967): 934-944.
- Goldberg, Stanley. "The Lorentz Theory of Electrons and Einstein's Theory of Relativity," *Am. J. Phys* 37 (1969): 982-994.
- Goldberg, Stanley. "Poincaré's Silence and Einstein's Relativity: The role of theory and experiment in Poincaré's Physics," *British Journal for the History of Science* 17 (1970): 73-84.
- Hirosige, Tetu. "The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity," *Historical Studies in the Physical Sciences* 7 (1976): 3-82.
- Holton, Gerald. "On the Origins of the Special Theory of Relativity," *Am. J. Phys.* 28 (1960): 627-636.
- Holton, Gerald. "On the thematic Analysis of Science: The Case of Poincaré and Relativity," *Mélanges Alexandre Koyré* 2 (1964): 257-268.
- Holton, Gerald. "Influences on Einstein's Early Work in Relativity Theory," *The American Scholar*, 37, n° 1 (Winter, 1967-1968): 59-79.
- Holton, Gerald. "Einstein, Michelson, and the "Crucial" Experiment." *Isis* 60, No. 2 (Summer, 1969): 132-197.
- Holton, Gerald. *Thematic Origins of Scientific Thought - Kepler to Einstein* (Cambridge: Harvard Press, 1973).
- Isaacson, Walter. *Einstein: Sua Vida, seu Universo* (São Paulo: Companhia das Letras, 2007).
- Katzir, Shaul. "Poincaré's Relativistic Physics and Its Origins," *Physics in Perspective* 7 (2005): 268-292
- Keswani, G. H. "Origin and Concept of Relativity (I)," *The British Journal for the Philosophy of Science*, 15 (1965): 286-306.
- Keswani, G. H. "Origin and Concept of Relativity (II)," *The British Journal for the Philosophy of Science*, 16 (1965): 19-32.
- Keswani, G. H. Kilmister, Clive. W. "Intimations of Relativity Relativity before Einstein," *The British Journal for the Philosophy of Science* 34, n° 4 (Dec. 1983): 343-354.
- Kox A. J., Eisenstaedt J. (eds) *The Universe of General Relativity* (Einstein Studies, vol 11. Boston: Birkhäuser, 2005).
- Martins, Roberto de Andrade. "Galileo e o princípio da relatividade," *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 9 (1986): 69-86,
- Martins, Roberto de Andrade. "Em busca do nada: considerações sobre os argumentos a favor e contra o vácuo," *Trans/Form/Ação* 16 (1993): 7-27.
- Martins, Roberto de Andrade, "Como distorcer".

cada uma das categorias *a posteriori* construímos um texto de apoio do tipo síntese e serviram para orientar a análise dos textos históricos apresentados nos Livros Didáticos.

Por fim, no terceiro momento, realizamos uma segunda leitura dos conteúdos de Teoria da Relatividade apresentados nos Livros Didáticos, contrapondo como as sínteses produzidas no segundo momento. Como os conceitos e episódios históricos variam conforme os livros, criamos uma nomenclatura e sistema de pontuação: **C**, quando o conceito ou episódio histórico é apresentado no livro de maneira correta, **I**, quando o conceito ou episódio histórico é apresentado no livro de maneira incorreta; **A**, quando o conceito ou episódio histórico não é apresentado no livro.

-
- Martins, Roberto de Andrade. "A dinâmica relativística antes de Einstein," *Revista Brasileira de Ensino de Física* 27 (2005): 11-26.
- Martins, Roberto de Andrade. "El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poncaré" in *Epistemología e Historia de la Ciencia. Selección de Trabajos de las XV Jornadas*, orgs. Faas, Horacio, Aarón Saal, & Marisa Velasco (Facultad de Filosofía y Humanidades. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2005): 509-516.
- Martins, Roberto de Andrade. "Física e História," *Cienc. Cult.*, 57, nº 3 (2005): 25-29.
- Martins, Roberto de Andrade. *Teoria da Relatividade Especial* (São Paulo: Livraria da Física, 2012).
- Martins, Roberto de Andrade. *A Origem Histórica da Relatividade Especial* (São Paulo: Livraria da Física, 2015).
- Mehra, Jagdish. *The Golden age of Theoretical Physics, vol. 1* (London: World Scientific Publishing, 2001).
- Miller, Arthur. I. *Frontiers of Physics: 1900-1911 Selected Essays* (New York: Springer, 1986).
- Miller, Arthur. I. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity. Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)* (New York: Springer, 1997).
- Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxonía: Oxford University Press, 1982).
- Prokhorovnik, Simon. J. "Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?," *The British Journal for the Philosophy of Science*, 25, nº. 4 (Dec., 1974): 336-340.
- Renn, Jurgen & Matthias Schemmel. *The Genesis of General Relativity Vol. 1-4* (Kluwer: Dordrecht, 2007).
- Schaffner, Kenneth F. "Einstein versus Lorentz: Research Programmes and the Logic of Comparative Theory Evaluation," *The British Journal for the Philosophy of Science* 25, nº 1 (1974): 45-78.
- Shankland, Robert. S. "Conversations with Albert Einstein," *American Journal of Physics* 31 (1963): 47-57
- Sklar, Lawrence. *A Filosofia da Física* (Rio de Janeiro: Contraponto, 2021).
- Stachel, John. "History of Relativity," in *Twentieth Century Physics. Vol 1*, org. Laurie M. Brown, Abraham Pais, Brian Pipard (Bristol and Philadelphia: Institute for Physics Publishing, 1995): 249-356.
- Stachel, John. *Einstein from 'B' to 'Z'* (New York: Springer, 2005).
- Walter, Scott. "Henri Poincaré, theoretical physics, and relativity theory in Paris," in *Mathematics Meets Physics*, ed. Karl-Heinz Schulte, Martina Schneider (Frankfurt: Harri Deutsch. 2011): 193-252.
- Wesley, James. P. "Michelson-Morley Result, a Voigt-Doppler Effect in Absolute Space-Time," *Foundations of Physics*, 16, nº 8 (1986): 817-824.
- Whittaker, Edmund. T. *A history of the theories of aether and electricity. 2 vol* (New York: American Institute of Physics, 1953).
- Zahar, Elie. Why "Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (I)". *The British Journal for the Philosophy of Science* 24, nº 2 (Jun., 1973): 95-123.
- Zahar, Elie. Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II). *The British Journal for the Philosophy of Science* 24, nº 3 (Sep., 1973): 223-262.

RESULTADOS E ANÁLISES

A pesquisa evidenciou que apesar dos esforços do MEC e a constante reformulação dos livros didáticos, os problemas conceituais e historiográficos listados ainda persistem nestes livros. A (cf. Quadro 3 sintetiza os resultados.

Quadro 3: Resultado da análise dos eventos históricos sobre a Teoria da Relatividade⁴⁵

Livros	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
CATEGORIAS	1	A	I	I	A	A	I	A	I	A	C	I	I
	2	A	A	A	I	I	I	C	I	I	A	A	I
	3	A	A	A	I	I	I	C	I	A	A	I	I
	4	A	A	A	I	C	I	A	I	I	I	C	A
	5	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	6	A	A	A	A	A	C	C	A	A	A	A	C

1. O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE DE GALILEU

O princípio da relatividade foi um conceito desenvolvido para responder as objeções que se Terra estivesse em movimento, diversos efeitos deveriam ser evidenciados. A sua forma elaborada, apareceu pela primeira vez com Galileu e aplicava-se apenas aos fenômenos mecânicos.

Ele [Galileu] propôs um tipo de experimento imaginário, no qual duas pessoas entrassem na cabine de um navio e fizessem vários experimentos lá dentro, tanto com o navio parado quanto em movimento. Afirmou, então, que todos os experimentos dariam exatamente o mesmo resultado, tanto no caso em que o navio estivesse parado quanto no caso em que ele estivesse se movendo rapidamente. Portanto, nenhum experimento realizado dentro da cabine do navio permite determinar se ele está se movendo. Da mesma forma, nenhum experimento na Terra permite saber se ela está parada ou em movimento.⁴⁶

⁴⁵ Fonte: Autoral

⁴⁶ Martins, "A Origem," 33.

Como esse princípio era válido apenas para a Mecânica, pesquisadores acreditavam que talvez fosse possível detectar o movimento da Terra em relação ao espaço absoluto por meio de efeitos ópticos⁴⁷. Diversos experimentos envolvendo telescópios e a aberração da luz foram conduzidos, porém, nenhum deles conseguiu evidenciar o movimento da Terra ⁴⁸. Assim, na metade do século XIX, já estava bem estabelecido que o Princípio da Relatividade deveria se aplicar tanto a Mecânica quanto a Óptica ⁴⁹. Foi somente no final do século XIX, que o físico-matemático Henri Poincaré sugeriu que o Princípio da Relatividade deveria ser considerado como uma lei fundamental da física (tal como a conservação de energia) e que qualquer teoria física deveria incorporá-lo. Posteriormente, Einstein adotou a mesma posição.

Das obras analisadas, o Princípio da Relatividade de Galileu aparece apenas em sete livros didáticos [B], [C], [F], [H], [J], [K], [L]. Em nossa análise encontramos três problemas: o primeiro diz respeito ao fato de que nenhum dos autores contextualiza o Princípio da Relatividade, os autores se preocupam apenas em enunciar-lo. Há uma diferença entre o contexto em que Galileu e Einstein e seus contemporâneos⁵⁰ utilizaram esse princípio.

O contexto da obra em que aparece essa descrição, Galileu preocupa-se basicamente com a defesa do sistema heliocêntrico de Copérnico e o conseqüente ataque ao sistema de Ptolomeu e à física de Aristóteles. Para que o movimento da Terra seja aceitável, é necessário que ele seja compatível com a experiência cotidiana que nos mostra que tudo se passa como se a Terra estivesse imóvel; por isso o princípio da relatividade era um elemento essencial para que o sistema de Copérnico se tornasse aceitável. O contexto da passagem que contém a experiência do navio mostra essa vinculação; e ela é explicitamente colocada por Galileu (1964, v. 2, 372; 1967, 186) sob a forma de um título marginal da seção: "Experiência que, sozinha, mostra a nulidade de todas as apresentadas contra o movimento da Terra". ⁵¹

Já no contexto da Teoria da Relatividade, o princípio da relatividade foi inicialmente proposto por Poincaré para explicar o resultado nulo dos experimentos que visavam evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter.

A experiência revelou uma série de fatos que podem ser resumidos na seguinte expressão: é impossível fazer manifestar o movimento absoluto da matéria, ou melhor, o

⁴⁷ Martins, "A Origem".

⁴⁸ Martins, "A Origem".

⁴⁹ Martins, "A Origem".

⁵⁰ Tais como Poincaré, Bucherer, Cohn, Langevin.

⁵¹ Martins, "Galileu," 69.

movimento relativo da matéria em relação ao éter; tudo o que se pode demonstrar é o movimento da matéria ponderável em relação à matéria ponderável.⁵²

Posteriormente, esse princípio passou a ser traduzido como uma equivalência das leis físicas entre todos referenciais inerciais, como podemos ver em uma declaração feita por Poincaré:

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.⁵³

E no ensaio seminal de Einstein⁵⁴: “as leis segundo as quais se modificam os estados dos sistemas físicos são as mesmas, quer sejam referidas a um determinado sistema de coordenadas, quer o sejam a qualquer outro que tenha movimento de translação uniforme em relação ao primeiro.” Também é importante observar que enquanto Poincaré usava o princípio da relatividade para justificar a imponderabilidade do éter, os físicos alemães, como Cohn, Bucherer e Einstein, utilizaram esse princípio para sustentar a rejeição do éter. Afinal de contas, se o éter é imponderável, então ele é um conceito desnecessário, como constata Einstein⁵⁵: “a introdução de um «éter luminífero» revelar-se-á supérflua, visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um «espaço em repouso absoluto», nem de atribuir um vector velocidade a qualquer ponto do espaço vazio em que tenha lugar um processo eletromagnético”. O segundo problema diz respeito ao enunciado do Princípio da Relatividade.

Denomina-se comumente "princípio de relatividade de Galileo" a afirmação de que é impossível detectar-se algum efeito físico de um movimento uniforme de translação de um sistema físico, por experiências internas a esse sistema; ou seja: para experiências realizadas dentro de um sistema, seu movimento de translação, se for uniforme, não pode ser notado.⁵⁶

Nas obras analisadas, há algumas incongruências conceituais. Por exemplo, nas obras [B] e nas obras [H], o princípio é enunciado da seguinte forma:

⁵² Poincaré, “A Propos,” 13.

⁵³ Poincaré, “L’état,” 306.

⁵⁴ Einstein, “Zur Elektrodynamik,” 895

⁵⁵ Einstein, “Zur Elektrodynamik,” 892

⁵⁶ Martins, “Galileo,” 69.

[B]: “As leis da mecânica (leis de Newton) são as mesmas para dois observadores que se movem, um em relação ao outro, com velocidade constante (referenciais inerciais)”. (p. 188)

[H]: “O movimento de qualquer corpo está sujeito às mesmas leis, tanto num sistema de referência que está em repouso quanto num sistema de referência que se desloca com velocidade constante em linha reta (chamados de referenciais inerciais)”. (p. 202).

A incongruência deste enunciado está na associação indevida entre observadores que se movem com velocidade constante com o conceito de referencial inercial, pois como observa Martins ⁵⁷: “É claro que *referenciais com velocidade relativa uniforme* não significa a mesma coisa que *referenciais inerciais*.” A definição de *referencial inercial* é

[...] aquele em relação ao qual vale a lei da inércia – ou seja, se um corpo não está submetido a forças externas, então quando é observado a partir de um referencial inercial, ele fica parado ou se move em linha reta, com velocidade constante. No entanto, o mesmo objeto, quando observado a partir de outro referencial (não inercial), pode estar se movendo em uma trajetória curva, ou estar acelerado.⁵⁸

No livro [K], o princípio da relatividade Galileu é enunciado da seguinte forma:

[K]: “As leis dos movimentos são as mesmas em todos os referenciais que se movem de maneira uniforme entre si.” (p. 254).

Trata-se de um enunciado incorreto, pois o princípio da relatividade não se aplica para um movimento uniforme em uma trajetória curva ⁵⁹ ⁶⁰ ⁶¹. É por essa razão que tanto Poincaré como Einstein enfatizam que esse movimento uniforme deve ser em linha reta.

No livro [C], esse princípio é apresentado da seguinte forma:

[C]: “O primeiro postulado é equivalente ao princípio da relatividade de Galileu Galilei: as leis da física são as mesmas para todos os observadores em quaisquer sistemas de referenciais inerciais”. (p. 187).

Uma afirmação semelhante é encontrada no livro [L]:

⁵⁷ Martins, “Como Distorcer,” 269.

⁵⁸ Martins, “A Fundamentação,” 2.

⁵⁹ Martins, “Como Distorcer”.

⁶⁰ Martins, “Teoria”.

⁶¹ Brown, K. *Reflections on Relativity* (Morrisville: Lulu Press, 2017).

[L]: *“Einstein conseguiu basear a teoria em dois postulados. O primeiro traduz o fato de não sentirmos, em termos de forças, um movimento retilíneo uniforme, apesar de sentirmos quando estamos sofrendo acelerações. Esse resultado já era conhecido por Galileu.”* (p. 244).

À rigor, o princípio da relatividade proposto por Galileu Galilei, era apenas válido para fenômenos mecânicos. Por isso, desde o século XVII, muitos pesquisadores tentaram evidenciar o movimento da Terra a partir de fenômenos ópticos. Foi somente no século XIX que os pesquisadores consentiram que o princípio da relatividade também deveria ser válido para os fenômenos ópticos, como podemos ver na conclusão de Mascart ⁶²:

A conclusão geral desta Memória seria, portanto [...] que o movimento translacional da Terra não tem influência apreciável nos fenômenos ópticos produzidos com uma fonte terrestre ou com a luz solar, que estes fenômenos não nos dão os meios de evidenciar o movimento absoluto de um corpo e que os movimentos relativos são os únicos que podemos realizar.

Além disso, no século XIX, com o desenvolvimento da teoria eletromagnética, surgiu a possibilidade de que fosse possível evidenciar o movimento absoluto da Terra, a partir de fenômenos eletromagnéticos. Diversos experimentos foram projetados e realizados, entretanto, nenhum deles foi capaz de detectar o movimento da Terra em relação ao Éter. Foi a partir desses resultados que, inicialmente, Poincaré sugeriu que o princípio da relatividade deveria ser uma lei geral da física, e pesquisadores como o próprio Poincaré, Bucherer, Cohn, Langevin e Einstein buscaram uma formulação do eletromagnetismo (e, posteriormente de toda a física) que fosse compatível com esse princípio. Portanto, é anacrônico dizer que o princípio da relatividade, como proposto por Einstein, é equivalente o proposto por Galileu.

Um exemplo de enunciado adequado para esse princípio é aquele encontrado na obra [J], ao apresentar o primeiro postulado do ensaio de Einstein:

“O primeiro princípio [da relatividade], referente às leis da Mecânica, da Termodinâmica, da Óptica, da Eletricidade e do Magnetismo, é uma generalização do princípio da relatividade de Galileu-Newton, que se aplicava somente às leis da Mecânica.” (p. 188).

Ou o que aquele que aparece na obra [F]:

“As leis da Mecânica são as mesmas em referenciais que estejam em movimento retilíneo e uniforme, um em relação ao outro”. (p. 234).

⁶² Mascart, “Sur Les,” 420.

Porém, os autores cometem uma incongruência quando discutem o princípio da relatividade no contexto da relatividade especial, ao afirmarem que:

[F]: “O 1º postulado, então, difere da ideia de Galileu Galilei ao incluir todos os processos naturais e não somente processos relativos a movimentos”. (p. 238).

Isso não é verdade, como vimos, mesmo na formulação de Einstein, o princípio continua associado a noção de movimento relativo.

O terceiro problema evidenciando é que o princípio da relatividade é focalizado em Galileu e Newton e Einstein. Trata-se de uma visão anacrônica que privilegia a construção dos conceitos como frutos de personagens isolados. Embora, Galileu tenha motorizado esse princípio para justificar a teoria heliocêntrica, se o princípio foi uma produção histórica e social que passou por vários atores e contextos culturais diversos, como pode ser visto em Martins⁶³. No contexto da Teoria da Relatividade, Poincaré foi quem inicialmente sugeriu sua generalização e essa prescrição encontrou ressonância principalmente nos físicos alemães, como Bucherer, Cohn, Einstein, Planck, Laue.

Embora seja inviável descrever todo processo de socialização e ruptura epistemológica que envolve a gênese de um conceito ou fato científico, e alguns pesquisadores se destaquem nesse processo, é importante destacar que esse processo não é linear e nem acumulativo. Talvez a melhor metáfora seja aquela sugerida pelo historiador da ciência Maia⁶⁴:

Uma espiral histórica de reinterpretações sucessivas, erigida sobre (e contra) a herança, a bagagem conceitual recebida; cada volta dessa espiral perfaz um acréscimo sobre a anterior, tornando-se dependente da que lhe antecede, porém dela se libertando, caminhando além, fornecendo as condições de possibilidade de novos passos. É um processo de encadeamento semiótico dos sentidos, a semiose infinita: o significado remete recorrentemente a outro significado – o sentido flutua sem referente fora dessa cadeia. Traça assim uma trajetória que nada se parece ao evoluir linear e progressivo em direção a um ponto de fuga futuro e predeterminado de aproximações sucessivas a um referente, A Verdade. O futuro jaz como incógnita. Essa espiral hermenêutico-semiótica dá novo impulso, outra vitalidade ao preexistente – claro, nada parte de um vazio cultural, mas, sim, mostra soluções para problemas já postos, descobre novas questões em antigas e consolidadas soluções. Este o evoluir histórico da cognição; e este o sentido que se pode dar à noção de “progresso” em história: seu evoluir espiralado, reinterpretaivo, interativo.

⁶³ Martins, “Galileo”.

⁶⁴ Maia, “História”.

2. O CONCEITO DE ÉTER

A ideia de espaço vazio parecia ser insustentável, por isso diversos pensadores assumiram que o espaço fosse preenchido por alguma substância ⁶⁵. Aristóteles propôs que o espaço fosse preenchido por uma quinta essência que ele chamou de éter. A ideia de um meio que preenchesse o espaço persistiu até o começo do século XX e, apesar de ter sido modificada e aprimorada, o nome éter foi mantido. Várias hipóteses e investigações a respeito do éter foram conduzidas no decorrer do século XVIII e XIX ⁶⁶. Para os pesquisadores, haviam um corpo robusto de resultados que sustentavam a existência e a consistência do éter ^{67 68}. Maxwell desenvolveu a sua abordagem causal sobre o eletromagnetismo construindo um modelo mecânico da interação das cargas com o éter ^{69 70}. Por isso, muitos pesquisadores do século XIX consideravam o sucesso da Teoria de Maxwell como a maior testemunho em favor da hipótese do éter ⁷¹.

Portanto, o conceito de éter desempenhou um papel fundamental na construção da física, porém, muitas vezes esse conceito é retratado de forma jogral e depreciativa. Por exemplo, na obra [E], embora o autor faça uma contextualização sobre a importância do éter para a física clássica, citando uma passagem de um livro texto do século XIX ⁷², ao discutir a rejeição do éter por Einstein, o autor faz a seguinte observação:

[E]: *“Desse modo, Einstein, que ao postular o quantum de luz eliminou a necessidade da existência do éter como meio de suporte das ondas eletromagnéticas, libertava – agora definitivamente – a Física da necessidade dessa incomoda entidade de propriedades mirabolantes e impossível de detectar”*. (p. 216)

Sobre essa declaração, é necessário fazer duas observações: a primeira diz respeito sobre a forma depreciativa como autor se refere a esse conceito. Como observa Martins ⁷³

O éter não era uma suposição tola: na verdade, tolice é falar-se sobre um espaço totalmente vazio (MARTINS, 1993). No final do século XIX e início do século XX, o éter preenchia o papel de proporcionar uma explicação causal para alguns fenômenos físicos (por exemplo, propagação da luz e dos campos eletromagnéticos), e na versão de Lorentz e Poincaré permitia uma explicação causal de fenômenos como a contração dos corpos em movimento (essa contração seria causada por uma variação das forças

⁶⁵ Martins, “A Origem”.

⁶⁶ Martins, “A Origem”.

⁶⁷ Darrigol, “The Mistery”.

⁶⁸ Martins, “A Origem”.

⁶⁹ Darrigol, “The Mistery”.

⁷⁰ Martins, “A Origem”.

⁷¹ Martins, “A Origem”.

⁷² A obra em questão é o *Cours de Physique* de A. Ganot.

⁷³ Martins, “Como Distorcer,” 267.

eletromagnéticas entre as partículas do corpo, que, por sua vez, seria causada pelo movimento através do éter). O aumento de massa de um elétron era explicado a partir do momento acumulado ao redor deste, no éter, pelos campos eletromagnéticos. Na versão de Einstein, a teoria da relatividade prevê os efeitos, mas não se preocupa em apresentar uma explicação causal dos fenômenos (id., 1981).

O segundo ponto é quando autor afirma que Einstein rejeitou o éter ao postular o *quantum* de luz. Trata-se de uma afirmação que também aparece na obra [D], como podemos ver na seguinte passagem:

[D]: “Aliás, Einstein não levou em conta a necessidade do éter, mesmo porque, na explicação do efeito fotoelétrico, que veremos adiante, ele já havia descartado a luz como onda eletromagnética. Para Einstein, a luz era formada de ‘partículas’ de luz.” (p. 209).

Isso está incorreto. Em 1905, Einstein também escreveu um trabalho onde ele discutiu as propriedades associadas a produção e a transformação da luz, porém, diferente das narrativas populares, nesse trabalho Einstein não recorreu a hipótese do *quantum* de Planck.

Costuma-se acreditar que o trabalho de Einstein se baseou no de Planck, mas essa crença não se sustenta, historicamente (KLEIN, 1977, p. 29). A partir do que foi exposto, pode-se concluir que no artigo de 1905, Einstein não estava empenhado em aplicar a idéia do quantum de energia de Planck, nem tentou associar seu próprio trabalho à teoria do corpo negro de Planck. Pelo contrário, parece que ele queria se desvincular da teoria de Planck, mostrando que seus pressupostos levavam a conclusões errôneas (a lei de Rayleigh) e associando-se por outro lado à teoria de Wien (e adotando, inclusive, sua postura geral em relação à radiação). É também significativo que Einstein sempre escreveu em seu artigo de 1905 a magnitude de seus quanta de luz como $(R/N)\beta v$, e não como fora proposto por Planck, $h\nu$. De acordo com Mehra e Rechenberg, Einstein queria “ficar longe da teoria de Planck” (MEHRA & RECHENBERG, 1982, vol. 1.1, p. 79). É relevante que Einstein criticou muitas vezes Planck como em 1906, por exemplo, ao escrever uma resenha sobre um livro do mesmo a respeito de radiação térmica: “O autor aponta repetidamente a necessidade de introduzir essa constante universal h e enfatiza quão importante é seu significado físico (que não é tratado neste livro)” (Einstein, apud MEHRA & RECHENBERG, 1982, vol. 1.1, p. 75).⁷⁴ (Rosa, 2004, 28).

⁷⁴ Rosa, Pedro. S. *Louis de Broglie e as ondas de matéria*. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004): 28.

Além disso, Einstein também não descartou a teoria ondulatória, já que o mesmo afirma que: “A teoria ondulatória da luz, que trabalha com funções espaciais contínuas, funcionou bem na representação de fenômenos puramente ópticos e provavelmente nunca será substituída por uma outra teoria.”⁷⁵. A esse respeito, Rosa salienta que:

Portanto, Einstein não está propondo, neste artigo, uma teoria geral para a luz, capaz de explicar todos os seus fenômenos. Ele está propondo uma hipótese particular, válida apenas em determinadas condições (radiação de alta frequência e baixa densidade), e que é capaz de explicar apenas alguns fenômenos, mas não outros. Deve-se notar que a postura de Einstein é semelhante à de Wien (ver seção 1.2.3), que admitia a possibilidade de que a radiação de grande comprimento de onda e a de pequeno comprimento de onda fossem qualitativamente diferentes, exigindo duas teorias distintas.

76

Além do mais, em seu ensaio sobre o princípio da relatividade, Einstein faz uma abordagem ondulatória da luz. Em nenhum momento ele se refere ao seu ensaio sobre a transformação e produção da luz e a sua natureza corpuscular. Por fim, convém mencionar que durante a consecução da Teoria da Relatividade Geral, Einstein voltou a defender a existência do éter^{77 78 79}, o que seria, no mínimo, incongruente se a natureza corpuscular tivesse descartado a existência do éter.

Outro tipo de incongruência que detectamos, ocorre na obra [D]. Ao discutir sobre o conceito de éter, os autores afirmam que:

[D]: “Na ocasião, havia a hipótese da existência de um meio rarefeito sem viscosidade e suficientemente rígido para justificar a elevada velocidade de propagação [da luz], atribuída a Hendrik Lorentz (1853-1928) e Henri Poincaré (1854-1912)”. (p. 205).

O conceito de éter não foi proposto nem por Lorentz, nem por Poincaré. Trata-se de um conceito que apareceu na filosofia natural nos debates sobre a existência do vazio⁸⁰ (cf. Martins 1993) tendo sido

⁷⁵ Rosa, “Louis,” 27.

⁷⁶ Einstein, Albert; “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt,” *Annalen der Physik* 17, nº 6 (1905): 368

⁷⁷ Martins, “A Origem”.

⁷⁸ Nunes, Ricardo. C. Queirós, Wellington. P. “Doze Mitos Sobre a Teoria da Relatividade que Precisamos Superar,” *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* 37, nº 2 (ago. 2020): 531-573.

⁷⁹ Voltaremos a discutir sobre a suposta refutação do conceito do éter quando discutirmos o experimento de Michelson-Morley.

⁸⁰ Losee, John. *Introdução Histórica a Filosofia da Ciência* (São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1979).

usado para explicar o conceito de ímpeto por diversos filósofos naturais^{81 82 83 84}, foi utilizado por Descartes, para explicar o movimento planetário e a conservação da quantidade movimento^{85 86 87 88} e até por Newton como uma possível explicação para a lei da gravitação universal (cf. Martins 2006b). Posteriormente, o éter foi associado aos fenômenos ópticos e eletromagnéticos, tornando um conceito fundamental para o desenvolvimento da teoria eletromagnética por Maxwell, Larmor e Lorentz^{89 90}. De fato, no final do século XIX e no começo do século XX, o conceito de éter era muito bem estabelecido no coletivo de pensamento dos físicos.

Na obra [L] há uma seção inteira para contextualizar os antecedentes históricos da relatividade, onde os autores focam em apresentar sobre a natureza ondulatória da luz e a necessidade do éter. Na descrição dos autores, encontramos quatro passagens problemáticas, que discutiremos a seguir:

[L]: *“No final do século XIX, a hipótese do éter foi questionada quando apareceram indícios perturbadores de que a velocidade de propagação da luz no vácuo era a mesma qualquer que fosse o referencial utilizado para medi-la. E isso era um problema, pois as velocidades até aquele momento eram dependentes dos referenciais adotados em suas medidas.”* (p. 241)

Isso não é verdade, como observou Martins⁹¹:

Michelson, como a quase totalidade dos físicos da época, não colocava em dúvida a existência do éter, e por isso nunca pensaria em testar a sua existência. O que ele estava tentando fazer, em seus famosos experimentos, era medir a velocidade da Terra através do éter, admitindo o modelo de Fresnel de um éter estacionário (ou seja, que não era arrastado pela própria Terra). O resultado obtido, contrário à expectativa, podia ser interpretado de muitos modos diferentes. Albert Michelson não rejeitou os resultados do experimento, evidentemente, mas adotou uma interpretação que é diferente da relativística, posterior.

⁸¹ Martins, “Em Busca”.

⁸² Martins, “Como Distorcer”.

⁸³ Henry, John. *A Revolução Científica e as Origens da Ciência Moderna* (Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998).

⁸⁴ Grant, Edward. *História da Filosofia Natural do Mundo Antigo do século XIX* (São Paulo: Madras, 2009).

⁸⁵ Martins, “Em Busca”.

⁸⁶ Martins, “Como Distorcer”.

⁸⁷ Henry, John. “A Revolução”.

⁸⁸ Grant, “História”.

⁸⁹ Martins, “A Dinâmica”.

⁹⁰ Martins, “A Origem”.

⁹¹ Martins, “Como Distorcer,” 266.

O que as equações de Maxwell apresentavam eram assimetrias em relação as transformações de Galileu que permitiriam evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter. Entretanto, inúmeros experimentos não conseguiram evidenciar esse efeito e isso exigia ou formulação das equações de Maxwell para condutores em movimento que fosse compatível com o princípio da relatividade.

Adiante, os autores afirmam que:

[L]: *“As equações do Eletromagnetismo de Maxwell apresentam uma solução ondulatória em que as ondas eletromagnéticas viajam numa velocidade constante no vácuo, igual a $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. Uma análise mais cuidadosa das equações mostra que essa velocidade é independente do movimento da fonte ou do observador, entrando em desacordo com a Mecânica newtoniana, na qual as velocidades das ondas são relativas, dependendo do referencial.”* (p. 241)

Essa incompatibilidade entre a mecânica e o eletromagnetismo não existe. O princípio da constância da velocidade da luz foi derivado dos estudos da acústica e incorporado ao eletromagnetismo quando os físicos aderiram a interpretação ondulatória da luz.

A velocidade de propagação de qualquer onda é uma propriedade do meio onde ela se propaga, e não depende da velocidade da fonte. A velocidade do som no ar, por exemplo, independe da velocidade do objeto que está produzindo o som. Em meios dispersivos (aqueles em que a velocidade depende do comprimento de onda ou da frequência) pode-se dizer que a velocidade da onda é influenciada pela velocidade da fonte, porque o seu movimento altera a própria frequência; mas no caso da luz e de outras ondas eletromagnéticas, em uma região sem matéria, não há dispersão, e portanto o movimento da fonte não produz nenhum efeito sobre sua velocidade. Assim, pode-se dizer que o postulado da constância de velocidade da luz era uma suposição natural e indiscutível para todos os que aceitavam a teoria ondulatória da luz, no início do século XX. E pode-se afirmar que essa ideia estava vinculada à crença na existência de um éter como substrato para a propagação da luz e de outras ondas eletromagnéticas. De fato, em qualquer teoria que aceite a existência do éter, é natural que a velocidade da luz não dependa do movimento da fonte, pois trata-se da mesma situação que ocorre na acústica. Se a luz é uma onda do éter, o valor de c deve ser uma propriedade do éter, não dependendo da velocidade da fonte luminosa.⁹²

A seguir, os autores fazem a seguinte observação:

⁹² Martins, “A Origem,” 249.

[L]: “Curiosamente, Maxwell acreditava na existência do “éter”, apesar de suas equações serem capazes de descrever a propagação das ondas eletromagnéticas sem depender desse hipotético meio elástico tênue.” (p. 241)

Isso não é verdade, pois “a teoria de Maxwell (isto é, aquilo que Maxwell fez, e não o que Lorentz fez depois dele) só era aplicável a referenciais em repouso em relação ao éter. Não examinava o que aconteceria em outros referenciais.”⁹³. E mesmo depois que Lorentz tenha apresentado, em 1904, uma teoria covariante do eletromagnetismo, ele apresentava suas transformações em duas etapas: uma utilizando as transformações de Galileu, que julgava serem as verdadeiras, e depois, aplicando o novo conjunto de transformações, que ele chamava de artificiais ou puramente matemáticas^{94 95}. Foi Poincaré^{96 97}.que mostrou, utilizando teoria de grupos, que essa transformação clássica era desnecessária e que também não era necessário fazer referência a um referencial em repouso no éter.

Por fim, na conclusão sobre a discussão do éter e sua rejeição, os autores declaram:

[L]: “(...) H. A. Lorentz, em 1892, apresentou sua teoria eletromagnética da qual o éter fazia parte e ainda justificou os resultados negativos dos experimentos de Michelson-Morley, acrescentando à sua teoria a chamada hipótese da contração. Apenas em 1905 a polêmica do éter seria reaberta, quando Albert Einstein apresentou sua teoria da relatividade desconsiderando a hipótese da existência do éter na sua formulação.”

A hipótese da contração proposta por Lorentz em 1892, não apaziguou os resultados polêmicos dos experimentos que visavam detectar o movimento da Terra em relação ao Éter. Poincaré⁹⁸ denunciou a hipótese da contração como artificial e afirmou que não se deveria propor uma hipótese nova para cada nova divergência, mas era necessário construir uma teoria eletromagnética compatível com o princípio da relatividade⁹⁹. Foi apenas em 1904, que Lorentz¹⁰⁰ conseguiu obter uma teoria satisfatória que conseguia explicar a nulidade destes experimentos. E mesmo com esse avanço, ainda haviam algumas divergências, envolvendo a variação da massa dos elétrons com a velocidade, cuja resolução só apareceria a partir de 1907, com o desenvolvimento da dinâmica relativística^{101 102}.

Na obra [K] os autores fazem uma contextualização bastante sintética sobre o éter e a sua importância para teoria eletromagnética:

⁹³ Martins, “Como Distorcer,” 268.

⁹⁴ Lorentz, “Electromagnetic”.

⁹⁵ Martins, “A Origem,” 126-128.

⁹⁶ Poincaré, “Sur la”, 1905.

⁹⁷ Poincaré, “Sur la”, 1906.

⁹⁸ Poincaré, “La Science”.

⁹⁹ Inclusive, Poincaré chamou esse período da segunda crise da física (ou a crise da física dos princípios).

¹⁰⁰ Lorentz, “Electromagnetic”.

¹⁰¹ Martins, “A Dinâmica”.

¹⁰² Martins, “A Origem”.

[K]: “Por volta de 1860, James Clerk Maxwell (1831-1879) desenvolveu sua teoria do eletromagnetismo, na qual os fenômenos eletromagnéticos se propagam com velocidade finita. Maxwell calculou a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo e mostrou ser ela equivalente a velocidade da luz, a qual passou a ser entendida como uma onda eletromagnética com velocidade constante. Nessa teoria, o éter (um fluido imaterial hipotético que permearia todo o espaço do Universo) ainda era aceito como o meio necessário para a onda de luz se propagar.” (p. 254).

E, mais a frente eles explicam como, supostamente, porque Einstein rejeitou o conceito de éter:

[K]: “(...) A teoria da relatividade de Einstein descarta a necessidade de um “éter” para explicar qualquer fenômeno associado à propagação da luz, porque considera, como primeiro postulado, que a velocidade da luz é uma das grandezas físicas absolutas.” (p. 255).

Inicialmente, convém observar que os autores inverteram a ordem dos postulados: por alguma razão, eles consideraram a constância da velocidade da luz como primeiro postulado (discutiremos em detalhes essa questão na seção 3.5). Além do mais, a rejeição do éter não decorre do princípio da constância da velocidade da luz. Em seu artigo original, Einstein ¹⁰³ apenas declara que “a introdução de um «éter luminífero» irá se mostrar supérflua, visto que na teoria que vamos desenvolver não precisaremos introduzir um «espaço em repouso absoluto», nem de atribuir um vector velocidade a qualquer ponto do espaço vazio em que tenha lugar um processo electromagnético.” Da perspectiva lógico-matemática, é o postulado do princípio da relatividade que permite que as transformações entre referenciais inerciais possam prescindir de um espaço absoluto ou de um sistema em relação ao éter ^{104 105 106 107 108 109 110}. É importante frisar que este resultado não pode ser tomado como uma prova da inexistência do éter e nem foi o motivo pelo qual

¹⁰³ Einstein, “Zur Elektrodynamik,” 892

¹⁰⁴ Poincaré, “Sur la”, 1905.

¹⁰⁵ Poincaré, “Sur la”, 1906.

¹⁰⁶ Lorentz, “Deux”.

¹⁰⁷ Logunov, “Henri Poincare”.

¹⁰⁸ Martins, “El Empirismo”.

¹⁰⁹ Martins, “A Origem”.

¹¹⁰ Na proposta original de Lorentz de 1904, as transformações deveriam ser feitas em duas etapas: primeiro transformamos o sistema S , em repouso em relação ao éter, para um sistema S' em movimento, utilizando as transformações clássicas (atualmente chamadas de transformações de Galileu). O segundo passo, consiste em aplicar as transformações de Lorentz, para um referencial S'' que se desloca com velocidade relativa v (que deve ser sempre menor que a velocidade da luz no vácuo) em relação a S' . Porém, no ano seguinte, Poincaré, em seus ensaios de 1905 e 1906, mostrou que como as transformações de Lorentz formam um grupo de Lie, em decorrência do princípio da relatividade, pode-se fazer a transformação direta entre S' e S'' . Portanto, não é preciso fazer referência a um sistema em repouso em relação ao éter.

Einstein propôs, em 1905, rejeitar o éter, pois, como aponta Martins ¹¹¹ a motivação de Einstein foram suas convicções epistemológicas:

No entanto, em 1905, Einstein considerava o éter como um conceito inútil, porque não pode ser detectado. Einstein, em 1905, adotou a posição de que aquilo que não pode ser detectado deveria ser excluído da física. Essa é uma postura epistemológica empirista, ou positivista. Há outros autores da mesma época que adotavam posturas semelhantes. Ernst Mach rejeitou o espaço e o tempo absolutos de Isaac Newton porque não podiam ser observados. O químico Wilhelm Ostwald rejeitou os átomos porque não podiam ser observados. Einstein admirava muito esses autores (e outros empiristas), e até mesmo tentou trabalhar junto a Ostwald (mas não conseguiu).

Por fim, nas obras [D], [H] e [I] evidenciamos que os autores apenas mencionam que existia uma substância chamada éter que serviria de meio material para a luz, mas que teve sua inexistência comprovada pelo experimento de Michelson-Morley ou pela Relatividade de Einstein¹¹². Assim como acontece com o Princípio da Relatividade, essa falta de contextualização não permite que o educando compreenda o quadro teórico que deu origem a Relatividade Especial. A única obra que apresenta o conceito do éter, sem fazer juízos de valores, e com uma contextualização adequada e sintética, é a obra [G].

3. O EXPERIMENTO DE MICHELON-MORLEY

Algumas das obras analisadas discutem o experimento interferencial de Michelson-Morley, realizado em 1887, que tentou evidenciar o movimento da Terra em relação ao Éter, porém obteve resultados nulos. Devido as divergências sobre a importância desse experimento para o desenvolvimento da relatividade especial ¹¹³, façamos uma breve recapitulação:

Na segunda metade do século XIX, estava bem estabelecido que não era possível estabelecer a velocidade absoluta de um corpo por meio de experimentos mecânicos ou ópticos, por outro lado, essa

¹¹¹. Martins, "A Origem", 255.

¹¹² Trataremos sobre essa questão na próxima seção.

¹¹³ Para uma discussão sobre a o papel do experimento de Michelson-Morley na Relatividade Especial, ver:

Hacking, Ian. *Representar e Intervir: Tópicos Introdutórios de Filosofia da Ciência Natural* (Rio de Janeiro: EdUERJ, 2012): 349-367

Holton, "Einstein".

Lakatos, Imre. "O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica," in *A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*, org. Lakatos, Imre. Alan Musgrave (São Paulo: Cultrix, 1979).

Miller, "Albert Einstein's".

restrição parecia não se aplicar a abordagem da teoria eletromagnética de Maxwell e Hertz¹¹⁴ (Martins, 2015). Em 1879, Maxwell propõe uma ideia para medir a velocidade da Terra em relação ao éter. Se a luz é uma onda do éter, significa que a sua velocidade medida em um referencial em repouso não depende da velocidade do movimento da fonte. A mesma coisa acontece com o som e essa é a causa do efeito Doppler-Fizeau. Porém, se o ar estiver se movimentando, então o som será arrastado pelo movimento do meio e sua velocidade irá mudar. Maxwell conjecturou que o movimento da Terra em relação ao éter poderia produzir uma espécie de vento de éter e separando a luz em dois feixes, um no sentido do vento de éter e o outro no sentido contrário, quando esses raios se encontrarem haverá uma interferência, pois o vento de éter criaria uma defasagem. Medindo essa interferência seria possível medir a velocidade de translação da Terra em relação ao éter¹¹⁵.

Infelizmente Maxwell morreu prematuramente, nunca podendo realizar o experimento. Por outro lado, o físico estadunidense Albert Abraham Michelson (1852-1931) se interessou pela proposta de Maxwell e conseguiu um apoio financeiro de Graham Bell para viajar para a Europa a fim de estudar métodos de interferometria. Em 1881, Michelson montou um interferômetro e conduziu a experiência proposta por Maxwell. O efeito observado não estava de acordo com o proposto por Maxwell, pareciam apenas ser ruído aleatório. Michelson desistiu da experiência, mas devido aos apelos dos colegas, retomou o interesse no assunto. A experiência de 1881 podia ser explicada de várias formas, as mais plausíveis eram: o aparelho não possuía sensibilidade suficiente ou o éter é viscoso e Terra arrasta uma porção dele durante a sua translação¹¹⁶.

Em 1886, para verificar a viscosidade do éter, Michelson e o químico Edward Williams Morley (1838-1923) realizaram um experimento bastante sensível e determinaram que o éter não deveria possuir viscosidade¹¹⁷. Assim, em 1887, Michelson e Morley, desenvolveram um experimento extremamente sensível¹¹⁸ e repetiram o experimento de 1881, os novos dados obtidos não permitiam detectar nenhum efeito do movimento absoluto da Terra em relação ao éter (ou ao espaço absoluto)¹¹⁹. Diferente da opinião popular, o experimento de Michelson-Morley não refutou a existência do éter^{120 121}. Este experimento, como

¹¹⁴ Nas abordagens relacionistas, como aquela devido a Weber, não há conceitos absolutos, apenas relacionais. Para detalhes, ver:

Darrigol, "Electrodynamics".

Lacey, Hugh. *A Linguagem do Espaço e do Tempo* (Perspectiva: São Paulo, 1972).

Sklar, Lawrence. *A Filosofia da Física* (Rio de Janeiro: Contraponto, 2021).

¹¹⁵ Martins, "A Origem".

¹¹⁶ Martins, "A Origem".

¹¹⁷ Martins, "A Origem".

¹¹⁸ Poincaré, "La Science".

¹¹⁹ Martins, "A Origem".

¹²⁰ Martins, "Como Distorcer".

¹²¹ Martins, "A Origem".

outros que foram realizados na mesma época, apenas estabeleceu, como observou Poincaré^{122 123 124 125}, que assim como ocorre na Mecânica e na Óptica, nenhum experimento eletromagnético pode medir a velocidade absoluta de um sistema físico.

Após essa pequena digressão, retomemos nossa análise sobre os Livros Didáticos. Nós evidenciamos diversas incongruências históricas.

A primeira diz respeito ao objetivo do experimento de Michelson-Morley. Essa incongruência é encontrada nas obras [D] e [H] que fazem as seguintes asserções sobre o objetivo do experimento de Michelson-Morley:

[D]: *“Michelson pretendia comprovar a existência do éter medindo a velocidade de deslocamento da Terra em relação a esse suposto meio.”* (p. 205).

[H]: *“A busca por uma prova do meio que preenchia todo o espaço se intensificou após a divulgação dos trabalhos de Maxwell e Hertz. (...) Albert Abraham Michelson (1852-1931) e Edward Williams Morley (1838-1923) realizaram um experimento com o objetivo de comprovar as hipóteses de Maxwell e determinar a velocidade da Terra em relação ao éter, entretanto esse experimento provou justamente o contrário.”* (p. 201).

Essas afirmações são incorretas do ponto de vista histórico, pois

Michelson, como a quase totalidade dos físicos da época, não colocava em dúvida a existência do éter, e por isso nunca pensaria em testar a sua existência. O que ele estava tentando fazer, em seus famosos experimentos, era medir a velocidade da Terra através do éter, admitindo o modelo de Fresnel de um éter estacionário (ou seja, que não era arrastado pela própria Terra).¹²⁶

Outra incongruência diz respeito sobre a interpretação dos resultados obtidos por meio do experimento de Michelson-Morley. Essa imprecisão aparece nas obras [D], [E], [F] e [H]:

[D]: *“As conclusões obtidas com o experimento de Michelson e Morley podem assim ser resumidas: Não existe o éter. O espaço é vazio (vácuo) e, portanto, não há referencial absoluto (...).”* (p. 205).

[E]: *“O resultado dessa experiência foi dramático para a Física, pois só admitia duas explicações: ou a velocidade da Terra através do éter é nula, ou o éter não existia.”* (p. 215).

¹²² Poincaré, “A Propos”.

¹²³ Poincaré, “La théorie”.

¹²⁴ Poincaré, “La Science”.

¹²⁵ Poincaré, “L’etat”.

¹²⁶ Martins, “Como Distorcer, 266.

[F]: “Ao falhar no experimento, Michelson e Morley descobriram que o éter não existia. Isso mostra que, na Ciência, errar também é importante.” (p. 235).

[H]: “A busca por uma prova do meio que preenchia todo o espaço se intensificou após a divulgação dos trabalhos de Maxwell e Hertz. (...) Albert Abraham Michelson (1852-1931) e Edward Williams Morley (1838-1923) realizaram um experimento com o objetivo de comprovar as hipóteses de Maxwell e determinar a velocidade da Terra em relação ao éter, entretanto esse experimento provou justamente o contrário”. (p. 201).

[L]: “(...) Apesar do questionamento da existência do éter ter partido dos resultados experimentais de Michelson-Morley quando verificaram que não havia alteração no efeito da velocidade do referencial do observador (Terra) na medida da velocidade da luz viajando no éter, o conceito de éter se manteve estável.” (p. 242).

Diferente do que é afirmado por estes autores,

O resultado obtido, contrário à expectativa, podia ser interpretado de muitos modos diferentes. Albert Michelson não rejeitou os resultados do experimento, evidentemente, mas adotou uma interpretação que é diferente da relativística, posterior.¹²⁷

Em outras palavras, “não é verdade que os experimentos de Michelson-Morley derrubaram a “teoria do éter luminífero” (Silveira 2014)¹²⁸. Com efeito, nenhuma experiência é capaz de falsificar hipótese do éter,

Ao contrário do que muitas pessoas acreditam, nem Einstein nem qualquer outro pesquisador provou que o éter não existe e que os lugares onde não existe matéria constituem um vazio absoluto. Nunca se pode provar que não existe nada em determinada região do espaço, pois ali poderiam existir entes físicos ainda desconhecidos, que não sabemos detectar. De fato, não se pode provar a inexistência de uma coisa, é sim, sua existência. Não observar uma coisa não prova que ela não exista¹²⁹.

Além disso, em uma palestra intitulada *Éter e Relatividade*, proferida por Einstein, em 1920, afirma que: “uma reflexão mais cuidadosa nos ensina, no entanto, que a teoria da relatividade especial não nos

¹²⁷ Martins, “Como Distorcer”, 266.

¹²⁸ Silveira, Fernando L. “Não é verdade que os experimentos de Michelson-Morley derrubaram a “teoria do éter luminífero”!” 6 de fevereiro, 2014. *Centro da Referência para o Ensino de Física*, Disponível em: < <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=nao-e-verdade-que-os-experimentos-de-michelson-morley-derrubaram-a-teoria-do-eter-luminifero> >. Acesso em: 21 de mar. de 2021.

¹²⁹ Martins, “A Origem”, 256.

obriga a negar o éter”¹³⁰ e por isso, “podemos assumir a existência de um éter; só devemos desistir de atribuir um estado de movimento definitivo, isto é, devemos, por abstração, tirar dela a última característica mecânica que Lorentz ainda deixara.”¹³¹ E ao final, Einstein declara que:

Recapitulando, podemos dizer que, de acordo com a teoria geral da relatividade, o espaço é dotado de qualidades físicas; nesse sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a teoria geral da relatividade, o espaço sem éter é impensável; pois em tal espaço não só não haveria propagação de luz, mas também nenhuma possibilidade de existência para padrões de espaço e tempo (régua de medição e relógios), nem, portanto, quaisquer intervalos de espaço-tempo no sentido físico.¹³²

Também, julgamos pertinente fazer um comentário a relação de Einstein com o experimento de Michelson-Morley, que é apenas discutido na obra [G]:

[G]: “O século XX começou com gosto de revolução na ciência. Albert Einstein (1879-1955) defendeu a necessidade de uma solução radical ao problema trazido pelo experimento de Michelson e Morley.” (p. 185).

Esta declaração não está incorreta, porém, a relação entre Einstein e o Experimento de Michelson-Morley é um caso bastante peculiar da história da ciência e merece algum esclarecimento. Inicialmente, Einstein deu uma série de declarações afirmando que na ocasião que escreveu seus ensaios sobre a Relatividade, ele não estava ciente desse experimento e de seus resultados. Ao físico Robert Shankland, Albert Einstein declarou que só veio “conhece-lo por meio dos escritos de H. A. Lorentz, mas só depois de 1905 lhe despertara atenção!”¹³³. À historiadora Frances Gardiner Davenport, Einstein declarou, em 1954, por meio de uma carta, que:

No meu próprio desenvolvimento, o resultado de Michelson não teve uma influência relevante. Eu nem lembro se eu o conhecia quando escrevi meu primeiro artigo sobre o assunto (1905). A explicação é que eu estava, por razões de ordem geral, firmemente convencido de como [a não existência de movimento absoluto] poderia ser conciliado com nosso conhecimento de eletrodinâmica. Pode-se, portanto, entender por que, na minha luta pessoal, o experimento de Michelson não teve nenhum papel ou, pelo menos, nenhum papel decisivo¹³⁴.

¹³⁰ Einstein, “Collected Papers 7”, 171.

¹³¹ Einstein, “Collected Papers 7”, 171.

¹³² Einstein, “Collected Papers 7”, 181.

¹³³ Shankland, “Conversations”, 47.

¹³⁴ Einstein *apud* Holton, “Einstein”, 194.

Com base nesses relatos, o historiador da ciência, Gerald Holton, declarou que “o papel do experimento de Michelson na gênese da teoria de Einstein parece ter sido tão pequeno e indireto que se pode especular que não teria feito diferença para o trabalho de Einstein se o experimento nunca tivesse sido feito.”¹³⁵ Porém, em 1983, foi encontrado a transcrição de uma palestra de 1920, onde Einstein explica “como ele criou a Teoria da Relatividade”. Nessa conferência Einstein declara que não apenas veio a conhecer o experimento de Michelson-Morley durante seus anos como acadêmico na Politécnica de Zurique, entre 1896 e 1900, mas enfatiza que ela foi vital para a criação da relatividade.

Enquanto pensava nesse problema em meus anos de estudante, passei a conhecer o estranho resultado do experimento de Michelson. Logo cheguei à conclusão de que nossa ideia sobre o movimento da Terra em relação ao éter é incorreta, se admitirmos o resultado nulo de Michelson como um fato. Este foi o primeiro caminho que me levou à teoria especial da relatividade. Desde então, passei a acreditar que o movimento da Terra não pode ser detectado por nenhum experimento ótico, embora a Terra esteja girando em torno do Sol.¹³⁶

Por fim, é importante enfatizar que estas obras pecam por não discutirem que diversos experimentos foram realizados para tentar detectar o movimento da Terra em relação ao éter, sendo que alguns apresentaram resultados positivos¹³⁷, porém eles foram contestados, e a maior parte apresentaram resultados nulos. O experimento de Michelson-Morley é o experimento que se tornou mais popular, porém, ele não foi (e nem poderia ser) crucial para a rejeitar o éter. Consideramos importante enfatizar que não existem experimentos cruciais na ciência e eles não podem provar uma teoria^{138 139 140 141 142}. Além disso, como observam Arabatzis e Gavroglu¹⁴³, não devemos dar uma ênfase tão grande ao experimento de Michelson-Morley para a gênese da relatividade, uma vez que “Einstein formulou o TRE em resposta a problemas na eletrodinâmica, e um de seus principais objetivos era se livrar das “assimetrias” na teoria eletromagnética.”.

¹³⁵ Holton, “Einstein”, 195.

¹³⁶ Einstein, “How I created”, 46.

¹³⁷ Martins, “Galileo”.

¹³⁸ Holton, “Einstein”.

¹³⁹ Fourez, Gerard. *A Construção das Ciências* (São Paulo: Editora UNESP, 1995).

¹⁴⁰ Martins, “Introdução”.

¹⁴¹ Moreira, Marco. A. & Neusa T Massoni, *Epistemologias do Século XX: Popper, Kuhn, Lakatos, Laudan, Bachelard, Toulmin, Feyerabend, Maturana, Bohm, Bunge, Prigogine, Mayr* (São Paulo: E. P. U, 2011).

¹⁴² Moreira, Marco. A. & Neusa T Massoni, *Noções Básicas de Epistemologias e Teorias de Aprendizagem* (São Paulo: Livraria da Física, 2016).

¹⁴³ Arabatzis & Gavroglu, “Myth 18”, 153.

4. A INTEPRETAÇÃO DE LORENTZ E POINCARÉ

Muitos pesquisadores contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial. Além de Einstein, Lorentz e Poincaré também são destacados como protagonistas para consolidação desse estilo de pensamento. Inclusive houve uma disputa historiográfica se a prioridade da Teoria da Relatividade pertenceria a Einstein ou a Poincaré ¹⁴⁴. A principal diferença entre a interpretação de Lorentz-Poincaré e a de Einstein diz respeito a abordagem epistemológica ^{145 146 147}. Para Lorentz e Poincaré, o éter embora fosse completamente imponderável, era um conceito útil, pois permitia uma explicação causal para os fenômenos eletromagnéticos e ópticos. Podemos dizer que a abordagem de Lorentz-Poincaré é *Instrumentalista* ^{148 149} ou *Substancialista* ^{150 151}. É importante enfatizar que, embora Lorentz, diferente de Poincaré, não tenha adotado explicitamente o Princípio da Relatividade ¹⁵², Poincaré ^{153 154} demonstrou que a abordagem de Lorentz (e, por conseguinte, a de Einstein) era a única compatível com o Princípio da Relatividade. Já Einstein adotou uma abordagem mais positivista, pois considerava somente como objetos físicos aqueles que podem ser mensurados por meio de operações controladas. Uma vez que o éter era completamente imponderável, ele deveria ser rejeitado das teorias físicas. Para Einstein, os fenômenos deveriam ser explicados apenas em termos das suas relações, sem inferir suas causas. Nesse sentido, podemos dizer que Einstein adotou uma postura *Positivista-Operacionalista* ^{155 156} ou *Relacionista* ^{157 158}.

Das obras analisadas, somente as [D], [E], [F], [H], [I], [J] e [K] mencionam as contribuições de Lorentz e, com exceção da obra [E], [F] e [I], de Poincaré. Nas obras [D], [F], [H], [I] e [J] encontramos algumas incongruências.

O primeiro tipo de incongruência ocorre na obra [D], trata-se da falsa atribuição de que o conceito de éter foi proposto por Lorentz e Poincaré¹⁵⁹, que já discutimos na seção 3.2. O segundo tipo incongruência

¹⁴⁴ Darrigol, "The Mystery".

¹⁴⁵ Darrigol, "The Mystery".

¹⁴⁶ Martins, "El Empirismo".

¹⁴⁷ Martins, "A Origem".

¹⁴⁸ Martins, "El Empirismo".

¹⁴⁹ Martins, "A Origem".

¹⁵⁰ Lacey, "A Linguagem".

¹⁵¹ Sklar, "A Filosofia".

¹⁵² Lorentz, "Deux".

¹⁵³ Poincaré, "Sur la", 1905.

¹⁵⁴ Poincaré, "Sur la", 1906.

¹⁵⁵ Martins, "El Empirismo".

¹⁵⁶ Martins, "A Origem".

¹⁵⁷ Lacey, "A Linguagem".

¹⁵⁸ Sklar, "A Filosofia".

¹⁵⁹ [D]: "Na ocasião, havia a hipótese da existência de um meio rarefeito sem viscosidade e suficientemente rígido para justificar a elevada velocidade de propagação [da luz], atribuída a Hendrik Lorentz (1853-1928) e Henri Poincaré (1854-1912)". (p. 205).

aparece nas obras [H] e [J], e opera como uma espécie de “menção honrosa”, pois os autores limitam-se a mencionar que estes autores deram contribuições para física, mas sem fazer uma discussão mais detalhada, focalizando o mérito e crédito apenas em Albert Einstein. Abaixo apresentamos essas menções:

[H] *“Algumas propostas surgiram [para explicar os resultados nulos do experimento de Michelson-Morley] e, nesse contexto de efervescência de ideias e resultados, cientistas como Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) e Jules Henri Poincaré (1854-1912) foram fundamentais para o desenvolvimento da Teoria da Relatividade. Eles lançaram as sementes para que Albert Einstein (1879-1955) pudesse publicar, em 1905, um artigo (“Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento”) (...)”*

[I]: *“A teoria da relatividade restrita mostrou que um novo conjunto de transformações era necessário para que a invariância das leis físicas fosse mantida no estudo de fenômenos eletromagnéticos. O fato curioso é que esse conjunto de transformações já existia antes de Einstein publicar seu artigo; havia sido desenvolvido pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) em 1895”. (p. 235).*

[J]: *“Teorias sobre fenômenos térmicos, elétricos, magnéticos e luminosos foram desenvolvidas por aguçadas mentes, como Sadi Carnot, Rudolf Clausius, Gustav R. Kirchhoff, Ludwig Boltzmann, André-Marie Ampère, Michael Faraday, James C. Maxwell, Hendrik A. Lorentz, Henri Poincaré, entre outros”. (p. 187).*

Sobre estas passagens precisamos fazer algumas observações. Na passagem [I] há um erro histórico: as transformadas de Lorentz exatas, não apareceram no seu trabalho de 1895. Nessa obra, Lorentz utilizou uma aproximação de primeira ordem que preservava a Transformada Clássica (também conhecida como Transformada de Galileu) e introduzia uma transformação do tempo que ele chamou de tempo local. Lorentz só obteve as transformações corretas para o espaço e para o tempo em seu ensaio de 1904.

Sobre a passagem da obra [H], é preciso fazer algumas observações. Em primeiro lugar, mesmo aqueles historiadores da ciência que atribuem a prioridade da relatividade a Einstein, consideram que Lorentz e Poincaré desenvolveram um programa diferente para a eletrodinâmica (cf Darrigol 2004), mesmo que Einstein tenha tomado de empréstimo algumas das ideias destes dois pesquisadores, ele produziu um programa completamente diferente. Pode-se dizer que Einstein produziu uma reversão gestáltica (Kuhn 2017), isto é, propôs uma nova interpretação, a partir dos mesmos fenômenos e os mesmos dados que Poincaré e Lorentz se debruçavam. Além disso, deve-se destacar que

A teoria que atingiu seu ápice nas mãos de Lorentz e Poincaré não era a teoria de Einstein. Suas visões de mundo eram diferentes. Lorentz e Poincaré aceitavam o éter, embora também aceitassem que era impossível detectar o movimento em relação a esse

meio. Sua abordagem epistemológica era também diferente da de Einstein. No entanto, quase todas as previsões científicas da teoria de Einstein já estavam lá, nos artigos publicados por outros pesquisadores, antes de seu primeiro trabalho de 1905. Como já foi explicado, o conteúdo empírico dessas duas teorias é idêntico. Por mais estranho que pareça, é impossível distinguir, por qualquer experimento, a interpretação de Lorentz e Poincaré da interpretação de Einstein.^{160 161}.

Na obra [F] não encontramos nenhuma menção a Poincaré, mas os autores tentam traçar uma comparação entre o trabalho de Lorentz e o de Einstein, como podemos ver na passagem abaixo:

[F]: “Sabendo que em 1904, o físico holandês Hendrik Lorentz havia aplicado novas transformações nas equações de Maxwell, para mantê-las invariantes, Einstein propôs que fossem aplicadas não apenas aos fenômenos eletromagnéticos, mas a toda a Física, de modo que essas leis se tornassem invariantes em qualquer referencial.” (p. 235).

Essa passagem é incongruente. De fato, em 1904, Lorentz publicou um ensaio onde conseguia explicar a impossibilidade de detectar o movimento da Terra em relação ao éter, cuja “a única restrição é quanto à velocidade que deve ser menor do que a da luz.”¹⁶² Por essa razão, no artigo de 1904 de Lorentz, o estabelecimento da covariância das equações de Maxwell “era apenas *uma parte* programa de seu programa.”¹⁶³

Inicialmente ele [Lorentz] derivou essas equações para mostrar que as transformações para o espaço e o tempo permitiam explicar os resultados nulos dos vários experimentos de arrasto do éter: foi assim que essas equações se originaram com Lorentz (pp. 11-13 e 29). Ele então mostrou que a massa de um elétron aumenta com a velocidade (pág. 24), aplicou a variação de massa a uma análise dos dados experimentais disponíveis e conjecturou que as massas de todas as partículas são transformadas da mesma maneira. Esta parte de seu trabalho, certamente, não pode ser considerada como uma mera tentativa de encontrar equações de transformação de um sistema de coordenadas para outro, de tal maneira que a forma das equações de Maxwell permaneçam inalteradas.¹⁶⁴

¹⁶⁰ Martins, “Teoria”, 45.

¹⁶¹ Para uma análise da equivalência destas duas teorias ver:

Darrigol, “The Mystery”.

Martins, “El Empirismo”.

¹⁶² Lorentz, “Electromagnetic”, 811.

¹⁶³ Keswani, “Origin I”, 298, *itálicos do autor*.

¹⁶⁴ Keswani, “Origin I”, 298-299.

Outra incongruência está quando os autores afirmam que Einstein propôs que a invariância de Lorentz fosse aplicada a toda física. Isso não é verídico. Em seu ensaio original de 1905, Einstein desenvolveu a cinemática relativística e parte da eletrodinâmica. A mecânica e a termodinâmica relativística foram desenvolvidas por outros. Além disso, Einstein não investigou as implicações da covariância de Lorentz para a gravitação. Essa análise foi realizada por Poincaré (antes mesmo que Einstein submetesse seu artigo original), em 1905^{165 166 167}. É preciso enfatizar que no desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral, a covariância de Lorentz foi substituída por uma lei de covariância mais geral¹⁶⁸.

Por fim, convém discutir as abordagens das obras [E] e [K], que não fazem menção a Poincaré, mas discutem as contribuições de Lorentz. A obra [E] discute a hipótese de Lorentz e FitzGerald de uma contração dos braços do interferômetro de Michelson e Morley para explicar os resultados nulos:

[E]: *“Como a natureza parecia não se comover com essa inquietação, os físicos passaram a buscar hipóteses para ‘salvar’ o éter. A mais importante tentativa nesse sentido foi uma hipótese formulada por Lorenz e o físico irlandês George FitzGerald (1851-1901). De acordo com essa hipótese, os corpos, ao se moverem pelo éter, teriam o seu comprimento encurtado na direção do movimento. Por isso a experiência de Michelson-Morley não podia detectar o éter. (...) Como vamos ver na seção, [a lei matemática] é a mesma expressão da teoria da relatividade, mas nesse caso, a contração seria real, por conta de uma espécie de compactação, do corpo no sentido do movimento, e não aparente, por causa de medidas realizadas em referenciais diferentes, como prevê a teoria de Einstein.”* (p. 215-126).

Esta afirmação está correta, porém, é preciso observar que Lorentz apresentou o fenômeno da contração, em duas ocasiões distintas. A esse respeito, Martins¹⁶⁹ esclarece que: “a primeira proposta da contração foi uma hipótese *ad hoc*. Mas logo depois a contração foi integrada a uma teoria sólida, por Lorentz (e depois por Poincaré) e explicada a partir da alteração das forças eletromagnéticas entre as partículas da matéria que se move através do éter.”

Já a obra [K], discute a transformação de Lorentz e suas implicações:

[K]: *“Em contrapartida, Hendrik Lorentz (1853-1928) percebeu que, para o eletromagnetismo, a mudança nos referenciais modificava a forma como os fenômenos deveriam ser descritos.*

¹⁶⁵ Poincaré, “Sur la”, 1905.

¹⁶⁶ Poincaré, “Sur la”, 1906.

¹⁶⁷ Poincaré mostrou que era possível reformar a lei da gravitação da universal para incorporar o princípio da relatividade, preservando a adequação empírica, e que a luz deveria viajar através do espaço e do tempo por ondas gravitacionais que se deslocavam a velocidade da luz. Poincaré também sugeriu que nesse novo formalismo as grandezas físicas deveriam ser escritas como grandezas 4-dimensionais. Para detalhes sobre as Hipóteses da Gravitação de Poincaré, ver: Kox, “The Universe” e Renn & Schemmel, “The Genesis”.

¹⁶⁸ A esse respeito, ver Einstein, “A Teoria”.

¹⁶⁹ Martins, “Como Distorcer”, 268.

Assim, formulou um conjunto de equações para fazer a correspondência entre as equações de um referencial para outro. Esse conjunto de equações, conhecido como transformações de Lorentz, prevê a contração do espaço e a dilatação do tempo, dependendo do referencial tomado para descrever determinado fenômeno.” (p. 244).

Esta breve citação sintetiza de forma adequada as contribuições de Lorentz. Seria pertinente acrescentar que a formulação dessas transformações contou com contribuições de outros pesquisadores, mais notoriamente Joseph Larmor, que obteve a formulação aproximada válida até segunda ordem para efeitos de v/c , e Henri Poincaré, que corrigiu algumas incongruências, forneceu a interpretação física e suas implicações e as associou com o princípio da relatividade.

5. OS POSTULADOS DE EINSTEIN

Outro problema que foi encontrado em todos os 12 livros analisados é o enunciado do segundo postulado adotado por Albert Einstein em seu trabalho de 1905, chamado de princípio da constância da velocidade da luz. Em seu artigo de 1905, Einstein enunciou este postulado da seguinte forma:

“Qualquer raio de luz move-se no sistema de coordenadas <<em repouso>> com uma velocidade determinada V , que é a mesma, quer esse raio seja emitido por um corpo em repouso, quer o seja por um corpo em movimento.”¹⁷⁰

Contudo, nas obras analisadas, este postulado é declarado da seguinte forma:

[A]: “A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c ($c \cong 300\ 000$ km/s) em relação a qualquer referencial inercial”. (p. 269).

[B]: “Da velocidade da luz – A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e não depende da velocidade da fonte e nem do observador”. (p. 189).

[C]: “A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor para todos os observadores, qualquer que seja seu movimento ou da fonte”. (p. 187).

[D]: “A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor, $c \cong 300\ 000$ km/s, independentemente do movimento da fonte ou do sistema de referência do observador”. (p. 209).

[E]: “A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor para todos observadores, qualquer que seja seu movimento ou o movimento da fonte”. (p. 216).

[F]: “A velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor, em todos os sistemas inerciais de referência. Ela é independente da velocidade do móvel que emite ou recebe um sinal luminoso”. (p. 238).

¹⁷⁰ Einstein, “Zur Elektrodynamik”, 895.

[G]: “A velocidade da luz no vácuo é uma constante universal para qualquer observador”. (p. 185).

[H]: “A velocidade da luz no vácuo possui o mesmo valor em qualquer sistema de referência inercial”. (p. 205).

[I]: “A velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, independentemente do estado de movimento relativo a eles.” (p. 221).

[J]: “Princípio da constância da velocidade da luz: a velocidade da luz no vácuo vale $c \cong 300.000$ km/s em todos os referenciais inerciais, independentemente do movimento da fonte em relação ao observador”. (p. 188).

[K]: “A velocidade da luz é constante em qualquer referencial inercial, independentemente de a fonte emissora da luz estar ou não em movimento.” (p. 255)¹⁷¹.

[L]: “A velocidade da luz no vácuo possui sempre o mesmo valor para qualquer observador.” (p. 244).

Em síntese, em todas as obras analisadas, o segundo postulado ou é substituído ou é acrescido pelo princípio da invariância da velocidade da luz que afirma que *a velocidade da luz é a mesma para todos os sistemas inerciais de referência*. Porém, ao se admitir o princípio da invariância da luz não se está sendo apenas anacrônico, mas comprometendo a consistência da dedução proposta por Albert Einstein, em seu artigo de 1905.

No método axiomático, definimos postulados como afirmações tomadas como verdades que não podem ser demonstradas ou testadas pela própria teoria ¹⁷². É verdade que um postulado pode ser substituído por uma expressão equivalente, como ocorre com o quinto postulado de Euclides que frequentemente é substituído pelo axioma de Playfair ¹⁷³. No caso do segundo postulado, a invariância da velocidade da luz não é um axioma equivalente, mas um teorema, que Einstein introduz na seção cinco do seu artigo, *Teorema da Adição de Velocidades* ¹⁷⁴. Pelas regras do método axiomático, os autores que trocam o segundo postulado, deveriam demonstrar o princípio da constância da velocidade da luz, assim como aqueles que acrescentaram esse novo postulado, deveriam apresentar uma nova forma de se deduzir a regra de adição de velocidades. Na prática, o que os autores fazem é seguir o mesmo processo de dedução empregado por Einstein em seu teorema de adição de velocidades e depois usam esse teorema

¹⁷¹ Nessa obra, o princípio da constância da velocidade da luz é apresentado como primeiro postulado.

¹⁷² Courant, Richard & Hebert Robbins. *O Que é Matemática? Uma Abordagem Elementar de Métodos e Conceitos* (Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2000).

¹⁷³ Joyce, David. E. *Euclid's Elements: Book I* Disponível em: < <https://mathcs.clarku.edu/~djoyce/elements/bookI/propI30.html> > Acesso em: 25 fev. 2021.

¹⁷⁴ Einstein, “Zur Elektrodynamik”, 905-907.

para mostrar que a velocidade da luz é a mesma para todos os sistemas inerciais de referência, assim incorrendo em um grave erro lógico.

Outro problema, porventura, é aquele constado na obra [D], [E], [H] e [L], onde os autores afirmam que o princípio da constância da velocidade da luz foi inferido empiricamente do experimento de Michelson-Morley, como podemos ver nos trechos abaixo:

[D]: “O 2º postulado foi estabelecido por Einstein, independentemente do experimento de Michelson e Morley. (...) O resultado encontrado por Michelson e Morley dá respaldo experimental ao 2º postulado”. (p. 209).

[E]: “(...) Toda velocidade, seja de partículas, seja de ondas, depende do referencial. Esse princípio, no entanto, estabelece uma estranha exceção. Para luz, assim como para qualquer radiação eletromagnética, isso não ocorre. A sua velocidade é sempre a mesma, qualquer que seja o sistema de referência considerado. Por isso a experiência de Michelson-Morley não deu o resultado esperado.”

[H]: “Essa constância da velocidade da luz aparece como uma tentativa de explicar o resultado do experimento realizado com interferômetro de Michelson e Morley (repare que o éter deixou de ser mencionado).” (p. 205)

[L]: “Einstein conseguiu basear a teoria em dois postulados. O primeiro traduz o fato de não sentirmos, em termos de forças, um movimento retilíneo uniforme, apesar de sentirmos quando estamos sofrendo acelerações. Esse resultado já era conhecido por Galileu. Além disso, esse primeiro postulado está em conformidade com o fato de Michelson e Morley não conseguirem determinar um referencial para o hipotético “éter”. O segundo postulado decorre da constância da velocidade da luz, que aparece na teoria eletromagnética de Maxwell e no fato de a experiência de Michelson e Morley não indicar variações na velocidade da luz à medida que o interferômetro era girado.” (p. 244).

Todas essas passagens são problemáticas, pois o princípio da constância da velocidade da luz não é justificado pelo experimento de Michelson-Morley. Arabatzis & Gavroglu¹⁷⁵ enfatizam que

(...) quando escolheu falar do experimento M-M, Einstein enfatizou, repetidamente, sua importância para apoiar o princípio da relatividade - não a constância da velocidade da luz. Mas em muitos livros didáticos encontramos uma inferência diferente: que o experimento M-M demonstrou a constância da velocidade da luz, independentemente do movimento de sua fonte.

¹⁷⁵ Arabatzis & Gavroglu, “Myth 18”, 153.

Nesse sentido, a discussão do livro [L] é a que mais se aproxima de uma interpretação adequada, mas os autores se equivocam ao estender a interpretação do experimento de Michelson-Morley ao segundo postulado. Dito isso, convém se perguntar: qual era a natureza do segundo postulado?

Pode-se dizer que a base deste segundo postulado era teórica e não experimental. A velocidade de propagação de qualquer onda é uma propriedade do meio onde ela se propaga, e não depende da velocidade da fonte. A velocidade do som no ar, por exemplo, independe da velocidade do objeto que o está produzindo. Em meios dispersivos (aqueles em que a velocidade depende do comprimento de onda ou da frequência) pode-se dizer que a velocidade da onda é influenciada pela velocidade da fonte, porque o movimento da mesma altera a própria frequência; mas no caso da luz e de outras ondas eletromagnéticas, em uma região sem matéria, não há dispersão, e portanto o movimento da fonte não produz nenhum efeito sobre sua velocidade. Assim, pode-se dizer que o postulado da constância de velocidade da luz era uma suposição natural e indiscutível para todos os que aceitavam a teoria ondulatória da luz, no início do século XX.¹⁷⁶

/

Além disso, a invariância da velocidade da luz já aparece como uma consequência da constância da velocidade da luz, em um estudo de 1887, do físico alemão W. Voigt sobre o efeito Doppler da luz^{177 178}
^{179 180}. Por outro lado, como observa Martins¹⁸¹

Quem negasse a teoria ondulatória da luz e a existência do éter, já não poderia justificar esse princípio de nenhuma forma simples. Na teoria de Einstein, já que o éter era abandonado, seria mais "intuitivo" pensar na luz como partícula e, nesse caso, seria esperado que a velocidade dependesse da fonte. É curioso que em 1905, o mesmo ano em que publicou seu primeiro trabalho sobre relatividade, Einstein propôs uma hipótese corpuscular para a luz. No entanto, no artigo sobre relatividade, a luz é tratada como uma onda. Ao contrário dos defensores do éter, Einstein precisaria justificar experimentalmente esse postulado, mas não o fez. Em 1900, não existiam experimentos terrestres sobre a constância de c , que estudassem fontes luminosas de alta velocidade.

¹⁷⁶ Martins, "Teoria", 38-39.

¹⁷⁷ Voigt, "Über".

¹⁷⁸ Wesley, "Michelson-Morley".

¹⁷⁹ Ernst, Andreas. J. P. Hsu. "First Proposal of the Universal Speed of Light by Voigt in 1887," *Chinese Journal of Physics* 39, nº 3 (June, 2001).

¹⁸⁰ Heras, Ricardo. "A review of Voigt's transformations in the framework of special relativity." *arXiv:1411.2559v4* [physics.hist-ph], 2017.

¹⁸¹ Martins, "Teoria", 39-40.

Foi apenas em 1919 que o físico italiano Quirino Majorana publicou as primeiras evidências de laboratório desse tipo.

Além disso, na ocasião que Einstein publicou seu ensaio (1905), as evidências sugeriam que talvez a velocidade da luz dependesse do movimento da fonte:

Sob o ponto de vista astronômico, não era muito claro se a velocidade da luz era sempre a mesma. Pareciam existir evidências de que a velocidade da luz emitida por certas estrelas seria mais lenta. Evidentemente, se esse efeito existisse, ele violaria tanto a relatividade de Einstein quanto a teoria do éter.¹⁸²

O mais curioso é que Einstein nunca forneceu uma justificativa. Ele simplesmente introduziu-o como um postulado^{183 184}. Pode ser que Einstein tenha se inspirado em Voigt, já que ele estudou seus trabalhos^{185 186}. Outra possibilidade decorre da experiência de Einstein com a Teoria da Emissão de Ritz. Nesse modelo, a velocidade da luz depende do movimento da fonte¹⁸⁷. Einstein havia estudado essa teoria, porém como ele confessou, em 1912, ao físico P. Ehrenfest, ele encontrou duas dificuldades que o levaram a abandonar a teoria: ele não conseguiu achar um sistema de equações diferenciais para fundamentar sua teoria e que quando a fonte estava acelerada, ocorreriam efeitos inconsistentes como a luz voltar a si mesma¹⁸⁸. Ao postular a constância da velocidade da luz, Einstein evitaria essas dificuldades.

Outra incongruência encontrada envolvendo o segundo postulado, é aquela encontrada nas obras [F] e [I] que afirmam que este postulado tem como consequência a rejeição do espaço e do tempo absoluto.

[F]: “Aqui no 2º postulado, Einstein tira o caráter absoluto do espaço e do tempo. O absoluto passa para o valor da velocidade da luz.” (p. 238).

[I]: “Esse postulado fez cair por terra o conceito da Física Clássica de referencial absoluto ou referencial privilegiado” (p. 221).

Porém, como afirmam Arabatzis & Gavroglu¹⁸⁹, a rejeição do espaço e tempo absoluto eram uma consequência do primeiro postulado, isto é, o princípio da relatividade. Também vimos que Voigt, que defendia a teoria do éter e do espaço absoluto, já havia sugerido, em seu ensaio de 1887, a universalidade

¹⁸² Martins, “Teoria”, 40.

¹⁸³ Martins, “Teoria”, 40.

¹⁸⁴ Martins, “A Origem”, 249-250.

¹⁸⁵ Auffray, “O Espaço-Tempo”.

¹⁸⁶ Miller, “Albert Einstein’s”.

¹⁸⁷ Whittaker, “A history”.

¹⁸⁸ Einstein *apud* Darrigol, “The Electrodynamics”, 298.

¹⁸⁹ Arabatzis & Gavroglu, “Myth 18”, 153.

da velocidade da luz. De fato, como mostrou J. P. Wesley¹⁹⁰, o efeito Doppler discutido por Voigt, em 1887, poderia ser usado para explicar o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley. A diferença entre a abordagem de Voigt e a abordagem de Einstein, é que esta é compatível com o princípio da relatividade, e aquela não é¹⁹¹. Além disso, a rejeição do espaço e do tempo absoluto, já era defendida por Henri Poincaré, como podemos ver em trecho retirado de seu livro *A Ciência e a Hipótese*, de 1902:

1. Não há espaço absoluto e só concebemos o movimento relativo; e, no entanto, na maioria dos casos, os fatos mecânicos são enunciados como se houvesse um espaço absoluto ao qual possam ser referidos. 2. Não há tempo absoluto. Quando dizemos que dois períodos são iguais, a afirmação não tem significado e só pode adquirir um significado por uma convenção. 3. Não apenas não temos intuição direta da igualdade de dois períodos, mas nem sequer intuimos diretamente a simultaneidade de dois eventos que ocorrem em dois lugares diferentes. Expliquei isso em um artigo intitulado “*Mesure du Temps*” [Poincaré, “*La Mesure*”].¹⁹²

Por meio da documentação pessoal de Einstein^{193 194 195}, sabemos que ele estudou *A Ciência e a Hipótese*, por isso, não é absurdo que ele tenha sido influenciado por Poincaré.

Por fim, convém observar uma pequena incongruência, encontrada na obra [J], na seguinte passagem:

[J]: “*O segundo princípio está em perfeito acordo com o primeiro (...)*” (p. 188).

Na verdade, o próprio Einstein salienta em seu ensaio de 1905, que o segundo postulado, a primeira vista, era inconsistente com o primeiro¹⁹⁶. Portanto, esse perfeito acordo não estava tão evidente, como os autores dão a impressão.

6. CONTRIBUIÇÕES POSTERIORES A EINSTEIN

A última categoria diz respeito a contribuições à relatividade especial que ocorreram após a publicação do ensaio de Einstein de 1905. Esta categoria só ocorre nas obras [G] e [L], ambas discutem, corretamente, o cone de luz, que foi apresentado pelo físico-matemático lituano Hermann Minkowski, em

¹⁹⁰ Wesley, “*Michelson-Morley*”.

¹⁹¹ Heras, “*A review*”.

¹⁹² Poincaré, “*La Science*”, 111-112.

¹⁹³ Miller, “*Albert Einstein’s*”.

¹⁹⁴ Giannetto, “*The Rise*”.

¹⁹⁵ Isaacson, “*Einstein*”.

¹⁹⁶ “*Introduziremos um outro postulado que é apenas aparentemente inconsistente com o primeiro, a saber, que a luz no espaço vazio sempre se propaga com uma velocidade definida V que é independente do estado de movimento do corpo que a emite*”. Einstein, “*Zur Elektrodynamik*”, 892.

sua conferência *Espaço e Tempo*¹⁹⁷. A obra [G] apenas introduz o conceito, mas sem fazer qualquer contextualização histórica. Já a obra [L], faz uma pequena nota histórica introdutória:

[L]: “Assim, a teoria da relatividade é uma teoria que deve ser entendida em quatro dimensões: as três dimensões do espaço e uma quarta dimensão, que é o tempo. Esse tipo de “geometria” quadridimensional é chamada de espaço-tempo. Um professor de Einstein, o matemático Hermann Minkowski (1864-1909), foi quem teve a ideia de formular a relatividade em termos geométricos. Por esse motivo, essa formulação da teoria da relatividade especial é denominada espaço-tempo de Minkowski. No espaço-tempo, a grandeza análoga ao ponto da geometria do espaço é o evento, um acontecimento ocorrido num dado instante, em determinado ponto do espaço.” (p. 247).

A criação do espaço-tempo não foi a única contribuição que ocorreu posterior ao trabalho de Einstein. O desenvolvimento da mecânica lagrangiana e hamiltoniana relativística, a formulação tensorial, a dinâmica relativística para corpos extensos e a termodinâmica relativística são alguns dos desenvolvimentos que ocorreram depois de 1905 e, curiosamente, sem a participação de Einstein, que no período de 1906 e 1911, focalizou sua atenção em questões pertinentes a mecânica quântica^{198 199 200}.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dessa pesquisa evidenciamos que nas 12 obras analisadas, somente a [A] não recorre a episódios históricos para discutir tópicos de relatividade. Isso evidencia que a maioria dos autores de livros didáticos consideram a história das ciências como um instrumento didático para o ensino de relatividade. O segundo aspecto é que há diversas incongruências históricas sobre a Teoria da Relatividade. Embora o diagnóstico não seja positivo, isso não significa que devemos abandonar a pretensão de incluir tópicos de história das ciências no ensino de física. As pesquisas que mencionamos brevemente na seção 1, mostram que o uso adequado da história das ciências no ensino tem efeitos significativos na aprendizagem e na construção de uma percepção adequada da natureza da ciência. Por isso, acreditamos que vale a pena o esforço para fazer uma introdução adequada de aspectos históricos da Teoria da Relatividade Especial na sala de aula.

A análise aponta que ainda prevalece uma visão instrumental e funcionalista da produção do conhecimento científico, que utiliza recorre a uma história domesticada que apenas valoriza os paradigmas vitoriosos, ignorando toda a complexidade dos paradigmas concorrentes e as amplas condições materiais

¹⁹⁷ Martins, “A Origem”.

¹⁹⁸ Minkowski, “Raum”.

¹⁹⁹ Martins, “Teoria”.

²⁰⁰ Martins, “A Origem”.

que permitiram seu surgimento e a sua adesão. Trata-se daquilo que Fourez ²⁰¹ chama de *discurso ideológico de segundo grau*, um discurso onde “(...) a maior parte dos vestígios da construção foram suprimidos.” Esse tipo de discurso é problemático, pois “(...) é profundamente manipulador ao apresentar como naturais opções que são particulares.” ²⁰² Esse tipo de discurso precisa ser rejeitado e substituído por um *discurso ideológico de primeiro grau*, aqueles onde “(...) as representações da construção das quais se pode ainda facilmente encontrar os vestígios. Esta é a situação dos discursos científicos se se tomou o cuidado de construir bem os seus conceitos de base e se está consciente das decisões que implica toda prática científica.” ²⁰³ Em outras palavras, é necessário que os autores de livros didáticos e educadores estejam mais familiarizados com as histórias das ciências produzidos por historiadores das ciências. Um dos maiores entraves para levar a história das ciências para sala de aula é a falta de material qualificado. Uma experiência compartilhada por Martins ²⁰⁴, ilustra essa problemática:

Alguns anos atrás, participei de uma mesa-redonda sobre o uso de história da ciência no ensino, em um congresso sobre educação. Os membros da mesa-redonda dedicaram grande parte do tempo apregoando as utilidades da história da ciência para o ensino. Depois das exposições, uma pessoa da platéia fez uma intervenção crucial. Disse que estava cansada de ouvir aquele tipo de discurso, que sabia que a história da ciência era importante, e queria passar à prática. Onde ela poderia conseguir livros ou artigos para aplicar no ensino? A resposta, constrangedora, foi que esse material ainda não existe. Em parte, esse problema poderia ser superado através de traduções. Sim, são publicadas muitas traduções de livros sobre história da ciência – mas, novamente, escolha dos livros traduzidos não costuma ser sábia. Em geral, as editoras estão mais preocupadas com o lucro do que com a qualidade, é claro. Por isso, a escolha da editora de traduzir um livro depende essencialmente de seu sucesso de vendas no exterior – o que não é uma indicação de qualidade. Bem, agora deve estar ficando clara a dificuldade envolvida nesse segundo problema. Temos poucos historiadores da ciência no Brasil, com formação adequada. Alguns deles nem tentam escrever textos mais acessíveis – apenas se dedicam à pesquisa especializada. Mesmo os que tentam escrever artigos e livros para um público mais amplo podem não ser bem-sucedidos nisso. O resultado é a carência de obras de boa qualidade e, ao mesmo tempo, acessíveis, em português, sobre história das ciências. A grande maioria do que se publica é inadequado. Há poucas coisas publicadas no Brasil (artigos e livros) confiáveis, que podem ser utilizados sem medo.

²⁰¹ Fourez, “A Construção”, 187.

²⁰² Fourez, “A Construção”, 187.

²⁰³ Fourez, “A Construção”, 187.

²⁰⁴ Martins, “Introdução”, XXXI.

Por isso, também é necessário que historiadores das ciências também contribuam com a produção de material qualificado que possam ser usados por educadores. Foi tendo em vista estas dificuldades que nos esforçamos em fazer uma discussão detalhada das incongruências sobre história da relatividade nos livros didáticos, que foi amparada por uma extensão de revisão de literatura em trabalhos históricos e fontes primárias. Desta forma, acreditamos que a nossa análise sirva também de fonte complementar para os educadores. De maneira geral, é necessário incentivar produções que promovam interfaces entre história e ensino de ciências.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS/MEC – Brasil.

SOBRE OS AUTORES:

Ricardo Capiberibe Nunes

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

e-mail: ricardo.capiberibe@ufms.br

Wellington Pereira de Queirós

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

e-mail: wellington_fis@yahoo.com.br

Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha

Universidade Federal de Goiás

e-mail: jeffadriany@gmail.com

Artigo recebido em 29 de agosto de 2021
Aceito para publicação em 11 de dezembro de 2021