

# As hipóteses de Poincaré sobre a gravitação

## *Poincaré's hypotheses on gravitation*

**Clair de Luma Capiberibe Nunes** | Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

[clair.capiberibe@ufms.br](mailto:clair.capiberibe@ufms.br)

<https://orcid.org/0000-0002-6536-3131>

**Wellington Pereira de Queirós** | Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

[wellington.queiros@ufms.br](mailto:wellington.queiros@ufms.br)

<https://orcid.org/0000-0002-9734-7136R>

**RESUMO** No início do século XX, Henri Poincaré e Albert Einstein estabeleceram o princípio da relatividade, afirmando que as leis da física devem ser as mesmas para todos os observadores inerciais. Uma implicação desse princípio é que a informação não pode se propagar mais rápido do que a velocidade da luz no vácuo. No entanto, em 1825, o físico-matemático Pierre Simon Laplace havia demonstrado que a ação gravitacional deve se propagar 1 milhão de vezes mais rápido do que a velocidade da luz no vácuo. Esse fato gerou dúvidas e objeções ao princípio da relatividade. Embora Einstein só tenha abordado essa questão a partir de 1912, Poincaré a estudou cuidadosamente e apresentou os resultados de sua reflexão em 1905, em dois ensaios intitulados "*Sur la dynamique de l'électron*". Poincaré mostrou que era possível conciliar o princípio da relatividade com a lei da gravitação universal. Neste ensaio, realizamos um estudo histórico das hipóteses de Poincaré sobre a gravitação, uma alternativa relativística que surgiu em 1905, mas que acabou sendo sobreposta pela teoria da relatividade geral. A análise das hipóteses de Poincaré sobre a gravitação oferece uma compreensão sobre o processo de construção do conhecimento científico e os diversos fatores que influenciam a escolha de um paradigma científico.

**Palavras-chave:** gravitação – teoria da relatividade especial – história da ciência – epistemologia da ciência – covariância de Lorentz.

**ABSTRACT** *At the beginning of the 20th century, researchers Henri Poincaré and Albert Einstein instituted the principle of relativity, which attests that the laws of physics should be the same for all inertial observers. One of the consequences of this principle is that no exchange of information can exceed the speed of light in a vacuum. However, in 1825, the physicist-mathematician Pierre Simon Laplace proved that the speed of propagation of gravitational action should propagate 1 million times faster than the speed of light in vacuum. This fact raised serious doubts and objections to the principle of relativity. While Einstein would only be interested in this question from 1912 onwards, Poincaré studied it carefully and presented the results of his reflection in 1905 in two essays with the same title, "Sur la dynamique de l'électron". Poincaré showed that it was possible to reconcile the principle of relativity with the law of universal gravitation. In this essay, we carry out a historical study of Poincaré's hypotheses about gravitation, an alternative relativistic theory of gravitation that appeared in 1905 but which ended up being superseded by the general theory of relativity. The study of hypotheses on*

*Poincaré's gravitation allows us to understand the process of building scientific knowledge and the various factors that influence the choice of a scientific paradigm.*

**Keywords** *gravitation – special theory of relativity – history of science – epistemology of science – Lorentz covariance.*

## Introdução

A versão convencional da história da relatividade sugere que, no início do século XX, todos fenômenos físicos encontravam explicação por meio da doutrina newtoniana e da teoria eletromagnética de Maxwell. De acordo com essa narrativa, apenas dois desafios permaneciam em aberto: explicar satisfatoriamente a emissão de radiação por um corpo negro aquecido e comprovar experimentalmente a existência do éter.

Conforme essa narrativa, os esforços para superar esses desafios culminaram em uma “revolução na física”. A problemática relacionada à radiação do corpo negro resultou no desenvolvimento da física quântica, enquanto as tentativas malsucedidas de evidenciar a existência do éter levaram Albert Einstein à formulação da teoria da relatividade especial e, posteriormente, de uma versão expandida conhecida como teoria da relatividade geral, que eliminou definitivamente o conceito de éter do domínio da física.

Histórias como essa frequentemente estão presentes em livros de divulgação científica, manuais didáticos e até mesmo obras especializadas sobre a relatividade. Devido à ênfase predominantemente técnica nos cursos de física, não surpreende que os próprios físicos adotem e reproduzam essas narrativas populares, mesmo diante das críticas dos historiadores da ciência.<sup>1</sup>

Neste ensaio, discutimos, a partir da perspectiva histórica, alguns desdobramentos importantes na gênese da teoria da relatividade especial, em especial as hipóteses sobre a gravitação de Poincaré, que representou a primeira tentativa de construir uma teoria relativística da gravitação (Katzir, 2005; Walter, 2007). O estudo desse episódio permite desconstruir visões deformadas sobre o trabalho científico. Além disso, as hipóteses de Poincaré sobre a gravitação são um tópico pouco abordado mesmo na literatura historiográfica internacional.<sup>2</sup>

Desse modo, o percurso deste trabalho divide-se da seguinte forma: inicialmente, discutimos as diferenças e semelhanças entre as abordagens de Einstein e Poincaré sobre o princípio da relatividade. Na segunda seção, contextualizamos o estado das teorias da gravitação no final do século XIX e início do século XX. Na terceira seção, abordamos as hipóteses de Poincaré sobre a gravitação. Na quarta seção, avaliamos a repercussão do trabalho de Poincaré entre seus contemporâneos.

1 Para exemplos e críticas às histórias populares, veja Martins (1998a), Nunes & Queirós (2020, 2022), Nunes, Queirós & Cunha (2021).

2 Os únicos trabalhos historiográficos que exploram esse tema são de Katzir (2005) e Walter (2007). Mesmo Miller (1973), responsável pelo estudo mais detalhado dos ensaios de Poincaré de 1905-1906, não abordou as hipóteses de Poincaré sobre a gravitação. Ele prometeu aos leitores realizar essa análise em um artigo separado; no entanto, esse artigo nunca foi publicado.

## Abordagens de Einstein e Poincaré sobre a relatividade

Nos textos de vulgarização científica e materiais didáticos, as contribuições de Poincaré para a teoria da relatividade são frequentemente minimizadas em comparação com as de Einstein. Raramente, quando Poincaré é mencionado, argumenta-se que, embora estivesse próximo de desenvolver a relatividade, lhe faltou a assertividade de Einstein para avançar. Todas essas narrativas buscam explicar a história da teoria da relatividade sob a perspectiva de uma suposta prioridade de Einstein. No entanto, ao retornarmos ao início do século XX, evidencia-se que as diferenças entre as proposições de Einstein e Poincaré são menores do que frequentemente é afirmado. Essa percepção é sintetizada nas conclusões extensas, porém necessárias, de Darrigol (2004, p. 616):

Tem sido frequentemente argumentado que a abordagem de Einstein tem maior simplicidade lógica, pois distingue claramente entre três tipos de propriedades físicas: cinemática, dinâmica e dependente do modelo. A teoria da relatividade de Einstein de 1905 é deliberadamente uma teoria de princípios que se esquivava de características 'construtivas' dependentes do modelo, enquanto a teoria de Poincaré é uma 'dinâmica do elétron', como afirmam os títulos de suas publicações de 1905 e 1906. No entanto, a diferença não é tão grande quanto parece à primeira vista. Em 1900, Poincaré já entendia que o tempo local de Lorentz poderia ser derivado (em primeira ordem) como uma convenção da medida do tempo próprio entre observadores em movimento. Em suas palestras na Sorbonne de 1906 e em publicações posteriores, ele mostrou que as transformações de Lorentz exatas eram compatíveis com a mesma convenção, junto com a suposição da contração de Lorentz. Embora esse não fosse um raciocínio puramente cinemático no sentido de Einstein, Poincaré poderia, portanto, justificar as transformações de Lorentz sem apelar para as equações de Maxwell-Lorentz. Nas mesmas palestras, ele apresentou a dinâmica relativística de uma partícula buscando uma generalização covariante da dinâmica newtoniana, independentemente de qualquer modelo específico. Portanto, em 1906 algumas das diferenças estruturais entre as derivações de Einstein e Poincaré das fórmulas relativísticas básicas estavam ausentes, apesar de um contraste persistente na base conceitual.<sup>3</sup>

A análise do contraste entre as abordagens de Einstein e Poincaré na relatividade especial é uma tarefa complexa e requer cuidado devido à incomensurabilidade semântica entre elas (Darrigol, 2004). Isso ocorre porque, apesar de serem abordagens que se distinguem epistemologicamente e ontologicamente, elas são estruturalmente equivalentes e, portanto, idênticas no plano fenomenológico<sup>4</sup> (Darrigol, 2004; Martins, 2005; Nunes, Queirós, 2023). Segundo Darrigol (2004, p. 616), a falta de atenção a esse aspecto específico tem sido a fonte de interpretações problemáticas.

3 Todas as traduções de trechos em língua estrangeira deste trabalho foram feitas pelos próprios autores.

4 "Essas diferenças entre as duas teorias às vezes são consideradas como implicando em diferentes previsões observáveis, mesmo dentro do domínio do eletromagnetismo e da óptica. Na realidade, não existe tal discordância, pois o éter de Poincaré é por suposição perfeitamente indetectável, e toda dedução feita na teoria de Einstein pode ser traduzida em uma dedução na teoria de Poincaré por (artificialmente) decidir que um determinado sistema de referência é o sistema etéreo e por meio da distinção entre o espaço e tempo 'verdadeiro' desse sistema e o espaço e tempo 'aparente' dos outros. Como o próprio Lorentz comentou certa vez, a diferença entre as duas teorias é meramente epistemológica: diz respeito à quantidade de elementos convencionais e arbitrários que estamos dispostos a introduzir na definição dos conceitos físicos básicos"

Alguns comentaristas, ignorando esta incomensurabilidade, interpretaram mal as relações entre as duas teorias e concluíram que a abordagem de Poincaré era basicamente inconsistente. Outros, por outro lado, exageraram a incomensurabilidade e, conseqüentemente, subestimaram as semelhanças entre as duas teorias. A dificuldade é que, para comparar teorias incomensuráveis, deve-se identificar um estrato conceitual que elas compartilham implicitamente (Darrigol, 2004, p. 616).

Para prevenir esses equívocos, sugerimos uma análise embasada na filosofia do segundo Wittgenstein (2022, 2023),<sup>5</sup> frequentemente denominada teoria do uso (Lycan, 2022). Essa abordagem busca identificar as *semelhanças de família*<sup>6</sup> nos usos de um determinado conceito nas diversas perspectivas em que ele se manifesta. Uma abordagem semelhante é apresentada por Darrigol (2004). Contudo, visando garantir maior acuracidade e atualidade, delineamos uma análise dos manuscritos produzidos por Poincaré entre 1895 e 1905 (Poincaré, 1895, 1898, 1899, 1900a, 1900b, 1900c, 1901, 1902, 1904, 1905a, 1905b, 1906) e por Einstein (1905a, 1905b), confrontando suas afirmações com a literatura secundária mais recente (Martins, 2005, 2012, 2015; Walter, 2014; Damour, 2017). Em relação às semelhanças, expandimos as sugestões de Darrigol (2004), enquanto, nas diferenças, promovemos algumas modificações à luz das fontes primárias e secundárias.<sup>7</sup> O resultado de nossa síntese está disposto no Quadro 1.

---

(Darrigol, 2004, p. 616).

- 5 “Wittgenstein é um dos fundadores da filosofia analítica e sua obra, extremamente idiossincrática e original, teve grande influência no desenvolvimento dessa corrente filosófica. Seu pensamento é tradicionalmente dividido em duas fases. A primeira corresponde ao *Tractatus Logico Philosophicus* (1921), única obra que publicou em vida, e que se insere na tradição da análise lógica da linguagem iniciada por Frege e Russell e desenvolvida pelo Círculo de Viena, o qual sofreu sua influência. Segundo sua visão, a preocupação central da filosofia deve ser a análise da linguagem, de seu alcance e de seus limites. A linguagem é vista nessa primeira obra como tendo uma estrutura lógica que reflete a estrutura lógica do real – a famosa “teoria pictórica do significado” – sendo a tarefa do filósofo estabelecer as condições dessa relação, determinando assim a possibilidade do significado. Por um período, Wittgenstein acreditou com isso ter esgotado os problemas filosóficos que pretendia tratar, chegando a abandonar a filosofia (1926). Várias questões, entretanto, dentre elas as levantadas pelo intuicionismo em relação à lógica e aos fundamentos da matemática, fizeram com que retomasse suas preocupações filosóficas (1929), considerando, contudo, sua visão de linguagem no *Tractatus* como insatisfatória. Embora continuando a considerar a tarefa da filosofia como análise da linguagem por meio da qual podemos entender melhor nossa forma de ver a realidade de nossa experiência, e não como construção de teorias ou de sistemas, Wittgenstein altera radicalmente sua concepção de linguagem. A noção central dessa segunda fase de seu pensamento, comumente conhecida como “o segundo Wittgenstein”, é a de jogo de linguagem, ou seja, de uma multiplicidade de usos que fazemos de palavras e expressões, sem que haja nenhuma essência definidora da linguagem como tal. A análise da linguagem passa a ser vista agora como consideração desses usos, das formas de vida a que pertencem, dos contextos de comunicação em que se inserem. O processo de elucidação, que é a prática filosófica, deve ser realizado levando-se em conta esses elementos” (Japiassu, Marcondes, 2006, p. 282-283).
- 6 Apesar de o termo sugerir uma ênfase nos traços comuns, a prática de observar as semelhanças de família implica sobrepor as afinidades e as diferenças, visando compreender as singularidades do conceito em cada contexto. Essa abordagem evita a busca por uma transcendência universal (Wittgenstein, 2022, cf. Condé, 2004).
- 7 Darrigol (2004) argumenta que Poincaré sustentava a existência do éter, uma afirmação que se revela parcialmente correta. Em *A ciência e a hipótese* (Poincaré, 1902), o filósofo destaca que a questão sobre a existência do éter pertencia ao domínio dos metafísicos, ressaltando, no entanto, sua utilidade como uma idealização proveitosa para os físicos. Essa perspectiva é extensível à discussão sobre a contração de Lorentz. Quanto à dilatação do tempo, Darrigol (2004) alega que Poincaré não abordou essa temática. Essa proposição revelou-se imprecisa à luz da recente descoberta de notas de aula, divulgadas por Walter (2014), que evidenciam que Poincaré dedicou sua atenção ao problema de duas maneiras distintas.

**Quadro 1:** Semelhanças de família entre as abordagens relativísticas de Einstein e Poincaré

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Traços comuns</b>  | O processo de sincronização de relógios por meio da troca de sinais ópticos.  |  |
|   | A relatividade do espaço, do tempo e da simultaneidade.   |  |
|   | A validade universal do princípio da relatividade, segundo o qual as leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.   |  |
|   | A invariância da velocidade da luz medida em todos os referenciais inerciais.   |  |
|   | A covariância de Lorentz do espaço e do tempo.  |  |
|   | A covariância de Lorentz nas equações de Maxwell-Lorentz.   |  |
|   | A exigência de que todas as leis da física sejam invariantes sob as transformações de Lorentz.  |  |
|   | As leis relativísticas do movimento, especialmente a regra de adição de velocidades.  |  |
|   | A dependência da inércia com a velocidade, que deve tornar-se infinita caso o corpo seja acelerado até a velocidade da luz.   |  |
|   | O princípio da relatividade e o princípio da conservação de energia levam a paradoxos quando aplicados conjuntamente aos processos de emissão e absorção de radiação.   |  |
| <b>Diferenças</b>   | <b>Einstein</b>   | <b>Poincaré</b>  |
|   | Eliminou o éter, exigiu a invariância das leis físicas em diferentes referenciais inerciais e propôs uma “nova cinemática” que estabelecia a equivalência exata das medidas de espaço e tempo entre sistemas inerciais distintos. | Por motivos pragmáticos, conservou o éter como um sistema privilegiado em que espaço e tempo “verdadeiros” eram definidos, enquanto via as medições em outros sistemas como “aparentes”. |
|   | Interpretou a contração de Lorentz como uma consequência cinemática da diferença entre espaço e tempo definidos por observadores em movimento relativo.   | Considerou, pragmaticamente, a contração de Lorentz como um efeito do movimento de uma haste através do éter.  |
|   | Propôs um significado operacional para a dilatação do tempo   | Sugere que uma esfera luminosa, em movimento, seria medida como uma elipse, usando essa representação para discutir a dilatação do tempo.  |
|   | Derivou a transformação de Lorentz dos seus dois postulados.  | Obteve a transformação de Lorentz a partir da invariância das equações de Maxwell-Lorentz.   |
|   | Ao rejeitar o éter e a teoria da emissão, adotou o postulado da constância da velocidade da luz.  | Considerava a constância da velocidade da luz como uma consequência pragmática do movimento ondulatório da luz no éter estacionário.   |
|   | Derivou a dinâmica de partículas em movimento rápido diretamente da covariância de Lorentz  | Baseou seu raciocínio em um modelo específico do elétron compatível com a covariância de Lorentz.  |
|   | Percebeu que os paradoxos da radiação exigiam a aceitação da inércia da energia, propondo uma generalização inadequada a partir dessa premissa.   | Propôs a resolução dos paradoxos da radiação pela aceitação da inércia da energia, mas posteriormente abandonou essa premissa.   |
| Abordou a questão gravitacional a partir de 1912, no desenvolvimento da relatividade geral. | Propôs uma modificação relativística da lei da gravitação de Newton, usando um formalismo quadridimensional.  |  |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Além das semelhanças de família, Damour (2017) ressalta que Poincaré singularmente explorou três concepções, a saber: (1) a formulação da lagrangeana relativística destinada ao elétron; (2) a interpretação das transformações de Lorentz como “rotações” em um espaço quadridimensional, com coordenadas “ $x, y, z, t\sqrt{-1}$ ”, acompanhada pelo desenvolvimento do método para construir invariantes relativísticos; (3) a investigação da álgebra de Lie associada ao grupo de Lorentz (SO (1,3)); (4) as tensões de Poincaré, representando forças de natureza não elétrica que atuam sobre o elétron e garantem sua estabilidade.<sup>8</sup>

Em resumo, podemos afirmar que, conforme argumentado por Martins (2012), as abordagens de Einstein e Poincaré representam duas perspectivas distintas de uma mesma teoria. Alternativamente, inspirados nas análises de Quine (1960, 1975, 1981, 1985, 1992, 2011), poderíamos considerar as abordagens de Einstein e Poincaré como traduções diferentes de um mesmo objeto. A incomensurabilidade entre essas abordagens surge como uma decorrência da relatividade ontológica, resultante dos compromissos ontológicos divergentes presentes em cada uma delas.

Por outro lado, é crucial reconhecer que, mesmo diante da preferência pela abordagem de Einstein, a perspectiva inicial de Poincaré parecia transcender aquela proposta por Einstein. Isso se deve ao empenho de Poincaré em ampliar o princípio da relatividade para abranger a gravitação, configurando-se, conforme destaca Katzir (2005), como a primeira tentativa de construir uma teoria relativística da gravitação. Nas próximas seções, delinearemos as hipóteses de Poincaré para a gravitação e empreenderemos a compreensão de por que sua abordagem se deteriorou. Contudo, para uma compreensão mais abrangente da importância da proposta de Poincaré, é imperativo, em primeiro lugar, apresentar o estado da arte das teorias da gravitação no início do século XX.

## Teorias da gravitação no começo do século XX

Como observa Martins (1998b), a narrativa convencional sobre a história da gravitação nos relata que no final do século XIX, os físicos adotaram a lei da gravitação universal proposta por Isaac Newton no final do século XVII. A lei de Newton foi corroborada por inúmeros testes experimentais, possibilitando aos astrônomos a descoberta de dois novos planetas, Urano e Netuno. No entanto, uma anomalia na órbita de Mercúrio desafiava a capacidade explicativa da lei de Newton. A resolução desse enigma foi proporcionada por Albert Einstein. Inicialmente, Einstein apresentou a teoria da relatividade especial em 1905, válida apenas para referenciais não acelerados.

Posteriormente, Einstein dedicou-se à exploração para estender sua teoria à gravitação. Somente em 1916, ele conseguiu formular a teoria da relatividade geral, que não apenas resolveu a anomalia na órbita de Mercúrio, mas também facultou aos físicos a previsão da existência de buracos negros, estrelas de nêutron, ondas gravitacionais, e originou uma nova disciplina científica, a cosmologia, que investiga o Universo. Embora tais narrativas sejam comuns, elas representam apenas a versão simplificada do que realmente ocorreu, como enfatiza Martins (1998b, p. 3):

8 Deve-se ressaltar que tais resultados podem ser derivados e interpretados igualmente sob a perspectiva einsteiniana.

Os historiadores da física sabem que as coisas realmente não acontecem dessa maneira. A relatividade geral foi de fato a teoria gravitacional bem-sucedida, mas muitas outras teorias foram propostas no final do século XIX e início do século XX. Os três 'testes clássicos' da relatividade geral são muito significativos, mas havia vários outros efeitos gravitacionais astronômicos e terrestres anômalos (não newtonianos) que mereceram atenção no início do século XX. De fato, se consultamos revistas científicas do final do século XIX e início do século XX, encontramos um grande número de estudos revolucionários sobre a gravitação. Muitos deles propuseram alternativas gravitacionais. Desde a publicação do livro de Whittaker (1951-1953), os historiadores estão bem cientes das teorias gravitacionais alternativas no início do século XX.

Primeiramente, é crucial desmistificar a visão anacrônica que sugere uma adesão quase dogmática à síntese newtoniana até o início do século XX, uma concepção que seria desafiada apenas pela 'revolução einsteiniana'. Em sua análise histórica, Whittaker (1951, p. 144) ressalta que

por muitos anos após sua primeira publicação, a doutrina newtoniana da gravitação não foi bem recebida. Mesmo na Universidade de Cambridge, de Newton, o livro de física em geral usado no primeiro trimestre do século XVIII ainda era cartesiano; enquanto todos os grandes matemáticos do continente – Huygens na Holanda, Leibniz na Alemanha, Johann Bernoulli na Suíça, Cassini na França – rejeitaram totalmente a teoria newtoniana. Isso não deve ser atribuído inteiramente a preconceitos: muitos astrônomos bem informados acreditavam, por certo e com razão, que a lei newtoniana não era reconciliável com os movimentos observados dos corpos celestes.

Tanto os contemporâneos de Newton quanto seus sucessores reconheceram que a doutrina newtoniana proporcionou uma explicação precisa para a cinemática, a balística e o movimento elíptico dos planetas, o que possibilitou a previsão exata de eclipses solares e a passagem de cometas. Contudo, haviam anomalias nos movimentos orbitais planetários que a teoria de Newton não conseguia elucidar. Essas anomalias, chamadas pelos astrônomos de desigualdades, eram de dois tipos distintos:

Primeiro, havia distúrbios que eram corrigidos depois de um tempo, de modo a não ter efeito cumulativo; essas eram chamadas de desigualdades periódicas. Muito mais sérios eram os desarranjos que se desenvolviam continuamente, cada vez mais se desviando do movimento orbital original; esses eram chamados de desigualdades seculares. O mais conhecido deles é aquele que foi denominado de a grande desigualdade de Júpiter e Saturno (Whittaker, 1951, p. 144).

Em 1773, Laplace (1799-1825) investigou as desigualdades entre Júpiter e Saturno, demonstrando que o modelo newtoniano podia abordar a questão ao considerar as perturbações causadas por outros corpos celestes. A pesquisa conduzida por Laplace não apenas resolveu esse problema específico, mas também contribuiu para a crescente aceitação e popularização da lei da gravitação universal de Newton (Whittaker, 1951). Laplace também inferiu de sua análise que, para evitar violações do princípio da ação e reação, a velocidade de propagação da ação gravitacional deveria ser instantânea ou se propagar com uma velocidade finita, porém da

ordem de 1 milhão de vezes a velocidade da luz<sup>9</sup> (Laplace, 1799-1825; Poincaré, 1906; Dugas, 2011; Brown, [s.d.]).

Apesar da proposta bem-sucedida de Laplace, persistia outro desafio à teoria newtoniana: a aceleração contínua do movimento médio da Lua. Halley, em 1693, observou que a Lua se movia cada vez mais rápido ao longo do tempo, levantando a preocupação de uma possível colisão com a Terra (Whittaker, 1951; Dugas, 2011). A Academia de Ciências de Paris ofereceu prêmios em 1770, 1772 e 1774 para abordar essa questão. Somente após uma análise extensiva, Euler e Lagrange concluíram que nenhuma desigualdade secular poderia ser produzida pela ação da gravitação newtoniana, seja considerando os corpos celestes como esféricos ou levando em conta deformações na esfericidade da Terra e da Lua (Whittaker, 1951).

Laplace, por sua vez, ofereceu uma possível solução. Inicialmente, ele demonstrou que a aceleração não decorria do retardamento da rotação diurna da Terra devido à resistência do éter (Laplace, 1799-1825; Whittaker, 1951; Dugas, 2011). Contudo, essa solução, por si só, não era suficiente. Por isso, ele explorou a possibilidade de que os efeitos gravitacionais são propagados com velocidade finita, mas essa abordagem também não proporcionou uma conclusão satisfatória (Whittaker, 1951).

Finalmente, Laplace sugeriu que a ação solar sobre a Lua, influenciada pela excentricidade da órbita terrestre, era a principal causa da aceleração observada (Laplace, 1799-1825; Whittaker, 1951; Dugas, 2011). Concluiu-se que, à medida que a excentricidade da órbita terrestre diminui devido à influência dos planetas, a influência média do Sol sobre a Lua também diminui. Isso resulta no aumento contínuo do movimento médio da Lua, explicando o fenômeno observado (Laplace, 1799-1825; Whittaker, 1951; Dugas, 2011).

Outra anomalia que suscitava desconfiança era um avanço irregular na órbita de Mercúrio. Mesmo considerando a perturbação de todos os corpos celestes, ainda persistia uma discrepância significativa entre o valor teórico e o observado (Whittaker, 1951; Roseveare, 1982). Duas explicações possíveis eram consideradas: a alteração da lei do inverso do quadrado da distância, mediante a adição de um termo envolvendo as velocidades dos corpos; ou, conforme proposto por H. Seeliger, atribuir o efeito à atração das massas que compõem a luz zodiacal (Whittaker, 1951). No entanto, em 1895, Newcomb identificou uma nova anomalia que poderia desafiar as duas hipóteses descritas acima: um avanço irregular no nó da órbita de Vênus<sup>10</sup> (Whittaker, 1951; Roseveare, 1982; Dugas, 2011).

Em paralelo à teoria da gravitação newtoniana, outras propostas teóricas surgiram. Entre as mais notáveis destacam-se as teorias cinéticas da gravitação, inspiradas na teoria da sombra de Fatio e Le Sage (Whittaker, 1951; 1953). Conforme essa perspectiva, a gravidade seria composta por corpúsculos minúsculos, chamados de ultramundanos, que se propagariam a velocidades muito superiores à da luz no vácuo. Os corpos materiais bloqueariam uma fração dessas partículas em movimento, gerando uma sombra gravitacional. A pressão resultante dos ultramundanos sobre as superfícies dos corpos seria então responsável pela força gravitacional observada. Porém, essas proposições teóricas foram contestadas, pois

9 Como veremos, esse é um resultado de grande importância, pois era incompatível com o princípio da relatividade. Esse princípio exigia que a velocidade de propagação da informação ocorresse em velocidades iguais ou inferiores à da luz no vácuo (Poincaré, 1900b, 1904, 1905b, 1906).

10 Um nó orbital refere-se a um dos dois pontos onde a órbita de um corpo celeste cruza o plano da eclíptica, que é o plano da órbita da Terra ao redor do Sol.

Em 1897, Austin e Thwing fizeram o primeiro teste experimental conhecido da existência de uma mudança de força gravitacional devido à interposição de matéria usando uma balança de torção (Austin e Thwing, 1897). Nenhum efeito foi detectado (Martins, 2002, p. 239).

Ciente dessas dificuldades, o físico holandês H. Lorentz tentou construir uma teoria da gravitação que dependesse apenas das ações eletromagnéticas propagando-se com velocidade igual à da luz no vácuo. Lorentz apresentou seus resultados em um ensaio intitulado “Considerações sobre a gravitação”, no dia 31 de março de 1900, durante a reunião da Academia de Ciências de Amsterdã. Inicialmente, Lorentz trabalhou com uma hipótese prefigurada na teoria da cinética da gravitação, na qual os corpúsculos ultramundanos eram substituídos por íons. No entanto, após efetuar os cálculos, Lorentz concluiu que os resultados não eram satisfatórios, e a hipótese deveria ser rejeitada (Whittaker, 1953).

Outra possibilidade que Lorentz considerou era que, semelhante à concepção de que a eletricidade é um fluido contínuo com átomos que reagem entre si, considerando que os átomos de éter possuem uma atração mútua ligeiramente maior do que a repulsão mútua das partículas que se repelem nas moléculas materiais. Portanto, essa composição de forças seria responsável pela gravitação, exceto em distâncias muito pequenas, nas quais esse mecanismo é responsável pela coesão (Whittaker, 1953).

A hipótese de Lorentz alinhava-se aos princípios da eletrodinâmica de Maxwell-Hertz. No entanto, uma alternativa compatível com a eletrodinâmica de Weber foi proposta pelos físicos alemães Friedrich Zöllner (1834-1882), de Leipzig, e pelo próprio Wilhelm Weber (1804-1891), de Göttingen. Conforme Whittaker (1953, p. 150), essa concepção fundamentava-se

na ideia de que todas as moléculas ponderáveis são associações de corpúsculos elétricos positivamente e negativamente carregados, com a condição de que a atração entre os corpúsculos de sinal diferente é um pouco maior que a força de repulsão entre corpúsculos de sinal semelhante. Se a força entre duas unidades elétricas de carga similar a uma certa distância for um dina, e a força entre uma carga unitária positiva e negativa na mesma distância for  $\gamma$  dinas, então, levando em conta o fato de que um átomo neutro contém como uma carga elétrica muito positiva e negativa, verificou-se que  $(\gamma - \alpha)/\alpha$  precisa ser apenas uma quantidade da ordem  $10^{-35}$  para considerar a gravitação como devida à diferença entre  $\alpha$  e  $\gamma$ .

Havia teorias que propunham alterações no coeficiente  $1/r^2$  da lei da gravitação universal, substituindo-o por valores fracionários muito próximos de 2. Outras propostas incluíam a substituição do fator  $1/r^2$  por um fator exponencial de base “e” (número neperiano), mantendo um contato de primeira ou segunda ordem com  $1/r^2$  (Roseveare, 1982). Uma alternativa, a qual investigaremos a seguir, foi sugerida por Poincaré: estender a covariância de Lorentz para os fenômenos gravitacionais.

## As hipóteses sobre a gravitação de Poincaré

Em 1899, Poincaré sustentou a universalidade do princípio da relatividade, que postula a invariabilidade das leis da física, seja em repouso ou em movimento de translação com velocidade uniforme (Poincaré, 1899). No ano seguinte, ao analisar a eletrodinâmica de Lorentz,

Poincaré demonstrou que uma das implicações desse princípio é a limitação da velocidade de sinais ou trocas de informação à velocidade da luz no vácuo (Poincaré, 1900b). Durante uma conferência em Saint Louis, em 1904, Poincaré argumentou que a teoria newtoniana da gravitação, conforme concebida por Laplace, estava em desacordo com o princípio da relatividade.

O que ocorreria se nos comunicássemos por meio de sinais não luminosos, cuja velocidade de propagação diferisse da velocidade da luz? Se, após ajustar os relógios por meio de procedimentos ópticos, quiséssemos verificar a precisão usando esses novos sinais, observaríamos discrepâncias que evidenciaríamos o movimento de translação compartilhado entre as duas estações. Seriam concebíveis esses sinais se aceitássemos, conforme Laplace, que a gravitação universal se propaga 1 milhão de vezes mais rapidamente do que a luz? Assim, recentemente, o princípio da relatividade foi vigorosamente defendido, e a própria intensidade dessa defesa evidencia a seriedade do desafio (Poincaré, 1904, p. 233).

Poincaré, convicto da validade universal do princípio da relatividade, propôs uma solução para o problema em 1905, por meio de dois ensaios: uma versão curta, com cinco páginas, e uma versão longa, com 48 páginas, ambos intitulados "*Sur la dynamique de l'électron*".<sup>11</sup> Na versão breve, Poincaré apresenta apenas os resultados gerais, omitindo os cálculos e outros resultados relevantes, como a construção de invariantes e grandezas físicas 4-dimensionais. Iniciando a discussão, Poincaré (1905b) disserta sobre a necessidade de criar uma teoria gravitacional compatível com o princípio da relatividade e, ao longo da discussão, declara que:

Era importante examinar mais de perto essa hipótese e, em particular, avaliar as mudanças que exigiria na lei da gravitação. Foi isso que procurei determinar; inicialmente, supus que a propagação da gravitação não é instantânea, mas ocorre com a velocidade da luz. Isso parece estar em desacordo com os resultados obtidos por Laplace, que afirmou que essa propagação é, se não instantânea, pelo menos muito mais rápida que a da luz. Contudo, a questão levantada por Laplace difere consideravelmente do nosso foco aqui. A introdução de uma velocidade finita de propagação foi a única alteração que Laplace fez na lei de Newton. Aqui, ao contrário, essa mudança é acompanhada por várias outras; é possível, e é o que ocorre de fato, que haja uma compensação parcial entre elas (Poincaré, 1905b, p. 1508).

Em outras palavras, ao estender a covariância de Lorentz para abranger os fenômenos gravitacionais e postular que a velocidade de propagação da gravidade seja igual à velocidade da luz, Poincaré introduz novos termos complementares à lei da gravitação, os quais passaram despercebidos por Laplace. Além disso, ele sugere que a ação gravitacional ocorre devido à emissão e absorção de ondas gravitacionais que se propagam à velocidade da luz no éter.<sup>12</sup>

11 O primeiro ensaio (Poincaré, 1905b) foi publicado em 5 de junho de 1905 nos *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. Devido às normas de publicação que limitavam o ensaio a cinco páginas, Poincaré restringiu-se a apresentar os resultados de suas investigações, sem justificá-los. Em 25 de julho de 1905, Poincaré submeteu à revista italiana do *Circolo Matematico di Palermo* a versão completa de "*Sur la dynamique de l'électron*" (Poincaré, 1906). Infelizmente, devido a um erro editorial, o ensaio de Poincaré só foi publicado em janeiro de 1906. Suas conjecturas sobre a gravitação aparecem em ambos os artigos, mas, dado que os detalhes são apresentados apenas no artigo publicado no *Circolo Matematico di Palermo*, direcionaremos nossa análise exclusivamente para essa versão.

12 É crucial enfatizar que o conceito de onda gravitacional previsto por Poincaré difere do previsto na teoria da relatividade geral. Devido a um erro de cálculo em 1916, Einstein previu a existência de três tipos de ondas gravitacionais: uma longitudinal, uma transversal e um novo tipo de onda, que não era nem transversal nem

Quando nos referimos à posição ou velocidade do corpo atrativo, estamos falando da posição ou velocidade no momento em que a *onda gravitacional* deixa esse corpo. Já ao mencionarmos a posição ou velocidade do corpo atraído, estamos nos referindo à posição ou velocidade no momento em que esse corpo foi atingido e atraído pela onda gravitacional emitida pelo outro corpo. É evidente que o primeiro instante precede o segundo (Poincaré, 1905b, p. 1508).

Pode chamar a atenção do leitor o fato de Poincaré ter mencionado a existência de ondas gravitacionais 10 anos antes de Albert Einstein. É notório que Poincaré foi o primeiro a demonstrar que, como uma consequência do princípio da relatividade, a gravidade deve ser transmitida à velocidade da luz. Contudo, a ideia de ondas gravitacionais não era novidade. O conceito de onda gravitacional não depende dos detalhes da teoria, mas sim da restrição de que a gravidade se propague com velocidade limitada, como ocorria nos modelos derivados da teoria de Le Sage (cf. Martins, 1998b, 2002). Sobre esse assunto, são pertinentes os comentários de Katzir (2005, p. 22):

O termo 'onda gravitacional' simplesmente destaca que a força se propaga em um tempo finito, de maneira semelhante às ondas de luz. Outros também utilizaram esse termo para indicar que a atração se propaga a uma velocidade finita. A constatação de que a gravidade se propaga à velocidade da luz responde à questão que Poincaré levantou em 1904: é possível ter uma teoria da gravitação na qual a força [gravitacional] se propaga à velocidade da luz, em contraste com a antiga afirmação de Laplace.

Dado que o modelo de força gravitacional de Newton e Laplace havia sido validado para diversos fenômenos astronômicos, Poincaré avalia se, nesses regimes, as novas funções gravitacionais, compatíveis com as transformações de Lorentz, levariam a resultados análogos. Para isso, Poincaré recalcula os desvios entre seu modelo e o modelo newtoniano, declarando o seguinte resultado:

A diferença em relação à lei comum da gravitação, como mencionado, é da ordem de  $\xi^2$ ; se assumirmos, como fez Laplace, que a velocidade de propagação é a da luz, essa discrepância é da ordem de  $\xi$ , ou seja, 10.000 vezes maior. Portanto, não é, à primeira vista, absurdo supor que as observações astronômicas não sejam suficientemente precisas para detectar uma diferença tão pequena quanto a que estamos considerando. No entanto, isso é algo que somente uma discussão completa nos permitirá decidir (Poincaré, 1905b, p. 1508).

Esta breve nota de Poincaré (1905b) nos contextualiza sobre suas investigações e resultados. Contudo, os principais detalhes surgem apenas na versão de Palermo, publicada em 1906. Poincaré não só detalha seu raciocínio, mas também desenvolve uma análise que antecipa resultados obtidos por Minkowski, Laue e Planck para a teoria da relatividade especial.

---

longitudinal (Einstein, 1916; Levi-Civita, 1917). Em 1917, Levi-Civita destacou que a dedução de Einstein estava equivocada (Levi-Civita, 1917). Em 1918, Einstein reconheceu seu erro e apresentou a dedução correta, obtendo apenas dois tipos de ondas gravitacionais. Curiosamente, embora Einstein afirmasse que as ondas gravitacionais se propagam com velocidade igual à da luz no vácuo, ele não provou essa afirmação (Einstein, 1916, 1918; Levi-Civita, 1917). Em 1922, coube a Eddington mostrar que essas ondas se propagam à velocidade da luz (Eddington, 1922). Para mais detalhes, consulte Cattani & Maria (1993).

Antes de adentrarmos ao artigo, é necessário fazer uma pequena observação sobre a notação empregada por Poincaré. Diferentemente de seus contemporâneos, como Lorentz, Poincaré não utiliza o formalismo vetorial de Gibbs-Heaviside, mas sim um conjunto de símbolos próprios. Para facilitar a leitura, Schwartz (1971) construiu uma tabela que permite converter os símbolos usados por Poincaré para a notação moderna. Neste trabalho, optamos por apresentar ao leitor as equações na notação moderna.<sup>13</sup>

Em seu extenso artigo, as hipóteses sobre a gravitação são apresentadas na seção 9. Assim como na versão curta, Poincaré enuncia que as diferenças na natureza da força eletromagnética e da força gravitacional fazem com que a teoria da relatividade seja parcialmente covariante em Lorentz, pois a completude só pode ser alcançada se o princípio da relatividade for válido para a gravidade, como podemos ver na passagem abaixo:

Assim, a teoria de Lorentz explicaria completamente a impossibilidade de demonstrar o movimento absoluto se todas as forças fossem de origem eletromagnética. No entanto, existem forças às quais não podemos atribuir uma origem eletromagnética, como, por exemplo, a gravitação. Pode ocorrer que dois sistemas de corpos produzam campos eletromagnéticos equivalentes, ou seja, exerçam a mesma ação nos corpos eletrizados e nas correntes. Ainda assim, esses dois sistemas não exercerão a mesma ação gravitacional sobre a massa newtoniana. O campo gravitacional é, portanto, distinto do campo eletromagnético. Lorentz foi compelido a aprimorar sua hipótese, assumindo que *as forças de qualquer origem, incluindo a gravitação, são afetadas pela translação* (ou, se preferir, pela transformação de Lorentz) *da mesma forma que as forças eletromagnéticas*.

Agora, é apropriado entrar em detalhes e examinar mais de perto essa hipótese. Se desejamos que a força newtoniana seja influenciada dessa maneira pela transformação de Lorentz, não podemos aceitar que a força dependa apenas da posição relativa do corpo atraente e do corpo atraído no instante considerado. Também dependerá das velocidades dos dois corpos. E isso não é tudo: é natural supor que a força que atua no tempo  $t$  no corpo atraído dependa da posição e velocidade desse corpo ao mesmo tempo  $t$ ; mas dependerá, além disso, da posição e velocidade do corpo *atraente*, não no tempo  $t$ , mas em *um instante anterior*, como se a gravitação precisasse de certo tempo para se propagar (Poincaré, 1906, p. 538-539).

Tendo identificado o problema, a necessidade de estabelecer a covariância de Lorentz para a gravitação, e delineado o percurso metodológico – uma reformulação da lei gravitacional de Newton e das investigações de Laplace – agora é imperativo esclarecer os parâmetros que viabilizam esse empreendimento. Em suas pesquisas históricas, Katzir (2005, p. 18) identificou cinco condições que Poincaré impôs para formular suas hipóteses sobre a gravitação:

13 A esse respeito, duas observações precisam ser feitas:

1. A letra grega gama ( $\gamma$ ) não representa o fator de Lorentz; utilizaremos a letra  $k$ .
2. Estamos cientes de que a expressão “modernizar as equações” pode ser considerada anacrônica (Kragh, 2003), no entanto, dado que o objetivo principal deste artigo é apresentar de forma clara e didática a essência das hipóteses sobre a gravitação de Poincaré, consideramos esse “anacronismo deliberado” como aceitável.

1. A existência de uma função invariante de Lorentz das quatro coordenadas e das velocidades que definem a lei da propagação da atração. Esse requisito implica uma velocidade finita de atração, conforme estabelecido pelo princípio da relatividade.
2. A suposição mencionada acima, de que a transformação de Lorentz afeta as forças gravitacionais e eletromagnéticas da mesma maneira.
3. Para corpos em repouso, a lei da força deve coincidir com a lei de Newton.
4. A solução escolhida será aquela que menos altera a lei de Newton para velocidades pequenas. Isso decorre da necessidade de interpretar os dados astronômicos da mesma forma que a lei de Newton. Isso evidencia a preocupação de Poincaré com as implicações empíricas da teoria, indicando que não encontrou razões empíricas para modificar a lei de Newton.
5. A variável tempo nas expressões matemáticas deve sempre ser consistente com o fato físico conhecido de que leva tempo para a atração viajar de um corpo para outro. A combinação desse requisito com a condição de invariância garante que a velocidade de propagação da força gravitacional não exceda a velocidade da luz.

Com o intuito de manter a maior similaridade possível com a lei da gravitação newtoniana, Poincaré assume que a massa gravitacional e a massa inercial são manifestações distintas, não apenas conceitualmente, mas empiricamente (Katzir, 2005). Enquanto a massa inercial depende da velocidade do sistema físico, a massa gravitacional de Poincaré é considerada um invariante relativístico. Naquela época, esse postulado era aceitável, uma vez que ainda não havia evidências empíricas que demonstrassem variações na massa gravitacional em relação à velocidade, similarmente à massa inercial (Whittaker, 1953).

A partir desses parâmetros, Poincaré propõe derivar a transformação da força gravitacional construindo invariantes de Lorentz que satisfaçam a forma quadrática do espaço-tempo ( $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ ). Inicialmente, Poincaré escreve três pontos no espaço 4-dimensional e observa que as transformações de Lorentz podem ser interpretadas como rotações nesse espaço. Dessa constatação, ele conclui que existem apenas seis invariantes dependentes de dez parâmetros, ou seja, há quatro parâmetros livres. A princípio, Poincaré obtém quatro invariantes distintos (Poincaré, 1906, p. 169):

$$\vec{r}^2 - t^2, \quad A = \frac{t - \vec{r} \cdot \vec{v}}{\sqrt{t - \vec{v}^2}}, \quad B = \frac{t - \vec{r} \cdot \vec{v}_1}{\sqrt{t - \vec{v}_1^2}}, \quad C = \frac{t - \vec{v} \cdot \vec{v}_1}{\sqrt{(t - \vec{v}^2)(t - \vec{v}_1^2)}} \quad (01)$$

Sobre esses invariantes, Walter (2007, p. 201-202) destaca a presença de uma pequena inconsistência matemática:

A inspeção dos sinais desses invariantes revela uma inconsistência, cuja razão é aparente quando os cálculos intermediários são realizados. Em vez de construir seus quatro invariantes a partir de produtos escalares, Poincaré introduziu uma inversão para A, B e C. Essa inconsistência de sinal não teve consequências em sua busca por uma lei relativística da gravitação, embora tenha afetado seu resultado final.

Por meio desses invariantes, Poincaré propõe uma derivação da expressão da nova lei gravitacional. Katzir (2005) categoriza esse processo em três etapas: Inicialmente, Poincaré identificou funções que são invariantes em relação às coordenadas e velocidades. Em seguida, formulou a força como uma função desses invariantes e de coeficientes não especificados, assegurando a compatibilidade com o princípio da relatividade. Por fim, determinou expressões específicas para a força por meio de uma comparação com a aproximação newtoniana em baixas velocidades.

Nesse contexto, Poincaré utiliza o *método da transferência* ou *analogia* (cf. Moles, 1981), uma abordagem que implica estabelecer uma analogia conceitual entre dois domínios e transferir as formas estruturais de um para o outro. Para construir as componentes gravitacionais, Poincaré fundamenta-se nas equações da eletrodinâmica, deduzindo seus novos invariantes por meio das transformações de Lorentz e analogias relacionadas à densidade de carga elétrica. Sobre o procedimento empregado por Poincaré, Walter (2007, p. 202) faz algumas observações pertinentes:

Poincaré identificou uma analogia formal entre os quatro vetores de força e densidade de força, de um lado, e os quatro vetores de posição e velocidade, por outro lado: esses pares de vetores se transformam da mesma maneira, exceto que um membro é multiplicado por  $1/k(1+\zeta\epsilon)$ . Embora esta analogia possa parecer matematicamente transparente, merece ser notada, já que parece ter escapado a Poincaré no início. Com esses quatro vetores cinemáticos em mãos, Poincaré definiu um quinto quadrúpleto  $Q$  com componentes de densidade de força  $(X, Y, Z, T\sqrt{-1})$ . Assim como no caso anterior, os produtos escalares de seus quatro quadrúplos  $P, P', P''$  e  $Q$  deviam entregar quatro novos Lorentz-invariantes em termos da força que age na massa passiva  $(X_i; Y_i; Z_i)$ .

Assim, decorre do método da transferência que os invariantes gravitacionais podem ser construídos pela multiplicação dos coeficientes pelos elementos de força. Dessa forma, os quatro invariantes gravitacionais obtidos por Poincaré (1906, p. 170) são:

$$M = \frac{\vec{F} \cdot \vec{F}_t}{1-v^2}, N = \frac{\vec{F} \cdot \vec{r}_t - F_t \cdot t}{\sqrt{1-v^2}}, P = \frac{\vec{F} \cdot \vec{v}_t - F_t \cdot t}{\sqrt{(1-v^2)(1-v_1^2)}}, Q = \frac{\vec{F} \cdot \vec{v}_t - F_t \cdot t}{1-v^2} \quad (02)$$

No entanto, como Poincaré estabeleceu que o escalar  $F_1$  é o produto interno do vetor força  $F$  pelo vetor velocidade  $v$ , o quarto invariante deve ser sempre nulo. Além disso, conforme enfatizado por Katzir (2005), a comparação não conduz a uma expressão única para a lei da força. Isso leva Poincaré a realizar outras considerações, a fim de obter uma única expressão. Entre essas considerações, destaca-se aquela em que Poincaré sugere, em decorrência do princípio da causalidade, que a força deve se propagar à velocidade da luz. Além disso, assim como ocorreu com os primeiros invariantes, há novamente uma inversão de sinais, conforme observado por Walter (2007, p. 203):

Ao comparar os sinais dos invariantes cinemáticos com os dos invariantes de força, observamos que Poincaré obteve sinais consistentes apenas para os últimos invariantes. Ele não deve ter calculado os invariantes de força da mesma maneira que seus invariantes cinemáticos, por razões que permanecem obscuras. Não é de todo improvável que, durante sua análise das transformações de velocidade e força, Poincaré tenha percebido que poderia calcular os invariantes de força a partir dos produtos escalares dos 4-vetores. No entanto,

dois fatos testificam contra essa interpretação. A princípio, Poincaré não mencionou que seus invariantes de força eram os produtos escalares dos 4-vetores de posição, velocidade e força. Além disso, ele não alterou os sinais de seus invariantes cinemáticos para fazê-los corresponder aos produtos escalares dos 4-vetores de posição e velocidade. O fato de os invariantes cinemáticos de Poincaré diferirem dos produtos dos 4-vetores de velocidade nos leva a acreditar que, ao formar esses invariantes, ele não estava pensando a partir do formalismo 4-vetorial.

Dado o número de parâmetros livres, Poincaré ainda não é capaz de derivar uma lei aplicável ao movimento relativo de dois corpos. Para contornar essa dificuldade, Poincaré (1906, p. 170) introduz três restrições aos seus oito invariantes, a saber:

1. O primeiro membro da relação que define a velocidade de propagação deve ser função dos 4 invariantes (01).
2. Os quatro invariantes (02) devem ser funções dos invariantes (01).
3. Quando ambos os corpos estão em repouso absoluto, o vetor força  $F$  deve ter o valor deduzido da lei de Newton; quando estão em repouso relativo, o valor deve ser deduzido das seguintes transformações:

$$\vec{F} = \nabla V, \quad V = \frac{1}{\gamma r'}$$

Sobre a primeira restrição, Poincaré (1906, p. 170) admite que há diversas hipóteses compatíveis, mas que ele irá restringir sua análise a apenas dois casos. No primeiro (A), ele considera que a velocidade de propagação da força gravitacional seria igual à da luz. No segundo, (B), Poincaré brevemente considera uma teoria de emissão (Walter, 2007), porém ele rejeita essa possibilidade. Isso decorre do fato de que, em (B), a velocidade de propagação da força gravitacional seria muito mais rápida que a da luz e, em alguns casos, haveria violação do princípio da causalidade, situação que, nas palavras de Poincaré (1906, p. 170), “dificilmente parece admissível”.

Assim, o próximo passo consistia em formular uma lei de força para as massas (cargas) gravitacionais ativas e passivas. Inicialmente, Poincaré (1906, p. 172) estabeleceu relações entre os invariantes  $M$ ,  $N$ ,  $P$  e os invariantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  por meio das seguintes identidades:

$$M = \frac{1}{B^4}, \quad N = \frac{A}{B^2}, \quad P = \frac{A-B}{B^3}$$

Poincaré (1906, p. 172) observa que, dado que os termos da ordem do quadrado das velocidades estão presentes, esses satisfazem a lei da força gravitacional de Newton. Poincaré também destaca que, uma vez que tanto  $(C - 1)$  quanto  $(A - B)^2$  também incluem termos na ordem do quadrado de  $v$ , poderíamos construir outras soluções compatíveis com as leis de Newton. Para tanto, basta adicionar a ambos os lados de cada uma das relações acima um termo composto por  $(C - 1)$  multiplicado por uma função arbitrária de  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , e um termo composto por  $(A - B)^2$  multiplicado por uma função de  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

Com base nessas considerações, Poincaré estabelece que qualquer abordagem voltada para a obtenção de uma lei relativística para a força gravitacional deve se alicerçar em dois pontos fundamentais: a exclusão das velocidades ao quadrado nos invariantes e a compatibilidade com sua contraparte newtoniana correspondente. Durante suas investigações, Poincaré explora duas abordagens distintas.

Na primeira abordagem, Poincaré buscou construir a força utilizando seus invariantes cinemáticos. No entanto, Poincaré não ficou satisfeito com essa solução. A princípio, a razão dessa insatisfação parece ser que, em determinadas situações, ela poderia resultar em um valor imaginário. Contudo, conforme observa Walter (2007, p. 205), essa não era a principal preocupação de Poincaré:

A observação feita [por Poincaré] sugere que, para determinados valores das velocidades das partículas, a força resulta em valores imaginários. No entanto, a verdadeira dificuldade reside na equação  $M = 1/B^4$ , que permite a presença de uma força repulsiva. A abordagem geral não atingiu seus objetivos. A decisão de Poincaré em publicar a derivação anterior pode ser interpretada de duas maneiras. De um lado, há uma explicação psicológica: o hábito de Poincaré, muitas vezes criticado por seus colegas, de apresentar suas descobertas conforme as encontrava, pode ter influenciado essa publicação. Por outro lado, Poincaré pode ter percebido que era valioso mostrar que a abordagem geral não era bem-sucedida.

Assim, Poincaré descarta essa abordagem e propõe outra. Desta vez, ele adota uma hipótese menos abrangente, que não faz uso dos três invariantes de força. Inicialmente, ele expressa os invariantes A, B e C da seguinte forma (Poincaré, 1906, p. 172):

$$A = -k_0(r + \vec{r} \cdot \vec{v}), \quad B = -k_1(r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1), \quad C = k_0 k_1 (1 - \vec{v} \cdot \vec{v}_1) \quad (03)$$

$$r = -t, \quad k_0 = 1/\sqrt{1 - \vec{v}^2}, \quad k_1 = 1/\sqrt{1 - \vec{v}_1^2}$$

Em seguida, Poincaré postula que a força gravitacional atuando sobre a massa passiva em movimento deve ser uma função tanto da distância quanto das velocidades relativas entre as cargas gravitacionais. A partir desse ponto de vista, Poincaré (1906, p. 173) deriva as seguintes equações:

$$\vec{F}_1 = \vec{r} \frac{\alpha}{k_0} + \vec{v} \beta + \vec{v}_1 \frac{k_1}{k_0} \gamma \quad F_{i1} = -r \frac{\alpha}{k_0} + \beta + \frac{k_1}{k_0} \gamma \quad (04)$$

onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são invariantes cinemáticos que satisfazem a equação:

$$-A\alpha - \beta - C\gamma = 0 \quad (05)$$

Aqui deparamos com um fato inconveniente em relação à hipótese gravitacional de Poincaré. A equação acima possui dois parâmetros livres, o que implica na existência de infinitas soluções e, portanto, uma variedade infinita de possibilidades para construir uma lei da gravitação universal. Não há nenhum argumento físico ou matemático que permita determinar de forma única os valores dos invariantes cinemáticos. Por uma questão de simplicidade, Poincaré (1906, p. 173) assume  $\beta = 0$  e encontra as seguintes soluções.

$$\beta = 0, \quad \gamma = \frac{A\alpha}{C} \quad (06)$$

Em seguida, Poincaré impõe que, para velocidades significativamente menores que a velocidade da luz, os termos que contêm os quadrados das velocidades podem ser desprezados, e que suas equações devem convergir para as leis de Newton. Nessas condições, ele obtém, respectivamente,  $\alpha = 1/r^3$  e  $1/B^3 = \alpha$ <sup>14</sup>. Ao substituir os invariantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  em vez de  $\beta$  e  $\gamma$  na equação, Poincaré (1906, p. 174) derivou quatro equações para os quatro componentes da força generalizada.

$$\vec{F}_1 = \frac{\vec{r}}{k_0 B^3} - \vec{v}_1 \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C} \quad F_{t1} = -\frac{r}{k_0 B^3} - \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C} \quad (07)$$

Substituindo os valores de  $A$ ,  $B$  e  $C$ , chegamos à primeira lei relativística de Poincaré para a força gravitacional (Poincaré, 1906, p. 174):

$$\vec{F} = -\frac{1}{k_0 k_1^3 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1)^3} \left[ \vec{r} + \frac{\vec{v}_1 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1)}{1 - \vec{v} \cdot \vec{v}_1} \right] \quad (08)$$

Nessa expressão, os vetores  $v$  e  $v_1$  representam, respectivamente, as velocidades das massas gravitacionais passiva e ativa, enquanto  $r$  é o vetor que conecta seus respectivos centros de massa. Ao abordar essa nova lei para a força gravitacional, Poincaré (1906, p. 174) mais uma vez faz menção à produção de ondas gravitacionais:

Lembre-se de que, ao mencionarmos a posição ou velocidade do corpo que atrai, estamos nos referindo à sua posição ou velocidade no momento em que a *onda gravitacional* se origina dele. Para o corpo atraído, por outro lado, trata-se da sua posição ou velocidade a partir do momento em que a *onda gravitacional* o alcança, assumindo que essa *onda se propague com a velocidade da luz* (destaques nossos).

Uma consideração adicional acerca dessa equação é apresentada por Katzir (2005, p. 21):

Essa força gravitacional guarda semelhanças com a força eletromagnética de Lorentz, compreendendo dois termos: um alinhado com a linha que conecta os dois corpos e o outro alinhado com a velocidade do corpo que atrai. O primeiro termo, dependendo da posição dos corpos, é análogo à força eletrostática, enquanto o segundo, relacionado à velocidade da força de atração, assemelha-se à força magnética. Notavelmente, ao contrário do termo magnético na força eletromagnética, essa força é paralela, em vez de ortogonal, à velocidade.

Poincaré considera prematuro levar adiante a discussão dessas fórmulas; por isso, ele se limita a fazer apenas três observações. Na primeira, destaca que essa solução não é única, pois

14 Registre-se que, como destacado por Katzir (2005), outras combinações de variáveis também poderiam fornecer o mesmo valor nessa aproximação.

é possível obter outras soluções igualmente consistentes, substituindo em todas as ocorrências de  $1/B^3$  pela expressão (Poincaré, 1906, p. 174):

$$\frac{1}{B^3} + (C-1)f_1(A, B, C) + (A-B)^2 f_2(A, B, C) \quad (09)$$

As funções  $f_1$  e  $f_2$  são selecionadas de forma arbitrária em relação a  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Poincaré ressalta que não é necessário assumir que  $\beta$  seja nulo; no entanto, é fundamental que essas funções atendam à relação (05). Além disso, elas devem ser de segunda ordem em relação a  $v$  no contexto de  $\alpha$  e de primeira ordem em relação a  $\beta$  e  $\gamma$ .

Em sua segunda observação, Poincaré propõe reformular sua primeira lei relativística da força gravitacional, substituindo  $1/B^3$  por  $C/B^3$ . Essa articulação conduz à sua segunda lei relativística para a força gravitacional (Poincaré, 1906, p. 175):

$$\vec{F} = -\frac{1}{k_1^2 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1)^3} \left[ (\vec{r} + r \cdot \vec{v}_1) + \vec{v}_1 \times (\vec{v}_1 \times \vec{r}) \right] \quad (10)$$

Assim como a primeira lei relativística da força gravitacional, a segunda lei também exhibe características formais semelhantes à força eletromagnética de Lorentz. Novamente, as análises de Katzir (2005, p. 21) apresentam observações pertinentes para compreender essas analogias:

A analogia entre essa lei de força e a interação entre dois elétrons em movimento é evidente; a primeira expressão entre parênteses assemelha-se ao efeito do campo elétrico, enquanto a segunda se relaciona ao campo magnético (Poincaré, 1905, p. 549). Embora a eletrodinâmica em geral e a força de Lorentz, em particular, tenham fornecido a Poincaré um modelo para a elaboração de uma lei de força relativística, a derivação da teoria não se baseou no modelo eletrodinâmico. O método de invariância, utilizado por Poincaré, não foi derivado e nem teve paralelo na teoria eletrodinâmica. Enquanto o segundo termo na força de Lorentz é uma função do campo magnético, na força de Poincaré é um produto vetorial direto da velocidade e da distância. Assim como na mecânica celeste clássica, a nova teoria gravitacional é também uma teoria de massas pontuais e não uma teoria de campo. A única diferença significativa é que a atração leva um tempo finito para se propagar em vez de ser instantânea.

Na sua terceira e última observação, Poincaré (1906, p. 175) conclui que o postulado da relatividade nos levaria a adotar a primeira lei relativística da força gravitacional (equação 08) ou a segunda (equação 10), ou qualquer outra solução decorrente da primeira observação. Assim, a questão crucial reside na avaliação da compatibilidade dessas soluções com as observações astronômicas. A essa indagação, Poincaré (1906, p. 175) oferece a seguinte resposta:

A discrepância com a lei de Newton é da ordem de  $v^2$ , ou seja, 10.000 vezes menor do que seria se fosse da ordem de  $v$ , isto é, se a propagação ocorresse com a velocidade da luz, mantendo-se as demais condições inalteradas. Assim, há razões para esperar que essa discrepância não seja muito significativa. Entretanto, somente uma análise mais aprofundada poderá proporcionar uma avaliação com maior precisão.

E, assim, concluem-se tanto as hipóteses sobre a gravitação quanto o artigo. De maneira análoga a Newton, Poincaré evitou empreender quaisquer explicações sobre como a atração gravitacional se propaga. Qual seria, então, a razão para a postura adotada por Poincaré? Em suas pesquisas, Katzir (2005, p. 21) faz o seguinte apontamento:

Sem dúvida, [Poincaré] estava ciente das tentativas anteriores, sem sucesso, de desenvolver uma teoria de campo para a gravitação, inspirada no eletromagnetismo de Maxwell. No presente contexto, esse não era seu objetivo; Poincaré não buscou fundamentar a gravitação em novas bases. Ele realizou uma modificação na teoria da gravitação de Newton, mantendo-se fundamentado na teoria clássica, ao invés de apresentar uma teoria independente.

Poincaré não elaborou novos trabalhos sobre suas hipóteses gravitacionais. Katzir (2005) relata que ele discutiu o assunto em um curso universitário no período de 1906-1907 e, posteriormente, em palestras de divulgação. Nessas ocasiões, compartilhou alguns resultados numéricos sobre os efeitos da força de atração relativística, indicando preferência por sua segunda lei relativística para a força gravitacional e ressaltando a analogia com a eletrodinâmica (Katzir, 2005). O historiador da ciência Scott Walter sintetiza o conteúdo das aulas ministradas por Poincaré em 1906-1907:

Durante suas aulas na Sorbonne de 1906-1907, [...], quando desenvolveu uma fórmula geral para o avanço do periélio, Poincaré optou por uma abordagem lagrangiana em vez de uma de suas leis específicas. As notas dos alunos indicam que ele interrompeu antes de realizar uma avaliação numérica para os vários modelos de elétrons, possivelmente deixando isso como um exercício. Posteriormente, em uma revisão abrangente da teoria eletrônica, Poincaré forneceu os números relevantes. A teoria de Lorentz previu um avanço extra de 7''00 por século para o periélio de Mercúrio, um valor ligeiramente maior que o da teoria eletrônica não relativística de [Max] Abraham. No entanto, o avanço anômalo do periélio de Mercúrio foi de 42''00, levando Poincaré a observar que outra explicação teria que ser encontrada para explicar os segundos restantes do arco. Poincaré concluiu de forma sóbria que as observações astronômicas não favoreceram argumentos a favor da nova eletrodinâmica (Walter, 2007, p. 208).

Embora Poincaré não tenha investigado mais profundamente essa questão, alguns de seus contemporâneos, incluindo Lorentz e o notório astrônomo holandês Willem de Sitter, refletiram sobre ela. Na próxima seção, ao discutirmos a repercussão das hipóteses gravitacionais de Poincaré, teremos a oportunidade de abordar essas discussões.

## Repercussão das hipóteses gravitacionais de Poincaré

Embora Einstein e Poincaré tenham apresentado diferentes abordagens para a teoria da relatividade especial (Martins, 2012), as investigações de Poincaré inicialmente foram além das de Einstein. Isso se deve ao fato de Poincaré estar ciente de que a velocidade de propagação da ação gravitacional, conforme elucidada por Laplace no século XVIII, contradizia o princípio da relatividade (Poincaré, 1906). Por essa razão, Poincaré, já em 1905, buscou imediatamente estender a covariância de Lorentz para incluir a gravidade, enquanto Einstein só abordaria essa questão a partir de 1911.

As hipóteses de Poincaré foram objeto de discussão entre alguns dos principais protagonistas no desenvolvimento subsequente da teoria da relatividade (Katzir, 2005; Walter, 2007). Conforme Katzir (2005, p. 24), “durante sua primeira apresentação sobre o princípio da relatividade em novembro de 1907, Minkowski mencionou a demonstração de Poincaré acerca da possibilidade de uma atração gravitacional propagar-se a uma velocidade finita e ser compatível com o princípio da relatividade. Essa visão contrastava com a afirmação anterior de Laplace”.

No ensaio de 1908 intitulado “As equações fundamentais para os fenômenos eletromagnéticos em corpos em movimento”,<sup>15</sup> Hermann Minkowski reexamina as hipóteses de Poincaré sobre a gravitação. Ao fundamentar sua abordagem exclusivamente na representação geométrica do espaço-tempo, Minkowski propõe uma lei geométrica para a força, concebida como um vetor “espaço-tempo”, assegurando, assim, sua covariância de Lorentz.<sup>16</sup> De acordo com a nova formulação, a força é determinada pelas “massas de repouso” das cargas gravitacionais, pela distância entre seus centros de massa e pela velocidade da carga gravitacional passiva (Minkowski, 1908). As conclusões de Minkowski (1908) sobre a velocidade de propagação da onda gravitacional e a compatibilidade de sua lei com o modelo newtoniano assemelham-se às obtidas por Poincaré (1906).

Uma lei de atração para massas, como discutido anteriormente e relacionado ao postulado da relatividade, implicaria que a *gravidade se propagaria à velocidade da luz*. Devido à pequena influência do termo periódico [ $O(10^{-8})$ ], não há motivo para *rejeitar* essa lei em favor da proposta de modificação na mecânica em relação à atração *newtoniana* e à mecânica *newtoniana*, com base nas observações astronômicas (Minkowski, 1908, p. 111; destaques no original).

O trabalho de Minkowski não despertou atenção, sendo mencionado pela primeira vez apenas dois anos após sua publicação (Walter, 2007). Em 1910, Arnold Sommerfeld escreveu um artigo sobre relatividade, no qual demonstrou que o modelo de Minkowski era equivalente à lei para a força gravitacional que Poincaré havia deduzido em seu artigo de 1906 (Sommerfeld, 1910). Nesse trabalho, Sommerfeld mostrou que as leis relativísticas poderiam ser expressas tanto usando 4-vetores quanto 6-vetores, reescrevendo as leis obtidas por Poincaré e Minkowski no novo formalismo matemático (Walter, 2007).

Ainda nesse trabalho, Sommerfeld (1910) criticou as abordagens de Poincaré e Minkowski, afirmando que eram incompatíveis com o princípio da reação (*cf.* Katzir, 2005; Walter, 2007). Nas teorias de Poincaré e Minkowski, nas quais a gravidade viaja através de ondas gravitacionais em um tempo finito, a ação e a reação não ocorrem instantaneamente. Poincaré já havia discutido um problema semelhante, mas relacionado à eletrodinâmica de Lorentz. A solução desse paradoxo levou-o a supor que nos processos de emissão e absorção, a radiação se comporta como um fluido fictício que apresenta uma inércia  $m = E/c^2$  (Poincaré, 1900b).<sup>17</sup>

15 Mais especificamente, no Apêndice (*Anhang*) intitulado “*Mecânica e o postulado da relatividade*” (*Mechanik und Relativitätspostulat*) (Minkowski, 1908, p. 98-111).

16 No entanto, conforme ressalta Katzir (2005), justamente devido à natureza puramente geométrica das entidades postuladas, estas carecem, por si só, de significados físicos concretos, demandando uma tradução para uma compreensão mais substancial.

17 A dedução dessa equação é realizada minuciosamente por Poincaré (1900b) entre as páginas 256 e 260. Ao final, ele propõe um cálculo envolvendo a relação massa-energia que transcrevemos por inteiro:

Entretanto, em 1908, no ensaio “A dinâmica do elétron”, posteriormente incorporado como a terceira parte do livro *Ciência e método*, Poincaré (1908a, p. 393ss, 1908b, p. 215ss), após uma análise profunda sobre o princípio da reação na eletrodinâmica, conclui de maneira definitiva: “devemos, portanto, adotar a teoria de Lorentz e, conseqüentemente, abandonar o princípio da reação” (Poincaré, 1908a, p. 394, 1908b, p. 245). Dessa forma, a objeção de Sommerfeld (1910) perde seu efeito, uma vez que a perspectiva de Poincaré (1908a, 1908b) rejeita o *princípio da reação*.

No mesmo ano em que Sommerfeld (1910) levantou objeções, Lorentz (1934) expressou seu apoio às hipóteses sobre a gravitação de Poincaré, durante uma série de palestras intitulada “Antigas e novas questões da física”, posteriormente transcritas e publicadas como ensaio. Na segunda palestra, Lorentz reiterou sua posição contrária à universalidade do princípio da reação, minimizando as críticas de Sommerfeld (1910). Optando pela segunda expressão sugerida por Poincaré para a nova lei gravitacional, Lorentz previu pequenas, mas observáveis, diferenças em relação à lei de Newton.

Na terceira palestra, Lorentz (1934, p. 218ss) analisa como um experimento proposto por Maxwell para detectar se o sistema solar se move em relação ao éter, por meio da observação dos eclipses das luas de Júpiter, poderia ser adaptado para avaliar empiricamente a segunda hipótese de Poincaré. Lorentz (1934, p. 219) destaca que, segundo Maxwell, o movimento orbital uniforme deve permanecer inalterado, o que implicaria em uma variação no intervalo de tempo entre a chegada dos sinais luminosos de duas passagens sucessivas de uma lua de Júpiter. Contudo, essa premissa entra em desacordo com o princípio da relatividade.

A conservação presumida do movimento circular uniforme durante uma translação no éter é, no entanto, incompatível com o princípio da relatividade. Ao descrever o processo em um sistema de coordenadas que não se move com o objeto, a aplicação da lei modificada da gravidade torna-se necessária. Isso resulta em uma não uniformidade no movimento dos planetas, anulando assim a disparidade nos intervalos de tempo entre a chegada dos sinais luminosos. Portanto, a determinação de se ocorre um adiantamento ou atraso nas ocultações pode ser utilizada para decidir a favor ou contra o princípio da relatividade (Lorentz, 1934, p. 219-220).

Lorentz (1934, p. 220) analisou os resultados experimentais de Burton relativos aos trânsitos e eclipses das luas de Júpiter, mas considerou a precisão insuficiente para chegar a uma conclusão satisfatória. Ele compartilhou esses resultados com De Sitter (Katzir, 2005; Walter, 2007), que, em 1911, buscou realizar novas medições para avaliar a segunda hipótese de Poincaré (De Sitter, 1911; Katzir, 2005; Walter, 2007). Apesar de os resultados obtidos por De Sitter (1911) não terem revelado evidências contundentes de incompatibilidade com a lei gravitacional de

---

“Portanto, do nosso ponto de vista, uma vez que a energia eletromagnética se comporta como um fluido que possui inércia, devemos concluir que, se qualquer tipo de dispositivo produzir energia eletromagnética e radiá-la em uma direção particular, esse dispositivo deve recuar, assim como um canhão recua ao disparar um projétil. Claro, esse recuo não ocorrerá se o dispositivo emitir energia igualmente em todas as direções; ocorrerá apenas se a emissão for assimétrica, e se a energia eletromagnética for emitida em uma única direção, como acontece, por exemplo, se o dispositivo for um excitador hertziano colocado no foco de um espelho parabólico. É fácil avaliar esse recuo quantitativamente. Se o dispositivo tiver uma massa de 1 kg e emitir três milhões de joules em uma direção com a velocidade da luz, a velocidade do recuo será de 1 cm/s. Em outras palavras, se a energia produzida por uma máquina de 3.000 watts for emitida em uma única direção, será necessária uma força de um dina para manter a máquina no lugar, apesar do recuo” (Poincaré, 1900b, p. 260).

Poincaré, o astrônomo concluiu que, mesmo se houvesse algumas divergências, a teoria poderia ser ajustada de maneira flexível para acomodá-las.

As duas leis são as únicas que foram realmente propostas, mas podemos, sem violar o princípio da relatividade, multiplicar a força por qualquer potência de  $C$ . Consequentemente, qualquer múltiplo (positivo, negativo ou mesmo fracionário) das quantidades [do periélio] estará de acordo com esse princípio (De Sitter, 1911, p. 406).

Essa maleabilidade *ad hoc* da teoria poderia levar um filósofo da ciência ortodoxo, como Popper, a considerar o abandono das hipóteses de Poincaré. No entanto, a dinâmica complexa da ciência transcende os modelos idealizados sobre o seu funcionamento (*cf.* Martins, 1986), e essa não foi a principal razão para o declínio das hipóteses de Poincaré. De acordo com as investigações históricas de Katzir (2005, p. 27ss), o abandono dessas hipóteses sobre a gravitação ocorreu principalmente por dois motivos: a preferência por teorias de campos e a incompatibilidade com o princípio da equivalência proposto por Einstein.<sup>18</sup>

Após 1911, o interesse da comunidade científica pela gravitação concentrou-se principalmente em teorias de campo que adotavam o princípio da equivalência, em contraste com teorias não baseadas em campo, como a de Poincaré. Esses esforços, notadamente os de Einstein, ganharam maior atenção, enquanto teorias mais simples que assumiam massa gravitacional constante foram preteridas. [...] O sucesso de Einstein, [em 1915], na construção de uma teoria de campo da gravitação que incorpora o princípio da equivalência e o princípio geral da relatividade tornou irrelevantes as tentativas anteriores de uma simples teoria covariante de gravitação de Lorentz (Katzir, 2005, p. 29).

Ademais, Apesar de terem atraído a atenção de notáveis pesquisadores como Hermann Minkowski, Hendrik Lorentz, Arnold Sommerfeld e Willem De Sitter, as hipóteses de Poincaré tiveram uma circulação e repercussão limitadas no meio acadêmico (Katzir, 2005; Walter, 2007). Esse fato pode ser atribuído, em parte, ao destaque tardio da relatividade especial, que começou a ganhar notoriedade apenas em 1911, especialmente entre cientistas alemães (Walter, 2011). Esses cientistas favoreciam teorias de campo e o princípio da equivalência, em contraste com as abordagens de Poincaré (Katzir, 2005; Walter, 2007). Assim, o desinteresse por uma proposta alternativa tornou inviável a continuidade das investigações das hipóteses de Poincaré sobre a gravitação, levando-as a degenerar.

## Considerações finais

As narrativas ingênuas sobre a teoria da relatividade frequentemente afirmam que Einstein proporcionou uma abordagem muito mais abrangente e completa do que Poincaré e Lorentz, passando longos anos enfrentando o problema da gravitação até desenvolver a teoria da relatividade geral. No entanto, é um fato que Einstein só se envolveu com a gravitação tardiamente, em 1911 (Katzir, 2005). Embora as abordagens de Einstein e Poincaré sejam interpretações

18 O princípio da equivalência einsteiniano afirma que os efeitos da gravidade e da aceleração são localmente indistinguíveis, tornando a gravidade uma manifestação da curvatura do espaço-tempo.

da mesma teoria (Martins, 2012), e inicialmente foi Poincaré que apresentou uma abordagem mais abrangente.<sup>19</sup>

Outro fator que parece ter contribuído para o esquecimento das hipóteses sobre a gravitação de Poincaré foi a falta de tráfego de suas ideias. Análises robustas de Fleck (1986), Sponsel (2002), Feyerabend (2010) e Kuhn (2017) mostram a importância da comunicação para a promoção de uma nova teoria. Poincaré tinha o hábito de publicar em periódicos de circulação limitada e com baixo fator de impacto em sua área. Além disso, ele nunca se deixou envolver pelo apelo da fama acadêmica, tampouco se interessava por disputas de prioridade.<sup>20</sup> Poincaré também não empenhou esforços em mobilizar a comunidade científica francesa para investir em suas ideias.

Por outro lado, os pesquisadores alemães formavam um grupo mais coeso e, ao perceberem o potencial do princípio da relatividade, lideraram esse programa de pesquisa e o submeteram ao que julgavam ser basilar: teoria de campo e concordância com o princípio da equivalência proposto por Einstein, o que preteria as hipóteses de Poincaré. Além disso, um dos líderes desse programa era Sommerfeld (Katzir, 2005; Walter, 2007), que, conforme discutido, foi um crítico incisivo das propostas de Poincaré sobre a gravitação.

O episódio em questão revela que a dinâmica das ciências é guiada por uma variedade de fatores. Do ponto de vista da abrangência e coerência, a abordagem de Poincaré parecia mais promissora. No entanto, foram feitas escolhas por outros caminhos, resultado de disputas epistemológicas e até mesmo ideológicas, que levaram à teoria da relatividade geral, que ao final, mostrou-se como uma teoria bem-sucedida, apesar de atualmente a considerarmos inadequada (*cf.* Martins, 1986, 1998a; Nunes, Queirós, 2020; 2022).

19 “A ausência de qualquer tratamento da gravitação na teoria de 1905 de Einstein torna sua discussão da simultaneidade e, portanto, toda a teoria, suscetível a dúvidas e objeções, como aquelas levantadas por Poincaré em 1904. O tratamento da gravitação fez a teoria relativística de Poincaré de 1905 mais completa do que a teoria de Einstein do mesmo ano. No entanto, o fato de uma teoria ser mais completa do que outra não é necessariamente uma vantagem. Poincaré propôs uma teoria relativística simples de movimento uniforme que inclui a gravitação e está em concordância com os dados observacionais. O objetivo de Einstein era muito mais ambicioso e, a longo prazo, mais bem-sucedido. A consolidação da gravitação na teoria da relatividade de Poincaré poderia ter desencorajado os físicos de buscar uma teoria alternativa. As exigências de Poincaré para a força eram o mínimo necessário para torná-la compatível com o princípio da relatividade e com os dados empíricos conhecidos. Físicos que perceberam a inclusão da gravitação na nova física relativística como uma questão em aberto tinham exigências adicionais que eventualmente levaram ao desenvolvimento de uma teoria muito mais bem-sucedida. Sendo mais completa, menos revolucionária e em melhor acordo com a teoria clássica do que a abordagem de Einstein sobre a gravitação, o caminho de Poincaré não teria conduzido à teoria geral da relatividade” (Katzir, 2005, p. 30).

20 Apesar da concordância geral de que Poincaré foi o primeiro a advogar pela universalidade do princípio da relatividade, ele jamais reivindicou tal primazia, atribuindo-a a Lorentz, que só reconheceu a importância desse princípio após a publicação dos trabalhos de Poincaré e Einstein (*cf.* Lorentz, 1914-1921).

## Referências bibliográficas

- BROWN, K. Laplace on the speed of gravity. *Mathpages*. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathpages.com/home/kmath690/kmath690.htm>. Acesso em: 10 set. 2020.
- CATTANI, C.; MARIA, M. Conservation laws and gravitational waves in general relativity (1915-1918). In: EARMAN, J.; JANSSEN, M.; NORTON, J.D. *The attraction of gravitation: new studies in the history of general relativity*. v. 5. Boston: Birkhäuser, 1993.
- CONDÉ, M.L.L. *As teias da razão: Wittgenstein e a crise da racionalidade moderna*. Belo Horizonte: Argumentvm, 2004.
- DAMOUR, T. Poincaré, the dynamics of the electron, and relativity. *Comptes Rendus. Physique*, v. 18, p. 551-562, 2017.
- DARRIGOL, O. The mystery of the Einstein-Poincaré connection. *Isis*, v. 95, n. 4, p. 614-626, 2004.
- DE SITTER, W. On the bearing of the principle of relativity on gravitational astronomy. *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society*, v. 51, p. 388-415, 1911.
- DUGAS, R. *A history of mechanics*. New York: Dover, 2011.
- EDDINGTON, A.S. The propagation of gravitational waves. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, v. 102, n. 716, p. 268-282, 1922.
- EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, v. 17, p. 891-921, 1905a.
- EINSTEIN, A. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, v. 18, p. 639-641, 1905b.
- EINSTEIN, A. Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften: Sitzungsberichte*, p. 688-696, 1916.
- EINSTEIN, A. Über Gravitationswellen. *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften: Sitzungsberichte*, 154-167, 1918.
- FEYERABEND, P. *Contra o método*. São Paulo: Editora Unesp, 2010.
- FLECK, L. *La génesis y el desarrollo de un hecho científico*. Madrid: Alianza, 1986.
- JAPIASSU, H.; MARCONDES, D. *Dicionário básico de filosofia*. 4. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2006.
- KATZIR, S. Poincaré's relativistic theory of gravitation. In: KOX, A.J.; EISENSTAEDT, J. (eds.). *The universe of general relativity*. Boston: Birkhäuser, 2005. p. 15-38. (Einstein Studies, v. 11).
- KRAGH, H. *An introduction to the historiography of science*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- KUHN, T.S. *A estrutura das revoluções científicas*. 13. ed. São Paulo: Perspectiva, 2017.
- LAPLACE, P.S. *Traité de mécanique céleste*. Paris: De L'Imprimerie de Crapelet, 1799-1825.
- LEVI-CIVITA, T. Sulla espressione analitica spettante al tensore gravitazionale nella teoria di Einstein. *Rendiconti Accademia dei Lincei*, ser. 5, v. XXVI, p. 381-391, 1917.
- LORENTZ, H.A. Alte und neue Fragen der Physik. *Physikalische Zeitschrift*, v. 11, p. 1234-1257, 1910. (Reprinted in *Collected papers*. The Hague: Martinus Nijhoff, v. 7, p. 205-245, 1934)
- LORENTZ, H.A. Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique. *Acta Mathematica*, v. 38, p. 293-308, 1914-1921.
- LYCAN, W.G. *Filosofia da linguagem: uma introdução contemporânea*. Lisboa: Edições 70, 2022.
- MARTINS, R.A. Popperian evaluation of Einstein's theory-plus-method. *Manuscrito: Revista Internacional de Filosofia*, v. 9, n. 2, p. 95-124, 1986. (Número especial dedicado a Popper)

- MARTINS, R.A. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica 2: física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 15, n. 3, p. 265-300, 1998a.
- MARTINS, R.A. The search for gravitational absorption in the early 20th century. In: GOEMMER, H.; RENN, J.; RITTER, J. (eds.). *The expanding worlds of general relativity* (Einstein Studies, v. 7). Boston: Birkhäuser, 1998b. p. 3-44.
- MARTINS, R.A. A. Majorana's experiments on gravitational absorption. In: EDWARDS, M.R. (org.) *Pushing gravity: new perspectives on Le Sage's theory of gravitation*. Montréal: Apeiron, 2002.
- MARTINS, R.A. El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poncaré. In: FAAS, H.; SAAL, A.; VELASCO, M. (eds.). *Epistemología e historia de la ciencia: selección de trabajos de las XV Jornadas*. Córdoba: Facultad de Filosofía y Humanidades/Universidad Nacional de Córdoba, 2005. p. 509-516.
- MARTINS, R.A. *Teoria da relatividade especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2012.
- MARTINS, R.A. *A origem histórica da relatividade especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2015.
- MILLER, A.I. A study of Henri Poincaré's 'Sur la dynamique de l'électron.' *Archive for History of Exact Sciences*, v. 10, p. 207-328, 1973.
- MINKOWSKI, H. Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. *Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, p. 53-111, 1908.
- MOLES, A. *A criação científica*. São Paulo: Perspectiva, 1981.
- NUNES, C.L.C.; QUEIRÓS, W.P. Doze mitos sobre a teoria da relatividade que precisamos superar. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 37, n. 2, p. 531-573, 2020.
- NUNES, C.L.C.; QUEIRÓS, W.P. O eclipse de 1919: um século de mitos históricos sobre a relatividade geral. *Caderno de Física da Uefs*, v. 20, n. 2, p. 2601.1-19, 2022.
- NUNES, C.L.C.; QUEIRÓS, W.P. Poincaré e o princípio da relatividade: uma tradução comentada do ensaio "Sobre a dinâmica do elétron". *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 16, n. 2, p. 765-792, 2023.
- NUNES, C.L.C.; QUEIRÓS, W.P.; CUNHA, J.A.R. Análise histórica do conteúdo de relatividade especial nos livros didáticos de física do PNLD 2018. *História da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces*, n. 24, p. 112-153, 2021.
- POINCARÉ, H. A propos de la théorie de M. Larmor. *Éclairage Electrique*, v. 3, p. 5-13, 1895.
- POINCARÉ, H. La mesure du temps. *Revue de Métaphysique et de Morale*, v. 6, n. 1, p. 1-13, 1898.
- POINCARÉ, H. Des fondements de la géométrie; à propos d'un livre de M. Russell. *Revue de Métaphysique et de Morale*, v. 7, p. 251-279, 1899.
- POINCARÉ, H. Sur les rapports de la physique expérimentale et de la physique mathématique. In: GUILLAUME, C. POINCARÉ, L. (org.). *Rapports présentés au congrès international de physique*. v. 1. Paris: Gauthier-Villars, 1900a. p. 1-29.
- POINCARÉ, H. La théorie de Lorentz et le principe de réaction. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, v. 5, p. 252-278, 1900b.
- POINCARÉ, H. Les relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique. *Revue Scientifique*, v. 14, p. 705-715, 1900c.
- POINCARÉ, H. Sur les principes de la mécanique; In: COLIN, A. *Bibliothèque du Congrès International de Philosophie*, v. 1, p. 457-494, 1901.
- POINCARÉ, H. *La science et l'hypothese*. Paris: Flammarion, 1902.
- POINCARÉ, H. L'état et l'avenir de la physique mathématique. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, v. 28, p. 302-324, 1904.
- POINCARÉ, H. *La valeur de la science*. Paris: Flammarion, 1905a.
- POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, v. 140, p. 1504-1508, 1905b.

- POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, v. 21, p. 129-176, 1906.
- POINCARÉ, H. La dynamique de l'électron. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées*, v. 19, p. 386-402, 1908a.
- POINCARÉ, H. *Science et méthode*. Paris: Flammarion, 1908b.
- POINCARÉ, H. *From a logical point of view*. New York: Harper & Row, 1963.
- POINCARÉ, H. *Ontological relativity and other essays*. New York: Columbia University Press, 1969.
- POINCARÉ, H. On empirically equivalent systems of the world. *Erkenntnis*, v. 9, n. 3, p. 313-328, 1975.
- POINCARÉ, H. *Pursuit of truth*. Cambridge: Harvard University Press, 1992.
- QUINE, W.O. *Word & object*. Cambridge: MIT Press, 1960.
- QUINE, W.O. On empirically equivalent systems of the world. *Erkenntnis*, v. 9, p. 313-328, 1975.
- QUINE, W.O. *Theories and things*. Cambridge: Harvard University Press, 1981.
- QUINE, W.O. Relatividade ontológica e outros ensaios. In: *Ryle; Strawson; Austin; Quine*. 3. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1985. (Coleção Os pensadores)
- QUINE, W.O. *Pursuit of truth*. Cambridge: Harvard University Press, 1992.
- QUINE, W.O. *De um ponto de vista lógico*. São Paulo: Unesp, 2011.
- ROSEVEARE, N.T. *Mercury's perihelion: From Le Verrier to Einstein*. Oxford: Clarendon Press, 1982.
- SCHWARTZ, H.M. Poincaré's rendiconti paper on relativity. Part I. *American Journal of Physics*, v. 39, p. 1287-1294, 1971.
- SOMMERFELD, A. Zur Relativitätstheorie II: Vierdimensionales Vektoranalysis *Annalen der Physik*, v. 33, p. 649-689, 1910.
- SPONSEL, A. Constructing a 'revolution in science': the campaign to promote a favourable reception for the 1919 solar eclipse experiments. *The British Journal for the History of Science*, v. 35, n. 4, p. 439-467, 2002.
- WALTER, S. Breaking in the 4-vectors: the four-dimensional movement in gravitation, 1905-1910. In: RENN, J.; SCHEMMELE, M. (eds.). *The genesis of general relativity*. v. 3: Theories of gravitation in the twilight of classical physics; Part I. Kluwer: Dordrecht, 2007. p. 193-252.
- WALTER, S. Henri Poincaré, theoretical Physics, and Relativity Theory in Paris. In: SCHLOTE, K.-H.; SCHNEIDER, M. (eds.). *Mathematics meets physics: A contribution to their interaction in the 19th and the first half of the 20th century*. Frankfurt: Harri Deutsch, 2011. p. 213-239.
- WALTER, S. Poincaré on clocks in motion. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 47, n. 1, p. 131-141, 2014.
- WHITTAKER, E.T. *A history of the theories of aether and electricity*. v. 1. New York: Humanities Press, 1951.
- WHITTAKER, E.T. *A history of the theories of aether and electricity*. v. 2. New York: Humanities Press, 1953.
- WITTGENSTEIN, L. *Investigações filosóficas*. Trad. de Tiago Tranjan, Giovane Rodrigues. São Paulo: Fósforo, 2022.
- WITTGENSTEIN, L. *Sobre a certeza*. Trad. de Giovane Rodrigues, Tiago Tranjan. São Paulo: Fósforo, 2023.

Recebido em 09/05/2024

Aceito em 30/09/2024