

Capítulo V

reflexões históricas sobre a teoria da relatividade. Sugestões pedagógicas

Roberto Leon Ponczek

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

PONCZEK, RL. *Deus ou seja a natureza: Spinoza e os novos paradigmas da física* [online]. Salvador: EDUFBA, 2009. 352 p. ISBN 978-85-232-0608-6. Available from SciELO Books

<<http://books.scielo.org>>.



All the contents of this chapter, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste capítulo, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de este capítulo, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

Parte II

SPINOZA E EINSTEIN E SUAS AFINIDADES POSITIVAS: A TEORIA DA RELATIVIDADE

CAPÍTULO V

REFLEXÕES HISTÓRICAS SOBRE A TEORIA DA
RELATIVIDADE. SUGESTÕES PEDAGÓGICAS

Neste e no próximo capítulo, abordarei especificamente uma das questões centrais deste texto: vislumbrar as afinidades e a compatibilidade da Teoria da Relatividade (TR) de Einstein com a metafísica de Spinoza, desvelando uma perspectiva mais ampla de entendimento, com vistas a uma pedagogia alternativa desta disciplina. Enquanto que neste capítulo, a abordagem terá um cunho historicamente mais interno e formal, embora com alguns inevitáveis matizes epistemológicos, no próximo, ela será, sob ponto vista filosófico, deliberadamente mais especulativa.

A TR é normalmente ensinada nas salas de aula das universidades, como uma construção historicamente interna da Física. A ideia predominante nas cartilhas da TR é a de que seus dois postulados foram introduzidos por Einstein tão-somente como consequência da necessidade de preservar a invariância dos fenômenos eletromagnéticos, em detrimento da mecânica clássica, uma vez ser impossível manter a invariância de ambas simultaneamente, sem sacrificar as transformações de Galileo. Defenderei, no entanto, a tese alternativa de que a TR, embora possa ter sido gestada pelo físico, inicialmente apenas com essas motivações de ordem interna à Física, pode também ser entendida, ensinada e referenciada num contexto

transdisciplinar mais amplo que vislumbra elementos externos, compatíveis com algumas metafísicas apreciadas pelo autor da TR, e dentre elas, em particular, o spinozismo.

Segundo W.Heisenberg, é certo que o autor da TR, já consagrado em 1924, como o maior físico de sua época, em suas constantes incursões contra as interpretações indeterministas da Teoria Quântica, afastava-se cada vez mais de suas convicções neopositivistas, inspiradas em E. Mach, defendendo peremptoriamente a autodeterminação e a vigência da natureza, e de suas leis, independentemente da observação humana. O criador do princípio de indeterminação da Teoria Quântica, relata-nos de forma pungente o diálogo que teve com Einstein em 1924, acompanhando-o ao longo de uma caminhada de volta à casa. O jovem Heisenberg não se sentiu constrangido em descrever com minúcias, os “puxões de orelha” que levou do autor da TR, quando, ao defender a sua recente mecânica matricial, ousou dizer a um severo Einstein que “uma boa teoria física deveria lidar apenas com grandezas observáveis”. O diálogo entre os dois grandes homens de ciência revela que, já nesta época, Einstein estava convicto da necessidade de se conhecer a natureza “tal qual ela é” e não como se nos apresenta aos sentidos¹.

Porém, antes de entrar no cerne dessa questão de cunho filosófico, à guisa de clareza e da boa didática, pretendo fazer uma incursão com um enfoque mais histórico, tomando, como o referência básica, o Cap. 7: “*Einstein’s Relativity And Others*”, do livro *Quantum Generations*, do historiador da ciência dinamarquês, H. Kragh, que visa à construção da TR, sob o ponto de vista estritamente interno. Como o autor do livro em questão não pretendeu questionar os respaldos filosóficos em que a TR se apoiou, ou tampouco pretendeu discutir as consequências metafísicas desta teoria, farei assim uma introdução histórica da TR, à maneira dos físicos. Apresentarei, à medida do possível, um quadro histórico evolutivo interno da ciência que levou à publicação dos artigos de Albert Einstein de 1905 e 1916, quando foram criadas respectivamente a Teoria da Relatividade Especial (TRE) e a Teoria da Relatividade Geral (TRG).

Um dos pontos mais polêmicos dessa dinâmica interna, que culminou com a criação da TRE, é saber até que extensão as experiências que visavam detectar o éter luminífero, e em particular a de Michelson-Morley de 1887, puderam ter influenciado a gênese da TR. Essa questão divide até hoje os historiadores, colocando frente a frente uma linha de pensamento neo-

empirista que advoga a impossibilidade de Einstein ter produzido seu artigo de 1905 sem um prévio conhecimento da experiência em questão; em oposição à outra, de cunho mais racionalista, que defende a independência do pensamento do autor da TR frente aos experimentos que resultaram na impossibilidade de detecção do éter.

Como no bojo dessa controvérsia encontram-se reconditamente algumas questões epistemológicas fundamentais acerca da origem do conhecimento, serei obrigado a extrapolar o objetivo inicial do autor que nos serviu de referência, acrescentando algumas dessas nuances de motivação filosófica, que caracterizaram o pensamento do criador da TR. No entanto, esta aparente transgressão ao texto de Kragh estará bem respaldada, a meu ver, pelo texto abaixo, de Michel Paty, endossando o fato de Einstein poder ser considerado um dos físicos do séc. XX mais atentos a questões extracientíficas de caráter filosófico, epistemológico e metafísico:

O pensamento de Einstein é explicitamente filosófico por si mesmo e não apenas em um nível implícito ou subjacente ainda que formulado como um trabalho científico. É verdade que a forma com que é expresso é diferente da maioria dos tratados filosóficos. Primeiramente, sua contribuição científica tem comumente não só um conteúdo filosófico, mas também um tom filosófico pela natureza fundamental das questões com que opera. Em segundo lugar, seus trabalhos acerca de questões gerais apresentam uma profunda coerência em toda a sua extensão. Finalmente seus escritos epistemológicos embora não numerosos, são de importância fundamental para a Filosofia da ciência. São eles: Geometria e Experiência, Física e Realidade, Os fundamentos da Física Teórica, Notas Autobiográficas e Resposta ao Criticismo².

Apesar do viés filosófico que sempre caracterizou a obra de Einstein, para não desvirtuar o propósito meramente histórico do livro de Kragh, esforçar-me-ei em resistir por ora aos apelos metafísicos do pensamento do autor da TR, deixando a especulação metafísica correr mais intuitivamente no próximo capítulo.

A citada controvérsia histórica acerca da importância da experiência de Michelson-Morley, as gêneses da TRE e TRG, a inadequação do nome sugerido por Planck, *Teoria da Relatividade*, e a aceitação desta teoria em diversos países europeus, bem como nos Estados Unidos, serão os principais pontos aqui abordados. A partir daí, creio que se possam reunir mais elementos históricos para adentrar na essência de minha indagação, a saber, a compatibilidade da TR com a metafísica spinoziana.

Baseado em minha longa travessia pelas salas de aula de várias universidades brasileiras, recomendo aos jovens mestres de Física que, sempre que possível, estimulem seus aprendizes com uma contextualização histórica bem fundamentada das teorias físicas, sendo esta de preferência seguida por reflexões multidisciplinares, envolvendo as motivações filosóficas de seus autores. É o que farei a seguir, neste e no próximo capítulo, entremeando o texto com algumas sugestões pedagógicas.

O éter luminífero e a experiência de Michelson-Morley

Até o final do séc. XIX acreditava-se piamente na existência do éter luminífero, fluido translúcido, sem peso, que preencheria os espaços vazios existentes tanto entre os átomos quanto entre os corpos celestes, e que serviria como o meio de propagação das ondas eletromagnéticas, assim como o ar é o meio mecânico que permite a propagação das ondas sonoras. Nem o grande James Clerck Maxwell, descobridor das famosas quatro equações fundamentais do eletromagnetismo, poderia prescindir da ideia do éter luminífero:

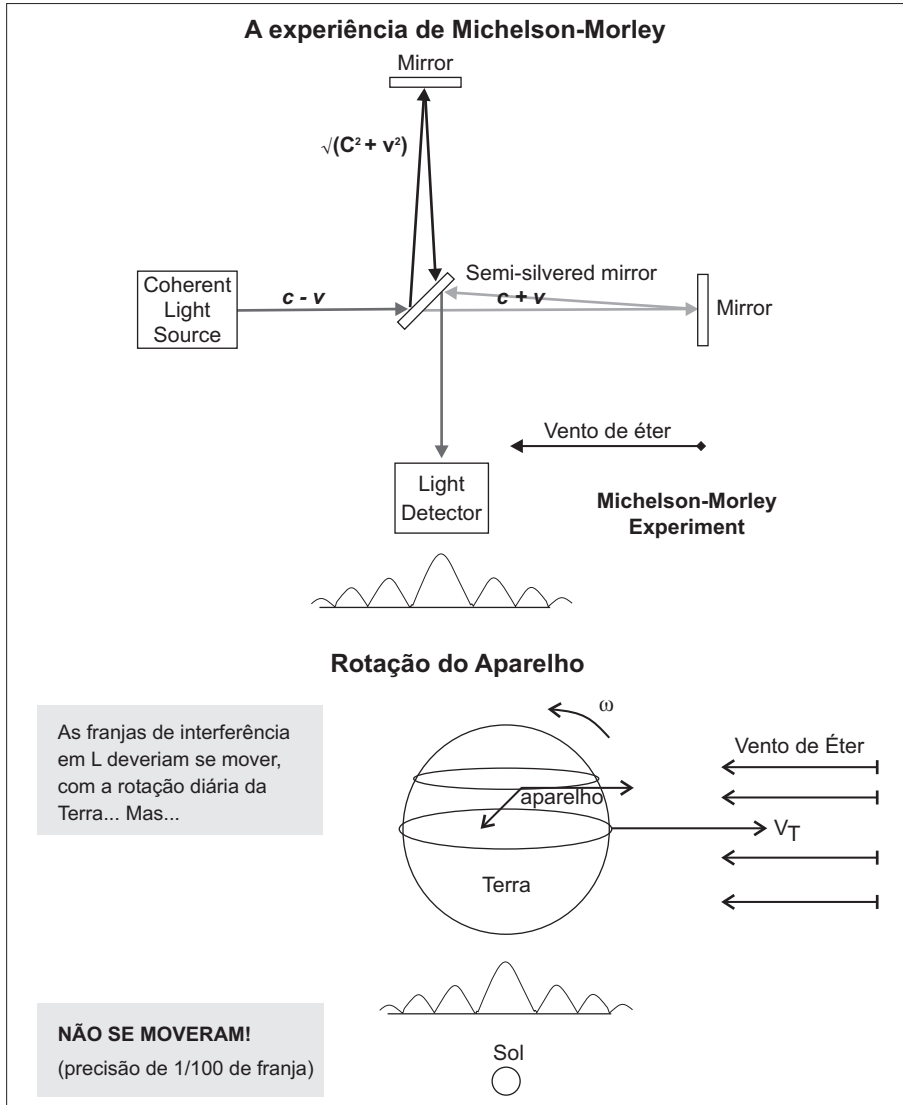
Não pode haver dúvida de que os espaços interplanetários e interestelares não são vazios, mas ocupados por uma substância ou corpo material que é certamente o maior, e provavelmente o mais uniforme, corpo que temos conhecimento³.

O geocentrismo aristotélico já havia sido sepultado há vários séculos, por Copérnico, Kepler e Galileo, mas o éter luminífero, sem dúvida, resistia como a última herança filosófica da doutrina aristotélica da quintessência. Para Aristóteles, o cosmos era dividido numa esfera sublunar onde pontificavam os quatro elementos terra, água, ar e fogo, com espaços vazios preenchidos pelo imponderável éter, enquanto que nos céus pairava a esfera supralunar onde não só os astros, mas também os espaços interestelares eram feitos dessa onipresente e perene quintessência etérea. Esse resquício aristotélico foi, várias vezes, registrado na História da Física como uma crença persistente em fluidos etéreos de cunho metafísico, como o calórico, os eflúvios e o fluido elétrico, por exemplo. Leonard Euler, comparando as velocidades da luz com a do som, chegou a calcular que o éter teria uma densidade 100 milhões de vezes menor que a do ar.

Assim, no final do séc. XIX tornou-se importante a detecção deste meio que seria a sede das perturbações eletromagnéticas. Quantificar as suas propriedades era o último elo aberto do eletromagnetismo, que se iniciou com Coulomb, Ampère, Oersted, Watt, Volta, Faraday, dentre outros, culminando, em grande estilo, com as quatro equações de Maxwell que davam suporte teórico ao entendimento da natureza da luz, como uma onda de origem eletromagnética⁴.

É neste contexto histórico que se situa a figura de Albert Michelson, físico experimental, naturalizado norte-americano, e fervoroso crente da existência do éter. Michelson, que trabalhava em Berlim, era um especialista na medição da velocidade da luz, imaginou que se a Terra se move, com velocidade v , num espaço pleno de éter em repouso, então no referencial terrestre haveria um vento de éter no sentido contrário ao de seu movimento, da mesma forma com que o vento bate no rosto de um ciclista. Desta forma, um raio luminoso que fosse apontado no sentido contrário ao movimento terrestre teria velocidade $c + v$, enquanto que um raio apontado no sentido do movimento teria velocidade $c - v$, e um raio perpendicular, velocidade $\sqrt{c^2 + v^2}$.

Como a Terra gira em seu movimento diário e também muda ligeiramente sua velocidade ao longo do ano, esperava-se um deslocamento das franjas de interferência produzida entre raios paralelos e perpendiculares ao vento de éter (ver **Figura V-1**). Apesar da sofisticação de seus aparelhos, Michelson não conseguiu detectar nenhuma diferença na velocidade dos raios, o que acarretava uma rigorosa imobilidade das franjas de interferência obtidas com seu aparelho. Repetiu a experiência em Cleveland, desta feita com a colaboração de Edward Morley, contando com aparelhos ainda mais sensíveis, cuja construção lhe valeu o prêmio Nobel de 1907. No entanto, ele nada encontrou. A crença de Michelson no éter era tão intensa e persistente que o físico chegou a repetir o experimento, ao ar livre, no alto de uma montanha, pois acreditava que, assim como um veículo fechado em movimento bloqueia a passagem do ar, as paredes de seu laboratório pudessem estar bloqueando o vento de éter. Para seu desapontamento, também ao ar livre os resultados foram negativos, atormentando para sempre o experimentador que chegou a adoecer, não se sabendo, no entanto, se por este motivo, ou por desavenças com a mulher que a esta altura já o acusara de adultério...⁵



Figuras V-1

Várias outras hipóteses tentaram em vão “salvar o éter”. Na segunda delas, o éter teria a mesma velocidade da Terra ~ 30 km/seg, o que explicaria a ausência de efeito num ponto da órbita, mas no ponto diametralmente oposto, o efeito deveria ser dobrado, e nada foi detectado.

Na hipótese de Lorentz & Fitzgerald supôs-se que o braço do interferômetro se contrairia na direção paralela ao éter, dando o mesmo tempo

de percurso que o raio que segue o outro braço. Em 1932, Kennedy & Thorndike usaram interferômetros com braços de comprimentos distintos, dando igualmente resultado negativo. A teoria da emissão de Walter Ritz foi mais uma tentativa infrutífera em que se supôs que a velocidade da luz seria c somente em relação à fonte emissora, e se esta se movesse com velocidade v , a velocidade da luz se somaria a esta, ou seja, seria $c + v$. Segundo essa teoria, as luzes de estrelas binárias, que giram em sentidos opostos, chegariam à Terra em tempos distintos, produzindo franjas de interferência que se moveriam na proporção do movimento de rotação da estrela, o que não foi observado. (Ver Figuras V-2)

As tentativas para “salvar” o programa do éter.

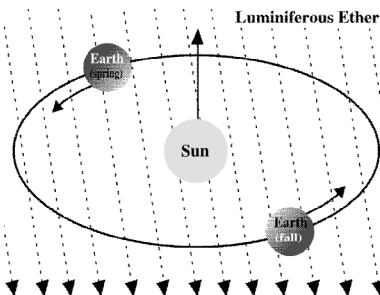
1 - O éter teria a mesma velocidade da Terra ~ 30 km/seg -> num ponto da órbita a ausência de efeito estaria explicada, mas no ponto diametral oposto, o efeito deveria ser dobrado: nada foi detectado. (M-M)

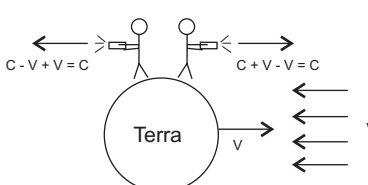
2 - A paredes do laboratório bloqueariam o vento de éter. A experiência foi repetida por Miller ao ar livre, com braços de 32m (sic) dando resultado negativo.

3 - O braço do interferômetro se contrairia de γ na direção // ao éter, dando o mesmo tempo de percurso. Em 1932, Kennedy & Thorndike usaram interf. com braços de comp. distintos: resultado negativo. (Hip. Lorentz & Fitz Gerald)

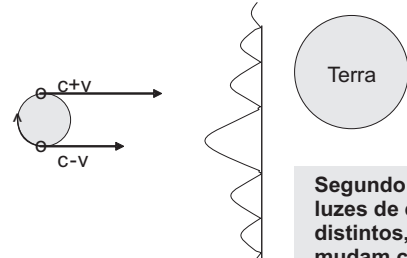
4 - Teoria da emissão de Walter Ritz (teoria balística): a vel. da luz seria c em relação à fonte e se somaria à vel. desta.

5 - Teoria de Stokes: a Terra arrastaria a camada mais próxima do éter → todos os elementos óticos da exp. MM repouso em rel ao éter → resultado negativo.





Estrelas binárias falseiam a teoria balística



Segundo a t.b. como os raios tem vel. diferentes as luzes de estrelas binárias chegariam em tempos distintos, produzindo franjas de interferência, que mudam com a rotação da estrela. Nada se observou!

Figuras V-2

Será neste contexto do final do séc. XIX, e das várias e infrutíferas tentativas de se “salvar” o éter luminífero, à maneira dos gregos, que surge um dos pontos mais controvertidos acerca da gênese da TRE. Essa questão, até os presentes dias, segue sendo objeto de polêmica entre as várias linhas de pesquisadores em História da Ciência, e à qual Kragh dedicará às duas primeiras seções do Cap. 7.

Segundo o historiador, o citado artigo de Einstein da *Annalen der Physik* é surpreendente, por diversos motivos:

(...) o artigo não inclui uma simples referência sequer, obscurecendo assim as fontes da teoria, tornando-se uma questão controversa para os historiadores da ciência. **Einstein não estava bem a par da literatura, e chegou à teoria de forma totalmente independente.** Ele sabia algo acerca de alguns trabalhos não técnicos de Poincaré e sobre o trabalho de Lorentz de 1895, mas nada sobre as deduções que este e Larmor haviam feito com respeito às equações de transformação de coordenadas. **Outro fato intrigante sobre o referido artigo de Einstein é que ele não menciona a experiência de Michelson-Morley ou qualquer outra experiência ótica que falhara em detectar o éter, e que eram rotineiramente discutidas na literatura concernente à eletrodinâmica dos corpos em movimento.** Entretanto, há uma forte evidência que Einstein, no momento que em publicou seu artigo, não só estava o par da experiência de Michelson-Morley **como também que a ela pouca importância dava. Ele não desenvolveu sua teoria para dar conta das anomalias experimentais, mas a trabalhou muito mais a partir de considerações de simplicidade e simetria,** originalmente relacionadas ao seu profundo interesse na teoria de Maxwell, bem como, à sua crença de que não poderiam haver diferenças de princípios entre as leis da mecânica e as que governam os fenômenos eletromagnéticos. **Na rota que Einstein seguiu até chegar à Relatividade, as experiências mentais eram mais importantes que as reais⁶**

Portanto, como se depreende do texto acima, sem referências claras a trabalhos afins como os de Lorentz, Fitzgerald, Poincaré, Larmor e à experiência de Michelson-Morley, em apenas 30 páginas, e à maneira geométrica (*more geométrico*), forma muito utilizada no séc. XVII, mas em desuso em uma época dominada pelo positivismo, Einstein partiria de apenas dois postulados, de caráter cinemático, enunciados sem demonstração.

As Transformações de Lorentz

Kragh parece assim engrossar o coro daqueles que advogam a independência da TRE não só frente à experiência de Michelson-Morley como

também frente a todo corpo teórico precedente, como a teoria de Lorentz, em particular:

As transformações de Lorentz formam o núcleo central da TRE e à primeira vista pode parecer que a teoria de Einstein foi precedida pelas teorias do elétron de Lorentz e Larmor. **Entretanto, definitivamente este não foi o caso.** Apesar de ter obtido as mesmas transformações que Einstein em 1905, Lorentz as interpretou de forma muito distinta. Em primeiro lugar, a teoria de Lorentz era de cunho dinâmico na qual às transformações se associaria uma causa física, qual seja a interação entre o éter e os elétrons de um corpo em movimento (...) Em segundo lugar, o éter de Lorentz constituía uma parte essencial de sua teoria no qual funcionaria como um referencial absoluto onde vigoraria uma simultaneidade absoluta⁷.

A TR, semelhantemente aos Elementos de Euclides, foi assim construída dedutivamente a partir de axiomas básicos, como um pequeno *more* geométrico. Arriscarei aqui a conjectura de que a forma que Einstein deu a seu artigo possa ser explicada pelo fato de que ele fora, desde a infância, um entusiástico admirador da geometria euclidiana, e assim expressava o seu encanto:

Aos doze anos experimentei minha segunda sensação de espanto⁸, (...) provocada por um livrinho de geometria plana de Euclides. (...) Ali estavam afirmações (...) que podiam ser provadas com tal certeza que qualquer dúvida estava fora de cogitação. Essa certeza lúcida impressionou-me profundamente. O fato de os axiomas serem aceitos sem prova não me perturbou. De qualquer forma, era bastante poder basear as provas em proposições cuja validade me parecia livre de qualquer dúvida. (...) Para quem a experimenta (a sensação) pela primeira vez, parece maravilhoso o homem ser capaz de alcançar tal grau de certeza e de pureza de pensamento, como nos demonstram os gregos com a sua geometria⁹.

Os dois postulados fundamentais da TRE são:

- 1 - As leis da natureza são as mesmas para todos os observadores que se movem uniformemente uns em relação aos outros.
- 2 - A velocidade da luz no vácuo independe do movimento da fonte e é a mesma para todos os observadores anteriores¹⁰.

Partindo desta base axiomática extremamente simples, Einstein construiu uma cadeia silogística com consequências drásticas não só para o entendimento como para a percepção sensorial comum: a desqualificação do éter, senão simplesmente a sua total supressão o que implica na desconstrução do espaço

e do tempo absolutos, dando, como vimos, às transformações de Lorentz abaixo escritas, uma interpretação totalmente diferente da que deu o físico holandês:

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$t' = \gamma(t - vx/c^2)$$

onde: $\gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$

Sobre essa nova interpretação das transformações de Lorentz, Kragh assim se expressa:

(...) com argumentos muito simples, Einstein mostrou primeiramente que a simultaneidade não pode ser definida absolutamente, mas depende do estado de movimento dos observadores. A seguir ele aplicou este insight para mostrar que não haviam noções consistentes para um tempo e um comprimento absolutos de um corpo. (...) Contrariamente às interpretações de Lorentz e Poincaré, as fórmulas acima, segundo Einstein, representariam posições e tempos fisicamente reais. Os dois sistemas de coordenadas são igualmente reais (...) **O tempo transformado (t')** seria assim tão real quanto **qualquer tempo (t)**, e portanto bem diferente da interpretação de um tempo local e fictício, dada por Lorentz¹¹.

Os postulados da Relatividade têm pelo menos cinco consequências drásticas, quase incompreensíveis para o senso comum:

- 1 - Dois eventos que são simultâneos para um observador podem não o ser para outro que se mova em relação ao primeiro, e a sequência temporal de dois eventos poderá ser distinta para observadores que se movam uns em relação a outros. Portanto, os acertos dos relógios são distintos para observadores em movimento relativo, tornando os conceitos de passado, presente e futuro, relativos.
- 2 - Um relógio em movimento para um determinado observador bate mais lentamente que outro idêntico em repouso. Assim, um relógio que viaja com a velocidade que se aproxima à da luz tenderá a ficar parado. A este fenômeno denomina-se de dilatação do tempo.
- 3 - Uma régua que se move em relação a um determinado observador, aparecerá para este mais curta que uma exatamente igual em repouso, isto é, ela contrair-se-á na direção de seu movimento. Se uma régua mover-se com a velocidade próxima à da luz, reduzir-se-á a quase

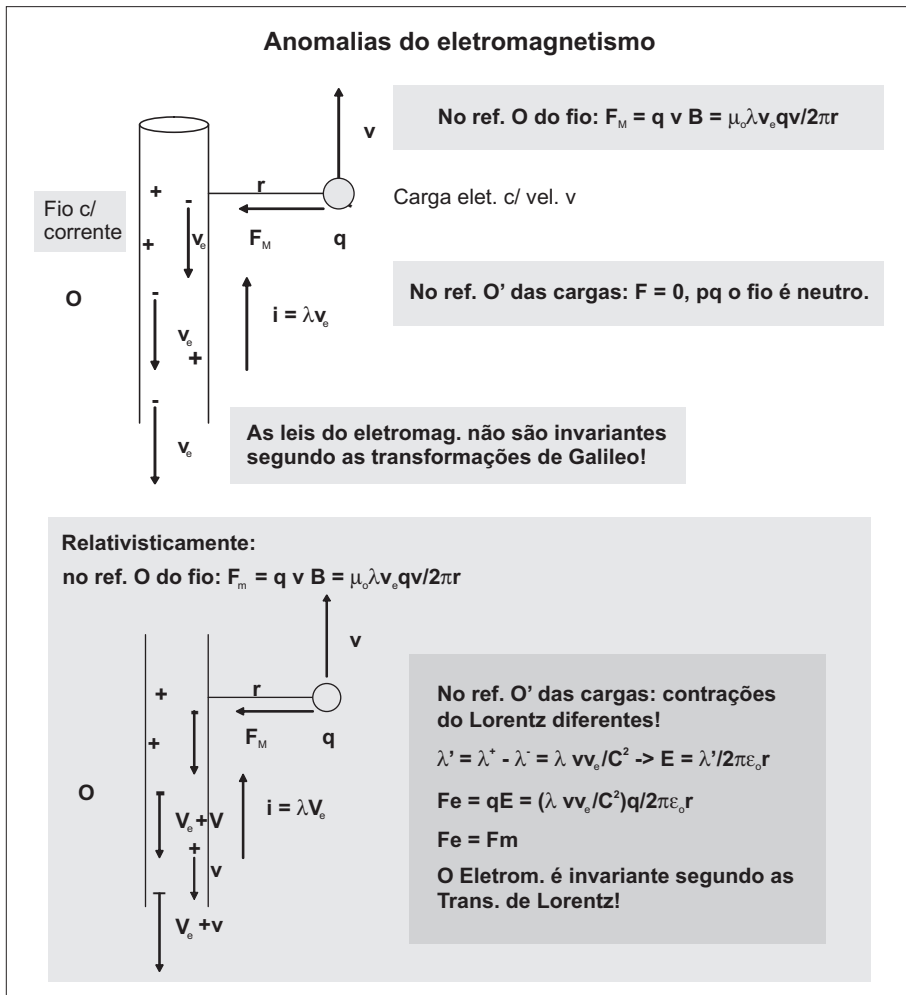
um ponto. Este fenômeno foi interpretado anteriormente de forma distinta por Lorentz, sendo por este motivo denominado de “contração de Lorentz”¹².

- 4 - Se um passageiro move-se com vel. \mathbf{u} em relação a um trem que se move com vel. \mathbf{v} em relação à estação, a vel. \mathbf{v}' do passageiro em relação à estação será dada pela expressão: $\mathbf{v}' = \mathbf{u} \oplus \mathbf{v}$ onde a operação de adição \oplus significa $\mathbf{u} \oplus \mathbf{v} = (\mathbf{u} + \mathbf{v}) / (1 + \mathbf{u}\mathbf{v}/c^2)$, chamada de adição relativística de velocidades. Se na expressão anterior, uma das velocidades for c , a adição de velocidades relativística dará c também, isto é, $c \oplus \mathbf{v} = c$, para qualquer valor de v . Isto significa que, com respeito à operação de adição relativística, a velocidade da luz jamais poderá ser ultrapassada, sendo assim um limite universal para todos os processos de transformação ocorridos na natureza¹³.
- 5 - As grandezas que se conservam (ver cap. III) numa colisão elástica devem ser reescritas: a quantidade de movimento (ao invés de $m\mathbf{v}$) passa a ser $\mathbf{p} = \mathbf{m}_0 \mathbf{v} / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ e a energia cinética (ao invés de $\frac{1}{2} m v^2$), passa a ser $E_c = (\mathbf{m} - m_0)c^2$, onde $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ é a chamada massa relativística que tenderá ao infinito se a velocidade do corpo se aproximar da velocidade da luz c ¹⁴.

As cinco consequências silogísticas da TRE, descritas acima, violam fortemente o senso comum abalizado pelas experiências sensoriais cotidianas, e, por outro lado, a TRE não teria nenhum respaldo epistemológico na experiência de Michelson-Morley, como preferem supor historiadores de peso como Pais¹⁵, Jammer¹⁶, além do próprio Kragh. Ocorre-me, portanto, propor que estes dois fatos enfraquecem novamente a tese empirista clássica de que todo conhecimento resulta de experiências prévias. Não estaria assim a TRE fazendo a balança pender novamente para o lado do racionalismo? Sugiro que esta questão, de suma relevância não só para a Física como para a Filosofia, seja apresentada e debatida nas salas de aula onde se introduz a TR. Tais questões aguçam a mente dos aprendizes, estimulando-os a fazerem por si próprios os cálculos matemáticos que levaram às dramáticas consequências dos postulados da TRE, bem como lhes possibilitará um entendimento das transformações de Lorentz como corretas representações da realidade física, e não apenas fórmulas heurísticas que salvam os fenômenos eletromagnéticos.

A invariância das leis do eletromagnetismo e o falso relativismo

Os fundamentos da TRE foram apresentados na primeira parte, mais especificamente nos seus dois postulados. O título do trabalho *Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento* fica justificado apenas na segunda parte, na qual Einstein deduz as transformações do campo elétrico e magnético, mostrando que, assim como o espaço e o tempo, eles são individualmente relativos ao estado de movimento do observador, embora a lei que governe os fenômenos eletromagnéticos, assim como a força total eletromagnética $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, permaneçam invariantes (ver as **Figuras V-3**):



Figuras V-3

Como o Eletromagnetismo não é invariante segundo as transformações de Galileo, mas, sim, com as transformações de Lorentz, ocorrendo o inverso com a mecânica newtoniana, Einstein se deparou com três possibilidades. Ao contrário dos físicos de sua época, ele optou pela Hipótese 3. (ver **Figura V-4**)

Eletromagnetismo, mecânica ou princípio da relatividade?

- Hipótese 1 - O princípio da invariância (Trans Galileo) vale para a Mecânica, mas não para o Eletromagnetismo -> teoria do éter
- Hipótese 2 - O princípio da invariância (Trans Galileo) vale para a Mecânica e p/ o eletromag., mas este último deve ser modificado -> teoria da emissão.
- Hipótese 3 - O princípio da invariância vale para a Mecânica e p/ o eletromag., mas as transformações são de Lorentz, e mecânica deve ser modificada -> teoria da rel.




Figura V-4

De acordo com a teoria de Einstein várias grandezas físicas são relativas ao movimento do observador, mas outras (como a carga elétrica, a velocidade da luz), bem como, as leis fundamentais da Física permanecem as mesmas, sendo essas invariâncias, fundamentais. Por esta razão, Einstein originalmente preferiria denominar a sua Teoria da Relatividade Especial de “teoria invariante”, um nome que poderia evitar muitos equívocos. O nome “Teoria da Relatividade” foi introduzido por Planck em 1906, e rapidamente tornou-se aceito. Ironicamente, Planck considerava que a essência da teoria de Einstein era seu caráter absoluto e não relativo¹⁷.

A TR restitui assim o absoluto e o invariante que existe na natureza, e assim o físico Arnold Sommefeld insurge-se também contra a denominação dada por Planck, achando, da mesma forma, que a expressão pode suscitar equívocos:

A expressão “Teoria da Relatividade” foi uma escolha infeliz. Sua essência não é a relatividade do espaço-tempo, mas a independência das leis da natureza em relação ao ponto de vista do observador. Essa denominação precária levou o público a acreditar, erroneamente, que a teoria implica em uma relatividade de concepções éticas, mais ou menos como o Além do bem e do mal, de Nietzsche¹⁸.

Já o próprio Einstein assim se expressou:

O princípio universal da Teoria da Relatividade restrita está contido no postulado: as leis da Física são invariantes em relação às transformações de Lorentz. (...) Este é um princípio restritivo para as leis naturais, comparável ao princípio restritivo da não-existência do perpetuum móbile que é a base da termodinâmica¹⁹.

Depreende-se assim das três citações acima que a TRE se caracteriza *muito mais pela invariância das leis da natureza do que pela relatividade do espaço-tempo*, parecendo assim o consagrado título sugerido por Planck, um equívoco, sendo “Teoria da Invariância”, mais adequado.

Sugiro que este ponto mereça dos mestres uma atenção especial, evitando que os aprendizes façam da teoria de Einstein uma bandeira para os relativismos éticos, morais e estéticos, tão em voga atualmente nos meios culturais contemporâneos, passando aos jovens a ideia de um “*vale-tudo porque Einstein disse que tudo é relativo*”.

Einstein conhecia a experiência de Michelson-Morley?

Uma vez que me parece ser uma das questões principais deste capítulo, volto ao tema da influência, ou não, da experiência de Michelson-Morley sobre a gênese da TRE. Creio ser interessante citar neste trabalho Adolf Grünbaum, filósofo da ciência empirista, que defende o ponto de vista diametralmente contrário ao de Kragh, e que não gostava nada da ideia de que Einstein houvesse autorizado o bioquímico M. Polanyi a afirmar certa vez que “*o experimento de Michelson-Morley teve um efeito insignificante sobre o descobrimento da relatividade*”. Grünbaum passa a recordar que, no começo de seu trabalho de 1905, Einstein menciona “*os intentos infrutíferos de descobrir algum movimento da Terra com relação ao meio luminífero*”, e critica o próprio autor da TR que teria autorizado o referido bioquímico a desqualificar a experiência de Michelson-Morley:

A menos que nos proporcionem alguma outra explicação coerente com a presença desta última afirmação de Einstein no texto de 1905, não há dúvida de que compete a todos aqueles historiadores da TR que negam o papel inspirador dos experimentos de Michelson-Morley, dizer-nos especificamente que outros “*intentos infrutíferos de descobrir algum movimento da Terra com relação ao meio luminífero*”, tinha Einstein aqui em mente. **Esta**

obrigação deveria haver sido assumida já pelo próprio Einstein (sic!)
 ao autorizar, em idade madura, a afirmação de Polanyi²⁰.

A citação acima soa quase como um desafio desesperado lançado para a grande maioria de historiadores que, como Kragh, nega à experiência de Michelson-Morley um valor epistemológico decisivo na gênese da TRE. A renitente postura de Grünbaum, e outros epistemólogos norte-americanos, a favor da experiência de Michelson, tem, no entanto, outra possível explicação: seria menos de caráter filosófico do que a de enaltecer o papel que a incipiente física norte-americana do final do séc. XIX teve na história e no desenvolvimento da TR. Voltarei a abordar este tema específico, na seção *Aceitação da Teoria da Relatividade*, acreditando, no entanto, que devido à sua complexidade, e grau de controvérsia, mereceria um capítulo à parte...

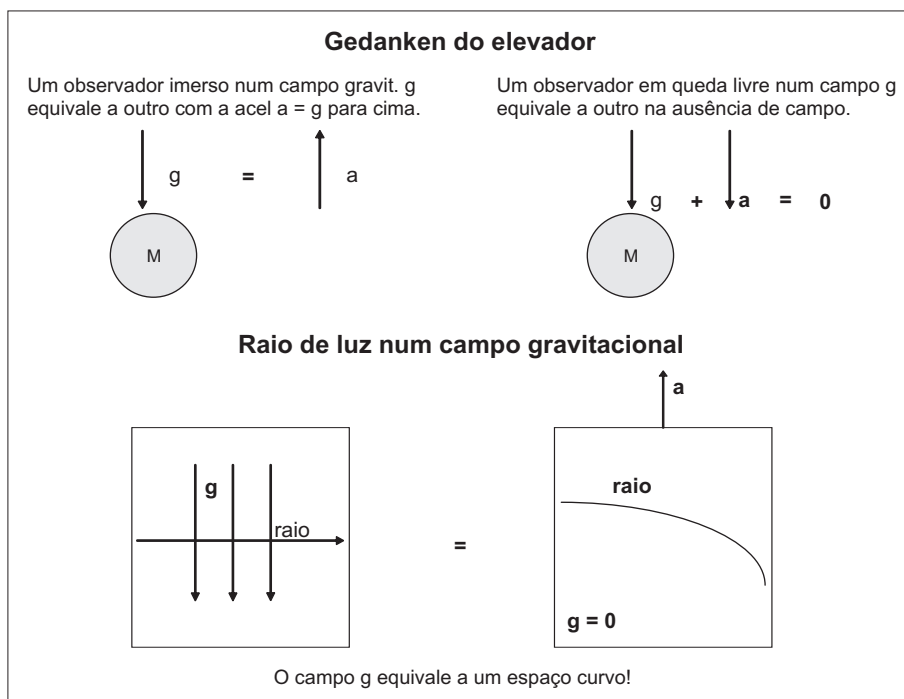
Da Relatividade Especial à Geral

Não tardou muito para que a TRE fosse aceita mundialmente, e não obstante haver algumas resistências localizadas em alguns países, já em 1911 era tida, pela grande maioria das comunidades científicas, como a mais correta descrição da realidade física. Mas apesar do rápido êxito de sua teoria, Einstein não estava ainda satisfeito, pois a TRE privilegiava uma restrita família de referenciais, em movimento retilíneo uniforme, uns em relação aos outros. Como estamos vendo e como veremos exaustivamente nos próximos capítulos, ele era um realista convicto, vendo a natureza como uma construção racional em si mesma, e não pelo que os homens e suas teorias a ela atribuíam. Afinal, desde Copérnico, a Terra deixou de ser o centro estático do universo, mas tão-somente um pequeno planeta acelerado em torno do Sol. Portanto, na mente do físico, não poderia caber uma teoria que não fosse invariante em relação a todos os sistemas de referência, fossem eles acelerados ou não. Além disso, na TRE, o campo gravitacional ficava de fora e esse fato incomodava Einstein, particularmente. A chave-mestra para a generalização da TRE ocorreu a Einstein em 1907, dois anos depois da publicação de “*Sobre a eletrodinâmica...*”, na forma de um *insight* extremamente simples:

Meu primeiro pensamento sobre a TRG foi concebido em 1907. Entendi que todas as leis, com exceção da lei de gravidade poderiam ser discutidas no contexto da TRE. Eu queria descobrir a razão para tal, mas não conseguia atingir meu objetivo, facilmente. A idéia esclarecedora veio repentinamente.

Estava sentado numa cadeira do meu escritório no Registro de Patentes de Berna. De repente, um pensamento golpeou-me: se um homem cair em queda livre ele não sentirá seu peso. Fiquei surpreso. Esta simples experiência mental causou-me profunda impressão. Isto me levou à teoria da gravidade²¹.

O que Einstein relata é a ideia original do princípio de equivalência que pode ser entendido como a impossibilidade de um experimento físico distinguir um campo gravitacional uniforme de um sistema de referência acelerado uniformemente no sentido contrário ao do campo. Em suma, alguém imerso, e em repouso, num campo gravitacional para baixo fará as mesmas observações que outro observador acelerado para cima, no espaço vazio. Por outro lado, um observador em queda livre num campo gravitacional, não sentirá nenhum efeito gravitacional. Einstein entendeu assim que poderia substituir qualquer referencial acelerado por outro em repouso em um campo gravitacional, e vice-versa, qualquer efeito da gravitação seria idêntico ao de uma observação feita a partir de um referencial acelerado. Esse lampejo não só levou-o à TRG como também a suprimir a secular dicotomia newtoniana entre sistemas de referência inerciais e não inerciais (ver **Figuras V-5**).



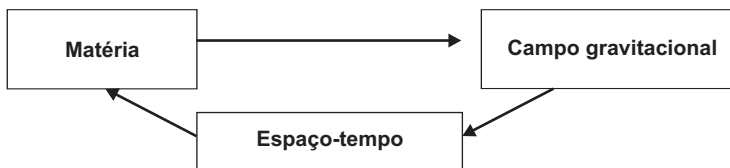
(Figuras V-5)

Assim, três consequências decorrerão imediatamente:

- a) Um raio de luz passando pelas vizinhanças de uma grande massa deverá ser por ela defletido.
- b) Um relógio posto em um campo gravitacional intenso baterá mais lentamente, e de forma análoga, um campo intenso fará a emissão de um átomo tender para o vermelho. A este efeito denominou-se de *red shift*. A expressão deduzida por Einstein para o desvio para o vermelho é $\Delta\lambda/\lambda = \Delta\Phi/c^2$ onde λ é o comprimento de onda da radiação emitida e $\Delta\Phi$ é a diferença de potencial gravitacional entre o ponto de emissão e o de recepção da radiação.
- c) Um planeta próximo do Sol terá a precessão de seu pericélio, maior que a prevista pela teoria clássica.

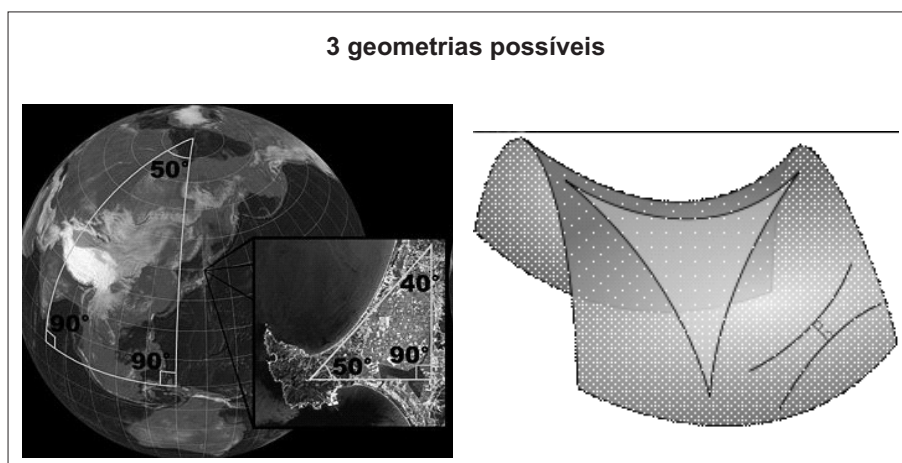
Após este *insight* inicial, Einstein passou a trabalhar duramente até 1911, quando formulou uma primeira, e não definitiva versão, da TRG com a qual previu uma deflexão de $0.83''$ para um raio cruzando o Sol. A partir de então, em novo lampejo de gênio, compreendeu que o raio não foi simplesmente encurvado por uma força, como se admite classicamente, mas que seguiu uma geodésica num espaço-tempo encurvado pela distribuição de matéria, situada na vizinhança.

Em suma, a matéria determina a curvatura do espaço-tempo, desta forma, os corpos materiais, os campos gravitacionais e o espaço-tempo, teriam uma estrutura unificada por uma interdependência que o esquema abaixo visa simplificar:



No esquema acima, a matéria produziria o campo gravitacional que seria a geometria do espaço-tempo onde, por sua vez, estaria localizada a matéria, e ao longo do qual passariam as ondas eletromagnéticas. No capítulo seguinte, voltarei a refletir, com mais cuidado filosófico, sobre a unidade pretendida por Einstein entre espaço-tempo, matéria e campos, relacionando-a a uma possível influência do spinozismo.

O elemento de linha relativístico invariante segundo uma transformação de Lorentz que na TRE é escrito como $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2$, num espaço encurvado pela matéria passa a ser escrito: $ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, onde $g_{\mu\nu}$ é o tensor métrico que será determinado pela distribuição de matéria. Por sua vez, $g_{\mu\nu}$ descreve a geometria do espaço-tempo, determinando a geodésica que um raio de luz seguirá. Em suma, a partir de então a geometria dependeria da matéria e vice-versa. Assim, a geometria euclidiana deixaria de ser a única representação possível para a estrutura do espaço, abrindo-se possibilidades a outras geometrias curvilíneas em que a soma dos ângulos de triângulo pode ser maior ou menor que 180° (ver **Figuras V-6**).



Figuras V-6

Foi em 1915 que Einstein viu seu titânico esforço coroado com a publicação definitiva da TRG:

Seu trabalho foi concluído durante o verão e o outono de 1915 e em novembro do mesmo ano, Einstein o apresentou à Academia de Ciências de Berlim, na sua forma final de uma teoria gravitacional covariante, escrevendo a seu amigo, o físico A. Sommerfeld: “esta foi a mais importante descoberta que fiz ao longo de toda a minha vida”²².

Restava agora submeter a recém-nascida TRG às provas experimentais. Os três efeitos decorrentes como consequências imediatas da teoria deveriam ser comprovados, com boa margem de precisão. E foi o que ocorreria durante

os anos subsequentes. Para não nos alongar demasiadamente, resumirei que em 1919 o astrônomo britânico Sir Arthur Eddington comandando uma equipe a Sobral (Ceará), quando aí ocorreu um eclipse solar, confirmou uma deflexão de $1,7''$ para o raio de luz proveniente de uma estrela situada “atrás” do Sol. O resultado estava em excelente concordância com a nova versão da TRG (um valor aproximadamente o dobro do previsto por Einstein com sua primeira teoria de 1911). (ver **Figura V-7**)

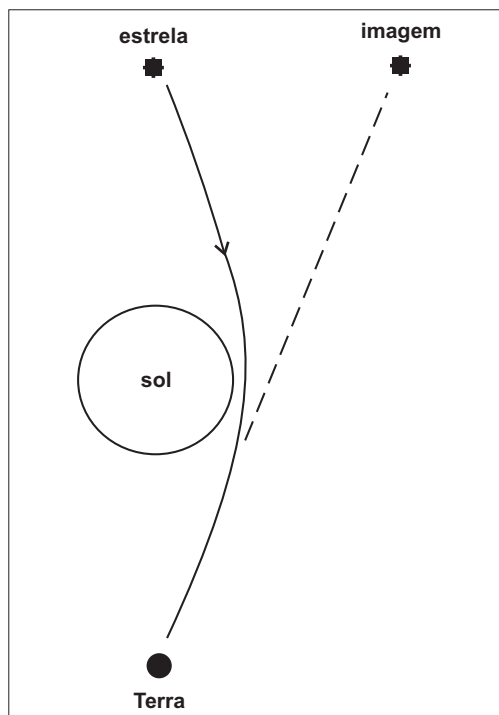


Figura V-7

Quanto à precessão do pericélio de Mercúrio, a TRG estava em excelente concordância com os $47''/\text{séc.}$, conhecidos desde o séc. XIX. Faltava apenas a confirmação do *red shift* que tardou um pouco mais, devido às dificuldades experimentais. Estas se deviam ao fato de que a luz medida provinha do interior do Sol e o efeito ficava mascarado pelo efeito Doppler. Entretanto, em 1920, dois experimentalistas da Universidade de Bonn, Albert Bachen e Lenhard Grebe, superaram as dificuldades, confirmando a hipótese.

A aceitação da Teoria da Relatividade Geral

Estava assim aberto o caminho para a consagração da TRG, embora isto não tivesse ocorrido de forma tão rápida e explícita, como poderia se esperar. Além dos testes experimentais, a TRG teve de se submeter a resistências de natureza cultural, política e até religiosa, que em cada país tinha matizes próprios. Sucintamente resumirei que, na França, nos primeiros anos que se seguiram, a TRG foi recebida com silêncio e indiferença, atribuídos, segundo Kragh, ao arcaico sistema de ensino e pesquisa vigente no país, na primeira metade do século passado, bem como, a um não disfarçado nacionalismo que conferia a Poincaré a autoria de uma teoria superior.

Nos Estados Unidos não só a TRG como a, já tida clássica, TRE, sofreram a resistência de uma cultura francamente dominada pelo indutivismo empirista que rejeitava quaisquer teorias que não tivessem sido obtidas por indução de resultados experimentais, e, por outro lado, resultassem em consequências experimentais que ferissem o senso comum. As duas TR tinham exatamente essas características, o que levou os físicos Millikan e Maggie a criticá-las duramente. A postura de Grünbaum e seus seguidores, anteriormente relatada, reforça essa hipótese.

Na Inglaterra foi só depois de 1919, com a consagradora expedição de Eddington ao Brasil, que a TR deixou de sofrer a resistência de uma comunidade científica solidamente arraigada nos conceitos de éter luminífero, herança deixada pelo grande Maxwell. A partir de então, a teoria de Einstein ganhou, na figura do astrônomo britânico, um poderoso aliado.

Na ex-União Soviética até a década de 1930, antes da consolidação do poder estalinista, a TR teve imediata aceitação, em parte favorecida pelos trabalhos afins desenvolvidos por Ehrenfest e Friedmann. Até o advento dos comissariados, a TR foi tida como compatível com o materialismo dialético, pois afinal ela tornava o espaço-tempo uma entidade materializada pela distribuição de energia e massa do universo.

Foi na Alemanha, berço da TR, que esta sofreu as mais contraditórias manifestações. Se por um lado, a grande maioria dos físicos de envergadura a aceitou com rapidez e entusiasmo, por outro, um grupo reacionário (*right wing*, como os designa Kragh), liderados pelos “prêmios Nobel”, Phillip Lenhard e Johannes Stark, além do experimentalista Ernst Gerhcke, a rechaçou com uma corrosiva veemência que transcendia, em muito, a mera contestação

baseada em argumentos científicos. As manifestações tinham um cunho nitidamente ideológico, se não visivelmente racista. Segundo esse grupo, a TR subvertia a ordem clássica em que deveria se sustentar a Ciência, introduzindo, através de axiomas não demonstrados, elementos especulativos, além de que não possuía em sua gênese dados empíricos seguros, culminando com consequências absurdas que ferem o senso comum, e também não podendo ser verificadas experimentalmente como, por exemplo, o paradoxo dos gêmeos e a contração de objetos. Segundo esse grupo, essas características eram próprias de uma “cultura especulativa judaica” em franca oposição aos valores éticos e morais do que deveria ser uma “sociedade ariana”. Segundo M. Jammer²³, o grupo liderado por Lenhard e Stark, acreditava que essa cultura especulativa tinha raízes em livros como o Talmude²⁴, que se propõe a interpretar a Bíblia, introduzindo-lhe elementos duvidosos...

Kragh aborda também esse episódio:

Desde 1920, a cruzada germânica contra a TR recrudescceu com um “Encontro anti-Einstein” em Berlim, organizado por Paul Weyland, um ativista político, e com Gerhcke como locutor. O encontro provocou uma dura resposta de Einstein em que ele denunciou que o anti-semitismo fazia parte da cartilha dos anti-relativistas²⁵.

Finalizo esta introdução histórica acerca da gênese da TR, retornando à questão do termo de autoria de Planck, *Teoria da Relatividade*, e dos vários equívocos que isto suscitou. A partir da década de 1920, a TR era contemplada com manchetes da grande imprensa mundial e proliferavam os títulos de livros de divulgação sobre o tema. A maioria deles, de qualidade duvidosa. Não faltaram piadas e um vasto folclore sobre a “relatividade das coisas e do tempo”. Um relato pitoresco afirma que a TRE com suas dilatações temporais e contrações espaciais teria sido concebida por Einstein no interior de um trem, enquanto que a TRG seria gestada dentro de um elevador em queda livre que felizmente o físico nunca chegou a experimentar...

Meu pai costumava contar-me que “1 hora em companhia de uma bela mulher passava como se fosse 1 minuto e que em contrapartida, 1 minuto em presença de uma mulher desagradável, parece arrastar-se por 1 hora, sendo isto uma consequência da relatividade de Einstein!”. Esta anedota é uma adaptação da explicação sobre “o que era afinal a TR” que, de fato, Charles Chaplin pediu a Einstein, apenas com a mulher desagradável (ou feia em outras versões) sendo substituída pelo físico por um “sentar-se sobre um

fogão aceso”. Obviamente Einstein não quis ser indelicado com as mulheres feias... Bem, o que seria da História sem a ficção, o folclore e o humor que alimentam o imaginário dos homens, conferindo aos grandes eventos históricos uma aura de realidade fantástica... Recomendo, pois, aos mestres de Física que realcem sempre os elementos pitorescos de uma teoria científica, exercitando, sempre que possível, com seus aprendizes, uma boa dose de bom-humor... , pois, já havia sido dito por Spinoza que a alegria e a felicidade andam de mãos dadas com o conhecimento e o bom aprendizado.