

Este arquivo contém o texto completo do seguinte trabalho:

MARTINS, Roberto de Andrade. Espaço, tempo e éter na teoria da relatividade. Pp. 31-60, *in*: KNOBEL, Marcelo; SCHULZ, Peter A. (orgs.). *Einstein: muito além da relatividade*. São Paulo: Instituto Sangari, 2010.

Este arquivo foi copiado da biblioteca eletrônica do Grupo de História e Teoria da Ciência <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do seguinte endereço eletrônico (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-144.pdf>>

Esta cópia eletrônica do trabalho acima mencionado está sendo fornecida para uso individual, para fins de pesquisa. É proibida a reprodução e fornecimento de cópias a outras pessoas. Os direitos autorais permanecem sob propriedade dos autores e das editoras das publicações originais.

This file contains the full text of the following paper:

MARTINS, Roberto de Andrade. Espaço, tempo e éter na teoria da relatividade. Pp. 31-60, *in*: KNOBEL, Marcelo; SCHULZ, Peter A. (orgs.). *Einstein: muito além da relatividade*. São Paulo: Instituto Sangari, 2010.

This file was downloaded from the electronic library of the Group of History and Theory of Science <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> of the State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, from following electronic address (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-144.pdf>>

This electronic copy of the aforementioned work is hereby provided for exclusive individual research use. The reproduction and forwarding of copies to third parties is hereby forbidden. Copyright of this work belongs to the authors and publishers of the original publication.

Capítulo 2

Espaço, tempo e éter na teoria da relatividade

ROBERTO DE ANDRADE MARTINS

Na teoria da relatividade (tanto na teoria especial quanto na geral), os conceitos de espaço e de tempo são de grande importância. O conceito de éter também teve significativa relevância, não apenas na gênese da relatividade, mas, também nas discussões conceituais que se seguiram à criação dessa teoria. Este capítulo apresentará uma visão geral sobre esses conceitos, mostrando seu papel e suas transformações no desenvolvimento da teoria da relatividade e em diferentes fases do pensamento de Albert Einstein.

Espaço, tempo e éter na Antiguidade

Os conceitos de espaço e tempo são de grande importância filosófica e têm sido discutidos desde a Antiguidade. Entre as questões centrais sobre esses conceitos podemos incluir:

- Pode-se falar em espaço sem falar em matéria?
- Poderia existir um espaço totalmente vazio de tudo?
- O tempo pode existir separadamente das coisas que acontecem ou é apenas um modo de se falar sobre os fenômenos?
- Poderia existir um tempo antes da existência do Universo?
- Se todas as coisas parassem, o tempo continuaria a fluir?

Na Antiguidade, os pensadores atomistas (como Leucipo, Demócrito e Epicuro) aceitavam a ideia de um espaço totalmente vazio (o vácuo) e

infinito, onde os átomos se moviam. Tal concepção foi rejeitada por praticamente todos os outros filósofos antigos. Ela foi fortemente criticada pelos *eleatas* – os seguidores de Parmênides (aprox. 540-450 a.C.), que negaram a possibilidade de um espaço vazio (Knight, 1959). Parmênides havia ensinado que é impossível pensar sobre aquilo que não existe – o não ser. Só se pode raciocinar sobre aquilo que existe, e o que existe nunca pode deixar de existir, nem começar a existir. Aquilo que existe também não pode se transformar em algo diferente, pois toda mudança significa o desaparecimento de algo e o aparecimento de outra coisa. Mas nada que seja real pode surgir ou desaparecer. Portanto, a mudança não deve existir. Zenão, um dos eleatas, desenvolveu famosos argumentos que procuravam mostrar a impossibilidade de pensar a respeito do movimento sem cair em absurdos. Ele não queria demonstrar que não podemos nos mover, e sim que o movimento é impensável. Outro eleata, Melisso, argumentou que o movimento é impossível porque duas coisas não podem ocupar o mesmo lugar e, portanto, um objeto só poderia se mover para um lugar vazio; mas um lugar vazio é o nada, e o nada não existe; portanto, não pode haver movimento.

Os atomistas foram influenciados por essa visão, mas a combateram (Dayley, 2006). Eles queriam descrever o mundo que observamos, onde há movimentos e transformações. Aceitavam que a realidade mais profunda é imutável, mas associavam essa ideia a uma infinidade de átomos, que são eternos e que nunca se transformam. Eles se movem, combinam-se e se separam, e isso produz todas as mudanças que vemos. Para que possam se mover, deve existir o espaço vazio, pois se não houvesse qualquer lugar vago para onde pudessem se deslocar, teriam que ficar parados.

Para descrever esse espaço no qual os átomos se moviam, os atomistas criaram a expressão grega *to kenon*. *Kenon* era um adjetivo que significava vazio. Aplicava-se, por exemplo, a um quarto sem nenhum móvel, ou a um jarro cujo vinho já havia sido bebido. Adicionando o artigo definido a esse adjetivo, os atomistas transformaram essa palavra em um substantivo, “o vazio”. Vazio de quê? De tudo. Esse vazio era exatamente o não ser sobre o qual não podemos pensar ou falar, segundo Parmênides. Ao afirmar que o vazio existia, os atomistas estavam dizendo que o nada – aquilo que não existe – existe.

Para quem não tem treino filosófico, toda essa discussão pode parecer desprovida de sentido. Mas não é (Martins, 1993). Os antigos gregos estavam querendo compreender os mistérios mais fundamentais do Universo – como a matéria e o movimento – e não conseguiam chegar a uma visão que fosse aceita por todos. Um leitor moderno com formação científica provavelmente sentirá mais simpatia pelos atomistas – cujas ideias foram, de certo modo, incorporadas à ciência moderna – e desprezo ou perplexidade diante dos eleatas, que falavam sobre algo que não faz parte do mundo que conhecemos. Um filósofo, provavelmente, valorizará mais o pensamento dos eleatas, pois eles tentavam ir além do óbvio, do senso comum, e atingir uma realidade absoluta pelo pensamento.

Aristóteles e o espaço

Outros pensadores, como Aristóteles (384-322 a.C.), consideravam impossível conceber um espaço vazio absoluto – a existência do espaço estaria intimamente ligada à presença de matéria –, e o espaço seria finito (Decaen, 1999). Todas as regiões do Universo que são aparentemente vazias (como o espaço entre os astros) estariam cheias de uma substância chamada “éter”, transparente, invisível.

A base geral dos argumentos aristotélicos é que o vazio não poderia ter propriedades diferentes (um vazio deve ser igual a outro vazio) e que todas as concepções que haviam sido sugeridas pelos atomistas exigiam que os vazios tivessem certas distinções. É claro que, se pensarmos que existem alguns espaços azuis e outros vermelhos, eles não podem ser espaços absolutamente vazios – eles têm cores, e o nada não pode ser colorido. Mas nós próprios estamos acostumados a pensar que um espaço vazio pode ter forma, tamanho, volume, posição. São propriedades puramente geométricas que não parecem poder levar a contradições. Mas podem quando pensamos nesse espaço vazio como algo que existe no mundo físico.

Vejam um dos argumentos aristotélicos. Suponha que exista em certo lugar um espaço vazio. Pensemos, por exemplo, em um cubo com arestas de um metro. Esse vazio tem volume de um metro cúbico, portanto. Agora, suponhamos que exista, fora desse vazio, um cubo material, exatamente de mesmo tamanho. Podemos, agora, imaginar que o cubo material é des-

locado e colocado no espaço que estava vazio. Bem, isso gera uma questão: se o espaço vazio tinha um metro cúbico de volume e colocamos dentro dele um corpo que também tem um metro cúbico de volume, qual o volume total? Dois metros cúbicos ou um metro cúbico?

Qualquer resposta é problemática. Se dissermos que agora existem dois metros cúbicos – um do espaço vazio e outro do corpo –, então uma região cúbica com um metro de aresta pode conter um volume de dois metros cúbicos, o que é absurdo. Por outro lado, se dissermos que o volume total é de apenas um metro cúbico, teremos que entender se esse metro cúbico pertence ao espaço vazio ou ao objeto material, ou uma parte dele, ao vazio e outra parte, ao corpo. Qualquer das alternativas é inaceitável. De fato, se o volume pertencer apenas ao espaço vazio, para onde foi o volume que era ocupado pelo corpo material? Se o volume pertencer apenas ao corpo material, para onde foi o volume do vazio? Se uma parte do volume pertencer a cada um deles, teremos também absurdos – porque o objeto material com um metro de aresta teria um volume de menos de um metro cúbico.

Esse argumento pode parecer apenas uma brincadeira, um jogo de palavras, mas tem grande importância filosófica. Mesmo atribuindo ao vazio apenas as propriedades geométricas, chegamos a paradoxos, *se supusermos que esse vazio está no mundo material*. Em um contexto abstrato, matemático, não surgem contradições como essa.

Tendo rejeitado a possibilidade de vazios, Aristóteles supôs que todos os espaços do Universo – mesmo os que *pareciam* vazios – estavam cheios de matéria. A matéria que vemos perto de nós seria constituída por terra, água, fogo e ar (os quatro elementos propostos por Empédocles). No entanto, o mundo celeste seria constituído pela quinta essência, o éter. A partir da Lua até as estrelas, o Universo estaria formado por cascas esféricas dessa substância invisível que, girando em torno da Terra, transportariam os astros. Os próprios planetas e estrelas seriam feitos de éter – porém, um éter mais denso.

O nome escolhido por Aristóteles para o quinto elemento está associado à luz. *Aither* era uma palavra aplicada ao céu azul e brilhante que vemos durante o dia. A luz do Sol apenas pode chegar até nós, segundo Aristóteles, porque existe o éter. A luz é uma qualidade que pode se propagar nos objetos transparentes, mas não pode se espalhar pelo nada – que não tem qualidades.

As ideias e argumentos a respeito do espaço e do tempo vão se multiplicando ao longo dos séculos. É impossível apresentar aqui um histórico completo sobre o assunto¹. Vamos analisar como o espaço e o tempo se apresentam no século XVII, quando a Física clássica estava sendo construída.

Espaço e tempo na Física clássica

René Descartes (1596-1650), embora não fosse um seguidor de Aristóteles, defendia também a impossibilidade de um espaço vazio, sem matéria. Consideremos, por exemplo, um recipiente cheio de ar. Se tirarmos o ar e *tudo* o que ele pode conter, de tal modo que já não exista mais *nada* dentro dele, qual será a distância entre suas paredes? Descartes argumenta que, nesse caso, como não existe *nada* entre as paredes, também não poderá existir nenhuma distância e elas deverão se tocar (Descartes, 1971, parte 2, § 18, p. 72-73).

Pode-se imaginar que isso seja apenas um jogo de palavras, mas não é. O que está por trás do argumento de Descartes (e outros semelhantes, desenvolvidos desde a época de Aristóteles) é a ideia de que um espaço totalmente vazio é equivalente ao nada, e o nada não pode ter propriedades. O nada não pode ser azul nem verde, não pode ser quente nem frio, não pode ter um tamanho, não pode ocupar um volume.

Como, na filosofia de Descartes, o espaço acaba sendo associado à matéria, o movimento também fica vinculado à existência de objetos que sirvam como referência (Descartes, 1971, parte 2, § 13, p. 69-70; § 24, p. 75-76). Suponhamos que uma pessoa esteja caminhando sobre o tombadilho de um navio. Ela terá um certo movimento em relação ao navio, outro movimento em relação à água que cerca o navio, um outro em relação ao vento, um outro em relação ao porto de onde o navio está se afastando. Seu movimento é *relativo*, depende do objeto em relação ao qual estamos analisando os movimentos. Um peixe que não está nadando, mas que é transportado por um rio, está se movendo em relação à terra, mas não está se movendo em relação à água. No entanto, Descartes defendia que existe um tipo de movimento que é o mais importante de todos: é aquele que ocorre em relação ao que está em volta do objeto (Descartes, 1971, parte 2, § 25-28, p. 76-78). Assim, o peixe transportado pelo rio está fisicamente parado, embora a água se mova e ele esteja mudando de posição.

Newton – espaço e tempo absolutos

Na Física clássica, uma das concepções mais importantes sobre espaço e tempo foi proposta por Isaac Newton (1642-1727), no século XVII. Para ele, existiriam o tempo e o espaço *absolutos*, independentes das coisas que existem e do que acontece no mundo (Toulmin, 1959; Earman, 1970; Laymon, 1978; Jammer, 1993, p. 98-108; Rynasiewicz, 1995). Ele afirmou: “O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, flui de forma regular por si mesmo e por sua própria natureza, sem relação com nada externo” (Newton, 1952, p. 8). Ou seja: mesmo se o Universo fosse congelado e tudo parasse, o tempo continuaria a fluir. Para Newton, o movimento serve para medir o *tempo relativo ou aparente*, mas o tempo existe independentemente da existência de movimentos. Da mesma forma, em relação ao espaço, ele afirma: “O espaço absoluto permanece sempre igual e imóvel, por sua própria natureza, sem relação com nada externo” (*ibidem.*). Esse espaço não se move, as coisas se movem no espaço. Ele é sempre igual, não sofre transformações; é o palco onde as coisas acontecem. Mesmo que fosse possível retirar tudo o que existe no Universo, esse espaço continuaria a existir. Para Newton, o *espaço relativo* é uma relação entre os corpos físicos, é determinado pelas posições relativas entre os objetos (como no pensamento de Descartes), mas existe também o espaço *absoluto*.

Os conceitos de espaço e tempo absolutos são metafísicos, descrevem coisas que não podem ser observadas. Apesar disso, Newton os achava importantes como uma conceituação fundamental para construir e pensar a Física.

Essas concepções de Newton estão ligadas às suas crenças teológicas. Ele tinha grande interesse e envolvimento com o pensamento religioso, acreditava sinceramente em Deus e muitas vezes associava suas ideias científicas ao pensamento teológico. Para Newton, o espaço pode ser considerado o órgão sensorial (*sensorium*) de Deus (Jammer, 1993, p. 109-115). Embora nós não possamos ver nem perceber o espaço absoluto, Deus o observa – e o mesmo se aplica ao tempo absoluto.

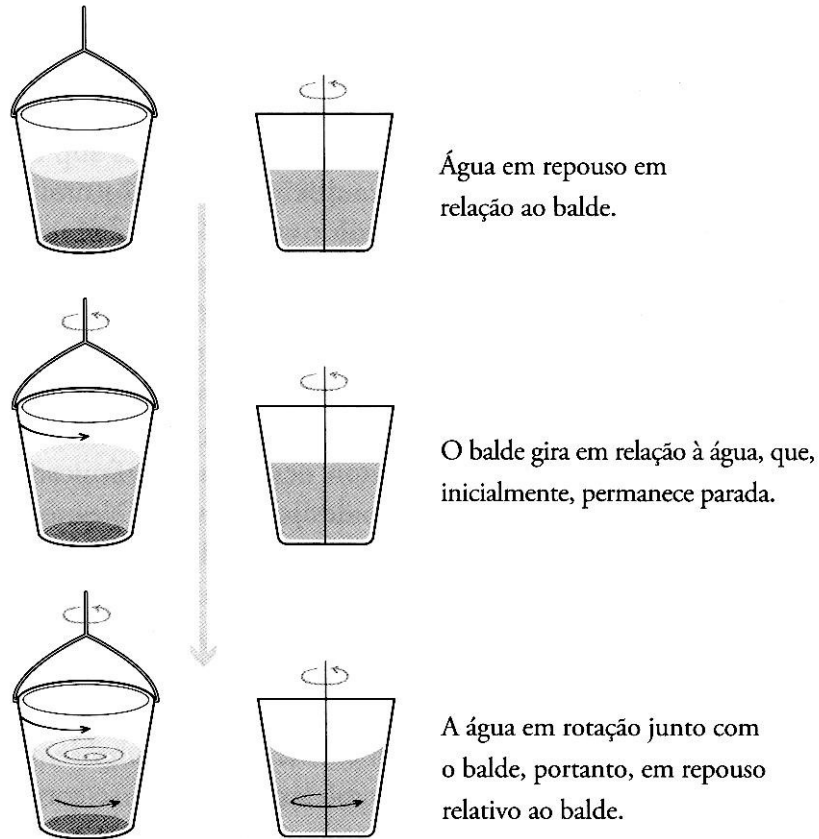
O espaço e o tempo absolutos de Newton não podem ser observados diretamente, nem medidos pelos seres humanos. Somente o

espaço e o tempo relativos podem ser observados. No entanto, segundo Newton, seria possível determinar alguns efeitos do *movimento absoluto*, que ele definiu da seguinte forma: “O movimento absoluto é o transporte de um corpo de um lugar absoluto para outro; e o movimento relativo é o transporte de um lugar relativo para outro” (Newton, 1952, p. 9).

Newton chamou a atenção para a diferença entre os movimentos de rotação e de translação. De acordo com ele, há diferenças físicas observáveis entre um corpo que está parado absolutamente (ou em movimento de translação uniforme) e um que está acelerado ou em rotação. Sempre que um corpo está em movimento *absoluto* de rotação, ele tende a se afastar do eixo de rotação; mas a rotação *relativa* não produz esses efeitos.

Para exemplificar essa ideia, Newton descreveu um famoso experimento imaginário, de um balde cheio de água girando (Newton, 1952, p. 11-12). Suponhamos que enchamos um balde até a metade com água e o penduramos a uma corda, que está torcida. A corda vai se desenrolar e vai começar a girar o balde. Como a água não é sólida e não está presa de forma rígida ao balde, inicialmente ela vai continuar parada, e apenas o balde vai girar. No entanto, aos poucos a água também começa a girar, até adquirir uma velocidade igual à do balde. Quando a água está em movimento, vê-se que a sua superfície se torna curva (côncava), porque esse movimento de rotação faz com que a água tente se afastar do eixo de rotação. Se segurarmos de repente o balde, a água continuará a girar durante algum tempo, e sua superfície continuará curva. O que determina a forma da superfície da água? Seu movimento relativo ou absoluto? Tanto antes de colocar o balde em movimento quanto agora, a água está parada em relação ao balde, que é aquilo que está em contato com ela. Assim, de acordo com Descartes, não deveria surgir nenhum efeito físico e a água deveria continuar plana. Segundo Newton, a superfície da água fica côncava quando ela está em rotação *absoluta*, independentemente de estar parada ou em rotação em relação ao próprio balde. Portanto, ao contrário do que Descartes defendia, não é o movimento em relação àquilo que está em contato com a água (o balde) que produz os efeitos observados.

Representação do experimento do balde, de Newton



Newton concluiu que a rotação produz efeitos *absolutos*. No entanto, o movimento de *translação* comum a todas as partes de um sistema não altera seus fenômenos internos. Se vários corpos estão se movendo na mesma direção, com a mesma velocidade, os fenômenos que eles produzem entre si não dependem dessa velocidade comum. O mesmo acontece também se eles estiverem todos *acelerados*, na mesma direção: se suas velocidades e acelerações forem iguais, elas não influirão sobre os fenômenos que esses corpos produzem entre si. Por exemplo: se vários corpos estão caindo juntos, em um campo gravitacional uniforme, tudo se passa (para eles) como se estivessem parados.

O conceito de Newton de espaço e tempo absolutos era o mais adequado para a mecânica clássica. Ele permitiu analisar, por exemplo, os movimentos dos planetas em torno do Sol, e mostrar que o sistema heliocêntrico era o único compatível com a mecânica. De acordo com a teoria heliocêntrica, a Terra gira, e Newton percebeu que essa rotação deveria produzir efeitos. A rotação não é suficientemente rápida para atirar para fora os corpos que estão na sua superfície, mas Newton calculou o efeito devido à rotação da Terra e indicou duas consequências observáveis: o período de um relógio de pêndulo deveria depender de sua latitude – ou seja, de sua distância angular ao equador; e a Terra deveria ser achatada, por causa de sua rotação (Martins, 1989). De fato, a distância entre os dois polos terrestres é menor do que o diâmetro equatorial. Segundo Newton, é o *movimento de rotação absoluto* da Terra que produz esses efeitos. Além disso, um corpo que cai de uma grande altura tem o seu movimento perturbado pela rotação da Terra, e não cai seguindo a vertical (ou seja, a direção de uma linha de prumo). Newton não só foi o primeiro a afirmar isso, como também *calculou* matematicamente esses efeitos. Previu o achatamento terrestre e mostrou como ele poderia ser medido. Esses efeitos foram confirmados depois de algumas décadas. Assim, através de medidas físicas feitas na própria Terra é possível determinar que ela gira, e medir sua velocidade de rotação.

Já que era possível observar efeitos de rotação, Newton considerou como estabelecida a existência de um *espaço absoluto*. As velocidades absolutas de *translação* não produzem efeitos, e todos os sistemas que estejam parados ou em movimento de translação uniforme através do espaço absoluto são equivalentes, mas as velocidades absolutas de *rotação* produzem efeitos.

Críticas aos conceitos de espaço e tempo absolutos

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), contemporâneo de Newton, defendia ideias opostas a estas. Para ele, não existiriam o espaço e o tempo absolutos. Somente existiriam o espaço e o tempo relativos, associados às coisas e aos movimentos. Embora Newton e Leibniz não tenham debatido diretamente esses temas, eles fizeram parte do célebre confronto entre Clarke (que representava o pensamento newtoniano) e Leibniz, nos anos anteriores à morte deste último (Alexander, 1956; Jammer, 1993, p. 116-124).

Para Leibniz, não havia sentido discutir se Deus poderia ter decidido criar todo o Universo em um lugar diferente do espaço, pois o espaço só passa a existir quando existe o Universo. Newton não concordava, pois considerava que Deus via o espaço absoluto e podia assim escolher qual o lugar mais adequado para criar o Universo.

Para Leibniz, não havia sentido imaginar o Universo todo sendo deslocado de um lugar para outro, pois o espaço é determinado pelos corpos. Se todos os corpos do Universo se movessem juntos, é como se eles não tivessem se movido. Newton não concordava, pois Deus poderia deslocar todo o Universo no espaço absoluto.

Para Leibniz, não havia sentido imaginar que Deus pudesse fazer o Universo todo desaparecer e criá-lo exatamente igual *depois de algum tempo*, pois sem o Universo não existiria o tempo. Newton não concordava, pois o tempo continuaria a existir sem o Universo e Deus conhecia o tempo de forma direta.

A concepção de Newton a respeito de um espaço absoluto foi depois criticada por George Berkeley (1685-1753) e, bem mais tarde (século XIX), por Ernst Mach (1838-1916). Esses dois autores consideraram que a ideia de um espaço absoluto que não pode ser observado, mas que produz efeitos físicos, era inaceitável (Jammer, 1993, p. 108-109, 141-143). Imaginaram que os efeitos produzidos pela rotação poderiam ser explicados de outro modo: supondo que são causados pela rotação dos objetos *em relação aos outros corpos do Universo* – em particular, em relação às estrelas. Nenhum deles, no entanto, conseguiu elaborar uma teoria física que permitisse compreender como as estrelas produziram esse tipo de efeito. De um modo geral, até o início do século XX, a concepção de espaço absoluto de Newton foi aceita pela maioria dos físicos.

Óptica e éter

Durante o século XVIII, quase todos acreditavam que a luz que chega a nós proveniente das lâmpadas, do Sol e de outras fontes luminosas seria constituída por partículas minúsculas como os átomos. Esta era a *teoria corpuscular da luz*, defendida por Newton.

Nas três primeiras décadas do século XIX, no entanto, a teoria corpuscular da luz vai sendo atacada e acaba por ser substituída pela teoria ondulatória (Buchwald, 1989), principalmente graças aos trabalhos de Thomas Young

(1773-1829) e Augustin Fresnel (1788-1827). Esses pesquisadores mostraram que certos fenômenos (interferência e difração), praticamente impossíveis de explicar supondo-se que a luz seja constituída de partículas, podiam ser elucidados quantitativamente pela teoria ondulatória. Conseguiram também explicar a polarização da luz (um fenômeno que havia colocado em xeque a teoria de Huygens), assumindo que as ondas luminosas são transversais, e não longitudinais como o som. A partir da década de 1820, a ideia que começa a predominar é a de que a luz é uma forma de onda. Mas se a luz for uma onda, ela é uma onda *de alguma coisa*, deve existir uma substância que está vibrando, oscilando, e que transmite essas ondas – seria, exatamente, o éter.

Em torno de 1830, a grande maioria dos físicos havia se convencido de que essa era a teoria correta (Swenson, 1972, p. 15-21). Juntamente com a teoria ondulatória, passou-se a aceitar a ideia de um éter – a substância que transmite as ondas luminosas. O éter seria uma substância diferente de todas as outras, que preencheria todo o espaço – mesmo onde parece não existir nada. A ideia de um éter já existia desde o tempo de Aristóteles; no entanto, no século XIX o éter se tornou um importante conceito no estudo da óptica e do eletromagnetismo.

Houve diversas propostas diferentes sobre a natureza e as propriedades do éter, mas a ideia predominante, no século XIX, foi a teoria de Fresnel de que o éter luminífero estava parado no espaço, exceto nos lugares onde havia objetos transparentes, que poderiam transportá-lo. Para explicar as ondas transversais, o éter era considerado como um sólido elástico (e não um fluido), o que trazia a dificuldade de compreender como os objetos podem se mover através dele. Muitos autores do século XX ridicularizaram essa ideia, mas considerava-se no século XIX que essa dificuldade poderia ser superada. Afinal, era uma concepção menos contraditória do que a dualidade onda-partícula da luz, que aceitamos atualmente.

Eletromagnetismo e éter

Na mesma época em que a teoria ondulatória da luz ganhava força, o estudo dos fenômenos eletromagnéticos também levou à ideia do éter. Alguns pesquisadores, como Charles Augustin Coulomb (1736-1806), André-Marie Ampère (1775-1836), Franz Neumann (1798-1895), Wilhelm Weber (1804-1890) e Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866), analisaram esses

fenômenos como forças exercidas à distância entre as cargas elétricas. Outros, como Hans Christian Ørsted (1777-1851), Michael Faraday (1791-1867), William Thomson (1824-1907) e James Clerk Maxwell (1831-1879), adotaram uma postura diferente: assumiram a existência de alguma coisa que servia como intermediário nas interações eletromagnéticas.

Faraday foi um dos grandes experimentadores que descobriram muitos fenômenos eletromagnéticos durante o século XIX. Ele acreditava que as forças entre ímãs ou entre cargas elétricas não são forças diretas à distância. Se temos um ímã em um ponto e outro ímã a certa distância, um não pode saber que o outro está ali na sua frente porque eles não têm olhos, eles não têm sentidos. Tente se colocar no lugar do ímã e fechar os olhos e tentar imaginar isso: será que um ímã poderia “sentir” que tem um outro ímã ali que o está puxando? Não, isso não é possível, o ímã não consegue saber que tem um outro ímã perto, puxando. Por causa de dificuldades conceituais como esta, Faraday começou a desenvolver a ideia de que há alguma coisa real, física, prendendo um ímã ao outro, que vai puxá-los e aproximá-los, talvez alguma coisa semelhante a fibras elásticas invisíveis, espalhadas pelo espaço, ou coisas parecidas. Embora Faraday falasse sobre “linhas de força” e não sobre uma substância invisível contínua, isso também era, afinal de contas, uma forma de éter. O éter seria uma substância elástica capaz de transmitir tensões, e essa modificação do éter é que se espalharia.

Para Maxwell, que seguiu muitas das ideias de Faraday, as forças elétricas e magnéticas não seriam forças exercidas diretamente à distância e sim forças transmitidas através de uma substância invisível – o éter. Maxwell adota o conceito de éter e nunca o abandona (Swenson, 1972, p. 27). Uma carga elétrica ou um ímã não exerceriam forças diretamente um sobre o outro. Eles influenciariam o éter à sua volta, essa influência se propagaria à distância e então atingiria o outro corpo, produzindo forças nele. A ideia de um éter é central na teoria eletromagnética de James Clerk Maxwell. Os conceitos de “campo elétrico” e “campo magnético” não eram abstratos, representavam modificações do éter, que adquiriria tensões e movimentos, por influência de cargas elétricas paradas ou em movimento.

A ideia do éter é um pouco estranha para nós, porque ela não foi conservada na Física que se estuda hoje em dia. No entanto, alguns dos grandes físicos do século XIX que ajudaram a desenvolver o eletromagnetismo

– como Maxwell – tinham certeza de que o éter existia, e o éter era uma parte importante de sua teoria. Atualmente, falamos sobre campo elétrico e campo magnético como algo bastante abstrato, mas para Maxwell não era assim. Para ele, o campo elétrico é uma modificação do éter produzida por cargas elétricas e que age sobre outras cargas elétricas. O campo magnético é uma outra modificação do éter. É por isso que esses campos podem existir no espaço “vazio”, e é por isso também que podem existir ondas eletromagnéticas no espaço vazio de matéria: porque lá existe o éter.

As teorias de ação à distância e a teoria do éter de Maxwell coexistiram durante algum tempo, sem que fosse possível fazer uma escolha científica entre elas. Seus estilos eram muito diferentes, mas levavam praticamente às mesmas consequências experimentais. Surgiu uma possibilidade de diferenciá-las, no entanto, quando Maxwell previu a possibilidade de produção de ondas eletromagnéticas no espaço “vazio”. Essas ondas deviam ter a mesma velocidade que a luz – c , por isso, ele afirmava que a luz visível era de natureza eletromagnética. A confirmação da existência de ondas eletromagnéticas fora dos corpos materiais derrubou as teorias eletromagnéticas de ação à distância e fortaleceu muito a crença na existência do éter.

Na teoria de Maxwell, a velocidade das ondas eletromagnéticas era calculada a partir de duas constantes. Uma delas era a permissividade elétrica ou constante dielétrica do éter sem matéria (ϵ_0), a outra era a permeabilidade magnética do éter vazio (μ_0). A velocidade das ondas eletromagnéticas é igual a $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$. A velocidade dependia apenas das propriedades do vácuo (ou seja, do éter), não sendo influenciada pela frequência das ondas ou pela velocidade da fonte que as produz. Trata-se de uma propriedade semelhante à das ondas sonoras, cuja velocidade também é determinada pelas características do meio em que se propagam (por exemplo, densidade e pressão do ar).

A velocidade da Terra através do éter

Na mecânica de Newton, apesar de se admitir o espaço absoluto, o movimento de translação uniforme (em linha reta, com velocidade constante) não poderia ser detectado – apenas as acelerações e rotações absolutas produziam efeitos. Isso continua sendo válido no século XIX, mas a crença na existência de um éter muda a situação. Por quê? Porque agora o espaço não

está exatamente *vazio*, ele contém uma substância física. E eu não poderia sentir os efeitos do movimento da Terra ou de outros objetos através do éter? Aparentemente, poderia. Então, essa é uma mudança importante na discussão sobre a possibilidade de observarmos os efeitos do movimento de translação dos corpos pelo espaço. Se não existe espaço absolutamente vazio, mas existe uma substância que produz efeitos físicos, que é o éter, preenchendo todo o espaço, então, deve ser possível observar seus efeitos.

Suponhamos que se descubra algum modo de medir os efeitos da velocidade da Terra através do éter. Não estará sendo feita a medida da velocidade absoluta da Terra; não é uma velocidade em relação ao espaço, é em relação a uma entidade física. Porém, supondo-se que o éter esteja parado em relação ao espaço absoluto, então, indiretamente, estaríamos também observando o movimento da Terra, ou de outro objeto, em relação ao espaço absoluto. Mas isso só seria possível por causa da existência desse intermediário, que é o éter.

Medir a velocidade de um objeto através do éter é um conceito tão simples e aceitável quanto o de medir a velocidade de um objeto em relação ao ar. De fato, o ar em movimento produz efeitos: as coisas podem girar por causa do vento; e quando um avião está voando, ele pode medir a sua velocidade em relação ao ar por meio de aparelhos colocados na sua superfície. Da mesma forma, como o éter era considerado uma substância física capaz de produzir efeitos, devia ser possível medir a velocidade da Terra em relação a essa substância. Por isso, durante o século XIX, foram feitos vários experimentos com luz, que procuravam observar os efeitos da velocidade da Terra através do éter.

O próprio Maxwell acreditava que isso deveria ser possível; fez experimentos com prismas (que não deram resultado) e sugeriu outros experimentos, um dos quais estimulou o trabalho posterior de Michelson (Maxwell, 1965; Keswami & Kilmister, 1983).

Alguns dos experimentos realizados no século XIX deram resultados *positivos*, como os que foram publicados em 1859 por Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) e os de 1861, pelo espectroscopista Anders Jonas Ångström (1814-1874). No entanto, eram experimentos muito delicados, mediam efeitos muito pequenos, difíceis de observar. Depois de alguns anos esses experimentos foram repetidos, mas não deram o mesmo resultado (Martins, 1986). Então,

esses experimentos de Fizeau e de Ångström ficaram como uma simples curiosidade histórica.

Várias tentativas de detecção da velocidade da Terra em relação ao éter falharam. Alguns desses resultados negativos podiam ser explicados por uma análise teórica que mostrava que vários efeitos ópticos se cancelavam. Houve, porém, um experimento que aparentemente não estaria sujeito a esses problemas: o de Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1858-1923), realizado em 1887. Para decepção e perplexidade de todos, o experimento deu resultado negativo – ou seja, não conseguiu observar os efeitos previstos.

Outros experimentos realizados nos anos seguintes também não deram resultado. No final do século XIX, alguns físicos começaram a suspeitar que seria impossível medir os efeitos do movimento de translação da Terra em relação ao éter. Henri Poincaré (1854-1912) foi, provavelmente, quem percebeu de forma mais clara a importância e as consequências disso (Goldberg, 1967; Zahar, 1983; Giannetto, 1998). Em 1895, Poincaré já afirmava: “É impossível medir o movimento absoluto da matéria, ou melhor, o movimento relativo da matéria em relação ao éter. Só se pode evidenciar o movimento da matéria em relação à matéria”. Em 1899, Poincaré deu a essa hipótese o nome de “lei da relatividade”, e nos anos seguintes intitulou-a “princípio do movimento relativo” e “princípio da relatividade”. Em um trabalho apresentado em 1904, Poincaré listou, entre os seis princípios mais importantes da Física, “o princípio da relatividade, de acordo com o qual as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, seja para um observador fixo, ou para um observador transportado em um movimento uniforme de translação; de modo que não temos e não podemos ter qualquer meio para distinguir se estamos ou não sendo transportados em tal movimento” (Poincaré, 1904, p. 284). Essa ideia guiou as pesquisas de Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), do próprio Poincaré e, mais tarde, de Albert Einstein (1879-1955), levando à descoberta das leis daquilo que chamamos de teoria da relatividade.

Embora não fosse possível medir velocidades dos objetos em relação ao éter, isso não significava que o éter não existisse, ou que fosse um conceito sem importância. O próprio Maxwell chamou a atenção para isso: a velocidade da luz no “vácuo” tem um valor que deve depender das propriedades

físicas do éter, e que não depende da velocidade da fonte luminosa. A mesma coisa acontece com o som, no ar: ele tem a mesma velocidade (que só depende das propriedades do ar), qualquer que seja a velocidade do objeto que emite o som.

O surgimento da teoria da relatividade

Se for impossível determinar a velocidade da Terra através do éter, então, todos os fenômenos ópticos e eletromagnéticos devem ser iguais, em sistemas parados ou em movimento através do éter. Se isso for verdade, as leis básicas do eletromagnetismo (“equações de Maxwell”) devem ser válidas não apenas quando estamos parados em relação ao éter, mas também para sistemas em movimento através dele. No entanto, isso não parecia ser verdade na teoria de Maxwell sob a forma em que ela havia sido proposta inicialmente.

Desde a década de 1890, vários físicos (como Hendrik Lorentz, Henri Poincaré, Joseph Larmor e Woldemar Voigt) procuraram encontrar um modo de tornar a teoria eletromagnética de Maxwell compatível com o princípio da relatividade (Whittaker, 1953, v. 2, cap. 2). Essas pesquisas, altamente técnicas e difíceis, que procuravam conciliar a teoria de Maxwell com o princípio da relatividade, resultaram na criação daquilo que chamamos atualmente de “teoria da relatividade especial”.

A maior parte da teoria da relatividade especial foi construída *antes* do primeiro artigo de Einstein sobre o assunto (publicado em 1905). Embora se costume atribuir tudo a Einstein, essa teoria foi o resultado de um trabalho coletivo – como geralmente ocorre na história da Física.

Algumas das equações mais importantes da relatividade especial são relações entre medidas de espaço e tempo em dois referenciais. Elas são chamadas “transformações de Lorentz” porque foi Lorentz quem apresentou essas equações sob essa forma, deduzindo-as e mostrando como podiam ser usadas no eletromagnetismo para torná-lo compatível com o princípio da relatividade.

Outras equações (também desenvolvidas por Lorentz) descrevem como os campos eletromagnéticos mudam quando observados de diferentes referenciais. Há também equações que descrevem a mudança da massa dos corpos em movimento e outros efeitos dinâmicos. Isso tudo foi feito antes do trabalho de Einstein.

Essa teoria se baseia no princípio da relatividade e, portanto, aceita que não se pode medir a velocidade absoluta (ou em relação ao éter) de um sistema físico. No entanto, a teoria não exige que se negue a existência do éter.

Einstein e o éter

Quase todos os que ajudaram a desenvolver a teoria da relatividade especial continuaram a aceitar o éter. O experimento de Michelson-Morley e a teoria da relatividade não mostraram que o éter não existe. Poincaré e Lorentz aceitavam o princípio da relatividade, mas continuavam a admitir o éter. Henri Poincaré, por exemplo, afirmou: “Pouco nos importa se o éter realmente existe: isso é um assunto para os metafísicos. Para nós, o essencial é que tudo se passa como se ele existisse, e que essa hipótese é cômoda para a explicação dos fenômenos” (Poincaré, 1889, p. I; Poincaré, 1902, p. 215).

Antes de 1905, Einstein leu e discutiu com seus amigos Maurice Solovine e Conrad Habicht (com os quais formou a “Akademie Olympia”) o livro *La science et l'hypothèse* de Henri Poincaré, em que o autor falava das tentativas de medir a velocidade da Terra através do éter, expunha o princípio da relatividade e discutia algumas de suas consequências, como a relatividade do tempo (Pais, 1982, p. 133). Disse Solovine: “Este livro nos impressionou profundamente e nos manteve com a respiração suspensa durante várias semanas” (Einstein, 1956, p. VIII).

Einstein aceitou o princípio da relatividade e outras ideias de Poincaré, porém, ao contrário deste, propôs excluir o éter da Física, já que era impossível detectá-lo. A teoria da relatividade de Einstein combateu a teoria do éter afirmando que ele era puramente hipotético. Ele não podia ser observado e, portanto, devia ser excluído da Física. De acordo com essa nova visão, existe o vácuo – o espaço totalmente vazio, sem éter e sem qualquer outra coisa semelhante. Esta é a única diferença entre Poincaré e Einstein: o papel do éter (Darrigol, 1995, p. 40).

Mas como seria possível jogar fora o éter, se ele era a base da óptica e do eletromagnetismo? Einstein pensou em atirar junto, pela janela, a teoria ondulatória da luz, retornando à teoria corpuscular de Newton. Porém, fazendo isso, era impossível explicar os fenômenos de interferência e difração da luz. Os próprios conceitos de frequência e comprimento de onda perderiam

o significado. E o que fazer com os campos elétrico e magnético? Se não existia o éter, esses campos espalhados pelo espaço – que eram modificações do éter – não poderiam ter realidade. Seria necessário retornar a uma teoria de forças à distância, e as próprias ondas eletromagnéticas não deveriam existir.

O preço que deveria ser pago para abandonar o éter era alto demais – a menos que Einstein fizesse alguma mágica. Ele fez. Em um truque de levitação, retirou o éter que suportava os campos elétrico e magnético, considerando que eles poderiam existir no vácuo absoluto. As ondas eletromagnéticas podiam assim ser conservadas. A energia dessas ondas estaria suportada pelo nada, em vez de estar armazenada no éter. A velocidade das ondas eletromagnéticas podia continuar a ser calculada como $1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, mas agora as constantes ϵ_0 e μ_0 deixavam de ser propriedades do éter e passavam a ser propriedades do espaço vazio.

No entanto, nem sempre Einstein negou o éter. Sabe-se que em 1897 ou 1898, enquanto estudante, Einstein tomou conhecimento de tentativas de detecção do movimento da Terra em relação ao éter. Relatos do próprio Einstein, bem como cartas que escreveu para Mileva Maric (em 1899) e para Marcel Grossmann (em 1901), mostram que de 1898 até pelo menos 1901 ele aceitava a existência de um éter e estava planejando a realização de experimentos para medir a velocidade da Terra em relação ao éter (Stachel, 1989, p. 259; Reiser, 1930, p. 52; Pais, 1982, p. 131-132).

No entanto, quando publicou seu artigo de 1905, ele já havia adotado uma atitude diferente. Influenciado pelo físico e filósofo Ernst Mach, que havia criticado os conceitos newtonianos de espaço e tempo absolutos, ele adotou uma posição filosófica empirista que negava a validade de se utilizar na ciência qualquer coisa que fosse inobservável, negando o uso do éter na Física (Martins, 1981). “Será provado que a introdução de um éter luminoso é supérflua, já que, de acordo com o conceito que será desenvolvido aqui, não será introduzido nenhum espaço em repouso absoluto, com propriedades especiais” (Einstein, 1905, p. 892).

Apesar da resistência de vários físicos, a abordagem de Einstein foi sendo aceita por muitas pessoas. Dois motivos principais determinaram o sucesso de Einstein. Primeiramente, sua teoria era mais simples do que a de Lorentz e Poincaré. Em segundo lugar, era fundamentada em uma abordagem epistemológica que estava em moda na época – o empirismo –,

que defendia a eliminação, na ciência, de tudo o que não pudesse ser observado. Einstein acabou sendo aceito e o éter foi deixado de lado; Lorentz e Poincaré foram relegados ao esquecimento.

Note-se que Einstein não afirmou que tinha provado (ou que provaria) que o éter não existe, e, sim, que ele seria supérfluo. De fato, ele mostrou que era possível desenvolver a teoria da relatividade e chegar às mesmas conclusões experimentais que já haviam sido propostas por Lorentz e outros pesquisadores sem falar sobre o éter. Mas isso não queria dizer que o éter não existisse, nem que a teoria anterior estava errada. Quanto às previsões experimentais, as duas abordagens levavam às mesmas equações. Era impossível escolher entre elas através de qualquer experimento².

É impossível provar que o éter não existe

Ao contrário do que algumas pessoas acreditam, nem Einstein nem qualquer outro pesquisador *provaram* que o éter não existe. Nunca se pode *provar* que não existe nada em uma certa região do espaço, pois ali poderiam existir entes físicos ainda desconhecidos, que não sabemos detectar. De fato, não se pode provar a *inexistência* de uma coisa, e, sim, sua existência. Não observar uma coisa não prova que ela não exista.

Pode realmente existir um lugar totalmente vazio? Como é possível verificar se não existe nada, de fato, em um certo espaço? Suponha que você entre em um quarto que parece estar vazio. Como saber se realmente não existe nada lá dentro?

Bem, se eu entro em um quarto e não vejo nenhuma pessoa, móvel ou objeto, posso dizer que *em certo sentido* ele está vazio. Mas esse quarto está cheio de ar, certo? Eu não vejo o ar, mas felizmente posso respirá-lo e sentir alguns de seus efeitos. Não poderiam existir outras coisas invisíveis nesse cômodo – objetos mais difíceis de perceber do que o ar, porém reais? Afinal, existem ondas de rádio, raios X, radiação cósmica e outras coisas semelhantes que não percebemos diretamente com nenhum dos nossos sentidos. Dois séculos atrás elas já existiam, mas não eram conhecidas. Pode haver outras que ainda não conhecemos.

Nunca podemos ter certeza de que não há nada em um quarto. Podemos apenas afirmar que em um lugar não existem certas coisas que sabe-

mos identificar – mesas, pessoas, elefantes. Porém, um espaço aparentemente vazio pode conter entes físicos que não conseguimos detectar.

Por outro lado, se pudermos notar efeitos físicos produzidos em certo lugar aparentemente vazio, poderemos afirmar que ele não está totalmente vazio. É fácil mostrar que o vácuo da Física contemporânea contém muitas coisas capazes de produzir efeitos. Como veremos mais adiante, a teoria da relatividade geral fez com que Einstein aceitasse novamente a existência de um éter.

Espaço-tempo

Embora o éter não fosse idêntico ao espaço absoluto, sua negação por Einstein estava associada também à negação do espaço absoluto, pois os dois são entidades que não podem ser observadas. Da mesma forma, Einstein negou o tempo absoluto e o movimento absoluto.

Na teoria da relatividade especial, o comprimento dos objetos (medido na direção do movimento) e o período dos relógios (ou de qualquer fenômeno) são alterados quando eles se movem em relação a um observador – *qualquer* observador. Assim, o espaço e o tempo se tornam grandezas relativas, sem valor único definido.

Durante o desenvolvimento da teoria da relatividade especial, o matemático Hermann Minkowski (1864–1909) introduziu o conceito de espaço-tempo, baseando-se em ideias de Henri Poincaré. O tempo seria uma quarta dimensão, relacionada às três dimensões do espaço. As transformações de Lorentz, que relacionam espaço e tempo, foram interpretadas como análogas às mudanças dos valores de coordenadas espaciais, quando se mudam os eixos das coordenadas.

A abordagem do espaço-tempo era, principalmente, uma ferramenta matemática, não trazendo nenhuma interpretação física nova para a teoria da relatividade especial. O uso do espaço-tempo se tornou muito mais importante quando foi desenvolvida a teoria da relatividade geral. Essa teoria estuda fenômenos envolvendo campos gravitacionais e sistemas de referência acelerados.

Para o desenvolvimento desse novo campo de estudos, o físico Max Abraham propôs o uso do *cálculo diferencial absoluto*, também conhecido

como *cálculo tensorial*. Trata-se de um ferramental matemático que permite trabalhar de uma forma poderosa as relações entre espaço e tempo para qualquer referencial. Einstein acabou adotando, contra sua vontade, esse complexo instrumento matemático, que precisou aprender com seu amigo Marcel Grossmann (1878-1936). É interessante vermos que essa pessoa extremamente famosa também tinha suas fraquezas, precisava da ajuda de outras pessoas para entender a matemática que utilizou depois para o desenvolvimento da relatividade geral.

O éter e a relatividade geral

Na teoria da gravitação (relatividade geral) de Einstein, os corpos produzem à sua volta um *campo gravitacional* que altera as propriedades do espaço-tempo. De acordo com a teoria da relatividade geral, cada ponto do espaço tem certas propriedades (a métrica do espaço-tempo) que variam de um ponto para outro, quando existe um campo gravitacional. A curvatura do espaço-tempo é influenciada pela presença e pela proximidade de matéria e de energia. Na teoria da relatividade geral, quando um objeto está em um campo gravitacional, seu movimento é dirigido pela curvatura do espaço-tempo. O movimento da radiação também é influenciado pela curvatura do espaço-tempo. A velocidade da luz pode ter valores distintos em diversas regiões do espaço “vazio”, como se o vácuo tivesse um índice de refração variável. Mas como dois *nadas* poderiam ser diferentes? É claro que um lugar onde há um campo gravitacional não é uma região absolutamente vazia e sim um espaço cheio de alguma coisa que produz efeitos físicos.

Havia semelhanças entre o espaço-tempo da relatividade geral e o éter do eletromagnetismo. Assim como na teoria de Maxwell, na teoria gravitacional de Einstein um objeto não exerce forças diretamente sobre um outro, à distância. Cada corpo cria mudanças no espaço-tempo à sua volta, essas mudanças se propagam gradualmente até grandes distâncias, e, quando chegam a um outro corpo, ele “sente” as mudanças do espaço-tempo à sua volta e reage, começando a se mover ou mudando seu movimento.

À medida que ia desenvolvendo essa teoria, Einstein começou a mudar sua atitude em relação ao espaço. Embora a teoria da relatividade geral se referisse de forma abstrata à métrica do espaço-tempo, era claro que agora o espaço

tinha propriedades físicas bem definidas e estava ficando parecido com um éter. O espaço-tempo tem características que mudam de um ponto para o outro; ele é influenciado pela matéria e pela energia e influencia o movimento da matéria e da energia. Ele não é um *nada*. O próprio Einstein afirmou que “Não existe um espaço vazio, isto é, um espaço sem campo. O espaço-tempo não alega existência por si próprio, mas apenas como uma qualidade estrutural do campo” (Einstein, 1960, p. 155). Podemos preferir não chamar essa coisa de “éter”, mas seria absurdo dizer que não há nada lá.

Lorentz não via conflito entre o desenvolvimento da teoria da relatividade geral e seu próprio programa de pesquisa. Ele apoiou ativamente o trabalho de Einstein e deu algumas contribuições (como o uso do princípio de Hamilton na relatividade geral), sem desistir da ideia de um éter. Em 1914, Lorentz escreveu: “Parece-me que não há nada que deva nos impedir, se isso nos satisfaz, de considerar os dois campos (o gravitacional e o eletromagnético) e tudo o que os caracteriza [...] como consistindo em modificações que são produzidas no interior de um éter” (citado por Brower, 1980, p. 429).

Embora isso não transparecesse claramente nos artigos publicados por Einstein, ele comentou a questão em cartas a algumas pessoas. Em 1916, escreveu a Lorentz: “Concordo com você que a teoria da relatividade geral, assim como a teoria da relatividade especial, admite a hipótese de um éter”. (Carta de Einstein a Lorentz, 17 de junho de 1916, *apud* Granek, 2001, p. 22).

O físico Paul Ehrenfest (1880-1933), amigo de Einstein, ficou incomodado com essa semelhança entre o espaço-tempo e o éter e numa carta lhe pediu que esclarecesse se estava retornando ao éter. Em 1920, em uma visita à Holanda – onde seu amigo trabalhava –, Einstein apresentou uma conferência sobre éter e relatividade, para esclarecer de uma vez por todas o que pensava sobre o assunto. Logo em seguida, a conferência foi publicada sob a forma de um pequeno livro: *Éter e teoria da relatividade* (Einstein, 1920).

A conferência de 1920

Nessa conferência, realizada em Leiden, encontramos afirmações de Einstein que nos parecem espantosas, por serem incompatíveis com sua postura de 1905: “De acordo com a teoria da relatividade geral, um espaço sem

éter é impensável; porque em um espaço assim não haveria propagação da luz, nem possibilidade de padrões de espaço e de tempo (réguas e relógios), nem intervalos de espaço-tempo, no sentido físico” (Einstein, 1920, p. 15).



Albert Einstein e Hendrik Antoon Lorentz, fotografados por Paul Ehrenfest na frente de sua casa, em Leiden, em 1920. Ao contrário do que se costuma pensar, Einstein e Lorentz eram amigos. “Desde o primeiro dia em que se conheceram [em 1909], Hendrik Lorentz e Albert Einstein permaneceram amigos firmes. Eles se viam com frequência, porém [...] o que cada vez mais unia os dois pesquisadores era uma correspondência científica muito viva” (Reiser, 1930, p. 83). Em 1920, data desta fotografia, Einstein passou a adotar publicamente a defesa de um éter e a considerar a teoria da relatividade geral como um desenvolvimento da Teoria do Éter de Lorentz.

Na conferência, Einstein faz um longo histórico das ideias a respeito do éter e do surgimento da teoria da relatividade especial e comenta: “A posição que poderia ser assumida em seguida parecia a seguinte: o éter não existe. Os campos eletromagnéticos não são estados de um meio e não estão ligados a qualquer transportador, mas são realidades independentes que não podem ser reduzidas a nenhuma outra coisa, exatamente como os átomos da matéria” (Einstein, 1920, p. 9). Essa é exatamente a opinião que se costuma atribuir a Einstein. No entanto, pouco mais adiante, ele afirma: “Uma reflexão mais cuidadosa nos ensina, no entanto, que a teoria especial da relatividade não nos obriga a negar o éter. Podemos assumir a existência de um éter; apenas devemos desistir de lhe atribuir um estado definido de movimento [...]. Veremos mais adiante que este ponto de vista [...] é justificado pelos resultados da teoria geral da relatividade” (*ibidem*).

Um “argumento de peso” que Einstein apresenta a favor da hipótese do éter é que “negar o éter é, em última instância, assumir que o espaço vazio [de

matéria] não tem nenhuma qualidade física. Os fatos fundamentais da mecânica não se harmonizam com essa visão”. Que fatos são esses? Ele esclarece logo em seguida: as propriedades mecânicas de um sistema físico dependem de seu estado de rotação, e isso dá uma realidade objetiva ao espaço, como Newton já havia mostrado. “Newton poderia ter chamado seu espaço absoluto de ‘éter’; o que é essencial é apenas que, além dos objetos observáveis, há outra coisa, que não é perceptível, que deve ser considerada real, para podermos considerar a aceleração ou rotação como algo real” (Einstein, 1920, p. 11).

Vemos, portanto, que Einstein aceitava, em 1920, que os argumentos de Newton a favor do espaço absoluto eram corretos, e que podiam ser interpretados como favoráveis à hipótese do éter. Mas não apenas isso: a estrutura da relatividade geral também levava a abandonar a ideia de que o espaço é fisicamente vazio. Logo em seguida, Einstein comparou “o éter da relatividade geral” com o éter de Lorentz. Esclareceu que a diferença era que, no caso da relatividade geral, o estado do éter em cada lugar depende das influências da matéria e do éter em pontos próximos; no caso da teoria de Lorentz, o éter é igual em todos os pontos:

O que é fundamentalmente novo no éter da teoria da relatividade geral, diferente do éter de Lorentz, é que o estado do primeiro [o éter da relatividade geral] é determinado em cada lugar por conexões com a matéria e pelo estado do éter em lugares próximos, estando sujeito a leis na forma de equações diferenciais, enquanto o estado do éter de Lorentz na ausência de campos eletromagnéticos não está condicionado por nada fora dele, e é o mesmo em todos os pontos. O éter da teoria da relatividade geral se transforma conceitualmente no éter de Lorentz se substituirmos por constantes as funções do espaço que descrevem o primeiro, omitindo as causas que condicionam seu estado. Assim, penso que podemos dizer que o éter da relatividade geral é o produto da relativização do éter de Lorentz (Einstein, 1920, p. 13).

Einstein estava se referindo principalmente à relatividade geral. No entanto, a relatividade especial é o caso limite da relatividade geral, quando não há campo gravitacional. Nesse caso, não há diferença conceitual entre o éter da relatividade geral e o éter de Lorentz. Portanto, em certo sentido, a relatividade geral é um produto do programa de pesquisa do éter, de Lorentz e Poincaré, e não uma continuação do programa de pesquisa da relatividade especial, empirista.

O último parágrafo da conferência de Einstein apresenta de forma muito clara sua posição em 1920:

Recapitulando, podemos dizer que, de acordo com a teoria geral da relatividade, o espaço é dotado de qualidades físicas; neste sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a teoria da relatividade geral, espaço sem éter é impensável, pois em tal espaço não haveria propagação de luz, nem possibilidade de padrões de espaço e tempo (réguas e relógios), nem, portanto, intervalos de espaço-tempo no sentido físico. Mas esse éter não pode ser pensado como dotado da qualidade dos meios ponderáveis, que consistem em partes que podem ser seguidas ao longo do tempo. A ideia de movimento não pode ser aplicada a ele (Einstein, 1920, p. 15).

É curioso. Em parte, Einstein retornou ao éter por causa da teoria da relatividade geral. Porém, alguns dos argumentos que ele apresentou eram muito mais antigos, como o associado à rotação dos corpos. Maxwell e muitos outros físicos do século XIX assinariam embaixo da frase “sem éter, não poderia haver propagação de luz”.

Nos anos seguintes, Einstein rejeitou as ideias de Mach e a filosofia empirista que havia orientado seus trabalhos iniciais. Na sua fase final, ele não adotava mais nenhuma postura epistemológica rígida, considerando que o físico poderia utilizar a concepção que lhe fosse mais conveniente, sem precisar se prender a nenhuma visão filosófica de um modo coerente.

Comentários finais

O desenvolvimento da teoria da relatividade exigiu uma reflexão sobre os conceitos de espaço, tempo e éter. Nesse processo houve oscilações entre diversos conceitos, e não a “prova” de que o espaço e o tempo são relativos e de que o éter não existe. Ao contrário do que se costuma acreditar, Einstein não provou a inexistência do éter, embora o tivesse rejeitado em 1905; e durante o desenvolvimento da teoria da relatividade geral reviu sua posição, passando a aceitar a existência de um éter.

Em um período mais recente, várias pesquisas físicas retomaram ideias associadas ao éter (Martins, 2006). Nossas concepções sobre espaço e tempo continuam a se transformar e não devemos imaginar que chegamos – ou chegaremos – a uma “verdade” final.

CAPÍTULO 2

Epígrafe

GRANEK, Galina. Einstein's ether: why did Einstein come back to the ether? *Apeiron* 8: p. 22, 2001.

Notas

¹ Uma revisão geral sobre esse assunto pode ser encontrada em Čapek, 1976.

² Uma análise epistemológica da situação mostra que a negação do éter não tinha vantagens filosóficas, naquela época, e que a adoção do éter aumentava o valor científico da teoria, ao contrário do que se imaginava (Martins, 2005).

Referências

- ALEXANDER, H. G. (Ed.). *The Leibniz-Clarke correspondence*. Manchester: Manchester University Press, 1956.
- BROUWER, W. Einstein and Lorentz: the structure of a scientific revolution. *American Journal of Physics*, 48 (6), 1980, p. 425-431.
- BUCHWALD, J. Z. *The rise of the wave theory of light. Optical theory and experiment in the early nineteenth century*. Chicago: University of Chicago Press, 1989.
- ČAPEK, Milič. *The concepts of space and time*. New York: Springer, 1976.
- CUVAJ, Camillo. Henri Poincaré's mathematical contributions to relativity and the Poincaré stresses. *American Journal of Physics*, 36 (12): p. 1102-1113, 1968.
- DARRIGOL, Olivier. Henri Poincaré's criticism of 'fin de siècle' electrodynamics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 26: p. 1-44, 1995.
- DAYLEY, Jason. Democritus' Parmenidean influence. *Aporia* 16 (2): p. 51-60, 2006.
- DECAEN, Christopher Alan. *The existence of aether and the refutation of void in Aristotle: A critical evaluation of the arguments*. Tese de doutorado em Filosofia. Columbia: Catholic University of America, 1999.
- DESCARTES, René. *Principes de la philosophie*. In: ADAM, Charles; TANNERY, Paul (Eds.). *Oeuvres de Descartes*. Paris: J. Vrin, v. 9-2, 1971.
- EARMAN, John. Who's afraid of absolute space? *Australasian Journal of Philosophy*, 48 (3): p. 287-319, 1970.
- EINSTEIN, Albert. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17: p. 891-921, 1905.
- EINSTEIN, Albert. *Äther und Relativitätstheorie*. Rede gehalten am 5 Mai 1920 an der Reichs-Universität zu Leiden. Berlin: Julius Springer, 1920. Disponível em <<http://www.mahag.com/rede.htm>>. (Acesso em: 01 Ago. 2006)
- EINSTEIN, Albert. *Lettres à Maurice Solovine*. Paris: Gauthier-Villars, 1956.
- EINSTEIN, Albert. *Relativity: the special and the general theory*. Trad. Robert W. Lawson. 3. ed. London: Routledge, 1960.
- EINSTEIN, Albert. *Sidelights on relativity*. New York: Dover, 1983. (Este livro contém a tradução para o inglês da palestra que Einstein apresentou em Leiden, em 1920, sobre relatividade e éter.)

- GIANNETTO, Enrico. The rise of special relativity: Henri Poincaré's works before Einstein. In: *XVIII Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia*. Milano: Istituto di Física Generale Applicata / Centro Volta de Como, 1998. p. 171-207.
- GOLDBERG, Stanley. Henri Poincaré and Einstein's theory of relativity. *American Journal of Physics*, 35: p. 934-944, 1967.
- GRANEK, Galina. Einstein's ether: why did Einstein come back to the ether? *Apeiron*, 8: p. 19-28, 2001.
- HOLTON, Gerald. Mach, Einstein, and the search for reality. In: *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988 p. 237-277.
- JAMMER, Max. *Concepts of space. The history of theories of space in physics*. 3. ed. New York: Dover, 1993.
- KESWAMI, G. H. & KILMISTER, C. W. Intimations of relativity. Relativity before Einstein. *British Journal of Philosophical Science*, 34: p. 343-354, 1983.
- KNIGHT, Thomas S. Parmenides and the void. *Philosophy and Phenomenological Research*, 19: p. 524-528, 1959.
- KOSTRO, Ludwik. *Einstein and the ether*. Montreal: Apeiron, 2000.
- LAYMON, Ronald. Newton's bucket experiment. *Journal of the History of Philosophy*, 16 (4): p. 399-413, 1978.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Use and violation of operationalism in relativity. *Manuscrito*, 5 (2): p. 103-15, 1981.
- MARTINS, Roberto de Andrade. A Popperian evaluation of Einstein's theory-plus-method. *Manuscrito*, 9 (2): p. 95-124, 1986.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Huygens e a gravitação newtoniana. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* [série 2], 1 (2): p. 151-84, 1989.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Em busca do nada: considerações sobre os argumentos a favor e contra o vácuo. *Trans/Form/Ação*, 16: 7-27, 1993.
- MARTINS, Roberto de Andrade. El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poincaré. In: FAAS, Horacio; SAAL, Aarón; VELASCO, Marisa (Eds.). *Epistemología e Historia de la Ciencia. Selección de Trabajos de las XV Jornadas. Facultad de Filosofía y Humanidades*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2005, p. 509-516.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Do éter ao vácuo e de volta ao éter. *Scientific American História*, (6): p. 92-98, 2006.

- MAXWELL, James Clerk. Ether. Vol. 2, In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Dover: New York, 1965, v. 2, p. 763-775.
- MILLER, Arthur I. *Albert Einstein's special theory of relativity: emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1981.
- NEWTON, Isaac. *Mathematical principles of natural philosophy*. Trad. Andrew Motte, rev. Florian Cajori. Chicago: Encyclopedia Britannica, 1952. (The Great Books of the Western World, p. 34.)
- PAIS, Abraham. *Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- POINCARÉ, Henri. *Leçons sur la théorie mathématique de la lumière I*. Paris: G. Carré, 1889.
- POINCARÉ, Henri. La mesure du temps. *Revue de Métaphysique et de Morale*, 6: p. 371-384, 1898.
- POINCARÉ, Henri. *La science et l'hypothèse*. Paris: Flammarion, 1902.
- POINCARÉ, Henri. The principles of mathematical physics. In: SOPKA, Kahterine R. (Ed.). *Physics for a New Century: Papers Presented at the 1904 St. Louis Congress*. Washington: Tomash Publishers / American Institute of Physics, 1986, p. 281-299.
- REISER, Anton. *Albert Einstein, a Biographical Portrait*. New York: Albert & Charles Boni, 1930.
- RYNASIEWICZ, Robert. By their properties, causes and effects: Newton's Scholium on time, space, place and motion. *Studies in History and Philosophy of Science*, 26: p. 133-153; p. 295-321, 1995.
- SCRIBNER Jr., Charles. Henri Poincaré and the principle of relativity. *American Journal of Physics*, 32: p. 672-678, 1964.
- SHANKLAND, R. S. Michelson-Morley experiment. *American Journal of Physics*, 32: p. 16-35, 1964.
- STACHEL, John (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. The Swiss years: writings, 1900-1909. Princeton: Princeton University Press, 1989, v. 2.
- SWENSON Jr., Loyd S. *The ethereal aether. A history of the Michelson-Morley-Miller aether-drift experiments, 1880-1930*. Austin: University of Texas Press, 1972.
- TOULMIN, Stephen. Criticism in the history of science: Newton on absolute space, time, and motion, I. *The Philosophical Review*, 68 (1): p. 1-29, 1959.

WHITTAKER, Edmund T. *A history of the theories of aether and electricity*. London: Nelson, 1953. 2 vols.

ZAHAR, Elie G. Poincaré's independent discovery of the relativity principle. *Fundamenta Scientiae*, 4: p. 147-175, 1983.

Imagem

P. 55. Título: Einstein e Lorentz. Fotografia de Ehrenfest, 1921, na entrada da sua residência em Leiden. Acervo do Museu Boerhaave, Holanda.