

O surgimento da teoria da relatividade restrita

Roberto de Andrade Martins
Rmartins@ifi.unicamp.br
Grupo de História e Teoria da Ciência, Unicamp

INTRODUÇÃO

A teoria da relatividade restrita (ou relatividade especial) foi desenvolvida no final do século XIX e início do século XX. Albert Einstein formulou sua versão dessa teoria em 1905, embora uma grande parte da teoria já tivesse sido desenvolvida por outros autores, antes disso. Este capítulo irá mostrar como essa teoria surgiu, discutindo desde suas origens mais remotas até o trabalho de Einstein. No entanto, antes de apresentar essa história, é importante proporcionar uma visão geral da própria teoria da relatividade especial¹.

A teoria da relatividade estuda, basicamente, as diferenças que existem entre as medidas físicas realizadas em dois referenciais em movimento relativo. Um referencial é um sistema físico dotado de instrumentos de medida, em relação ao qual é possível fazer medições e experimentos. Podemos imaginar, por exemplo, um referencial parado em relação ao solo, e um outro referencial parado em relação a um avião que passa pelo céu. Na teoria da relatividade geral, os referenciais podem estar se movendo de qualquer modo (podem estar acelerados ou girando uns em relação aos outros). A teoria da relatividade restrita, que foi desenvolvida antes – e que será tratada aqui – estuda apenas referenciais *inerciais*, com movimentos relativos retilíneos e uniformes. Um referencial inercial é, basicamente, aquele em relação ao qual vale a lei da inércia – ou seja, se um corpo não está submetido a forças externas, então, quando ele é observado a partir de um referencial inercial, ele fica parado ou se move em linha reta, com velocidade constante. No entanto, o mesmo objeto, quando observado a partir de um outro referencial (não inercial), pode estar se movendo em uma trajetória curva, ou estar acelerado.

Do modo como Einstein apresentou a teoria da relatividade especial, ela se baseia em dois postulados – ou seja, em dois princípios que são tomados como ponto de partida e que não são provados pela própria teoria. Esses dois postulados são:

1. *Princípio da relatividade*, que afirma que as leis básicas da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais em movimento relativo uniforme. Seu conteúdo físico pode ser descrito de outra forma: os fenômenos físicos que ocorrem em um sistema isolado não dependem de sua velocidade e, portanto, não se pode medir a velocidade de um sistema por experiências puramente internas. Em particular, não se pode medir a velocidade da Terra utilizando apenas observações terrestres.
2. *Princípio da constância da velocidade da luz*, que afirma que a velocidade da luz (ou qualquer outra radiação eletromagnética) não depende da velocidade de sua fonte. Por exemplo: a luz emitida por uma lâmpada parada tem a mesma velocidade que a luz emitida por uma lâmpada com alta velocidade.

Einstein os introduziu, em seu artigo de 1905, da seguinte forma:

¹ Não é possível apresentar aqui uma descrição didática do próprio conteúdo da teoria da relatividade. Os leitores que não tenham qualquer conhecimento dessa teoria terão dificuldade em compreender o presente capítulo e devem procurar ler, antes, alguma obra que descreva a própria teoria – como, por exemplo, RUMER, Yuri; LANDAU, Lev Davidovich. *O que é a teoria da relatividade*. São Paulo: HEMUS, 2004. Pode-se também consultar: EINSTEIN, Albert. *A teoria da relatividade especial e geral*. Trad. Carlos Almeida Pereira. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

[...] as tentativas sem sucesso de verificar que a Terra se move em relação ao “meio luminoso” [éter] levaram à conjectura de que, não apenas na mecânica, mas também na eletrodinâmica, não há propriedades observáveis associadas à idéia de repouso absoluto, mas as mesmas leis eletrodinâmicas e ópticas se aplicam a todos os sistemas de coordenadas nos quais são válidas as equações da mecânica [...]. Elevaremos essa conjectura (cujo conteúdo será daqui por diante chamado de “princípio da relatividade”) à posição de um postulado; e, além disso, introduziremos um outro postulado que é apenas aparentemente inconsistente com o primeiro, a saber, que a luz no espaço vazio sempre se propaga com uma velocidade definida V que é independente do estado de movimento do corpo que a emite. (EINSTEIN, 1905, pp. 891-2)

A partir desses dois postulados são deduzidas muitas conseqüências importantes, que são pouco intuitivas e que contrariam a física clássica (ou seja, a física que existia até o final do século XIX).

Algumas dessas conseqüências são *cinemáticas*, ou seja, envolvem apenas conceitos de espaço e tempo e outros que dependem diretamente deles, como velocidade, aceleração, frequência, período, etc. Eis algumas delas:

- *Contração dos objetos.* Se dois objetos têm o mesmo tamanho quando estão parados um em relação ao outro, e um deles é colocado em movimento em relação ao outro, seus comprimentos já não serão mais iguais. Cada um deles parecerá menor (mais curto) quando medido de um referencial parado em relação ao outro; mas essa diferença só afeta as dimensões paralelas ao movimento (não as perpendiculares). Esse efeito pode ser representado pela fórmula abaixo, onde v é a velocidade de um referencial em relação ao outro, c é a velocidade da luz no vácuo, L_0 é o comprimento do objeto parado em relação ao referencial e L é o comprimento do objeto em movimento.

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- *Dilatação do tempo.* Se dois relógios têm o mesmo período (funcionam do mesmo modo) quando estão parados um em relação ao outro, e um deles é colocado em movimento em relação ao outro, seus períodos já não serão mais iguais. Cada um deles parecerá estar andando mais lentamente (período maior) quando medido de um referencial parado em relação ao outro. Esse efeito pode ser representado pela fórmula abaixo, onde T_0 é o período do relógio parado em relação ao referencial e T é o período do relógio em movimento.

$$T = T_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- *Relatividade da simultaneidade.* Se dois acontecimentos (eventos) ocorrem em lugares diferentes, ao mesmo tempo, em relação a um referencial, eles podem não ocorrer ao mesmo tempo quando observados em relação a um outro referencial que se move em relação ao primeiro. A quebra de simultaneidade só não ocorrerá se a reta que une os pontos onde ocorrem os dois eventos for perpendicular o movimento de um referencial em relação ao outro.
- *Adição de velocidades.* A lei de adição de velocidades da física clássica não é mais válida. Suponhamos três objetos A, B, C em movimento sobre uma mesma reta. De acordo com a física clássica, a velocidade de C em relação a A é igual à soma algébrica da velocidade de C em relação a B com a velocidade de B em relação a A, ou seja: ${}_aV_c = {}_bV_c + {}_aV_b$. No caso da teoria da relatividade, a adição de velocidades obedece a uma fórmula mais complicada:

$${}_aV_c = \frac{{}_bV_c + {}_aV_b}{1 + \frac{{}_bV_c \cdot {}_aV_b}{c^2}}$$

- *Velocidade limite.* A velocidade da luz não depende do referencial. Ela é a velocidade mais elevada que se pode obter adicionando-se velocidades inferiores à velocidade da luz².
- *Violação da causalidade.* Se fosse possível enviar sinais controláveis (por exemplo, vozes ou textos codificados) de um ponto para outro com velocidade superior à velocidade da luz no vácuo, os sinais seriam recebidos *antes de serem emitidos*, em relação a um certo conjunto de referenciais (ver MARTINS, 1986b). Ocorreria uma inversão temporal, ou violação da causalidade, porque o efeito (recebimento do sinal) ocorreria antes da sua causa (emissão do sinal).

A cinemática relativística pode ser descrita de forma sintética através de um conjunto de equações denominadas “transformações de Lorentz”. Elas relacionam as medidas de posição (x , y , z) e de tempo (t) de um mesmo evento, observadas em relação a dois referenciais diferentes (S e S'). As transformações de Lorentz são estas:

$$\begin{aligned}x' &= (x-vt) / \sqrt{1-v^2/c^2} = (x-vt)(1-v^2/c^2)^{-1/2} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= (t-vx/c^2) / \sqrt{1-v^2/c^2} = (t-vx/c^2)(1-v^2/c^2)^{-1/2}\end{aligned}$$

Todos os efeitos cinemáticos da teoria da relatividade especial podem ser deduzidos desse conjunto de equações, que indicam como as medidas de espaço e tempo dependem do referencial utilizado.

A teoria da relatividade especial pode também ser descrita de uma outra forma, considerando-se que o tempo é uma quarta dimensão análoga às três dimensões do espaço, porém com uma característica imaginária (no sentido matemático). As quatro coordenadas do espaço-tempo são x , y , z e ict , onde i é a unidade imaginária (raiz quadrada de -1). Cada acontecimento ou evento ocorre em uma certa posição do espaço-tempo, e a “distância” (intervalo relativístico) Δs entre dois eventos é dada por:

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2}$$

Esse intervalo relativístico é invariante, ou seja, ele tem o mesmo valor em relação a todos os referenciais. Quando se trabalha com as quatro dimensões do espaço-tempo, pode-se considerar que as transformações de Lorentz correspondem a uma simples mudança de coordenadas, como quando se giram os eixos de um sistema cartesiano de coordenadas.

Além da cinemática, existe também a *dinâmica relativística*, que estuda as relações que existem entre forças, energia, massa, quantidade de movimento e outras grandezas dinâmicas, quando medidas em relação a diferentes referenciais. Os dois principais efeitos da dinâmica relativista são:

- *Aumento da massa com a velocidade.* Se dois objetos têm a mesma massa quando estão parados um em relação ao outro, e um deles é colocado em movimento em relação ao outro, suas massas já não serão mais iguais. Cada um deles parecerá ter aumentado de massa, quando medido de um referencial parado em relação ao outro. Esse efeito pode ser representado pela fórmula abaixo, onde m_0 é a massa do objeto parado em relação ao referencial e m é a massa do objeto em movimento.

$$m = m_0 / \sqrt{1-v^2/c^2}$$

- *Relação entre massa e energia.* A massa de um objeto é proporcional à sua energia. Se a energia do objeto aumentar (por exemplo, se ele aumentar de temperatura ou aumentar de

² Muitos livros e artigos afirmam que este é o segundo postulado da teoria da relatividade. Não é. O segundo postulado afirma apenas que a velocidade *da fonte de luz* não afeta a velocidade da própria radiação emitida.

velocidade), sua massa também sofrerá um aumento correspondente. Essa relação é representada pela famosa fórmula:

$$E = m.c^2$$

As leis básicas da mecânica clássica continuam válidas na teoria da relatividade. Por exemplo: a lei da inércia, a segunda lei de Newton (com uma pequena modificação³) e a lei da ação e reação (ou lei da conservação da quantidade de movimento). Porém, outras equações sofrem modificações.

A teoria da relatividade não nasceu do estudo da mecânica, e sim do eletromagnetismo (como será mostrado mais adiante). As equações básicas do eletromagnetismo, chamadas de “equações de Maxwell”, foram inicialmente formuladas como leis que se aplicavam apenas ao estudo de fenômenos medidos por um referencial parado em relação ao éter. Imaginava-se, inicialmente, que os fenômenos eletromagnéticos poderiam ser diferentes quando estudados em relação a referenciais em movimento em relação ao éter. No entanto, como a experiência não mostrou a possibilidade de detectar o movimento da Terra em relação ao éter, foi necessário tornar o eletromagnetismo independente de um referencial privilegiado (o éter). As quatro leis de Maxwell não precisaram ser alteradas; mas foi necessário introduzir certas relações entre as grandezas eletromagnéticas medidas em relação a diferentes referenciais.

Além da mecânica (cinemática e dinâmica relativísticas) e do eletromagnetismo, a teoria da relatividade afeta todos os outros ramos da física. Se existisse alguma área da física (por exemplo, o estudo dos fenômenos térmicos) que não obedecesse à teoria da relatividade, seria possível medir a velocidade absoluta da Terra através do estudo de fenômenos térmicos. Como não se acredita na possibilidade de qualquer tipo de medida da velocidade absoluta da Terra, impõe-se a necessidade de que todas as teorias físicas obedçam ao princípio da relatividade; se não obedecerem, suas leis devem ser alteradas, de modo a se tornarem *covariantes*, isto é, de modo a terem a mesma forma em todos os referenciais inerciais. Além disso, é necessário estabelecer as fórmulas de transformação das várias grandezas físicas de cada teoria (por exemplo, temperatura, calor, entropia – no caso da termodinâmica) entre dois referenciais inerciais.

Bem, essas são algumas das idéias centrais da teoria da relatividade restrita. Vamos agora ver como tudo isso surgiu, ao longo de uma extensa história.

O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE NA MECÂNICA

O movimento da Terra, na Antigüidade

Todos nós aprendemos na escola que a Terra gira em torno do seu eixo e que, além disso, ela se move em torno do Sol. No entanto, não *sentimos* que a Terra está se movendo e não notamos ao nosso redor nenhum efeito desses movimentos. O princípio da relatividade surgiu, há muitos séculos, como um modo de conciliar as aparências (tudo se passa como se a Terra estivesse parada) com a teoria astronômica que considerava que a Terra se movia.

Nem sempre se pensou que a Terra estivesse em movimento. Na Antigüidade pensava-se que ela estivesse parada, evidentemente (ver MARTINS, 1994a). Parecem ter sido alguns filósofos pitagóricos os primeiros que sugeriram que ela se movia. Philolaos, no século V a.C.,

³ Costumamos representar a segunda lei de Newton pela equação $F=ma$, que estabelece uma proporcionalidade entre força e aceleração. Na verdade, Newton nunca escreveu nada parecido com isso. A segunda lei do movimento, conforme proposta por Newton, afirma que a *variação da quantidade de movimento* é proporcional à força. Isso pode ser representado pela seguinte equação: $F=dp/dt$, onde p representa a quantidade de movimento e t representa o tempo. Essa forma da segunda lei de Newton continua a ser válida, na teoria da relatividade especial. A outra forma ($F=ma$) não é utilizada atualmente, embora tenha sido empregada por Einstein e outros autores, no início do século XX.

supôs que o centro do universo estivesse ocupado por um fogo central (que não seria o Sol e que nunca seria visível da Terra), em torno do qual girariam a Terra, o Sol e todos os planetas. Outros filósofos antigos, menos radicais (como Niketas e Ecphantos), supuseram que a Terra está sempre no centro do universo, mas gira em torno de seu eixo. No século III a.C., Aristarchos de Samos propôs um sistema heliocêntrico, isto é, o Sol estaria parado no centro do universo e a Terra (com todos os planetas) giraria em torno dele.

Não conhecemos os detalhes de nenhuma dessas propostas e não sabemos se esses pensadores tentavam explicar o motivo pelo qual não sentimos nenhum efeito do movimento da Terra. Porém, a maior parte dos astrônomos e filósofos aceitava que a Terra estava parada no centro do universo, sem girar.

Nenhuma observação astronômica permitia determinar se a Terra está realmente parada. Para explicar o movimento diário (em 24 horas) dos astros, pode-se tanto supor que a Terra está girando de oeste para leste (que é a explicação que aceitamos hoje em dia) como supor que todo o céu está girando de leste para oeste, completando uma volta em um dia. Os detalhes dos movimentos dos planetas também podem ser explicados tanto do ponto de vista geocêntrico quanto heliocêntrico (ver MARTINS, 2003).

No século IV a.C. o filósofo Aristóteles apresentou um forte argumento experimental para mostrar que a Terra estava parada. Se jogarmos verticalmente para cima uma pedra (e se não houve vento), ela cairá exatamente no ponto de onde foi lançado, mesmo se ele for atirado a uma grande altura. Se a Terra estivesse girando, isso não poderia acontecer, porque a superfície da Terra (e a pessoa que lançou o objeto) se moveriam, enquanto a pedra estivesse no ar; e, quanto ela caísse, a pessoa já não estaria no mesmo lugar e, portanto, veria que o objeto não retornou ao ponto de lançamento (ver MARTINS, 1986a).

Pode-se pensar que o argumento não é forte, porque a Terra se moveria muito pouco enquanto a pedra estivesse no ar. Não é verdade. Acreditamos que a Terra dá uma volta em 24 horas. Já se sabia, no tempo de Aristóteles, o tamanho aproximado da Terra e, com os dados atuais, podemos calcular que a velocidade tangencial terrestre, no equador, é de 1.700 km/h, ou 460 m/s. Se estivermos distantes do equador a velocidade será menor, mas continuará sendo significativa. Assim, se estivermos no equador e se a pedra ficar no ar durante um décimo de segundo, o solo se deslocará 46 metros antes que ela retorne ao chão. Portanto, esperaríamos que o movimento de rotação da Terra produzisse fortes efeitos e fosse facilmente observado.

O argumento de Aristóteles foi aceito por quase todos os pensadores, sendo repetido e apoiado desde Ptolomeu (século II d.C.) até Tycho Brahe (século XVI). Além do experimento da pedra, foram citados outros fatos que pareciam indicar que a Terra estava parada. Se ela girasse, todos os objetos que estão em sua superfície deveriam ser atirados para longe, por causa de sua rotação rapidíssima. Se ela girasse, veríamos os pássaros e as nuvens passarem sobre nós, de leste para oeste, com grande velocidade, como os astros. Se ela girasse, seria mais difícil lançar uma flecha (ou dar um tiro de canhão) para leste do que para oeste. Enfim: não vemos nenhum efeito do movimento da Terra, e tudo indicava que deveriam existir certos efeitos, se ela girasse. Portanto, a conclusão mais razoável era a de que a Terra estava realmente parada.

Discussões sobre o movimento da Terra, da Idade Média a Copérnico

Durante a Idade Média, vários pensadores discutiram a argumentação de Aristóteles. A maioria deles concordou com o filósofo, mas houve outros que se posicionaram contra ele. Nicole Oresme (1320-1382), no século XIV, defendeu a idéia de que era impossível saber se a Terra estava parada ou em movimento, por qualquer tipo de experimento que fosse realizado. Em primeiro lugar, ele alegou que os fenômenos celestes não nos permitem decidir nada, pois poderiam ser interpretados tanto supondo que a Terra se move como supondo que os céus se movem. Apresentou para isso uma comparação, já feita antes por Witelo, a respeito de navios. Se dois navios estão se aproximando um do outro, no mar, os marinheiros de cada um deles pensam que é o outro que está se movendo. Se um navio se afasta do porto, as pessoas que estão no navio

pensam que é o porto que está se afastando. Nossa tendência natural é pensarmos que estamos parados e que as outras coisas se movem – a menos que surjam fortes evidências de que somos nós que estamos em movimento.

E o argumento das nuvens? Se a Terra girasse, não veríamos as nuvens e os pássaros passando rapidamente sobre nós, para oeste? Oresme respondeu que não: o ar e a água se movem com a Terra. Tudo se passa como se estivéssemos dentro de um navio, onde o ar é transportado junto com ele e não aparece nenhum vento.

Havia, no entanto, o argumento de Aristóteles, que agora era apresentado de uma forma um pouco diferente. Se uma pessoa estiver em um navio em movimento rápido e lançar uma seta para o alto, ela não cairá no navio, mas fora (atrás dele), porque o navio se moveu enquanto ela estava no ar. Da mesma forma, se a Terra girasse (para leste), então, quando lançássemos uma pedra para o alto, ela não cairia no mesmo lugar e sim para oeste.

Oresme respondeu que o argumento estava equivocado. A flecha não se move apenas verticalmente: ela também se move para leste, junto com a Terra e o ar, e por isso recai na Terra no lugar de onde partiu. Da mesma forma, dentro de um navio em movimento, apenas percebemos os movimentos em relação ao navio. Se movermos a mão para cima e para o algo ao longo do mastro, parecerá que a mão se move apenas verticalmente. Se lançarmos uma fecha para cima, ela terá tanto um movimento vertical quanto outro horizontal (acompanhando o navio) e cairá de volta dentro do navio.

Os argumentos de Oresme nos parecem bons e são semelhantes aos que utilizamos hoje em dia. No entanto, na época, parecerem absurdos e não foram aceitos pelos demais pensadores, porque entravam em choque com a física aceita por todos.

No século XVI Nicolau Copérnico (1473-1543) propôs sua teoria heliocêntrica e, como a Terra deveria se mover, era necessário entender por que não sentimos esse movimento. Copérnico supôs que o movimento de rotação da Terra era “natural”: tanto a Terra como um todo quanto suas partes (por exemplo, pedras e montanhas) têm uma tendência natural a girar em torno do seu eixo, dando uma volta por dia. Se tirarmos uma pedra do chão e depois a deixarmos cair, ela terá dois movimentos. Um deles será o movimento vertical, para baixo; o outro será o movimento natural de rotação em torno do eixo da Terra, que fará com que a pedra acompanhe o movimento do solo. Assim, o único movimento que observaremos será o vertical e parecerá que a Terra está parada – mas ela estará em movimento. Por outro lado, o fato de que o movimento de rotação da Terra seja “natural” impede que os corpos em sua superfície sejam atirados para longe dela (ver MARTINS, 2003).

Como aconteceu no caso de Oresme, as idéias de Copérnico também pareceram absurdas. Nenhum dos dois dispunha de uma nova física que pudesse substituir a física aristotélica; e seus argumentos eram simples hipóteses *ad hoc*, inventadas para justificar as suas estranhas idéias, mas não faziam parte de um sistema teórico aceitável.

Giordano Bruno (1548-1600), que defendeu a astronomia de Copérnico, publicou em 1584 um livro chamado *La cena de le ceneri*, onde apresentou uma nova resposta ao argumento da pedra. Suponhamos que um navio está se movendo rapidamente, descendo um rio. Se ele passar por uma ponte e uma pessoa, na ponte, soltar uma pedra quando o mastro estiver passado abaixo dela, a pedra cairá a uma certa distância atrás do mastro, porque o navio se move enquanto a pedra cai. Mas uma pessoa que esteja no mastro do navio soltar a pedra, ela cairá exatamente na base do mastro, e não para trás. Pois a pedra, antes de ser largada do topo do mastro, já possui uma “virtude impressa” e mantém a mesma velocidade do navio, além de adquirir uma velocidade de queda.

O argumento é semelhante ao de Oresme. Essa “virtude impressa” à qual Bruno se referiu é uma idéia que era aceita na época, semelhante ao conceito de inércia de Newton. Usando a mesma idéia, de que os corpos dentro do navio já possuem certa velocidade horizontal e tendem a manter essa velocidade, Bruno afirmou que se uma pessoa, ao pé do mastro, jogar uma pedra para cima, ela cairá de volta no mesmo ponto de onde foi lançada; e se uma pessoa lançar pedras

do alto do mastro para outros pontos do navio, atingirá o alvo, sem nenhum erro, por mais rápido que seja o movimento do navio. Tudo se passa como se o navio estivesse parado. Da mesma forma, embora a Terra se mova, não percebemos nenhum efeito desse movimento, quando lançamos objetos para cima ou para outras direções (ver MARTINS, 1986a).

Podemos dizer que, nessa obra de Giordano Bruno, já aparece uma idéia semelhante ao princípio da relatividade dos movimentos. A proposta de Bruno é muito boa, sob o ponto de vista da física atual – mas era problemática, na época, pelos motivos já expostos.

É importante comentar que nem Bruno nem qualquer dos pensadores dessa época se referia ao “princípio da relatividade dos movimentos”. Esse nome começou a ser utilizado apenas no final do século XIX.

O princípio da relatividade dos movimentos, de Galileo a Descartes

Galileo Galilei (1564-1642) foi outro pensador que apoiou a teoria de Copérnico e também se viu obrigado a responder aos argumentos contra o movimento da Terra. Em 1616, Galileo escreveu sobre as marés, e defendeu que esses fenômenos provavam o sistema de Copérnico. Além de ser imediatamente censurado pela Inquisição, Galileo foi criticado por Francesco Ingoli, que escreveu, sob a forma de uma carta dirigida a Galileo (mas que foi tornada pública) uma detalhada apresentação dos argumentos que pareciam provar que a Terra estava parada. Parece que Galileo não sabia, nesse momento, responder aos argumentos. Ele respondeu a Ingoli apenas 8 anos mais tarde (1624) e, nessa resposta, apresentou uma versão daquilo que podemos chamar de princípio da relatividade de Galileo.

Uma parte da análise de Galileo é semelhante à de Giordano Bruno e provavelmente foi inspirada pela leitura de sua obra. No entanto, em certo ponto Galileo apresentou um argumento novo. Ele propôs um tipo de experimento imaginário, no qual duas pessoas entrassem na cabine de um navio e fizessem vários experimentos lá dentro, tanto com o navio parado quanto em movimento. Afirmou, então, que todos os experimentos dariam exatamente o mesmo resultado, tanto no caso em que o navio estivesse parado quanto no caso em que ele estivesse se movendo rapidamente. Portanto, nenhum experimento realizado dentro da cabine do navio permite determinar se ele está se movendo. Da mesma forma, nenhum experimento na Terra permite saber se ela está parada ou em movimento (MARTINS, 1986a).

O mesmo argumento foi apresentado por Galileo em 1632, na segunda parte de seu livro “Diálogo sobre os dois maiores sistemas do mundo, Ptolomaico e Copernicano”. Lá, ele argumenta que “o movimento comum é como se não existisse”; o movimento da Terra não é percebido por nós porque é comum a todas as coisas da Terra. No entanto, ele comenta que apenas movimentos *uniformes* não são percebidos. Se o navio oscilar ou parar de repente, as pessoas dentro da cabine vão perceber isso. Da mesma forma, se a Terra oscilasse para um lado e para o outro, isso produziria efeitos. Seria exatamente por causa disso que existiriam as marés – produzidas pela composição do movimento de rotação e de translação da Terra, que produziria um tipo de oscilação.

A argumentação de Galileo não é totalmente coerente, e em diferentes partes de sua obra ele apresenta idéias diferentes (ver MARTINS, 1994b; MARTINS, 1998). Por exemplo: para explicar por qual motivo a rotação da Terra não faz com que os objetos terrestres sejam jogados para longe, ele afirma (como Copérnico) que essa rotação é “natural” e, por isso, não produz efeitos violentos.

René Descartes (1596-1649) foi outro pensador que defendeu a teoria de Copérnico, mas de um modo um pouco diferente. Para Descartes, todo movimento é mudança de posição em relação a algum objeto (só existem movimentos relativos). Assim, cada corpo possui um enorme número de movimentos diferentes, em relação a cada objeto do universo. Porém, nem todos os movimentos possuem a mesma importância. Somente o movimento em relação ao meio imediato (aquilo que toca o corpo) produz efeitos físicos. Assim, um peixe que esteja sendo levado pela correnteza de um rio está parado em relação à água que o cerca e, por isso, pode-se dizer que ele

está parado, embora tenha movimentos em relação à margem do rio e a outros corpos. Descartes acreditava que todos os planetas eram transportados por uma espécie de matéria invisível que girava em torno do Sol. Ele acreditava que não notamos o movimento da Terra porque ela não se move em relação ao que a cerca: o ar e essa matéria invisível.

Newton e o espaço absoluto

Nem a abordagem de Galileo nem a de Descartes são totalmente corretas e a versão final do princípio de relatividade foi formulada por Isaac Newton (1642-1727). Newton chamou a atenção para a diferença entre os movimentos de rotação e de translação. Suponhamos que temos um balde cheio de água, preso ao teto por uma corda. Quando tudo está parado, a superfície da água é plana e horizontal. Se o balde for colocado em rotação, a água não começará imediatamente a girar com ele; porém, depois de algum tempo, o balde e a água estarão girando juntos. Nesse momento, será possível ver que a superfície da água não fica plana e sim côncava (mais baixa no centro do balde e mais alta junto às paredes do balde). Porém, 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. De acordo com Galileo, também, “o movimento comum é como se não existisse”; portanto, quando a água e o balde estão se movendo juntos, esse movimento é como se não existisse e não poderia produzir efeitos. Porém, vemos que a água adquire uma forma diferente quando ela e o balde estão girando juntas.

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 (que é o caso considerado por Galileo, no exemplo do navio). 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.

No entanto, a Terra gira; e Newton percebeu que essa rotação deveria, sim, 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 conseqüências 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. 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). Ele *calculou* esses efeitos, que foram confirmados depois de algumas décadas (MARTINS, 1989). Assim, através de medidas físicas feitas na própria Terra é possível determinar que ela gira, e medir sua velocidade de rotação. No século XIX, Léon Foucault mostrou de forma espetacular alguns efeitos da rotação da Terra, através do “pêndulo de Foucault” e do giroscópio que inventou.

Já que era possível observar efeitos de rotação, Newton admitiu 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.

A análise de Newton, apresentada no seu livro “Princípios matemáticos da filosofia natural”, referia-se apenas aos fenômenos mecânicos (ou seja: aos movimentos de partículas materiais, submetidas a forças). Se todos os fenômenos da Física puderem ser reduzidos a movimentos de partículas regidas por forças mútuas (a hipótese básica do mecanicismo), então o princípio de relatividade de Newton deve se aplicar a *todos os fenômenos*, indistintamente. Mas se existirem fenômenos que não são de natureza mecânica, a análise de Newton não nos permite afirmar nada sobre eles.

A concepção de Newton a respeito de um espaço absoluto foi depois criticada por George Berkeley e, bem mais tarde (século XIX) por Ernst Mach. Esses dois autores consideraram que a idéia de um espaço absoluto que não pode ser observado mas que produz efeitos físicos era inaceitável. 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.

OS FENÔMENOS LUMINOSOS E O ÉTER

A velocidade e a natureza da luz

Para Newton, a luz seria constituída por partículas muito pequenas, que se moveriam pelo espaço com grandes velocidades. Portanto, de acordo com Newton, o princípio da relatividade também deveria se aplicar à luz. Mas isso não era tão evidente para outros autores.

É verdade que, alguns séculos antes de Newton, Witelo havia afirmado que observando-se (com a visão) dois navios que se movem um em relação ao outro, não é possível descobrir qual está se movendo *realmente*, e que os tripulantes de cada navio atribuem o movimento ao outro navio. Galileo, também, afirmou que o movimento não influenciava nos fenômenos ópticos, pois escreveu que a visão das partes de um navio não é alterada por seu movimento. Se, por exemplo, fixarmos uma luneta em um navio apontando-a para a extremidade do seu mastro, a posição da luneta não precisará ser alterada quando o navio se mover mais rapidamente, ou mais devagar, ou mesmo parar.

No entanto, até a época de Galileo, havia enormes dúvidas sobre o que era a luz. O próprio Galileo tentou medir a velocidade da luz e não conseguiu, afirmando apenas que era excessivamente grande. Descartes, estudando eclipses da Lua, concluiu que a velocidade da luz era *infinita*. A partir daí, argumentou que a luz não podia ser constituída por partículas – nenhuma partícula pode ter velocidade infinita, pois isso significaria ir de um ponto a outro em um tempo nulo, ou seja, a partícula estaria em todos os lugares ao mesmo tempo. Descartes imaginou que a luz poderia ser uma *pressão* que se propaga do Sol até nós, atravessando a matéria invisível que (segundo ele) preenche o espaço celeste.

Em 1675, Olaus Römer (1644-1710) concluiu, no entanto, que a luz demora um certo tempo para atravessar grandes distâncias. Ele estudou cuidadosamente os eclipses dos satélites de Júpiter e percebeu que esses eclipses aconteciam *antes do previsto* quando a Terra estava se aproximando de Júpiter, e *depois do previsto* quando a Terra estava se afastando daquele planeta. Analisando um grande conjunto de medidas, concluiu que a luz demorava cerca de 22 minutos⁴ para percorrer uma distância igual ao diâmetro da órbita terrestre.

Se a luz não se transmite de forma instantânea, então ela poderia ser formada por partículas, como Newton efetivamente sugeriu. No entanto, poderia também ser constituída por ondas se propagando no meio transparente que preenche o espaço (o éter luminífero), como sugeriu Christiaan Huygens (1629-1695).

No final do século XVII ainda se discutia a natureza da luz. No entanto, durante o século XVIII, houve quase uma unanimidade em aceitar que a luz seria constituída por partículas.

Aberração da luz

Suponhamos que uma fonte luminosa esteja se movendo. Entre o instante em que a luz sai do objeto e o momento em que chega ao observador, a fonte se deslocou para uma nova posição.

⁴ O tempo é de 16 minutos e 37 segundos, de acordo com medidas posteriores.

Assim, se uma fonte luminosa se move, ela é vista onde *estava* e não onde *está* no momento em que é vista. Essa diferença entre a posição real e a posição aparente da fonte luminosa é chamada de *aberração*.

Se o movimento da fonte luminosa for perpendicular à reta que une a fonte ao observador, então o ângulo de aberração α será dado pela relação:

$$\tan \alpha = v / U$$

onde v é a velocidade da fonte luminosa e U é a velocidade da luz. Normalmente a razão v/U é pequena (muito menor do que 1) e, nesse caso, pode-se utilizar a relação:

$$\alpha \cong \tan \alpha = v / U$$

Se a fonte luminosa está parada mas o observador se move, ele também não observa a direção real da fonte luminosa. Nesse caso também existe uma aberração da luz. É um fenômeno semelhante ao que ocorre quando nos movemos sob a chuva: se a chuva estiver caindo verticalmente, mas estivermos correndo, ela atingirá principalmente nossa parte da frente, como se estivesse caindo inclinada.

Nos dois casos (movimento da fonte ou do observador), o modo de calcular a aberração é o mesmo, embora os modos de entender o fenômeno sejam diferentes. Se tanto a fonte quanto o observador estiverem se movendo com velocidades iguais e na mesma direção, não há aberração, porque os dois efeitos (do movimento da fonte e do movimento do observador) se cancelam. A aberração da luz só depende do movimento *relativo* entre a fonte e o observador. Portanto, embora não conhecesse a teoria da aberração, Galileu adivinhou corretamente que o movimento do navio não influi na direção em que a luneta deve ser apontada, para observar algum ponto do próprio navio.

Suponhamos, agora, que a Terra se move em torno do Sol (como acreditamos atualmente) e que observamos algumas estrelas a partir da Terra. Por causa do efeito de aberração, o movimento da Terra produzirá uma aberração da luz, e não veremos as estrelas nos seus lugares “reais”. Porém, não temos nenhum modo de saber onde as estrelas estão, a não ser olhando para elas. Assim, não podemos notar diretamente, pela aberração da luz das estrelas, que a Terra está em movimento.

No entanto, existe um modo *indireto* de observar a aberração estelar. Ao longo do ano, a Terra se move em torno do Sol primeiro para um lado, depois para o outro. Se considerarmos dois instantes separados por seis meses, então a Terra terá movimentos *opostos* nesses dois dias, e as aberrações da estrela também terão sentidos opostos, nesses dias. Se houver algum modo de comparar as posições aparentes de uma estrela, com 6 meses de intervalo, então será possível notar que a estrela *parece oscilar* para um lado e para o outro. Medindo essa oscilação, podemos descobrir o valor da aberração e a velocidade da Terra. Somente se podem medir diferenças entre direções *aparentes*, por isso só são mensuráveis *variações* de velocidade.

O astrônomo James Bradley (1693-1762) descobriu a existência desse fenômeno, quase por acaso, em 1728. Inicialmente, Bradley estava tentando observar a *paralaxe* das estrelas – uma outra mudança de posição aparente das estrelas, ocasionada pelo movimento da Terra em sua órbita. A paralaxe é um efeito de *diferença de perspectiva*, ou seja, uma mudança de posição aparente da estrela porque ela está sendo observada de diferentes pontos. Ela não depende da velocidade da Terra, depende apenas do tamanho da órbita terrestre e da distância da Terra até a estrela. A aberração é diferente, pois depende da velocidade (e não do tamanho da órbita terrestre) e não depende da distância da estrela. Além de serem calculadas de modo diferentes, e terem valores diferentes, as *direções* desses dois fenômenos também são distintas. Se estivermos observando estrelas que estão em uma direção perpendicular à órbita terrestre, a aberração estelar e a paralaxe da estrela serão *perpendiculares entre si*.

Quando Bradley estudou a posição de estrelas próximas ao pólo celeste, ele observou que a posição das mesmas variava ao longo do ano; porém todas as estrelas mostravam os mesmos movimentos, e eles eram diferentes daquilo que se podia esperar no caso da paralaxe. Ele acabou pensando em alguma outra explicação, e chegou à idéia da aberração estelar.

As medidas de Bradley mostraram que o efeito era máximo para as estrelas próximas ao pólo celeste e que, nesse caso, a variação angular máxima (para um lado e para o outro) era de $20,2''$. Utilizando a fórmula indicada acima ($\alpha \cong \tan \alpha = v/U$), Bradley calculou que U/v seria igual a 10.210 (ou seja, a velocidade da luz seria dez mil vezes superior à velocidade orbital da Terra). O tempo que a Terra demora para dar uma volta em torno do Sol é de um ano (365,25 dias); se ela percorresse o raio de sua órbita, com a mesma velocidade, demoraria um tempo igual a um ano dividido por duas vezes pi (2π). Portanto, a Terra demoraria 58 dias para percorrer o raio de sua órbita. Como a luz tem uma velocidade 10.210 vezes maior, ela demoraria um tempo de 8 minutos e 12 segundos para percorrer o raio da órbita terrestre (ou seja, para vir do Sol até a Terra). Este valor obtido por Bradley é muito mais próximo do atualmente aceito do que a estimativa de Römer, descrita anteriormente.

Note-se que, como a aberração estelar depende de v/U , onde v é a velocidade da Terra e U a velocidade da luz, o fato descoberto por Bradley de que todas as estrelas próximas umas das outras têm a mesma aberração indicava que a velocidade da luz emitida por todas as estrelas é a mesma. Se as estrelas se movem e se a velocidade da luz dependesse da velocidade da estrela, a aberração seria diferente para diferentes estrelas, e as posições relativas das estrelas mudariam. Além disso, se a velocidade da luz dependesse da cor da luz, as estrelas seriam vistas como uma faixa espectral – porque cada cor sofreria um desvio diferente.

Na teoria ondulatória da luz, é natural pensarmos que a velocidade da luz não deve depender nem do movimento das estrelas nem da cor da luz (assim como a velocidade do som, no ar, não depende nem do movimento da fonte de som, nem da frequência sonora). No entanto, considerando-se a luz como um feixe de partículas (como se acreditava no século XVIII) não era de modo nenhum evidente que a velocidade da luz não dependa nem da velocidade da fonte nem da cor.

A descoberta da aberração estelar permitia concluir que a Terra se movia em torno do Sol – ou que todas as estrelas oscilavam, com um período de um ano, em torno da Terra. A aberração mostra um movimento *relativo*, não absoluto. Esse efeito não viola o princípio da relatividade dos movimentos.

Aberração em meios refringentes

Havia, no entanto, alguns aspectos do fenômeno de aberração que não estavam totalmente claros. Em 1753, Thomas Melvill publicou um trabalho no qual discutia o seguinte problema: a aberração estelar depende de v/U – mas U é a velocidade da luz no vácuo, na atmosfera, ou no olho do observador? Bradley havia feito seus cálculos supondo que U era a velocidade da luz no espaço entre a estrela e a Terra. Mas talvez o que fosse realmente relevante seria a velocidade da luz *no lugar onde ela é observada*.

A dúvida é pertinente. Suponhamos que estamos olhando para uma estrela com um telescópio e que é o observador que está se movendo (não a estrela). Pode-se mostrar que a direção para onde o telescópio deve ser apontado, para que a estrela possa ser vista, vai depender da velocidade do telescópio *e da velocidade da luz dentro do tubo*. Isso é diferente do que acontece no caso em que a fonte de luz se move, porque então é a velocidade da luz *no espaço entre a fonte e o observador* que deve ser utilizada na equação.

A partir dessa constatação, em 1785 o padre Roger Boscovich (1711-1787) teve uma idéia muito interessante. Se tivermos dois telescópios iguais, porém um deles estiver cheio de ar e o outro estiver cheio de água, a aberração estelar deve ser diferente, neles. Assim, comparando-se um telescópio com o outro, em um único instante (sem precisar observar durante um ano inteiro) seria possível detectar a aberração da luz e medir a velocidade da Terra. Haveria ainda uma outra consequência mais estranha. Suponhamos que temos uma fonte luminosa na própria Terra, e essa fonte é observada de um ponto distante, com os dois telescópios. A aberração *da fonte* é igual nos dois casos; mas a aberração *devida ao movimento do observador* será diferente nos dois

casos. Assim, os dois telescópios deverão ser apontados em direções ligeiramente diferentes, para que possamos ver a fonte terrestre. Logo, seria possível medir um efeito de aberração e determinar a velocidade da Terra por um experimento puramente terrestre (sem olhar para as estrelas). Portanto, o princípio da relatividade dos movimentos não seria válido para a óptica.

A conclusão era estranha e entrava em conflito com aquilo que já explicamos antes – que todos os fenômenos que pudessem ser explicados pela mecânica newtoniana teriam que obedecer ao princípio da relatividade.

Alguns anos depois, em 1790, John Robinson (1739-1805) esclareceu alguns aspectos do problema. A análise da aberração era mais complicada do que se pensava. Quando se utilizasse um telescópio cheio de água, seria necessário calcular o que ocorre quando a luz *penetra na água*, que está em movimento junto com o telescópio. Estudando os detalhes do fenômeno, Robinson concluiu que, de acordo com a teoria newtoniana (corpuscular) da luz, a aberração seria igual com um telescópio vazio ou com água, obedecendo portanto ao princípio da relatividade dos movimentos. Porém, parecia que os efeitos seriam diferentes se fosse utilizada a teoria ondulatória da luz e, nesse caso, seria possível medir a velocidade da Terra através do estudo de um experimento de aberração feito na própria Terra (com o telescópio e a fonte luminosa se movendo juntos).

A teoria de Fresnel

Na época em que os trabalhos acima descritos foram publicados, quase todos os físicos aceitavam a teoria corpuscular da luz. Como essa teoria era mecânica, devia obedecer ao princípio da relatividade. Mas a teoria ondulatória não se baseava também em movimentos do éter, que deveriam obedecer igualmente à mecânica? Isso não era muito claro – mas não era um problema que preocupasse muitas pessoas, já que a teoria ondulatória tinha poucos partidários.

Em 1809, François Arago (1786-1853) realizou um experimento sobre a deflexão da luz das estrelas em um prisma. Ele supunha que seria possível medir a velocidade da Terra em relação às estrelas utilizando esse experimento. Seu raciocínio era o seguinte. Quando a luz passa de um meio transparente para outro (por exemplo, quando passa do ar para o vidro), o desvio que ela tem (refração) depende da variação de velocidade que ela sofre. Suponhamos que a luz que vem das estrelas possa ter diferentes velocidades, sendo maior quando estamos nos aproximando da estrela e menor quando estamos nos afastando – uma suposição válida, se admitirmos que a luz é constituída por partículas que obedecem à física newtoniana. Se a velocidade da luz dentro do vidro for sempre a mesma, então a luz sofrerá diferentes desvios, conforme venha de uma estrela ou de outra. Arago esperava que, ao observar a passagem pelo prisma da luz de estrelas em direção à qual a Terra está se movendo (por causa do seu movimento orbital) o desvio seria maior do que ao medir o desvio da luz proveniente das estrelas no sentido oposto. Esse efeito não violaria o princípio da relatividade, mas permitiria medir velocidade da Terra em relação às estrelas.

Ao realizar o experimento, no entanto, Arago não notou nenhuma diferença entre os dois casos. O resultado foi contrário à expectativa inicial, mas ele logo procurou explicá-lo utilizando a teoria corpuscular da luz. Tanto a concepção do experimento quanto sua realização e a análise que Arago fez tinham problemas – mas não vamos entrar nos detalhes, aqui. Mais importante do que isso é descrever algumas conseqüências dessa pesquisa.

Nas duas primeiras décadas do século XIX estava acontecendo uma mudança nas teorias sobre a natureza da luz. Embora, até o fim do século XVIII, quase todos os físicos aceitassem a teoria corpuscular, começaram a surgir no início do século XIX importantes evidências favoráveis à hipótese ondulatória. Os principais responsáveis por essa mudança foram Thomas Young (1773-1829) e Augustin Jean Fresnel (1788-1827). Fresnel admitia um éter em repouso, em todo o universo – ou seja, o movimento da Terra não afetaria o éter, e este não seria arrastado pela Terra. O éter seria capaz de atravessar todos os objetos, por mais espessos que fossem. Com uma hipótese desse tipo era fácil explicar, por exemplo, a aberração da luz das estrelas.

Como já foi explicado antes, o princípio da relatividade dos movimentos se aplica à teoria corpuscular da luz e torna impossível realizar experimentos ópticos que pudessem medir a velocidade absoluta de translação da Terra. Porém, se a luz for uma onda do éter, temos uma nova situação, pois talvez fosse possível medir a velocidade de translação da Terra *em relação ao éter*. Se isso fosse possível, não seria uma violação do princípio de relatividade, propriamente dita, pois estaríamos medindo uma velocidade relativa (a velocidade da Terra em relação a uma entidade física, o éter). Assim como um navio pode medir sua velocidade em relação à água, e um avião pode medir sua velocidade em relação ao ar, não seria absurdo pensar que talvez fosse possível medir a velocidade da Terra em relação ao éter.

À medida que a situação se alterava, Arago começou a pensar se seus resultados não entrariam em conflito com a teoria ondulatória. Em 1818, Arago resolveu consultar Fresnel a respeito do seu antigo experimento, perguntando-lhe se seria possível explicar o efeito nulo obtido, utilizando a teoria ondulatória. Fresnel apresentou uma resposta positiva em um artigo, sob a forma de uma carta dirigida a Arago, que foi publicada em 1818 na revista *Annales de Chimie et de Physique*, da qual o próprio Arago era um dos editores.

O artigo de Fresnel, chamado “Carta de Augustin Fresnel a François Arago sobre a influência do movimento terrestre em alguns fenômenos de óptica”, lançou as bases da *óptica ondulatória dos corpos em movimento*.

A luz seria uma onda do éter e sua velocidade em relação ao éter seria constante. Porém, dentro dos corpos transparentes, a velocidade da luz diminui,⁵ tornando-se igual a c/n , onde n é o índice de refração. Para explicar isso, seria necessário admitir que o éter sofre alguma modificação nos meios transparentes.

Para analisar o que poderia ocorrer com o éter, Fresnel parece ter se guiado por uma analogia com o som. No caso do som, a velocidade u depende da pressão P e da densidade d do ar ou gás onde está se propagando:

$$u = k \sqrt{P/d}$$

Talvez a velocidade da luz pudesse também depender da pressão e da densidade do éter. Suponhamos, então, que no espaço vazio a pressão e a densidade do éter são P_0 e d_0 , e a velocidade da luz é c , enquanto dentro de um material transparente a pressão e a densidade seriam P e d , e a velocidade da luz seria c' . Teríamos:

$$c = k \sqrt{P_0/d_0}$$

$$c' = k \sqrt{P/d}$$

Se tanto a pressão quanto a densidade do éter variassem, seria difícil prosseguir com a análise. No entanto, pode-se supor que a pressão do éter é a mesma, dentro e fora dos materiais transparentes – ou seja, pode-se supor que há um certo equilíbrio de pressão do éter em todos os lugares. Alguns corpos, no entanto (os materiais transparentes), produziram algum tipo de atração do éter, ou condensação do éter, aumentando sua densidade. Teríamos, então:

$$c' = k \sqrt{P_0/d}$$

Com essa hipótese, torna-se possível comparar as densidades do éter no vácuo e dentro dos corpos transparentes. Sabemos que $c' = c/n$. Portanto, combinando todas as equações anteriores, temos:

$$c' = c/n = k \sqrt{P_0/d} = k \sqrt{P_0/d_0} / n \therefore d = n^2 d_0$$

Ou seja: nos meios transparentes há uma maior densidade de éter.

⁵ Segundo a teoria corpuscular, a velocidade da luz deveria *aumentar* quando ela entrasse em um corpo transparente; mas, de acordo com a teoria ondulatória, ela deveria *diminuir*. Não havia experimentos, na época, que permitissem testar essa diferença. Apenas em meados do século XIX foram feitas medidas de velocidade da luz dentro da água – e os resultados confirmaram a teoria ondulatória.

A justificativa que apresentamos acima não aparece de forma muito clara no trabalho de Fresnel, mas aparentemente foi através dessa comparação com o som que ele chegou à sua relação $d=n^2d_0$.

Em seguida, Fresnel analisou o que acontece quando um corpo transparente se move em relação ao éter. Ele supôs que o *excesso de éter* fica preso ao material transparente e se move com ele; mas que uma parte do éter atravessa livremente o objeto. A fração f do éter que é transportada junto com o objeto é chamada de “coeficiente de arrastamento do éter, de Fresnel”, e tem o valor:

$$f = (d-d_0)/d_0 = (n^2-1)/n^2 = 1-1/n^2$$

Fresnel analisou, então, a velocidade da luz dentro de um objeto transparente em movimento. Se o objeto está parado, a velocidade da luz é simplesmente c/n . Porém, uma parcela $f=(1-1/n^2)$ do éter está se movendo junto com o objeto, com a velocidade v . A velocidade resultante w da luz será dada, segundo Fresnel, por:

$$w = c/n + fv = c/n + (1-1/n^2)v$$

Ou seja: se um objeto transparente está se movendo em relação ao éter, ele arrasta parcialmente o éter e, portanto, arrasta também a própria luz. A velocidade da luz é parcialmente afetada pelo movimento do corpo transparente.

Depois de obter esses resultados, Fresnel os aplicou à análise do experimento proposto por Boscovich e ao experimento realizado por Arago. Calculando detalhadamente o que acontecia quando a luz penetrava na água (no caso do telescópio cheio de água) ou no prisma, ele mostrou que existiam vários efeitos que se anulavam e que, no final das contas, não era possível observar nenhum efeito do movimento da Terra através do éter utilizando esses experimentos.

Os cálculos feitos por Fresnel são altamente complicados e, em vários pontos, ele fez uma simplificação: levou em conta apenas termos em que aparecia a razão entre a velocidade da Terra e a velocidade da luz (v/c) elevada à primeira potência e desprezou termos de segunda ordem $(v/c)^2$ ou de ordens superiores. Ou seja: a teoria de Fresnel é uma teoria de *primeira ordem* em v/c .

Dentro dos limites de sua análise (ou seja, admitindo-se todas as suas hipóteses e considerando apenas efeitos de primeira ordem), Fresnel provou que os dois experimentos analisados não permitiriam detectar nenhum efeito do movimento da Terra através do éter. Era um resultado inesperado, por causa do que foi exposto anteriormente: se existia o éter e se a luz era uma onda do éter, seria plausível que existissem fenômenos ópticos capazes de mostrar efeitos do movimento da Terra através do éter.

Em 1839, Jacques Babinet (1794-1872) realizou um novo experimento de primeira ordem, comparando através de um método interferométrico as velocidades da luz dentro de um bloco de vidro, nos casos em que a luz se move no sentido do movimento da Terra, e no sentido oposto. A análise quantitativa do fenômeno, utilizando a teoria ondulatória da luz, parecia indicar que deveria surgir um efeito mensurável proporcional à velocidade da Terra. No entanto, nenhum efeito foi observado. Embora Babinet não tenha aplicado a teoria de Fresnel ao seu experimento, é possível provar que, levando-se em conta o arrastamento parcial do éter pelo vidro, prevê-se um efeito nulo desse experimento.

Stokes e o éter

A despeito do sucesso que a teoria de Fresnel obteve em explicar o resultado de alguns experimentos, essa teoria era extremamente complexa. George Gabriel Stokes (1819-1903) propôs, em 1845, uma nova teoria do éter, mais simples do que a de Fresnel em vários aspectos.

A teoria de Stokes propunha que o éter seria semelhante a um líquido viscoso, que aderiria à superfície dos corpos, sendo quase totalmente arrastado pela Terra, ficando em repouso em relação a ela na região próxima ao solo. Tal arrastamento faz com que qualquer experimento óptico puramente terrestre independa do movimento da Terra, o que explica de forma direta e simples o resultado nulo dos experimentos de Boscovich, Arago e Babinet.

Por quê ninguém havia pensado nisso antes? Porque anteriormente se imaginava que qualquer teoria na qual o éter fosse arrastado pela Terra seria incapaz de explicar a aberração estelar. O raciocínio utilizado (errôneo) era de que, se a Terra arrastasse o éter em sua proximidade, todos os fenômenos ópticos próximos à Terra (incluindo o funcionamento do telescópio) se comportariam como se não houvesse nenhum movimento, e portanto não poderia ser observada a aberração. No entanto, Stokes provou que era possível explicar a aberração estelar, em sua teoria, mostrando que haveria uma gradual mudança de direção da luz à medida que ela atravessasse as sucessivas camadas de éter com diferentes velocidades. Assim, ele conseguiu mostrar que sua teoria era compatível com todos os fenômenos conhecidos.

Embora tivesse proposto sua nova visão a respeito do éter, o próprio Stokes mostrou que a teoria de Fresnel era de grande valor. Além de explicar o experimento de Arago e prever um efeito nulo para o telescópio com água, a teoria do arrastamento parcial do éter podia explicar o experimento de interferência de Babinet, como foi mostrado por Stokes. Neste, como nos outros casos, a análise quantitativa é complexa, e envolve o cancelamento de vários efeitos diferentes. Em 1846, Stokes proporia a seguinte generalização para esses resultados: embora a Terra se mova através do éter e a luz seja transmitida pelo éter, os fenômenos da óptica geométrica (reflexão, refração e propagação retilínea) não permitem detectar esse movimento.

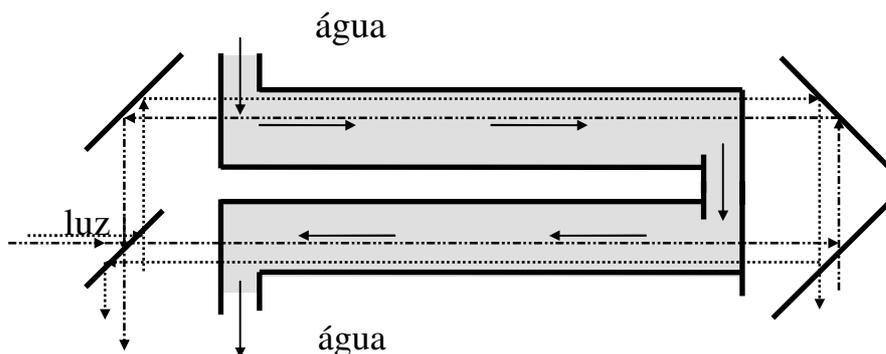
O experimento de Fizeau

A teoria do éter de Fresnel tinha aspectos estranhos e podia parecer até inútil, já que mostrava que não era possível detectar o movimento da Terra em relação ao éter. Porém, em meados do século XIX, a teoria ondulatória da luz foi confirmada e tornou-se necessário refletir mais profundamente a respeito da natureza do éter.

Em 1850, Jean-Bernard-Leon Foucault (1819-1869) e Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) fizeram as primeiras medidas terrestres da velocidade da luz, através de métodos diferentes, que deram resultados concordantes. No mesmo ano, Foucault conseguiu medir a velocidade da luz na água e mostrar que ela era menor do que no ar, confirmando assim a previsão da teoria ondulatória da luz.

No ano seguinte (1851), Fizeau fez um experimento destinado a testar a hipótese do arrastamento do éter pelos corpos em movimento. O princípio básico do experimento era fazer a luz atravessar um tubo com água em movimento, e medir a velocidade da luz nos dois sentidos, para ver se existia o arrastamento parcial da luz previsto por Fresnel. No entanto, como a variação prevista para a velocidade da luz era muito pequena, seria impossível fazer as medidas e compará-las diretamente. Assim, Fizeau elaborou uma aparelhagem que permitia comparar as velocidades nos dois sentidos através de um fenômeno de interferência, sem precisar medir efetivamente as duas velocidades.

O sistema utilizado por Fizeau é apresentado de forma esquemática na figura abaixo. Uma corrente de água percorre um tubo em forma de U, e dois feixes luminosos passam pela água, em sentidos opostos. Esses dois feixes são depois reunidos e observa-se sua interferência.



A defasagem dos dois feixes deveria mudar, quando a velocidade da água é alterada (ou quando o sentido do movimento da água é mudado), e a teoria de Fresnel permitia prever o valor dessa defasagem Δt , em função do comprimento L total do tubo, da velocidade v da água, do seu índice de refração n e da velocidade da luz no vácuo c :

$$\begin{aligned}\Delta t &= L / [c/n - v.(1 - 1/n^2)] - L / [c/n + v.(1 - 1/n^2)] = \\ &= [2Lv.(n^2 - 1)] / [c^2 - v^2(n^2 - 1)^2] \cong 2Lv(n^2 - 1)/c^2\end{aligned}$$

O deslocamento δ das franjas de interferência é proporcional a essa defasagem e depende do comprimento de onda λ da luz utilizada:

$$\delta = c \Delta t / \lambda$$

No experimento realizado por Fizeau, a água não podia ter uma velocidade muito alta, porque se entrasse em turbulência isso impediria a observação da interferência da luz. Ele utilizou uma velocidade de 7 m/s. Cada parte do tubo em U tinha um comprimento de cerca de um metro e meio (ou seja, o comprimento total era de aproximadamente 3 metros). O índice de refração da água é cerca de 1,33, e o comprimento de onda da luz utilizada era de $5,26 \times 10^{-7}$ m. A previsão teórica, a partir da teoria de Fresnel, era de um deslocamento das franjas igual a $\delta = 0,20$ franjas. Se houvesse arrastamento total do éter pela água, o efeito seria de 0,46 franjas; sem nenhum arrastamento, o efeito seria zero.

O resultado experimental foi um deslocamento de 0,23 franjas, confirmando assim a teoria. Fazendo depois uma experiência com ar, em vez de água, Fizeau não observou nenhum efeito. Esse resultado era compatível com a teoria, pois nesse caso o índice de refração é muito próximo de 1, e o deslocamento previsto era inferior à sensibilidade do experimento.

O experimento de Fizeau proporcionou uma impressionante confirmação da teoria de arrastamento do éter, de Fresnel. Como a teoria do éter de Stokes não previa o fenômeno observado, ela foi deixada de lado por quase todos os físicos, a partir desse momento. Parecia, portanto, que tudo estava claro, em meados do século XIX: a luz era realmente uma onda do éter, e o éter se comportava, nos corpos transparentes, exatamente como Fresnel havia previsto.

Experimentos de aberração

Como vimos, Fresnel havia analisado o experimento do telescópio cheio de água, proposto por Boscovich, e utilizando sua teoria havia concluído que ele não permitiria observar nenhum efeito do movimento da Terra. No entanto, o experimento não havia sido efetivamente realizado, naquela época.

Em 1861 Lorenzo Respighi (1824-1889) fez pela primeira vez um experimento para procurar a existência de aberração utilizando fonte luminosa terrestre, que era observada através de um telescópio cheio de água. Se não existisse o arrastamento do éter pela água, deveriam ser observadas variações regulares da posição aparente da fonte luminosa, de aproximadamente $16''$ de arco. O resultado experimental foi a observação de movimentos desordenados de cerca de $2''$ de arco, compatíveis com um efeito nulo. Assim, o autor concluiu que a experiência era favorável à teoria de Fresnel.

Uma experiência realizada pelo astrônomo Ernst Friedrich Wilhelm Klinkerfues (1827-1884) em 1867, entretanto, apresentou uma conclusão contrária à teoria Fresnel. Ele realizou a experiência de aberração astronômica com o tubo do telescópio cheio de água. Previu que, se não ocorresse o cancelamento dos efeitos previsto pela teoria de Fresnel, deveria ser observada uma variação de $8''$ de arco na ascensão reta de certas estrelas. Afirmou ter observado efeitos de aproximadamente $7''$, contrários portanto à teoria de Fresnel.

Pouco tempo depois, Martinus Hoek (1834-1873) realizou dois experimentos que deram resultados favoráveis à teoria de Fresnel. A primeira, em 1868, era semelhante à de Babinet (de 1839) e as observações confirmaram o resultado nulo. No ano seguinte, ele realizou a experiência de aberração terrestre com o telescópio cheio de água. Se não houvesse o arrastamento do éter previsto por Fresnel, deveria haver um deslocamento de 0,24 mm na posição da imagem. O deslocamento observado foi 50 vezes menor do que isso. Hoek concluiu que existe o arrastamento, e que o valor do coeficiente de Fresnel é correto, com erro máximo de 2%.

O astrônomo inglês George Biddell Airy (1801-1892) repetiu os experimentos de Klinkerfues sobre aberração estelar utilizando um telescópio cheio de água, em 1872-3. Fez medidas da declinação da estrela δ de Draco com intervalos de 6 meses entre as observações. Airy concluiu que a aberração estelar tem sempre o mesmo valor, com ou sem água e que, portanto, Klinkerfues estava errado.

Em 1874, Éleuthère Élie Nicolas Mascart (1837-1908) realizou um grande conjunto de experimentos ópticos procurando efeitos do movimento da Terra através do éter. Estudou o desvio da luz por um prisma, investigou a posição das faixas de interferência em anéis de Newton, fez um experimento semelhante ao de Babinet, além de outros. Em nenhum caso observou efeitos regulares que pudessem ser associados ao movimento da Terra. Assim, em todos os casos, os resultados eram compatíveis com a teoria de Fresnel.

A conclusão geral de Mascart foi esta:

A conclusão geral dessa Memória será portanto [...] que o movimento de translação da Terra não tem nenhuma influência apreciável sobre os fenômenos de óptica produzidos com uma fonte terrestre ou com a luz solar, que esses fenômenos não nos dão um meio de apreciar o movimento *absoluto* de um corpo e que os movimentos *relativos* são os únicos que podemos atingir.

Com exceção do resultado de Klinkerfues, as experiências estavam de acordo com a teoria de Fresnel.

Além desses resultados experimentais, é importante citar que no início da década de 1870 foram publicados três trabalhos teóricos, por Wilhelm Veltmann (1832-1902), Alfred Potier (1840-1905) e Mascart, estabelecendo de forma bastante conclusiva que, se a teoria de Fresnel estava correta, nenhum experimento óptico terrestre envolvendo aberração, reflexão e refração apresentaria qualquer efeito mensurável devido ao movimento da Terra através do éter, porque haveria um cancelamento dos diversos efeitos de primeira ordem.

Esse princípio da relatividade na óptica ondulatória é, de certa forma, mais espantoso do que o da mecânica, pois torna impossível detectar um movimento *relativo* entre a Terra e o éter (que se supunha ser a realidade física transmissora da luz).

TENTATIVAS DE MEDIR A VELOCIDADE ABSOLUTA DA TERRA ANTES DE MICHELSON

A teoria de Fresnel analisava, fundamentalmente, os fenômenos de refração da luz. Não poderiam existir outros efeitos ópticos, sem envolver refração, que não se anulassem?

Fizeau e a intensidade da luz

Em 1854, Fizeau já havia proposto (mas não havia realizado) uma experiência em que a variação de intensidade luminosa de uma fonte talvez permitisse a detecção do movimento da Terra através do éter. A idéia é simples. Consideremos uma fonte luminosa muito pequena, que emite luz para todos os lados; suponhamos que há dois anteparos em lados opostos da fonte, ambos à mesma distância dela. Se o sistema estiver parado, é claro que as intensidades luminosas

serão iguais, nos dois anteparos. Porém, se o sistema se mover através do éter, as intensidades poderiam ser diferentes. De fato, se o sistema se move e se a velocidade em relação ao éter for paralela à reta que une os dois anteparos, a luz vai demorar mais tempo para atingir um dos anteparos do que o outro. Durante esse tempo, a luz estará se espalhando para todos os lados, e diminuindo de intensidade à medida que se afasta da fonte. Assim, a intensidade luminosa em um deles deve ser menor do que no outro.

A análise quantitativa do fenômeno parecia indicar que haveria uma diferença de luminosidade da ordem de $4v/c$. Como a velocidade orbital da Terra é aproximadamente dez mil vezes menor do que a velocidade da luz, a diferença de luminosidade seria de aproximadamente uma parte em 2.500. Era impossível fazer uma comparação de intensidades luminosas com essa precisão, em meados do século XIX, e Fizeau não tentou, por isso, realizar o experimento.

Na verdade, a análise teórica estava equivocada, pois Fizeau não levou em conta como seria a distribuição de luz emitida por uma fonte em movimento, nem analisou como seria a interação entre os anteparos em movimento e a luz. Tais problemas foram apontados por Lorentz, em 1902.

Fizeau e a polarização da luz

Alguns anos depois, em 1859, Fizeau idealizou e realizou um outro tipo de experimento, no qual estudava a polarização da luz. Quando um feixe de luz polarizada incide obliquamente sobre uma lâmina de vidro, o plano de polarização dos feixes refletido e transmitido sofrem uma pequena rotação. Esse fenômeno já havia sido estudado no início do século, por Malus. O valor do ângulo de rotação do plano de polarização depende de alguns fatores geométricos (como a inclinação do vidro) e depende também do índice de refração do material. Ora, o índice de refração depende da velocidade da luz no vidro; e, se a aparelhagem está na Terra, que se move em relação ao éter, a velocidade da luz no vidro depende da velocidade da Terra. Portanto, a rotação do plano de polarização da luz deveria depender do movimento da Terra através do éter.

O efeito previsto seria pequeno. O movimento da Terra através do éter poderia produzir alterações de uma parte em 1.500 na rotação do plano de polarização da luz. Como essa rotação era pequena, o efeito seria minúsculo. Fizeau, no entanto, procurou aumentar o efeito, utilizando uma pilha de placas de vidro, em vez de uma única lâmina. Montou um dispositivo no qual deveria surgir um efeito observável de um ou dois graus, dependendo do sentido do movimento da luz dentro do sistema. Quando a luz se propagasse no mesmo sentido que o movimento da Terra através do éter, a variação seria para um lado; quando o sentido do movimento da luz fosse invertido, a variação do ângulo seria para o outro lado.

Fizeau fez observações durante um ano, variando o horário de observação e tomando muitos cuidados experimentais. A partir de 2.000 observações que realizou, concluiu que havia efeitos sistemáticos, regulares, da ordem de grandeza prevista e com o sentido correto. As medidas variavam bastante entre si, mas parecia realmente que Fizeau estava medindo o efeito previsto. Por exemplo: em certo dia, a previsão teórica era de que houvesse uma variação angular entre 2° e $2^\circ 20'$. As medidas indicaram os valores: $1^\circ 21'$; $2^\circ 19'$; $2^\circ 8'$; 2° ; $2^\circ 35'$. Apesar da variabilidade, os resultados eram coerentes com a previsão. O autor concluiu:

O raciocínio e a experiência levam a admitir como muito provável que o azimute do plano de polarização do raio refratado é realmente influenciado pelo movimento do meio refringente, e que o movimento que transporta a Terra pelo espaço exerce uma influência dessa natureza sobre as rotações produzidas na luz polarizada por pilhas de vidros inclinados.

Fizeau era um experimentador respeitado, e seu trabalho teve forte repercussão. No entanto, o astrônomo Hervé-Charles-Antoine Faye (1814-1902) criticou o trabalho, pois Fizeau só havia levado em conta, em sua análise teórica, o movimento orbital da Terra. No entanto, havia

também um movimento do sistema solar como um todo em direção à constelação de Hércules, que havia sido detectado recentemente. Se esse movimento fosse levado em conta, já não haveria concordância entre a teoria e a experiência.

O trabalho de Fizeau foi no entanto defendido por Louis Urbain Dortet de Tessen (1804-1879). Ele comentou que as experiências haviam sido feitas com a luz solar; portanto, só poderiam evidenciar o movimento relativo da Terra e do Sol, e não o movimento do sistema solar como um todo. Portanto, a análise de Fizeau estaria correta. Faye não concordou, mas a discussão acabou por morrer.

Babinet, Ångström e a difração da luz

Em 1862, Babinet apresentou uma nova proposta de experiência para detectar efeitos do movimento da Terra através do éter, utilizando o fenômeno de difração. Seu raciocínio foi o seguinte: quando se estudam fenômenos em que aparecem efeitos de aberração, reflexão e refração da luz, não se pode medir velocidade da Terra por compensação de efeitos. Porém, a deflexão da luz por rede de difração é um fenômeno físico diferente e independente desses e não deve ocorrer compensação.

Babinet analisou o que deveria ocorrer com a luz desviada por uma rede de difração em movimento em relação ao éter, indicando que deveria haver uma variação $\Delta\delta$ do desvio angular proporcional à velocidade da Terra e que dependeria também do ângulo δ em que a luz é desviada. Para ângulos medidos em radianos, ele obteve a equação:

$$\Delta\delta = 2(v/c)(1 - \cos \delta) \cdot \tan \delta$$

Considerando um caso em que o desvio da luz pela rede de difração fosse de 15° , as variações desse ângulo devidas ao movimento orbital da Terra deveria ser $\Delta\delta = \pm 0,3''$. Se, além do movimento orbital, fosse também considerado o movimento de translação do sistema solar como um todo, o efeito seria maior.

Babinet apenas fez a proposta teórica do experimento, mas não o realizou. Dois anos depois, aparentemente sem ter conhecimento do artigo de Babinet, uma experiência equivalente a essa foi realizada pelo espectroscopista Anders Jonas Ångström (1814-1874). Ele utilizou uma rede de difração que produzia um desvio maior do que o discutido por Babinet (63°) e previu que esse ângulo sofreria variações de até $20''$ de arco, por causa do movimento orbital da Terra. Ele mediu então a posição das raias espectrais do Sol, em diferentes horários, procurando variações de sua posição e comparando com a teoria. A tabela abaixo indica os dados desse experimento:

MEDIDA	OBSERVADO	TEÓRICO
$62^\circ 55'38''$	+3''	+7''
$62^\circ 55'53''$	-11''	-2''
$62^\circ 56'07''$	-26''	-13''
$62^\circ 56'00''$	-19''	-9''
$62^\circ 55'51''$	-10''	-8''
$62^\circ 55'58''$	-18''	-12''
$62^\circ 56'07''$	-26''	-16''

Com boa vontade, pode-se dizer que havia uma concordância razoável entre teoria e experimento. Ångström concluiu: “Tanto quanto podemos concluir das observações acima, a influência do movimento anual da Terra parece ter sido verificada”. No artigo em que publicou esses resultados, o autor prometeu fazer mais medidas para tentar detectar movimento do sistema solar como um todo, mas não publicou mais sobre o assunto.

Maxwell, Mascart e os experimentos de Fizeau e Ångström

James Clerk Maxwell (1831-1879) estudou esses trabalhos e também investigou, experimentalmente, se o movimento da Terra afetaria o desvio da luz por um prisma. Ele confirmou o resultado nulo já obtido por Arago várias décadas antes. É interessante que Maxwell comentou os resultados positivos que foram descritos acima:

Por outro lado, Fizeau observou uma diferença na rotação do plano de polarização [...] e Ångström observou uma diferença semelhante em fenômenos de difração. Não estou ciente de que qualquer dessas duas difíceis observações tenha sido confirmada pela repetição.

Embora Maxwell não tenha lançado uma dúvida sobre os dois experimentos, é claro que ele sentia a necessidade de alguma confirmação (ou refutação) dos mesmos, por outros observadores.

Em 1872 Mascart repetiu o experimento de Ångström, com algumas variações. Ele empregou uma fonte de luz terrestre, em vez de utilizar a luz do Sol; e empregou um aparelho montado sobre uma base giratória, em vez de esperar que a rotação da Terra mudasse a direção do sistema. Os erros experimentais eram de aproximadamente 5" de arco. Ele não conseguiu notar nenhum efeito regular – apenas pequenas variações irregulares do desvio da luz, que podiam ser atribuídos aos erros experimentais.

É difícil saber o que um físico “neutro” poderia concluir, na época. Ångström era um dos mais respeitados espectroscopistas da época. Talvez o efeito existisse, talvez não. Seria necessário repetir as medidas com aparelhos mais sensíveis, para decidir isso. Mas essas repetições não foram realizadas.

Havia, assim, uma situação complexa na década de 1870. Por um lado, a teoria de Fresnel para o éter e seu arrastamento parecia bem confirmada, e essa teoria excluía a possibilidade de detectar o movimento da Terra através do éter por experimentos envolvendo apenas refração, reflexão e aberração da luz. Por outro lado, não era absurdo pensar que outros fenômenos luminosos pudessem trazer evidências do movimento da Terra através do éter – e, aparentemente, Fizeau e Ångström haviam detectado fenômenos desse tipo.

A contribuição de Maxwell

Em 1879 Maxwell escreveu um famoso artigo sobre o éter, para a *Encyclopaedia Britannica*. Lá, ele discutiu (entre outras coisas) alguns dos experimentos que haviam sido realizados para procurar detectar o movimento da Terra em relação ao éter e discutiu algumas outras possibilidades.

Suponhamos que (como Fresnel propôs) o éter está parado em todo o universo e a Terra se desloca através do éter. Nesse caso, em relação à Terra, teríamos algo semelhante a um “vento de éter” passando por nós. Como a luz é uma onda do éter, sua velocidade seria influenciada diretamente por esse vento de éter – exatamente como a velocidade do som é influenciada pelo vento. Se o éter estiver passando pela superfície da Terra indo do ponto A para o ponto B, então a luz deve levar menos tempo para ir de A até B do que para voltar. Maxwell concluiu: “Se fosse possível determinar a velocidade da luz observando o tempo que ela gasta para ir de uma estação até outra sobre a superfície da Terra, poderíamos, comparando as velocidades observadas em direções opostas, determinar a velocidade do éter com relação a essas duas estações terrestres”.

Porém, como a luz caminha muito rapidamente, é extremamente difícil conceber um método de medir o tempo que ela demora para ir de um ponto até outro ponto sobre a superfície da Terra. Nos métodos que haviam sido desenvolvidos por Foucault e por Fizeau, a luz saía de um ponto, era refletida em um espelho a uma certa distância e retornava ao ponto de partida. Se houvesse

um “vento de éter” entre a fonte de luz e o espelho, a velocidade da luz seria maior em um sentido e menor no outro, e os dois efeitos praticamente se cancelariam.

Este é um ponto importante, que precisa ser esclarecido. Se a luz caminha apenas em um sentido, a favor do vento de éter que tem velocidade u , percorrendo uma distância D , o tempo que ela demora é

$$t_1 = D/(c+u)$$

e se ela percorrer a mesma distância no sentido contrário ao vento de éter, o tempo será:

$$t_2 = D/(c-u)$$

Se esses dois tempos pudessem ser medidos diretamente, e comparados, a diferença entre eles seria:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = D/(c-u) - D/(c+u) = 2Du/(c^2 - u^2)$$

Se u for muito menor do que c , o efeito Δt seria de aproximadamente $2Du/c^2$, que é um efeito de primeira ordem em u/c .

Sem o vento de éter, o tempo de ida e volta seria simplesmente:

$$t_0 = 2D/c$$

Se compararmos Δt com o tempo t_0 , teremos:

$$\Delta t / t_0 = [2Du/(c^2 - u^2)] / (2D/c) = uc/(c^2 - u^2) \cong u/c$$

Considerando u igual à velocidade orbital da Terra, teremos que u/c é aproximadamente igual a um dividido por dez mil (ou seja, um décimo milésimo). É um efeito pequeno, mas que talvez pudesse ser medido.

Se a luz vai e volta entre os dois pontos, o tempo total será:

$$t' = t_2 + t_1 = D/(c-u) + D/(c+u) = 2Dc/(c^2 - u^2)$$

Como já foi indicado acima, sem o vento de éter o tempo de ida e volta seria simplesmente:

$$t_0 = 2D/c$$

A diferença entre o tempo t' com vento de éter e o tempo t_0 sem vento de éter seria:

$$\Delta t' = t' - t_0 = 2Dc/(c^2 - u^2) - 2D/c = 2Du^2 / c(c^2 - u^2)$$

Se u for muito menor do que c , o efeito $\Delta t'$ seria de aproximadamente $2Du^2/c^3$, que é um efeito de segunda ordem em u/c .

Se compararmos $\Delta t'$ com o tempo t_0 , teremos:

$$\Delta t' / t_0 = [2Du^2 / c(c^2 - u^2)] / (2D/c) = u^2/(c^2 - u^2) \cong u^2/c^2$$

Considerando u igual à velocidade orbital da Terra, teremos que u^2/c^2 é aproximadamente igual a um dividido por cem milhões (ou seja, um centésimo de milionésimo). É um efeito muito menor do que o calculado acima, sendo praticamente impossível medi-lo.

Depois de comentar sobre essas dificuldades, Maxwell sugeriu um método astronômico:

O único método praticável de determinar diretamente a velocidade relativa do éter e do sistema solar é comparar os valores da velocidade a luz deduzidos da observação dos eclipses dos satélites de Júpiter, quando Júpiter é visto da Terra em pontos aproximadamente opostos da eclíptica.

No caso, Maxwell não estava indicando um modo de determinar efeitos da velocidade *orbital* da Terra e sim efeitos do movimento do sistema solar como um todo, em relação ao éter. O princípio do método proposto é semelhante ao que serviu para a primeira determinação da velocidade da luz, por Römer: observar os momentos dos eclipses dos satélites de Júpiter e, comparando seus atrasos e adiantamentos, determinar a velocidade da luz. No entanto, se o sistema solar se mover em relação ao éter, essa velocidade não será sempre a mesma: ela dependerá da direção da reta que une Júpiter à Terra. Se houver um vento de éter vindo de Júpiter para a Terra, a velocidade efetiva da luz será maior; se houver um vento de éter indo da Terra para Júpiter, a velocidade efetiva da luz será menor. À medida que Júpiter for se deslocando em sua órbita em torno do Sol, as medidas da velocidade da luz obtidas por esse

método devem ir mudando; haveria uma oscilação da velocidade da luz entre Júpiter e a Terra, com um período de 12 anos.

A proposta de Maxwell era nova, e ele não dispunha de dados astronômicos que permitissem testar esse método. Em 1879 ele escreveu uma carta ao astrônomo norte-americano David Peck Todd, que estudava os satélites de Júpiter, perguntando-lhe se havia dados suficientemente precisos para fazer esse tipo de análise. Todd lhe respondeu que não havia dados suficientemente bons. Para detectar uma velocidade do sistema solar da ordem da velocidade orbital da Terra (ou seja, aproximadamente um décimo milésimo de c), seria necessário determinar os instantes de início dos eclipses com uma precisão melhor do que 0,1 s. Isso era impossível, na época.

OS EXPERIMENTOS DE MICHELSON E SUA REPERCUSSÃO

O primeiro experimento do interferômetro de Michelson

No mesmo ano (1879), Maxwell morreu. No ano seguinte, a carta de Maxwell foi publicada; e Todd discutiu o assunto com Albert Abraham Michelson (1852-1931). Michelson era a pessoa que havia feito as melhores medidas da velocidade da luz, até aquela época. Em 1873 ele obteve o resultado $c=299.853$ km/s – muito próximo de valor atual, $c=299.793$ km/s. Todd discutiu com ele a possibilidade de determinar a velocidade da Terra através do éter medindo a velocidade da luz. Michelson estudou as idéias de Maxwell e considerou que era realmente difícil determinar alguma variação no tempo de ida e volta da luz (uma variação que, como foi indicado acima, seria de segunda ordem em v/c). Tal medida exigiria a possibilidade de medir uma variação de tempo de uma parte em cem milhões. Michelson pensou que o único modo de medir uma variação tão pequena seria utilizando métodos interferométricos – com os quais ele não estava suficientemente familiarizado.

No entanto, Michelson se interessou muito pelo problema e resolveu atacá-lo. Para isso, precisaria ir até a Europa, onde havia os melhores especialistas em interferometria. Para realizar sua viagem, obteve um auxílio financeiro de Graham Bell – que, na época, começava a enriquecer com a invenção do telefone. No ano de 1880, Michelson tomou um navio para a Europa, permanecendo primeiramente algum tempo em Paris (no *Collège de France* e na Escola Politécnica), onde obteve apoio de Jamin; e, depois, deslocou-se para Berlin, onde trabalhou alguns meses no laboratório de Helmholtz.

Tendo adquirido a experiência necessária, Michelson mandou construir em 1881, na Alemanha, seu famoso interferômetro destinado a medir a velocidade da Terra em relação ao éter. O princípio de funcionamento do aparelho era comparar o tempo que a luz demorava para ir e voltar até o ponto de partida, em direções perpendiculares. Baseando-se na análise de Maxwell, Michelson sabia que haveria uma diferença de tempo $\Delta t'/t_0 \cong u^2/c^2$, quando o percurso da luz fosse paralelo à direção do vento do éter. Ele supôs inicialmente que, quando o percurso da luz fosse perpendicular ao vento do éter, não haveria nenhuma mudança do tempo de ida e volta da luz (o que está errado). Foi com base nessas suposições que ele fez suas previsões teóricas. Os tempos seriam diferentes, e portando haveria uma defasagem das ondas luminosas que seguissem os dois percursos diferentes, produzindo interferência. Quando o aparelho fosse girado de 90° , o efeito se inverteria.

Michelson previu que haveria variações no padrão de interferência de 0,08 franjas, quando o aparelho fosse girado. É uma diferença muito pequena, difícil de ser observada. O aparelho, feito com uma estrutura de aço, era instável, sensível a variações de temperatura e a vibrações. Inicialmente, Michelson não conseguiu fazer medidas consistentes. Depois, obteve permissão para instalar seu aparelho no porão do observatório astronômico de Potsdam. Lá, como não havia vibrações e a temperatura era estável, conseguiu realizar suas medidas. Ao girar o aparelho ele observou variações de 0,02 a 0,03 franjas, que não obedeciam a um padrão muito regular,

parecendo simples erros experimentais. Concluiu que o efeito previsto não existia e que havia algum problema com a hipótese do éter estacionário, de Fresnel:

A interpretação desses resultados é que não há deslocamento das franjas de interferência. Mostra-se assim incorreto o resultado da hipótese de um éter estacionário, e segue-se a conclusão de que a hipótese é errônea.

No seu artigo, publicado em 1881, Michelson citou a teoria do éter de Stokes, parecendo acreditar que encontrou uma experiência crucial para diferenciar a hipótese do éter estacionário do éter “viscoso”. Assim, ao contrário do que se costuma dizer, Michelson não concluiu que o éter não existia – concluiu que o éter se comportava conforme a teoria de Stokes e que era arrastado pela Terra.

Havia problemas na base teórica do trabalho de Michelson, no entanto. Quando retornava da Alemanha para os Estados Unidos, Michelson passou por Paris, onde apresentou os resultados de sua pesquisa. Foi criticado por Potier, que assinalou o erro teórico: era preciso levar em conta a variação do tempo de ida e volta do feixe perpendicular ao vento de éter. Essa variação não é nula, como Michelson pensava.

Michelson corrigiu a teoria, chegando às fórmulas que utilizamos até hoje. A diferença entre os tempos para a luz ir e voltar nos dois braços do interferômetro seria *a metade* do efeito previsto por Michelson. Portanto, a previsão correta seria um deslocamento de 0,04 franjas, e não 0,08. Michelson havia observado deslocamentos irregulares de 0,02 a 0,03 franjas, que atribuiu a erros experimentais. Portanto, os erros experimentais eram praticamente equivalentes ao próprio efeito que ele queria medir. O experimento era inválido, pois não tinha sensibilidade suficiente para detectar o efeito.

Michelson deve ter se sentido extremamente frustrado. Seu experimento, que tinha tomado dois anos de trabalho, era um fracasso, não permitindo concluir nada.

Michelson e a confirmação da teoria de Fresnel

Durante algum tempo, Michelson não voltou a se interessar pelo problema da velocidade da Terra em relação ao éter. No entanto, em 1884, Lord Kelvin e Lord Rayleigh o estimularam a retomar seus estudos. Eles consideravam importante a idéia da pesquisa de 1881 e sugeriram que era necessário realizar medidas mais precisas.

Michelson voltou ao problema. Porém, antes de aperfeiçoar o experimento do interferômetro, resolveu repetir o experimento de Fizeau a respeito do arrastamento do éter pela água. Esse era o experimento mais importante que confirmava a teoria de Fresnel. Se o experimento de Fizeau estivesse errado, isso confirmaria a conclusão de Michelson de 1881 – e, talvez, nem fosse preciso refazer o experimento do interferômetro.

Em 1886, Michelson conseguiu reproduzir o experimento de Fizeau – que nunca havia sido repetido antes – e obteve resultados que confirmavam a teoria de Fresnel. Nas condições estudadas, a teoria levava à previsão de um coeficiente de arrastamento de 0,438. O resultado experimental foi de 0,434 – quase exatamente igual ao previsto, com uma diferença de apenas 1%.

A partir desse ponto, a situação de Michelson ficou mais complexa. O experimento de 1881 dera um resultado contrário à teoria de Fresnel; agora, ele havia confirmado a teoria de Fresnel. Tornava-se necessário repetir o experimento de 1881 – porém, agora, com melhor sensibilidade.

O experimento de Michelson e Morley

Em 1887 Michelson, com o auxílio do químico Edward W. Morley (1838-1923), montou um interferômetro muito melhor do que o antigo. Em vez de utilizar uma estrutura de aço, o aparelho foi montado sobre uma placa cilíndrica de mármore. Assim, era muito mais estável,

pouco sujeito a variações de temperatura. A placa de mármore flutuava sobre mercúrio líquido, podendo girar praticamente sem atrito. O sistema ficava bem isolado contra vibrações. Os feixes de luz iam e voltavam várias vezes, entre espelhos, amplificando o efeito. Enfim, foram tomados muitos cuidados na montagem do novo aparelho. A sensibilidade era dez vezes maior do que o dispositivo utilizado em Potsdam. Agora, o efeito previsto, considerando a velocidade orbital da Terra em relação ao éter, seria um deslocamento de 0,4 franjas – que podia ser detectado e medido com relativa facilidade. Michelson e Morley realizaram uma série de medidas, durante quatro dias. Observaram apenas pequenas variações irregulares da figura de interferência, com deslocamentos de aproximadamente um centésimo de franja. Concluíram, então, que o efeito era nulo e que não era possível medir a velocidade da Terra em relação ao éter, como esperado a partir da teoria de Fresnel.

Deixando de lado o experimento de 1881 – que não era conclusivo – agora, em 1887, Michelson dispunha de dois excelentes resultados. Um confirmava a teoria de Fresnel para o arrastamento do éter por corpos transparentes; o outro refutava a teoria de Fresnel para o éter estacionário. Seria possível explicar os dois experimentos com uma única teoria? Aparentemente, não. A teoria de Stokes explicava o resultado nulo do experimento com o interferômetro, pois segundo essa teoria o éter era arrastado nas vizinhanças da Terra, não existindo o vento de éter. Mas essa teoria não previa o arrastamento parcial do éter pelos corpos transparentes. Seria preciso elaborar uma nova teoria do éter, ou descobrir algum modo não muito evidente de conciliar uma das teorias existentes com os resultados obtidos.

Tentativa de explicação do experimento

Em 1892, Fitzgerald e Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) propuseram, independentemente um do outro, uma possível solução para o impasse. Ambos consideraram que era possível manter a teoria do éter de Fresnel, desde que se supusesse que o movimento do interferômetro através do éter produziria uma *contração* do seu comprimento. Se o braço do interferômetro que se move paralelamente ao vento de éter sofresse uma contração, passando do comprimento L para $L' = L(1 - v^2/2c^2)$, os tempos de ida e volta da luz nos dois braços passariam a ser iguais (considerando-se termos até segunda ordem em v/c) e o movimento da Terra através do éter não produziria nenhum efeito mensurável pelo interferômetro. Lorentz comentou que os efeitos também se cancelariam se o interferômetro, em vez de se contrair, ficasse mais *largo*, isto é, se o braço do interferômetro perpendicular ao vento do éter aumentasse de tamanho na proporção $L'' = L(1 + v^2/2c^2)$. Na verdade, infinitas combinações de mudanças de comprimento longitudinal (paralela ao vento do éter) e transversal poderiam explicar o efeito nulo, desde que a *razão* entre o comprimento longitudinal e o comprimento transversal sofresse uma variação de $1 - v^2/2c^2$.

Na época, não havia nenhum motivo *físico* para imaginar que o movimento dos corpos através do éter deveria mudar suas dimensões. Tanto Fitzgerald quanto Lorentz estavam, provavelmente, se guiando simplesmente pela idéia de que *alguma coisa* poderia estar cancelando o efeito do vento do éter, e imaginaram então esse efeito de contração.

O disco girante de Lodge

Outro modo de tentar explicar o experimento de Michelson e Morley era através da teoria de Stokes, mas seria necessário encontrar alguma outra evidência independente de que a matéria em movimento pode arrastar o éter em sua proximidade. Em 1892, o físico britânico Sir Oliver Lodge (1851-1940) procurou observar esse tipo de efeito utilizando um grande disco metálico em rotação. Ele utilizou um disco de ferro que tinha uma ranhura em sua borda. Dois feixes luminosos viajavam em sentidos opostos, dentro da aparelhagem, passando por dentro dessa ranhura do disco, e interferiam entre si. Qualquer mudança na velocidade de um dos dois feixes produziria um deslocamento das franjas de interferência.

Se a rotação do disco acarretasse um arrastamento do éter perto dele (e, principalmente, dentro de sua ranhura), a velocidade da luz aumentaria em um dos feixes e diminuiria no outro. Lodge procurou, por isso, detectar algum deslocamento das franjas de interferência quando o disco era colocado em rotação em um sentido ou no outro, com grande velocidade. Não conseguiu observar nenhum efeito regular. Se o éter na ranhura do disco tivesse adquirido uma velocidade igual à do disco metálico, ou mesmo um centésimo da velocidade do disco, teria havido um deslocamento mensurável das franjas de interferência. A conclusão de Lodge foi de que, se o movimento do disco arrasta parcialmente o éter em sua vizinhança, esse arrastamento é inferior a $1/200$.

Em 1897, Lodge repetiu o experimento, utilizando um disco com maior tamanho (diâmetro de um metro) e maior massa, fazendo uma ranhura mais fina (cerca de 1 cm de espessura) e aumentando sua velocidade. Continuou não detectando qualquer efeito. Tentou também eletrizar e magnetizar o disco, mas não observou nenhuma variação das franjas de interferência.

O experimento não era conclusivo, é claro. A aparelhagem estava próxima à superfície da Terra; pela teoria de Stokes, um corpo de grande massa como a Terra arrasta o éter próximo à sua superfície. O disco também poderia arrastar o éter em sua volta, mas o efeito do disco poderia ser desprezível, comparado com o efeito da Terra. Assim, era difícil concluir qualquer coisa desse experimento. Apenas se ele tivesse dado um resultado *positivo* ele seria significativo.

A tentativa de Michelson de testar a teoria de Stokes

Michelson também procurou evidências de que a teoria do éter viscoso de Stokes pudesse ser correta. De acordo com essa teoria, o éter só seria totalmente arrastado a pequenas distâncias da superfície da Terra; a grandes distâncias, o arrastamento seria pequeno. Assim, à medida que se considerasse alturas cada vez maiores em relação à superfície terrestre, deveríamos ter um vento de éter que iria aumentando com a altitude. Como testar isso?

Em 1897, Michelson fez um novo experimento que é pouco citado pelos historiadores da ciência. Ele procurou detectar um vento de éter a uma certa altura sobre a superfície da Terra. Ele construiu um aparelho que pode ser descrito como um interferômetro *vertical*, retangular, constituído por tubos evacuados de grande comprimento. Os tubos horizontais, na direção leste-oeste, tinham 60 metros de comprimento. Os tubos verticais tinham comprimento de 16 metros. O retângulo formado por esses tubos era percorrido por dois feixes luminosos que caminhavam em sentidos opostos, interferindo entre si depois de completar o percurso.

Suponhamos que o vento do éter seja praticamente nulo na altura do solo, mas não seja nulo à altura de 16 metros. Então, se esse vento tiver o sentido leste-oeste, um dos feixes caminhará mais rapidamente e o outro mais lentamente, no tubo superior. Depois de 12 horas, por causa da rotação da Terra, o aparelho todo terá girado 180° . Então, o feixe que tinha sua velocidade aumentada estará agora caminhando *contra* o vento de éter, e vice-versa. A posição das franjas de interferência deve se alterar.

Realizando o experimento, Michelson observou efeitos irregulares e muito pequenos. O resultado obtido foi que as velocidades da luz no tubo superior e no tubo inferior poderiam ter uma diferença máxima de um bilionésimo da velocidade da luz (ou seja, $10^{-9} c$).

A conclusão final de Michelson foi que ou o éter é arrastado (de acordo com a teoria de Stokes) mas o arrastamento se estende até enormes distâncias da superfície da Terra; ou o éter não é arrastado (de acordo com a teoria de Fresnel) mas os corpos se contraem (como sugerido por Lorentz e Fitzgerald).

Os experimentos de Morley e Miller

Michelson não voltou a utilizar o interferômetro de 1887. No entanto, seu colega Morley, com a ajuda de um estudante chamado Dayton Miller, realizou novos experimentos com o interferômetro. Em 1904 eles montaram o interferômetro sobre uma base de madeira e sobre uma

base metálica, para testar se a eventual contração de Lorentz e Fitzgerald poderia depender do material. Com os interferômetros de madeira e de metal observaram efeitos muito pequenos, cerca de cem vezes menores do que o efeito previsto pela teoria de Fresnel. Concluíram que esses interferômetros se contraíam ao se mover através do éter, como o antigo; ou que a velocidade do éter no laboratório onde o experimento foi feito era inferior a 3 km/s.

Como Michelson, esses pesquisadores também acreditavam que a teoria de Stokes poderia ser a correta. Por isso, em 1905-6 realizaram novo experimento no alto da colina *Euclid Heights* de Cleveland (altura de aproximadamente 300 metros) para tentar detectar um vento de éter significativo. Nesse experimento, cujo resultado não foi publicado na época, obtiveram um resultado *positivo*, que era aproximadamente um décimo do efeito previsto pela teoria de Fresnel. Parecia, assim, que a teoria de Stokes poderia estar correta, e que o vento de éter a 300 metros de altitude seria cerca de um décimo da velocidade orbital da Terra. No entanto, os pesquisadores tinham dúvidas sobre se o efeito medido poderia ser espúrio – devido, por exemplo, a variações de temperatura.

Muitos anos depois (na década de 1920), quando a teoria da relatividade já era aceita por quase todos os físicos, Miller publicou o resultado de novas pesquisas realizadas no alto do Monte Wilson (1.800 metros de altitude) que pareciam indicar um vento de éter de aproximadamente 9 km/s. Mas isso é uma outra história, que não pode ser analisada aqui.

É importante comentar que a *rotação* de um sistema pode ser medida, de seu interior, por efeitos ópticos – exatamente como a rotação da Terra pode ser detectada pelo pêndulo de Foucault e outros efeitos mecânicos. Os primeiros experimentos ópticos que mostraram isso foram realizados apenas em 1912-1913, por Georges Sagnac. No caso desses experimentos, toda a aparelhagem eram montada em uma base que girava, e a rotação do sistema produzia efeitos mensuráveis. Posteriormente (em 1925) Michelson, Hans Gordon Gale e F. Pearson fizeram um experimento análogo, pelo qual mostraram que a rotação da própria Terra também podia ser detectada opticamente. Não há dúvidas de que esses efeitos existam, e o fenômeno detectado pela primeira vez por Sagnac é utilizado atualmente para a construção de giroscópicos muito sensíveis. Os defensores do éter (entre os quais se incluíam Sagnac e Michelson) consideraram que esses experimentos provavam conclusivamente a existência do éter (assim como Newton considerou que os efeitos mecânicos de rotação provavam a existência do espaço absoluto). Eles podem também ser compreendidos utilizando-se a teoria da relatividade geral.

O que se poderia concluir, em torno de 1900?

Como se pode ver pela descrição aqui apresentada, a situação era bastante confusa, em torno de 1900. As duas mais importantes teorias do éter – a de Fresnel e a de Stokes – permitiam explicar uma parte dos resultados experimentais, mas ambas tinham problemas. A teoria de Fresnel só não explicava, sozinha, o experimento de Michelson e Morley de 1887; porém, se admitíssemos a contração dos objetos, ela se tornaria compatível com aquele experimento. Essa foi a direção em que alguns importantes pesquisadores – como Lorentz e Poincaré – desenvolveram seus trabalhos.

O DESENVOLVIMENTO DA TEORIA DE LORENTZ E POINCARÉ

Paralelamente à óptica dos sistemas em movimento, desenvolveu-se no século XIX o eletromagnetismo – que foi outra fonte de onde se originou a teoria da relatividade. É necessário agora voltar um pouco no tempo, para falar sobre esse outro aspecto.

O éter eletromagnético, de Faraday a Maxwell

A partir de meados do século XIX, Michael Faraday (1791-1867) começou a defender fortemente a idéia de que as forças eletromagnéticas são transmitidas por *linhas de força* que têm

realidade física. Segundo ele, duas cargas elétricas que se atraem ou repelem não interagem diretamente à distância. Elas são puxadas ou empurradas pelas linhas de força, que seriam coisas reais, que se estendem pelo espaço e que transmitem as forças entre as cargas.

Cada carga elétrica era pensada por Faraday como uma pequena esfera dotada de “cabelos” que se espalhavam para todos os lados. Os “cabelos” de uma carga elétrica negativa estariam sempre ligados a cargas elétricas positivas, e vice-versa. Nenhum desses fios ligaria duas cargas de mesmo sinal. Supondo que essas linhas de força são semelhantes a molas que tendem a diminuir de tamanho era possível entender que elas puxavam as cargas de sinais umas para as outras. Além disso, supondo que elas se empurram umas às outras lateralmente, era possível explicar os fenômenos de aparente repulsão entre cargas de mesmo sinal. Os efeitos magnéticos também seriam produzidos por linhas de força magnética, com propriedades semelhantes a essas.

Antes de Faraday, a maioria dos físicos pensava que as forças elétricas e magnéticas eram ações diretas à distância e, mesmo depois da proposta de Faraday, muitos continuaram a trabalhar de acordo com essa visão. Pode-se dizer que, inicialmente, apenas os físicos britânicos começaram a seguir a idéia de que havia um intermediário nas forças eletromagnéticas. Na Europa continental (por exemplo, França e Alemanha), a visão preponderante era a de forças diretas à distância.

Na Inglaterra, William Thomson e James Clerk Maxwell foram os mais importantes pesquisadores que formularam a teoria matemática do eletromagnetismo. Os dois se basearam fortemente nos experimentos e nas idéias qualitativas de Faraday. Além disso, percebendo que as equações eletromagnéticas tinham forte semelhança formal com as equações de sólidos elásticos e da dinâmica de fluidos, Maxwell passou a imaginar que todo o espaço estaria preenchido de fato por uma substância (o éter) que transmitiria as forças eletromagnéticas. Quando provou teoricamente que poderiam existir ondas eletromagnéticas no espaço vazio, com uma velocidade igual à velocidade da luz, concluiu que a própria luz era um fenômeno eletromagnético e que o mesmo éter que serve para transmitir forças elétricas e magnéticas é também o éter onde se propagam as ondas luminosas.

A principal obra de Maxwell foi seu “Tratado de eletricidade e magnetismo”, publicado em 1873. Lá, o autor apresenta todo o eletromagnetismo como teoria de interações locais – isto é, nada atuaria à distância – com o éter servindo como intermediário. O éter teria várias propriedades mecânicas. Por exemplo: a energia eletrostática estaria armazenada sob a forma de tensões no éter, sendo portanto um tipo de energia potencial elástica. A energia magnética, por sua vez, seria uma forma de energia cinética (de rotação) dos elementos que constituem o éter. O éter seria capaz não apenas de produzir forças e armazenar energia, mas também teria, em certas circunstâncias, uma quantidade de movimento. Podia, assim, ser pensado como uma realidade mecânica.

O princípio da relatividade no eletromagnetismo

Maxwell desenvolveu todas as equações de sua teoria eletromagnética supondo que os fenômenos estariam sendo analisados do ponto de vista de um referencial parado em relação ao éter. Em princípio, quando se estudasse um fenômeno eletromagnético em um sistema em movimento em relação ao éter, poderiam surgir novos efeitos – e talvez fosse possível medir a velocidade de um corpo em relação ao éter através de um experimento eletromagnético.

No entanto, o próprio Maxwell percebeu que, pelo menos no caso de alguns fenômenos eletromagnéticos, apenas os movimentos *relativos* dos corpos produzem efeitos. Ele se referiu ao exemplo da indução eletromagnética (experiência de Faraday): quando um ímã é aproximado ou afastado de um solenóide, aparece uma corrente elétrica no condutor; se o ímã fica parado e o solenóide é movido, aparece exatamente o mesmo efeito. Ou seja: a corrente que aparece só depende do movimento relativo entre ímã e condutor.

Sob o ponto de vista da teoria eletromagnética, as duas situações pareceriam *qualitativamente* diferentes. Quando o ímã se movimento, a alteração do campo magnético no

solenóide cria um campo elétrico; e esse campo elétrico movimentava as cargas elétricas dentro do fio, produzindo a corrente. No entanto, se o ímã está parado, não pode surgir nenhum campo elétrico. Mas o movimento do solenóide no campo do ímã faz com que as cargas elétricas do fio sofram forças *magnéticas* que as movimentam, criando a corrente elétrica.

Embora as análises das duas situações sejam diferentes, Maxwell mostrou que os efeitos eram iguais, sob o ponto de vista quantitativo. Explicou isso teoricamente utilizando equações aproximadas de transformação dos campos elétrico e magnético.

Não se sabe até que ponto Maxwell pensava que o eletromagnetismo podia obedecer totalmente ao princípio da relatividade. Porém, em uma obra sobre mecânica que publicou em 1877, intitulada “Matéria e movimento”, Maxwell enfatizou muito o princípio da relatividade (o que não era usual, na época). Nesse livro encontra-se a seguinte frase: “Relatividade do conhecimento dinâmico – todo nosso progresso até este ponto pode ser descrito como um desenvolvimento gradual da relatividade de todos os fenômenos físicos”.

Em 1894, o físico alemão Föppl publicou um livro denominado “Introdução à teoria da eletricidade de Maxwell”. O capítulo 5 desse livro se intitulava “A eletrodinâmica de condutores em movimento”. No primeiro parágrafo desse capítulo, com o título “Movimento relativo e absoluto no espaço”, Föppl afirmou:

As discussões da cinemática, ou seja, da teoria geral do movimento, usualmente se baseiam no axioma de que na interação dos corpos só é importante o movimento relativo. Não se pode recorrer a um movimento absoluto pelo espaço pois não há meios de descobrir tal movimento se não há um objeto de referência disponível a partir do qual o movimento pode ser observado e medido.

Como exemplo do princípio da relatividade, Föppl discutiu a indução eletromagnética. Comentou que o efeito só depende do movimento relativo do ímã e do condutor, e que se eles se moverem juntos, não ocorrerá nenhum efeito. A discussão de Föppl deve ter se baseado no estudo de Maxwell, mas era mais clara e geral, enfatizando que *para todos os fenômenos eletromagnéticos* somente os movimentos relativos poderiam ser importantes.

De acordo com o historiador Gerald Holton, Einstein estudou o livro de Föppl e foi inspirado nele que escreveu o início do seu artigo de 1905 (Holton, 1967).

As transformações de Voigt

Em 1887, Waldemar Voigt publicou um trabalho a respeito do efeito Doppler para a luz – ou seja, a variação de frequência e comprimento de onda da radiação, quando ela a fonte se move ou quando o observador se move em relação ao éter. Para fazer sua análise, Voigt estudou as propriedades das ondas luminosas em diferentes sistemas de referência. A equação de propagação da onda, em relação ao éter, era:

$$\partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2 + \partial^2 U / \partial z^2 - (1/c^2) \partial^2 U / \partial t^2 = 0$$

Voigt impôs a condição de que essa equação de onda deveria ter a mesma forma em todos os referenciais. No entanto, percebeu que isso exigia o uso de um tipo especial de transformação de coordenadas. Se dois referenciais S e S' se movem um em relação ao outro na direção x , sendo v a velocidade de S' em relação a S , suas medidas de posição de um objeto, na direção x , serão relacionadas pela seguinte equação:

$$x' = x - vt$$

onde x' é a posição do objeto em relação a S' , x é a posição do mesmo objeto em relação a S , e t é o tempo contado a partir do instante em que as origens de S e S' se cruzam. Essa é uma relação bem conhecida, da mecânica clássica.

Se utilizarmos essa equação de transformação e se supusermos que $y' = y$, $z' = z$ e $t' = t$, a equação de onda não poderá manter a mesma forma indicada acima, quando se muda de um referencial para outro. Voigt percebeu que era necessário introduzir as seguintes transformações

de coordenadas e tempo, para que a equação de onda fosse válida em todos os referenciais inerciais:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y\sqrt{1-v^2/c^2} = y(1-v^2/c^2)^{1/2} \\z' &= z\sqrt{1-v^2/c^2} = z(1-v^2/c^2)^{1/2} \\t' &= t - vx/c^2\end{aligned}$$

Apenas a relação entre as coordenadas x tinha um significado claro. As transformações das coordenadas y e z , e do tempo t , podiam ser consideradas como simples truques matemáticos, que traziam uma grande simplificação na análise da onda luminosa, quando se fazia uma mudança de referencial.

Note-se que Voigt impôs duas condições, para deduzir suas transformações. A primeira foi que a equação de onda deveria obedecer à mesma equação em relação a todos os referenciais. A segunda condição foi que a coordenada x obedecesse à transformação clássica. Sem essa segunda condição, haveria muitos outros conjuntos de equações que poderiam manter a forma da equação de onda.

Essas “transformações de Voigt” podem ser consideradas como um tipo de antecedente histórico das transformações de Lorentz, que serão descritas mais adiante. São transformações das coordenadas e do tempo que permitem utilizar a mesma equação física (no caso, a equação de onda) em todos os referenciais.

As transformações de Lorentz, desenvolvidas posteriormente, são muito semelhantes às de Voigt. Se dividirmos o lado esquerdo das transformações de Voigt por $\sqrt{1-v^2/c^2}$, obteremos as transformações de Lorentz. A partir das transformações de Voigt é possível obter alguns resultados corretos que foram depois deduzidos das transformações de Lorentz – tal como a transformação relativística de velocidades.

As transformações de Lorentz em primeira aproximação

Como já foi explicado antes, em 1892 Fitzgerald e Lorentz propuseram a hipótese de contração dos objetos que se movem através do éter, para explicar o resultado do experimento de Michelson e Morley. Essa contração foi, posteriormente, considerada uma consequência das transformações de Lorentz. Porém, Lorentz ainda não havia proposto suas transformações de coordenadas, nessa época.

Em 1893, Joseph Larmor publicou um trabalho a respeito da teoria do éter. Ele tentou justificar, a partir das equações de Maxwell, os resultados nulos das experiências ópticas. Considerando que a luz era um fenômeno eletromagnético, a aparente impossibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter, por efeitos ópticos, podia significar que *todos os fenômenos eletromagnéticos* ocorriam exatamente da mesma forma, tanto em um referencial parado em relação ao éter como em um referencial em movimento.

Para tentar analisar as leis do eletromagnetismo em um referencial em movimento em relação ao éter era necessário partir das equações válidas em relação ao éter e transformá-las nas equações válidas em outros referenciais, através de transformações de coordenadas e das grandezas eletromagnéticas. Larmor tentou desenvolver esse tipo de análise e apresentou certas transformações de coordenadas semelhantes às que Lorentz desenvolveu depois, mas suas transformações das grandezas eletromagnéticas eram incorretas.

Foi em 1895 que Lorentz propôs sua primeira teoria do eletromagnetismo para sistemas em movimento, considerando apenas efeitos de primeira ordem em v/c . Seu ponto de partida foram as equações de Maxwell. O próprio Maxwell não havia escrito o conjunto de equações que tem o seu nome. Elas foram escritas da forma atual, pela primeira vez, por Oliver Heaviside.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = (\partial \vec{E} / \partial t + \vec{j} / \epsilon_0) / c^2$$

No entanto, Heaviside, como Maxwell, assumiu que essas equações eram válidas apenas para a descrição de fenômenos descritos em relação a um referencial parado em relação ao éter. Lorentz supôs que as mesmas equações deveriam ser válidas em relação a outros referenciais; e procurou as condições em que isso poderia ocorrer. Em sua análise, empregou a equação que ele próprio desenvolveu para a força que age sobre uma carga q em movimento em um campo eletromagnético (“força de Lorentz”):

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Lorentz provou que as equações de Maxwell são válidas, em primeira ordem, em qualquer referencial, desde que sejam utilizadas certas transformações de coordenadas, do tempo e dos campos eletromagnéticos:

$$\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t - vx/c^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{E}' &= \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \\ \vec{B}' &= \vec{B} - \vec{v} \times \vec{E}/c^2 \end{aligned}$$

No caso das transformações de coordenadas, note-se que Lorentz utilizou inicialmente a transformação clássica da coordenada x e supôs que as coordenadas y e z não sofreriam nenhuma mudança. No entanto, ele precisou introduzir uma transformação no tempo. Isso pareceu ao próprio Lorentz uma coisa sem muito significado físico, mas ele chamou a relação $t' = t - vx/c^2$ de “tempo local”.

Quanto às transformações dos campos elétrico e magnético, a primeira equação foi obtida a partir da fórmula da força de Lorentz; a segunda é uma consequência da primeira.

O princípio da relatividade de Poincaré

Em 1895, Henri Poincaré (1854-1912) publicou um trabalho no qual discutiu a proposta de Larmor, acima referida. Poincaré explicitou nesse artigo, de forma muito clara, o princípio básico que nortearia todas as pesquisas a partir dessa época:

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.

Ao apresentar essa idéia, Poincaré enfatizou que entendia tal princípio como uma lei *exata*, e não válida apenas em primeira aproximação. A teoria de Fresnel, por exemplo, permitia explicar os resultados nulos dos experimentos ópticos apenas com relação aos efeitos de primeira ordem em v/c . No entanto, o experimento de Michelson e Morley, que também havia dado um resultado nulo, testava efeitos de segunda ordem em v/c . Para dar conta desse resultado, não bastava a

teoria de Fresnel. Era necessário alguma coisa a mais (como a hipótese de contração de Fitzgerald e Lorentz).

De forma análoga, as teorias desenvolvidas por Larmor e por Lorentz eram aproximações de primeira ordem. Seria necessário desenvolver teorias *exatas* do eletromagnetismo, aplicáveis aos sistemas em movimento, que fossem compatíveis com o princípio que Poincaré havia explicitado.

Em 1899 Poincaré voltou ao assunto e deu o nome de “lei da relatividade” ao princípio de que somente os movimentos entre corpos materiais podem produzir efeitos. Comentou que todos os efeitos (tanto ópticos, quanto eletromagnéticos, quanto de outro tipo) que pudessem depender do movimento de um sistema em relação ao éter deveriam se cancelar exatamente, de tal modo que seja impossível detectar o movimento do sistema em relação ao éter, por qualquer tipo de experiência. Poincaré comentou que a hipótese de contração dos corpos materiais, de Lorentz, eram uma explicação *ad hoc*, inventada apenas para satisfazer o resultado inesperado do experimento de Michelson e Morley, sendo por isso insatisfatória. Seria necessário desenvolver uma teoria compatível com a lei da relatividade, aplicável a todos os fenômenos, e não ficar criando novas hipóteses para cada novo experimento.

Em 1900, Poincaré publicou novo trabalho, no qual utilizou o nome de “princípio do movimento relativo”, em vez de “lei da relatividade”. Nesse artigo, Poincaré deu uma interpretação física para o “tempo local” de Lorentz: mostrou que essa nova variável representava o tempo medido quando os relógios eram sincronizados por meio de sinais luminosos. Basicamente, o uso do “tempo local” significava utilizar a velocidade da luz como um padrão; e, por causa disso, a velocidade da luz se tornava um invariante, ou seja, tinha o mesmo valor em relação a todos os referenciais, estivessem eles se movendo em relação ao éter ou não. Dessa forma, nenhuma medida da velocidade da luz poderia evidenciar qualquer efeito do movimento do sistema em relação ao éter.

Por fim, em 1902, no seu livro “Ciência e hipótese”, Poincaré utilizou o nome “princípio de relatividade” para sua lei. Mas qual seria o motivo para aceitar esse princípio? Para Poincaré, ele seria simplesmente uma extrapolação dos resultados experimentais obtidos durante o século XIX. Por mais que se tentasse, não se conseguia medir a velocidade da Terra em relação ao éter. Podia-se supor que os repetidos fracassos fossem devidos a um princípio fundamental, e que nenhum tipo de experiência, fosse qual fosse, permitiria jamais medir a velocidade de um sistema em relação ao éter; somente os movimentos relativos entre corpos materiais podem ser medidos.

Não se sabe se Einstein chegou a ler os trabalhos anteriores de Poincaré; é provável que não os tenha lido. Porém, sabe-se com segurança que Einstein e alguns amigos discutiram detalhadamente o livro “Ciência e hipótese”. De acordo com dois amigos de Einstein, Maurice Solovine e Carl Seelig, Einstein leu esse livro de Poincaré entre os anos 1902 e 1903. O livro foi discutido no círculo de leituras ao qual Einstein pertencia, chamado “Academia Olympia”, durante várias semanas. Eles devem ter utilizado a edição original francesa (Einstein sabia ler e escrever em francês – um conhecimento exigido na Escola Politécnica da Suíça, onde estudou), pois a primeira tradução em alemão apareceu em 1904, quando a Academia Olympia já havia sido dissolvida. Portanto, Einstein conhecia o princípio da relatividade de Poincaré e outras idéias desse autor, quando escreveu seu trabalho de 1905.

Novos experimentos

Nos primeiros anos do século XX foram realizados novos experimentos para tentar medir a velocidade da Terra em relação ao éter. Um dos mais importantes foi o realizado por Trouton e Noble, em 1902. Foi o primeiro experimento eletromagnético (não óptico) para tentar detectar um fenômeno associado ao movimento da Terra. A idéia do experimento foi desenvolvida por Fitzgerald. Supondo que os corpos se contraem quando se movem, ele analisou as forças existentes em um capacitor carregado, que se deslocasse obliquamente em relação ao éter. Ele

mostrou que deveria surgir um torque, que tenderia a girar o capacitor. O efeito previsto era de segunda ordem em v/c , mas era mensurável. As medidas realizadas por Trouton e Noble deram um resultado nulo, ou seja, não mostraram o efeito previsto. Portanto, deveria haver algum novo efeito que cancelava o torque produzido pela contração de Lorentz e Fitzgerald. Era uma notável confirmação do princípio da relatividade de Poincaré – embora não fosse possível, inicialmente, entender por que não existia o torque previsto.

Já nos referimos a uma proposta de Fizeau, de 1854, de detectar o movimento da Terra através de medidas de intensidade luminosa. Em 1902, Lorentz discutiu essa proposta e concluiu que a análise teórica de Fizeau estava equivocada. Previu que a intensidade luminosa deveria ser igual nos dois anteparos, não dependendo do movimento da Terra. O teste experimental foi realizado no ano seguinte (1903) por Bucherer e Nordmeyer. De fato, eles não conseguiram detectar a diferença de intensidade luminosa prevista por Fizeau.

Admitindo a existência da contração de Lorentz e Fitzgerald, Lord Rayleigh sugeriu um outro efeito que poderia ser procurado: um sólido transparente comum, movendo-se através do éter, deveria adquirir dupla refração. Lord Rayleigh procurou o efeito, experimentalmente, em 1902-1903, e não o encontrou. O experimento foi refeito no ano seguinte (1904) por Brace, que confirmou o resultado nulo de Rayleigh.

Note-se que os experimentos de Trouton e Noble e de Lord Rayleigh não podiam ser explicados através da teoria de Fresnel, nem qualquer outra teoria conhecida. Eles confirmavam o princípio da relatividade e apontavam para a necessidade de desenvolver uma teoria fundamental, que incorporasse esse princípio e que pudesse ser aplicada a qualquer tipo de experimento.

As transformações de Lorentz (formulação exata)

Em 1900 Joseph Larmor publicou um livro denominado “Éter e matéria”, no qual procurou novamente estabelecer as transformações de espaço e tempo que mantêm as equações de Maxwell invariantes. No entanto, ao contrário do seu trabalho de 1893, já citado, ele agora procurou transformações *exatas* e não aproximações de segunda ordem. Ele chegou a resultados que, embora escritos de uma forma um pouco diferente da usual, foram a primeira versão correta das transformações de Lorentz. As transformações obtidas por Larmor eram:

$$\begin{aligned}x' &= (x - vt) / \sqrt{1 - v^2/c^2} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t \sqrt{1 - v^2/c^2} - x'v/c^2\end{aligned}$$

Substituindo o x' que aparece nessa quarta equação pela primeira relação e fazendo-se algumas simplificações algébricas, obtém-se a transformação de Lorentz para o tempo:

$$t' = (t - vx/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Pode-se dizer, portanto, que foi Larmor (e não Lorentz) quem obteve pela primeira vez as “transformações de Lorentz”. Mas então, por que não damos a essas equações o nome de “transformações de Larmor”? O principal motivo é que essas equações só se tornam úteis, no eletromagnetismo, quando são acompanhadas pelas transformações corretas das grandezas eletromagnéticas (campo elétrico, campo magnético, densidade de corrente elétrica, etc.). E Larmor não conseguiu chegar a esse conjunto de transformações.

Em 1904 (quatro anos depois do livro de Larmor), Lorentz publicou um extenso trabalho no qual propôs sua teoria exata do eletromagnetismo dos corpos em movimento.

No seu artigo, Lorentz apresentou sua transformação de coordenadas e tempo em duas etapas. Primeiramente, ele transformou do sistema S parado em relação ao éter para um sistema S' em movimento, utilizando as transformações da física clássica, ou seja:

$$\begin{aligned}x' &= (x - vt) \\y' &= y\end{aligned}$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Depois, como um segundo passo, ele transforma as coordenadas e o tempo do sistema em referência em movimento, utilizando as seguintes relações:

$$x'' = x' / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$y'' = y'$$

$$z'' = z'$$

$$t'' = t' \sqrt{1 - v^2/c^2} - (x'v/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Combinando-se os dois conjuntos de equações, obtemos a forma usual das transformações de Lorentz – que, no entanto, não aparece explicitamente no trabalho de Lorentz de 1904:

$$x'' = (x - vt) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$y'' = y$$

$$z'' = z$$

$$t'' = (t - vx/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

É interessante comentar o motivo pelo qual Lorentz faz essas transformações em duas etapas. Para ele, a *verdadeira* transformação de coordenadas é a primeira (que chamamos usualmente de “transformações de Galileu”, embora nunca tenham sido escritas por Galileu). O segundo passo seria um conjunto de transformações artificiais, ou puramente matemáticas, que lhe pareciam desprovidas de significado físico, criadas apenas para tornar invariante a forma das leis de Maxwell.

Lorentz obteve também a transformação dos campos eletromagnéticos, que podem ser escritas da seguinte forma:

$$E'_x = E_x$$

$$E'_y = (E_y - v.B_z) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$E'_z = (E_z + v.B_y) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$B'_x = B_x$$

$$B'_y = (B_y + E_z.v/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$B'_z = (B_z - E_y.v/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Utilizando esse conjunto de equações, Lorentz mostrou que todos os efeitos se cancelam exatamente e que é impossível medir movimento da Terra em relação ao éter por fenômenos eletromagnéticos (e ópticos).

Analisando a alteração das forças eletromagnéticas quando os corpos se movem através do éter e supondo que as forças que mantêm a forma dos objetos sólidos se transformam do mesmo modo, Lorentz provou que os objetos devem sofrer contração dos seus comprimentos, quando se deslocam através do éter. Ou seja: a partir desse trabalho, a contração de Lorentz deixou de ser uma explicação inventada sob medida para explicar o experimento de Michelson e Morley, tornando-se uma *consequência* das mudanças das forças entre as partículas que compõem cada corpo.

Há outros aspectos interessantes, no trabalho de Lorentz de 1904. Ele estudou teoricamente as propriedades de um elétron em movimento, supondo que ele fosse uma pequena esfera com carga elétrica, quando estivesse parado, e que se achatasse quando estivesse em movimento em relação ao éter (sofrendo contração). Deduziu que esse tipo de elétron deveria ter uma massa que

depararia da velocidade. A massa, definida pela segunda lei de Newton ($F=ma$), poderia ter diferentes valores conforme a força fosse aplicada na direção do movimento (massa longitudinal m_L) ou perpendicularmente ao movimento (massa transversal m_T). O resultado obtido por Lorentz pode ser representado da seguinte forma:

$$m_T = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$m_L = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{3/2}$$

Na teoria de Lorentz, a massa do elétron quando a velocidade tende a zero (m_0), é proporcional à sua energia eletrostática W , de acordo com a relação:

$$m_0 = \frac{4}{3} \frac{W}{c^2}$$

Temos, assim, um caso particular de relação entre massa e energia, porém contendo um fator numérico $4/3$, que não aparece na teoria da relatividade desenvolvida posteriormente.

No ano seguinte (1905) Paul Langevin analisou todas as forças que agem em um capacitor em movimento em relação ao éter e mostrou que a teoria de Lorentz permitia explicar o resultado nulo do experimento de Trouton e Noble.

Há outros aspectos históricos da teoria da relatividade que não podem ser discutidos aqui, por limitações de espaço. O estudo da relação entre massa e velocidade e da relação entre massa e energia tem uma longa história, que se inicia aproximadamente em 1880 e que se completa em torno de 1910. Muitos pesquisadores contribuíram para esse desenvolvimento.

A contribuição de Poincaré

Pode-se dizer que as principais contribuições de Poincaré ao desenvolvimento da teoria da relatividade ocorreram em resposta aos artigos de outros pesquisadores – especialmente Larmor e Lorentz. Estudando esses trabalhos, Poincaré apontou alguns erros, aperfeiçoou vários pontos e propôs complementações às idéias apresentadas, ajudando a construir uma teoria mais clara e coerente. Foi Poincaré quem batizou as “transformações de Lorentz” com esse nome, e que as apresentou na forma pela qual as conhecemos hoje em dia.

Acima de tudo, Poincaré se preocupava muito com a *interpretação física* da teoria de Lorentz. Em 1904, publicou um trabalho no qual mostrava que as transformações de Lorentz implicavam uma quebra de sincronização dos relógios em diferentes referenciais, e que o resultado obtido era exatamente igual ao que se obtém fazendo a sincronização com o uso de sinais luminosos e assumindo que, em relação a todos os referenciais, a velocidade da luz é a mesma. Mostrou também que as transformações de Lorentz levavam à idéia de uma dilatação do tempo e discutiu o significado físico desse efeito. Utilizando as mesmas transformações, mostrou que a velocidade da luz no vácuo era a velocidade limite que se poderia obter, utilizando composição de velocidades.

Por fim, nesse mesmo trabalho, Poincaré adotou uma posição de ruptura radical com a antiga física, propondo que seria necessário construir uma nova dinâmica geral, aplicável a todos os corpos (não apenas ao elétron) e que todas as leis físicas deveriam ser revistas, de tal modo a serem conciliadas com os resultados obtidos no eletromagnetismo e com o princípio da relatividade.

Foi em 1905 (o mesmo ano em que Einstein publicou seu primeiro trabalho sobre relatividade) que Poincaré fez sua maior contribuição ao assunto. Ele escreveu dois trabalhos – um mais longo, que foi publicado na Itália (na revista *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*) e um mais curto, apresentando apenas os resultados mais importantes, que foi

publicado na França (na revista da Academia de Ciências de Paris). O trabalho longo, embora enviado para publicação em meados de 1905, saiu publicado apenas no ano seguinte – depois do trabalho de Einstein.

Nesse trabalho, Poincaré corrigiu alguns últimos problemas da teoria de Lorentz. Mostrou que ele não havia obtido a transformação adequada da densidade de corrente elétrica, e que era necessário introduzir essa pequena modificação para que todos os fenômenos eletromagnéticos fossem idênticos, em referenciais parados ou em movimento em relação ao éter. Mostrou que as transformações de Lorentz formavam um grupo (no sentido matemático) e que, embora tivessem sido deduzidas supondo-se que um referencial estava parado em relação ao éter e o outro em movimento, podiam ser aplicadas a dois referenciais inerciais em movimento em relação ao éter – ou seja, não era necessário fazer referência ao éter, para utilizar a teoria de Lorentz. Poincaré também introduziu, nesse trabalho, a idéia de que o tempo pode ser manipulado como uma quarta dimensão, e mostrou a existência de invariantes relativísticos, como o intervalo espaço-temporal $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$. Costuma-se atribuir esse passo a Hermann Minkowski, mas o trabalho de Minkowski foi desenvolvido apenas dois anos depois.

Lorentz, como foi mencionado acima, havia desenvolvido uma teoria dinâmica para o elétron e calculado sua massa em função da velocidade. Havia outros modelos para o elétron, na época – autores como Max Abraham supunham que o elétron não se contraía ao se mover, e outros como Paul Langevin supunham que ele se contraía longitudinalmente mas se dilatava lateralmente, conservando o mesmo volume. Poincaré provou que apenas a teoria de Lorentz era coerente com o princípio da relatividade – ou seja, se o elétron não obedecesse exatamente à proposta de Lorentz, seria possível detectar o movimento da Terra em relação ao éter. Por isso, considerou que as outras teorias eram inválidas.

Por fim, Poincaré iniciou, nesse trabalho, a discussão sobre as conseqüências do princípio da relatividade no estudo da gravitação. Assim como os campos eletromagnéticos possuem diferentes valores quando medidos de diversos referenciais, o campo gravitacional também deveria ter equações de transformação análogas. Poincaré mostrou que isso teria conseqüências importantes e que introduziria uma alteração da força gravitacional agindo sobre corpos em movimento rápido. Provou que o efeito produziria um efeito de rotação do eixo das órbitas dos planetas (precessão do periélio) e calculou o efeito para o caso de Mercúrio. Existia, de fato, uma anomalia que já tinha sido detectada por Leverrier e por Newcomb, para o movimento de Mercúrio e de Marte. No entanto, o efeito que Poincaré calculou era aproximadamente um terço do efeito anômalo que havia sido observado. Somente com o desenvolvimento da teoria da relatividade geral, dez anos depois, houve uma concordância quantitativa entre a teoria e as observações astronômicas.

Einstein e depois de Einstein

Em 1905 Einstein publicou dois artigos relacionados à teoria da relatividade. Um deles, mais extenso, discutia a mecânica e o eletromagnetismo dos corpos em movimento. Obtinha essencialmente os mesmos resultados que já haviam sido obtidos por outros autores, porém utilizando uma forma diferente de deduzi-los (muito mais simples). No segundo trabalho ele apresentou a relação entre massa e energia, para um caso particular.

Sob o ponto de vista de *novos resultados científicos*, o trabalho de Einstein em 1905 não trouxe muitas contribuições. No entanto, como será discutido mais adiante, ele utilizava uma concepção epistemológica diferente, interpretando de outra forma os resultados obtidos. A maior parte do desenvolvimento posterior da teoria da relatividade especial foi também realizada por outros pesquisadores – e não por Einstein.

A termodinâmica relativística foi desenvolvida por Max Planck, que em 1907 também esclareceu as propriedades relativísticas de sistemas extensos submetidos a forças externas, mostrando que, em vez da relação $E=mc^2$, existe uma relação mais geral, que associa a entalpia H de um sistema à sua massa inercial: $H=mc^2$. A relação $E=mc^2$ só é válida para partículas, ou

sistemas isolados (que não estão submetidos a pressões ou tensões) e não pode ser aplicada a alguns outros casos, como na análise da energia potencial de uma partícula em um campo externo.

A cinemática da teoria da relatividade recebeu um tratamento mais sofisticado com o formalismo quadri-dimensional do espaço-tempo. Esse tratamento foi iniciado por Poincaré (no trabalho escrito em 1905 mas que saiu publicado em 1906) e completado por Minkowski em 1909. Além de dar um novo formalismo à cinemática, outras grandezas (como momentum e energia) receberam um tratamento novo, sob a forma de quadrivetores. Einstein não contribuiu para esse desenvolvimento.

No caso do eletromagnetismo, a aplicação do formalismo quadri-dimensional levou a uma formulação *tensorial*. Esse desenvolvimento foi realizado por Minkowski e por Abraham, em 1908-1910. Einstein também não participou dessa etapa.

A dinâmica relativística de meios contínuos foi o resultado da colaboração de vários autores, como Max Planck, Richard Tolman e outros. Ela foi completada por Max von Laue, que criou o tensor de momentum-energia, em 1911.

Todos esses avanços tiveram também contribuições de muitos outros pesquisadores. Porém, Einstein esteve alheio a esses importantes desenvolvimentos. Parece que, se Einstein tivesse morrido logo depois de publicar seus trabalhos de 1905, isso não teria feito nenhuma diferença significativa no desenvolvimento da teoria da relatividade especial.

SEMELHANÇAS E DIFERENÇAS ENTRE EINSTEIN E LORENTZ + POINCARÉ

Se considerarmos o trabalho *conjunto* de Lorentz e Poincaré (que, como foi explicado, utilizaram resultados obtidos por vários outros pesquisadores), pode-se dizer que quase todas as equações obtidas por Einstein já haviam sido obtidas antes.

Como Lorentz e Poincaré desenvolveram seus trabalhos admitindo a existência de um éter, pode-se imaginar que essa equivalência de resultados poderia ser apenas parcial e que, em alguns pontos cruciais, há conseqüências testáveis da teoria de Einstein que mostram que ela é superior à de Lorentz e Poincaré. Isso, no entanto, não ocorre. Tudo o que pode ser deduzido matematicamente de uma dessas teorias pode ser deduzido da outra. Em relação ao que é *observável*, não há diferenças, ou seja: todos os resultados experimentais previstos por uma das teorias podem ser previstos pela outra.

Como então, se provou que Einstein estava certo e os defensores do éter estavam errados? Bem, para dizer a verdade, *isso nunca foi feito*. Não houve nenhum experimento que tenha mostrado que o éter não existia. Não houve nenhuma previsão feita por Einstein (dentro da relatividade especial) que tenha levado a resultados em contradição com a teoria de Lorentz e Poincaré. *Não pode ser feita uma experiência crucial para distinguir a teoria de Lorentz-Poincaré da relatividade de Einstein. Não se pode decidir cientificamente qual delas é correta.*

Pode-se dizer que, em vez de serem duas *teorias* diferentes, o que esse autores produziram foram duas *interpretações diferentes* da mesma teoria física.

A principal diferença entre as duas abordagens era a aceitação (ou negação) do éter. Para Lorentz e Poincaré, o éter era aceito com um *conceito útil*, capaz de propiciar uma *compreensão* dos fenômenos, embora fosse impossível detectá-lo. Para Einstein, o éter era um *conceito inútil*, porque não pode ser detectado. Einstein, em 1905, adotou a posição de que aquilo que não pode ser detectado deveria ser excluído da física. Posteriormente (em 1920) ele mudou sua postura e defendeu a existência de um éter.

O princípio da relatividade nas duas teorias

Tanto Lorentz e Poincaré quanto Einstein aceitavam o princípio da relatividade. Eles acreditavam que uma série de experimentos havia mostrado que era impossível medir a

velocidade da Terra em relação ao éter. Havia, como indicamos acima, alguns experimentos que aparentemente haviam medido efeitos do movimento da Terra. Como eles encaravam esses experimentos? Einstein nunca se referiu a eles – provavelmente não os conhecia. Poincaré também não os mencionava. Lorentz escreveu sobre eles e considerava que eles estavam equivocados.

Se algum experimento medisse a velocidade da Terra em relação ao éter, não mostraria apenas que Einstein estava errado: também mostraria que Lorentz e Poincaré estavam enganados. Se um experimento refutasse a teoria da relatividade, refutaria também a teoria de Lorentz e Poincaré. No entanto, podemos dizer que a teoria do éter seria mais “adaptável” e que poderia ser reformada e conciliada com os resultados experimentais; mas a teoria de Einstein não poderia, pois ele coloca os seus princípios como postulados gerais.

Para Lorentz e Poincaré, o princípio da relatividade era a generalização de resultados experimentais e, por isso, era passível de refutação. A teoria de Lorentz foi construída aos poucos, sendo primeiramente uma teoria aproximada – isto é, ela mostrava que *certos tipos de experimentos* (de primeira ordem em v/c) não poderiam detectar o movimento da Terra em relação ao éter, mas permitia que outros experimentos mostrassem efeitos desse movimento. Depois, a teoria se tornou exata e o princípio da relatividade passou a valer de forma rigorosa. Se o princípio da relatividade fosse derrubado por experimentos, certamente Lorentz e Poincaré poderiam retornar à primeira teoria e aperfeiçoá-la.

No caso da abordagem de Einstein, o princípio da relatividade é um *postulado*. O éter não existe, portanto é impossível detectar movimentos em relação ao éter e todos os referenciais inerciais são equivalentes. Se um experimento mostrasse que o princípio da relatividade não é válido, *toda a teoria de Einstein* cairia por terra.

A constância da velocidade da luz nas duas teorias

Além do princípio da relatividade, o trabalho de Einstein de 1905 postula a constância da velocidade da luz, afirmando que a velocidade da luz (ou qualquer outra radiação eletromagnética) não depende da velocidade de sua fonte. Por exemplo: a luz emitida por uma lâmpada parada tem a mesma velocidade que a luz emitida por uma lâmpada com alta velocidade⁶.

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

De fato, em qualquer teoria que aceite a existência do éter, é natural que a velocidade da luz não dependa do movimento da fonte, pois trata-se da mesma situação que ocorre na acústica. Se a luz é uma onda do éter, o valor de c deve ser uma propriedade do éter, não dependendo da velocidade da fonte luminosa.

⁶ Muitos autores confundem o conteúdo desse segundo postulado, descrevendo-o como se afirmasse que a velocidade da luz *não depende do referencial em relação ao qual ela é medida*. O postulado original de Einstein não dizia isso.

A idéia de que a luz seria uma onda que se propaga no éter havia adquirido um forte peso durante o século XIX. Antes disso, predominava a idéia de que a luz seria constituída por um fluxo de pequenas partículas de grande velocidade. Quem admitisse a hipótese corpuscular da luz não teria nenhum motivo para pensar que a velocidade da luz pudesse independe da velocidade da fonte – muito pelo contrário, afirmaria justamente o contrário, como consequência da mecânica newtoniana.

Quem negasse a teoria ondulatória da luz e a existência do éter, já não poderia justificar esse princípio de nenhuma forma simples. Na teoria de Einstein, já que o éter era abandonado, seria mais “intuitivo” pensar na luz como partícula e, nesse caso, seria esperado que a velocidade dependesse da fonte.

É curioso que em 1905, o mesmo ano em que publicou seu primeiro trabalho sobre relatividade, Einstein propôs uma hipótese corpuscular para a luz⁷. No entanto, no artigo sobre relatividade, a luz é tratada como uma onda.

Ao contrário dos defensores do éter, Einstein precisaria justificar experimentalmente esse postulado, mas não o fez. Em 1900 não existiam experimentos terrestres sobre a constância de c , estudando fontes luminosas de alta velocidade. Foi apenas em 1919 que o físico italiano Quirino Majorana publicou as primeiras evidências de laboratório desse tipo.

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

Então, que justificativa Einstein apresentava para justificar o seu segundo postulado? Na verdade, *nenhuma*. Ele apenas afirmou: “introduziremos um outro postulado que é apenas aparentemente inconsistente com o primeiro, a saber, que a luz no espaço vazio sempre se propaga com uma velocidade definida V que é independente do estado de movimento do corpo que a emite” (EINSTEIN, 1905, pp. 892).

Pode-se dizer que o postulado da constância da velocidade da luz era o menos revolucionário dos pressupostos de Einstein, pois seria aceitável à maioria dos físicos que aceitavam o éter e a teoria ondulatória da luz, a partir de meados do século XIX. No entanto, quando se pensa que Einstein simultaneamente estava negando o éter, torna-se difícil compreender como ele poderia justificar esse postulado.

A velocidade da luz em diferentes referenciais

Em uma teoria de éter, como a de Lorentz e Poincaré, a velocidade da luz só é isotrópica (isto é, tem a mesma velocidade em todas as direções e sentidos) em relação ao éter. Em relação a outros referenciais, que se movam em relação ao éter, sua velocidade “real” é diferente – exatamente como no caso do som no ar. Se duas pessoas estão paradas no chão, a uma distância de duzentos metros, e há um vento soprando de uma para a outra, o som percorrerá o espaço entre elas mais rapidamente no sentido do vento do que no sentido oposto. Ou então, se não há vento mas as duas pessoas estiverem nas extremidades de um trem de duzentos metros de comprimento, e enviarem sinais sonoros através do ar externo, o som percorrerá o espaço entre elas mais lentamente no sentido do movimento do trem, e mais rapidamente no sentido oposto ao do trem.

No entanto, no caso da luz, é muito difícil determinar sua velocidade em um único sentido, entre dois pontos, como já foi explicado. Normalmente é medida a velocidade de ida e volta. Para se poder medir a velocidade em um único sentido, é necessário dispor de algum tipo de método para sincronizar relógios distantes. Poincaré mostrou que o método mais conveniente de se sincronizar relógios distantes é exatamente utilizando sinais luminosos (ou outros

⁷ Costuma-se afirmar que Einstein propôs, em 1905, a dualidade onda-partícula para a luz. Este é uma interpretação totalmente errônea da “hipótese heurística” que ele propôs naquele ano.

equivalentes, como sinais eletromagnéticos). Quando se usa a luz para sincronizar os relógios, qualquer medida da velocidade da luz fica “viciada” e não poderá indicar a velocidade “real” da luz. Por isso, quando a velocidade da luz for medida em relação a um referencial em movimento em relação ao éter, utilizando relógios sincronizados pela luz, as medidas vão indicar que a velocidade da luz é sempre a mesma, em todas as direções e sentidos. Mas isso não é uma medida “real”, é apenas o resultado de uma convenção adotada para o processo de sincronização dos relógios.

Na abordagem de Einstein, a situação é muito diferente. Como não existe o éter, todos os referenciais são idênticos. Se existir um referencial inercial no qual a velocidade da luz se propaga com a mesma velocidade em todas as direções e sentidos, a mesma coisa deve acontecer em todos os outros. Ora, se tivermos um referencial no qual uma fonte luminosa está *parada*, a velocidade da luz deve ser a mesma em todas as direções, *por simetria* – não existe nada que diferencie uma direção da outra. Além disso, pelo segundo postulado (a velocidade da luz não depende da velocidade da fonte), se houver uma fonte luminosa *em movimento* nesse mesmo referencial, a velocidade da luz continuará a mesma, e também será isotrópica. Portanto, nesse referencial, qualquer que seja o estado de movimento da fonte luminosa, a velocidade da luz é sempre a mesma e igual a c , em todas as direções. Pelo princípio da relatividade, o mesmo deve ocorrer em todos os outros referenciais.

Existe, assim, uma diferença *conceitual* entre as duas abordagens. No entanto, as duas concordam que as medidas da velocidade da luz são sempre as mesmas, em todos os referenciais inerciais. Assim, nenhum experimento pode mostrar que uma das abordagens está certa e a outra está errada.

A contração de Lorentz-Fitzgerald e a realidade

O mesmo tipo de diferença entre a realidade e a aparência está presente em outros aspectos da abordagem de Lorentz e Poincaré. A contração dos corpos em movimento (contração de Lorentz e Fitzgerald) seria, na teoria do éter, um efeito *real*. Quando um corpo material se move através do éter, as forças moleculares se alteram por causa desse movimento e o objeto muda de tamanho e forma. Assim, se tivermos dois objetos idênticos, um parado em relação ao éter e outro em movimento em relação ao éter, aquele que está em movimento vai *realmente* se contrair e o outro vai continuar do mesmo tamanho. No entanto, se um observador estiver se movendo em relação ao éter, junto com o objeto, ele observará o contrário: o corpo em movimento parecerá ter o tamanho “normal” e o objeto parado em relação ao éter parecerá estar contraído. Nesse caso, a contração do objeto parado em relação ao éter é aparente, apenas; mas o observador em movimento não terá nenhum modo de descobrir se a contração é real ou aparente.

No caso da abordagem de Einstein, como não existe o éter, não há diferença entre contração real e aparente. A contração é um fenômeno relativo, que depende apenas dos processos de medida adotados. Ela não é explicada microscopicamente pelas mudanças das forças entre as partículas da matéria. Em um certo sentido, a abordagem de Einstein *não explica a causa da contração*, apenas deduz que ela existe. Diferenças de interpretação como essa ocorrem em outros aspectos da teoria.

Nível de análise

No estudo de muitos fenômenos – como a contração dos objetos e a variação da massa com a velocidade – a abordagem de Lorentz e Poincaré utiliza uma análise microscópica, estuda todos os detalhes do fenômeno e procura captar as causas dos efeitos observados. Einstein, pelo contrário, permanece em um nível principalmente macroscópico e fenomenológico: ele deduz os resultados mais importantes sem entrar em detalhes sobre o que ocorre dentro dos vários objetos estudados.

Essa diferença entre as duas abordagens pode ser comparada à que havia, na época, entre a teoria cinética dos gases e a termodinâmica. A teoria cinética dos gases se preocupa com a estrutura atômica da matéria e procura compreender os vários fenômenos das substâncias (como a lei dos gases ideais) a partir dessa estrutura. A termodinâmica propriamente dita não utiliza qualquer hipótese sobre a estrutura da matéria, mas baseia-se em leis gerais, macroscópicas, que permitem chegar a muitos resultados importantes de forma simples. Pode-se dizer que, em muitos aspectos, a abordagem de Lorentz e Poincaré é semelhante à teoria cinética dos gases, enquanto a de Einstein é mais parecida com a termodinâmica.

Estrutura matemática e lógica

Costuma-se dizer que a teoria da relatividade de Einstein é extremamente complexa e difícil de compreender. Na verdade, o trabalho de Einstein de 1905 é muito simples, claro e fácil de compreender. No caso dos trabalhos de Lorentz e Poincaré, a situação é justamente oposta. Esses trabalhos, sim, são muito difíceis de serem compreendidos. Esses autores não estava apresentando uma versão acabada e didática de suas idéias, e sim mostrando a construção gradual, através de diversas tentativas, de uma teoria que ainda estava sofrendo mudanças. Eles não tinham muita clareza sobre o que deveria ser tomado como ponto de partida, não tinham um conjunto de postulados e um método claro de dedução dos resultados. Cada caso particular era estudado por um novo método.

Em contraste, Einstein apresenta seus pressupostos com muito mais clareza. Como parte de dois postulados (e de outras coisas tomadas do eletromagnetismo e da mecânica clássica), as deduções se tornam mais simples e claras, tanto sob o ponto de vista conceitual quanto matemático. Há uma técnica geral de análise, utilizada em todos os casos. Esse foi um aspecto do trabalho de Einstein que impressionou e foi apreciado por todos, na época. Mesmo as pessoas que não concordaram com os aspectos conceituais e epistemológicos do trabalho de Einstein perceberam que sua metodologia era muito mais conveniente. Foi por causa disso – e não pela negação do éter – que muitos pesquisadores começaram a seguir a abordagem de Einstein, alguns anos depois.

É claro que essa diferença entre as duas abordagens não é uma diferença *de princípio*. Mesmo quem aceitasse o éter podia tomar como ponto de partida os dois postulados de Einstein, já que eles também eram aceitos por Lorentz e Poincaré.

Embora ambos os princípios fossem aceitos pelos físicos anteriores, foi Einstein quem mostrou que todas as deduções se tornavam muito mais simples se eles fossem assumidos como o ponto de partida básico (ou seja, se fossem assumidos como postulados). Não há dúvidas de que isso foi uma importante contribuição. Note-se, no entanto, que a mesma coisa ocorre, normalmente, quando se elabora uma versão *didática* de uma teoria científica. Quando Maxwell publicou seu *Treatise of electricity and magnetism*, sua teoria foi apresentada de um modo confuso, difícil de entender. Obras posteriores, como o livro em que Poincaré expôs a teoria de Maxwell, em 1901 (e que era, na verdade, a transcrição de um curso que ele ministrou na Sorbonne), eram muitíssimo mais simples, com deduções claras e simples. Pode-se dizer que o trabalho de Einstein de 1905 está para os trabalhos de Poincaré e Lorentz como a formulação didática de uma teoria está, normalmente, para sua primeira proposta.

Visão epistemológica

Por fim, é preciso apontar que a principal diferença entre as duas abordagens é de natureza *epistemológica*, ou seja, filosófica, que se manifestava tanto na questão da realidade dos efeitos relativísticos quanto no aspecto de aceitar ou negar o éter. Aceitar ou não o éter não era uma questão *científica*, propriamente dita, pois não podia ser decidida por experimentos. Ou seja: nenhum experimento provou que existia o éter e nenhum experimento provou que ele não existia.

Para Lorentz e Poincaré, o éter era aceito com um *conceito útil*, capaz de propiciar uma *compreensão* dos fenômenos, embora fosse impossível detectá-lo. Poincaré chegou a afirmar que, para ele, não interessava saber se o éter existia realmente ou não – isso seria um problema metafísico. Para ele, o que interessava é que tudo se passa como se ele existisse, já que a luz se comporta como uma onda e uma onda deve ser pensada como um fenômeno que ocorre em alguma substância. Trata-se de uma postura epistemológica que pode ser descrita como *instrumentalista*.

Para Einstein, o éter era um *conceito inútil*, porque não pode ser detectado. Einstein, em 1905, adotou a posição de que aquilo que não pode ser detectado deveria ser excluído da física. Essa é uma postura epistemológica *empirista*, ou *positivista*. Posteriormente (em 1920) Einstein mudou sua postura e defendeu a existência de um éter. Em diferentes momentos, ele adotou posições filosóficas diferentes, não considerando importante manter uma coerência. Quando a mecânica quântica se desenvolveu e adotou uma interpretação empirista, negando a validade de falar sobre coisas que não podiam ser observadas (como a posição e velocidade de um elétron em um certo instante), Einstein se revoltou contra essa postura epistemológica que Heisenberg havia aprendido com o próprio Einstein. Pode-se dizer que ele se comportava de modo oportunista, utilizando em cada fase a epistemologia que parecia mais conveniente para defender suas idéias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A teoria que atingiu seu ápice nas mãos de Lorentz e Poincaré não era a teoria de Einstein. Suas visões de mundo eram diferentes. Eles aceitavam o éter, embora também aceitassem que era impossível detectar o movimento em relação a esse meio. Sua abordagem epistemológica era também diferente da de Einstein. No entanto, quase todas as previsões científicas da teoria de Einstein já estavam lá, nos artigos publicados por outros pesquisadores, antes de seu primeiro trabalho de 1905. O conteúdo empírico dessas duas teorias é idêntico. Por mais estranho que pareça, é impossível distinguir, por qualquer experimento, a interpretação de Lorentz e Poincaré da interpretação de Einstein.

Antigamente, descrevia-se a história de cada nação como a sucessão dos feitos de seus reis. Essa visão simplista e equivocada foi substituída por outra, em que muitos tipos de atores contribuem para as diversas mudanças sociais que ocorrem em cada lugar, ao longo do tempo. É necessário que a história das ciências ultrapasse também a descrição mítica dos “grandes gênios” e seja capaz de estudar toda a complexidade e riqueza do real desenvolvimento histórico de cada passo. A teoria da relatividade não é “a teoria de Einstein” e ela não surgiu de forma mágica no ano de 1905. Ela se desenvolveu gradualmente, com a contribuição de um grande número de pesquisadores, alguns dos quais totalmente obscuros para a grande maioria dos cientistas de hoje. A evolução da ciência é um trabalho coletivo e gradual, não é individual e instantâneo.