

O DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE

YASHIRO YAMAMOTO

Devida à escassez das fontes de energia natural, mormente o petróleo, hoje, como nunca acontecera, a atenção dos povos desenvolvidos voltou-se violentamente para o aproveitamento da energia nuclear que pode ser transformada em energia elétrica (o esforço brasileiro nesse sentido pode ser traduzido pela construção do reator nuclear em Angra dos Reis). Mas, até o começo deste século a energia nuclear não era conhecida. Foi a teoria da relatividade apresentada por Einstein em 1905 que mostrou a conversibilidade da matéria em energia e vice-versa (na teoria da relatividade existe a dualidade massa-energia). Fato curioso é que essa teoria despertou muito interesse não só no meio científico e intelectual como também entre os leigos. Sobre ela e seu criador Einstein (talvez o cientista mais famoso de nosso século) foram escritos inúmeros artigos de divulgação. Mas, apesar de nenhuma teoria física ter dado tanta notoriedade e popularidade a um homem, no início ela foi recebida com frieza, desinteresse e descrédito. É nosso propósito procurar alinhar em poucas palavras o retrospecto histórico dessa teoria.

No fim do século passado a mecânica Newtoniana e o eletromagnetismo Maxwelliano já estavam bem estabelecidos e os grandes físicos como William Thomson (1872), também conhecido como Lord Kelvin, chegaram mesmo a acreditar que pouco de importante lhes restava por fazer. Porém, a tentativa de explicar o eletromagnetismo por meio da mecânica (tentativa de unificação dessas duas teorias numa só) e a radiação do corpo negro levariam os físicos a duas teorias inéditas que iriam abrir novas perspectivas ao mundo das pesquisas físicas com consequentes influências nas

outras ciências: a teoria da relatividade e a mecânica quântica. A teoria da relatividade foi proposta por Einstein (1905) e a radiação do corpo negro que deu origem à mecânica quântica foi explicada por Max Planck (1900). Já se conhecia na época que tanto a fórmula da atração gravitacional de Newton entre duas massas gravitacionais como a da interação Coulombiana de cargas elétricas bem como forças de interação entre polos magnéticos obedeciam formalmente a uma mesma equação matemática: a força de interação gravitacional (elétrica, magnética) é proporcional ao produto de suas massas gravitacionais (cargas elétricas, massas magnéticas) e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa. Mas, havia uma diferença notória entre as duas teorias: na mecânica o movimento era *relativo* ao passo que no eletromagnetismo *absoluto*. Na mecânica um determinado corpo pode estar em repouso *relativamente* a um observador e estar em movimento *relativamente* a outro observador. Por exemplo, no interior de um trem em movimento o copo de leite que está sobre a mesa, em frente ao passageiro, está *parado em relação* a ele, mas, está se movimentando com a mesma velocidade que o trem *em relação* ao observador que estiver fora do trem e parado. Mas, no eletromagnetismo necessitamos de um meio universal, o éter, em relação ao qual (e somente em relação a ele) fazia sentido qualquer movimento. Então o éter seria um meio absoluto em relação ao qual as partículas teriam *portanto uma velocidade única e logo absoluta*.

A idéia do éter surgiu na ciência grega. Ele foi introduzido como um elemento adicional aos quatro elementos que os filósofos gregos acreditavam formar o universo: fogo, terra, água e ar. Para eles, o éter ocupava a região acima do ar, a região celestial.

Do ponto de vista de Descartes (1638), o espaço é um pleno, sendo ocupado por um meio imponderável, o éter mecânico, que embora seja imperceptível aos sentidos é capaz de transmitir força a corpos imersos nele bem como ser portador da luz. Descartes assumiu que as partículas do éter estavam em constante movimento. Entretanto, como ele supunha que não havia espaço vazio onde as partículas em movimento pudessem deslocarse, ele inferiu que elas se moviam tomando os lugares que se vagavam com o movimento de outras partículas do éter. Portanto, o movimento dessas cadeias fechadas constituíam vórtices que desempenhavam funções importantes na sua imagem do cosmos: os vórtices é que carregariam os planetas em órbitas ao redor do sol.

Uma vez que o éter era considerado como o portador da luz, havia interesse em se conhecer a natureza da luz pois, através dela poder-se-ia ter uma melhor compreensão do éter. Havia a *teoria ondulatória* de Descartes (1638), Robert Hooke (1667) e Christian Huygens (1678) e a *teoria corpuscular* de Newton (1675).

A teoria corpuscular defende o ponto de vista de que os corpos luminosos lançam partículas finas que se movem segundo as leis da mecânica e produzem a sensação de luz quando se chocam com o olho. A teoria ondulatória, por sua vez, estabelece uma analogia entre propagação da luz e o movimento das ondas sobre a superfície da água ou das ondas sonoras no ar. Para tanto, era assumida a existência de um meio elástico que atravessava todos os corpos transparentes: o éter luminífero (o termo luminífero apareceu na época pelo fato de se pensar que a luz devia se propagar por um meio que eles chamaram éter; o éter seria o portador da luz).

A grande objeção à teoria ondulatória era que a luz propagava-se em linha reta (quando interposmos um material opaco em sua trajetória, a luz projetará num anteparo a sombra do material opaco) enquanto o som podia contornar obstáculos. Isto fez com que Newton supusesse que a luz fosse algo que se movia a partir de um corpo luminoso como partículas ejetadas. Seus sucessores interpretaram a sua opinião como sendo a favor da teoria corpuscular e a autoridade de seu nome trouxe a aceitação para sua teoria durante um século. Mas, naquela época Grimaldi havia descoberto que a luz pode também contornar obstáculos (o resultado foi publicado postumamente em 1665). Nas bordas de obstáculos finos ele observou uma fraca iluminação na forma de estrias ou franjas com regiões claras e escuras alternadas; esse fenômeno é chamado *difração da luz*.

Logo depois, Huygens (1678) notou que dois feixes de luz podiam se cruzar sem que uma interferisse na outra como duas ondas na superfície da água enquanto que em feixes de partículas emitidas ocorrem colisões que perturbam os feixes. Huygens enunciou um princípio (princípio de Huygens) que considera todo ponto onde a luz atinge como fonte de nova onda esférica de luz e assim explicou satisfatoriamente a reflexão e a refração da luz. Huygens também descobriu a polarização da luz por meio da refração dupla do espato da Islândia, fato este descoberto por Erasmus Bartholinus (1669). Outros progressos foram alcançados no estudo da luz. Thomas Young

(1802) citou o princípio de interferência para explicar os anéis coloridos e as franjas que Newton já tinha observado em finas camadas de substâncias transparentes (hoje temos redes de difração que espalham a luz em ângulos diferentes, de acordo com a cor da luz; a luz branca é composta de luzes de todas as cores e elas podem ser separadas num prisma ou numa rede de difração). Hoje também sabemos que a cor da bolha de sabão depende da espessura da bolha, uma vez que as reflexões da luz nas duas superfícies da bolha selecionarão a cor da luz que dará interferência construtiva, de acordo com a espessura da bolha. Fresnel e também Young (1817) descobriram experimentalmente que as vibrações da luz devem ser transversais; a velocidade da luz foi medida por Fizeau (1849) e Foucault (1865) usando métodos astronômicos.

O éter como um sólido elástico

Após ser reconhecida e provada a transversalidade da luz, Fresnel passou a desenvolver uma teoria que mais tarde se tornaria a *teoria dinâmica da luz*, na qual as propriedades dos fenômenos ópticos seriam deduzidos a partir das propriedades do éter e das forças nela atuantes, de acordo com a mecânica. O éter seria obrigatoriamente uma espécie de sólido elástico porque somente nele podia ocorrer onda mecânica transversa. Fresnel estudou a propagação dos fenômenos ópticos nos cristais e confirmou a analogia entre a natureza das ondas de luz e as ondas elásticas.

Sem nos preocuparmos com a dedução matemática, podemos relacionar a velocidade de propagação de uma onda num meio com a constante de restauração k e densidade desse meio ρ por:

$$c = \sqrt{k/\rho}$$

Devida a essa relação, a teoria que considerava éter como um sólido elástico deparava-se com propriedades quase espantosas: deveria ter grande constante de restauração, ou seja, grande rigidez ou baixa densidade de matéria ou as duas coisas simultaneamente. Como a velocidade de propagação da luz é diferente no interior de substâncias diferentes, o éter não interior das

substâncias deve ser condesnado ou ter a elasticidade *mudada ou ambas as coisas simultaneamente. Devida à natureza indefinida do problema, surgiram inúmeras teorias diferentes para o éter elástico. Mas, o fato de ter-se que atribuir ao éter elástico uma grande rigidez implicava que o éter deveria intervir no movimento dos corpos celestes. As observações astronômicas mostravam o contrário: o movimento dos planetas obedeciam às leis de Newton do movimento, sem apresentar qualquer desvio.

O éter eletromagnético

A existência da relação íntima entre luz e fenômenos eletromagnéticos foi mostrada por Faraday (1834) ao notar que quando um raio de luz polarizada passava através de uma substância transparente magnetizada sofria interferências dessa substância, tal que o plano de polarização da luz girava quando o feixe de luz era paralelo às linhas magnéticas de força **. Faraday concluiu disso que o éter luminífero (éter portador de luz) e o portador das linhas magnéticas de força devem ser idênticos. Como Faraday era auto-didata, sem formação acadêmica, ele não sofreu influência muito forte das idéias que corriam no meio científico da época. As suas deficiências matemáticas eram compensadas pelas inúmeras experiências que realizava e pela grande facilidade de observar, interpretar e criar modelos.

Faraday fez experiências com um condensador de placas paralelas e notou que as placas submetidas a uma diferença fixa de potencial elétrico se carregava com cargas diferentes, de acordo com o tipo de material que era inserido entre as placas. Desse fato, Faraday concluiu que as cargas de cada placa do condensador não atuavam diretamente uma nas outras mas sim através do meio material, numa transmissão de ponto a ponto. Isto fez com que Faraday abandonasse a hipótese da ação a distância e a substituísse pela ação contígua por contacto. James Clerk Maxwell (1837), grande admirador de Faraday e profundo conhecedor das teorias matemáticas da época condensou todas as leis do eletromagnetismo em quatro fórmulas matemáticas que passaram a se chamar equações de Maxwell. Maxwell admitiu a ação

* Quanto menor a constante de restauração, maior será a elasticidade.

** Essas linhas podem ser vistas se espalharmos limalha de ferro sobre uma folha de papel e em seguida colocarmos um ímã em forma de U por baixo do papel.

contigua por contacto e uma velocidade finita de propagação para as forças eletromagnéticas. Maxwell ainda demonstrou teoricamente que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas coincidia com a velocidade da luz e desse fato concluiu que as *ondas de luz eram ondas eletromagnéticas*.*

A ligação entre luz e eletromagnetismo tornava-se cada vez mais próxima com a descoberta de que a luz podia ser perturbada pelos campos elétrico e magnético, em concordância com as leis de Maxwell.

A prova final da unicidade da óptica e eletromagnetismo devemos a Heinrich Hertz (1888) que produziu pela primeira vez ondas eletromagnéticas em laboratório e mostrou que a propagação da força eletromagnética ocorria com velocidade finita.

Hertz efetuou experiências de reflexão e interferência de ondas eletromagnéticas que lhe possibilitaram medir os comprimentos de onda. Como ele conhecia a frequência dessas ondas, eletromagnéticas, ele pode determinar a velocidade dessas ondas, confirmando definitivamente que era a própria velocidade da luz, fato esse previsto por Maxwell. Hoje em dia os nossos meios de comunicação (rádio, televisão, telex, telefone via satélite) existem e são eficientes graças aos dois grandes cientistas: Maxwell e Hertz; o primeiro por ter previsto a existência das ondas eletromagnéticas e o segundo por tê-las produzido pela primeira vez em laboratório.

Agora que já verificamos a conexão entre a mecânica ondulatória e o eletromagnetismo através das ondas eletromagnéticas, resta-nos superar o impasse entre o movimento absoluto do eletromagnetismo e o movimento relativo da mecânica. Para isso, necessitamos demonstrar a inexistência do éter, referencial absoluto.

A experiência de Michelson e Morley e a hipótese de contração de Lorentz

Michelson (1881) construiu um interferômetro que foi posterior-

* Hoje sabemos que todas as luzes visíveis a olho nu ocupam uma estreita faixa de frequências que podem ter as ondas eletromagnéticas.

mente aperfeiçoado com o auxílio de Morley (1887) a fim de detectar uma possível variação da velocidade da luz devida ao suposto movimento da Terra em relação ao éter. Essa detecção poderia ser feita através de observações no deslocamento das franjas de interferência quando eles giravam o interferômetro de 90°. Pelos seus cálculos, eles esperavam um deslocamento de 0,4 de franja mas, nenhum deslocamento foi observado. Depois disso muitas pessoas refizeram a experiência, mudando-se as condições experimentais, porém, sem conseguir detectar qualquer deslocamento de franjas. Uma vez que não era possível detectar qualquer movimento da Terra em relação ao éter, sobraram duas alternativas para os pesquisadores:

- 1º) Não existe éter absolutamente estático;
- 2º) O éter é arrastado pelos corpos ponderáveis, no caso particular, a Terra.

Essa segunda alternativa foi eliminada pelo fenômeno da aberração de luz das estrelas distantes. As estrelas distantes parecem mover-se em órbitas de diâmetro angular de aproximadamente 41" devido ao movimento da Terra em relação ao Sol. Considere a Fig. 1. Se a luz vier diretamente para baixo enquanto o telescópio se move com velocidade v (velocidade da Terra em torno do Sol), o telescópio deve ser inclinado de um pequeno ângulo $\theta \approx \text{tg } \theta = v/c$ a fim de que a luz possa atravessar o telescópio sem tocar a parede interna do mesmo. Se o éter for arrastado pela Terra, juntamente com o telescópio, o telescópio deveria apontar verticalmente. Portanto, a hipótese que restava era a primeira: não existe éter absolutamente estático.

Apesar do resultado negativo da experiência de Michelson e Morley, a fim de preservar o conceito do sistema de referência preferencial éter, Fitzgerald (1892) e Lorentz (1899) postularam que todos os corpos que se movem em relação ao éter estacionário são contraídos por um fator $\sqrt{1 - \beta^2}$ na direção do movimento, onde $\beta^2 = v^2/c^2$ (v é a velocidade do corpo e c a velocidade da luz, ambos em relação ao éter).

A experiência de Michelson e Morley baseava-se na diferença de tempo de propagação da luz para ir e voltar por uma trajetória de comprimento l , dependendo dessa trajetória ser paralela ou perpendicular à direção do movimento da Terra em relação ao éter. Esses tempos são:

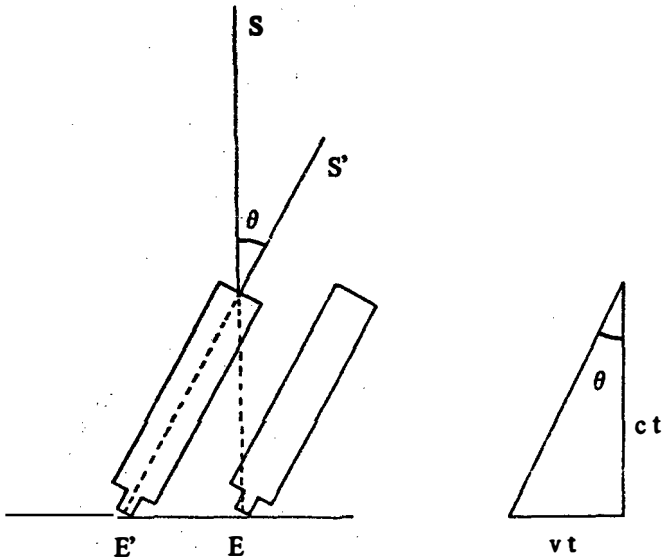


Fig. 1. Aberração da luz das estrelas distantes. SE é o caminho real da luz proveniente da estrela e S'E' é o caminho aparente.

$$t_{II} = \frac{2l}{c(1 - \beta^2)}$$

$$t_I = \frac{2l}{c(\sqrt{1 - \beta^2})}$$

Se assumirmos que o braço do interferômetro que é dirigido paralelamente à direção de movimento da Terra é encurtado na proporção de $\sqrt{1 - \beta^2}$, o tempo t_{II} será reduzido na mesma proporção, ou seja,

$$t_{II} = \frac{2l \sqrt{1 - \beta^2}}{c(1 - \beta^2)} = \frac{2l}{c\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Portanto, assim teríamos $t_{II} = t_I$ e assim Lorentz e Fitzgerald conseguiram explicar porque Michelson e Morley não obtiveram nenhum deslocamento das franjas, sem precisar de abandonar o meio portador da luz, o éter, visto que, não passava na mente de seus conterrâneos a inexistência de um meio portador para a luz, uma vez que todos os fenômenos conhecidos na época precisavam de um meio portador. Lorentz que havia aperfeiçoado a

hipótese de Fitzgerald chegou muito perto da descoberta de uma nova teoria: a teoria da relatividade ao descobrir que a força magnética que atuava sobre uma carga elétrica dependia somente do movimento relativo entre a carga e o campo magnético, demonstrando que os movimentos no eletromagnetismo também são relativos. Einstein (1905) criou a teoria da relatividade e chegou aos mesmos resultados que Lorentz a partir de dois postulados:

- 1º) Movimento uniforme absoluto não pode ser detectado,
- 2º) A velocidade da luz no vácuo é constante e independente do movimento da fonte emissora dessa luz.

Como uma das inúmeras aplicações da teoria da relatividade, citaremos a descoberta do meson pi pelo físico brasileiro César Lattes (1947) em colaboração com Giuseppe Occhialini e Cecil Powell. O meson pi previsto, teoricamente, por Hideki Yukawa (1935) tem meia vida de 2 microsegundos em seu sistema de referência e 30 microsegundos em relação à Terra se ele incidir sobre ela com uma velocidade próxima à da luz no vácuo. Desta feita, o meson percorreria apenas 600 metros relativos ao seu sistema de referência e 9.000 metros em relação ao sistema Terra. Lattes conhecendo esse fato e sabendo que os raios cósmicos de alta energia poderiam produzir mesons pi através de colisões com moléculas de ar da atmosfera terrestre, usou chapas de emulsões fotográficas em Bristol, Inglaterra para detectar a presença desses mesons. Depois de ter conseguido sucesso nessas experiências Lattes foi para os Estados Unidos e lá, juntamente com Eugene Gardner (1948), detectou o meson pi por meio de partículas aceleradas em laboratório. Podemos dizer que as experiências em partículas elementares começaram com as experiências de Lattes. A descoberta do meson pi foi de tal importância que foram outorgados prêmios Nobel para Hideki Yukawa (1949) e Cecil Powell (1950).

BIBLIOGRAFIA

1. Max Born, *Einstein's Theory of Relativity*, Dover Publications, Inc. New York (1965).
2. E.T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Thomas Nelson and Sons Ltd. (1951).

3. Paul Tipler, *Foundations of Modern Physics*, Ed. Worth Publishers (1970).
4. Wolfgang K.H. Panofsky e Melba Phillips, *Classical Electricity and Magnetism*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1962).
5. F.K.Richtmyer, E.H.Kennard e T.Lauritsen, *Introduction to Modern Physics*, McGraw-Hill Book Company, Inc. (1955).
6. W.G.V. Rosser, *An introduction to the Theory of Relativity*, Butterworth & Co. Ltd. (1964).
7. M.Russel Wher e James A.Richard Jr., *Física do Átomo*, Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro (1965).