

O ÉTER PRÉ-RELATIVÍSTICO E AS ORIGENS DA TEORIA DA RELATIVIDADE

Os fenômenos ondulatórios no vácuo desempenharam um papel essencial para a criação da teoria da relatividade especial. Pelo que sabemos até o presente, a velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite com a qual um sinal pode ser transmitido. Podemos até considerar que a história da relatividade especial começou com a descoberta de que a velocidade da luz no vácuo é finita e seu valor independe do observador inercial. A grande dificuldade dos físicos do século XIX era conceber como a luz (sendo uma onda) poderia se propagar sem a necessidade de um meio material. O abandono da noção de um “meio luminífero” ocorreu sob pressão dos fatos experimentais e constitui uma página extremamente interessante da História da Ciência. Vamos então rever brevemente como a noção de éter incorporou-se na física a partir dos diferentes pontos de vista elaborados sobre a natureza da luz.

Mesmo antes que existisse uma prova experimental convincente, já se acreditava que a velocidade da luz deveria ser finita. Contudo, a primeira evidência experimental foi obtida apenas em 1676 pelo astrônomo dinamarquês Olaus Roemer (1644-1710) medindo o tempo de trânsito da luz através da órbita terrestre. Com base nos eclipses de uma das luas de Júpiter (Io), Roemer estimou em 22 minutos o tempo para a luz atravessar a órbita terrestre, obtendo para sua velocidade um valor $c = 214.300 \text{ km/s}$. A primeira determinação em laboratório foi feita por Fizeau em 1840 - utilizando o famoso experimento das rodas dentadas como interruptor de luz - o que elevou a velocidade para um valor $c = 315.300 \pm 500 \text{ km/seg}$. Jean Foucault (1819-1868) aperfeiçoou o dispositivo de Fizeau, utilizando espelhos girantes, e em 1862 sua melhor medida forneceu $c = 298.000 \pm 500 \text{ km/s}$. Em 1927, também através de um dispositivo combinado de espelhos girantes e lentes, Michelson obteve $c = 299.796 \pm 4 \text{ Km/s}$, um resultado já bem próximo do valor moderno, $c = 299.792,5 \pm 0,3 \text{ km/s}$, para a velocidade da luz no vácuo.

No final do século XVII, bem antes dos experimentos de Fizeau, Foucault e colaboradores, surgiram duas teorias sobre a origem e a natureza dos fenômenos luminosos. Uma corpuscular, desenvolvida por Newton (1642-1727) e outra ondulatória devido a Christian Huygens (1629-1695). Na verdade, ambas as teorias tiveram seus predecessores antes da sistematização realizada por esses dois autores. Em sua visão corpuscular, Newton inspirou-se profundamente no trabalho póstumo do atomista Pierre Gassendi (1592-1655), publicado em 1660. Os primeiros escritos de Newton datam de 1675, embora a versão mais detalhada da teoria tenha sido publicada apenas em 1704, no seu famoso livro “Opticks”, onde resumiu os seus estudos sobre a natureza e o comportamento da luz. Por outro lado, bem antes de Huygens, René Descartes (1596-1650), também havia proposto que a luz seria a manifestação de um distúrbio no “Plenum”, a substância contínua que supostamente formava o universo. Sua teoria de refração, publicada em 1637, assumia que a luz se propagava mais rapidamente num meio mais denso. Considerado isoladamente, esse resultado já indicava a superioridade da teoria ondulatória formulada por Huygens em 1678 e, posteriormente, detalhada no seu tratado sobre a luz de 1690. O interessante é que até hoje, quando consideradas a luz da teoria quântica, nenhuma das duas teorias (corpuscular e ondulatória) perdeu sua importância teórica.

Examinemos inicialmente a teoria corpuscular de Newton. O sucesso da sua mecânica quase que exigia uma interpretação mecânica da luz. Newton supôs que a luz representava o movimento de partículas materiais muito especiais, as quais foram denominadas de corpúsculos. As propriedades básicas da luz – propagação em linha reta através de um meio homogêneo, as leis da refração e reflexão e outros efeitos podem ser facilmente explicados em termos desse esquema corpuscular. Num meio homogêneo, nenhuma força atua sobre o corpúsculo, assim, por inércia, seu movimento é em linha reta. A reflexão ocorre por conservação do momento num impacto elástico (como as bolas de bilhar nas tabelas de uma mesa de sinuca). O ângulo de incidência é igual ao de reflexão, o que fornece uma descrição bastante precisa da reflexão da luz para uma superfície estacionária. No caso da refração, considere um corpúsculo atravessando a interface entre dois meios (ver gravura da esquerda na Fig. 1).

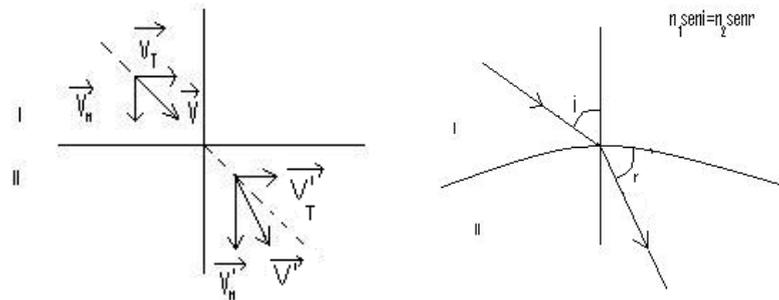


Fig. 1: refração no esquema corpuscular e ondulatório.

Imagine também que a partícula luminosa está sujeito a uma força normal, dirigida no sentido do meio mais denso. É fácil ver que a direção de movimento se modifica. Sejam V_N e V_T as componentes da velocidade no meio I e V'_N , V'_T as componentes do meio II. A componente da velocidade paralela a interface não é modificada ($V_T = V'_T$). Por outro lado, As forças atuando na interface aumentam a componente normal V'_N , ou seja, $V'_N > V_N$ (devido ao “puxão gravitacional” do meio mais denso). Portanto, a direção da velocidade varia e assim, a refração ocorre. Portanto, qualitativamente, a teoria de Newton explicava a refração. Na gravura da direita vemos a explicação da refração como usualmente apresentada no esquema ondulatório.

Newton também sabia que a luz apresentava fenômenos que somente com grandes dificuldades se enquadrariam no seu esquema, como por exemplo, os “anéis de Newton” na ótica, um típico fenômeno de interferência. Mesmo assim, através de explicações bastante engenhosas, ele manteve o quadro corpuscular.

Huygens, aproximadamente na mesma época, levantou a hipótese de que a luz era dotada de uma natureza ondulatória. Era também de seu conhecimento que a luz poderia se movimentar onde o som não era permitido. Isto ocorre, por exemplo, dentro de uma campânula de vidro transparente da qual o ar foi evacuado. Huygens e todos os físicos que lhe procederam (Einstein parece ter sido a primeira exceção), não conseguiam imaginar a propagação de vibrações na ausência de um meio material. Era então essencial introduzir um meio especial que servisse de suporte para as ondas luminosas. Huygens o denominou de éter. Surgiu assim na física, um conceito que só foi abandonado com o advento da teoria da relatividade, quase trezentos anos depois.

Newton rejeitou a teoria ondulatória descrevendo a propagação da luz. Seu principal argumento se baseava no fenômeno de dupla refração em cristais. Ele argumentou que se a luz se propagava como onda, a dupla refração indicava uma direção preferencial de vibração do feixe. Por outro lado, no tempo de Newton, somente

ondas longitudinais eram conhecidas, as quais não possuíam tal propriedade. Dessa forma, a teoria ondulatória foi rejeitada, apesar de Newton fazer algumas concessões a respeito de sua plausibilidade. O fenômeno de difração já era conhecido por Newton, mas ele não reconheceu nele nenhuma justificativa a favor da teoria ondulatória. Por sua vez, o conceito de éter foi categoricamente criticado.

A visão corpuscular da natureza da luz dominou até cerca de um século depois da morte de Newton. Seu sucesso em grande parte parecia que estava associado ao seu próprio prestígio. Porém, uma teoria é auto-sustentável apenas enquanto não contradiz algum fato experimental, ou melhor, quando a explicação de novos fatos não exige uma adição contínua de novas hipóteses na base da teoria, tornando-a cada vez mais complexa e artificial.

Com a descoberta e estudo de vários fenômenos, o começo do século XIX ofereceu um testemunho convincente da natureza ondulatória da luz. Assim, a interferência e a difração foram exaustivamente investigadas por Augustin Fresnel (1788-1827). Em 1850, Foucault também demonstrou que a velocidade da luz ($v = c/n$) era menor em um meio mais denso, o contrário do previsto pela teoria corpuscular. A propagação retilínea da luz foi satisfatoriamente explicada com base na teoria ondulatória e mais ainda, a descoberta da polarização indicava que a luz era realmente transversal, o que explicava definitivamente a dupla refração.

Diante de tantos fatos experimentais, estava faltando apenas demonstrar analiticamente que a luz poderia ser descrita por alguma espécie de equação ondulatória.

Coube a Maxwell (1831-1879), já na segunda metade do séc. XIX, demonstrar que a partir das equações fundamentais do Eletromagnetismo, se deduz que os campos elétricos e magnéticos satisfazem equações de onda que se propagam com velocidade da luz. Esse resultado foi interpretado por ele, considerando que a luz visível era um tipo particular de onda eletromagnética, ou seja, dotada de uma frequência tal que era percebida pelo olho humano. Essa previsão de Maxwell foi brilhantemente confirmada em 1886, pelas experiências efetuadas por Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894). Assim, o esforço dos físicos do séc. XIX, foi responsável - tanto do ponto de vista experimental quanto teórico - pelo triunfo da teoria de Huygens. O que estava se tornando um sentimento geral (a luz ser um processo ondulatório), passou a ser um fato bem estabelecido.

Por sua vez, os físicos e astrônomos da época (incluindo o próprio Maxwell!), ainda não concebiam a propagação de uma perturbação (onda), na ausência de um meio material. Um sentimento decorrente dos experimentos com ondas sonoras (ou ondas elásticas) usualmente descritas como uma perturbação ondulatória na densidade de um meio material. No caso da luz, tal meio deveria também existir, embora até aquela data, suas propriedades ou sua real natureza não tivessem sido identificadas. Seu nome, éter, devido a Huygens, já era parte da História da Física.

Nesse ponto é interessante mencionar que o nome éter remonta aos gregos. Além dos tijolos básicos que supostamente compunham o universo: água, ar, terra e fogo, os filósofos pré-socráticos introduziram ainda um quinto elemento, chamado éter ou quinta-essência, uma nova componente fundamental que seria a matéria prima dos corpos celestes. No entanto, a idéia básica subjacente ao éter grego é bem diferente de um “éter luminífero”, tal como proposto pelos físicos do século XVII. Os gregos introduziram a quinta-essência devido ao princípio de que tudo que é pesado cai. Contudo, embora parecendo pesada a Lua não caía para o centro do universo que era a Terra na concepção vigente na época (modelo geocêntrico de Eudóxio e Aristóteles, posteriormente aperfeiçoado por Ptolomeu). O mesmo ocorrendo com os demais corpos

celestes, pois seriam também feitos de quinta-essência. Retornemos agora ao caso do “éter eletromagnético”, ou seja, o meio que serviria de suporte para as ondas luminosas.

O sucesso da mecânica na explicação de distintos fenômenos tais como: gravitação, eletrostática, hidrodinâmica, teoria cinética dos gases, corpos elásticos e rígidos, havia tornado o pensamento mecanicista o paradigma da Física. O éter foi então dotado de propriedades mecânicas, pois já era sabido que vibrações transversais ocorrem em sólidos elásticos. Contudo, o éter aparentemente não era um sólido qualquer. Seu movimento não era percebido, sendo transparente, com densidade nula e dotado de estranhas propriedades elásticas.

Por outro lado, Maxwell, ao deduzir a equação de onda para o campo eletromagnético, não deixou claro em qual sistema de referência estaria escrita. Dizendo de outra forma - em termos mais modernos - qual o observador que mediria a

velocidade como sendo $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, onde μ_0 e ϵ_0 são, respectivamente, a permeabilidade

magnética e a permissividade elétrica do meio (que se sabe agora ser um vácuo)? Vamos procurar entender melhor essa questão.

Na segunda metade do século XIX sabia-se que as equações de Maxwell não eram invariantes por transformações de Galileu, como são as da mecânica clássica. Isso significa que um **Princípio de Relatividade** (a equivalência de todos os referenciais inerciais), existiria para as leis da Mecânica, mas não para os fenômenos eletromagnéticos. Logo, na Eletrodinâmica deveria existir um referencial privilegiado (concretizado pelo éter), no qual, as equações de Maxwell assumiriam a forma padrão e a velocidade da luz seria exatamente c . Assim, para referenciais inerciais em movimento relativo, a velocidade da luz teria valores diferentes e seria possível determinar por experiências óticas ou eletromagnéticas, a velocidade relativa de um dado sistema com relação ao éter. Portanto, a existência do éter era também uma necessidade teórica, capaz de acomodar de forma consistente - e sem modificações - a Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo. Era uma consequência - na prática quase uma exigência - do pensamento dominante entre os pesquisadores que faziam parte da corrente principal (“main stream”) da época.

É fácil perceber como a existência do éter conciliava as duas teorias físicas mais bem estabelecidas até então, considerando as seguintes hipóteses alternativas:

i) Um **Princípio de Relatividade (galileano)** deveria existir tanto para a Mecânica quanto para a Eletrodinâmica. Nesse caso, as leis da Eletrodinâmica descritas pelas equações de Maxwell estariam incompletas ou mesmo erradas.

ii) Um **Princípio de Relatividade (não-galileano)** existiria tanto para a Eletrodinâmica como para a Mecânica, porém as leis da Mecânica como propostas por Newton deveriam ser reformuladas.

As hipóteses acima evidentemente tornavam desnecessária a idéia de um sistema preferencial de éter, porém, a adoção de qualquer uma delas parecia no mínimo uma temeridade aos físicos e astrônomos da época, senão vejamos: pela hipótese (i) era preciso executar experiências que mostrassem os desvios da Eletrodinâmica de Maxwell e reformular tais leis para que ficassem invariantes sob transformações galileanas. Por outro lado, pela hipótese (ii), o princípio de Galileu não seria mais válido, pois como foi dito antes, as equações de Maxwell não são invariantes por transformações de Galileu. Nesse caso, seria necessário exibir efeitos não explicáveis pela Mecânica Clássica como

também, estabelecer novas equações de transformação (a base do novo princípio), que seriam satisfeitas pela Eletrodinâmica e pela nova Mecânica.

Diante desse quadro (reformular a Mecânica ou a Eletrodinâmica), é fácil entender porque os físicos e astrônomos achavam muito mais simples e natural decretar a existência de um “éter luminífero”. Por mais estranho que fossem suas propriedades, o éter tinha que existir. Neste caso, existiria um Princípio de Relatividade (galileano) apenas para a Mecânica. Além disso, as equações de Maxwell descreveriam com precisão os fenômenos eletromagnéticos na presença de um sistema privilegiado, o referencial do Éter. Somente assim, seria possível dizer: nada de novo debaixo desse sol!

Em 1905, Einstein adotou a hipótese (ii) estabelecendo definitivamente os fundamentos da teoria da relatividade especial. O conceito de éter presente na física pré-relativística foi finalmente abandonado. A luz se propaga no vácuo e sua velocidade independe do estado de movimento do observador inercial o que contraria as transformações de Galileu. A Mecânica foi modificada e a Eletrodinâmica, uma teoria naturalmente relativística, tornou-se o paradigma das chamadas teorias clássicas de campo. As transformações de Lorentz – que deixam as equações de Maxwell invariantes – substituíram as transformações de Galileu e se tornaram o grupo de invariância de toda a Física (com exceção da teoria gravitacional newtoniana, que também teve que ser reformulada, dando origem a teoria da Relatividade Geral).

Para se compreender a amplitude e a profundidade da revolução Einsteiniana, é suficiente perceber que de toda estrutura da física pré-relativística, apenas o Eletromagnetismo (despojado do conceito de éter) e a Termodinâmica (primeira e segunda lei) sobreviveram intocáveis no seu núcleo básico de axiomas. O resto foi “demolido”, ou melhor, teve seu domínio de validade bastante restrito.

A expansão das idéias relativísticas e a necessidade de superação dos fundamentos da Mecânica Clássica nortearam grande parte do desenvolvimento da Física no século XX. Como observou o próprio Einstein, a Relatividade é como um edifício de dois andares separados: a Teoria Especial e a Teoria Geral da Relatividade. A Teoria Especial, na qual se apóia a Relatividade Geral, se aplica a todos os fenômenos físicos, com exceção da gravitação universal. A Teoria Geral da Relatividade fornece a lei da gravitação e suas relações com as outras disciplinas da Física. Em outras palavras, a chamada relatividade geral nada mais é do que uma teoria relativística para a gravitação. Pelo exposto acima, podemos afirmar que todos esses desenvolvimentos foram uma consequência direta do abandono da noção do éter pré-relativístico. Certamente, as lições aprendidas com este episódio de transição paradigmática poderão ainda ser extremamente úteis para o desenvolvimento da ciência moderna.

São Paulo, 8/08/2007

José Ademir Sales de Lima
Departamento de Astronomia (IAG-USP)