

CORPÚSCULOS E ONDAS – Uma estranha dança

Uma verdade científica não se impõe por convencer os que a ela se opõem e por levá-los a verem com clareza, mas sim, antes, porque os opositores acabam morrendo e surge uma nova geração que aceita a verdade nova.

(Max Planck, físico, Nobel de Física de 1918)

PAULO ROBERTO GOTAC*
Capitão de Mar e Guerra (Ref^º)

SUMÁRIO

Introdução
Os corpúsculos de Newton e as ondas de Young
Elétrons
O mistério da radiação
O retorno dos corpúsculos – O efeito fotoelétrico
Conclusões

INTRODUÇÃO

O presente trabalho se propõe a expor uma resumida narrativa dando conta das idas e vindas das formulações conceitualmente baseadas, ora em corpúsculos, ora em ondas, ao longo da história da Física e que constituíram as fundações do desenvolvimento do eletromagnetismo, da descoberta do elétron e dos primórdios da

Mecânica Quântica, com o efeito fotoelétrico e a radiação do corpo negro.

Não se trata de uma exposição quantitativa rigorosa dos problemas relatados, mas de uma resenha histórica abrangendo o período que se inicia com a edificação das bases da chamada Física Clássica por Isaac Newton, até a alvorada da Teoria Quântica, anunciada por Planck e Einstein, no início do século XX.

* Foi declarado Guarda-Marinha em junho de 1963; é graduado em Física (UERJ-1971); docência em Eletromagnetismo (Faculdade Veiga de Almeida-1974; Universidade Católica de Petrópolis- 1975/76). Foi chefe do Departamento Técnico do Centro de Munição da Marinha (1984/86) e chefe do Departamento de Pesquisa do Instituto de Pesquisas (1986/88). Após sua transferência para a reserva, foi chefe de Projeto do Instituto Nacional de Projetos Especiais (1988-1996) e exerceu atividade docente na Escola Naval em Eletromagnetismo e Física (1996-2008). Vários artigos publicados em revistas sobre Física.

O texto pretende também acrescentar algumas pitadas de ficção pitoresca, na medida em que é sugerida uma dança na qual os dançarinos são ondas e partículas que interagem de modo diferente e se alternam cada vez que as exigências experimentais determinam outras abordagens, terminando por uma forma louca de movimentos que antecipam evoluções inesperadas para as próximas fases a serem narradas em trabalho futuro e que atendem pelo nome de Mecânica Quântica, cujos alicerces, praticamente concluídos na década de 30 do século passado, transformaram, até os dias de hoje, a vida e o comportamento humanos mais do que no período desde o nascimento de Cristo.

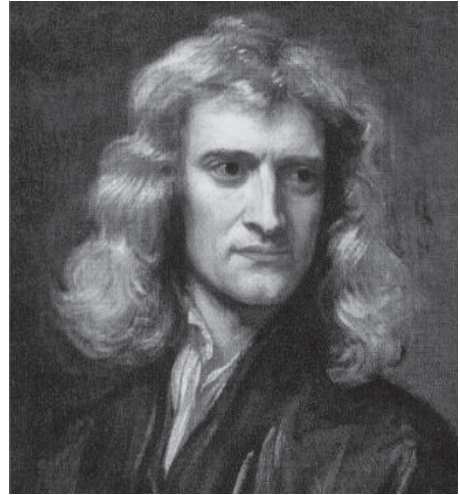
As informações biográficas dos cientistas mencionados, quase todas constantes do *site* Wikipedia, estão assinaladas nas referências bibliográficas.

OS CORPÚSCULOS DE NEWTON E AS ONDAS DE YOUNG

A dança se inicia. No salão ainda vazio começam a chegar os primeiros dançarinos. Quem eram eles?

A mais famosa obra de Sir Isaac Newton (1643-1727), publicada em 1687, leva o pomposo título de *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (*Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* – naquela época, não havia ainda a denominação “Física” para designar o estudo de uma parcela dos fenômenos naturais) [1], abreviadamente conhecido como *Principia*. Redigida em latim, é considerada um dos mais importantes trabalhos na história da Ciência, base do que atende hoje pelo rótulo de “Física Clássica”. Nela são apresentadas as leis do movimento e a gravitação universal, graças às quais explicaram-se, por exemplo, as órbitas dos planetas e as marés e edificou-se toda uma ciência espacial com sua tec-

nologia associada que tornaram possíveis a fabricação de veículos propulsores e o lançamento de satélites artificiais.



Isaac Newton

Interessado também em questões ligadas à Ótica, publicou 17 anos após, em 1704, outro livro, *Opticks* [2], dessa vez em inglês, ao longo do qual interpretou a luz como constituída por partículas submetidas às mesmas leis de movimento estabelecidas nos *Principia*. Por meio desta abordagem, foi capaz de explicar a reflexão luminosa em espelhos e a refração resultante da deflexão do feixe de corpúsculos ao passar de um meio para outro.

Havia, no entanto, à época, proposta alternativa que considerava a luz como uma manifestação ondulatória, através da qual podiam ser elucidados os mesmos fenômenos contemplados pela abordagem corpuscular e justificados outros que não eram abrangidos pela formulação newtoniana. Era ela devida ao físico e astrônomo holandês Christiaan Huygens (1629-1695) [3], tendo sido anunciada em 1678 na Academia de Ciências de Paris e publicada em 1690 no livro *Traité de la Lumière* [4]. Suas ideias, no entanto, não foram muito

consideradas pela comunidade científica em virtude do aparecimento posterior do tratado de Newton, que já gozava de enorme prestígio, principalmente por causa dos *Principia*.



Christiaan Huygens

Assim, a concepção ligada às partículas de luz ficou sacramentada por mais de um século, sendo incondicionalmente defendida, principalmente pelos cientistas ingleses. Durante a década de 1790, o físico, médico e egiptólogo inglês Thomas Young (1773 – 1829) [4] trabalhava em Cambridge com questões ligadas ao som, entendido já àquela época como fenômeno ondulatório provocado por perturbação no meio de propagação. Ele estava particularmente interessado no resultado obtido pela interferência de duas dessas ondas, situação em que se verificam sons mais intensos em locais onde as amplitudes se somam, a chamada interferência construtiva, e outros silenciosos, a interferência destrutiva, semelhantemente ao que ocorre na superfície de um lago quando duas perturbações emanam de pontos diferentes e produzem ondas que interagem, gerando ondas de amplitudes maiores ou mínimas.

Apesar da esmagadora influência de Newton, que ainda garantia a adoção da interpretação corpuscular da luz, havia um pequeno número de estudiosos que procuraram detalhar um pouco mais a hipótese ondulatória. Entre estes, cita-se o grande matemático suíço Leonard Euler (1707-1783) [6].

Animado por tais exemplos, Young, em 1800, dedicou-se a montar um experimento que visava demonstrar a verdadeira natureza da luz.



Thomas Young



Leonard Euler

O esquema, mostrado de maneira aproximada na Figura 1, consiste nos anteparos A, B e C, o primeiro com o orifício S0, o segundo com os orifícios S1 e S2, e o terceiro, de verificação, onde aparecerão as intensidades máximas ou nulas num padrão de franjas claras e escuras, caso a luz se comporte como onda.

Se, por outro lado, a luz fosse composta por um feixe de corpúsculos, o arranjo experimental teria que ser modificado para a configuração resumidamente apresentada na Figura 2. Em 1 se vê um lançador de partículas (um canhão) com várias elevações e, no anteparo posterior, um detector móvel, uma espécie de cesta que, podendo deslizar ao longo do anteparo, coletaria as partículas, sendo observado que a maior quantidade recolhida, após contagem, aconteceria quando o detector se situasse em alinhamento perpendicular com os orifícios 1 e 2, com quantidades menores à medida que se afastasse do perpendicularismo, padrão bem diferente do das franjas claras e escuras características do comportamento ondulatório.

Na Figura 1, a luz é emitida de uma fonte monocromática (frequência definida), localizada a grande distância do anteparo A, de modo a se poder caracterizá-la praticamente como plana. Ao atingir o anteparo, se refrata ao passar pelo orifício S0, desde que

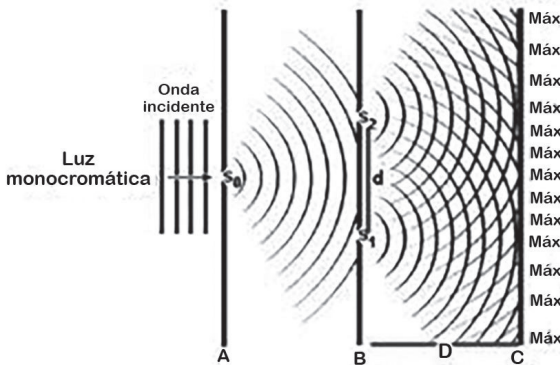


Figura 1 – Esquema do experimento de Young

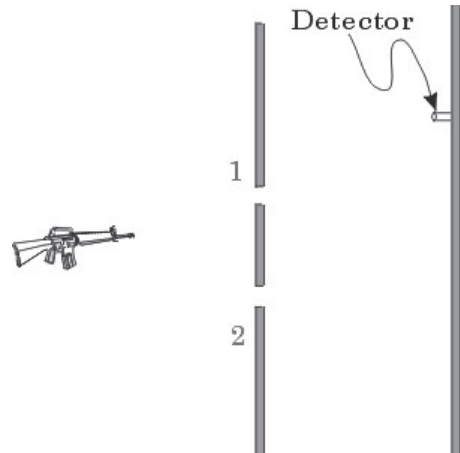


Figura 2 – Arranjo para detectar corpúsculos

as dimensões deste sejam bem menores que o comprimento de onda da onda incidente – distância entre dois picos consecutivos –, como ocorre, por exemplo, com as ondas formadas a grande distância num lago tranquilo, quando tentam passar por pequena fenda localizada num muro que esteja no caminho.

A partir daí, S0 se transforma então numa fonte de ondas esféricas. Estas, ao encontrarem o anteparo B, são difratadas por S1 e S2, que, separados por uma distância d , criam duas outras esféricas que se superpõem para formarem em C, o padrão de interferência de máximos e nulos. Os resultados de Young foram apresentados à

Royal Society de Londres em 1803 e constituíram uma forte evidência em favor da natureza ondulatória da luz.

Apesar dos resultados, porém, continuou inflexível a rejeição a tal interpretação, principalmente na Inglaterra, onde era quase pecaminoso imaginar que Newton estivesse errado. Além disso, perguntavam os céticos,

como era possível admitir que a superposição de dois feixes luminosos brilhantes poderia criar uma região escura? A obstinação dos que duvidavam, no entanto, foi finalmente removida pelo trabalho do físico e engenheiro francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) [7], que, por força das guerras napoleônicas, desenvolveu somente a partir de 1815, em período durante o qual esteve preso, seus trabalhos em ótica, em completo isolamento, sem conhecer os resultados obtidos por Young ou as ideias de Huygens e Euler e sem conseguir comunicar seus pontos de vista favoráveis à interpretação ondulatória. Assim, seus experimentos e a consistente teoria por ele desenvolvida quase caem no esquecimento, não fora uma circunstância curiosa ligada à Academia Francesa de Ciências, que, conhecedora do trabalho de Young, mas relutante em acreditar nele, decidiu, em 1817, oferecer um prêmio a quem conseguisse explicar observações relacionadas com a luz que se curvava ao encontrar arestas bem definidas ou pequenas frestas [8], manifestações típicas de ondas.



Augustin-Jean Fresnel

Fresnel apresentou-se e, por meio da descrição de seus experimentos, apoiados por fundamentação teórica de sua autoria, tudo privilegiando a interpretação ondulatória, convenceu aos representantes da Academia sobre suas ideias e, particularmente, obteve o aval do famoso matemático Siméon Denis Poisson (1781-1840) [9], que testou a teoria exposta na previsão de fenômenos observados envolvendo a difração da luz, algo que só ocorre quando ela, como onda, passa por obstáculos definidos.

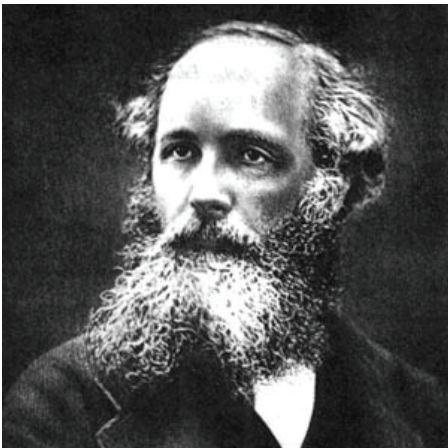


Siméon Denis Poisson

Os resultados dos trabalhos de Young e Fresnel, os deste último homologados pela autoridade da Academia Francesa de Ciências e chancelados por Poisson, determinaram definitivamente o triunfo da interpretação ondulatória da luz e o arquivamento da visão corpuscular advogada por Newton, que, no entanto, ressuscitaria com outra indumentária, quase cem anos depois, nos primórdios da Física Quântica.

Consolidada, a natureza ondulatória foi aperfeiçoada e atingiu seu auge por meio dos estudos do grande físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) [10,11], que se notabilizou em várias áreas importantes da Física, como a Termodinâmica, e apresentou, por meio das suas famosas

quatro equações, um modelo teórico em que propôs as chamadas ondas eletromagnéticas, vibrações de campos magnético e elétrico, num meio não muito bem definido intitulado éter, cuja velocidade de propagação no vácuo coincidia com a da luz, à época já medida com precisão por Hyppolite Fizeau (1819-1896) [12], o que o levou a considerá-la como somente uma das manifestações daquelas vibrações e deduzir que havia outras, com frequências diferentes, não visíveis, como as de rádio, com a mesma origem eletromagnética.



James Clerk Maxwell



Heinrich Hertz

A existência delas, ponto de partida das telecomunicações, foi verificada experimentalmente em 1883 pelas experiências memoráveis do Físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894) [13]. Vê-se, assim, que os primeiros movimentos da dança se caracterizam por uma substituição no salão de corpúsculos imaginados pelo grande Isaac Newton que explicavam uma série de fenômenos da ótica, mas não foram bem-sucedidos na solução de outros, por ondas que abordavam o problema com mais elegância e que, mediante o uso de trajes mais charmosos, criados pelos figurinistas Maxwell e Hertz, tiveram sua influência estendida para outras aplicações e permitiram a grande unificação do eletromagnetismo com a ótica que vinha na esteira de uma outra anterior, a da eletricidade com o magnetismo, mencionada no tópico seguinte.

ELÉTRONS

Entram em cena outros protagonistas.

Em 1819, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) [14], durante aula ministrada a estudantes avançados da Universidade de Copenhague, mostrou que um condutor linear percorrido por uma corrente elétrica provocava a deflexão de uma agulha magnetizada, colocada inicialmente em sentido paralelo ao fio, até se estabilizar perpendicularmente a este, e, caso o sentido da corrente fosse invertido, a deflexão ocorreria para o outro lado [15].

Com este resultado, ficou estabelecida a ligação entre a eletricidade e o magnetismo, até então considerados ramos científicos distintos, que culminou com as ondas eletromagnéticas previstas por James Clerk Maxwell em meados do século XIX [11]. É importante ressaltar, no entanto, que tal descoberta só foi possível graças aos estudos desenvolvidos poucos anos antes por Alessandro Volta (1745-1827) [16], que

resultaram na invenção da pilha elétrica, tornando possível a manutenção da corrente elétrica ao longo de um condutor retilíneo.

Semelhantemente, pode-se afirmar que a descoberta do elétron constituiu um processo cuja origem está associada ao trabalho de cientistas que se dedicaram a aperfeiçoar bombas de vácuo capazes de reduzir substancialmente a pressão no interior de tubos. Um destes pesquisadores foi o alemão Heinrich Geissler (1814-1879), talvez o maior responsável, em 1850, pelo aperfeiçoamento definitivo de tais equipamentos [8], de fundamental importância para o avanço da ciência física no século XIX, permitindo, entre outras descobertas fundamentais, a do elétron e dos chamados raios X, a serem lembrados em futuro trabalho [17].

Consolidada a técnica de produzir baixa pressão em gases no interior de tubos, foi possível observar a passagem, através deles, de corrente elétrica partindo de um eletrodo, carregado negativamente, numa das extremidades, o catodo, em direção a outro na ponta oposta, positivo, o anodo. Um esquema aproximado do equipamento de Geissler é mostrado na Figura 3.

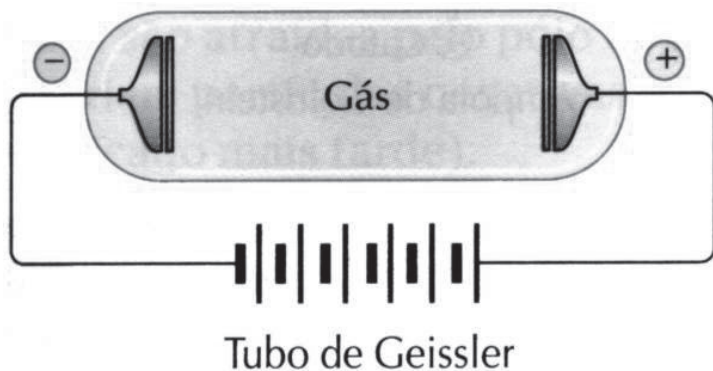


Figura 3 – Esquema do tubo de Geissler [18]

O físico alemão Johann Hittorf (1824-1904) [19] foi o primeiro a observar feixes luminosos retilíneos que, partindo do catodo, atingiam o anodo. Tais feixes receberam, mais ou menos na mesma época, 1876, a denominação de raios catódicos [8], que permanece até hoje e que, durante muito tempo, serviram de base para os cinescópios de televisão, hoje substituídos por dispositivos concebidos dentro do contexto quântico que não necessitam daqueles raios para a geração de imagens, daí a possibilidade de fabricá-los com espessura bem menor.

A partir daí, descobrir a natureza dos raios catódicos passou a ser uma das prioridades dos físicos. Estimulados pela já consolidada característica ondulatória da luz e pela então recente proposta de Maxwell, comprovada experimentalmente mais tarde, em 1883, por Hertz [13], de que ela consistia de radiações eletromagnéticas, os cientistas adotaram a tendência inicial de considerar os raios catódicos como tal. Ainda na década de 70 do século XIX, porém, o cientista inglês William Crookes (1832-1919) [20], responsável pelo aperfeiçoamento de tubos de gases a baixa pressão,

realizou experimentos que fortaleciam a evidência corpuscular dos raios que eram emitidos do catodo para o anodo, embora permanesse o ceticismo da comunidade acadêmica que favorecia o comportamento ondulatório deles[8].

J. J. Thomson (1856 – 1940) [21] foi um cientista inglês que trabalhou

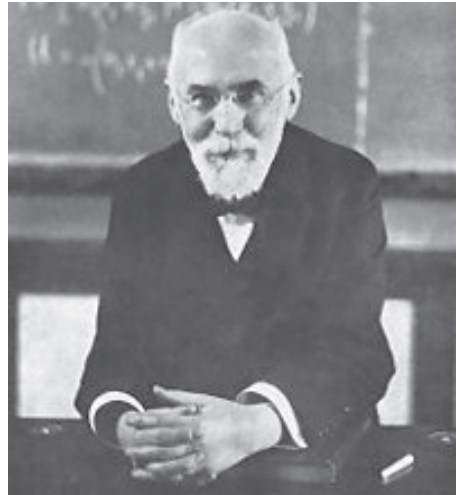
durante grande parte de sua vida no Laboratório de Cavendish, em Cambridge. Em suas pesquisas envolvendo os raios catódicos, verificou que a velocidade deles era muito menor que a da luz no vácuo, o que permitia concluir que não possuíam características ondulatórias eletromagnéticas, pois, de acordo com a teoria de Maxwell, verificada experimentalmente por Hertz, qualquer radiação se propagava com a velocidade da luz. Assim, concluiu Thomson, deveriam os raios catódicos consistir em jatos de partículas. De que espécie, porém?



J.J. Thomson

As primeiras pistas surgiram por meio de experiências realizadas pelo físico francês Jean Perrin (1870 – 1942) [22], que, ao submeter um feixe de raios catódicos a um campo magnético dirigido perpendicularmente, verificou que o feixe sofria uma deflexão, de acordo com o que previa a força de Lorentz, nome dado em homenagem ao físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) [23], Nobel de Física de 1902, o segundo da série do Premio de Física, – embora outros cientistas antes dele já a tivessem descoberto –, o que indicava

que os raios eram constituídos por partículas carregadas. A expressão matemática da referida força, que relaciona o campo magnético com cargas elétricas, não será mostrada no presente trabalho, podendo um resumo ser encontrado em [24]. Os resultados permitiram concluir também que o feixe era constituído por cargas negativas, dada a natureza da deflexão observada. Restava descobrir o valor delas e a respectiva massa



Hendrik Antoon Lorentz

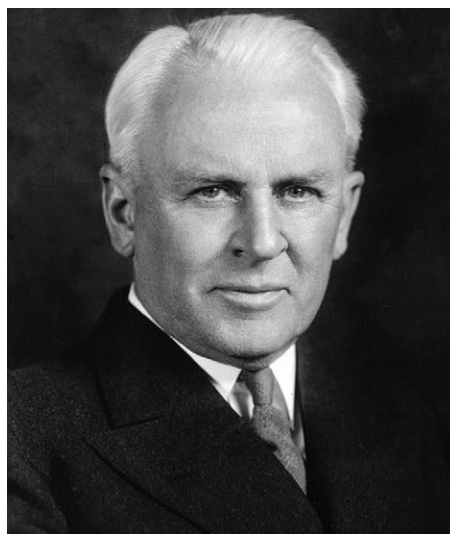
Coube a Thomson desenvolver arranjos experimentais relativamente práticos com a finalidade de levantar tais parâmetros. O sistema por ele idealizado consistia na aplicação simultânea de campos elétrico e magnético, que, sobre o feixe com intensidades ajustadas, criava deflexões opostas que mantinham os raios em linha reta.

O esquema mostrado na Figura 4 dá uma ideia do experimento. No interior do tubo, a baixa pressão é mantida pela ação de uma bomba de vácuo. As partículas são formadas no filamento, carregado negativamente, o catodo, e aceleradas até o anteparo A, o anodo, onde se encontra um orifício colimador que cria então um jato linear. Este, ao colidir com a tela T, pintada internamente

com material fosforescente, produz nela um ponto luminoso. Uma bateria cria um campo elétrico E entre as placas, representado pelas setas verticais, capaz de atuar nas partículas carregadas do feixe. Bobinas colocadas externamente ao tubo criam um campo magnético B , perpendicular ao elétrico, representado na Figura 4 pelos x , entrando no plano do papel. Como as deflexões oriundas das forças sobre as cargas criadas por eles ocorrem em sentidos contrários, é possível ajustá-los de modo que o feixe atinja a tela exatamente no seu centro, alinhado com o colimador. Nessa situação, manipulam-se equações simples que possibilitam a obtenção da relação e/m , onde e é a carga da partícula e m sua massa. Apesar de não ter sido possível a Thomson a derivação isolada de cada um dos parâmetros, a relação obtida foi revolucionária na medida em que foi possível, por meio da comparação com a massa do átomo de hidrogênio, concluir que a da partícula em questão deveria ser bem menor que a de qualquer átomo, o que indicou que este não era indivisível como se pensava, mas possuía na sua composição partículas mais leves, de alguma forma deles expelidas, que passaram a ser conhecidas como subatômicas.

Thomson apresentou tais conclusões em 1897 e, prosseguindo seus trabalhos na área,

foi capaz de determinar pela primeira vez, em 1899, com dispositivos envolvendo gotas d'água eletrificadas, a carga da nova partícula, denominada por Lorentz de “elétron” e interpretada como elementar, tendo em vista que as cargas das gotas eram múltiplas inteiras dela. Apesar disso, a fama hoje por esta última medida cabe ao físico americano Robert Millikan (1868-1953) [25], que, utilizando técnicas semelhantes às de Thomson, com o emprego, entretanto, de gotículas de óleo, foi capaz, em experimento célebre [26], de obter, em 1909, o mesmo resultado.



Robert Millikan

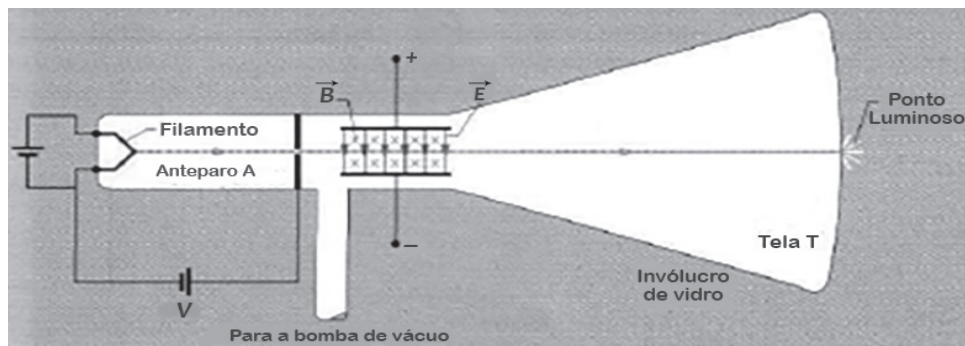


Figura 4 – Diagrama do equipamento usado por J.J. Thomson para determinar a relação e/m das partículas componentes dos raios catódicos

Ambos os cientistas foram laureados com o Nobel de Física por essas investigações, Thomson em 1906 e Millikan em 1923.

O século XIX encerrava-se, assim, com a consagração da chamada Física Clássica, originada pela obra de Newton havia quase 200 anos, complementada pela Termodinâmica e pelo Eletromagnetismo de Maxwell, que estabelecia como indiscutível o fato de que a luz e as radiações eletromagnéticas em geral possuíam natureza ondulatória e que existia uma partícula dotada de carga elétrica elementar, o elétron.

E o baile prosseguiu, com os dançarinos atuando sem interferências uns com os outros. Os corpúsculos e as ondas reinavam alegres e absolutos, e tudo parecia tranquilo.

O MISTÉRIO DA RADIAÇÃO

Anunciam-se, no entanto, notícias vindas de fora do salão e que deixam os dançarinos preocupados. Uma das primeiras medidas experimentais precisas do espectro energético, isto é, a distribuição de energia eletromagnética por unidade de comprimento de onda (ou frequência), de um corpo que absorve toda a radiação que recebe – o chamado corpo negro, que, entretanto, mantido a uma determinada temperatura, não se apresente necessariamente como “negro” –, foi realizada por volta de 1899 mediante os trabalhos do físico alemão Otto Lummer (1860-1925) [27]. Seus resultados, para várias temperaturas, podem ser sintetizados na Figura 5, em que o eixo vertical representa a energia de radiação, por unidade de área e unidade de tempo, e o horizontal os vários comprimentos de onda das várias radiações.

Observa-se pela figura que os picos de energia deslocam-se para comprimentos de ondas menores (maiores frequências) à medida que se aumentam as temperaturas – daí a razão para chamá-las mais azuis (frequências maiores) quando se sobe a temperatura de aquecimento de uma amostra – e que não há energia em comprimentos de onda muito pequenos ou muito grandes. Deve-se mencionar também que o formato dos gráficos só depende das temperaturas do corpo negro e não do material de que são feitos.

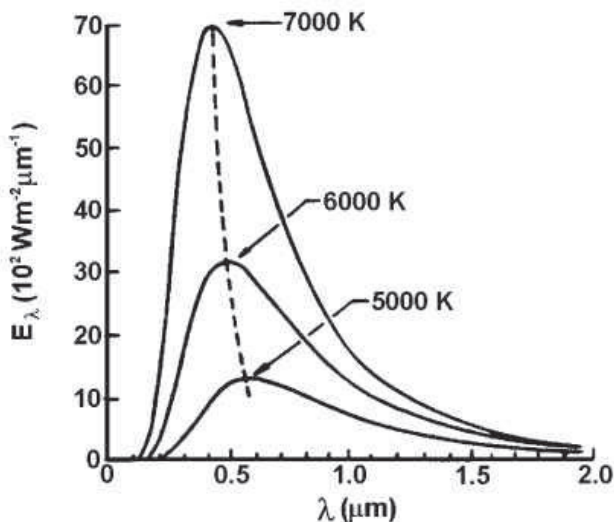


Figura 5 – Curvas experimentais obtidas para várias temperaturas, do espectro de energia do corpo negro

Todo o arsenal da Física Clássica, tendo como motores o Eletromagnetismo e a Termodinâmica, foi dirigido então a explicar os resultados experimentais obtidos. O resultado foi desastroso, com previsões que explodiam para grandes frequências (comprimentos de onda pequenos), apesar da razoável concordância com frequências menores, e do valor infinito para a energia total (para os leitores identificados com o cálculo infinitesimal, a integral das curvas da Figura 6) em todo o espectro, em flagrante contradição com a realidade. A falha,

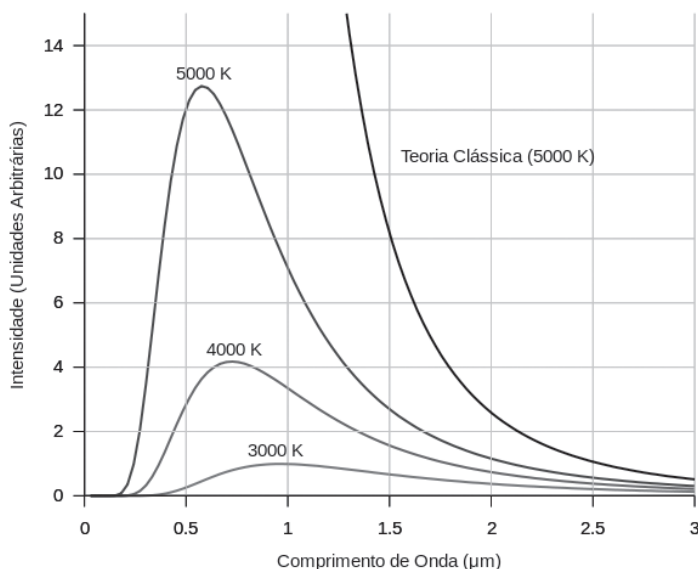


Figura 6 – A catástrofe do ultravioleta

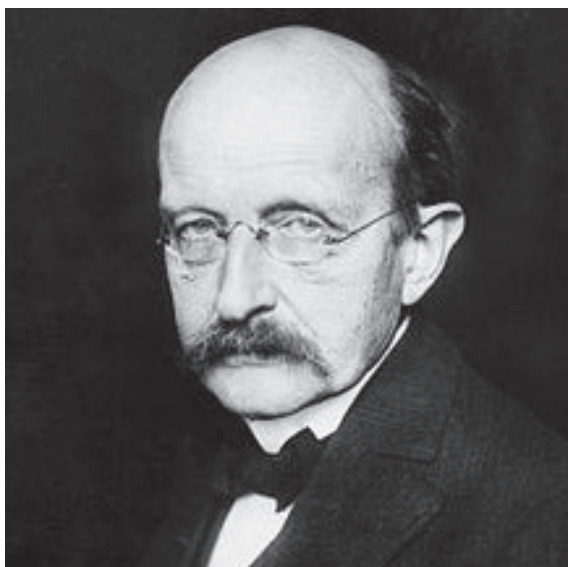
que passou a ser conhecida na história da Física como a “catástrofe do ultravioleta”, pode ser ilustrada pelas curvas da Figura 6.

Dedicado a estudar a origem da discrepância, o físico Max Planck (1858-1947) [28], Nobel de 1918, propôs uma hipótese revolucionária que contrariava os cânones da Física Clássica: a de que a energia era emitida ou absorvida não de maneira contínua, mas em forma de *quanta* discretos, proporcionais à frequência da radiação, sendo a constante de proporcionalidade promovida mais tarde a constante fundamental da natureza (para os leitores iniciados em cursos básicos de Física, o fato é matematicamente representado pela relação matemática $E_n = nh\nu$, onde n é um número inteiro que indica que a energia é emitida e absorvida em *quanta* discretos, h é a chamada constante de Planck, como passou a ficar conhecida, e ν a frequência da radiação). O novo conceito resultou em uma relação para o es-

pectro que concordava admiravelmente com a experiência, como é mostrado na Figura 7.

Apesar do sucesso obtido, Planck, formado nos princípios da Física Clássica, considerou sua hipótese como um “ato de desespero” [29] na tentativa de encontrar uma explicação teórica que se harmonizasse com os resultados experimentais e procurou enquadrá-la nos esquemas tradicionais, não vislumbrando de imediato a revolução que representava. Mas

o aspecto revolucionário do seu *insight* não passou despercebido ao jovem Albert Einstein (1879-1955) [30] quando ainda trabalhava no Escritório de Patentes de Berne, Suíça, no primeiro ano do século XX.



Max Planck

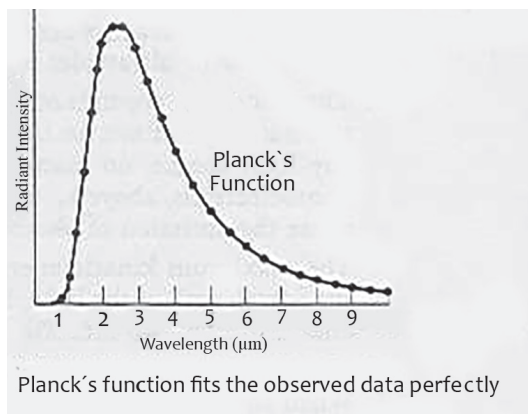


Figura 7 – Concordância dos dados experimentais com a função obtida por Planck

O RETORNO DOS CORPÚSCULOS – O EFEITO FOTOELÉTRICO

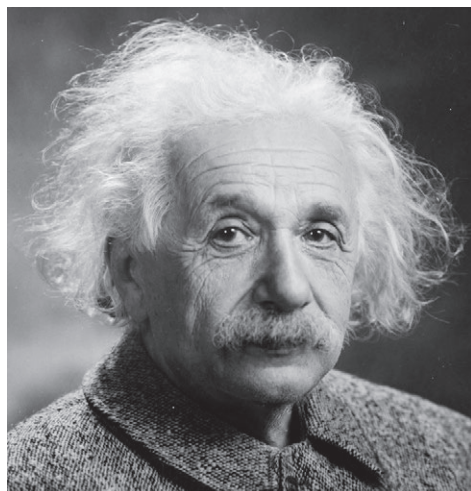
Um acontecimento inusitado é descoberto, os ecos chegam ao baile dos corpúsculos e das ondas e todos ficam meio assustados.

O fenômeno relacionado com a ejeção de elétrons de superfícies metálicas quando incide luz sobre elas, conhecido hoje como “efeito fotoelétrico”, foi notado pela primeira vez em 1888 por Hertz, que, porém, não lhe dedicou maior atenção, em face de o seu principal propósito ser, então, a detecção das ondas eletromagnéticas previstas nos trabalhos teóricos de Maxwell, cerca de 20 anos antes [31].

Mais ou menos à mesma época, o físico alemão Philipp Lenard (1862-1947) [32], laureado com Nobel de Física em 1905, pegando carona nas observações de Hertz e estendendo-as, certificou-se, ao longo de extenso trabalho experimental, que as partículas arrancadas do metal, quando sobre este incidia a luz ultravioleta, eram realmente os recém-descobertos elétrons e, o mais estranho, a energia com que eram expelidos não dependia da intensidade luminosa, mas tão somente da frequência da luz, sendo que,

quanto maior esta fosse, com mais energia eram eles ejetados, fato incompatível com a natureza ondulatória da radiação.

Em 1901, as conclusões de Lenard chegaram às mãos de Einstein, que, ciente da hipótese de Planck, que levantava o mistério do espectro do corpo negro, resolveu, ao contrário deste, considerar os *quanta* de energia, introduzidos como um “ato de desespero”, não só como elementos discretos de trocas de energia no espectro do corpo negro, como também reais elementos corpusculares componentes da radiação, até então essencialmente onda, dotados de energia igual à que, ao colidirem com os elétrons do metal, ejetava-os em harmonia com os dados experimentais. Ou seja: luz e radiação, de um modo geral, eram compostas por partículas cuja energia estava estranhamente ligada à frequência de uma onda. Tais entidades são conhecidas hoje pelo termo “fótons”, criado somente em 1926 pelo físico-químico americano Gilbert Lewis (1875 – 1946) [33]. Com essa hipótese demasiadamente ousada, em face do fato de que a configuração ondulatória da radiação reinava absoluta e indiscutível, o efeito fotoelétrico encontrou explicação para os resultados experimentais,



Albert Einstein

incompatíveis com o eletromagnetismo clássico. Era tal o inusitado da proposta que Einstein usou o termo “heurístico” (uma espécie de tentativa) no título do trabalho que a apresentou, um dos quatro [34] do chamado *Annus Mirabilis* de 1905 [35].

O retorno triunfal dos corpúsculos como componentes fundamentais da radiação luminosa nada tem a ver, no entanto, com qualquer visão premonitória de Newton quando este formulou sua ótica lá no início do século XVIII, baseada em leis de movimento por ele criadas.

Contrariamente, e meio que sem explicação teórica, fótons são monstros que carregam a tiracolo uma energia que depende da frequência da radiação, numa estranha fusão com aspectos ondulatórios, um tipo de dualidade (termo que reaparecerá em etapas futuras do presente trabalho) sem semelhança com nada do que ocorre na Física Clássica, os quais vieram, por meio da interferência num dos pilares científicos mais consolidados e corroborados à época em que foram propostos, explicar um fenômeno que aqueles princípios não conseguiam.

Por esses motivos, a hipótese de Einstein introduzindo as partículas de luz não recebeu aceitação imediata por parte da comunidade científica. A verificação experimental de sua realidade só foi atestada pelo trabalho de Robert Millikan, já citado, [25, 26], em 1916, pelo qual foi laureado com o Nobel de Física de 1923, merecido também pela investigação relativa à determinação da carga do elétron,.

Einstein, por outro lado, autor da ideia original, responsável pela promoção dos *quanta* de Planck a um aspecto real da natureza, com o respectivo trabalho publicado em 1905, só recebeu o Nobel, justificado pelo comitê julgador do prêmio pela descoberta do efeito fotoelétrico, em 1921, o que evidencia a relutância dos físicos em aceitar o novo conceito revolucionário que praticamente inaugurou a teoria quântica moderna.

CONCLUSÕES

Vê-se, assim, que a dança dos corpúsculos e das ondas no salão da radiação assumiu um aspecto confuso.

Primeiramente Newton interpretou a luz como composta por corpúsculos que reinaram absolutos por quase cem anos, quando foram convidados a se retirar em virtude dos trabalhos de Young e Fresnel, sendo substituídos pelas ondas, que mais tarde atingiram seu apogeu de luxo e originalidade ao serem associadas a oscilações dos campos magnético e elétrico, graças aos trabalhos de Maxwell e Hertz. Tudo indicava que o palco da radiação estaria definitivamente dominado por elas.

Novos corpúsculos, no entanto, entraram na festa, impulsionados pelos chamados raios catódicos e pelas investigações de Thomson e Lenard. Esses, porém, eram um pouco mais sofisticados, pois ostentavam carga elétrica e possuíam uma natureza independente das ondas eletromagnéticas, com as quais evoluíam em paz e interagem.

Havia situações, no entanto, em que os elétrons eram colididos e até ejetados da festa por um grupo novo e estranho de corpúsculos, que recebeu mais tarde o nome de fótons. Vinham agregados às radiações e eram dotados, de forma inexplicável, de uma energia diretamente proporcional à agitação delas, conhecida como frequência. Introduziram uma forma até então nunca vista, revolucionária mesmo, ao baile, deixando os participantes perplexos e certos de que um novo estilo de dança estava sendo inaugurado.

O que aconteceu depois? Uma festa louca se instalou, denominada Mecânica Quântica, enlouquecendo ainda mais o evento, antes tão pacífico. Mas esta é outra história, mais inimaginável do que a até agora contada, e ficará para um próximo trabalho.

 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<CIÊNCIA E TECNOLOGIA>; Ciência; Energia; Mecânica; Estudo;

REFERÊNCIAS

- [1]. https://en.wikipedia.org/wiki/Philosophi%C3%A6_Naturalis_Principia_Mathematica
- [2]. Newton, I. *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light*, Dover, 1952, New York, N.Y.
- [3]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens
- [4]. Huygens, Christiaan. *Traité de la lumiere...* (Leiden, Netherlands: Pieter van der Aa, 1690), Chapter 1.
- [5]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young
- [6]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Leonhard_Euler
- [7]. https://en.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresnel
- [8]. Gribbin, J. *The quantum Mystery* (Kindle Single) (English Edition), 21 jan/ 2016.
- [9]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Simon-Denis_Poisson
- [10]. https://pt.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell
- [11]. Gotaç, P.R. “O esquecido Maxwell”, *Revista do Clube Naval*, nº 373, jan/fev/mar 2015.
- [12]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Hippolyte_Fizeau
- [13]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz
- [14]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Hans_Christian_%C3%98rsted.
- [15]. Purcell, E.M. *Electricity and Magnetism – Berkeley Physics Course*, Vol. 2, capítulo 5, Macgraw-Hill, 1965.
- [16]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta
- [17]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Geissler
- [18]. <http://www.estudopratico.com.br/descoberta-do-eletron/>
- [19]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Johann_Wilhelm_Hittorf
- [20]. https://en.wikipedia.org/wiki/William_Crookes
- [21]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson
- [22]. /Jeanhttps://pt.wikipedia.org/wiki/Baptiste_Perrin
- [23]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Lorentz
- [24]. <https://www.resumoescolar.com.br/fisica/forca-de-lorentz/>
- [25]. <http://brasilecola.uol.com.br/biografia/robert-andrews.htm>
- [26]. <http://macbeth.if.usp.br/~gusev/Millikan.pdf>
- [27]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Otto_Lummer
- [28]. [https://www.google.com.br/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=max+Planck&*](https://www.google.com.br/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=max+Planck&*&hl=pt-br)
- [29]. Gotaç, P.R. “Um ato de desespero”, *Revista do Clube Naval*, v. 117, número 352 out/nov/dez 2009.
- [30]. Pais, A. *Sutil é o Senhor – A Ciência e a Vida de Albert Einstein*, Nova Fronteira, 1982.
- [31]. Gotaç, P.R. “O esquecido Maxwell”, *Revista do Clube Naval*, nº 373 jan/fev/mar 2015.
- [32]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Philipp_Lenard
- [33]. https://pt.wikipedia.org/wiki/Gilbert_Newton_Lewis
- [34]. Einstein, A. *Über einen Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, *Annalender Physik* 6 (17), 1905 (Sobre um ponto de vista heurístico relativo à produção e transformação da luz).
- [35]. Gotaç, P.R. “Einstein – do *Annus Mirabilis* à visita ao Brasil”, *Revista Marítima Brasileira*, V. 136, nº 07/09, jul/set 2016.