

CBPF-CS-005/90

OS 90 ANOS DA HIPÓTESE QUÂNTICA DE PLANCK

por

José Maria Filardo BASSALO

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/CNPq
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Departamento de Física da UFPA
66059 - Campus do Guamã, Belém, Pará

RESUMO - Neste trabalho, feito em homenagem aos 90 anos da hipótese quântica de Planck, vamos mostrar como surgiu e se desenvolveu esse importante conceito físico. Iniciamos com o estudo da radiação do corpo negro, no qual a energia era considerada como variando continuamente e, logo em seguida apresentamos a hipótese quântica de Planck, na qual a idéia fundamental é a da variação discreta da energia. Em continuação, discutiremos as duas principais aplicações do quantum planckiano: o quantum de luz einsteiniano e o modelo atômico quântico de Bohr. Finalmente, ressaltaremos como os vários resultados experimentais observados nas três primeiras décadas de nosso século, assim como os diversos modelos e teorias formulados no sentido de explicá-los, foram consolidando a idéia de Planck, culminando com a adoção definitiva do termo quântico na Física.

No dia 14 de dezembro de 1900 o físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) apresentou na Reunião da Sociedade Alemã de Física, em Berlim, seu famoso trabalho¹ no qual assumiu que a emissão e a absorção da radiação se fazia sempre por intermédio de porções discretas de energia -os quanta de energia $h\nu$. Essa hipótese inédita e audaciosa com a qual, contudo, explicou a polêmica questão da radiação do corpo negro e, graças à mesma, ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1918. Neste trabalho² vamos abordar alguns aspectos dessa hipótese quântica, bem como suas principais aplicações: o efeito fotoelétrico e o modelo quântico do átomo.

Vejamos, inicialmente, o problema do corpo negro, cujo conceito surgiu no decorrer do estudo da radiação térmica. As primeiras leis referentes a essa radiação foram experimentais. Com efeito, em 1792, o físico suíço Pierre Prévost (1751-1839), ao observar que um corpo esquentando ao rubro começava a se esfriar ao emitir radiação calorífica, enunciou uma lei experimental que ficou conhecida como lei das trocas de Prévost, segundo a qual "um corpo deve receber tanto calor quanto pode irradiar". Mais tarde, em 1858, o físico e meteorologista escocês Balfour Stewart (1828-1877), ao estudar a absorção e a emissão de radiação térmica por uma placa de sal de rocha, concluiu que "o poder emissor de cada espécie de substância é igual ao seu poder absorsor, para cada espécie de raio (comprimento de onda) do calor radiante". Independentemente

de Balfour, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), em 1859, fez essa mesma descoberta, isto é, a de que a razão entre o poder de emissão (e) e o de absorção (a) é uma função do comprimento de onda da radiação emitida ou absorvida e da temperatura absoluta T : $(e/a)_\lambda = I(\lambda, T)$. Logo depois, em 1860³, ao estudar com mais detalhes essa relação, o próprio Kirchhoff introduziu o conceito de corpo negro ou radiador integral, definindo-o como um corpo que absorve toda a radiação que incide nele, ou seja: $(e/a)_\lambda = 1$.

Após essa descoberta de Balfour-Kirchhoff, o problema enfrentado pelos físicos era o de encontrar $I(\lambda, T)$. O primeiro passo para chegar a essa função foi dado pelo físico austriaco Josef Stefan (1835-1893) ao estudar, em 1879, a velocidade com que os corpos se esfriam através da medida das áreas sob as curvas do espectro radiante térmico, chegando, nessa ocasião, à lei empírica: $R \propto T^4$, onde R representa a intensidade total da radiação (energia por unidade de área e por unidade de tempo) emitida por um corpo na temperatura absoluta T^4 . Mais tarde, em 1884, o físico austriaco Ludwig Edward Boltzmann (1844-1906) demonstrou, matematicamente, essa lei empírica de Stefan, ao considerar, como um gás, a radiação eletromagnética no interior de um corpo negro e aplicando ao mesmo a Segunda Lei da Termodinâmica proposta pelo físico francês Nicolas-Léonard Sadi Carnot (1796-1832), em 1824. A pressão desse gás (pressão de radiação) foi por

ele calculada usando a teoria eletromagnética desenvolvida pelo físico matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), em 1867.

O sucesso obtido por Boltzmann no sentido de demonstrar, teoricamente, a lei de Stefan (e, com isso, obter a famosa constante de Stefan-Boltzmann) levou o físico alemão Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928; PNF,1911) a estudar o espectro térmico dos corpos usando, também, a Termodinâmica e a teoria maxwelliana. Assim, em 1893, demonstrou, matematicamente, o fato experimental de que os máximos das curvas desse espectro se deslocam na medida em que a temperatura aumenta, segundo a lei: $T\lambda_{\text{máx}} = \text{cte}$, conhecida, desde então, como lei do deslocamento de Wien. Por outro lado, ao considerar que a radiação térmica decorria da vibração de osciladores moleculares e que a intensidade dessa radiação era proporcional ao número desses osciladores, Wien, em 1896, obteve o valor $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T)$, onde C_1 e C_2 são constantes. Essa expressão, aliás, que já havia sido obtida, empiricamente, pelo físico alemão Louis Carl Henrich Friedrich Paschen (1865-1940), em 1896.

No entanto, como a expressão de Paschen-Wien só se aplicava a pequenos λ (altas frequências), o físico inglês William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF,1904), ao considerar a intensidade da radiação térmica como proporcional aos tons normais de vibração dos

osciladores moleculares, obteve, em 1900, uma nova expressão para $I(\lambda, T) = C_1' T \lambda^{-4} \exp(-C_2 / \lambda T)$. É importante observar que em 1905⁶, Rayleigh reobteve essa sua fórmula, porém sem o fator exponencial e com $C_1' = 64k$, sendo k a constante de Boltzmann. Nesse mesmo ano de 1905⁷ e, independentemente, o físico inglês James Hopwood Jeans (1877-1946) encontrou uma nova expressão para $I(\lambda, T)$. Aliás, nessa ocasião, corrigiu um erro que Rayleigh praticara em seu artigo de 1905. Desse modo, a expressão agora corrigida: $I(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4}$ é hoje mundialmente conhecida como lei de Rayleigh-Jeans. Como essa expressão diverge (tende para o infinito) para baixos comprimentos de onda (ou para altas frequências), tal divergência ficou, então, conhecida como catástrofe do ultravioleta.

Enquanto os físicos teóricos procuravam obter, matematicamente, $I(\lambda, T)$ os experimentais, por sua vez, tentavam verificá-la de maneira experimental. Para isso, havia necessidade de construir-se um corpo negro. A primeira idéia foi a de usar uma cavidade, conforme o próprio autor desse conceito, Kirchhoff, sugeriu em 1860. Mais tarde, em 1884, o físico dinamarquês Christian Christiansen (1843-1917) e, em 1895, o físico norte-americano Edward St. John usaram, também, cavidades para observar a radiação do corpo negro. No entanto, em 1897, os físicos, o russo-alemão Otto Richard Lummer (1860-1925) e o alemão Ernst Pringsheim (1859-1917) construíram um corpo

negro formado, basicamente, por um recipiente com paredes duplas, sendo que o espaço entre elas servia de termostato para manter uma temperatura constante pré-fixada; com esse equipamento, realizaram uma série de experiências sobre a radiação do corpo negro. Aliás, é oportuno esclarecer que Lummer, na década de 1890, realizou uma série de trabalhos sobre a radiação do corpo negro, tendo como colaboradores além de Pringsheim, o próprio Wien e o físico alemão Ferdinand Kurlbaum (1857-1927).

Essa era a situação teórica e experimental sobre a radiação do corpo negro, quando surge Planck. No início de seus trabalhos sobre esse tema, obteve a fórmula de Wien usando argumentos físicos diferentes dos usados pelo próprio Wien, principalmente, os relacionados com a entropia dos osciladores moleculares. No entanto, as experiências realizadas sobre o corpo negro acima referidas, mostravam que para $\lambda T \gg 1$, a fórmula de Wien falhava, enquanto a fórmula de Rayleigh (a de 1900), ajustava-se bem às essas experiências. Inteirando-se desse resultado, Planck apresentou em 19 de outubro de 1900⁸, em um seminário realizado na Sociedade de Física Alemã uma nova expressão para $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2/\lambda T) - 1]$ que obtivera, de maneira eurística, ao fazer uma interpolação entre as fórmulas de Wien e de Rayleigh. (É oportuno observar que essa expressão se reduz à de Wien(1896) para $\lambda T \ll 1$, e à de Rayleigh-Jeans(1905) para $\lambda T \gg 1$.) Nesse mesmo dia, o físico

alemão Heinrich Leopold Rubens (1865-1922) e Kurlbaum confrontaram essa fórmula de Planck com o resultado das experiências que haviam terminado de realizar sobre o corpo negro⁹ e observaram que esse resultado se ajustava perfeitamente à fórmula de Planck.

Em vista dessa situação, Planck tentou obter, teoricamente, essa sua expressão usando todos os recursos da Termodinâmica pré-Boltzmann. No entanto, como não encontrou nenhum erro na dedução que Rayleigh fizera em 1900, Planck utilizou, então, a interpretação probabilística da entropia que Boltzmann propôs em 1877, para o cálculo dessa grandeza física de seus osciladores moleculares. Porém, para fazer esse cálculo, teve de admitir a hipótese de que a energia dos osciladores variava discretamente, ou seja: $\epsilon = h\nu$. Planck, contudo, esperava que essa hipótese fosse apenas um artifício de cálculo e que, no final do mesmo, pudesse anular h . Porém, para que os seus resultados combinassem com os experimentais era necessário que h tivesse um valor finito. Em vista disso, Planck demonstrou então sua fórmula, obtendo para C_1 e C_2 os valores: $C_1 = hc^2$ e $C_2 = hc/k$, onde c é a velocidade da luz, $k = 1.346 \times 10^{-16}$ ergs/k e $h = 6.55 \times 10^{-27}$ ergs.sec, posteriormente conhecida como constante de Planck. Foi esse trabalho que Planck apresentou à Sociedade Alemã de Física, reunida em Berlim, no dia 14 de dezembro de 1900, conforme já registramos.

Agora, vejamos as duas principais aplicações dessa hipótese revolucionária: a energia é uma grandeza física que varia discretamente e não continuamente, como até então a tradição científica consagrara¹⁰. A primeira grande aplicação dessa hipótese foi dada pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955; PNF,1921) na explicação do efeito fotoelétrico, que é o fenômeno pelo qual uma radiação eletromagnética, ao incidir em certas substâncias, é capaz de produzir emissão de elétrons. A primeira observação experimental desse novo fenômeno físico parece haver sido realizada pelo físico russo Alexander Grigoryevich Stoletov (1839-1896), em 1872, quando retirava ar de um pequeno frasco, no qual havia inserido duas placas metálicas, ligadas ao borne de uma bateria. Observou então que quando a luz de uma lâmpada de mercúrio atingiu uma dessas placas, imediatamente uma corrente elétrica circulou na bateria. Mais tarde, em 1887, o físico alemão Rudolf Heinrich Hertz (1857-1894) verificou que faíscas elétricas saltavam do eletrodo negativo do aparelho que utilizou para produzir ondas eletromagnéticas, toda a vez que o mesmo era iluminado com radiação ultravioleta. Logo depois, em 1888, o físico, também alemão, Wilhelm Hallwachs (1859-1922) notou que uma placa de zinco, descarregada e isolada, passava a carregar-se positivamente quando recebia radiação ultravioleta.

As leis do efeito fotoelétrico foram inicialmente estabelecidas pelo próprio Stoletov e,

posteriormente, pelo físico húngaro-alemão Philipp Eduard von Anton Lenard (1862-1947; PNF,1905). Assistente de Hertz, Lenard iniciou seu trabalho de pesquisa com tubos de raios catódicos a partir de 1892, havendo então observado em 1899 que um metal irradiado com ultravioleta emitia um feixe de elétrons. (Aliás, observação análoga e independente foi feita pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF,1906), também em 1899.) Continuando suas pesquisas com fotoeletricidade Lenard, em 1902¹¹, enunciou as seguintes leis para esse fenômeno: a) "os elétrons emitidos têm velocidades iniciais finitas, são independentes da intensidade da luz incidente, porém dependem de sua frequência"; b) "o número total de elétrons emitidos é proporcional à intensidade da luz incidente". Tais leis, contudo, eram incompatíveis com o eletromagnetismo maxwelliano, já que, para este, por exemplo, quanto mais intensa a radiação eletromagnética, maior seria a energia cinética do elétron arrancado, o que não acontecia com a observação de Lenard.

A solução dessa questão controversa foi dada por Einstein, em 1905¹², conforme assinalamos anteriormente. Sua idéia é bastante simples. Admitiu que a energia da radiação eletromagnética não é distribuída uniformemente sobre as frentes de onda como indicava a eletrodinâmica de Maxwell e sim, concentrada em pequenas regiões, ou verdadeiros "pacotes" de energia, denominados por Einstein de quantum de luz ("lichtquanta"¹³), de

valor $h\nu$ - o quantum planckiano. Assim, no efeito fotoelétrico, um quantum de luz ao colidir com um elétron no material emissor cede uma parte dessa energia ao elétron, que o utiliza para vencer a energia $h\nu_0$ que o liga ao átomo, e a diferença de energia restante é a energia cinética do fotoelêtron, isto é: $E_{cin} = h\nu - h\nu_0$, segundo o princípio da conservação de energia. Com essa única expressão Einstein explicou as leis de Lenard, graças à qual e, principalmente, ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1921. Observe-se que essa equação einsteiniana foi utilizada pelo físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF,1923) para obter experimentalmente, em 1916, a constante de Planck h , obtendo desse modo um valor que diferia de apenas 0.5 por cento do valor teórico proposto por Planck¹⁴. É oportuno salientar que Einstein utilizou o quantum planckiano para explicar em 1907, sem sucesso, a observação experimental da dependência com T^3 do calor específico em ultra-baixas temperaturas¹⁵.

A segunda grande aplicação do quantum de Planck foi a utilizada pelo físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF,1922) na formulação de seu modelo atômico. No final do século passado e começo deste, alguns modelos atômicos foram imaginados com o objetivo de explicar certos resultados experimentais até então conhecidos, tais como: efeito Zeeman, espalhamento da radiação eletromagnética pela matéria, séries espectrais dos

elementos químicos e radioatividade, dentre outros. Para poder entender o efeito Zeeman¹⁶, o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF,1902) em 1897, utilizou sua teoria dos elétrons proposta em 1892 e, ao considerar os seus "elétrons"¹⁷ como presos quase-elasticamente aos átomos, obteve uma expressão analítica que explicava aquele efeito. Nesse mesmo ano de 1897, o físico inglês Sir Joseph J. Larmor (1857-1942) explicou também esse efeito considerando os elétrons como girando em órbitas circulares ao invés dos elétrons oscilantes de Lorentz¹⁸.

Em 1901, o físico francês Jean-Baptiste Perrin (1870-1942; PNF,1926) formulou a hipótese de que os elétrons¹⁹ nos átomos se deslocavam em órbitas em torno de um caroço central com velocidade da ordem das velocidades com que os elétrons são arrancados do alumínio devido ao efeito fotoelétrico. Se tal ocorresse, aduziu Perrin, a frequência de revolução dos elétrons era da ordem das frequências ópticas das raias espectrais²⁰ e, com isso, deu uma explicação a esse fenômeno. Admitiu ainda Perrin que as instabilidades dessas órbitas eram responsáveis pelo fenômeno da radioatividade ou decaimento beta²¹. Aliás, as raias espectrais e o decaimento beta também foram objeto de estudo por parte do físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) ao considerar, em 1904, o átomo como formado por uma partícula central, carregada positivamente e rodeada por anéis de elétrons girando com a mesma velocidade angular.

Segundo esse sistema saturniano²², como denominou NagaoKa a seu próprio modelo, as oscilações dos anéis eletrônicos eram responsáveis pelas raias espectrais, e a quebra de um desses anéis provocava o decaimento beta.

O espalhamento da radiação eletromagnética pela matéria também induziu a um outro tipo de modelo atômico, desta vez, formulado por Thomson, também em 1904. Para esse físico inglês, o átomo era considerado como sendo constituído por uma carga elétrica positiva, homogeneamente distribuída na forma de uma esfera de raio da ordem de um angstrom, e movendo-se no seu interior um certo número de elétrons de modo a manter o átomo neutro. Cada elétron era considerado harmonicamente ligado ao centro do átomo e oscilando com frequência própria, configuração essa que lhe valeu a denominação de "pudim de ameixas". Com esse modelo, Thomson conseguiu explicar o espalhamento de luz visível pela matéria, isto é, o espalhamento Rayleigh²³, o espalhamento de raios-X pela matéria, conhecido desde então como espalhamento Thomson, e o espalhamento ressonante que se relaciona com a luminescência (fluorescência e fosforescência)²⁴.

Um outro modelo atômico diferente dos apresentados acima foi idealizado por Rutherford. Com efeito, conhecedor de que as partículas alfa eram oriundas do hélio, esse físico e mais dois outros, o alemão Hans Geiger (1882-1945) e o inglês Sir Ernst Marsden (1889-1970) começaram a estudar o espalhamento dessas partículas por uma

fina lâmina de ouro. Desse modo, em 1909, Rutherford solicitou de Marsden que observasse as trajetórias dessas partículas em consequência do espalhamento. Quando Marsden comunicou-lhe que as partículas alfa, algumas vezes, sofriam grandes desvios, inclusive chegando a voltar para o lugar onde se encontrava o rádio que usavam como fonte delas, Rutherford não acreditou nesse resultado, já que o mesmo era contrário ao modelo thomsoniano. Em vista disso, Geiger e Marsden continuaram a trabalhar nesse mesmo tema independentemente de Rutherford, ainda em 1909. Somente em 1911 e convencido de que o modelo de Thomson era insuficiente para explicar essas observações, foi então que Rutherford propôs o seu famoso modelo. Neste, o átomo comportava-se como um verdadeiro sistema planetário em miniatura, formado de uma parte central positiva onde se concentrava, praticamente, toda a massa do átomo - denominada por ele de núcleo atômico -, envolvida por uma nuvem de elétrons girando circularmente em torno dessa parte central, conhecida como eletrosfera.

Apesar do grande sucesso do modelo rutherfordiano, pois conseguiu explicar o espalhamento de partículas alfa pela matéria - o hoje conhecido espalhamento de Rutherford - e com isso determinar a carga elétrica do núcleo²⁵, esse modelo apresentava uma grande dificuldade. Tal dificuldade relacionava-se com a estabilidade da eletrosfera, de vez que os elétrons girando em torno do núcleo estavam sob a ação de uma aceleração

centrípeta, provocando desse modo, uma perda de energia por irradiação, segundo a eletrodinâmica de Maxwell-Larmor. Em consequência disso, os elétrons deveriam espiralar acabando por caírem no núcleo, provocando, portanto, o colapso do átomo. Uma primeira tentativa para contornar essa dificuldade, foi apresentada pelo astrofísico inglês John William Nicholson (1881-1955) em uma série de trabalhos realizados entre 1911 e 1912. Com efeito, usando um modelo tipo saturniano, Nicholson assumiu que era nula a soma vetorial das acelerações de todos os elétrons que giravam nos anéis e, com isso, deteve a radiação larmorniana²⁶. É oportuno observar que em um desses trabalhos (o de junho de 1912), Nicholson chegou a encontrar uma relação entre a constante de Planck h e o momento angular dos elétrons girantes, chegando mesmo a afirmar que esse momento só poderia variar discretamente e em quantidades proporcionais a $h^{2/7}$.

Esse era o cenário do mundo atômico no qual Bohr iria assumir o seu papel²⁸. Suas primeiras idéias sobre a constituição dos átomos e moléculas foram esboçadas em um memorandum que apresentou em Manchester, entre junho e julho de 1912, a fim de discutir com Rutherford esse polêmico assunto. No entanto, nesse documento, ainda não havia qualquer menção explícita da constante de Planck h e nem havia, também, considerado o problema da série de Balmer-Rydberg. No final desse memorandum, Bohr formulou a hipótese de que a estabilidade

da eletrosfera rutherfordiana decorria da proporcionalidade entre a energia cinética E e a frequência de rotação w dos elétrons, isto é: $E = kw$. Nessa ocasião, conforme frisamos, Bohr ainda não havia relacionado k com h .

No final de 1912 e começo de 1913 Bohr começou a estudar toda a literatura sobre esse tema. Assim é que leu os trabalhos de Nicholson acima referidos, bem como o trabalho do físico húngaro Georg von Hevesy (1885-1966) sobre as propriedades radioativas dos átomos, e um outro do físico holandês Antonius Johannes van den Broek (1870-1926) sobre o sistema periódico dos elementos. No entanto, foi em fevereiro de 1913 que encontrou a chave para o seu famoso modelo, pois, em conversa com o amigo, o físico dinamarquês Hans Marius Hansen (1886-1956), este questionou-lhe sobre como sua teoria dos átomos e moléculas explicava a série de Balmer-Rydberg. Bohr, até então, não havia considerado essa questão porque julgava que os espectros ópticos eram demasiadamente complexos e, portanto, fora do alcance de sua teoria, cujo objetivo era o de apenas estudar as propriedades gerais da matéria atômica e molecular.

Alertado por Hansen, Bohr procurou então estudar a fórmula de Balmer-Rydberg no livro do físico alemão Johannes Stark (1874-1957; PNF,1919) intitulado Prinzipien der Atomodynamik, publicado em 1911. Logo que viu a fórmula, tudo lhe ficou claro, conforme ele próprio declarou anos mais tarde a seu amigo, o físico Léon Rosenfeld (1904-1974). No entanto, para deduzir aquela

fórmula, teve de fazer suas duas célebres hipóteses, apresentadas por ele no primeiro dos três artigos que escreveu para apresentar, ainda em 1913²⁹, a teoria sobre A constituição de átomos e moléculas. Essas hipóteses são: 1ª) "A energia de cada elétron numa configuração estacionária é igual à sua frequência de revolução (ω) multiplicada por $\tau h/2$, sendo τ um número inteiro e h a constante de Planck, isto é: $W = \tau h \omega/2$ "³⁰; 2ª) "A passagem dos sistemas entre diferentes estados estacionários é seguida pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre sua frequência (ν) e a quantidade de energia emitida ($W_{\tau_2} - W_{\tau_1}$) é dada pela teoria de Planck, isto é: $W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h\nu$ ".

De posse desses postulados e usando um teorema da Mecânica Clássica³¹, Bohr deduziu a fórmula de Balmer-Rydberg e, com ela, obteve pela primeira vez uma expressão analítica para a famosa constante de Rydberg R usada pelos espectroscopistas, em função da massa (m) e carga elétrica (e) do elétron, da constante de Planck (h) e da carga E do núcleo rutherfordiano, ou seja:

$$\nu = R(1/\tau_2^2 - 1/\tau_1^2), \quad \text{onde } R = \frac{2\pi^2 m e^2 E^2}{h^3}, \quad \text{sendo } \tau_1 = \tau_2 + 1, \tau_2 + 2, \dots$$

Assim, aplicando tal expressão ao átomo de hidrogênio ($E = e$) encontrou para R o valor de 3.10×10^{15} (uCGS)³², contra o valor de 3.29×10^{15} usado pelos espectroscopistas. Além disso,

Bohr observou que se fizesse nessa expressão $\tau_2 = 2$, ela reproduziria a série de Balmer (1885); para $\tau_2 = 3$ a série de Paschen (1908)³³. Afirmou ainda que "se $\tau_2 = 1$ e $\tau_2 = 4,5, \dots$ obteremos séries situadas, respectivamente, nos extremos ultravioleta e infravermelho, não observadas mas cujas existências deve-se esperar-se"³⁴.

No final do terceiro artigo de sua trilogia, Bohr resume as cinco principais hipóteses que utilizou na sua teoria atômica e molecular, sendo que na quarta ele confirma a observação de Nicholson, qual seja, a de que o momento angular (M) do elétron em uma órbita circular em torno do núcleo é proporcional a h , conforme vimos. Tal resultado ($M = nh/2\pi$) é uma consequência de sua hipótese, concluiu. Além desse resultado espetacular, Bohr ainda resolveu, com seu modelo, a célebre polêmica sobre as séries de Pickering (1896,1897) e de Fowler (1912), ao demonstrar que as mesmas eram devidas ao hélio ionizado e não ao hidrogênio, como era admitido³⁵.

Ao concluirmos este trabalho sobre a hipótese quântica de Planck, observemos que apesar de algumas objeções que a mesma recebeu por parte da comunidade científica³⁶, ela foi se impondo na medida em que novos resultados experimentais foram sendo explicados, tomando como base ela própria, ou teorias nas quais a hipótese quântica era fundamental. Destaquemos alguns deles. Logo em 1913, o físico inglês Henry Gwyn-Jeffreys Moseley (1887-

1915) usou o modelo de Bohr para explicar sua lei: -"A frequência dos raios-X varia com o quadrado do número atômico Z do elemento-alvo". (É importante frisar que com essa lei Moseley conseguiu prever a existência de alguns elementos químicos, dentre eles, o elemento 72). Em 1914, os físicos alemães James Franck (1882-1964; PNF, 1925) e Gustav Ludwig Hertz (1887-1975; PNF, 1925) realizaram uma experiência na qual mediram o potencial de ionização de vapor de mercúrio provocado pela colisão de elétrons-catódicos. Não obstante o protesto de Franck e Hertz, Bohr interpretou essa experiência, em 1915, usando seu próprio modelo³⁷.

Por outro lado, uma das dificuldades apresentadas pelo modelo de Bohr era a de admitir órbitas circulares para os elétrons. Desse modo, uma extensão a outras órbitas foi procurada. Assim, essa extensão foi apresentada, independentemente e, em 1915, pelos físicos, o japonês Jun Ishiwara (1881-1947), o inglês William Wilson (1875-1965) e o alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), ao considerarem órbitas elípticas. Contudo, um dos resultados de tal modelo indicava que os planos das órbitas eram quantizadas, fato que foi confirmado na experiência realizada em 1921, pelos físicos alemães Otto Stern (1888-1969; PNF, 1943) e Walther Gerlach (1899-1979), na qual um feixe de átomos de prata, na forma de vapor, atravessou uma região de campo magnético variável.

O modelo de Bohr foi ainda utilizado para dirimir a dúvida que surgiu sobre a natureza do elemento 72 previsto por Moseley, conforme vimos. Com efeito, os químicos franceses, Georges Urbain (1872-1938) e Alexandre Henri George Dauvillier (1892-1979) achavam que se tratava de uma terra rara, enquanto os físicos dinamarqueses liderados por Bohr, diziam tratar-se de um metal similar ao zircônio, afirmação essa que decorria do modelo bohriano. No entanto, minutos antes de Bohr receber o Prêmio Nobel de Física, no dia 11 de dezembro de 1922, um telegrama do físico holandês Dirk Coster (1889-1950) informou-lhe que ele e von Hevesy haviam isolado o elemento 72 no minério de zircônio. Este novo elemento químico recebeu, em janeiro de 1923, o nome de háfnio em homenagem a Copenhague que em latim significa hafniae.

Por fim, destaquemos dois fatos que consagraram a hipótese quântica de Planck neste século XX. O primeiro deles foi a descoberta realizada pelo físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962; PNF, 1927), em 1923, ao estudar o espalhamento da luz pelo elétron - o hoje conhecidíssimo efeito Compton - para cuja explicação teórica teve de utilizar a hipótese do quantum de luz einsteiniano, bem como a teoria da relatividade do próprio Einstein, formulada em 1905. O segundo, foi a incorporação definitiva do termo quântico em nossa Física. Assim, tivemos o desenvolvimento da Mecânica Quântica e da Eletrodinâmica Quântica nos trabalhos dos

físicos, os alemães Alfred Landé (1888-1975), Max Born (1882-1970; PNF, 1954), Ernst Pascual Jordan (1902-1980), Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) e Ralph de Laer Krönig (1904-), os holandeses Hendrik Anthony Kramers (1894-1952), George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), o francês Príncipe Louis-Victor de Broglie (1892-1987; PNF, 1929), os austríacos Wolfgang Pauli Júnior (1900-1958; PNF, 1945) e Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) e os ingleses Charles Galton Darwin (1887-1962), Llewellyn Hilleth Thomas (1903-) e Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), trabalhos esses desenvolvidos entre 1920 e 192838.

NOTAS E REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (01) PLANCK, M. 1900. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2 (2): 237-245.
- (02) Para a feitura deste texto, usaremos, basicamente, os seguintes textos:
- MEHRA, J. and RECHENBERG, H. 1982. The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1, Parts 1,2. Springer-Verlag;
- WHITTAKER, E. Sir 1951, 1953. A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories and The Modern Theories: 1900-1926. Thomas Nelson and Sons Ltd.;
- SEGRE, E. 1987. Dos Raios-X aos Quarks. Editora Universidade de Brasilia;
- CROPPER, W. H. 1970. The Quantum Physics and An Introduction to their Physics. Oxford University Press;
- BASSALO, J. M. F. 1987-1990a. Crônicas da Física. Tomos 1 e 2. GEU/UFGA.
- (03) KIRCHHOFF, G. R. 1860. Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht, Ann. d. Phys. 109 (2) : 275-301; Phil. Mag. 20 (4):1-21.
- (04) R é calculada por $\int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda$.

- (05) RAYLEIGH, Lord 1900. The law of partition of kinetic energy, Phil. Mag. 49 (5):98-118.
- (06) _____ 1905. The dynamical theory of gases and radiation, Nature, 72: 54-55.
- (07) JEANS, J. H. 1905. On the partition of energy between matter and aether, Phil. Mag. 10(6): 91-98.
- (08) PLANCK, M. 1900. Über eine Verbesserung der Wien'schen Spektralgleichung, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2 (2): 202-204.
- (09) RUBENS, H. L. und KURLBAUM, F. 1900. Über die Emission langwelliger Wärmestrahlen durch den schwarzen Körper bei verschiedenen Temperaturen, Sitz. ber. Preuss. Akad. der Wiss. (Berlin), 25: 929-941.
- (10) Planck não aceitou integralmente essa idéia da descontinuidade da energia tanto que, entre 1910 e 1918, publicou uma série de artigos em que sugeriu ser a energia continuamente distribuída sobre a onda, as descontinuidades aparecendo somente no mecanismo de emissão ou mesmo, somente nos choques entre partículas. (LESTIENNE, R. 1973. La Recherche, 39 (4) : 1010-1011.)
- (11) LENARD, P. 1902. Über die lichtelektrische Wirkung, Ann. d. Phys. 8 (4): 149- 198.
- (12) EINSTEIN, A. 1905. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Ann. d. Phys., 17 (4): 132-148.

- (13) O nome fóton só foi introduzido em 1926 pelo químico norte-americano Gilbert Newton Lewis (1875-1946). (WHITTAKER, op. cit.)
- (14) Essa equação do efeito fotoelétrico proposta por Einstein também já havia sido verificada experimentalmente em 1912, em trabalhos independentes realizados pelos físicos, o inglês Owen Williams Richardson (1879-1959; PNF, 1928), o norte-americano Karl Taylor Compton (1887-1954) e A. L. Hughes. (WHITTAKER, op. cit.)
- (15) Essa dependência em T^3 foi demonstrada pelos físicos, o holandês Petrus Joseph Debye (1884-1966; PNQ,1936), o alemão Max Born (1882-1970; PNF,1954) e o húngaro Theodore von Kármán (1881-1963), em trabalhos realizados em 1912. (Born e Kármán, trabalharam juntos, enquanto Debye trabalhou independente.) Basicamente, nesses trabalhos sobre calor específico (inclusive o de Einstein), as energias dos osciladores harmônicos considerados nesses modelos eram admitidas como múltiplas do quantum planckiano. (BASSALO, J. M. F. 1990b. A Crônica do Calor: Calorimetria.CCEN/DF - PPD-001/90.)
- (16) Em 1896, o físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943; PNF,1902) observou que as duas linhas amarelas D do sódio eram alargadas quando examinadas sob a ação de um campo magnético forte.

- (17) Para Lorentz, o elêtron era qualquer partícula carregada, com ou sem massa, e qualquer que fosse o sinal da mesma.
- (18) Maiores detalhes sobre a explicação do efeito Zeeman veja-se Bassalo (1990a), op. cit.
- (19) O elêtron como partícula carregada negativamente e como constituinte da matéria foi descoberto pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF,1906) em 1897, em suas experiências com raios catódicos.
- (20) A existência de cerca de sete linhas escuras no espectro solar foram registradas pelo químico e físico inglês William Hyde Wollaston (1766-1828), em 1802. A existência dessas linhas bem como a de outras, foi observada pelo físico alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826), em 1814. Em suas pesquisas, Fraunhofer chegou a calcular o comprimento de onda dessas raias. Por outro lado, o físico norte-americano Henry August Rowland (1848-1901), utilizando sua técnica de construção de redes de difração descoberta em 1870, preparou, entre 1886 e 1895, um mapa do espectro solar no qual cerca de 14 000 linhas tiveram seus comprimentos de onda exatamente calculados. Por fim, os físicos, o suíço Johann Jakob Balmer (1825-1898), em 1885, e o sueco Johannes Robert Rydberg (1854-1919), em 1890, propuseram uma fórmula empírica para determinar o comprimento de onda das linhas espectrais do hidrogênio, a hoje conhecida série de Balmer.

- (21) A radioatividade - a emissão de partículas do interior de alguns núcleos - foi descoberta pelo físico francês Antoine-Henri Becquerel (1854-1912; PNF,1903) em 1896. Por sua vez, o físico inglês Lord Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ,1908), em 1897, descobriu que "os raios de Becquerel (denominados de radioatividade, em 1898, pela física e química polonesa Marie Sklodowska Curie (1867-1934; PNF,190; PNQ,1911)) eram constituídos por dois tipos de partículas:alfa, carregada positivamente e beta, negativamente.
- (22) Para formular seu modelo, Nagaoaka baseou-se em um trabalho de Maxwell de 1859, sobre a estabilidade dos anéis de Saturno.
- (23) Em 1871, Rayleigh demonstrou através da Análise Dimensional que a secção de choque de espalhamento da luz pelos gases é proporcional à quarta potência da frequência da luz considerada, explicando, desse modo, o fato cotidiano de ser azul a cor do céu, e de ser vermelho, o nascente e o poente do Sol. É oportuno esclarecer que uma explicação mais completa desses fenômenos foi apresentada por Einstein, em 1910, e pelo físico austriaco-polonês Marian Ritter von Somolan-Smoluchowski (1872-1917), em 1911, nos estudos que realizaram sobre o movimento browniano. (BASSALO, J. M. F. 1990c. A Crônica do Calor: A Teoria Cinética dos Gases. CCEN/DF - PPD - 002/90.)

- (24) Sendo ν a frequência da radiação espalhada em um átomo e ν_0 a frequência própria do elétron no átomo thomsoniano, a secção de choque de espalhamento é calculada relacionando a potência média da radiação devido à oscilação do elétron (Larmor, 1897) e a intensidade média da radiação incidente (Poynting, 1883). Pois bem, de posse da expressão analítica dessa secção de choque, os três tipos de espalhamento vistos acima podem ser obtidos da seguinte maneira: se $\nu \ll \nu_0$, tem-se o espalhamento Rayleigh; se $\nu \gg \nu_0$ tem-se o espalhamento Thomson; e se $\nu = \nu_0$ tem-se o espalhamento ressonante.
- (25) Um dos sucessos do espalhamento de Rutherford foi o obtido por seu discípulo, o físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF,1935) - o descobridor do nêutron (1932) - ao medir, em 1920 (Charge on the Atomic Nucleus and the Law of Force; validity of the Inverse Square Law for the Pt Atom. Phil. Mag., 40:734), a carga nuclear Z dos elementos platina (77,4), prata (46,3) e cobre (29,3) contra, respectivamente, 78, 47 e 29, dados pela tabela periódica.
- (26) Nicholson formulou seu modelo com o objetivo de analisar vários espectros da coroa do Sol e de algumas nebulosas. Segundo esse astrofísico, os átomos químicos eram constituídos por combinações de quatro átomos

primários: "coronium", contendo dois elétrons; "hidrogênio", com três; "nebulium" com quatro; e "protofluor", com cinco.

- (27) Um dos primeiros trabalhos a demonstrar que a constante h se relaciona com o átomo foi o realizado pelo físico alemão Arthur Erich Haas (1884-1941), em 1910, ao considerar que, no modelo thomsiano, o elétron se movia em uma órbita circular dentro de uma esfera carregada positiva e uniformemente, esfera essa que exercia uma força do tipo coulombiano sobre esse elétron.
- (28) Veja-se em ROBILOTA, M. R. e COELHO, H. T. (Ciência Hoje, 11(63): 22-30 (1990)) a mesma idéia de representação teatral pelos "atores" da matéria.
- (29) BOHR, N. 1913. On the constitution of atoms and molecules, Phil. Mag.(I) 26:1-25; (II) 476-502;(III) 857-875. (Existe uma tradução portuguesa (Fundação Calouste Gulbenkian, 1969) desses três trabalhos de Bohr, com uma excelente introdução feita por Rosenfeld.)
- (30) Segundo Mehra e Rechenberg (op. cit.), Bohr foi levado ao fator $1/2$ (não existente no primeiro esboço de sua teoria atômica) em consequência da segunda hipótese quântica de Planck, apresentada por este em 1911, tanto na Sociedade Alemã de Física, quanto no Primeiro Congresso de Solvay, realizado também em 1911. Com efeito, para Planck a energia média do oscilador

harmônico no zero absoluto vale $h\nu/2$. (PLANCK, M. 1911. Eine neue Strahlungshypothese, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 13(2):138-148.)

- (31) O teorema mecânico usado por Bohr era o seguinte: - "Em qualquer sistema formado por elétrons e núcleos positivos, no qual os núcleos estão em repouso e os elétrons se movem em órbitas circulares com velocidade pequena em comparação com a velocidade da luz (c), a energia cinética será numericamente igual a metade da energia potencial".
- (32) Para obter esse valor, Bohr utilizou os valores experimentais de e (Millikan, 1912), de e/m (A. H. Bucherer, 1912) e de h (Planck, 1900). Mais tarde, Bohr corrigiu o valor de R para 3.26×10^{15} , ao utilizar um novo valor de h medido por E. Warburg, G. Leitnäuser, E. Hupka e C. Müller, em 1913.
- (33) Essa série foi descoberta pelo físico alemão Louis Carl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947), em 1908, na região do infravermelho.
- (34) Essas séries espectrais previstas por Bohr foram descobertas, respectivamente, pelo físico norte-americano Theodore Lyman (1874-1954), em 1914, na região do ultravioleta, e por F. S. Brackett, em 1922, e A. H. Pfund, em 1926, na região do infravermelho longínquo.

- (35) O físico e astrônomo norte-americano Edward Charles Pickering (1846-1919) descobriu a série espectral que leva seu nome, ao estudar o espectro de algumas estrelas, dentre elas a ϵ -Pupis, em 1896 e 1897. Por sua vez, o espectroscopista inglês Alfred Fowler (1868-1940) foi levado à sua descoberta fazendo experiências com tubos de vácuo contendo uma amostra de hidrogênio e hélio, em 1912. Uma primeira tentativa no sentido de explicar a série de Pickering foi devida a Rydberg ao substituir na fórmula de Balmer-Rydberg, r_2 e r_1 , respectivamente, por $r_2/2$ e $r_1/2$, uma vez que a série de Pickering coincidia com a de Balmer, apenas de maneira alternada. Bohr deu a explicação correta ao atribuir ao hélio e não ao hidrogênio a causa dessas raias. Desse modo, fez em sua fórmula $E = 2e$. Essa discussão teve desdobramentos, porém Bohr foi resolvendo-os com grande competência. Para melhores esclarecimentos sobre essa discussão, veja-se Mehra e Rechenberg, op. cit.
- (36) Conforme já frisamos, o próprio Planck não a aceitou integralmente, tanto que não se referia à constante h na edição de 1905 de seu Thermodynamik (Termodinâmica). (LESTIENNE, op. cit.)
- (37) Somente em 1919 é que Franck e Hertz aceitaram a interpretação de Bohr sobre sua experiência.
- (38) É oportuno registrar que a equação de Schrödinger, apresentada em 1926, demonstra que a energia do

oscilador harmônico é quantizado e tem, justamente, os valores postulados por Planck em 1900 e em 1911, ou seja: $E_n = (n + 1/2) h\nu$. (Maiores detalhes sobre essa equação, bem como sobre esses trabalhos desenvolvidos na década de 1920, consultar as referências indicadas na nota (02).)

ABSTRACT - NINETY YEARS OF PLANCK'S QUANTUM HYPOTHESIS -

In this work, intended to pay homage to 90 years of Planck's quantum hypothesis, we show how this important concept in physics emerged and developed. We begin with the study of blackbody radiation, in which energy was considered as continuously varying, and immediately thereafter we present Planck's quantical hypothesis, in which the fundamental idea is that of the discrete variation of energy. Following this, we discuss two main applications of planckian quantics: Einstein's light quantum and Bohr's quantic atomic model. Finally we emphasize how the various experimental results observed during the first three decades of this century, as well as the diverse models formulated to explain them, acted in consolidating Planck's idea, culminating with the definitive adoption of Planck's own term - quantical, in physics.

Palavras-chave - Quantum, Planck, quantum de luz

einsteiniano, modelo atômico quântico
bohriano.

Projeto de Pesquisa - CONSEP - 0979/83 - Textos de

Física

Belém, Agosto de 1990