



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### Os Efeitos Zeeman (normal e anômalo), Back-Paschen e o Spin do Elétron.

Em 1896 o físico holandês Peter Zeeman (1865-1943; PNF, 1902) começou a estudar a influência do campo magnético sobre o estado de polarização da luz, que havia sido objeto de pesquisa físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867), o famoso efeito Faraday (vide verbete nesta série). Desse modo, trabalhando com um equipamento melhor do que o utilizado por Faraday, ou seja, uma bobina de Rühmkorff, que produzia um campo magnético da ordem de 10 kilogauss, e uma grade de difração [que o físico norte-americano Henry August Rowland (1848-1901) construíra, em 1882 (*Philosophical Magazine* 13, p. 469; *Nature* 26, p. 211), com um raio de 10 pés, possuindo 14.938 linhas por polegada, e apresentando um poder de resolução acima de 150.000], Zeeman observou, naquele ano de 1896, que as duas linhas amarelas D do sódio (Na) eram alargadas quando examinadas sob a ação de um campo magnético muito forte. Ele ainda observou que tais linhas eram circularmente polarizadas quando observadas paralelamente às linhas de força do campo magnético, e linearmente plano-polarizadas quando a observação era dirigida perpendicularmente a essas mesmas linhas de força. Alargamentos semelhantes ao do espectro do Na foram ainda observados por Zeeman com outras linhas espectrais. É oportuno destacar que, antes de esse efeito ser descoberto experimentalmente, o físico e matemático irlandês Sir Joseph J. Larmor (1857-1942) já havia estudado, em 1893 (*Report of the British Association for the Advancement of Science*), essa situação sob o ponto de vista teórico. [Sir Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories* (Thomas Nelson And Sons Ltd., 1951).]

As experiências de Zeeman referidas acima foram discutidas com o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) (de quem, aliás, Zeeman tornou-se assistente em 1890), que havia, desde 1892, desenvolvido a sua famosa Teoria do Elétron segundo a qual a eletricidade possuía uma estrutura composta de "partículas carregadas" (denominadas por Lorentz de "íons", a partir de 1895 e, de elétrons, em 1899), cujas oscilações harmônicas amortecidas no interior de um corpo eram as responsáveis pela emissão de seu espectro luminoso (vide verbete nesta série). Os resultados dessas experiências de Zeeman foram apresentados na Reunião da *Academia de Ciências de Amsterdam*, no dia 31 de outubro de 1896, e o artigo referente ao hoje conhecido efeito Zeeman foi publicado, ainda em 1896 (*Verlag van de gewone Vergadering der wis-en natuurkundige Afdeling, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* 5, pgs. 181; 242; *Verbandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin* 7, p. 128) (ver excertos desse trabalho em William Francis Magie, *A Source Book in Physics* (McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935).

Logo depois, em 1897 (*Annalen der Physik* 63, p. 278; *Philosophical Magazine* 43, p. 232), Lorentz deu uma explicação teórica para esse novo fenômeno observado por Zeeman. Assim, usando a sua Teoria do Elétron e considerando os "íons" (mais tarde, "elétrons", como vimos acima) como estando presos aos átomos por uma força do tipo elástica e sujeitos à ação de uma força externa, demonstrou que, na presença de um campo magnético  $\vec{H}$ , esses "íons" oscilavam na direção desse campo com a frequência própria  $\nu_0$ , enquanto giravam em órbitas circulares em planos normais à direção de  $\vec{H}$  com a frequência  $\nu$  dada por (na notação atual):  $\nu = \nu_0 \pm eH/(4\pi m_e c)$ , onde  $e$  e  $m_e$  representam, respectivamente, a carga e a massa do "íon", e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Ainda segundo Lorentz, quando a observação do efeito Zeeman era feita na direção do campo magnético, apareciam apenas duas linhas polarizadas circularmente e em sentido inverso uma da outra. Por outro lado, quando a observação era feita perpendicularmente ao campo  $\vec{H}$ , apareciam três linhas, sendo a central polarizada linearmente à direção de  $\vec{H}$ , a chamada componente  $\pi$ , e as duas extremas, polarizadas também linearmente, porém perpendicularmente à direção de  $\vec{H}$ , a chamada componente  $\sigma$  (essa denominação deriva da palavra alemã *senkrecht* que significa perpendicular). Essa previsão de Lorentz [desdobramento ("splitting") de linhas espectrais] foi confirmada por Zeeman, pela primeira vez e ainda em 1897

(Verlag van de gewone Vergadering der wis-en natuurkundige Afdeeling, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam 6, pgs. 13; 99; 260), observando a linha azul (4800Å) do cádmio (**Cd**) sob a ação de um campo magnético de 32 kilogauss. É oportuno destacar que, também em 1897 (*Philosophical Magazine* 44, p. 503), Larmor apresentou uma outra explicação teórica para o efeito Zeeman. Segundo ele, o efeito magnético de um campo magnético  $\vec{H}$  sobre partículas carregadas que descrevem órbitas circulares era o de superpor à frequência própria de rotação uma frequência precessional em torno de  $\vec{H}$  e de mesmo valor calculado por Lorentz. Essa frequência precessional ficou conhecida como frequência de Larmor ( $\nu_L$ ):

$$\nu_L = \frac{e}{2m_e} \times \frac{H}{2\pi c}.$$

O desdobramento de linhas espectrais sob a ação de um campo magnético forte foi também observado, ainda em 1897, em outros laboratórios do mundo pelos físicos: o norte-americano Albert Abraham Michelson (1852-1931; PNF, 1907) (*Philosophical Magazine* 44, p. 109); o francês Marie-Alfred Cornu (1841-1902) (*Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris* 125, p. 555); e o alemão C. G. Walther König (*Annalen der Physik* 62, p. 240). Note-se que, no dia 20 de janeiro de 1898, numa reunião realizada na *Royal Society of London*, o físico irlandês George Francis Fitzgerald (1851-1901), mostrou pela primeira vez a relação entre os efeitos descobertos por Faraday e por Zeeman, durante a discussão do trabalho sobre o efeito Zeeman, apresentado pelo físico irlandês Thomas Preston (1860-1900) naquela reunião (Whittaker, op. cit.).

O estudo do efeito Zeeman continuou despertando muito interesse no mundo inteiro. Contudo, novas observações experimentais sob a ação de um campo magnético em uma linha espectral não se ajustaram na explicação de Lorentz-Larmor. Com efeito, logo em 1898 (*Scientific Transactions of the Royal Dublin Society* 6, p. 385), Preston observou que as linhas azuis do Zn (4722Å) e do Cd (4800Å) tornavam-se um quadrupletto na presença de um campo magnético. Ainda em 1898 (*Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris* 126, p. 181), Cornu obteve um outro quadrupletto, desta vez para a linha **D<sub>1</sub>** do Na e um sextupletto para a linha **D<sub>2</sub>**, também do Na, resultado esse que foi logo confirmado por Preston. Também em 1898 (*Astrophysical Journal* 7, p. 131), Michelson conseguiu separar a linha verde (5460Å) do mercúrio (Hg) em onze componentes. Além disso, e no mesmo ano de 1898 (*Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris* 126, p. 997; 127, p. 18), quadrupletos e outras estruturas complexas foram obtidas pelos físicos franceses Antoine Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903) e Henri Alexandre Deslandres (1853-1948), examinando linhas espectrais do ferro (**Fe**), no espectro visível e no ultravioleta.

Esses “tipos mais complexos do efeito Zeeman”, conforme Lorentz os denominou, foram estudados sistematicamente por Preston e, em consequência desses estudos, formulou em 1899 (*Nature* 59, p. 248) uma lei denominada de Lei Geral do Fenômeno da Perturbação Magnética das Linhas Espectrais, segundo a qual, as séries espectrais (vide verbete nesta série) de uma dada substância apresentam o mesmo padrão (“pattern”) de componentes na presença de um campo magnético; por outro lado, linhas espectrais de diferentes elementos da mesma família (por exemplo, os álcalis ou as terras raras), têm o mesmo efeito Zeeman. Essa lei (regra) de Preston foi tentada ser explicada, sem sucesso, por Lorentz, ainda em 1899 (*Physikalische Zeitschrift* 1, p. 39), usando sua Teoria do Elétron. Ela, no entanto, só foi corretamente explicada pela Mecânica Quântica, desenvolvida a partir de 1925 (vide verbete nesta série). Registre-se que, também em 1899, o físico alemão Woldemar Voigt (1850-1919) (*Annalen der Physik* 67, p. 345) e, independentemente, D. A. Goldhammer (*Annalen der Physik* 67, p. 696), estudaram o chamado *efeito Zeeman inverso*, ou seja, eles analisaram o que acontecia com o espectro de uma chama de Na colocada em um campo magnético, quando essa chama é atravessada por uma luz plano-polarizada de frequência próxima à da linha **D** daquele elemento químico. [Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Volume 1, Parts 1 and 2. (Springer-Verlag, 1982).]

Com o propósito de testar a regra de Preston, os físicos alemães Carl David Tomé Runge (1856-1927) e Louis Carl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947), em 1900 (*Physikalische Zeitschrift* 1, p. 480), investigaram algumas linhas do **Hg** e observaram que, sob a ação de um campo magnético, a linha verde (5461Å) era separada em onze componentes e a linha azul (4359Å) em oito. Observaram mais ainda que, certos pares de linhas (5461Å e 3341.7Å; 4359Å e 2893.7Å) apresentavam o mesmo número de “componentes Zeeman”, igualmente separados em frequência. Mais tarde, em 1902 (*Physikalische Zeitschrift* 3, p. 441), analisando as séries de tripletos do magnésio (**Mg**), Cd e Hg, e as séries de dupletos do cobre (Cu), prata (Ag), alumínio (**Al**), tálio (**Tl**) e Na (linhas D), Runge observou que em todos os casos das linhas correspondentes, elas apresentavam o mesmo número de componentes magnéticos com a mesma diferença de frequências.

Esse conjunto de resultados referentes ao “efeito Zeeman complexo”, foi reunido por Runge em 1907 (*Physikalische Zeitschrift* 8, p. 232) com o objetivo de ajustar numericamente as diferenças de frequências ( $\Delta\nu$ ) entre os componentes magnéticos. Nesse trabalho, Runge encontrou que as distâncias (medidas em  $\Delta\nu$ ) desses

componentes ao componente central, são múltiplos da quantidade  $\sqrt{Lr}$ , onde  $r$  é um número inteiro compreendido entre 1 (triplete normal de Zeeman) e 12, conhecido como “número de Runge”. Note-se que Runge deduziu esse resultado, que posteriormente veio a ser conhecido como regra de Runge, depois de cuidadosa análise matemática dos dados experimentais até então conhecidos.

Logo após Runge haver anunciado a sua regra, um resultado experimental obtido por W. Lohmann, em 1908 (*Physikalische Zeitschrift* 9, p. 145), começou a colocar em dúvida as “regras” de Runge e de Preston. Nesse trabalho, ele mostrou que a grande maioria das linhas do hélio (He) (com as quais trabalhou em sua Tese de Doutorado defendida em 1907 na *Universidade de Halle*) eram separadas apenas em “triplete normal Zeeman”, independentemente das séries às quais aquelas linhas pertenciam.

Durante alguns anos, as linhas do He observadas por Lohmann eram as únicas exceções do “efeito Zeeman complexo”, até que Voigt e seu aluno de doutoramento, o físico dinamarquês Hans Marius Hansen (1886-1956), ao estudarem o *efeito Zeeman inverso* (separação magnética de linhas espectrais de absorção) da linha vermelha (6708Å) do lítio (Li), observaram em 1912 (*Physikalische Zeitschrift* 13, p. 217) que a mesma era separada apenas em “triplete normal Zeeman”. Observe-se que esse resultado representava uma surpresa, pois sendo o espectro do Li análogo aos do Na e potássio (K), ele, igualmente como estes dois últimos, deveria apresentar o mesmo “padrão Zeeman complexo”.

Para investigar mais apuradamente essas dificuldades com os “efeitos Zeeman normal e complexo”, Paschen convidou seu aluno de doutoramento, o físico alemão Ernst Emil Alexander Back (1881-1959). Assim, em 1912 (*Annalen der Physik* 39, p. 897), ao analisarem o Li e outros elementos químicos [hidrogênio (H) e He, por exemplo], eles descobriram que quando o campo magnético começa a aumentar muitos componentes magnéticos “complexos” sofrem uma “transformação magnética”, tornando-se cada vez mais fracos, até se reduzirem a uma configuração “Zeeman normal”. Em outras palavras, o efeito Zeeman anômalo (como eles passaram a chamar, nessa ocasião, o “efeito Zeeman complexo”) transforma-se no efeito Zeeman normal, à medida que aumenta o campo magnético externo. Logo depois, em 1913 (*Annalen der Physik* 40, p. 960), Paschen e Back confirmariam sua descoberta, ao observarem uma “transformação magnética” do oxigênio (O), sob um campo magnético de **40 kilogauss**. Assim, o efeito Paschen-Back [nome cunhado pelo físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), em 1914 (*Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten*, p. 207)], explicou as regras de Preston e de Runge. Ainda em 1913, Voigt (*Annalen der Physik* 40, p. 368; 41, p. 403; 42, p. 210) e, independentemente, Sommerfeld (*Annalen der Physik* 40, p. 748) estudaram o efeito Zeeman normal e a “transformação magnética” (efeito Paschen-Back) assumindo os elétrons como sendo presos anisotropicamente aos átomos, sem, contudo, obterem bons resultados.

Um estudo mais elaborado sobre o efeito Zeeman normal foi apresentado por Sommerfeld, em 1916 (*Physikalische Zeitschrift* 17, p. 491) ao estudar o movimento (relativista e não-relativista) de um elétron sob a influência de um campo magnético  $\vec{H}$ . Nesse estudo, ele obteve dois resultados importantes. O primeiro deles, referia-se à introdução de um terceiro número quântico  $m$  (conhecido posteriormente como número quântico magnético), além dos números quânticos  $n_r$  e  $n_\varphi$  que ele próprio já havia introduzido ao considerar Kleperianas as órbitas eletrônicas Bohrianas (ver verbete nesta série sobre o modelo atômico de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld). Esse novo número quântico determinava as posições das órbitas dos elétrons em relação à direção de  $\vec{H}$ , e de tal modo que o cosseno do ângulo  $\theta$  entre as direções de  $\vec{H}$  e da normal ao plano da órbita era dado por:  $\cos \theta = m / n_\varphi$ . Ora, como  $m$  e  $n_\varphi$  são números inteiros (quantizados), os valores correspondentes para  $\theta$  indicavam que os planos das órbitas eletrônicas não podiam ser quaisquer e, sim, apenas os determinados por aquela condição, ou seja, tais planos variavam discretamente no espaço. Esse resultado ficou conhecido como o *princípio da quantização do espaço*. O segundo resultado importante obtido por Sommerfeld nesse artigo foi o de que as linhas do espectro do H eram deslocadas de  $\Delta\nu = \Delta\nu_{(Zn)} - \Delta m$ , onde  $\Delta\nu_{(Zn)}$  representava o mesmo “deslocamento Zeeman normal”, que fora deduzido por Larmor e Lorentz, segundo vimos acima, e  $\Delta m$  media a variação de  $m$ , variação essa que só podia assumir os valores discretos ( $\Delta m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Ora, em vista dessa “regra de seleção”, esse resultado de Sommerfeld apenas explicava o efeito Zeeman normal. Por outro lado, não havia indicação nos cálculos desse trabalho de Sommerfeld de algo que se relacionasse com o efeito Zeeman anômalo ou mesmo com o efeito Paschen-Back. Registre-se que essa “regra de seleção” foi demonstrada em 1918, em trabalhos distintos realizados pelos físicos, o polonês Adalbert Wojciech Rubinowicz (1889-1974) (*Physikalische Zeitschrift* 19, pgs. 441; 465) e o dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) (*Königlige Danske Videnskabernes Selskab Skrifter*, 8. *Laekke*, IV. 1, pgs. 1; 37). Para maiores detalhes sobre essa demonstração ver Mehra e Rechenberg, op. cit. e Whittaker, op. cit.

Muito embora o efeito Zeeman normal tenha recebido essa explicação de Sommerfeld, o efeito Zeeman anômalo só começou a ser entendido com os trabalhos do próprio Sommerfeld e dos físicos, os alemães Alfred Landé (1888-1975), Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932), Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) e Ralph Ralph de Laer Krönig (1904-1995), o norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962; PNF, 1927), e os holandeses George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), entre 1920 e 1925, segundo veremos a seguir.

Conforme vimos anteriormente, Voigt e Sommerfeld, em trabalhos independentes realizados em 1913, e Sommerfeld, em 1916, haviam tentado, sem sucesso, explicar as “complexidades” do efeito Zeeman. Em 1920, o próprio Sommerfeld voltou a essa questão com a publicação de dois trabalhos. No primeiro (*Naturwissenschaften* 8, p. 61), formulou a regra de decomposição magnético-óptica que é caracterizada pela equação  $r = r_1 r_2$ , onde  $r$  é o “número de Runge” do “efeito Zeeman complexo” e  $r_1$  e  $r_2$  são também “números de Runge” dos termos envolvidos na transição eletrônica que caracteriza aquele efeito. No segundo trabalho (*Annalen der Physik* 63, p. 221), Sommerfeld usou essa sua “regra”, os “números de Range” [os quais denominou de “números misteriosos” (*Zahlemysterium*)], seu modelo atômico e mais o Princípio da Combinação de Ritz, para explicar o “efeito Zeeman complexo”. Registre-se que, em 1908 (*Physikalische Zeitschrift* 9, p. 521), o físico suíço Walther Ritz (1878-1909) apresentou aquele seu princípio, segundo o qual a frequência de uma linha arbitrária do espectro de qualquer átomo, pode ser representada como a soma algébrica das frequências de duas outras linhas quaisquer do mesmo espectro.

Conforme vimos acima, no segundo trabalho de 1920, Sommerfeld conseguiu explicar alguns resultados experimentais relacionados com o “efeito Zeeman complexo”. No entanto, ainda nesse trabalho, ele encontrou sérias dificuldades na explicação de alguns dupletos observados experimentalmente, notadamente o famoso dubleto formado pelas linhas amarelas ( $D_1$  e  $D_2$ ) do Na. Ora, segundo o modelo atômico de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld, o Na só poderia apresentar uma linha (singleto) D derivada da transição eletrônica entre a órbita de “número quântico azimutal”  $n_\varphi = 1$  (hoje, número quântico orbital  $l$ ) [órbita essa denominada de “onda” p (de *principal*) pelos espectroscopistas] e a órbita de “número quântico azimutal”  $n_\varphi = 0$  [órbita essa denominada de “onda” s (de *sharp*) pelos espectroscopistas]. Desse modo, para explicar o dupleto observado do Na, ainda naquele segundo trabalho de 1920, Sommerfeld postulou a existência de um novo número quântico, denominado por ele de “número quântico interno” e denotado por  $j$ , e que, de alguma forma, deveria estar relacionado com uma rotação “escondida” dentro do átomo.

Esse novo número quântico (que mais tarde foi visto relacionar-se com o spin do elétron) postulado por Sommerfeld indicava que as órbitas eletrônicas Kleperianas deveriam ser desdobradas em outras órbitas. Assim, aos subníveis ( $n, n_\varphi$ ) (onde  $n$  representa o número quântico principal Bohriano) do modelo atômico de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld deveria ser incorporado um sub-subnível ( $j$ ), de modo que aquelas órbitas seriam caracterizadas pelos números quânticos ( $n, n_\varphi, j$ ). Desse modo, para explicar outros resultados experimentais relativos a singletos, dupletos e tripletos, Sommerfeld impôs, respectivamente, que:  $j = n_\varphi, j = n_\varphi, n_\varphi - 1, j = n_\varphi, n_\varphi - 1, n_\varphi - 2$ , além de  $\Delta j = 0, \pm 1$ . É oportuno destacar que Sommerfeld foi levado a impor essa “regra de seleção” para  $j$  em virtude de haver observado que a “onda”  $d$  (de *diffuse*) do Na, que decorre da transição do subnível ( $n = 4, n_\varphi = 3$ ) para o subnível ( $n = 3, n_\varphi = 2$ ), poderia ser um tripleto. No entanto, Sommerfeld notou, ao estudar as transições entre os dois sub-subníveis ( $n = 4, n_\varphi = 3, j = 3$  ou  $2$ ) e ( $n = 3, n_\varphi = 2, j = 2$  ou  $1$ ), que poderia também haver o quadrupletos:  $j = 3 \rightarrow j = 2, j = 3 \rightarrow j = 1, j = 2 \rightarrow j = 2$  e  $j = 1 \rightarrow j = 1$ . Aí, veio-lhe a idéia de “proibir” a transição  $j = 3 \rightarrow j = 1$ . [A. d’Abro, *The Rise of the New Physics*, Volume Two (Dover, 1952).]

Ao ler o livro sobre a espectroscopia de gases e vapores escrito em 1913 [Das Leuchten der Gase und Dämpfe (Braunschweig: Fr. Vieweg)] pelo físico alemão Heinrich Mathias Konen (1874-1948), Landé começou a se interessar pelo efeito Zeeman anômalo e, sobre o qual, em 1921, publicou dois trabalhos. No primeiro deles (*Zeitschrift für Physik* 5, p. 213), considerou que o número quântico  $j$  proposto por Sommerfeld (o qual denominou de  $k$ ) significava o “número quântico azimutal” do átomo como um todo (correspondente ao momento angular total do átomo), e cuja projeção na direção do campo magnético  $\vec{H}$  era representado por um outro número quântico chamado por ele de “número quântico equatorial” e denotado por  $m$ . Desse modo, para Landé o estado estacionário de energia ( $E$ ) de um átomo em um campo magnético externo ( $\vec{H}$ ) era dado por:  $E = E_1 + g m h \nu_L$ , onde  $E_1$  é o estado de energia do átomo não perturbado e  $g$  é um “fator de proporcionalidade”, mais tarde conhecido como fator de Landé. Para explicar os singletos, dupletos e tripletos conhecidos, Landé então propôs que  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm j$ , para singletos e tripletos, e  $m = \pm 1/2, \pm 3/2, \dots, \pm (j - 1/2)$ , para os dupletos e, mais

ainda, que na transição óptica, deveríamos ter:  $\Delta m = 0, \pm 1$ . Quanto ao g, Landé propôs que ele seria unitário no caso do efeito Zeeman normal, e assumiria valores diferentes de um ( $g \neq 1$ ) para o efeito Zeeman anômalo (EZA). No segundo trabalho (*Zeitschrift für Physik* 7, p. 398), Landé observou que, por ser  $g \neq 1$  no EZA, então a razão giromagnética do elétron era diferente de seu valor clássico, qual seja:  $e/(2 m_e)$ . Ora, como a frequência de Larmor é função dessa relação [conforme se vê na expressão que vimos acima, ou seja:  $\nu_L = e/(2 m_e) \times H/(2 \pi c)$ ], então Landé propôs uma alteração nessa expressão para explicar a anomalia que encontrou ao estudar o movimento do elétron atômico na presença de um campo magnético externo. Registre-se que aquela “razão” é definida como a relação entre o momento magnético do elétron ( $\mu = e v r / 2$ ) e o seu momento angular ( $L = m_e v r$ ) em sua órbita circular de raio (r) e velocidade (v) em torno do núcleo atômico.

Como Landé não havia apresentado base teórica para a modificação proposta por ele para  $\nu_L$ , vários trabalhos teóricos foram então realizados no sentido de encontrar essa base. Vejamos quais. Em 1921, Heisenberg participava dos seminários dados por Sommerfeld, na *Universidade de Munique*, a respeito da Teoria das Linhas Espectrais. Em um desses seminários, ele pediu que Heisenberg examinasse os últimos dados experimentais apresentados por Back, nesse mesmo ano de 1921 (*Naturwissenschaften* 9, p. 199), sobre o EZA, levando em consideração a teoria que Sommerfeld desenvolvera, em 1920, sobre os “números misteriosos”. Depois de examiná-los, Heisenberg foi a Sommerfeld e apresentou-lhe a idéia de que os estados dupletos poderiam ser mais bem interpretados se os “números misteriosos Sommerfeldianos” fossem considerados como semi-inteiros ao invés de inteiros, conforme Sommerfeld havia admitido. Ao saber disso, Sommerfeld ficou muito chocado e falou a Heisenberg: *Isto é absolutamente impossível. O único fato que conhecemos sobre a teoria quântica é que existem números inteiros e não semi-inteiros.* [David C. Cassidy, *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg* (W. H. Freeman and Company, 1992).] Refeito do choque e pensando na proposta de Heisenberg, Sommerfeld convidou Heisenberg para que, no verão de 1922, o acompanhasse até Göttingen, onde Bohr iria ministrar algumas conferências e, desse modo, pudesse conhecê-lo pessoalmente para, se houvesse oportunidade, apresentar sua hipótese. Cada uma dessas conferências era seguida de longas discussões e, ao final da terceira, Heisenberg fez uma ousada observação crítica sobre o estado atual da Teoria das Linhas Espectrais e, provavelmente, falou sobre os “números quânticos fracionários”. Essa ousadia valeu-lhe um convite de Bohr para caminharem a uma montanha próximo de Göttingen para discutirem mais sobre a espectroscopia. Como resultado dessa caminhada surgiu o convite de Bohr para que Heisenberg fosse a Copenhague trabalhar com ele, pelo menos por um semestre, para que juntos pudessem “fazer um pouco de física”. [Antônio Fernando Ribeiro de Toledo Piza, *Schrödinger & Heisenberg: A Física além do senso comum* (Odisseus, 2003).]

A hipótese de Heisenberg sobre “números quânticos fracionários” foi desenvolvida por ele em seu primeiro trabalho científico, publicado em 1922 (*Zeitschrift für Physik* 8, p. 273). Nesse trabalho, ele apresentou o modelo de caroço (*core model*) segundo o qual, em um átomo de muitos elétrons, um grande número deles circulam em torno do núcleo compondo um “caroço de elétrons”, enquanto os mais externos são fracamente ligados a esse mesmo núcleo, constituindo os chamados “elétrons ópticos” (ou “elétrons de valência”), que são os responsáveis pelas transições (radiação) eletrônicas-ópticas Bohrianas. Assim, para explicar os dupletos do EZA, nesse seu primeiro trabalho, Heisenberg postulou que o “caroço de elétrons” era dotado de um momento angular igual a  $\hbar/2$  e que o “elétron de valência” era dotado de um momento angular igual a  $(n_r - 1/2) \hbar$ , sendo que o duplete decorria, exatamente, do alinhamento e do anti-alinhamento, respectivamente, desses momentos angulares. Note-se que a idéia de tratar um átomo de muitos elétrons, separando os mesmos em uma parte interna (“caroço de elétrons”) e uma parte externa (“elétrons de valência”), já havia sido utilizada por Sommerfeld, em 1916 [*Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (München), mathematisch-physikalische Klasse*, p. 131]. Por sua vez, em 1920 (*Transactions of the Optical Institute in Petrograd* 1, p. 1), o físico russo Dmitry Sergeevich Roschdestwensky (1876-1940) explicou a origem dos termos duplete e tripleto como sendo devidos à ação do campo magnético produzido pelo “caroço de elétrons” sobre os “elétrons de valência”, isto é, como uma espécie de “efeito Zeeman interno”. Com essa hipótese ele chegou a calcular a separação das primeiras linhas da “onda” p do Li.

Ainda no ano de 1922 aconteceu um fato muito importante para o entendimento da Espectroscopia Atômica, qual seja, a descoberta de espectros com mais de três linhas e não decorrentes de separação magnética, descoberta essa realizada, independentemente, pelo físico espanhol Miguel Antonio Catalán (1894-1957) (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 223A, p. 127) e por uma estudante de Paschen, Hilde Gieseler (*Annalen der Physik* 69, p. 147) ao estudarem, respectivamente, os espectros do Mg e do Cr. Para explicar esses multipletos (nome cunhado por Catalán), Sommerfeld esboçou um novo modelo atômico em trabalho publicado em 1923 (*Annalen der Physik* 70, p. 32), no qual considerou que o momento

angular total ( $\vec{J}$ ) de um átomo, era a composição vetorial entre o momento angular total ( $\vec{J}_0$ ) do átomo não-excitado e o momento angular ( $\vec{J}_1$ ) da excitação, sendo inteiros os números quânticos associados a esses dos momentos. No entanto, dificuldades com os átomos alcalis (Li, Na, etc.) levaram Sommerfeld a adicionar o momento angular proposto por Heisenberg para o “caroço de elétrons”, isto é,  $\hbar/2$ , tanto a  $\vec{J}_0$  quanto a  $\vec{J}_1$ .

Esse modelo vetorial atômico proposto por Sommerfeld foi retomado por Landé, ainda em 1923 (*Zeitschrift für Physik* 15, p. 189), porém com uma outra interpretação. Com efeito, para Landé o momento angular total ( $\vec{J}$ ) do átomo seria a soma vetorial entre o momento angular ( $\vec{K}$ ) dos “elétrons de valência” e o momento angular ( $\vec{R}$ ) do “caroço de elétrons”, ou seja:  $\vec{J} = \vec{K} + \vec{R}$ . De posse de “modelo vetorial”, Landé explicou o efeito Zeeman anômalo (EZA) supondo que, enquanto os vetores  $\vec{K}$  e  $\vec{R}$  precessionavam em torno de  $\vec{J}$ , este precessionava em torno do campo magnético externo  $\vec{H}$ . Assim, considerando que os números quânticos correspondentes aos três momentos angulares eram “números fracionários Heisenbergianos”, Landé deduziu uma nova expressão para o seu “fator de proporcionalidade” (g):  $g = 1 + \frac{K^2 + R^2 - J^2}{2J^2}$ . É importante registrar que, com o desenvolvimento da Mecânica Quântica, entre 1925 e 1926 (vide verbete nesta série), foi visto que o valor do fator de Landé que melhor se ajustaria aos resultados experimentais, seria aquele em que os quadrados dos números quânticos fossem substituídos pelo produto dele por ele próprio adicionado da unidade [por exemplo:  $j^2 = j(j+1)$ ].

Apesar do grande avanço alcançado pelo modelo vetorial atômico de Sommerfeld-Landé no sentido de explicar, quer o EZA, quer a estrutura de multipletos, novos resultados experimentais [como os “supermultipletos” observados nos espectros do néon (Ne) e dos alcalinos terrosos (berílio - Be, cálcio - Ca, Mg, etc.)] não conseguiam ser explicados por esse modelo. Em vista dessa dificuldade, esse modelo passou a ser questionado. Um dos primeiros questionamentos foi apresentado por Pauli, em dois trabalhos realizados em 1925 (*Zeitschrift für Physik* 31, pgs. 373; 765), nos quais tratou relativisticamente o elétron naquele modelo e, com isso, demonstrou que os componentes Zeeman deveriam depender do número atômico Z do átomo considerado. No entanto, tal dependência não era conhecida experimentalmente e nem foi confirmada posteriormente; em consequência disso, Pauli inferiu que o momento angular  $\vec{R}$ , atribuído ao “caroço de elétrons” por Landé, era devido a uma nova propriedade quanto-teórica do elétron e à qual denominou de *uma duplicidade não descritível classicamente*.

O exame do espectro de multipletos de átomos alcalis e alcalinos terrosos levou Pauli, nos dois trabalhos referidos acima, a formular o seu “modelo atômico” composto de quatro números quânticos para o elétron, assim distribuídos: o número quântico principal Bohriano (n), o número quântico azimutal Sommerfeldiano [ $n, (k)$ ] e dois números quânticos magnéticos ( $m_1$  e  $m_2$ ), sendo que, em alguns casos, eram considerados dois k ( $k_1$  e  $k_2$ ) e apenas um m ( $m_1$ ). De posse desse modelo, Pauli passou a examinar a Tabela Periódica dos Elementos e, na segunda parte do segundo trabalho de 1925, ele formulou o seu célebre princípio da exclusão: *Dois elétrons em um campo de força central nunca podem estar em estados de energia de ligação com os mesmos quatro números quânticos*. Então, baseado nesse princípio, Pauli conseguiu distribuir os elétrons nas diversas camadas eletrônicas (níveis K, L, M, N, ...) e, com isso, a uma primeira explicação daquela tabela foi então conseguida. Registre-se que o nome princípio da exclusão de Pauli foi cunhado pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) em 1926 (*Proceedings of the Royal Society of London* 112A, p. 661).

Nessa altura em que havia uma verdadeira disputa entre os modelos atômicos, o vetorial de Landé-Sommerfeld e o dos “quatro números quânticos” de Pauli, é que apareceu a idéia do spin do elétron, ou seja, a idéia de que o elétron possuía uma “rotação própria”. Aliás, é interessante ressaltar que a hipótese de o elétron possuir um “momento angular intrínseco” já havia sido sugerida por Compton, em 1921 (*Journal of the Franklin Institute* 192, p. 145), com o objetivo de explicar as propriedades magnéticas do metal, propriedades essas que decorreriam do momento magnético ( $\vec{\mu}$ ) do elétron associado ao “momento angular intrínseco”. Porém, para Compton, esse momento angular valia  $\hbar$ . No entanto, quem teve a idéia de usar esse “momento angular intrínseco” do elétron no sentido de explicar o EZA, bem como para explicar a estrutura de multipletos e supermultipletos, foi Krönig, no começo de 1925. Com efeito, para Krönig, o quarto número quântico proposto por Pauli nada mais era do que o momento angular próprio do elétron, que, contudo, valia  $\hbar/2$ . Ao discutir essa sua hipótese com Pauli, na presença de Landé, Pauli com a sua proverbial atitude de reagir quase sempre contra idéias novas (vide verbete nesta série), disse enfaticamente para Krönig: *Isto é, seguramente, uma idéia bastante inteligente, mas a Natureza não é assim* (Mehra e Rechenberg, op. cit.). Em vista dessa afirmativa, Krönig não publicou de imediato esse sua idéia, só vindo a fazê-lo, em 1926 (*Nature* 117, p. 550), quando Uhlenbeck e Goudsmit já haviam publicado, em 1925 (*Naturwissenschaften* 13, p. 953), seu famoso trabalho no qual

propuseram, como Krönig, associar o quarto número quântico de Pauli com uma “rotação intrínseca do elétron” (spin), e com essa hipótese explicaram vários resultados experimentais espectroscópicos, principalmente o EZA.

É oportuno registrar que a idéia de atribuir **spin** ao elétron foi apenas de Uhlenbeck ao raciocinar da seguinte maneira. Segundo Pauli, há quatro números quânticos caracterizando o elétron; então deve haver quatro graus de liberdade. Ora, como há três graus de liberdade de translação do elétron em torno do núcleo, então o quarto grau de liberdade só poderia ser devido a uma “rotação interna” do elétron, concluiu Uhlenbeck. Goudsmit, por sua vez, não concordava com essa hipótese pois admitia que o número quântico  $m_s$  (que considerou em substituição ao  $m_l$  de Pauli), deveria assumir apenas os valores  $+1/2$  e  $-1/2$ . Contudo, a hipótese do **spin** de Uhlenbeck explicava a razão pela qual o  $m_s$  de Goudsmit só poderia assumir os dois valores indicados acima.

A hipótese do **spin** do elétron foi um sucesso, pois ela esclareceu uma série de resultados experimentais da Espectroscopia Atômica. No entanto, permanecia ainda um mistério a resolver, qual seja, a presença do fator 2, quer na **razão giromagnética do elétron**, quer nos dupletos. A presença desse fator na fórmula do duplete surgiu em consequência de um cálculo feito por Uhlenbeck [usando o modelo do elétron apresentado pelo físico alemão Max Abraham (1875-1922), em 1902 (*Annalen der Physik* **10**, p. 105)] ao considerar, por sugestão do físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), um sistema de coordenadas no qual o elétron permanecia em repouso, enquanto o núcleo girava em torno do elétron. Todavia, o resultado experimental apresentava um valor que era a metade desse valor teórico. O mesmo fator 2 aparecia, conforme vimos anteriormente, na razão giromagnética do elétron, que os resultados experimentais indicavam ser  $e/m_e$ , isto é, duas vezes o valor clássico conhecido, qual seja:  $e/(2m_e)$ .

A explicação do fator 2 foi dada pelo físico inglês Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992), em 1926 (*Nature* **117**, p. 514), ao tratar relativisticamente o elétron em sua órbita em torno do núcleo. Em seu cálculo, Thomas observou que, de acordo com a Relatividade Einsteiniana, havia um erro ao se passar simplesmente de um sistema atômico formado pelo núcleo em repouso e o elétron em movimento, para um outro sistema atômico constituído do elétron em repouso e do núcleo em movimento. Para Thomas, o erro consistia em não se considerar a aceleração do elétron (ao se fazer a troca de referenciais indicada acima) no cálculo da frequência ( $\nu$ ) do elétron em sua órbita. Ao considerar essa aceleração, Thomas obteve um fator  $1/2$  na expressão da frequência do elétron – que passou a ser conhecida como a famosa **frequência (precessão) de Thomas** – que compensava o inoportuno fator 2 da fórmula do duplete e, conseqüentemente, explicando o resultado experimental. Em seu cálculo, Thomas considerou a razão giromagnética do elétron como sendo a observada experimentalmente ( $e/m_e$ ), por Einstein e pelo físico holandês Wander Johannes de Haas (1878-1960), em 1915 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **17**, p. 152). É interessante notar que, basicamente, a **precessão de Thomas** pode ser atribuída à diferença de tempo entre os referenciais de repouso do elétron e do núcleo, isto é, o tempo que um observador vê o elétron girando em torno do núcleo fixo, é diferente do tempo em que um outro observador vê o núcleo girando em torno do elétron fixo, devido à correção relativística temporal. [Robert Benjamin Leighton, **Principle of Modern Physics** (McGraw-Hill Book Company Inc., 1959).]

Em seqüência ao estudo da espectroscopia Zeeman e de multipletos que, conforme vimos acima, levou ao conceito de **spin** do elétron, houve o desenvolvimento da Mecânica Quântica, culminando com a famosa **equação de Schrödinger**, em 1926 (vide verbete nesta série). Como essa equação não considerava o “momento angular intrínseco” do elétron, vários físicos procuraram estender aquela equação no sentido de incluir (*ad hoc*) esse “momento angular”. Dentre esses físicos, destacam-se Pauli e o físico inglês Charles Galton Darwin (187-

1962). Com efeito, Pauli, em 1927 (*Zeitschrift für Physik* **43**, p. 601), considerou a **equação de Schrödinger** e tomou a função de onda ( $\Psi_s$ ) que nela aparece, como dependendo das coordenadas espaciais e de spin. Como o número quântico associado ao spin pode assumir dois valores ( $\pm 1/2$ ), conforme vimos acima, então Pauli teve que introduzir matrizes  $2 \times 2$ , as hoje famosas **matrizes de Pauli**. Darwin, por sua vez, interpretou a  $\Psi_s$  como um “vetor onda” do elétron, em um trabalho que realizou, também em 1927 (*Proceedings of the Royal Society of London* **115A**, p. 1), para explicar o EZA. Muito embora esses dois modelos dessem uma resposta razoável à interpretação quanto-mecânica do **spin**, falhavam, no entanto, ao tentar combiná-lo com a Relatividade Restrita Einsteiniana. Tal combinação só foi obtida por Dirac, em 1928, por intermédio de sua célebre **equação relativista do elétron** ou **equação de Dirac** (vide verbete nesta série).

Ao concluir este verbete, é oportuno salientar que a comprovação experimental do spin já havia sido obtida pelos físicos alemães Walther Gerlach (1899-1979) e Otto Stern (1888-1969; PNF, 1943), em 1922 (*Zeitschrift für Physik* **8**; **9**, pgs. 110; 349), ao realizarem uma experiência na qual observaram que um feixe de átomos de Ag, na forma de vapor, ao atravessar uma região de campo magnético variável, era separado em dois feixes. Naquela ocasião, esse resultado foi interpretado como sendo a comprovação experimental da hipótese (já referida anteriormente) da quantização espacial proposta por Sommerfeld, em 1916, uma vez que, segundo o modelo atômico de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld, o feixe original dos átomos de Ag deveria ser separado em dois feixes, sob a ação da força  $\mu_z (\partial \vec{H} / \partial z)$ , onde  $\mu_z$  é o componente do momento magnético ( $\vec{\mu}$ ) do elétron na direção de  $\vec{H}$ , uma vez que  $\mu_z$  só poderia ser paralelo ou anti-paralelo a  $\vec{H}$ . Com o advento da Mecânica Quântica mostrou-se que o momento magnético ( $\vec{\mu}$ ) e o spin ( $\vec{S}$ ) tem a mesma direção e, desse modo, a experiência de Stern-Gerlach passou a representar a comprovação experimental do spin do elétron (Mehra e Rechenberg, op. cit.; Leighton, op. cit.).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)