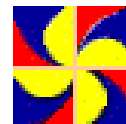




CURIOSIDADES DA FÍSICA
José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br



CADEIA DE COGNIÇÃO DA FÍSICA DO MICROMUNDO

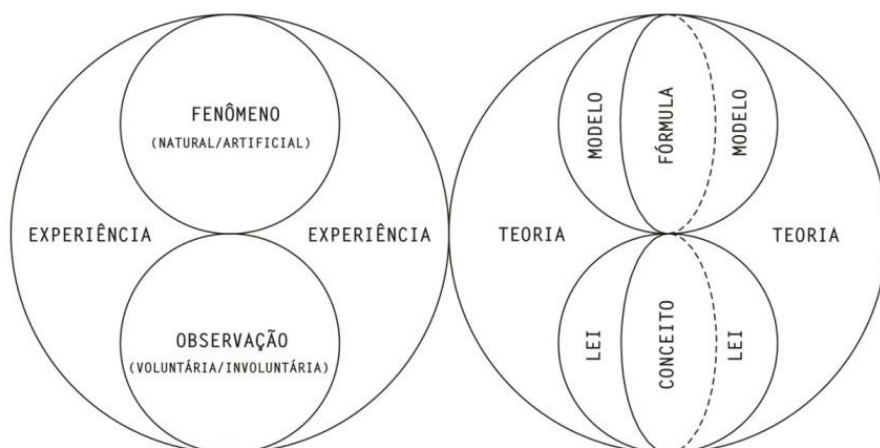
[NOTA: A Introdução desse artigo é a mesma do artigo anterior sobre a Física do Macromundo. Quem já leu o artigo anterior pode passar direto para o trecho seguinte sobre os Modelos Atômicos.]

INTRODUÇÃO

Neste artigo tentaremos mostrar como se desenvolve o conhecimento da Física e, para isso, utilizaremos uma **Cadeia de Cognição** (CC), pois, segundo o físico russo Leonid Ivanovich Ponomarev (n.1937) [**In Quest of the Quantum** (Mir Publishers, 1974)], ela é a base de todo aquele conhecimento. São conhecidos vários aspectos da CC como, por exemplo, os apresentados pelos físicos e filósofos da ciência, dentre os quais, destacamos: 1) o argentino Mario Augusto Bunge (n.1919) [**Foundations of Physics** (Springer-Verlag, NY, 1967); **Philosophy of Physics** (D. Reidel Publishing and Company; Edições 70, 1973); **Teoria e Realidade** (Editora Perspectiva/Debates, 1974)]; 2) o austríaco Paul Karl Feyerabend (1924-1994) [**Contra o Método** (Editora Francisco Alves, 1975); **Diálogos Sobre o Conhecimento** (Perspectiva, 2001); **Adeus à Razão** (EdUNESP, 2001)]; 3) o húngaro Imre Lakatos (1922-1974) [**A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento Científico** (Cultrix/EdUSP, 1979)]; 4) o franco-brasileiro Pierre Henri Lucie (1917-1985) [**A Gênese do Método Científico** (Editora Campus, 1977)]; 5) o nipo-brasileiro Jun'ichi Osada [**A Evolução das Ideias da Física** (Editora Edgard Blücher/EdUSP, 1972)]; 6) o brasileiro Antonio S. T. Pires [**Evolução das Ideias da Física** (Editora Livraria da Física, 2008)]; e 7) o português José Tito Mendonça (n.1945) [**Uma Biografia da Luz** (Livraria da Física, 2015)].

No entanto, para este texto, usaremos a CC proposta por Ponomarev, aqui um pouco mais elaborada e sintetizada na figura abaixo. Para a explicação da CC serão usados exemplos físicos. Contudo, achamos que ela poderá ser mais aprimorada na medida em que o conhecimento físico-filosófico for evoluindo.

CADEIA DE COGNIÇÃO DA FÍSICA



Segundo os físicos brasileiros Mauro Sérgio Dorsa Cattani (n.1942) e Normando Celso Fernandes (1936-2014) (*Informação Particular*, 1975), o estudo da Física é feito por intermédio de um encadeamento em que se misturam fatos novos com os já conhecidos e leis novas com as já estabelecidas. Nesse encadeamento, velhas leis são utilizadas na descrição de fatos novos ou mesmo na ampliação dos já estudados. Quando as leis conhecidas são insuficientes para a descrição de novos fenômenos físicos, novas leis deverão ser formuladas. É claro que deveremos constantemente criticar, tanto os elos quanto à própria CC, seguindo os trabalhos dos físicos e filósofos da ciência (cada um a sua maneira), como veremos no decorrer deste artigo.

Inicialmente, diremos que o tangenciamento mútuo (correlacionamento) entre os círculos que compõem a CC representa a influência recíproca entre os juízos indicados em cada círculo, na concepção de que não existe um sentido preferencial para passarmos de um círculo a outro, ou seja, de que não existe uma relação de causalidade entre eles.

O contato entre o círculo da **teoria** e o da **experiência** possui um sentido mais amplo do que o referido antes, pois, além de indicar que toda **teoria** [**modelo teórico**, para Bunge (op. cit.) ou **programa de pesquisa** para Lakatos (op. cit.)] deverá ser testada experimentalmente e que nenhuma **experiência** pode ser planejada e interpretada sem o recurso da teoria [Feyerabend (op. cit.)]. Tal contacto indica ainda a existência de uma **relação de complementaridade** (RC) entre os círculos, pois que o conhecimento de um só se completa com o conhecimento do

outro. Aliás, essa RC deve ser aplicada a todos os círculos da CC. Em suma, como afirma Feyerabend (op. cit.), o aprendizado da Física não se desenvolve da **experiência** para a **teoria**, e nem desta para a primeira, mas sempre envolve as duas, ou seja: sempre existe um correlacionamento entre elas.

Antes de detalharmos o conteúdo de cada círculo, cremos ser oportuno fazer um comentário. Há cerca de 2,5 milhões de anos, os hominídeos começaram a evoluir transformando-se no HOMEM atual [Leakey, R. E. e Lewin, R. **Origens** (Edições Melhoramentos/EdUnB, 1981)]. As observações iniciais, tanto no Céu, quanto na Terra, realizada pelo HOMEM, não fazia a distinção entre a **qualidade** e a **quantidade** do que observava. Essa distinção começou a ser realizada quando o HOMEM começou a desenvolver as invenções [Sedgwick, W. T., Tyler, H. W. e Bigelow, R. P. **A História da Ciência** (Editora Globo, 1950); de Bono, E. **Eureka! Uma História das Invenções** (Editorial Labor do Brasil S.A., 1975); Solla Price, D. de, **A Ciência desde a Babilônia** (Editora Itatiaia Ltd./EdUSP, 1976); Bronowski, J. **A Escalada do Homem** (Martins Fontes/EdUnB, 1976); Ronan, C. A. **História Ilustrada da Ciência I, II, III** (Jorge Zahar Editor, 1987); Philbin, T. **As 100 Maiores Invenções da História** (DIFEL, 2006); Challoner, J. (Editor). **1001 Invenções que Mudaram o Mundo** (Sextante, 2010)] (basicamente: **dispositivos** decorrentes da extensão dos sentidos, e **modelos**, oriundos do pensamento) e, com isso, a **qualidade** deu origem (*grosso modo* e em nosso entendimento), ao círculo da **experiência** e, a **quantidade**, ao da **teoria**. Porém, na medida em que o conhecimento da Física foi evoluindo, as **descobertas** e as **invenções** foram se correlacionando, de modo que elas passam de um círculo para outro, ou mesmo, ambas existindo no mesmo círculo. Essa correlação é o objetivo central deste texto. Vejamos se conseguiremos realizá-lo.

Assim, iniciemos os detalhamentos do conteúdo de cada círculo. O da **experiência** que, como mostra a figura, contém dois outros círculos: **observação** e **fenômeno**. Segundo nos fala o filósofo austríaco Sir Karl Raymund Popper (1902-1994) [**O Conhecimento Objetivo** (Editora Itatiaia/EdUSP, 1975)], a **observação** (O) pode ser: **voluntária** (OV) e **involuntária** (OI). A OV ocorre quando o **observador** analisa certo **fenômeno** (*natural* e/ou *artificial*) dentro de seu **horizonte de expectativas** (HE) que se constitui na soma total de suas expectativas conscientes ou sub(in)conscientes. Por exemplo, nas experiências diárias realizadas em laboratórios de pesquisas ou mesmo didáticos (hoje, muitas destas são realizadas usando computadores e os aplicativos computacionais, disponíveis na INTERNET) vários resultados são

reproduzidos constantemente ou novos resultados esperados são conseguidos. Por outro lado, a OV poderá não corresponder ao HE de quem a observa, o que ocorrerá quando um resultado novo não esperado for conseguido e, neste caso, diremos que houve uma OI, também conhecida como **descoberta acidental** ou **serendipidade**. Registre-se que este nome deriva de uma estória que é contada em versões diferentes de acordo com o narrador. Neste artigo, usaremos a versão do patologista australiano William Ian Beardmore Beveridge (1908-2006) [**Sementes da Descoberta Científica** (T. A. Queiroz Editor/EdUSP, 1981)]. Segundo esse autor, a palavra **serendipidade** (“serendipity”) foi inventada pelo escritor inglês Horace Walpole (Conde de Orford) (1717-1797), em 28 de janeiro de 1754, em carta que escreveu a um amigo, para representar as descobertas **acidentais**. Para tal, ele se baseou em um conto persa de fadas: - *A Princesa de Serendip, antigo nome do Ceilão* (hoje: Sri Lanka), *tinha três príncipes pretendentes e a cada um incumbiu uma tarefa impossível: fracassaram todos os três, mas, no decorrer de seus heroicos esforços, cada qual, no entanto, fez descobertas afortunadas e inesperadas, por mero acidente.*

Por sua vez, o círculo da **teoria** é composto de dois outros círculos: **lei** e **modelo**, caracterizados, respectivamente por **conceito** e **fórmula**. Não tentaremos definir estes dois termos, pois eles envolvem uma longa discussão físico-filosófica. Apenas vamos apresentá-los por intermédio de exemplos físicos. Muito embora a **fórmula** possa ser representada por intermédio de uma expressão matemática, o **conceito** é muito mais complexo, já que ele evolui com o tempo. Assim, usaremos para o **conceito** a classificação de Bunge (op. cit.) que diz que ele pode ser **formal** (decorrente do círculo da **teoria**) e **factual** (decorrente do círculo da **experiência**). Para compor este texto, usaremos exemplos físicos envolvendo o **Micromundo**, sendo este descrito por **Modelos Atômicos**.

1. MODELOS ATÔMICOS

1. 1. Os Primeiros Modelos Atômicos

Muito embora os filósofos gregos, Leucipo de Mileto (c.460-c.370) e seu discípulo Demócrito de Abdera (c.470-c.380), hajam proposto a ideia de **átomo** como componente último da matéria, por volta de 400 a. C., a primeira tentativa de apresentar um modelo para explicar esse “elemento eterno, indivisível e imperecível” dos gregos antigos, só foi

apresentada pelo físico francês André Marie Ampère (1775-1836), em 1814 (*Annales de Chimie* **90**, p. 43), ao supor que os átomos eram constituídos de partículas menores (subatômicas), que giravam em torno de um centro, constituindo as famosas **correntes amperianas**. Com essa ideia, Ampère pretendia explicar o elemento químico proposto pelo físico e químico inglês Robert Boyle (1627-1691), em 1661. Mais tarde, em 1828, o físico e filósofo alemão Gustav Theodor Fechner (1801-1887) propôs que o “átomo” consistia de uma parte central massiva que atraía gravitacionalmente uma nuvem de partículas quase imponderáveis.

Um primeiro **modelo eletrodinâmico** para o átomo foi proposto pelo físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) como consequência de suas pesquisas sobre o eletromagnetismo. Com efeito, em 1862 e 1871, ele apresentou uma modificação do “átomo fechneriano” ao supor que a parte central desse “átomo” era eletrizada com um determinado sinal e que cargas elétricas de sinais opostos orbitavam em torno dessa parte central de acordo com a lei da força que propusera em 1846, na primeira de suas famosas publicações denominadas **Elektrodynamische Maassbestimmungen** (“Medidas Eletrodinâmicas”), lei essa dada pela seguinte expressão: $F = (e_1 e_2 / r^2) \{1 - (1 - c^2) [(dr/dt)^2 - 2r (d^2r/dt^2)]\}$, onde dr/dt e d^2r/dt^2 representam, respectivamente, a velocidade e a aceleração radiais relativas entre as cargas elétricas e_1 e e_2 , e c é uma constante que expressa a relação entre as unidades eletrostática e eletrodinâmica daquelas cargas. Nessa expressão, o termo dominante ($e_1 e_2 / r^2$) representa a **força eletrostática coulombiana** [proposta pelo físico francês Charles Augustus Coulomb (1736-1806), em 1785 (*Mémoires de l'Académie des Sciences, Paris*, p. 488)], e os demais termos modificam essa força na medida em que as cargas elétricas apresentam um movimento relativo. Usando esse modelo, Weber chegou a um resultado muito importante: - *Duas cargas de mesmo sinal nem sempre se repelem. Caso estejam muito próximas uma da outra elas podem se atrair! Com isto era possível em seu modelo prever e explicar a estabilidade de um núcleo composto apenas de cargas positivas, com as cargas negativas orbitando ao redor deste núcleo.* Desse modo, vê-se que a **força de Weber** dá uma explicação natural para as forças nucleares, explicando a estabilidade dos núcleos utilizando apenas uma força eletromagnética clássica [Torres de Assis, A. K. **Weber's Electrodynamics** (Kluwer, 1994; EDUNICAMP, 1995); Torres de Assis, A. K. and Hernandez, J. A. **The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges Resistive Conductors Carrying Steady Currents** (Apeiron, 2007)].

1.2. Modelos de Lorentz e Thomson

A partir de 1880, o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) começou a elaborar um novo **modelo atômico eletrodinâmico** para a matéria, segundo o qual os “elétrons” (que para ele significava qualquer partícula carregada, positivamente ou negativamente, com ou sem massa) eram distribuídos no interior da matéria e livres de oscilarem com certa frequência própria em torno de posições fixas. Esse modelo foi por ele usado para o desenvolvimento de sua **Teoria do Elétron**, a partir de 1892 (*Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* **25**, p.363), e que lhe permitiu explicar a dispersão da luz, bem como prever o **Efeito Zeeman** (EfZ) (considerado como **normal**) como que representa a separação das linhas espectrais do hidrogênio (H) pela ação de um campo magnético (**H**) e observado pelo físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943; PNF, 1902), em 1896 (*Verhandlungen der Physikalische Gesellschaft zu Berlin* **7**, p. 128), e calculado pelo físico inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1897 (*Philosophical Magazine* **44**, p. 503) e por Lorentz, também em 1897 (*Annales de Physique* **63**, p. 278). No entanto, esse modelo atômico lorentziano apresentava dificuldade para estudar o espalhamento dos **raios-X** [estes haviam sido descobertos, em 1895 (*Sitzungsberichte der Würzburger Physikalische-Medicinischen Gesellschaft* p. 132), pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923; PNF, 1901)] pela matéria. Para contornar essa dificuldade, o físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), em 1899, começou a desenvolver um modelo para o átomo, considerando-o como composto de um grande número de “corpúsculos” carregados negativamente [“corpúsculos” (mais tarde reconhecidos como **elétrons**) para os quais ele havia determinado a relação entre a carga (e) e a massa (m), em 1897 (*Philosophical Magazine* **44**, p. 295)], e “alguma” carga positiva que contrabalançasse a carga negativa total. Logo depois, em 1904, Thomson elaborou um novo **modelo atômico** para poder explicar aquele espalhamento. Vejamos qual.

Para Thomson, o átomo era considerado como sendo constituído por uma carga elétrica positiva, homoganeamente distribuída na forma de uma esfera de raio da ordem de 1 \AA ($\text{angström} = 10^{-8} \text{ cm}$), e movendo-se no seu interior, em anéis concêntricos, um certo número de elétrons de modo a manter o átomo neutro. Além disso, cada elétron de carga (e) e massa (m) era considerado ligado ao centro do átomo e oscilando amortecidamente com frequência angular própria (ω_0),

configuração que essa que lhe valeu a denominação de “pudim de ameixas”, nome esse que é inadequado pois, no “pudim”, o número de ameixas é distribuído aleatoriamente, enquanto no modelo Thomsiano os elétrons são distribuídos uniformemente em anéis concêntricos para que fossem satisfeitas as condições de estabilidade que assegurassem o equilíbrio, postulando ainda que o número desses anéis fosse mínimo. [Francisco Caruso e Vitor Oguri, **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos** (Elsevier/Campus, 2006; LTC, 2016)].

Com esse modelo, Thomson conseguiu explicar o **espalhamento Rayleigh** [estudado pelo físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), em 1871 (*Philosophical Magazine* **41**, p. 107)]; o espalhamento dos **raios-X** pela matéria – logo conhecido como **espalhamento Thomson** -; e o **espalhamento ressonante** que se relaciona com a **luminescência** (re-emissão de radiação luminosa por parte de alguns corpos quando iluminados por radiação eletromagnética). É oportuno registrar que a **seção de choque de espalhamento** (σ_s), que define esses tipos de espalhamento, é calculada relacionando-se a potência média da radiação devida à oscilação amortecida do elétron [obtida por Larmor, em 1897 (op. cit.)] à intensidade média da radiação incidente de frequência ω [demonstrada pelo físico inglês John Henry Poynting (1852-1914), em 1884 (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **175**, p. 343)]. Esses **espalhamentos** são dados pelas seguintes expressões:

$$\sigma_s = [32 \pi (r_0)^2/3] \times \{\omega^4 / [(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (g \omega)^2]\}; \quad r_0 = \{e^2 / [8 \pi \epsilon_0 m c^2]\},$$

onde r_0 é o **raio clássico do elétron**, ϵ_0 é a **permissividade elétrica do vácuo**, g é o **coeficiente de amortecimento**, e c é a **velocidade da luz no vácuo**. É interessante ressaltar que, segundo a expressão acima, as **seções de choque de espalhamento** para os três tipos de espalhamento referidos acima são dadas por:

$$\sigma_R \approx [32 \pi (r_0)^2/3] \times (\omega / \omega_0)^4 \quad (\text{Espalhamento Rayleigh: } \omega \ll \omega_0),$$

$$\sigma_T \approx 32 \pi (r_0)^2/3 \quad (\text{Espalhamento Thomson: } \omega \gg \omega_0),$$

$$\sigma_{\text{Res}} \approx (\omega_0 r_0 / g) \text{ (*Espalhamento Ressonante*: } \omega \approx \omega_0 \text{)}.$$

1.3. Modelo Saturniano: Perrin e Nagaoka

Em 1901 (*Revue Scientifique* **15**, p. 449), o físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926) propôs um **modelo atômico**, segundo o qual os elétrons 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 ($A\ell$) devido ao **efeito fotoelétrico** (ver verbete nesta série). Se tal ocorresse, observou Perrin, a frequência de revolução dos elétrons era da ordem das frequências ópticas das raias espectrais. Ainda para Perrin, as instabilidades das órbitas eletrônicas de seu modelo eram as responsáveis pelos fenômenos da **radioatividade**, que havia sido descoberta pelo francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903), em 1896 (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Séances de l'Académie des Sciences* **112**, p. 420).

A ideia desse modelo de Perrin foi retomada, em 1904 (*Nature* **69**, p. 392; *Philosophical Magazine* **7**, p. 445), pelo físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) ao propor um outro **modelo atômico**, segundo o qual o átomo era formado por uma parte central carregada positivamente e rodeada de anéis de elétrons deslocando-se com a mesma velocidade angular, um sistema semelhante ao planeta Saturno, com seus anéis, razão pela qual esse modelo de Nagaoka ficou conhecido como **modelo saturniano**. Com esse modelo, Nagaoka procurava explicar as raias espectrais, bem como as emissões radioativas: **alfa** (α) e **beta** (β). Com efeito, para ele, as oscilações perpendiculares ao plano do movimento dos anéis resultavam no espectro “tipo banda” (contínuo), enquanto as oscilações paralelas àquele plano resultavam num espectro “tipo raia” (discreto). Por outro lado, a quebra de um desses anéis provocava a **emissão (decaimento) beta**. É oportuno notar que a **emissão de beta** β [junto com a **emissão de alfa** (α)] havia sido observada pelo físico neozelandês-inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908), em 1898 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **9**, p. 401), e que em 1899 em trabalhos independentes, de Becquerel (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Séances de l'Académie des Sciences* **129**, p. 996) e dos físicos, os austríacos Stefan Meyer (1872-1949) e Egon Ritter von Schweidler (1873-1948) (*Physikalische Zeitschrift* **1**, p. 113), e o alemão Frederick Otto Giesel (1852-1927) (*Annalen der Physik* **69**, p. 834), ao observaram a deflexão magnética sofrida por essas partículas. Em 1900 (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Séances de*

l'Académie des Sciences **130**, p. 809), Becquerel mostrou que os raios β eram *raios catódicos*, isto é, **elétrons**. Ainda em 1900 (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Séances de l'Académie des Sciences* **130**, p. 1010; 1178), o físico francês Paul Villard (1860-1934) observou que a **radioatividade** possuía uma terceira parcela que não era defletida pelo campo magnético, parcela essa penetrante e semelhante aos **raios-X**, à qual Rutherford denominou de **gama** (γ). Essa descoberta foi confirmada por Becquerel, também em 1900 (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Séances de l'Académie des Sciences* **130**, p. 1154).

Uma das grandes dificuldades enfrentadas pelos modelos de Thomson e de Perrin-Nagaoka era o de saber o número de elétrons em cada anel, além, é claro, de explicar a sua estabilidade em virtude da **Radiação Larmoniana** (RL) [emissão de radiação por parte de um elétron acelerado conforme demonstrou Larmor, em 1897 (op. cit.)]. Note-se que antes de esses modelos serem formalmente apresentados, já existia uma dificuldade em conhecer o número de elétrons e de sua correspondente distribuição no interior de um átomo. Por exemplo, em 1902 (*Transactions of the Royal Society of Canada* **8**, p. 79), Rutherford escreveu: - *O átomo de hidrogênio (H) é uma estrutura muito complicada constituída, possivelmente, de mil ou mais elétrons*. Ora, como esse elemento é o primeiro da *Tabela Periódica*, podemos imaginar que a dificuldade aumentava para os demais elementos dessa Tabela. Essa mesma dificuldade foi enfrentada por Thomson em seu modelo ("pudim de ameixas") formulado em 1903 (*Philosophical Magazine* **6**, p. 673) e 1904 (*Philosophical Magazine* **7**, p. 237; *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **13**, p. 39). Apesar de conhecer a RL e, portanto, que ela levaria ao colapso o seu modelo, Thomson discutiu a estabilidade de seu sistema apenas do ponto de vista dinâmico. Contudo, o número de elétrons do átomo (H) ainda permanecia um problema para Thomson, conforme se pode ver em seu livro intitulado **Electricity and Matter** ("Eletricidade e Matéria"), publicado em 1904 (Scribner, New York), no qual escreveu: - *O átomo de hidrogênio contém cerca de mil elétrons*. Entretanto, na segunda edição (a primeira foi em 1903) de seu livro **Conduction of Electricity through Gases** ("Condução de Eletricidade através de Gases"), publicado em 1906 (Cambridge University Press), Thomson mudou de opinião ao afirmar o seguinte: - *O número de elétrons*

em um átomo situa-se entre 0,2 e 2 vezes o peso atômico de uma substância. Para o hidrogênio esse número não pode diferir muito da unidade. Aliás, ainda nesse livro, Thomson escreveu: - *As linhas espectrais não são devidas às vibrações de corpúsculos (isto é, elétrons) no interior do átomo, mas sim devido às vibrações de corpúsculos em consequência de um campo de forças exterior ao átomo.* É oportuno esclarecer que na distribuição eletrônica de seu modelo, Thomson usou uma analogia com os resultados da experiência realizada pelo físico norte-americano Alfred Marshall Mayer (1836-1897), em 1878 (*Philosophical Magazine* **5**, p. 397) e 1879 (*Philosophical Magazine* **7**, p. 98), na qual mostrou como pequenos polos magnéticos se orientam na presença de um campo magnético intenso [Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951); **The Modern Theories (1900-1926)** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1953); Jadish Mehra e Helmut Rechenberg, **The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1** (Springer Verlag, 1982); Abraham Pais, **Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World** (Oxford University Press, 1995); Caruso e Oguri (op. cit.)].

1.4. Modelo Planetário de Rutherford

A grande dificuldade dos **modelos atômicos de Thomson, Perrin e Nagaoka**, formulados entre 1899 e 1904 (ver **1.3.**), surgiu quando o físico neozelandês-inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) e seus colaboradores, os físicos, o alemão Hans (Joahannes) Wilhelm Geiger (1882-1945) e o inglês Ernst Marsden (1889-1970), começaram a estudar o espalhamento de partículas α pela matéria. De fato, em 1906 (*Philosophical Magazine* **11**, p. 166; **12**, p.134), Rutherford apresentou os resultados de experiências nas quais observou um pequeno espalhamento (desvio de aproximadamente 2^0) de partículas α ao passarem através de uma lâmina de mica de 0,003 cm de espessura. Em 1908 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A81**, p. 174), Geiger estudou o espalhamento de um feixe de partículas α , oriundo de um composto de rádio, o brometo de rádio (RaBr_2), através de uma lâmina fina de metal [alumínio (Al) e ouro (Au)]. As partículas α espalhadas eram detectadas em contadores de cintilações. Usando essa técnica de contagem, Geiger e Marsden, em 1909 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A82**, p. 495), estudaram o espalhamento de um feixe de partículas α [oriundas do radônio (Rn)],

através de uma lâmina fina de metal. Nesse estudo, eles observaram que do feixe, não muito bem colimado e contendo cerca de 8.000 daquelas partículas, apenas uma delas era refletida, ou seja, era espalhada num ângulo $> 90^\circ$. Este tipo de espalhamento foi também comentado por Geiger, em 1910 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A83**, p. 492).

Muito embora, em 1910, Thomson tenha usado seu modelo para explicar (sem êxito) os resultados das experiências de Geiger e Marsden, os mesmos só foram interpretados por Rutherford, em 1911 (*Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* **55**, p. 18; *Philosophical Magazine* **5**, p. 576; **21**, p. 669), ao propor seu célebre **modelo planetário do átomo**, decorrente da fórmula que deduziu para o espalhamento de partículas (α ou β) pela matéria – **fórmula do espalhamento de Rutherford** (em notação atual):

$$y = [(n t)/2] \times \{[Z^2 (e E)^2 Q]/(m^2 u^4 r^2)\} \times \text{cosec}^4 (\varphi/2).$$

onde y expressa o número de partículas espalhadas sobre a unidade de área de um anteparo (“screen”) colocado a uma distância r da fonte espalhadora e num ângulo φ medido a partir da direção das partículas incidentes; n e t denotam, respectivamente, o número de átomos na unidade de volume da lâmina alvo e sua espessura; m , u e Q representam, respectivamente, a massa, a velocidade e o número total de partículas incidentes; Z a carga elétrica do núcleo do átomo que compõe a lâmina alvo; E a carga elétrica das partículas incidentes ($E = 2e$, para a α e $E = e$, para a β); sendo e a carga elétrica do **elétron**. É interessante observar que, para a dedução dessa célebre fórmula, Rutherford contou com a colaboração de seu genro, o matemático inglês Ralph Howard Fowler (1889-1944).

Apesar da formulação desse **modelo planetário Rutherfordiano**, o **modelo saturniano de Perrin-Nagaoka** ainda foi utilizado pelo físico inglês John William Nicholson (1881-1955) em suas pesquisas sobre as raias espectrais cósmicas. Com efeito, em 1911 (*Philosophical Magazine* **22**, p. 864; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **72**; p. 139) e em 1912 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **72**; p. 676; 677; 693), Nicholson desenvolveu um novo **modelo atômico saturniano**. Contudo, para deter a RL decorrente do movimento dos elétrons em seus anéis, Nicholson considerou nula a soma vetorial das acelerações desses elétrons, e que seus momentos angulares deveriam variar discretamente e em quantidades proporcionais à

constante de Planck (h). Com esse novo **modelo saturniano**, Nicholson explicou que as raias espectrais eram devidas às pequenas vibrações dos anéis eletrônicos dos átomos primários que, em seu entendimento, eram de três tipos: **coronium**, contendo dois elétrons; **hidrogênio**, com três elétrons; e **nebulium**, com quatro elétrons. Para Nicholson, o **hélio** era considerado um elemento composto. Mais tarde, mostrou-se que o **nebulium** nada mais era do que uma mistura metaestável de oxigênio (O) e nitrogênio (N), e que o **coronium** é o ferro (Fe) altamente ionizado.

1.5. Modelo Atômico de Bohr

Para contornar as dificuldades dos **modelos atômicos** conhecidos até então (“pudim de ameixas”, saturniano e planetário), o físico dinamarquês Niels Hendrik Bohr (1885-1962; PNF, 1922), em três artigos publicados em 1913 (*Philosophical Magazine* **26**, p. 1; 476; 857), formulou seu **modelo atômico quântico** baseado em dois postulados:

Primeiro – A energia (W) de cada elétron em uma configuração estacionária é dada por $W = \omega \tau h/2$, onde ω é a frequência de revolução (angular) do elétron, τ é um número inteiro, e h é a **constante de Planck**;

Segundo – A passagem dos sistemas entre diferentes configurações estacionárias é seguida pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a sua frequência (ν) (ou comprimento de onda λ) e a quantidade de energia emitida ($W_{\tau_2} - W_{\tau_1}$) é dada por: $W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h \nu$.

De posse desses dois postulados, apresentados em seu primeiro artigo (julho de 1913), então Bohr passou a deduzir a fórmula empírica de **Balmer-Rydberg-Schuster** e que foi deduzida pelo matemático e físico suíço Johann Jakob Balmer (1825-1898), em 1885 (*Verhandlungen der Naturforscher Gesellschaft zu Band 7*, p. 548), e complementada pelos físicos, o sueco Johannes Robert Rydberg (1854-1919), em 1890 (*Philosophical Magazine* **29**, p. 331) e 1896 (*Annalen der Physik* **58**; p. 674), e o germano-inglês Sir Arthur Schuster (1851-1934), em 1897 (*Nature* **55**, p. 200; 223)], cuja expressão final é dada por:

$$1/\lambda = \nu/c = R \{1/[(\tau_2)^2] - 1/[(\tau_1)^2]\},$$

sendo $\tau_1 = \tau_2 + 1, \tau_2 + 2, \dots$ e c a **velocidade da luz no vácuo**], com a **constante de Rydberg** R , usada pelos espectroscopistas, escrita em termos da massa de repouso m e da carga elétrica e do **elétron**, da **constante de Planck** h e da carga E do núcleo (número atômico) rutherfordiano, ou seja: $R = 2 \pi^2 m e^2 E^2 / (c h^2)$.

Para a energia W e o raio (a) das órbitas dos elétrons, Bohr obteve, respectivamente:

$$W = (2 \pi^2 m e^2) E^2 / (\tau^2 h^2); 2 a = [h^2 / (2 \pi^2 m e)] (\tau^2 / E),$$

expressões essas que estão todas no sistema CGS.

Usando as expressões acima para o átomo de hidrogênio ($E = e$), Bohr observou que havia um bom acordo entre o seu modelo e alguns resultados experimentais até então conhecidos. Assim, de posse do valor de e medido pelo físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF, 1923), em 1912 (*Transactions of the American Electrochemical Society* **21**, p. 185) e 1913 (*Physical Review* **2**, p. 139); do valor de e/m medido pelo físico alemão Alfred Heinrich Bucherer (1863-1927), também em 1912 (*Annalen der Physik* **37**, p. 597); e do valor de h proposto pelo físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918), em 1900 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **2**, p. 237), Bohr obteve os seguintes resultados:

1) **Raio da primeira órbita** ($\tau = 1$) (**Raio de Bohr**):

$$a_0 = h^2 / (2 \pi^2 m e^2) = 1,1 \times 10^{-8} \text{ cm};$$

2) **Constante de Rydberg**

$$c R = 3,10 \times 10^{15} \text{ s}^{-1};$$

sendo $c R = 3,29 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ o valor experimental usado pelos espectroscopistas.

Note-se que, logo depois, usando o valor experimental de h medido, em 1913 (*Annalen der Physik* **40**, p. 611), pelos físicos alemães Emil Gabriel Warburg (1846-1931), G. Leitnäuser, E. Hupka e C. Müller, Bohr obteve um novo valor para R :

$$c R = 3,26 \times 10^{15} \text{ s}^{-1};$$

3) **Energia da primeira órbita**:

$$W_0 = (2 \pi^2 m e^3 / h^2) = 13 \text{ eV.}$$

Além do mais, Bohr observou que se na expressão que deduzira para a frequência ν se fizesse $\tau_2 = 2$, ela reproduziria a **série de Balmer** (1885); para $\tau_2 = 3$, teríamos a **série de Paschen** [obtida físico alemão Louis Carl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947), em 1908 (*Annales de Physique Leipzig* **27**, p. 537)]. Afirmou mais ainda que: - Se $\tau_2 = 1$ e $\tau_2 = 4, 5, \dots$ obteremos séries situadas, respectivamente, no extremo ultravioleta e no extremo infravermelho, séries ainda não observadas, mas cuja existência deve esperar-se. É oportuno registrar que tais séries foram encontradas: **série de Lyman** [pelo físico norte-americano Theodore Lyman (1874-1954), em 1914 (*Physical Review* **3**, p. 504)], na região ultravioleta; **série de Brackett** [pelo físico norte-americano Frederick Sumner Brackett (1896-1972), em 1922 (*Nature* **109**, p. 209)] e **série de Pfund** [pelo físico norte-americano August Herman Pfund (1879-1949), em 1924 (*Journal of the Optical Society of America* **9**, p. 193)], na região infravermelha. Destaque-se ainda que, com esse modelo, Bohr resolveu também a polêmica que havia sobre a **série de Pickering-Fowler** ao mostrar, por intermédio da expressão que deduzira para $1/\lambda$ (ver expressão acima), que tal série era devido ao hélio ionizado (He^+), uma vez que a mesma poderia ser obtida fazendo nessa expressão: $E = 2$. Note-se que essa série deve-se ao trabalho do físico e astrônomo norte-americano Edward Charles Pickering (1846-1919), em 1896 (*Astrophysical Journal* **4**, p. 369), no qual descreveu as experiências que realizou com o espectro de raios de algumas estrelas, entre elas a ζ -Puppis, raios essas que apresentavam um aspecto curioso: elas praticamente coincidiam com as **séries de Balmer**, apenas de maneira alternada, isto é, a primeira **série de Balmer** (H_α) praticamente coincidia com a primeira **série de Pickering**, no entanto a segunda de Balmer (H_β) só correspondia à terceira de Pickering, e assim sucessivamente. Registre-se que essas séries foram redescobertas pelo físico inglês Alfred Fowler (1868-1940), em 1912 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **73**, p. 62), usando uma mistura de hidrogênio (H) e hélio (He).

É interessante notar que, ainda no primeiro artigo de sua trilogia (reunida no livro: Niels Bohr, **Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas** (Fundação Calouste Gulbenkian, 1989), além das demonstrações indicadas acima, Bohr também demonstrou que, se o momento angular (L) de um elétron em movimento circular (de raio a) em torno do núcleo de um átomo, tivesse o valor dado por $L = \tau L_0$, com $L_0 =$

$h/2\pi = 1,04 \times 10^{-27}$ erg.s, a energia desse elétron seria estacionária, isto é, o elétron estaria em um **estado quântico** de energia bem definida. Aliás, registre-se que a “quantização do momento angular” já havia sido sugerida por Nicholson, em 1911 e 1912, em seus trabalhos nos quais desenvolveu seu modelo atômico “tipo saturniano”, isto é: um caroço central carregado positivamente rodeado de anéis eletrônicos (ver item 1.4.).

1.6. Modelo Atômico de Bohr-Wilson-Ishiwara-Sommerfeld

Apesar dos êxitos do **Modelo Atômico de Bohr** (MAB) (êxitos estes descritos acima), tal modelo não foi capaz de explicar alguns resultados experimentais então conhecidos como, por exemplo, a separação (“*split*”) das linhas espectrais ópticas do hidrogênio (H), quer pelo uso de espectroscópios de alta resolução – a chamada **estrutura fina** -, como observado pelo físico germano-norte-americano Albert Abraham Michelson (1852-1931; PNF, 1907) e pelo químico e físico norte-americano Edward Williams Morley (1838-1923), em 1887 (*American Journal of Sciences* **34**, p. 333; *Philosophical Magazine* **24**, p. 449); quer pela ação de um campo magnético (**H**), como foi percebido por Zeeman, em 1896 (op. cit.) – o conhecido EfZ -, e calculado, independentemente, em 1897, por Larmor (op. cit.) e também por Lorentz (op. cit.); quer pela ação de um campo elétrico (**E**), observação essa realizada pelo físico alemão Johannes Stark (1874-1957; PNF, 1919) em 1913 (*Sitzungsberichte Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin* **40**, p. 932) – o denominado **Efeito Stark** (ES). Acrescido a isso tudo, existia a limitação das órbitas circulares do MAB. Destaque-se que a pesquisa de Zeeman resultou da análise das experiências realizadas pelo físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) e reunidas no livro deste e intitulado: **Experimental Researches in Electricity 1-2-3** [Taylor and Francis (London 1839-1855)].

Em vista das dificuldades do MAB apontadas acima, algumas modificações foram então consideradas para contorná-las. Assim, em 1915 (*Philosophical Magazine* **29**, p. 332; **30**, p. 394), o próprio Bohr introduziu correções relativísticas à massa do elétron para poder explicar a “estrutura fina” produzida por **H**. Nesse mesmo ano de 1915, os físicos, o alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) (*Sitzungsberichte Bayerischen Akademie Wissenschaften zu München* p. 425), o japonês Jun Ishiwara (1881-1947) (*Tokyo Sugaku Buturi-gakkakiwi*

Kizi **8**, p. 106), e o inglês William Wilson (1875-1965) (*Philosophical Magazine* **29**, p. 795), apresentaram uma extensão do MAB a mais um grau de liberdade dos elétrons em suas órbitas. Essa extensão, que ficou conhecida como o **Modelo de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld** (MB-I-W-S), é traduzida pela **regra de quantização**:

$$\oint_{CC} p_i dq_i = n_i h$$

onde q_i e p_i são, respectivamente, as coordenadas e os momentos canonicamente conjugados dos elétrons, e n_i são números inteiros positivos, i são os graus de liberdade dos movimentos elípticos eletrônicos, e a integral \oint_{CC} se estende aos períodos correspondentes às coordenadas.

Ainda em 1915 (*Sitzungsberichte Bayerischen Akademie Wissenschaften zu München* p. 459), Sommerfeld formulou uma teoria relativista de *átomos de um-elétron*, obtendo a seguinte expressão para a energia (W) do elétron em sua órbita:

$$W = [- Z^2 R h (n^2)] \times [1 + \alpha^2 Z^2 / n (1/4 + n_\phi / n_r) + \dots],$$

onde: $n = n_r + n_\phi$, sendo n_r e n_ϕ , respectivamente, os **números quânticos radial** e **azimutal**. Por outro lado: $n_r/n = b/a$, sendo a e b , respectivamente, os eixos maior e menor da órbita elíptica do elétron.

Aliás, foi a partir desse artigo que $\alpha = 2 \pi e^2 h c \approx 1/137$, recebeu a denominação de **constante de estrutura fina** porque a expressão acima permitia explicar alguns resultados experimentais relacionados com a estrutura fina das linhas espectrais do **H**, observada por Michelson e Morley, e da **série de Pickering-Fowler**, conforme registramos antes. Note-se que Bohr já havia demonstrado, em seu famoso trabalho de 1913, que essa série era devida ao hélio ionizado (He^+), pois bastaria fazer $Z = 2$ na expressão que deduziu para R , para explicar a alternância dessa série com a **série de Balmer**.

Em 1916, o físico russo-norte-americano Paul Sophus Epstein (1883-1966) (*Physikalische Zeitschrift* **17**, p. 148; 313; *Annalen der Physik* **50**, p. 489) e o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) (*Sitzungsberichte Bayerischen Akademie Wissenschaften zu Berlin*, p. 548), em trabalhos independentes, apresentaram uma explicação do ES usando os resultados do MB-I-W-S. Ainda em 1916 e usando esses mesmos resultados, o físico e químico holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye

(1884-1966; PNQ, 1936) (*Physikalische Zeitschrift* **17**, p. 507; *Nachrichten Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, p. 142) e Sommerfeld (*Physikalische Zeitschrift* **17**, p. 491; *Annales de Physique Leipzig* **51**, p. 1; 125) em trabalhos independentes, explicaram o EfZ. É interessante anotar que, nesses trabalhos, Sommerfeld propôs um **terceiro número quântico** m , posteriormente conhecido como **número quântico espacial**, ao lado dos **números quânticos** n_r e n_φ que havia proposto em 1915. Esse novo número quântico determinava a posição das órbitas do elétron em relação à direção do campo magnético \mathbf{H} e, de tal modo que o cosseno do ângulo (Θ) entre a direção desse campo e a normal do plano da órbita, era dado por: $\cos \Theta = m/n_\varphi$. Ora, como m e n_φ são números inteiros, os valores discretos assumidos por Θ indicavam que os planos das órbitas eram quantizados, fato esse que ficou conhecido como **princípio da quantização do espaço**. Ainda em seu trabalho de 1916, Sommerfeld obteve outro resultado muito importante: as linhas do espectro do \mathbf{H} eram deslocadas de $\Delta v = \Delta v_{(Zn)} \times \Delta m$, com $\Delta v_{(Zn)}$ representando o “**deslocamento Zeeman**” (dZ). Por sua vez, Δm media a variação de m , variação essa que só podia assumir os seguintes valores ($\Delta m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Ora, em vista dessa “regra de seleção”, esse resultado de Sommerfeld apenas explicava o EfZ. Por outro lado, não havia indicação nos cálculos desse trabalho de Sommerfeld de algo que se relacionasse com os “tipos mais complexos do efeito Zeeman” como, por exemplo, os observados, em 1898, pelos físicos, o irlandês Thomas Preston (1860-1900) (*Scientific Transactions of the Royal Dublin Society* **6**, p. 385), e os franceses Marie-Alfred Cornu (1841-1902), Becquerel (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l’Académie des Séances de l’Académie des Sciences* **126**, p. 997), Henri Alexandre Deslandres (1853-1948) (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l’Académie des Séances de l’Académie des Sciences* **127**, p. 18) e, também por Michelson (*Astrophysical Journal* **7**, p. 131).

1.7. Modelo Vetorial de Sommerfeld-Landé

Segundo vimos até aqui (particularmente nos itens **1.2.** e **1.6.**), em 1896, Zeeman começou a estudar a influência de um campo

magnético (**H**) sobre o estado de polarização da luz e que havia sido objeto de estudo por parte de Faraday (op. cit.). Desse modo, trabalhando com um equipamento melhor do que o utilizado por Faraday, ou seja, uma **bobina de Rühmkorff** [construída, em 1851, pelo mecânico alemão Henrich Daniel Rühmkorff (1803-1877) e que se destinava a produzir baixa intensidade de corrente sob elevada tensão] e que produzia um **H** de intensidade 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)], Zeeman observou, naquele mesmo ano de 1896, que as duas linhas amarelas D do sódio (Na) eram alargadas quando examinadas sob a ação do **H** considerado. Ele ainda observou que tais linhas eram circularmente polarizadas quando observadas paralelamente às linhas de força de **H**, e linearmente plano-polarizadas quando a observação era dirigida perpendicularmente a essas mesmas linhas de força.

Alargamentos semelhantes ao desse espectro do Na foram ainda observados por Zeeman com outras linhas espectrais, sendo seus resultados discutidos com Lorentz (de quem, aliás, Zeeman tornou-se assistente em 1890), uma vez que Lorentz havia, desde 1892, desenvolvido a sua famosa **Teoria do Elétron** (ver item 1.2.) 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. Os resultados dessas experiências de Zeeman foram por ele apresentados na Reunião da *Academia de Ciências de Amsterdam*, no dia 31 de outubro de 1896, e o artigo referente aos mesmos foi publicado, ainda em 1896 (*Verhandlungen der Physikalische Gesellschaft zu Berlin* **7**, p. 128).

Logo depois, em 1897 (*Annalen der Physik* **63**, p. 278), 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 **H**, esses “íons” oscilavam na direção desse campo com a frequência própria ν_0 , enquanto giravam em órbitas circulares em planos normais à direção de **H** com a frequência ν dada por (na notação atual): $\nu = \nu_0 \pm e H / (4\pi m_e c)$, onde e e m_e representam, respectivamente, a carga e a massa do “íon” (**elétron**), c é a velocidade da luz no vácuo, e H é o módulo de **H**.

Ainda segundo Lorentz, quando a observação do EfZ 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 **H**, apareciam três linhas, sendo a central polarizada linearmente à direção de **H**, a chamada *componente* π , e as duas extremas, polarizadas também linearmente, porém perpendicularmente à direção de **H**, a chamada *componente* σ (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 (*Verhandlungen der Königlich Akademie Wetensch. Amsterdam* **6**, p. 13; 99; 260), observando a linha azul (4800Å) do cádmio (Cd) sob a ação de $H = 32$ kilogauss.

É oportuno destacar que, também em 1897 (op. cit.), Larmor apresentou outra explicação teórica para o EfZ. Segundo ele, o efeito magnético de um campo magnético **H** sobre partículas carregadas que descrevem órbitas circulares era o de superpor à frequência própria de rotação uma frequência precessional em torno de **H** e de mesmo valor calculado por Lorentz. Essa frequência precessional ficou conhecida como **frequência de Larmor** $\nu_L = [e/(2 m_e)] \times [H/(2 \pi c)]$.

O estudo do EfZ 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 (op. cit.), o físico irlandês Thomas Preston (1860-1900) observou que as linhas azuis do zinco (Zn) (4722Å) e do Cd (4800Å) tornavam-se um quadrupletos na presença de um campo magnético. Ainda em 1898 (*Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Séances de l'Académie des Sciences* **126**, p. 181), Cornu obteve outro quadrupletos, desta vez para a linha D do Na (denominada D_1) e um sextupletos para a linha D, também do Na (denominada D_2), resultado esse que foi logo confirmado por Preston. Também em 1898, Michelson conseguiu separar a linha verde (5460Å) do mercúrio (Hg) em onze componentes. Além disso, e no mesmo ano de 1898, quadrupletos e outras estruturas complexas foram obtidas por Becquerel e Deslandres, examinando linhas espectrais do ferro (Fe), no espectro visível e no ultravioleta.

Esses "tipos mais complexos (singletos, dupletos, quadrupletos etc.) do efeito Zeeman" (conforme Lorentz os denominou), foram estudados sistematicamente por Preston e, em consequência desses estudos, formulou em 1899 uma lei denominada de **Lei Geral do**

Fenômeno da Perturbação Magnética das Linhas Espectrais, segundo a qual, as séries espectrais 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 EfZ. Essa **lei (regra) de Preston** foi tentada ser explicada, sem sucesso, por Lorentz, ainda em 1899, usando sua **Teoria do Elétron**.

Com o propósito de testar a **regra de Preston**, os físicos alemães Carl David Tomé Runge (1856-1927) e Paschen, em 1900, investigaram algumas linhas do mercúrio (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, analisando as séries de tripletos do magnésio (Mg), Cd e Hg, e as séries de dupletos do cobre (Cu), da prata (Ag), do tálio (Tl) e do alumínio (Al) e do 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 apresentado por Runge em 1907 (*Physikalische Zeitschrift* **8**, p. 232), e conhecidas como **Regra de Runge**.

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 lítio (Li) e outros elementos químicos [por exemplo, hidrogênio (H) e hélio (He)], 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 ao EfZ. Em outras palavras, o **Efeito Zeeman Anômalo** (EfZA) (como eles passaram a chamar, nessa ocasião, o “efeito Zeeman complexo”) transforma-se no EfZ, 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** (EfP-B) [nome cunhado por Sommerfeld, em 1914 (*Nachrichten Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, p. 207)], explicou a **Regra de Preston** e a **Regra de Runge**.

Em 1920 (*Annalen der Physik* **63**, p. 221), Sommerfeld conseguiu explicar alguns resultados experimentais relacionados com o “efeito Zeeman complexo”, usando o MAB-I-W-S, ocasião em que 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 elípticas deveriam ser desdobradas em outras órbitas.

Esta era a situação do estudo do EfZ e do EfZA quando entram em cena os físicos alemães Alfred Landé (1888-1975) e Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932). Landé se interessou por esses efeitos quando leu o livro intitulado **Das Leuchten der Gase und Dämpfe** (“Espectroscopia de Gases e Vapores”) (Braunschweig: Fr. Vieweg) escrito, em 1913, pelo físico alemão Heinrich Mathias Koenen (1874-1948). Então, para explicá-lo, em 1921, Landé publicou dois trabalhos. No primeiro deles (*Zeitschrift für Physik* **5**, p. 231), considerou que o número quântico j proposto por Sommerfeld (que o 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 de \mathbf{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 (\mathbf{H}) era dado pela expressão: $E = E_1 + g m h \nu_L$, 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 Zeemanianos**, 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 EfZ, e assumiria valores diferentes de um ($g \neq 1$) para o EfZA. No segundo trabalho (*Zeitschrift für Physik* **7**, p. 398), Landé observou que, por ser $g \neq 1$ no EfZA, então a **razão giromagnética do elétron** [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] era diferente de seu valor clássico, qual seja: $\mu/L = e/(2 m_e)$. Ora, como ν_L é função dessa relação [$\nu_L = e/(2m_e) \times H/(2\pi c)$, como vimos acima], então Landé propôs que essa expressão deveria ser alterada para explicar a anomalia (que será tratada

mais adiante) que encontrou ao estudar o movimento do elétron atômico na presença de um campo magnético externo.

Como Landé não havia apresentado base teórica para seu modelo, vários trabalhos teóricos foram então realizados no sentido de encontrar essa base. Vejamos quais. Em 1921, Heisenberg participava dos seminários ministrados 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, sobre o EfZA, 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 ideia de que os estados dupletos poderiam ser mais bem interpretados se os “**números misteriosos sommerfeldianos**” fossem considerados como semi-inteiros e não 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 que, se houvesse oportunidade, apresentar-lhe 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 próxima 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** (Odysseus, 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 circula 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) eletrônico-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 $\hbar/2$ (com $\hbar = h/2\pi$) e que o “elétron de valência” era dotado de um momento angular igual a $(n_\phi - 1/2) \hbar$, sendo que o dupletos decorria, exatamente, do alinhamento e do antialinhamento, respectivamente, desses momentos angulares. Note-se que a ideia 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.

Ainda no ano de 1922 aconteceu um fato muito importante para o entendimento da **Espectroscopia Atômica**, isto é, 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* **A223**, p. 127) e por uma estudante de Paschen, Hilde Gieseler (*Annalen der Physik* **69**, p. 147) ao estudarem, respectivamente, os espectros do manganês (Mn) e do cromo (Cr). Para explicar esses **multipletos** (nome cunhado por Catalán), Sommerfeld esboçou o **Modelo Vetorial Atômico** (MVA) em trabalho publicado em 1923 (*Annalen der Physik* **70**, p. 32), no qual considerou que o momento angular total (**J**) de um átomo, era a composição vetorial entre o momento angular total (**J**₀) do átomo nãoexcitado e o momento angular (**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 para **J**₀ quanto para **J**₁.

Esse MVA (proposto por Sommerfeld) foi retomado por Landé, ainda em 1923 (*Zeitschrift für Physik* **15**, p. 189), porém com outra interpretação. Com efeito, para Landé o momento angular total (**J**) do átomo seria a soma vetorial entre o momento angular (**K**) dos “elétrons de valência” e o momento angular (**R**) do “caroço de elétrons”, ou seja: **J = K + R**. De posse desse “modelo vetorial”, Landé explicou o EfZA supondo que, enquanto os vetores **K** e **R** precessionavam em torno de **J**, este precessionava em torno do campo magnético externo **H**. Assim, considerando que os números quânticos correspondentes aos três

momentos angulares eram “números fracionários heisenbergianos”, Landé deduziu uma nova expressão para g , ou seja: $g = 1 + (j^2 + k^2 - r^2)/2j^2$. É importante registrar que, com o desenvolvimento da Mecânica Quântica, em 1925-1926, foi visto que o valor de g 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: $j^2 = j(j + 1)$]. [A. d’Abro, **The Rise of the New Physics 1, 2** (Dover Publications, Inc., 1952)]

Apesar do grande avanço alcançado pelo **Modelo Vetorial de Sommerfeld-Landé** (MVS-L) no sentido de explicar, quer o EfZA, 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 pelo físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945), em dois trabalhos realizados em 1925 (*Zeitschrift für Physik* **31**, p. 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 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 álcalis 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_φ (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** (PE): - *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.

Nessa altura em que havia uma verdadeira disputa entre os modelos atômicos, o MVS-L e o dos “quatro números quânticos” de Pauli, é que apareceu a ideia do *spin* do elétron, ou seja, a ideia de que o elétron apresentava uma “rotação própria”. Aliás, é interessante ressaltar que a hipótese de o elétron possuir um “momento angular intrínseco” já havia sido sugerida pelo físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962; PNF, 1927), 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 (μ) do elétron associado ao “momento angular intrínseco”. Porém, para Compton, esse momento angular valia \hbar . No entanto, quem teve a ideia de usar esse “momento angular intrínseco” do elétron no sentido de explicar o EfZA, bem como para explicar a estrutura de multipletos e supermultipletos, foi o físico alemão Ralph de Laer Krönig (1904-1995), 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 ideias novas, disse enfaticamente para Krönig: - *Isto é, seguramente, uma ideia bastante inteligente, mas a Natureza não é assim.* [Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg, **The Historical Development of Quantum Theory 1** (Springer Verlag, 1982)]. Em vista dessa afirmativa, Krönig não publicou de imediato esse sua ideia, só vindo a fazê-lo, junto com físico holandês Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978) (este como primeiro autor), em 1925 [*Naturwissenschaften* **13**, p. 90 (01/1925, enviado em 12/1924)]. Em novembro de 1925 (*Naturwissenschaften* **13**, p. 953), o físico holandês George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) junto com Goudsmit, publicaram o hoje famoso trabalho no qual propuseram 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 EfZA.

É oportuno registrar que a ideia 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. [(Mehra and Rechenberg, op. cit.).]

1.8. O Átomo de Schrödinger/Dirac

O MVS-L, desenvolvido entre 1920 e 1923 (ver item 1.7.), apresentava grandes dificuldades: ele não conseguia demonstrar, por intermédio de uma equação, como encontrar os níveis de energia das órbitas; explicar a razão dos números quânticos; e, também, como ocorrem as transições quânticas entre aqueles níveis. Tais dificuldades foram contornadas em várias etapas. Vejamos quais. Em 1924, o físico francês, o Príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987; PNF, 1929) apresentou à *Faculdade de Ciências da Universidade de Paris* sua Tese de Doutorado, na qual há sua interpretação ondulatória da matéria: o elétron descreve uma “onda-piloto” em sua *órbita bohriana*. Tal interpretação, a princípio, causou certo ceticismo por parte dos físicos. Ao ler esse trabalho de de Broglie, o físico e químico holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye (1884-1966; PNQ, 1936) sugeriu ao físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) que este fizesse um seminário sobre as ideias do Príncipe francês. Imediatamente Schrödinger recusou, dizendo: - *Eu não quero falar sobre tal “nonsense”*. Porém, como Debye era o chefe do grupo de pesquisa, do qual participava Schrödinger, ele enfatizou que esse seminário era importante para a formação do referido grupo. Schrödinger, então, aceitou e prometeu apresentar as ideias de de Broglie em uma forma matemática mais compreensível. E assim, em 1926, propôs a hoje famosa *Equação de Schrödinger* (ES):

$$\Delta\psi(x, y, z) + \frac{8\pi^2 m_e}{h^2} [E - V(x, y, z)]\psi(x, y, z) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad H\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}),$$

onde $\psi(x, y, z)$ é conhecida como *Função de Onda de Schrödinger*, H é o *operador Hamiltoniano* {dado pela soma das energias potencial (V) e cinética [T= $p^2/2m$, com $p = i (h/2\pi)\nabla$: *operador momento linear*]}, $\Delta = \nabla^2$, E é a energia do elétron em uma órbita atômica estacionária, m_e é a massa do elétron, h é a *constante de Planck*, e ∇ [= $(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$] é o *operador gradiente*. É interessante registrar que, segundo Debye contou ao físico russo Piotr Leonidovich Kapitza (1894-1984; PNF, 1978), por ocasião da apresentação do seminário de Schrödinger sobre esse assunto, este não estava muito convicto da equação que estava propondo.

Foi Debye, presente a esse seminário, quem disse a Schrödinger, ao término de seu seminário: - *Você fez um trabalho extraordinário.*

Para obter os níveis de energia E (**autovalores**) do átomo de hidrogênio (H) por intermédio de sua equação, Schrödinger utilizou as técnicas matemáticas encontradas no livro **Methoden der Mathematischen Physik** (“Métodos da Física-Matemática”) dos matemáticos alemães Richard Courant (1888-1972) e David Hilbert (1862-1943), publicado em 1924 (Springer-Verlag). Ao encontrar um aspecto discreto de energias (n), idêntico ao obtido por Bohr em seu célebre **modelo atômico** formulado em 1913 (ver item 1.5.), Schrödinger observou que a **quantização** da energia decorria, automaticamente, de sua formulação matemática. Aliás, o título de seus trabalhos – **Quantisierung als Eigenwertproblem** (“Quantização como um problema de autovalores”) – sintetiza os resultados por ele obtidos, pois a sua segunda equação [$H\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r})$] é conhecida na Matemática como uma equação de autovalores. Ainda na solução de sua equação para o átomo H, Schrödinger mostrou também a quantização dos números quânticos: **orbital** (ℓ) e **magnético** ($m = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$). [Walter John Moore, **A Life of Erwin Schrödinger** (Cambridge University Press, 1994; Bassalo & Caruso, **Schrödinger** (Livraria da Física, 2014))].

A dificuldade das transições quânticas bohrianas foi resolvida pelo físico alemão Max Born (1882-1970; PNF, 1954), em 1926, ao interpretar a função schrödingeriana (ψ) como uma **amplitude de probabilidade**, e $|\psi|^2$ como a **probabilidade** de encontrar o elétron em uma determinada órbita bohriana caracterizada por ψ . [Bassalo & Caruso, **Born** (Livraria da Física, 2014).]

Apesar do grande sucesso da ES, ele apresentava ainda algumas dificuldades, tais como: 1) os níveis de energia das órbitas eletrônicas bohrianas eram degenerados, pois dependiam apenas do **número quântico principal de energia** (n); 2) ela era não relativista, ou seja, a energia cinética (T) era dada por: $T = p^2/2m$; 3) não incluía o **spin** (s), proposto pelos físicos holandeses George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), em 1925, que representava uma espécie de **rotação interna do elétron** – que poderia assumir dois valores: $s = \pm\hbar/2$ [“up” (\uparrow) e “down” (\downarrow)]. Para contornar essa ausência de s na ES, uma interpretação **quanto-mecânica-schrödingeriana** desse **número quântico de spin** foi apresentada, em 1927, em trabalhos independentes dos físicos, o austro norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) (*Zeitschrift für Physik* **43**, p. 601) e o inglês Charles Galton Darwin (1887-1962) [neto do lendário naturalista Charles

Robert Darwin (1809-1882)] (*Proceedings of the Royal Society of London* **115A**, p. 1). Para Pauli, $\vec{s} = \hbar \vec{\sigma} / 2$, onde $\vec{\sigma}$ são as famosas **matrizes (2 x 2) de Pauli**. Contudo, esse tratamento quântico de Pauli-Darwin [**equação de Pauli-Darwin** (EP-D)] permanecia ainda não-relativista e com o **spin** introduzido *ad hoc*.

As dificuldades das ES e EP-D foram contornadas pelo **modelo atômico quântico relativístico**. Com efeito, em 1928, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) formulou a **Teoria Relativística do Elétron**, conhecida como **Equação de Dirac** (ED):

$$(i \hbar \gamma^\mu \partial_\mu - m_e c) \Phi = 0,$$

onde γ^μ é a **matriz de Dirac** (matriz 4×4), $\partial_\mu = \partial/\partial x^\mu$ ($\mu = 1, 2, 3, 4$), Φ é o **spinor de Dirac** (matriz coluna), m_e é a massa do elétron, e c é a velocidade da luz no vácuo.

A ED conseguiu remover a degenerescência dos níveis de energia das órbitas eletrônicas bohrianas (dependência apenas do **número quântico de energia** n) indicada pela ES, conforme se pode ver na expressão:

$$E_{nj} \sim m_e c^2 [1 - Z^2 \alpha^2 / (2 n^2) - Z^4 \alpha^4 / (2 n^4) \{n/(j + 1/2)\} - 3/4],$$

onde Z é o **número atômico**, $\alpha [= 2 \pi (e^2) \hbar c \approx 1/137]$ é a **constante de estrutura fina**, $j = \ell + s$, é o **momento angular total**, ℓ é o **momento angular orbital**, e s é o **momento angular de spin**.

No entanto, apesar da ED resolver a degenerescência da ES, ela apresentou uma nova degenerescência entre os níveis de energia $2 s_{1/2}$ e $2 p_{1/2}$ do átomo de hidrogênio (H). Note-se que, de um modo geral, o nível de energia das órbitas atômicas é caracterizado por: $n\ell j$, onde n , ℓ , j ($j = \ell \pm 1/2$) representam, respectivamente, os números quânticos: **principal** (energia), **momento angular orbital** e **momento angular total**. Observe-se que a "**onda s**", corresponde a $\ell = 0$ e a "**onda p**", a $\ell = 1$. Registre-se que essa degenerescência só foi resolvida pela Eletrodinâmica Quântica (ED) desenvolvida por Dirac, em 1927, e pelos físicos, o japonês Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979; PNF, 1965), em 1943, e os norte-americanos Richard Phillips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) e Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNT, 1965), entre 1947 e 1949. Sobre a EQ ver, por exemplo, os textos: Richard Phillips Feynman, **Quantum Electrodynamics** (W. A. Benjamin, Inc., 1962); José Leite Lopes, **Introducción a la Electrodinámica Cuántica** (Editorial Trillas, 1977); Silvan S. Schweber, **QED**

and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga (Princeton University Press, 1994); Walter Greiner and Joachim Reinhardt, **Quantum Electrodynamics** (Springer-Verlag, 1996); Peter Goddard (Editor), **Paul Dirac: The Man and His Work** (Cambridge University Press, 1998); José Maria Filardo Bassalo, **Eletrodinâmica Quântica** (Livraria da Física, 2006)].

É interessante ressaltar que os trabalhos de Dirac sobre a Mecânica Quântica foram apresentados por ele no livro intitulado **The Principles of Quantum Mechanics**, publicado pela Oxford University Press, 1930. Nesse livro, ele conceitua a hoje famosa **função delta de Dirac** (δ), muito usada em Física para representar quantidades discretas por intermédio de uma função contínua.



ANTERIOR