

Nascimentos da Física

José Maria Filardo Bassalo

Departamento de Física da UFPA

66075-900 - Belém, Pará

home-page: <http://www.amazon.com.br/bassalo>

Recebido em 26 de Fevereiro, 1998

Neste trabalho, como em nosso **Nascimentos da Física (3500 a.C. - 1900 A.D)** (EDUFPA, 1997), apresentamos em forma de verbetes os principais fatos (*nascimentos*) referentes aos conceitos físicos, surgidos em nosso Século XX. Para isso, basicamente, usaremos os dados que coletamos nos quatro tomos de nossas **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994), nos textos **Twentieth Century Physics: I, II, III** (Edited by L. M. Brown, A. Pais and B. Pippard, Institute of Physics Publishings and American Institute of Physics Press, 1995), **Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World** (A. Pais, Clarendon Press and Oxford University Press, 1995) e **Dictionary of Scientific Biography** (Edited by C. C. Gillispie, Charles Scribner's Sons, 1981), e nas referências indicadas em todos esses livros.

In this work, as in our **Nascimentos da Física (3500 a.C. - 1900 A.D)** (EDUFPA, 1997), we present in entries the main events (*births*) concerned to the physical concepts, appeared in our Century XX. For that, basically, we use the data that we gather in our four books **Crônicas da Física** (EDUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994), in the books **Twentieth Century Physics: I, II, III** (Edited by L. M. Brown, A. Pais and B. Pippard, Institute of Physics Publishings and American Institute of Physics Press, 1995), **Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World** (A. Pais, Clarendon Press and Oxford University Press, 1995) and **Dictionary of Scientific Biography** (Edited by C. C. Gillispie, Charles Scribner's Sons, 1981), and in the references therein.

IDADE CONTEMPORÂNEA: FÍSICA ATÔMICA E NUCLEAR

Primeira Década do Século XX (1901-1910)

Em 1901, o físico-químico escocês William Sutherland (1859-1911) publicou um artigo na *Philosophical Magazine* 2, no qual especulou que o espectro dos elementos era função de sua rigidez.

Em 1901, o físico e matemático inglês Sir James Hopwood Jeans (1877-1946) sugeriu na *Philosophical Magazine* 2 que o átomo era eletricamente neutro pois, além dos elétrons, era composto de um outro tipo de partícula de igual massa e de carga elétrica oposta. Ainda para Jeans, esse par de partículas positiva e negativa era orientado espacialmente de modo que as positivas apontavam sempre para o interior e não poderiam ser deslocadas.

Em 1901, os físicos franceses Antoine-Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903) e Pierre Curie (1859-1906;

PNF, 1903) descreveram nos *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 132 o resultado de suas experiências com os elementos radioativos.

Em 1901, o físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926) formulou na *Revue Scientifique* 15 a hipótese de que 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 devido ao efeito fotoelétrico. Se tal ocorresse, concluiu Perrin, a frequência de revolução dos elétrons era da ordem das frequências ópticas das raias espectrais. Destaque-se que Perrin admitiu ainda que as instabilidades dessas órbitas eram responsáveis pelos fenômenos da **radioatividade** e, principalmente, do **decaimento beta**.

Em 1901, o químico escocês Sir William Ramsay (1852-1916; PNQ, 1904) e o físico-químico inglês Morris William Travers (1872-1961) publicaram um trabalho nos *Philosophical Transactions of the Royal Society*

of London 197 no qual descreveram algumas propriedades dos gases inertes: hélio (He), neônio (Ne), argônio (Ar), kriptônio (Kr) e xenônio (Xe).

Em 1902, J. H. Vincent publicou na *Philosophical Magazine* 4 uma tentativa de expressar o peso atômico **A** de um elemento com a sua posição na Tabela Periódica.

Em 1902, Pierre Curie e o físico francês Georges Sagnac (1869-1928) publicaram um trabalho no *Journal de physique théorique et appliquée* 1, no qual analisaram a radiação secundária produzida quando raios-X incidiam em metais pesados. Eles observaram que essa radiação era composta de raios-X secundários (de frequência menor que os raios-X originais) e de cargas elétricas negativas.

Em 1902, Pierre Curie e a física e química polonesa Marie Sklodowska Curie (1867-1934; PNF, 1903; PNQ, 1911) - a famosa Madame Curie - apresentaram no *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 134 uma lista de possíveis interpretações para o fenômeno da radioatividade.

Em 1902, o físico inglês Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) apresentou na *Physikalische Zeitschrift* 3 o resultado de uma experiência na qual observou que os raios γ não eram desviados por campos magnéticos. Em vista disso, apresentou a hipótese de que os γ eram raios β “duros”.

Em 1902, Rutherford publicou um artigo nos *Transactions of the Royal Society of Canada* 8 no qual afirmou que:

O átomo de hidrogênio é uma estrutura muito complicada constituída, possivelmente, de mil ou mais elétrons.

Em 1902, Rutherford e o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956; PNQ, 1921) formularam na *Philosophical Magazine* 4 a teoria da transmutação espontânea sofrida por algumas espécies atômicas. Para desenvolver essa teoria, eles se basearam no conceito de **vida-média** que havia sido apresentado por Rutherford, em 1900, na *Philosophical Magazine* 49.

Em 1902, o físico escocês William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) apresentou na *Philosophical Magazine* 6 a idéia de que, no átomo, uma carga positiva era distribuída homogeneamente sobre um volume esférico.

Em 1903, Fernando Re publicou nos *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 136 sua hipótese sobre o nascimento dos átomos. Segundo esse físico, aluno de Becquerel, a formação dos átomos decorreu de um processo análogo ao da formação do sistema solar, segundo a concepção laplaciana da nebulosa girante.

Em 1903, o físico húngaro-alemão Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947; PNF, 1905) publicou

nos *Annalen der Physik* 11 e 12 trabalhos relacionados aos espectros luminosos. Assim, para Lenard, cada átomo excitado emite todas as séries de seu espectro. Ainda para Lenard, cada elétron em um átomo (este considerado “quase completamente vazio”) é emparelhado com um “quantum elementar positivo” o qual, aparentemente, era dotado de uma grande massa.

Em 1903, o físico inglês Charles Glover Barkla (1877-1944) publicou um artigo na *Philosophical Magazine* 5 no qual registrou resultados de experiências relacionadas com a emissão de raios-X secundários decorrente do espalhamento de um feixe de raios-X pela matéria. Essas experiências apresentaram dois resultados importantes. O primeiro deles mostrou que os raios-X eram polarizados, enquanto o segundo indicou que havia uma relação entre o peso atômico e a emissão de raios-X secundários pelos elementos químicos.

Em 1903, Madame Curie apresentou na Universidade de Paris sua Tese de Doutorado intitulada *Recherches sur les substances radioactives*, na qual considerou que o peso atômico do rádio era ~ 225 .

Em 1903, o engenheiro norte-americano William Joseph Hammer (1858-1934) publicou o livro intitulado *Radium* no qual, parece que, pela primeira vez, apresentou a radioatividade em nível de divulgação.

Em 1903, Becquerel publicou uma monografia intitulada *Recherches sur une propriété nouvelle de la Matière* na qual registrou o resultado de uma experiência em que observou a infecção causada pelo rádio na pele das pessoas.

Em 1903, os físicos alemães Hermanus Haga e C. H. Wind apresentaram nos *Annalen der Physik* 10 o resultado de uma experiência sobre a difração de raios-X, na qual encontraram que o comprimento de onda desses raios era da ordem de 6×10^{-9} cm.

Em 1903, Rutherford e Soddy publicaram um artigo na *Philosophical Magazine* 5 no qual usaram pela primeira vez a expressão **energia atômica** para representar a energia armazenada em qualquer átomo. Ainda nesse trabalho eles apresentaram o **princípio da conservação da radioatividade**.

Em 1903, Rutherford apresentou na *Philosophical Magazine* 5 o resultado de uma experiência na qual observou que as partículas α eram desviadas em campos elétricos fortes e que portavam carga elétrica positiva.

Em 1903, os físicos alemães Johann Philipp Ludwig Julius Elster (1854-1920) e Hans Geitel (1855-1923) apresentaram nos *Annales de Physique Leipzig* 69 o resultado de uma experiência na qual observaram que uma fonte radioativa não aumentava a emissão de **raios Becquerel**, quando essa fonte fosse exposta a raios catódicos ou a raios solares.

Em 1903, Elster e Geitel registraram no *Physikalische Zeitschrift* 4 a observação que fizeram sobre a cintilação provocada por raios-X em “screens” de sulfureto

de zinco.

Em 1903, Pierre Curie realizou, juntamente com Albert Laborde (1878-1968), uma experiência na qual observaram que um grama de rádio (Ra) podia elevar a temperatura de $\sim 1,3$ gramas de água de seu ponto de fusão ao seu ponto de ebulição, em uma hora. O resultado dessa experiência foi publicado no *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 136.

Em 1903, Soddy e Ramsay anunciaram na *Nature* 68 que haviam observado a presença do elemento hélio em gases liberados por bromídio de rádio.

Em 1903, o físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) publicou na *Philosophical Magazine* 6 um trabalho no qual continuou sua pesquisa sobre o elétron atômico, que havia iniciado em 1897. Assim, nesse trabalho, apresentou a primeira versão de seu famoso modelo atômico, conhecido como “pudim de ameixas”, segundo o qual o átomo era considerado como sendo uma esfera de raio r (da ordem de 10^{-8} cm) com uma carga positiva total Q distribuída sobre a mesma e produzindo uma densidade ρ dada por:

$$\rho = \frac{3 Q}{4 \pi r^3}.$$

Além do mais, Thomson considerou que um elétron no interior dessa esfera e a uma distância a do centro da mesma experimentava uma força restauradora que variava com o inverso do quadrado da distância, ou seja:

$$\frac{4 \pi \rho a^3 e}{3 a^2} = \frac{e Q a}{r^3}.$$

Contudo, conhecendo o teorema enunciado pelo físico inglês Reverendo Samuel Earnshaw (1805-1888), em 1842 (*Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 7):

Partículas sob a ação de forças que variam com o inverso do quadrado da distância não podem estar em equilíbrio estático,

e a demonstração feita pelo físico inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1897 (*Philosophical Magazine* 44), de que um elétron acelerado perde energia, Thomson considerou então que os elétrons giravam em anéis com velocidade angular ω constante. Contudo, essa hipótese não foi suficiente para estabilizar o átomo.

Em 1903, Thomson afirmou na *Nature* 67 que a radioatividade decorria das mudanças na configuração do átomo.

Em 1904, Pierre Curie, Charles Jacques Bouchard e Victor Balthazard publicaram nos *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 138 o resultado de experiências que realizaram nas quais observaram que ratos e hamsters, colocados no interior de garrafas contendo emanções de rádio, morriam mais rapidamente quanto maior fosse a concentração da emanção.

Em 1904, o físico alemão Louis Karl Heinrich Paschen (1865-1947) apresentou nos *Annalen der Physik* 14 e na *Physikalische Zeitschrift* 5 o resultado de uma experiência na qual estudou o comportamento dos raios γ sob altos campos magnéticos. Em vista disso, concluiu que, se esses fossem partículas carregadas, sua massa deveria ser pelo menos 45 vezes maior que a massa do átomo de hidrogênio.

Em 1904, Thomson publicou na *Philosophical Magazine* 7 e nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 13 novos trabalhos nos quais voltou a discutir a estabilidade de seu modelo atômico apresentado em 1903. Assim, ele observou que certas configurações eletrônicas só eram estáveis se a velocidade $v = \omega a$ dos elétrons fosse maior que um dado valor crítico. Ainda nesses trabalhos, ele procurou explicar as regularidades da tabela periódica usando seu modelo atômico, assim como estudou o espalhamento de partículas α pela matéria.

Em 1904, Barkla publicou na *Philosophical Magazine* 7 e na *Nature* 69 novos resultados de experiências relacionadas com a emissão de raios-X secundários decorrente do espalhamento de um feixe de raios-X pela matéria.

Em 1904, o físico inglês John William Strutt (Lord Rayleigh) (1842-1919; PNF, 1904) publicou o livro intitulado *The Becquerel rays and the properties of radium* no qual aceitou a hipótese de que o átomo de hidrogênio era composto de muitos elétrons.

Em 1904, os físicos ingleses Sir William Henry Bragg (1862-1942; PNF, 1915) e Richard Daniel Kleeman (1875- ?) apresentaram na *Philosophical Magazine* 8 o resultado de uma experiência na qual observaram a ionização do ar provocada pela passagem de um feixe de partículas α emitido por uma fina camada de sal de rádio. Nesse mesmo volume do *Philosophical Magazine*, Bragg publicou um trabalho no qual estudou o espalhamento de raios β (elétrons) em moléculas de ar.

Em 1904, o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) apresentou na *Philosophical Magazine* 7 seu modelo atômico do tipo saturniano (caroço central positivo rodeado de anéis de elétrons deslocando-se com a mesma velocidade angular) para explicar o espectro luminoso emitido pelos corpos. Segundo esse modelo, as oscilações perpendiculares ao plano de movimento dos anéis resultavam no espectro tipo banda (contínuo), enquanto as oscilações paralelas àquele plano resultavam num espectro tipo raia (discreto). Observe-se que Nagaoka explicou o **decaimento beta** como decorrente da quebra de um dos anéis eletrônicos.

Em 1904, Soddy e Ramsay anunciaram nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 73 que haviam observado a presença do elemento hélio em gases liberados por bromídio de rádio.

Em 1904, Thomson publicou o livro intitulado *Electricity and Matter*, no qual reuniu suas primeiras *Silliman Lectures*, ministradas na Yale University. Nesse livro, ele afirmou que:

O átomo de hidrogênio contém cerca de mil elétrons.

Ainda nesse livro, Thomson descreveu as experiências realizadas pelo físico norte-americano Alfred Marshall Mayer (1836-1897), em 1878 (*American Journal of Science* 15, 16; *Scientific American*, Supp. 5), envolvendo **magnetos flutuantes**. Nessas experiências, Marshall observou que **n** magnetos flutuantes, colocados em pequenos discos de cortiça e sujeitos a uma força variando com o inverso do quadrado da distância, apresentavam configurações estáveis em forma de camadas fechadas poligonais.

Em 1904, Rutherford publicou o livro intitulado *Radioactivity* no qual descreveu as primeiras experiências realizadas sobre esse novo fenômeno da Natureza. Nesse livro, afirmou que não seria surpresa observar que alguns átomos poderiam se desintegrar, muito embora parecessem ser permanentes.

Em 1904, Rutherford e Howard Turner Barnes publicaram um artigo no *Philosophical Magazine* 1, no qual analisaram a energia desprendida pelo radônio.

Em 1904, Lord Kelvin publicou um artigo na *Philosophical Magazine* 8, no qual estudou a relação entre a estabilidade atômica e a emissão de partículas β . Esse estudo o levou a afirmar que alguma espécie de ondas etéreas era responsável pela energia do rádio.

Em 1905, Lord Kelvin apresentou na *Philosophical Magazine* 10 novos estudos sobre a relação entre a estabilidade atômica e a emissão de partículas β .

Em 1905, o físico-químico alemão Otto Hahn (1879-1968; PNQ, 1944) anunciou nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 76 a descoberta de um novo rádio-elemento ao qual deu o nome de **radiotório**.

Em 1905, o físico alemão Johannes Stark (1874-1957; PNF, 1919) apresentou na *Physikalische Zeitschrift* 6 o resultado de uma experiência na qual observou que as linhas discretas dos raios canais do hidrogênio têm a seguinte estrutura: uma linha aguda (*sharp*) “estacionária” (λ_o) cuja posição coincide com uma das linhas do espectro do hidrogênio ($H_{\beta,\gamma}$, etc), e uma difusa (*diffuse*) “móvel” (λ_s) cuja intensidade cai agudamente no lado ultravioleta e decresce suavemente no lado infravermelho do espectro estudado. A diferença entre essas linhas era dada pela expressão:

$$\frac{\lambda_o - \lambda_s}{\lambda_o} = \frac{v}{c},$$

onde **v** é a velocidade dos íons de hidrogênio e **c** a velocidade da luz no vácuo.

Em 1905, Bragg e Kleeman apresentaram na *Philosophical Magazine* 10, novas experiências sobre a ionização do ar produzida pelas partículas α .

Em 1905, Rutherford publicou um artigo na *Philosophical Magazine* 10 no qual mostrou que a partícula α emitida pelo polônio (Po) era a mesma que a emitida pelo rádio (Ra). Essa mesma informação foi apresentada por Rutherford na segunda edição de seu livro *Radioactivity*, publicado ainda em 1905.

Em 1905, o físico austríaco Egon Ritter von Schweidler (1873-1948) apresentou no *Premier Congrès de Radiologie* ocorrido em Liège, França, a hoje famosa **lei da desintegração radioativa**, para cuja demonstração ele usou a Teoria das Probabilidades:

$$A = A_o e^{-\lambda t},$$

onde **A** é a atividade radioativa de uma amostra em um instante **t**, **A_o** é a atividade inicial, e λ é uma característica do material radioativo, chamada **constante de decaimento**, que é ligada à meia-vida **T** pela expressão: $T\lambda = 0,693$.

Em 1905, Barkla apresentou na *Nature* 71 e nos *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 204A novos resultados de experiências relacionadas com a emissão de raios-X secundários decorrente do espalhamento de um feixe de raios-X pela matéria.

Em 1905, a unidade de comprimento (10^{-8} cm) utilizada pelo astrônomo e físico sueco Anders Jonas Ångström (1814-1874) em seus trabalhos sobre espectroscopia recebeu a denominação oficial de **1 ångström** $\equiv 1 \text{ \AA}$.

Em 1905, Rutherford publicou a segunda edição de seu livro *Radioactivity*, de 1904.

Em 1905, Thomson relatou nos *Transactions of the International Electrical Congress* 1 o resultado de uma experiência na qual observou não haver nenhuma influência da gravitação sobre a radioatividade.

Em 1906, o físico alemão Heinrich Willy Schmidt (1876-1914) publicou um artigo na *Physikalische Zeitschrift* 7, no qual estudou o espalhamento de raios β (elétrons) pela matéria, ocasião em que propôs como calcular a intensidade **I** de um feixe monoenergético desses raios ao atravessarem uma espessura **d**:

$$I(d) = I(0) e^{-\nu d},$$

onde o “coeficiente de absorção” ν depende apenas da natureza do material, mas não de **d**.

Em 1906, Bragg apresentou na *Philosophical Magazine* 11 novas experiências sobre a ionização do ar produzida pelas partículas α .

Em 1906, Stark publicou um trabalho nos *Annalen der Physik* 21, no qual mostrou que os raios canais de pequenas velocidades não contribuem para as linhas móveis do **efeito Doppler** dos raios canais do hidrogênio que havia observado em 1905.

Em 1906, Sagnac relatou no *Journal de Physique* 15 o resultado de experiências que realizou com o objetivo de verificar se havia influência da gravitação sobre a radioatividade. Tais experiências mostraram não haver nenhuma influência.

Em 1906, Barkla publicou na *Philosophical Magazine* 11, na *Nature* 73 e nos *Proceedings of the Royal Society of London* 77A novos resultados de experiências relacionadas com a emissão de raios-X secundários decorrente do espalhamento de um feixe de raios-X pela matéria.

Em 1906, Rutherford publicou o livro intitulado *Radioactive Transformations* no qual reuniu as aulas que havia ministrado em março de 1905, nas **Silliman Lectures** da Yale University, nas quais dissertou sobre raios-X, raios catódicos, efeito Zeeman, radioatividade α , β e γ , bem como sobre a destrutibilidade dos átomos.

Em 6 de agosto de 1906, Lord Kelvin escreveu no *The Times* que o rádio poderia ser uma molécula composta de chumbo e de cinco átomos de hélio.

Em 1906, Thomson voltou a usar seu modelo atômico (“pudim de ameixas”) e, ao assumir que os elétrons no interior desse “bolo” eram considerados como partículas livres, ele obteve resultados teóricos importantes que foram publicados no *Philosophical Magazine* 11 e na segunda edição do livro intitulado *Conduction of electricity through gases*. Por exemplo, ao estudar o espalhamento de luz de frequência ν em gases monoatômicos, obteve a seguinte expressão para o índice de refração μ desse tipo de gás:

$$\frac{\mu^2 - 1}{\mu^2 + 2} = \frac{N Q (Me + mQ)}{\rho (Me + mQ) - M m \nu^2},$$

onde **N** é o número de átomos por unidade de volume, **m** é a massa do elétron, e **M**, **Q** e ρ são, respectivamente, a massa, a carga e a densidade da esfera carregada positivamente. Por outro lado, ao estudar o espalhamento dos raios-X pelos gases, obteve o hoje famoso **espalhamento Thomson** cuja secção de choque σ é dada por:

$$\sigma_{Th} = \frac{8 \pi}{3} \left(\frac{e^2}{m c^2} \right)^2.$$

Por fim, tendo em vista os resultados acima e ao discutir a absorção dos raios β pela matéria, Thomson chegou aos seguintes importantes resultados:

1. O número de elétrons em um átomo situa-se entre 0,2 e 2 vezes do peso atômico de uma substância. Para o hidrogênio esse número não pode diferir muito da unidade;

2. As linhas espectrais não são devidas às vibrações de corpúsculos (isto é, elétrons) no

interior do átomo, mas sim devidas às vibrações de corpúsculos devidos a um campo de forças exterior ao átomo.

Em 1906, o físico escocês Norman Robert Campbell (1880-1949) publicou um artigo nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 13, no qual escreveu:

Consideráveis evidências experimentais indicam que todos os elementos são radioativos.

Em 1906, Rutherford apresentou na *Philosophical Magazine* 12 os resultados de experiências nas quais observou um pequeno espalhamento (desvio da $\sim 2^\circ$) de partículas α ao passarem através de uma lâmina de mica de 0,003 cm de espessura.

Em 1906, a física austríaca Lise Meitner (1878-1968) publicou na *Physikalische Zeitschrift* 7 o resultado de seus trabalhos sobre a absorção de raios α e β em folhas de metal.

Em 1907, Stark apresentou no *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 4 a idéia de que o espectro de banda dos elementos era devido à excitação dos corpos neutros, e que o espectro de linha era devido às excitações dos átomos ionizados.

Em 1907, Stark apresentou na *Physikalische Zeitschrift* 8 uma interpretação teórica, baseada na teoria quântica planckiana, do **efeito Doppler** dos raios canais que havia observado em 1905.

Em 1907, Haga relatou nos *Annalen der Physik* 33 uma experiência na qual observou a polarização dos raios-X.

Em 1907, Meitner apresentou na *Physikalische Zeitschrift* 8 novos trabalhos sobre a absorção de raios α e β em folhas de metal.

Em 1907, Barkla publicou na *Nature* 75 novas experiências sobre os raios-X secundários.

Em 1907, Campbell e Alexander Wood (1879-1950) publicaram nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 14 o resultado de experiências que realizaram nas quais determinaram as vidas-médias do potássio (K^{40}) ($1,28 \times 10^9$ anos) e do rubídio (Rb^{87}) (5×10^{10} anos).

Em 1907, Campbell publicou o livro intitulado *Modern Electrical Theory* no qual afirmou que a massa atômica era de origem puramente eletrônica.

Em 1907, o químico e físico norte-americano Bertram Borden Boltwood (1870-1927) publicou um trabalho no *American Journal of Science* 24, no qual mostrou que existem átomos que são quimicamente idênticos, mas diferem por suas propriedades radioativas. Essa foi a primeira evidência sobre o conceito de **isotopismo**.

Em 1907, Schmidt publicou um artigo na *Physikalische Zeitschrift* 8, no qual voltou a tratar do espalhamento de raios β pela matéria.

Em 1907, Schmidt publicou um artigo no *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 5 no qual voltou a tratar do espalhamento de raios- β pela matéria.

Em 1907, o físico holandês Antonius Johannes van den Broek (1870-1926) publicou nos *Annalen der Physik* 23 um trabalho, no qual apresentou uma regra que relacionava o peso atômico **A** dos elementos químicos com a sua posição na Tabela Periódica. Segundo essa regra, o número **A** aumentava de duas unidades de elemento para elemento.

Em 1907, Bragg publicou um artigo nos *Transactions of the Royal Society of South Australia* 31, no qual apresentou objeções à lei exponencial de Schmidt para explicar o espalhamento de raios β (elétrons) pela matéria.

Em 1907, Barkla e seu assistente Charles Albert Sadler apresentaram na *Philosophical Magazine* 14 o resultado de suas experiências nas quais mostraram haver uma relação entre o peso atômico e a emissão de raios-X secundários por elementos químicos.

Em 1908, Barkla publicou na *Philosophical Magazine* 15 e na *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 5 novos resultados de suas experiências relacionadas com a emissão de raios-X secundários decorrente do espalhamento de um feixe de raios-X pela matéria.

Em 1908, Rutherford e o físico alemão Hans (Johannes) Wilhelm Geiger (1882-1945) publicaram um artigo nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 81 (p.162), no qual anunciaram que as **partículas alfa** eram átomos de hélio, e que apresentavam a carga elétrica igual a $2e$, sendo e a carga do elétron. Nessa descoberta, eles utilizaram métodos espectroscópicos.

Em 1908, Geiger apresentou nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 81 o resultado de uma experiência sobre o espalhamento de um feixe de partículas α , oriundo de um composto do rádio (RaBr_2), através de uma lâmina fina de metal (alumínio e ouro). As partículas α espalhadas foram detectadas em contadores de cintilações.

Em 1908, Paschen apresentou nos *Annalen der Physik* 27 a descoberta de uma nova série de linhas espectrais do hidrogênio na região do infravermelho, hoje conhecida como a **série de Paschen**. Esta série obedece à **fórmula de Rydberg-Schuster** para $m = 3$.

Em 1908, o físico suíço Walter Ritz (1878-1909) formulou, na *Zeitschrift für Physik* 9, o **princípio da combinação** segundo o qual a frequência ($\nu = \frac{c}{\lambda}$) 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:

$$\nu(n, n-1) + \nu(n-1, n-2) = \nu(n, n-2).$$

Com esse princípio, Ritz explicou um fato que intrigava os espectroscopistas, qual seja, o de que existiam mais

raias claras (espectro de emissão) do que escuras (espectro de absorção). Observe-se que no espectro de um determinado elemento químico, as raias escuras sempre coincidem com as claras.

Em 1908, Stark propôs na *Physikalische Zeitschrift* 9 um modelo segundo o qual as séries espectrais se relacionavam com o processo de ionização de átomos e moléculas, e que sua frequência ν era ligada ao potencial de ionização **V** por intermédio da relação: $h\nu = eV$.

Em 1908, Stark publicou na *Physikalische Zeitschrift* 9 novos trabalhos sobre o **efeito Doppler** dos raios canais e sua interpretação quântica.

Em 1908, Hahn e Meitner publicaram na *Physikalische Zeitschrift* 9 o resultado de suas pesquisas sobre o espalhamento de raios β (elétrons) pela matéria. Além do mais, nessas experiências, eles observaram que o tório emitia somente raios β de uma espécie (isto é, como uma única velocidade), e que ao serem absorvidos pelo alumínio seguiam uma lei exponencial.

Em 1908, Ramsay publicou um trabalho nos *Archives des sciences physiques et naturelles* 26, no qual estudou os gases inertes da atmosfera, decorrentes da emissão de corpos radioativos.

Em 1909, Barkla e Sadler apresentaram na *Philosophical Magazine* 17 novas experiências nas quais observaram haver uma relação entre o peso atômico e a emissão de raios-X por elementos químicos.

Em 1909, Eugen Bassler publicou um trabalho nos *Annalen der Physik* 28 relatando uma experiência na qual observou a polarização dos raios-X.

Em 1909, Barkla publicou nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 10 novos resultados experimentais sobre a relação entre o peso atômico e a emissão de raios-X por elementos químicos.

Em 1909, o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928; PNF, 1911) publicou um trabalho nos *Annalen der Physik* 30, no qual afirmou que átomos neutros, principalmente o vapor de mercúrio monoatômico, poderiam produzir espectro de linha.

Em 1909, Geiger e o físico inglês Ernst Marsden (1889-1970) relataram nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 82 nova experiência sobre o espalhamento de um feixe de partículas α , oriundo do radônio (Rn), através de uma lâmina fina de metal. Nessa experiência, eles observaram que de um feixe, não muito bem colimado, contendo cerca de 8.000 partículas α , apenas uma delas era refletida, ou seja, era espalhada num ângulo maior do que 90° .

Em 1909, Hahn e Meitner publicaram na *Physikalische Zeitschrift* 10 o resultado de uma experiência na qual observaram a natureza complexa do rádio, pois verificaram que o mesmo emitia partículas- β com velocidades variáveis.

Em 1909, Rutherford e o químico inglês Thomas Royds (1884-1955), na *Philosophical Magazine* 17 confirmaram a natureza da partícula α : átomo de hélio.

Em 1909, o físico alemão Max Born (1882-1970; PNF, 1954) publicou um artigo na *Physikalische Zeitschrift* 10 no qual afirmou que:

O trabalho de Thomson é um concerto para piano da grande sinfonia do átomo radiante.

Em 1909, Stark publicou na *Physikalische Zeitschrift* 10 e nos *Annalen der Physik* 28 (este com a colaboração do físico alemão Friedrich Wilhelm Steubing (1885- ?)) novos resultados sobre o **efeito Doppler** dos raios canais e sua interpretação quântica.

Em 1909, o físico inglês William Wilson (1875-1965) apresentou nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 82 o estudo que fez do espalhamento de partículas β pela matéria e, em consequência desse estudo, sugeriu que esse espalhamento ocorria por colisão individual e não por colisão múltipla, como indicava o modelo thomsoniano. Ainda nesse estudo, ele observou que a lei da absorção desses raios era linear e não exponencial.

Em 1910, Barkla e James Nicol apresentaram na *Nature* 84 novas evidências experimentais sobre a relação entre o peso atômico e a emissão de raios-X por elementos químicos.

Em 1910, Geiger publicou um trabalho nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 83, no qual comentou as experiências que realizou com Marsden, sobre o espalhamento de partículas α por uma lâmina fina de metal, principalmente os espalhamentos que ocorreram em ângulos maiores do que um reto.

Em 1910, Wilson apresentou nos *Proceedings of the Royal Society of London A* 84 novos estudos sobre o espalhamento de partículas β pela matéria, nos quais confirmou a observação que fizera em 1909 sobre a linearidade da lei de absorção dessas partículas.

Em 1910, Ramsay e o físico-químico inglês Robert Whytlaw-Gray (1877-1958) anunciaram nos *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 151 o resultado de algumas experiências nas quais determinaram a densidade do gás decorrente da emanção do rádio, o **niton**, hoje conhecido como radônio (Rn). Nessa ocasião, usando considerações genéticas, eles sugeriram para esse gás inerte um peso atômico de 222,5.

Em 1910, Madame Curie publicou o primeiro Volume de seu famoso livro *Traité de Radioactivité*, onde

reuniu suas pesquisas e descobertas sobre a radioatividade.

Em 1910, Wilson e Joseph Alexander Gray publicaram na *Philosophical Magazine* 20 um trabalho no qual mostraram que a lei linear de absorção de partículas β pela matéria, observada em 1909 por Wilson, apresentava um limite de validade. Essa mesma observação foi feita por J. A. Crowther, também em 1910 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 15).

Em 1910, Hahn e o físico alemão Otto von Bae- yer (1877-1946) apresentaram na *Physikalische Zeitschrift* 11 o resultado de uma experiência que realizaram na qual fizeram a separação magnética de um feixe de partículas β . Nessa experiência, eles observaram que um emissor puro de raios β gera elétrons monocromáticos.

Em 1910, Stark publicou na *Physikalische Zeitschrift* 11 novos resultados sobre o **efeito Doppler** dos raios canais e sua interpretação quântica.

Em 1910, o físico austríaco Arthur Erich Haas (1884-1941) apresentou nos jornais científicos *Wiener Berichte* 119, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 7 e *Physikalische Zeitschrift* 11 uma tentativa de explicar a estrutura atômica. Assim, para Haas, o átomo de hidrogênio era constituído por um simples elétron (de carga $-e$ e massa m) descrevendo uma órbita periódica de frequência f em torno de uma esfera de carga positiva e e raio a . Para calcular o valor de a , Haas usou pela primeira vez a constante de Planck h , ao impor que o módulo da energia potencial do elétron era dado por:

$$|E_{pot}| = \frac{e^2}{a} = h f.$$

Usando a expressão acima, e o fato de que a força de atração elétrica entre o elétron e a carga da esfera é igual à força centrípeta:

$$\frac{e^2}{a^2} = m a (2 \pi f)^2,$$

Haas obteve o seguinte valor para a :

$$a = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m},$$

idêntico ao valor que o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962; PNF, 1922), obteria em 1913.