



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



A Descoberta e a Natureza dos Raios-X.

Em 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923; PNF, 1901) estava interessado na luminescência (vide verbete nesta série) que os raios catódicos provocavam em determinados produtos químicos. Assim, com o objetivo de melhor observar esse fenômeno, no dia 8 de novembro daquele ano, Roentgen escureceu sua sala de trabalho e colocou o *tubo de Hittorf* (também conhecido como **tubo de Crookes** ou **tubo de Geissler**, que é um produtor de raios catódicos), em uma caixa de papel preto. Ao ligá-lo, observou que uma folha de papel embebida com platino-cianeto de prata (Pt-AgCN), colocada a uma certa distância do tubo, esta brilhando. Ao desligar o tubo, verificou que a luminosidade da folha desaparecia, e que voltava a brilhar tão logo o tubo fosse religado. Surpreso com o inesperado fenômeno, Roentgen resolveu investigá-lo com mais detalhes. Virou a folha embebida com o composto de prata, deslocou-a, colocou certos objetos (papel grosso e finas lâminas metálicas) entre ela e o tubo, levou-a para uma sala vizinha etc. Por fim, por desconhecer a natureza do fenômeno que acabara de observar, intuiu então que deveria tratar-se de uma "nova espécie de raios", aos quais deu o nome de **raios-X**, por ser X o símbolo matemático que representa uma variável desconhecida. Essa descoberta foi comunicada por Roentgen em um encontro da *Würzburg Physico-Medical Society*, em 28 de dezembro de 1895, e publicada no *Sitzungsberichte der Würzburger Physikalischen-Medicinischen Gesellschaft* 137, p. 132 (1895), *Nature* 53, p. 274 (1896) e *Annalen der Physik* 54, p. 1; 12 (1898). É interessante observar que durante algum tempo os raios-X foram chamados de **raios Roentgen**, porém, em virtude da dificuldade na pronúncia do ditongo *oe*, foi abandonado essa prática. Todavia, o nome **Roentgen** ficou perpetuado com a denominação que deram à unidade de dosagem de radiação: *Roentgen (R)- quantidade de raios-X que libera uma unidade eletrostática de carga elétrica em 1 cm³ de ar em condições normais de pressão, temperatura e umidade*. Destaque-se que uma radiação da ordem de 600 Roentgens atuando por um curto período de tempo no corpo inteiro de uma pessoa, é o suficiente para matá-la. Essa unidade foi inicialmente proposta pelo físico francês Paul Ulrich Villard (1860-1934), em 1908 (*Archives d'Électricité Médicale* 16, p. 692). Em 1937, essa unidade foi estendida para incluir a radiação γ , que havia sido descoberta por Villard, em 1900. Hoje, $1 R = 2.58 \times 10^{-4}$ coulombs/kilograma.

Segundo nos contam os historiadores da ciência Jagdish Mehra (n.1937) e Helmut Rechenberg (n.1937), em seu livro **The Historical Development of Quantum Theory**, Volume 1 (Springer Verlag, 1982), por ocasião da descoberta dos raios-X, Roentgen já havia escrito quarenta e oito (48) trabalhos em muitos campos da Física incluindo elasticidade, capilaridade, calor específico dos gases, condução de calor em cristais, rotação do plano de polarização da luz por um campo magnético e piezoelectricidade. Em 1888 (*Annalen der Physik* 35, p. 264), Roentgen havia demonstrado experimentalmente o efeito magnético causado pelo deslocamento de um dielétrico polarizado eletricamente, e que mais tarde ficou conhecido como **corrente de Roentgen**. Tal experimento confirmou a descoberta do físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867), ocorrida em 1845, o hoje conhecido **efeito Faraday**.

Sobre os raios-X, lembro-me de um fato inusitado quando estudava Engenharia Civil (1954-1958) na então Escola de Engenharia do Pará. Nesse período, era voz corrente entre os futuros engenheiros civis que certo professor dessa Escola definia os raios-X como: *Raios em forma de X, daí o seu nome*. Certamente era uma brincadeira maldosa com esse professor, já que Roentgen o havia descoberto há mais de 50 anos, bem como já se conhecia sua origem e natureza e, principalmente, sua aplicação na Medicina. É oportuno registrar que, por ocasião da

descoberta dos raios-X, Roentgen acidentalmente passou sua mão na frente do tubo emissor desses raios e viu os ossos de seus dedos em uma tela. Essa imagem certamente sugeriu-lhe obter uma chapa de raios-X de uma mão. Assim, no dia 22 de dezembro de 1895, ele fez a primeira chapa de raios-X da mão do histologista e embriologista alemão Rudolph Albert von Kölliker (1817-1905), segundo nos contam os físicos, o ítalo-norte-americano Emílio Gino Segrè (1905-1989; PNF, 1959), no livro **Dos Raios X aos Quarks** (EDUnB, 1987), e os brasileiros Francisco Caruso (n. 1959) e Vítor Oguri (n.1951) em seu livro intitulado **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos** (Campus, 2006). É ainda oportuno registrar que Roentgen também fez chapas de raios-X da mão de sua mulher Bertha. Quando lhe mostrou a chapa indicando os ossos dos dedos, na qual apareciam os dois anéis que usava, ela chocou-se, pois logo associou o esqueleto de sua mão com a morte.

Antes de passarmos para as explicações sobre a origem e natureza dos raios-X, devo registrar dois fatos interessantes sobre esses raios. O primeiro refere-se ao ato grandioso de Roentgen que, apesar de pobre, doou o dinheiro do prêmio Nobel de Física que recebeu em 1901, cerca de 70 mil francos-ouro, para instituições de caridade, segundo nos conta a historiadora norte-americana Bárbara Goldsmith no livro intitulado **Gênio Obsessivo: O Mundo Interior de Marie Curie** (Companhia das Letras, 2006). O outro fato relaciona-se com a primeira aplicação médica dos raios-X. Em seu livro intitulado **El Descubrimiento del Electron** (Reverté Mexicana, 1968), o físico norte-americano David L. Anderson registra que “em 20 de janeiro de 1896, o braço quebrado de Eddie MacCarthy foi curado com a ajuda dos raios-X em Dartmouth, New Hampshire”.

Logo após a descoberta dos raios-X, surgiram as primeiras explicações sobre a sua origem e natureza. A primeira delas foi apresentada pelo físico alemão Arthur Schuster (1851-1934) [*Nature* 53, p. 268 (1896)] ao afirmar que tais raios eram vibrações transversais do éter, de comprimento de onda excessivamente pequeno, isto é, luz ultra-ultravioleta. Essa hipótese foi independentemente sugerida pelo físico irlandês George Francis Fitzgerald (1851-1901) no *Electrician* 37, p. 372 (1896). Por sua vez, ainda em 1896 e em trabalhos independentes, o matemático e físico inglês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) (*Nature* 54, p. 427) e o geofísico alemão Emil Johann Wiechert (1861-1928) (*Annalen der Physik* 59, p. 321) propuseram que os raios-X eram pulsos eletromagnéticos gerados no éter quando o vidro do tubo de descarga elétrica era bombardeado pelos raios catódicos (elétrons livres) e, em consequência, eles são desacelerados emitindo esses raios. Em 1899 (*Proceedings of the Academy of Sciences of Amsterdam*, 25 de março), 1902 (*Proceedings of the Academy of Sciences of Amsterdam*, 27 de setembro) e 1903 (*Annalen der Physik* 10, p. 305), os físicos holandeses Hermanus Haga (1852-1936) e Cornelius H. Wind (1867-1911) realizaram experiências nas quais testaram a natureza ondulatória dos raios-X estudando sua difração através da matéria. Os resultados dessas experiências confirmaram o caráter ondulatório dos raios-X, e indicavam um comprimento de onda da ordem de 6×10^{-9} cm (0.6 Angströms). É oportuno registrar que, em 1912 (*Annalen der Physik* 38, p. 473), o físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), deduziu o valor teórico de 0.3 Angströms para o comprimento de onda dos raios-X.

A natureza ondulatória dos raios-X continuou a ser estudada pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) em trabalho sobre o espalhamento dos raios-X pela matéria e discutido em seu livro intitulado **Conduction of Electricity through Gases** (Cambridge University Press, 1903), espalhamento esse hoje conhecido como **espalhamento Thomson**, e por seu estudante, o físico inglês Charles Glover Barkla (1877-1944; PNF, 1917), realizando experiências relacionadas com a emissão de raios-X secundários decorrente de seu espalhamento pela matéria. Essas experiências apresentaram dois resultados importantes. O primeiro deles mostrou que os raios-X eram ondas transversais polarizadas, conforme ele registrou em seu primeiro artigo publicado em 1903 (*Philosophical Magazine* 5, p. 697). O

segundo resultado indicou que havia uma relação entre o peso atômico e a emissão de raios-X secundários pelos elementos químicos, de acordo com o artigo que publicou com seu assistente, o físico inglês Charles Albert Sadler, em 1907 (*Philosophical Magazine* 14, p. 408), isoladamente, em 1909 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 10, p. 257) e, em 1910 (*Nature* 84, p. 139), com seu assistente, o físico inglês James Nicol.

É interessante destacar que Barkla, no trabalho de 1909, apresentou a primeira estimativa do número de elétrons em um átomo, o hoje chamado de **número atômico** Z e que representa o número de prótons do núcleo. Com efeito, na experiência relatada nesse artigo, ele estudou o espalhamento de um feixe de raios-X, com comprimento de onda de 0.707 Angströms e oriundo do molibdênio (Mo), através de um absorvedor de grafite [que é rico em carbono (C)]. A análise desse espalhamento levou-o a concluir que o carbono tinha seis (6) elétrons. Conforme relatam os físicos norte-americanos F. K. Richtmyer, Earle Hesse Kennard e John N. Cooper no livro intitulado **Introduction to Modern Physics** (McGraw-Hill, 1969), o sucesso de Barkla nessa experiência foi fortuito, pois, se ele escolhesse um absorvedor de maior número atômico, ou se tivesse usado um feixe de raios-X de maior comprimento de onda, como, por exemplo, o oriundo do cobre (Cu), cujo valor é de 1.5 Angströms, seu cálculo para determinar o Z do carbono seria substancialmente errado. Registre-se que, conforme veremos a seguir, foi Barkla quem denominou de raia K os raios-X com os quais trabalhou nessa experiência.

Em 1911 (*Philosophical Magazine* 21, p. 648), Barkla demonstrou que o número de elétrons espalhados por átomo é cerca da metade do peso atômico [hoje A , e representa o número de prótons (p) e de nêutrons (n) do núcleo atômico] no caso de átomos leves ($A \leq 32$). Ainda em 1911 (*Philosophical Magazine* 22, p. 396), Barkla identificou duas séries de linhas espectrais de raios-X, as quais denominou de K e L, sendo K a mais interna. Também em 1911 (*Proceedings of the Royal Society of London* A85, p. 323), o físico inglês Richard Whiddington (1885-1970) estudou a relação entre a radiação (frequência) de uma dada linha espectral, produzida por um feixe de raios catódicos incidente em um átomo-alvo e a massa atômica desse alvo. Ele mostrou que os raios-X primários (oriundos de um tubo bombardeado por raios catódicos) podem excitar a radiação característica de um elemento químico de peso atômico (w) somente quando a velocidade dos raios catódicos produtores daqueles raios excederem a velocidade de $10^8 w$ cm/s. Registre-se que essa "lei de Whiddington" foi importante para que o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) propusesse seu célebre **modelo atômico do átomo**, em 1913, conforme afirma o físico holandês Abraham Pais (1918-2000) em seu livro **Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World** (Clarendon Press e Oxford University Press, 1986). Sobre esse modelo, ver verbete nesta série.

A natureza ondulatória dos raios-X e seu pequeno comprimento de onda (da ordem de Angströms, conforme vimos antes), permitiram que se determinasse a estrutura dos cristais, bem como se estimasse o valor de A , analisando espalhamento desses raios através da matéria. Vejamos como isso aconteceu. Em janeiro de 1912, o físico alemão Paul Peter Ewald (1888-1985) defendeu sua Tese de Doutorado na *Universidade de Munique*, sob a orientação de Sommerfeld. Nessa tese, estudou a passagem de luz por um cristal. Tal estudo levou-o à idéia de que um cristal deveria apresentar uma estrutura espacial. Ao discuti-la com o físico alemão Max Felix Theodor von Laue (1879-1960; PNF, 1914), este fez a conjectura de que os efeitos de interferência poderiam ser produzidos se ondas eletromagnéticas de comprimento de onda extremamente curta fossem espalhadas (difratadas) por um cristal cuja estrutura ("lattice") funcionaria como uma rede de difração tridimensional. Com essa idéia em mente, von Laue e os físicos alemães Walther Friedrich (1883-1968) e Paul Knipping (1883-1935) realizaram, ainda em 1912 (*Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München*, p. 303; 363), uma experiência sobre a difração de raios-X em cristais (por exemplo, sulfato de cobre: CuSO_4), na qual chegaram a estimar o espaçamento entre sítios da rede cristalina como sendo da ordem de 1 Angström.

A análise da estrutura dos cristais por intermédio da difração de raios-X foi também objeto de pesquisa por parte dos físicos ingleses Sir William Henry Bragg (1862-1942; PNF, 1915) e seu filho Sir William Lawrence Bragg (1890-1971; PNF, 1915). Assim, entre 1912 e 1913, realizaram uma série de experiências, cujos resultados foram apresentados em 1913 (*Nature* 91, p. 557; *Proceedings of the Royal Society of London* A88, p. 428), com os quais conseguiram estudar a estrutura de muitos cristais, por intermédio de uma equação por eles deduzida, hoje conhecida como a famosa **lei de Bragg** dada por: $2d\sin\theta = m\lambda$, onde d é a distância entre os planos da rede cristalina, λ é o comprimento de onda da radiação-X utilizada, θ é o ângulo de incidência dessa radiação com o plano da rede, e $m=1,2,3, \dots$ é a posição da figura de difração formada pelo espalhamento dos raios-X pelo cristal. Para o cristal cloreto de sódio (*NaCl*) eles chegaram a calcular a distância entre os átomos desse cristal e encontraram: ~ 5.6 Angströms.

Um outro resultado importante decorrente do estudo do espalhamento de raios-X pela matéria foi obtido pelo físico inglês Henry Gwyn-Jeffreys Moseley (1887-1915), em 1913 (*Philosophical Magazine* 26, p. 1024), ao encontrar uma relação entre a frequência (ω) dos raios-X com o número atômico (N , hoje Z) do alvo espalhador (vários elementos químicos), ou seja: $\omega = k(N-a)^2$, onde k é uma constante absoluta e a é uma constante que apresenta diferentes valores para as linhas K e L descobertas por Barkla. É interessante notar que Moseley escreveu uma carta para Bohr, em 16 de novembro de 1913, na qual dizia que sua fórmula poderia ser escrita na forma: $\nu_{K\alpha} = R(N-1)^2(1/1^2 - 1/2^2)$, isto é, em consonância com o **modelo de Bohr**, onde R é a constante de Balmer-Rydberg.

A primeira consequência da expressão acima foi a descoberta, por parte de Moseley, de que o cobalto (Co) devia preceder ao níquel (Ni) na Tabela Periódica de Mendeleiev, apesar do peso atômico do primeiro ser maior do que do segundo. Na continuação de seu trabalho, Moseley continuou a medir a frequências das raias ("duras") K_α de mais de trinta (30) substâncias puras, do alumínio (Al) ao ouro (Au). No entanto, dificuldades experimentais levaram Moseley a examinar linhas mais "moles" do tipo L_α e M_α , para elementos além da prata (Ag). Para as raias L_α , obteve a expressão: $\nu_{L\alpha} = R(N-7.4)^2(1/2^2 - 1/3^2)$. Contudo, como essa expressão não coincidia com a obtida por Bohr, pela presença de uma constante subtrativa ao valor de N , Moseley explicou-a como sendo devido ao efeito de blindagem da carga nuclear pelos elétrons orbitais mais internos. Note-se que, hoje, as raias indicadas acima indicam a emissão de raios-X quando um elétron cai da órbita (camada-"shell") L para a órbita K [$K_\alpha: L \rightarrow K$] (raio-X "duro"), de M para L [$L_\alpha: M \rightarrow L$] e de M para N [$M_\alpha: N \rightarrow M$] (raios-X "moles").

Ao finalizar esse verbete sobre os raios-X, é importante notar que o espalhamento dos raios-X pela matéria permitiu a descoberta de mais um novo fenômeno físico, qual seja, o conhecido **efeito Compton**, em 1923. (Detalhe desse efeito pode ser visto no verbete desta série relacionado com Compton.)