

Talento de Moseley: desvendando os segredos do átomo

Odilon A. P. Tavares*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/MCTI,

Rua Dr. Xavier Sigaud 150, Rio de Janeiro, RJ - 22290-180, Brasil

1913 HÁ 100 ANOS ERA CRIADO O CONCEITO MODERNO DE NÚMERO ATÔMICO DE UM ELEMENTO QUÍMICO. De sua investigação experimental, o então jovem físico inglês Henry G. J. Moseley (1887–1915) disse: "Temos aqui uma prova de que existe no átomo uma quantidade fundamental, a qual aumenta por passos regulares quando se passa de um elemento ao seguinte. Essa quantidade só pode ser a carga [elétrica] do núcleo central positivo, da existência do qual já temos prova definitiva". Experimentalista exímio, o trabalho de Moseley permitiu estabelecer a equivalência entre número atômico, isto é, o número de ordem do elemento químico no sistema periódico, e o número de unidades da carga elétrica elementar do núcleo atômico e, portanto, o número de elétrons no átomo.

DESCOBERTAS NA FÍSICA E NA QUÍMICA, sobretudo as novidades relacionadas à natureza atômica da matéria, foram protagonizadas por cientistas europeus durante as duas décadas que precederam à Primeira Guerra Mundial. Os raios X, nome dado à radiação penetrante, invisível e misteriosa, percebida pela primeira vez em 1895 pelo físico alemão Wilhem C. Roentgen (1845–1923), passaram a ser utilizados logo no ano seguinte em diversas aplicações (diagnóstico, por exemplo). Entretanto, sua natureza foi somente compreendida 17 anos mais tarde.



Físico inglês Henry Moseley (1887–1915), de breve carreira científica (1910–1914).

MOLE E DURA. No período 1903–1911, o físico inglês Charles G. Barkla (1877–1944) e seus estudantes realizaram medidas precisas sobre a absorção de raios X secundários. Esses eram produzidos toda vez que se fazia incidir um feixe primário de radiação X sobre diferentes materiais. Desses experimentos eles concluíram que: i) havia uma relação entre o peso atômico do elemento químico que servia de alvo e o poder de penetração dos raios X secundários (indicado pela fração da radiação X absorvida por uma folha de alumínio de espessura um décimo de milímetro); ii) o poder de penetração dos raios X secundários era característico do elemento alvo—por exemplo, a radiação X proveniente do cromo (peso atômico 52,1) era bastante absorvida no alumínio, daí dita “mole”, enquanto que a proveniente da prata (peso atômico 107,9) era muito penetrante, e por isso conhecida como “dura”—; iii) ordenando os nove elementos investigados entre o cromo e a prata pelo poder de penetração da radiação X secundária, a lista seguia os pesos atômicos, exceto para o par níquel-cobalto, caso em que o cobalto (peso atômico 59,0) precedia o níquel (peso atômico 58,7); iv) depois de investigar alvos de estanho, antimônio e iodo, Barkla relatou em 1911 que a radiação secundária era na verdade constituída de duas componentes (ou séries), uma “dura” (isto é, de menor absorção) e outra “mole” (facilmente absorvida). Essas “raias” foram denotadas pelas letras K e L, respectivamente. Ficava evidente também que raios X característicos de um dado elemento eram também produzidos por incidência direta de elétrons em diferentes alvos.

COMO A LUZ. Finalmente, os físicos alemães Max F. T. von Laue (1879–1960), Walther Friedrich (1883–1968) e Paul Knipping (1883–1935) observaram pela primeira vez, em julho de 1912, figuras de difração de raios X produzidas em cristais, o que os levou a concluir pela natureza ondulatória dos raios X (à semelhança da luz visível). Eles chegaram a estimar em 1 \AA (Angström) os espaçamentos interatômicos na rede cristalina (1 \AA equivale a um décimo do milionésimo do milímetro, ou seja, 10^{-8} centímetro; essa foi a unidade de comprimento adotada para distâncias na escala atômica, em homenagem ao físico sueco Anders Jonas Angström (1814-1874).

Poucos meses depois, o físico inglês William L. Bragg (1890–1971), na época um estudante em Cambridge (Inglaterra), notou que raios X eram refletidos na superfície de um cristal. Sólidos cristalinos possuem, entre outras, a propriedade de se fragmentar ao longo de planos particulares que revelam sua estrutura regular e periódica ligada

*Electronic address: oaptavares@cbpf.br

à disposição dos átomos (ou moléculas) na rede cristalina. São as superfícies de clivagem (ou de corte) do cristal. A reflexão de raios X por superfícies planas e paralelas de clivagem de um cristal resulta intensificada quando os raios X incidem segundo um ângulo adequado. Em dezembro de 1912, o jovem Bragg relatou que um feixe de raios X lançado sobre uma superfície de clivagem da mica dera imagens reforçadas por reflexão especular. Em Leeds (cidade ao norte da Inglaterra), Bragg e seu pai, o físico inglês William H. Bragg (1862–1942), mostraram, em 1913, como medir comprimentos de onda de raios X mediante reflexão em cristais. Eles construíram pela primeira vez um instrumento, conhecido como ‘espectrômetro de raios X’, com o qual obtiveram a distância interatômica num cristal de salgema (cloreto de sódio) como sendo 5,6 Å. O método criado pelos Bragg mostrou-se bastante preciso, simples e valioso na obtenção e análise de espectros de raios X característicos dos elementos. A partir de então, as radiações X puderam ser descritas quantitativamente mediante seus comprimentos de onda (ou frequências). O método dos Bragg substituiu com vantagem aquele desenvolvido por Barkla quatro anos antes.

PONTA DE PROVA. Em 1910, aos 23 anos de idade, apenas terminados seus estudos no Trinity College (Oxford), Moseley chegara a Manchester (Inglaterra) onde fora admitido no grupo liderado pelo físico neozelandês *sir* Ernest Rutherford (1871–1937). Naquele momento, Rutherford estava criando seu modelo nuclear do átomo. Moseley se convencera de que investigações sobre as propriedades dos raios X característicos poderiam trazer novas contribuições para a estrutura atômica. Ele sabia exatamente o que estava procurando, pois acompanhava de perto os rápidos avanços da ciência. Convidou seu colega de grupo, o físico inglês Charles G. Darwin (1887–1962) [neto do famoso naturalista inglês Charles R. Darwin (1809–1882)] para trabalhar juntos. Então, foram pedir a Rutherford permissão para começar os experimentos. De início, Rutherford desencorajou-os, mas finalmente convenceu-se de que eles poderiam tentar.

Assim, no outono de 1912, Moseley partiu para Leeds a fim de aprender com Bragg (o pai) a arte da experimentação com raios X. De volta a Manchester, Moseley e Darwin começaram suas investigações sobre a reflexão de raios X em cristais. Eles usaram sal-gema, selenita (sulfato de cálcio) e ferrocianeto de potássio (um composto cristalino de ferro e potássio), e utilizaram o método de Bragg para obter os comprimentos de onda dos raios X. Em julho de 1913 eles anunciaram seus primeiros resultados na *Philosophical Magazine*: i) a radiação X produzida por um alvo de platina mostrava duas componentes, uma análoga à luz branca, e outra constituída de cinco “raias” cujas frequências eram características da platina; ii) os raios X não eram produzidos no cristal porque suas propriedades eram independentes da natureza e composição do cristal refletor.

Depois desse primeiro trabalho, Darwin passou a se interessar por outros assuntos da física, e Moseley decidiu prosseguir com o seu projeto de forma independente. Ele estava convencido de que a existência de raios X característicos dos elementos químicos conhecidos era um meio de se descobrir os segredos da estrutura dos átomos. Em par-

ticular, a existência do núcleo atômico, região central ultraminúscula contendo a carga elétrica positiva e praticamente toda a massa do átomo, já era bem conhecida, pelo menos entre os que compunham o grupo de *sir* Ernest Rutherford. Entretanto, as medidas de espalhamento de partículas alfa por lâminas metálicas finíssimas, realizadas pelo grupo no período 1911–1913, não permitiram obter a quantidade da carga elétrica positiva do núcleo atômico.

MONTADO O QUEBRA-CABEÇA. Por outro lado, em janeiro de 1913, o advogado e físico amador holandês Antonius van den Broek (1870–1926) propusera que todas as propriedades químicas e óticas (incluindo os raios X) de um elemento seriam determinadas pelo seu “número atômico”, Z , isto é, o número de ordem da posição do elemento na Tabela Periódica, e não pelo seu peso atômico. Numa carta à revista *Nature* em novembro de 1913, den Broek sugeriu que número atômico e peso atômico seriam quantidades independentes, e que as unidades de carga elétrica nuclear do átomo de um elemento seria igual ao seu número atômico. Em cartas de dezembro no mesmo volume da *Nature* essa sugestão teve a concordância tanto do químico inglês Frederick Soddy (1877–1956) quanto de Rutherford, que julgou essa ideia bastante promissora. Além disso, químicos já haviam notado que em três duplas de elementos consecutivos na Tabela Periódica, a saber, argônio-potássio (Ar-K), cobalto-níquel (Co-Ni), e telúrio-iodo (Te-I), a sequência dos pesos atômicos era invertida—por exemplo, iodo, com peso atômico 126,9, deveria preceder telúrio (peso atômico 127,6), o que não acontecia—(figura 1).

Decidido a testar o que chamou de ‘hipótese de Broek’, Moseley escreveu “veremos qual quantidade determina o espectro de raios X”. E então começou sua investigação sistemática sobre os espectros de raios X de alta frequência característicos dos elementos. No final do outono de 1913, todo o equipamento necessário às medidas das frequências estava pronto e funcionando perfeitamente. Na primeira fase do seu trabalho Moseley utilizou 10 elementos alvo, do cálcio ($Z = 20$) ao zinco ($Z = 30$), exceto o escândio ($Z = 21$), com amostras de grau de pureza aceitável. A sequência escolhida incluía o par crítico Co-Ni. Com ímpeto, em apenas duas semanas começaram a aparecer os primeiros resultados: i) a radiação X característica do tipo K era constituída de duas raia distintas, que chamou de K_{α} (a de menor frequência) e K_{β} ; ii) a frequência (comprimento de onda) das radiações K_{α} e K_{β} dos elementos investigados aumentava (diminuía) regularmente com o número atômico, e não com o peso atômico. Ou seja, a frequência tanto da raia K_{α} quanto da K_{β} seguia perfeitamente o número de ordem dos elementos.

DE QUE AS COISAS SÃO FEITAS. Entusiasmado, numa carta a seu colega de grupo, o físico dinamarquês Niels Bohr (1885–1962), ele escreveu em 16 de novembro de 1913: “os resultados foram extremamente simples e em grande parte o que seria de se esperar”. Um mês depois, seu trabalho estava publicado na *Philosophical Magazine*. Para ilustrar seus resultados de forma clara, Moseley preparou um diagrama dos espectros de raios X dos elementos examinados, o qual ficou conhecido como ‘escadaria de Moseley’ (figura 2). O espectro de alguns elementos mostrara outras raia, porém de menor intensidade. Essas poderiam resultar de impurezas

Período	Série	Grupo																	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		o	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b		
1	1	H 1																He 2	
2	2	Li 3	Be 4		B 5	C 6		N 7	O 8		F 9							Ne 10	
3	3	Na 11	Mg 12		Al 13	Si 14		P 15	S 16		Cl 17							Ar 18	
4	4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28							Kr 36	
	5		Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35										
5	6	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46							Xe 54	
	7		Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53										
6	8	Cs 55	Ba 56	Terras raras	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78							Rn 86	
	9		Au 79	Hg 80	Ti 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85										
7	10	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92												

Terras raras	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64
	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	

Figura 1: Tabela Periódica dos Elementos de 1913. Números atômicos (de 1 a 92) estão sob os símbolos dos elementos. Em vermelho indicam-se aqueles ainda não conhecidos na época. Os pares marcados com azul são os casos em que a ordem do peso atômico não segue a do número atômico.

contidas nas amostras. Para esclarecer esse ponto, Moseley analisou também uma amostra de latão (liga de cobre e zinco), encontrando as raías K_{α} e K_{β} características do cobre e do zinco (figura 2).

H. Moseley, *Phil. Mag.* (Ser. 6), 26 (1913)

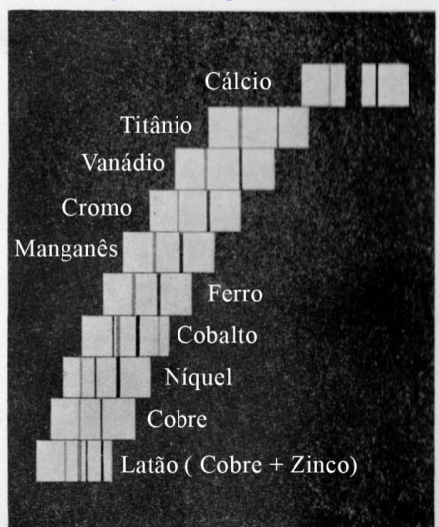


Figura 2: “Escadaria de Moseley” obtida quando as imagens dos espectros de raios X característicos dos elementos foram colocadas de baixo (cobre) para cima (cálcio) (ordem decrescente do número atômico) e ordenadas de forma a crescer da esquerda para a direita o comprimento de onda das “raias” K_{α} (mais escuras, de 1,45 a 3,37 Å) e K_{β} (menos escuras, de 1,31 a 3,09 Å). Notar no latão as raías do cobre e do zinco [para comparação, a luz visível está entre 4000 e 7500 Å].

Assim, Moseley criara um novo e poderoso método de análise química a partir da simplicidade dos espectros de raios X característicos obtidos com o espectrômetro de Bragg. O método poderia, inclusive, levar à descoberta de elementos que estavam faltando na Tabela Periódica. À época eram conhecidos 85 dos 92 elementos tabelados (figura 1). Quatro dos faltosos, tecnécio (Tc, $Z = 43$), promécio (Pm, $Z = 61$), háfnio (Hf, $Z = 72$) e rênio (Re, $Z = 75$) foram, de fato, descobertos e identificados mais tarde por seus espectros de raios X característicos [os três restantes, astatínio (At, $Z = 85$), frâncio (Fr, $Z = 87$) e protactínio (Pa, $Z = 91$), descobriu-se mais tarde pertencerem a famílias radioativas naturais, descendentes dos “patriarcas” urânio (U, $Z = 92$) e tório (Th, $Z = 90$)]. A descoberta de Moseley permitiu também atribuir os corretos números atômicos ao cobre (Cu, $Z = 29$), à prata (Ag, $Z = 47$) e à platina (Pt, $Z = 78$).

UM NÚMERO ERA TUDO. Do ponto de vista da estrutura atômica, o grande feito de Moseley foi encontrar o preciso significado físico de número atômico, qual seja, o número que representa as unidades da carga elétrica elementar do núcleo e, portanto, o número de elétrons do átomo, como havia sugerido den Broek meses antes. Por conseguinte, as propriedades químicas dos elementos passaram a ser entendidas como funções periódicas do número atômico, e não de seus pesos atômicos, como pensara o químico russo Dmitri Mendeleev (1834–1907) na construção de sua Tabela Periódica dos elementos de 1871.

Terminada a primeira parte de seu trabalho, Moseley, a contragosto de Rutherford, transferiu-se, no final de novembro de 1913, para Oxford (Inglaterra), para estar mais perto de sua mãe viúva enquanto continuava com seus experimen-

tos. Lá, em abril de 1914, ele completou a sua obra após ter medido as raias K_{α} e K_{β} para elementos do alumínio (Al, $Z = 13$) até a prata, e as raias L_{α} , L_{β} , L_{ϕ} e L_{γ} para elementos do zircônio (Zr, $Z = 40$) ao ouro (Au, $Z = 79$). Ao todo, foram 38 elementos investigados. Para cada tipo de radiação X característica ele encontrou, sem exceção, uma variação linear da raiz quadrada da frequência com o número atômico.

VITÓRIA CIENTÍFICA. A Primeira Guerra Mundial iniciara em agosto de 1914. Patriota que era, Moseley imediatamente se apresentou como voluntário para o combate, opondo-se aos conselhos de sua mãe, de seu mentor Rutherford e do próprio Exército Britânico. Aos 27 anos, numa batalha contra os turcos na península de Gallipoli, Moseley foi mortalmente atingido em 10 de agosto de 1915 por uma bala na cabeça.

Moseley combateu e venceu as dúvidas que havia sobre os mistérios do átomo. Foi, portanto, um soldado vitorioso da causa científica. Brillante, talentoso e de excepcional vigor, sua curtíssima carreira científica, com seus dois últimos trabalhos finalizados em apenas seis meses, bastou para i) descobrir a quantidade de carga elétrica contida no núcleo atômico, ii) explicar, com o correto significado de número atômico, do que dependia a periodicidade das propriedades dos elementos químicos, iii) mostrar a independência entre

número atômico e peso atômico, iv) antecipar a existência de novos elementos químicos até então desconhecidos, e v) criar um método não destrutivo de obter a composição química de materiais. Do trabalho de Moseley, de natureza puramente experimental, certa vez o químico húngaro George de Hevesy (1885–1966) disse que seus resultados eram “incrivelmente simples” e “a teoria atômica não poderia prever essa simplicidade”.

Para saber mais

- Oswald H. Blackwood, Thomas H. Osgood e Arthur E. Rurark: *Introdução à Física Atômica* (Tradução da 3ª Edição norteamericana, Editora Globo, Rio de Janeiro, 1960) Cap. V (Raios X).
- John L. Heilbron: The Work of H. G. J. Moseley. *Isis* **57** (3), 336 (1966).
- Bernard Jaffe: *Moseley and the Numbering of the Elements* (Doubleday & Company, Garden City (N.Y.), 1971).
- Henry G. J. Moseley: The High-Frequency Spectra of the Elements. *Philosophical Magazine* **26**, 1024 (1913); **27**, 703 (1914)