



Aston e a descoberta dos isótopos

Alexandre Medeiros

A descoberta dos isótopos foi decisiva na história da ciência, servindo para definir conceitos importantes para a química e para a física na primeira metade deste século. O trabalho de Aston foi dos mais significativos e é central na história da construção do conhecimento, por isso seu destaque nesta seção de *Química Nova na Escola*.

► Aston, espectrógrafo de massa, isótopos ◀

Os resultados de uma recente pesquisa realizada por nós entre estudantes do ensino médio, assim como entre estudantes universitários de química e de física, revelaram um enorme desencontro entre suas compreensões da teoria atômica e suas distintas capacidades de enunciar o conceito de isótopos¹. Ainda que os detalhes daquela pesquisa sejam extensos demais para serem discutidos no escopo deste artigo, ao menos um resultado merece ser comentado. Parcela representativa dos entrevistados demonstrou acreditar que átomos de um mesmo elemento têm massas iguais. Quando questionados sobre a conceituação dos isótopos, uma parte não soube o que responder. Dentre os que forneceram respostas aceitáveis para aquele conceito, a quase totalidade não chegou a perceber o desencontro entre a conceituação apresentada e a crença em algo extremamente semelhante ao segundo postulado de Dalton para a teoria atômica.

Esse desencontro revela-nos o quanto a idéia revolucionária da existência de isótopos na natureza é ensinada de modo descontextualizado da história de sua construção. Ignorando as dificuldades e as disputas travadas ao longo da história, o conteúdo parece ser apresentado de modo asséptico, desprovido de significado para o

estudante.

O intuito deste artigo é oferecer um pequeno resgate histórico da construção do conceito de isótopos que possa vir a ser útil aos interessados na problemática da construção das idéias científicas. Afinal, como afirmou Weinberg (1990, p. 82), Prêmio Nobel de Física de 1979: “nenhuma discussão dos pesos atômicos estaria completa sem um relato de como nossa moderna compreensão dos isótopos veio a se desenvolver”².

A trajetória inicial de Aston

Francis William Aston ganhou o Prêmio Nobel de Química em 1922 pela descoberta, realizada em 1919, de isótopos de grande número de elementos não-radioativos, assim como pelo enunciado da regra do número inteiro — a afirmação de que todos os isótopos têm números massas atômicas relativas muito próximas de números inteiros em relação ao ¹⁶O (ou como diríamos hoje, em relação ao

¹²C). Aston utilizou, para isso, um novo instrumento, por ele mesmo construído: o espectrógrafo de massa.

É importante assinalar, no entanto, que Aston não foi o primeiro a utilizar o conceito de isótopo, mas sim o primeiro a estabelecer evidências convincentes de que tal conceito não se restringia aos elementos radioativos, ou seja, que a existência dos isótopos era mais uma regra que uma exceção. Por outro lado, essa não foi uma descoberta fortuita ou casual, produto de algum feliz acidente histórico, como freqüentemente são caricaturadas as descobertas científicas.

Aston não foi o primeiro a utilizar o conceito de isótopo, mas sim o primeiro a estabelecer evidências convincentes de que tal conceito não se restringia aos elementos radioativos, ou seja, que a existência dos isótopos era mais uma regra que uma exceção

Não estamos afirmando com isso a inexistência da casualidade nas descobertas científicas, mas apenas ressaltando que para que uma tal casualidade possa vir a ter significado é preciso que o cientista tenha uma carga teórica apropriada. Como afirmaram Watson e Crick, ao receberem o Prêmio Nobel pela descoberta do DNA: “nós descobrimos ouro tateando, mas era ouro o que estávamos procurando”. De modo análogo, também, Alexandre Fleming, descobridor da penicilina, afirmou certa vez que: “o espírito despreparado não vê a mão que a sorte lhe oferece”.

Nesse sentido, a contribuição de Aston para a descoberta dos isótopos não-radioativos corresponde a um esforço planejado e à busca de uma solução para uma disputa travada, à época, no seio da ciência, a respeito da inexatidão dos valores dos então denominados pesos atômicos dos elementos. Recuemos, portanto, um pouco no tempo para que possamos compreender melhor a origem e a própria

natureza dessa mencionada disputa, assim como a maneira pela qual Aston veio a inserir-se na mesma.

Aston nasceu em 1877 em Harborne, no condado de Birmingham, na Inglaterra. Estudou na escola paroquial local e posteriormente na Malvern School, onde o seu interesse pelo estudo da ciência parece ter sido despertado, chegando mesmo a montar um pequeno 'laboratório com sucatas' na fazenda de seu pai. Em 1894 ingressou no Mason College, que logo depois viria a se transformar na Universidade de Birmingham. Lá estudou química com Frankland e física com Poynting, que viriam a orientar as suas primeiras pesquisas.

Edward Frankland, ex-aluno de Robert Bunsen, havia se notabilizado pelos seus trabalhos na teoria dos equivalentes químicos, pela descoberta dos compostos organometálicos e principalmente pela descoberta do elemento hélio, no Sol, uma consequência de seus estudos na nascente ciência da espectroscopia. Frankland era ainda um entusiasta das aplicações da química no estudo dos alimentos, na análise das águas, na purificação de esgotos e na prevenção da poluição da água.

Aston iniciou suas pesquisas em espectroscopia após ganhar uma bolsa de estudos em 1898, estudando sob a orientação de Frankland as propriedades óticas dos derivados do ácido tartárico. Após terminar sua graduação, abandonou a vida acadêmica por três anos, dedicando-se a trabalhar como químico no laboratório de uma cervejaria. Ali, interessou-se pelos dispositivos mecânicos de evacuação de recipientes, o que o levou ao desenvolvimento de novos tipos de bombas de vácuo. Os trabalhos com a tecnologia do vácuo o aproximaram novamente da vida acadêmica, passando a interessar-se pelo estudo,

No final de 1909 foi convidado por Thomson, então já uma celebridade, para trabalhar como seu assistente nos laboratórios Cavendish, na Universidade de Cambridge, em um estudo sobre os raios canais, ou raios positivos. É nesse período, até o início da Primeira Guerra Mundial, em 1914, que Aston encontrou evidências da existência de dois isótopos do neônio

então dominante na química, dos fenômenos resultantes das descargas elétricas em tubos com gases rarefeitos. Retornou então, em 1903, com uma nova bolsa de estudos, para a já

denominada Universidade de Birmingham. Seu intuito era investigar, sob a orientação de Poynting, as propriedades do "espaço escuro de Crookes", uma região sem luminosidade que aparecia na trajetória dos raios catódicos durante as descargas nos tubos de Crookes. Aston obteve evidências que corroboraram a explicação dada por sir J.J. Thomson de que o referido espaço escuro era uma região de partículas positivas

movendo-se em direção ao cátodo. Como consequência de tais estudos, descobriu ainda um outro espaço escuro, quase imperceptível, próximo ao cátodo, que viria a ser denominado "espaço escuro de Aston". No final de 1909 foi convidado por Thomson, então já uma celebridade, para trabalhar como seu assistente nos laboratórios Cavendish, na Universidade de Cambridge, em um estudo sobre os raios canais, ou raios positivos. É nesse período, até o início da Primeira Guerra Mundial, em 1914, que Aston encontrou evidências da existência de dois isótopos do neônio.

Como começaram, no entanto, os estudos sobre a existência dos isótopos? E como veio Aston a inserir-se numa tradição de pesquisas — e disputas — já existentes, àquela época, sobre esse tema?

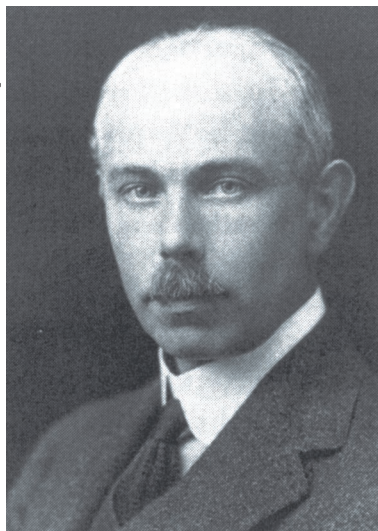
A polêmica sobre o segundo postulado de Dalton

Nossa história pode ser reconstituída, em boa parte, com base nos próprios escritos de Aston, como o trabalho por ele publicado na revista *Nature*, no início do século, intitulado "Isotopes and atomic weights" ("Isótopos e pesos atômicos"), assim como no discur-

so de apresentação do Prêmio Nobel de Química de 1922. Acompanhar tal história pode fornecer ao professor uma visão mais ampla para focar as próprias dificuldades encontradas por seus alunos na utilização da idéia da existência de isótopos.

Aston lembra-nos que o segundo postulado da teoria atômica, enunciado por Dalton em 1801, estabelecia que: "átomos de um mesmo elemento são semelhantes uns aos outros e iguais em peso". Por mais de um século essa concepção foi hegemônica entre os atomistas e, embora tenha sido superada devido aos trabalhos de Aston, parece muito semelhante às idéias freqüentemente encontradas entre estudantes, segundo dados de nossas próprias pesquisas. Se isso é um fato, conhecer um pouco do caminho que levou a seu abandono pode ser de alguma utilidade para os professores.

Apesar de o segundo postulado de Dalton ter sido aceito pelos atomistas, no século XIX, como algo dogmático, uma série de dificuldades, originariamente não relacionadas ao mesmo, foram sendo acumuladas. A questão ligava-se à inexplicável variação dos valores determinados experimentalmente para os pesos atômicos dos elementos. Por maior que fosse o rigor experimental adotado, algo que de início parecia fruto de simples erros nas medições insistia em manter-se inalterável. A questão não poderia ser resolvida simplesmente com medições mais acuradas — era necessária uma autêntica mudança conceitual, uma nova maneira de interpretar os dados das observações experimentais. Em outras palavras, o problema estava na teoria que conferia significado aos dados experimentais coletados. Munidos da crença no segundo postulado de Dalton, a maior parte dos químicos e físicos do século XIX tentou justificar os desencontros nas determinações experimentais dos valores dos pesos atômicos de um mesmo elemento por meio de fórmulas estatísticas que dessem conta daquelas flutuações. As observações, carregadas da teoria vigente à época, indicavam exatamente que os valores dos pesos atômicos de um mesmo elemento — por pressu-



Aston em 1922, ano em que ganhou o Prêmio Nobel de Química.

postos considerados iguais entre si — estavam flutuando segundo uma estatística a ser identificada. A idéia de que átomos de um mesmo elemento pudessem ter efetivamente pesos diferentes e que as flutuações experimentais observadas pudessem ser interpretadas como flutuações na distribuição de tais átomos, e não nos erros experimentais das medidas, era algo que necessitava de um salto conceitual revolucionário.

Na verdade, as grandes descobertas não são feitas necessariamente quando novos fatos experimentais são encontrados, mas, no mais das vezes, quando dados experimentais já conhecidos são enquadrados em uma nova estrutura teórica que lhes confere um novo significado. E isso, tanto do ponto de vista do desenvolvimento da ciência quanto da educação, é sempre um enorme desafio. Não existe talvez tarefa mais difícil do que pedir a alguém que veja de um modo completamente diferente um conjunto de coisas que já esteja acostumado a interpretar de determinada maneira, pois é necessária uma transformação na própria mente do observador. Os educadores adeptos da mudança conceitual teriam talvez mais a aprender com o estudo das investigações históricas do que com uma corrida desenfreada ao pote dos 'experimentos cruciais'. Isso não significa em absoluto negar o enorme valor dos experimentos na ciência. A questão é que a compreensão de tais

experimentos tem sempre uma carga teórica interpretativa que a investigação histórica pode nos revelar, e que é costumeiramente negligenciada nas salas de aula. É exatamente por isso que parece bastante educativo acompanhar a história do desenvolvimento da crise do segundo postulado de Dalton, do aparecimento das dúvidas e das disputas interpretativas até a síntese revolucionária provocada pelas novas evidências apresentadas por Aston. Embora a história não possa, evidentemente, ser tida como a solução dos problemas pedagógicos no ensino das ciências, ela pode conferir o necessário apoio para a interpretação das diferentes maneiras de compreender os experimentos, inclusive em salas de aula. Ignorar essa importância da história seria cair num objetivismo que confere aos experimentos um papel que eles não podem efetivamente desempenhar. Tomemos, por exemplo, a atmosfera do final do século passado — no tocante à interpretação dos experimentos relacionados às relações ponderais —, nas palavras do renomado químico escocês William Ramsay, que viria a ganhar o Prêmio Nobel de Química de 1904 pela descoberta de vários gases nobres.

Em 1897, ano da descoberta da radioatividade, quando Aston era ainda estudante de graduação em Birmingham, Ramsay sintetizava da seguinte maneira, num encontro da Sociedade Britânica para o Avanço da Ciência, a atmosfera de incertezas da época:

"Tem havido inúmeras tentativas para reduzir as diferenças entre os pesos atômicos a uma regularidade por meio da busca de alguma fórmula que possa expressar os números que representam os pesos atômicos, com todas as suas irregularidades. Seria desnecessário

dizer que tais tentativas não têm sido bem-sucedidas. Sucessos aparentes têm sido obtidos à custa de descuidos na precisão e os números reproduzidos não são aqueles aceitos como os verdadeiros pesos atômicos. Tais tentativas, em minha opinião, são fúteis. Mais ainda, a mente humana não pode se contentar com o mero registro de tais irregularidades; ela esforça-se para compreender por que uma tal irregularidade deveria existir (...) Foi lançada pelo professor Schutzenburger, e mais tarde por Crookes, a idéia de que aquilo que denominamos peso atômico de um elemento é uma média; que quando dizemos que o peso atômico do oxigênio é 16, estamos apenas afirmando que o peso atômico médio é 16 — e não é inconcebível que um certo número de moléculas tenha um peso algo maior que 32, enquanto um certo número tenha um peso menor."

A idéia da existência de isótopos, ainda que tal denominação tenha sido introduzida apenas em 1913, por Frederick Soddy, começava já a germinar e a orientar pesquisas que pudessem fornecer evidências de sua existência. Ainda que os velhos resultados estatísticos pudessem ser reinterpretados, baseados agora na idéia da isotopia, isso não parecia, no entanto, convincente para uma parcela representativa dos cientistas. Parecia necessário isolar experimentalmente essas que até então eram 'construções teóricas'. Os primeiros avanços nessa direção vieram dos recentes estudos das transformações dos elementos radioativos, realizados por Ernest Rutherford e seus colaboradores, por volta de 1907. Os dados coletados por Rutherford pareciam indicar a existência de alguns elementos que possuíam propriedades químicas idênticas, para efeitos práticos, mas cujos átomos apresenta-

Embora a história não possa, evidentemente, ser tida como a solução dos problemas pedagógicos no ensino das ciências, ela pode conferir o necessário apoio para a interpretação das diferentes maneiras de compreender os experimentos

vam pesos diferentes. As transmutações, por exemplo, de materiais radioativos em certos tipos de chumbo, com propriedades químicas idênticas mas pesos atômicos diferentes, ofereciam uma classe de evidências que dificilmente poderia ser atribuída a erros experimentais.

Apresentava-se agora, como uma conjectura arrojada, a idéia de que os elementos não-radioativos, aqueles mais comuns para todos nós, pudessem consistir também de misturas de isótopos que fossem inseparáveis pelos métodos químicos tradicionais. E nesse caso, os trabalhos com substâncias radioativas não pareciam ser de grande ajuda.

Aqui entram em cena as contribuições dos estudos das descargas elétricas nos gases rarefeitos, já em desenvolvimento desde o século XIX, abrindo-se um novo flanco na batalha contra o segundo postulado de Dalton. Os trabalhos desenvolvidos por Thomson sobre os raios positivos, ou 'raios canais', em tubos contendo o gás neônio, forneceram um campo de estudos no terreno dos elementos mais leves e não-radioativos. O deslocamento desses raios por campos eletromagnéticos forneceram evidências, pelas curvaturas observadas, de que dois tipos de átomos estariam presentes, com pesos atômicos 20 e 22. Dado que o peso atômico aceito pelos métodos tradicionais era de 20,2, parecia plausível conjecturar que o neônio fosse na verdade uma mistura de dois isótopos, numa proporção tal que justificasse aquele valor tradicionalmente aceito. Porém, as primeiras tentativas de separação parcial por fracionamento não deram bons resultados e a idéia da existência dos isótopos, por mais atraente que pudessem parecer, continuava no plano das conjecturas arrojadas.

É exatamente nessa época, 1909, que surge o convite de Thomson a Aston para trabalhar como seu assistente, na Universidade de Cambridge. Essa aliança marcará, sobretudo, um aperfeiçoamento nos métodos de análise dos desvios eletromagnéticos e na busca incessante dos isótopos.

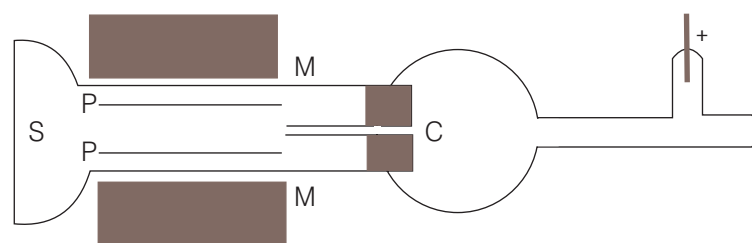
As tentativas de Aston na procura dos isótopos

As primeiras comparações experimentais dos pesos atômicos dos elementos feitas por Thomson com o seu método dos desvios parabólicos dos raios canais submetidos a campos elétricos e magnéticos perpendiculares deram origem, no entanto, a contra-evidências da existência dos isótopos. Assim como a ausência da paralaxe das estrelas havia se constituído inicialmente em uma contra-evidência à revolução copernicana, os primeiros experimentos de Thomson apontavam para um fundamento experimental da não existência dos isótopos não-radioativos. Tanto naquele caso como neste foi a obstinação trazida por uma convicção teórica que fez os pesquisadores perseverarem em suas crenças apesar dos resultados contrários das observações. De fato, submetidos ao teste dos desvios parabólicos no aparelho de Thomson, muitos dos elementos pareciam obedecer ao segundo postulado de Dalton, produzindo parábolas que pareciam provir de grupos de átomos com diferentes velocidades, mas com as mesmas massas. Apenas os inconclusivos resultados com o neônio pareciam alimentar a crença na existência dos isótopos não-radioativos.

Por volta de 1913, Aston obteve os primeiros bons resultados na separação dos isótopos do neônio, utilizando a técnica da difusão, após a realização de milhares de experimentos. Mudanças aparentes de 0,7 nas densidades das frações mais leves e mais pesadas foram, porém, todo o resultado do seu trabalho. Segundo o próprio Aston, no início da Primeira

Guerra Mundial várias linhas de raciocínio já apontavam para a idéia de que o neônio devia ser uma mistura de isótopos, mas nenhuma delas fornecia evidências convincentes para um desenvolvimento tão importante quanto aquele.

Após o final da guerra, embora a teoria dos isótopos já fosse aceita para os elementos radioativos, permanecia ainda como matéria especulativa de debates para os demais elementos. Tendo o método da difusão se mostrado lento e trabalhoso, Aston voltou-se novamente para os estudos dos desvios dos raios positivos em tubos de descarga, aperfeiçoando o aparelho de Thomson. Naquele aparelho, um feixe de partículas positivas, os 'raios canais', era defletido por um campo eletromagnético, formando curvas visíveis, cada uma das quais associada a um certo valor da relação carga/massa da partícula. O grande problema do instrumento estava exatamente nas imagens difusas, que não permitiam mais que uma estatística das densidades dos possíveis isótopos presentes. Aston planejou diversas maneiras para melhorar a calibração do aparelho, conseguindo finalmente um novo arranjo dos campos eletromagnéticos defletores que permitia focalizar os raios defletidos com bastante nitidez sobre uma chapa fotográfica. A necessidade de focalização conduziu Aston ao princípio do espectrógrafo de massa. A principal diferença entre o aparelho de Thomson e o espectrógrafo de Aston estava em que no aparelho de Thomson os campos elétricos e magnéticos eram aplicados de maneira perpendicular e simultânea, enquanto no espectrógrafo eles eram aplicados consecutivamente e



Aparelho usado por Thomson em 1910 para investigar raios positivos ('raios canais'). C é o eletrodo negativo (cátodo). O feixe é defletido pelos pólos MM de um eletroímã e pelas placas paralelas PP conectadas a uma fonte de eletricidade. Este aparelho simples foi o protótipo dos espectrógrafos de massa.

em um mesmo plano. Foi esse novo arranjo das peças já presentes que conduziu à invenção de um novo e revolucionário instrumento. Colimando os feixes das partículas através de fendas e defletindo-os com o novo arranjo do campo eletromagnético, Aston conseguiu obter imagens sobre uma chapa fotográfica que lembravam os espectros obtidos classicamente nas técnicas espectroscópicas ao fazer passar um feixe de luz através de um prisma. Possuía, assim, um registro gráfico, em filme, que lhe permitia, pelo cálculo dos deslocamentos dos raios, tratados como projéteis, determinar a massa das partículas constituintes dos mesmos — daí o nome do novo instrumento: o espectrógrafo de massa.

De posse desse novo instrumento e do conceito de isótopos, Aston pôde, num curto espaço de tempo, determinar as massas de 212 isótopos naturais, estabelecendo assim uma nova classe de evidências que fizeram o velho segundo postulado de Dalton cair rapidamente em descrédito. Ainda assim, as disputas interpretativas não cessaram de imediato, e o próprio Thomson chegou a levantar sérias dúvidas sobre os resultados de Aston. De fato, no final de 1921, em uma reunião da Royal Society, Thomson confessou que não estava plenamente convencido de que formações híbridas nas condições artificiais dos tubos de descarga não pudessem fornecer explicações alternativas aos resultados de Aston e que a não existência significasse necessariamente a evidência dos isótopos não-radioativos. Assim sendo, no caso dos isótopos do cloro, ^{35}Cl e ^{37}Cl , Thomson argumentava que aquele último poderia ser apenas o ClH_2 . Thomson mostrava-se sobretudo céptico quanto à precisão de uma parte em 103 defendida por Aston para seu espectrógrafo. Podemos apenas especular sobre as razões das críticas de Thomson, até então um fervoroso adepto da existência dos isótopos não-radioativos mas subitamente transformado num feroz adversário da mesma. Ainda que fatores psicológicos possam ser invocados na tentativa de explicar a referida disputa, vale salientar que Thomson não estava sozinho naquele debate, tendo apenas sido,

paradoxalmente, o último dos grandes combatentes da idéia dos isótopos não-radioativos, que ele mesmo havia perseguido longamente. A disputa causou uma cisão entre os próprios componentes dos laboratórios Cavendish, tendo Rutherford, que havia sido convidado para trabalhar em Cambridge pelo próprio Thomson, tomado o partido de Aston. Soddy foi mais além, afirmando que os trabalhos de Aston eram “uma das mais brilhantes combinações de análise matemática e habilidades experimentais que este século já produziu”. Soddy, numa clara referência a Thomson, chegou a afirmar ainda que: “não acho que os químicos tenham alguma razão para duvidarem da precisão dos trabalhos de Aston. Nós químicos estamos satisfeitos, mesmo que vocês físicos não estejam”.

Apesar de toda a acesa disputa que marcou a longa história do segundo postulado de Dalton, foi só a partir dos trabalhos de Aston que a denominação de isótopos, cunhada em 1913 por Soddy para explicar as séries radioativas, passou a ter uma aceitação que rapidamente se tornaria hegemônica, embora a busca pelos isótopos dos elementos estáveis ainda se prolongasse por mais de 30 anos. A composição isotópica de alguns elementos estáveis só veio a ser encontrada na década de 50, mas a maior parte dos isótopos estáveis já havia sido descoberta na década de 20.

A idéia de isótopos como átomos de massas diferentes mas com as mesmas propriedades químicas, e que por isso ocupariam o mesmo lugar na tabela periódica, passou a ser aceita desde então de forma tão dominante que ganhou contornos de lugar-comum. Aquilo que por muito tempo pareceu a vários cientistas de renome um autêntico absurdo e que requereu um intenso esforço e uma acesa disputa para seu estabelecimento, em meio a uma crítica vigorosa, foi sendo incorporado ao ensino como algo de aspecto quase trivial. Não é à toa portanto que, retirado do contexto histórico que lhe deu origem, o conceito de isótopo seja tão fácil de ser enunciado pelos professores quanto de ser esquecido pelos estudantes, que em

última instância se recordam da definição tal como nos lembramos de um verso, sem se dar conta da extensão das conseqüências que tal conceito carrega.

Professores interessados em que seus alunos compreendam de maneira mais significativa precisariam, portanto, fazer um esforço para romper o apego inegável exercido por convicções semelhantes ao segundo postulado de Dalton, entre seus alunos, em vez de presentear-los com uma definição historicamente descontextualizada do que são isótopos. Se evitarmos o risco de apresentar as respostas antes que as perguntas tenham sido ao menos identificadas, a história da ciência com certeza será uma importante contribuição ao ensino.

Alexandre Medeiros, licenciado em física pela UFPE, mestre em ensino de física pela USP e doutor em educação em ciências pela Universidade de Leeds, Inglaterra, é professor da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Notas

1. Trabalho apresentado no II Encontro Nacional de Pesquisa em Educação nas Ciências (Valinhos, set. 1999) sob o título: “Com isótopos na mente e Dalton no coração”. Para interessados nos detalhes das entrevistas realizadas, o CD com as atas do encontro encontra-se disponível para venda na secretaria da Abrapec (abrapec@if.ufrgs.br).

2. Embora modernamente seja importante estabelecer a conceituação de massa atômica, em lugar de peso atômico, como fazemos nas conceituações mais recentes apresentadas no presente texto, nas incursões históricas adotamos a denominação mais antiga de peso atômico em respeito às interpretações da época. É importante, nesse sentido histórico, destacar o próprio título do célebre artigo de Aston: “Isotopes and atomic weights”, assim como o trecho mencionado do discurso de Ramsey. Desse modo, não há por que nos prendermos exclusivamente à denominação atualmente consagrada de massa atômica, se quisermos estar mais atentos à questão histórica.

Referências bibliográficas

ASTON, F. The structure of the atom. In: Andrade, E.N., org. *Science: a course of selected readings by authorities*. Londres: International University Press, 1957.

BOORSE, H.; MOTZ, L. e WEAVER, J. *The atomic scientists: a biographical history*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1989.

BROCK, W. Aston, isotopes and the mass spectrograph. In: Brock, W.; Chapple, M. e Hewson, M., orgs. *Studies in physics*. Leicester: Hulton Editorial, 1972.

ELYASHEVICH, M.; GAPANOV-GRAKHOV, A.V.; GINZBURG, V.L., GOLDANKII, V.I.; LETOKHOV, V.S.; RABINOVICH, M.I.; SHANTOROVICH, V.P. e TRIFONOV, D.N. *Physics of the 20th century: history and outlook*. Moscou: Mir Publishers, 1987.

PAIS, A. *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. Oxford: Oxford University Press, 1988.

TRIGG, G. *Landmark experiments in twentieth century physics*. Nova Iorque: Dover Publications, 1995.

WEINBERG, S. The discovery of subatomic particles. Nova Iorque: W.H.

Freeman and Company, 1990.

Para saber mais

GLADKOV, K. *A energia do átomo*. Trad. P. Graça. Lisboa: Portugália Editora, 1969.

FRISCH, O. *A natureza da matéria*. Trad. J.C. Ferreira. Lisboa: Editorial Verbo, 1973.

SEGRÉ, E. *Dos raios X aos quarks. Físicos modernos e suas descobertas*. Brasília: Editora da UnB, 1987.

TAYLOR, J. *La nueva física*. Trad. E. Paredes. Madrid: Alianza Editorial, 1984.