

Fusão a frio, esperanças e dúvidas

A busca de novas fontes de energia é uma preocupação permanente do homem. Na atualidade, para suprir uma demanda crescente, usam-se largamente usinas térmicas convencionais (a óleo ou a gás) ou não convencionais (reatores nucleares). Neste último caso, a energia é liberada pela fissão de núcleos atômicos pesados, processo muito questionado, seja pelos riscos de acidente, sempre presentes, seja pela indesejável produção de rejeitos radioativos.

Outro processo possível para a produção de energia nuclear é a fusão, que ocorre no Sol e nas demais estrelas. Trata-se neste caso de uma reação que envolve núcleos leves, que liberam grande quantidade de energia ao se fundirem em núcleos mais pesados. Imensas dificuldades impedem que o processo de fusão — muito mais limpo do que o de fissão — seja cogitado, em termos de curto prazo, para a produção de energia com fins pacíficos.

Para que uma reação nuclear ocorra, é necessário que os núcleos atômicos se aproximem a ponto de permitir a ação das chamadas 'forças fortes', cujo alcance é da ordem de um fermi, ou seja, 10^{-13} centímetros. Nas condições normais em que a matéria existe em nosso planeta, a nuvem de elétrons que envolve cada núcleo atômico impede que estes se aproximem tanto uns dos outros. Não há para isso solução trivial. Os átomos não são 'compactos': o diâmetro dos núcleos é muito pequeno, mesmo quando comparado a outras distâncias atômicas, como aquela que os separa da nuvem eletrônica. Por isso, para que os núcleos se aproximem e possam interagir é necessário que a temperatura ambiente seja muito alta ou — o que, do ponto de vista da física, é a mesma coisa — que eles recebam muita energia cinética, como ocorre nos potentes aceleradores de partículas.

Em 23 de março passado, os químicos Martin Fleischmann (da Universidade de Southampton, na Inglaterra) e Stanley Pons (da Universidade de Utah, nos Estados Unidos) anunciaram a descoberta de um novo caminho para produzir fusão nuclear. Segundo eles, haveria reações deste tipo em núcleos de deutério (um isótopo pesado do hidrogênio) colocados no interior do paládio (um metal). Uma semana depois, um grupo liderado por S.E. Jones (da Universidade de Brinham Young, também em Utah) e J. Rafelski (da Universidade do Arizona) anunciaram que também haviam

observado o fenômeno. Houve ceticismo: aparentemente era um caminho simples demais para se chegar a um precioso resultado, até aqui perseguido por pesquisas caríssimas, que envolvem a criação de ambientes com temperaturas de milhões de graus. Nas últimas semanas, no entanto, instituições de diversos países repetiram a experiência e — embora ainda persistam dúvidas importantes sobre o que de fato se passa — confirmaram os resultados anunciados. Foi reforçada a expectativa de que eles envolvem processos nucleares (e não apenas químicos). Mesmo assim, ainda não se pode confirmar a existência de fusão, que se manifesta através das seguintes evidências: alta taxa de geração de calor, produção de dois isótopos de hélio (He^3 e He^4) e um de hidrogênio (H^3 , ou trítio), emissão de nêutrons e radiação gama.

Os aspectos gerais das experiências foram amplamente divulgados pela imprensa. Os autores utilizaram um método muito conhecido — a eletrólise — para bombear átomos de deutério para o interior do paládio. Até aí, nada de novo: trata-se de um procedimento bem conhecido. A propriedade de absorção de hidrogênio (ou de deutério) pelo paládio é utilizada normalmente em certos equipamentos, para que se faça o controle da quantidade desses átomos leves presentes em um recipiente fechado. Do ponto de vista experimental, a novidade foi a monitoração de partículas nucleares durante a eletrólise.

As observações independentes das duas experiências levaram a resultados convergentes sobre as taxas de emissão de nêutrons durante a eletrólise (isto é, durante a introdução de deutério na estrutura do paládio). Foram observados nêutrons em quantidades suficientes para diferenciá-los daqueles que existem normalmente no ambiente onde se fizeram as experiências. Pons e Fleischmann constataram ainda a liberação de um excesso de calor, fenômeno interpretado como decorrente de algum processo não associável à eletrólise.

Em artigo que submeteram ao *Journal of Electroanalytical Chemistry*, os dois pesquisadores listam uma série de questões que não sabem responder. A primeira: como é possível que átomos de deutério aglomerados no interior do paládio, caracterizados por energia de equilíbrio termodinâmico de apenas um elétron-volt (1 eV), possam participar de um processo de fusão nuclear?

Para que se visualize o porquê dessa perplexidade, basta saber que a energia necessária para aproximar dois núcleos de deutério é de 140.000 eV! Pons e Fleischmann discutem essa intrigante questão, apelando para um efeito quântico — chamado efeito de tunelamento — que possibilita um dramático aumento na probabilidade de ocorrência de fusão cada vez que ocorre uma diminuição, mesmo pequena, da distância entre os dois núcleos.

O tunelamento, no entanto, não é um processo eficiente. Para explicar as taxas de detecção de nêutrons, Jones e Rafelski estimam que seria necessária uma frequência entre 10^{-23} a 10^{-20} fusões por par de dêuterons por segundo. Esta estimativa traz outra implicação instigante: se for verdadeira, a distância média entre núcleos do deutério confinados no interior do paládio teria que cair para a metade do valor encontrado no caso de moléculas livres. Que causas físicas possibilitariam essa variação no volume de uma molécula de deutério?

Mas há mais surpresas. Quando se comparam o calor emitido e as taxas de partículas nucleares observadas, os resultados não são coerentes, podendo-se constatar um excesso de energia. Se isto for atribuído à fusão de núcleos de deutério no interior do paládio, chega-se a uma taxa da ordem de 10^{11} a 10^{14} fusões por segundo. Mas a contagem de nêutrons emitidos é compatível com a ocorrência de apenas 10^4 fusões por segundo. Note-se bem: a discrepância é da ordem de cem milhões de vezes! Os autores chegaram a propor que, nas condições da experiência, podem ocorrer reações nucleares 'não convencionais', até hoje não percebidas e descritas. É uma idéia ousada, pois a comunidade científica estuda detalhadamente esse tipo de reação há mais de 40 anos.

A baixa detecção de nêutrons pode ser causada por uma absorção dessas partículas pelo próprio material que integra as experiências (por exemplo, absorvendo um nêutron ainda dentro do paládio, o deutério pode formar o trítio). Deve-se salientar, entretanto, que podem existir reações nucleares não caracterizadas por processos de fusão. Elas podem mascarar ou mesmo simular algumas dessas evidências. Se é verdade que isso exige cautela a respeito da idéia de que a introdução do deutério no interior do paládio produza fusão nuclear em temperatura ambiente, não é menos

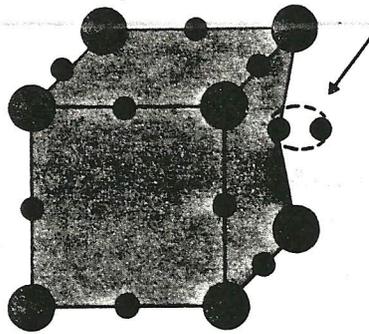
verdade que a série de experiências bem-sucedidas, feitas em março e abril, fez diminuir o ceticismo inicial. Há consenso de que alguma coisa estranha, de natureza nuclear, precisa ser explicada.

As experiências apresentam grande interesse para a compreensão de aspectos relacionados às interações do hidrogênio com a estrutura cristalina do paládio. Os átomos dos materiais metálicos formam sempre unidades tridimensionais — chamadas células unitárias — que se repetem no espaço, envolvidas por nuvens de elétrons. A estrutura cristalina assim formada apresenta grande capacidade de condução de eletricidade e de temperatura. No caso do paládio, a célula unitária é cúbica, com átomos localizados em cada vértice e no centro de cada uma das faces.

Ao penetrarem na estrutura cristalina do paládio, os átomos de hidrogênio (ou de deutério) se alojam com facilidade nos interstícios vazios, existentes entre os átomos do metal, que não formam um conjunto compacto. Diz-se que o hidrogênio está em solução sólida no paládio quando ele ocupa esses espaços interiores, que apresentam forma tetraédrica ou octaédrica, sendo esta última a mais importante para o que nos interessa aqui.

Mas as estruturas cristalinas reais não são perfeitas. Apresentam defeitos que desempenham papéis muito importantes no que diz respeito à interação de elementos químicos. Alguns tipos de defeitos na estrutura dos metais atuam como armadilhas para os átomos de hidrogênio, com os quais esses elementos apresentam forte energia de ligação. O paládio é, sob este aspecto, particular: a maioria dos defeitos de sua estrutura representa uma fonte interna de hidrogênio, pois a energia de ligação dos dois elementos é muito baixa, o que permite fácil liberação do hidrogênio por ativação térmica. Ou seja: são potencialmente móveis os átomos de hidrogênio aglomerados nos defeitos com os quais mantêm baixa energia de ligação.

As interações do hidrogênio com a estrutura cristalina dos metais são estudadas há cerca de cem anos. O curioso é que os defeitos acima citados quase sempre foram vistos como vilões, inclusive porque, por razões não totalmente entendidas, a presença do hidrogênio no interior dos metais é um fator de fragilização e de deterioração das propriedades mecânicas destes elementos. Em alguns materiais, esse efeito fragilizante é muito forte: se o hidrogênio se alojar nas estruturas do ferro (ou do aço co-



A figura mostra a disposição cúbica dos átomos de paládio (círculos maiores) e a localização dos átomos de deutério (círculos menores), numa situação em que estes ocupam todos os sítios octaédricos, formando uma solução em que os dois elementos estão na proporção um para um. Se um átomo de deutério se desloca para o sítio do outro, a rede cristalina se deforma e resulta uma situação, assinalada pela seta, favorável à ocorrência de fusão nuclear, pois a distância entre eles seria suficientemente pequena para tornar significativa a probabilidade de ocorrência do efeito de tunelamento.

mum) em proporções pequeníssimas (algumas partes por milhão, em peso), estes materiais perdem a capacidade de suportar cargas relativamente leves. A pequena dimensão do átomo de hidrogênio é uma das razões deste fato: muito móvel, ao penetrar na rede cristalina ele caminha por difusão (sob a forma prótonica), trocando posições entre sítios intersticiais adjacentes até segregar-se junto aos defeitos da rede. Por isso, ele nunca se distribui homogeneamente na estrutura cristalina, permanecendo agrupado em regiões próximas dos defeitos. Em algumas situações, esse fenômeno é autocatalítico: quanto mais hidrogênio estiver disponível, mais ele se concentrará nas proximidades de um defeito. Inicialmente, isso contribuirá para equilibrar o campo de tensões elásticas que o defeito causa na rede. Porém, ao ultrapassar uma concentração crítica, o hidrogênio cria enormes tensões compressivas, capazes de fissurar localmente — ou mesmo levar à fratura — metais ou ligas metálicas, às vezes mesmo na ausência de cargas mecânicas externas.

Essa sensibilidade aos efeitos do hidrogênio varia com o tipo de material metálico. Há, como vimos, os extremamente sensíveis. Mas o paládio é um caso à parte: tem enorme capacidade de dissolver o hidrogênio em sua estrutura, podendo suportar elevadas concentrações; além disso, apresenta coeficiente de difusão muito elevado. A partir das experiências recentes, o que se procura responder é se as condições necessárias para a fusão nuclear em temperatura ambiente podem ser criadas pelo tensionamento resultante da presença de elevados teores de deutério localmente concentrados na estrutura do paládio.

Podemos agora recapitular as quatro principais características que marcam a interação dos dois elementos:

a) a enorme capacidade de o paládio absorver hidrogênio em solução sólida. A eletrólise é um método muito eficiente para se introduzirem átomos de hidrogênio (ou de deutério) no paládio, podendo-se chegar a situações em que eles existam na proporção de um para um. Estuda-se a possibilidade de introduzir mais átomos de hidrogênio do que os existentes na estrutura cristalina do metal, situação que talvez seja necessária para a ocorrência da fusão, mas por enquanto isso não foi confirmado;

b) a baixa energia de ligação do hidrogênio com a maioria dos defeitos da rede cristalina do paládio, que servem como fontes internas do primeiro elemento (potencialmente móvel e disponível como elemento ativo no interior da estrutura);

c) o elevado coeficiente de difusão do hidrogênio à temperatura ambiente, o que lhe confere grande mobilidade no interior da estrutura cristalina do paládio;

d) a capacidade de o paládio acomodar tensionamentos internos causados pela presença do hidrogênio, que podem ocasionar variações volumétricas da ordem de 20% (o deutério provoca distorção adicional de 5%).

Excetuando-se os estudos na área de combustíveis sólidos, voltados para obter armazenamento de hidrogênio em alguns metais, a possibilidade de se obter fusão nuclear em temperatura ambiente atribuí, pela primeira vez, papel de mocinho aos átomos de hidrogênio introduzidos na rede. Não se trata, como vimos, de descoberta plenamente comprovada. Até o momento, o que se pode dizer é o seguinte: criaram-se condições nas quais o aumento do efeito de tunelamento possibilitou a observação de um fenômeno de natureza nuclear, que pode ser a fusão de núcleos de deutério no interior do paládio (efeito que se repete com o titânio). Caso essas evidências sejam comprovadas e otimizadas a ponto de permitir sua utilização industrial, estamos testemunhando a descoberta científica mais importante do século, do ponto de vista da sociedade.

Fernando de Souza Barros
Instituto de Física da UFRJ

**Paulo Emílio Valadão de Miranda e
Zieli Dutra Thomé Filho**
Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, UFRJ