

DOS NÚCLEOS AOS AGREGADOS ATÔMICOS

CAMPO MÉDIO E MOVIMENTOS COLECTIVOS

O núcleo é uma democracia, ao contrário de um átomo, esse sítio totalitário dominado pelo núcleo central com mão de ferro. Todos os nucleões participam no governo do núcleo e, perante uma perturbação, podem exhibir movimentos colectivos de vários tipos. O mesmo se passa com os agregados atômicos recentemente descobertos.

CARLOS FIOLHAIS

O físico norte-americano Richard Feynman escreveu um dia que, se tivéssemos de transmitir o essencial sobre o nosso conhecimento do mundo a um extraterrestre perfeitamente ignorante, teríamos de lhe dizer, concisa mas exactamente, que “o mundo é feito de átomos!”.

Esta verdade fundamental, embora intuída por alguns filósofos e poetas da antiguidade clássica (lembramos que por cada poeta que acerta numa verdade científica há uma multidão de outros a errar...), só veio a impor-se lentamente, facto experimental a facto experimental. Embora existisse alguma evidência em favor da realidade dos átomos com base na fenomenologia química, a entrada do átomo na Física foi lenta e penosa. No início do nosso século, a hipótese atômica não passava de pura especulação por nada então se saber sobre a estrutura do átomo. Mas, em 1911, o físico britânico de origem neozelandeza Ernest Rutherford descobre o núcleo, o pequeno coração do átomo, que já antes tinha revelado a sua presença através de toda uma pléiade de fenómenos radioactivos. Passados dois escassos anos, o dinamarquês Niels Bohr elabora o famoso “modelo planetário” do átomo. Os anti-atomistas que ainda não estavam rendidos tiveram, a custo, de ceder.

Conta a lenda que alguém, mal-dosamente, mostrou a Ernst Mach, o físico e filósofo austríaco que se notabilizou na oposição às doutrinas atomísticas (os átomos não existiam

porque ele nunca tinha visto nenhum!), uma amostra radioactiva com brilhantes cintilações, que só podiam vir do interior do átomo. Mach teria pouco depois expirado, poupando-lhe a morte o incómodo de assistir ao triunfo em várias frentes da teoria que afirma a constituição corpuscular da matéria.

De acordo com Bohr, o pequeno núcleo reside no centro e os electrões orbitam velozmente à sua volta. Esse modelo manteve-se no essencial com o amadurecimento da mecânica quântica, em finais dos anos 20, embora a imagem do electrão localizado tivesse de ser substituída pelo conceito de uma nuvem de probabilidade. Não se pode saber muito bem por onde anda o electrão mas, em contrapartida, sabe-se muito bem a respectiva energia. Os níveis de energia dos electrões no átomo estão quantificados, só podendo tomar certos valores bem definidos.

A mecânica quântica veio a revelar-se a teoria não só do átomo mas também do núcleo no seu interior. Continua a aplicar-se, sem quaisquer objecções por parte desse juíz impiedoso que é a experiência, às partículas que constituem o núcleo (os protões e neutrões, designados genericamente por nucleões, os quais, sabe-se hoje, são por sua vez feitos de quarks) ou às partículas produzidas artificialmente em aceleradores de alta energia.

Para o outro lado da escala de distâncias, a mecânica quântica explica o comportamento dos gases, líquidos, sólidos (que mais não são do que arranjos regulares de áto-



Licenciado em Física pela Universidade de Coimbra, doutorado em Física Teórica pela Universidade Goethe, em Frankfurt (Alemanha), Carlos Fiolhais é professor associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia de Coimbra. O seu trabalho científico tem incidido principalmente sobre estrutura e movimentos colectivos de sistemas de muitos corpos, sendo autor ou co-autor de dezenas de trabalhos em revistas internacionais; em 1991 foi professor visitante na Universidade Tulane, New Orleans, EUA. Responsável por um projecto sobre o uso de computadores no ensino da física, autor de numerosos artigos de divulgação científica, tradutor de trabalhos de Feynman, Mandelbrot, Mayer-Kuckuk, etc, publicou recentemente “Física Divertida” (Gradiva, 1991).

mos), macromoléculas biológicas, etc. A equação fundamental da teoria quântica, que tem o nome do físico inglês Paul Dirac, explica, nas palavras do seu autor, toda a Química e quase toda a Física.

De entre os inúmeros exemplos de sucesso que a mecânica quântica tem conhecido, pretende-se aqui apresentar, de modo necessariamente breve e qualitativo, a sua aplicação a sistemas de muitas partículas, sejam estas nucleões no núcleo, ou conjuntos de alguns átomos, sob a forma de agregados (figura 1). Essas estruturas, embora caracterizadas por diferentes escalas de distância e de energia, exibem um princípio de organização a que se convencionou chamar de “campo médio”. Significa isto que constitui boa aproximação tratar as partículas como independentes, movendo-se cada uma delas sob um certo potencial ou campo médio. Numa situação de equilíbrio, o campo médio é estático, mas se por alguma razão, ele for perturbado exteriormente, esses sistemas podem exibir um comportamento colectivo, quer dizer, podem mostrar um movimento de conjunto, coerente e ordenado. O facto de as propriedades dos núcleos e dos agregados atômicos apresentarem notáveis similaridades deve ser visto como um dos triunfos recentes da unidade dos princípios físicos.

A mecânica quântica começou por ser desenvolvida para o átomo. Neste, o núcleo central mantém uma ordem rígida que dificilmente pode ser perturbada, estando os movimentos colectivos dos electrões grandemente dificultados. No entanto, nos núcleos não existe um tal “poder centralizado”, tendo-se revelado profícua a ideia de um campo médio comum, onde se move cada partícula, e de flutuações desse campo. Desde os anos trinta que são conhecidos exemplos de comportamento colectivo dos núcleos atômicos. A cisão nuclear, descoberta no início da Segunda Guerra Mundial e que lhe colocou termo, é um movimento colectivo de grande amplitude. Foi, logo no início, comparada à deformação lenta de uma gota líquida clássica mas acabou, mais tarde, por ser explicada usando o conceito quântico de campo médio. Mais recentemente, descobriram-se nos núcleos vibrações periódicas, de alta energia, que são movimentos colectivos de pequena amplitude, interpretáveis como variações do campo médio.

Conforme o átomo de que são feitos, assim é diferente a natureza dos agregados atômicos, essas estruturas intermediárias entre um átomo e um cristal que só há poucos anos foram produzidas em laboratório. Alguns deles podem ser descritos, à imagem e semelhança dos núcleos, recorrendo ao conceito de campo médio. Os agregados de hélio, a temperaturas próximas do zero absoluto, serão pequenas gotas aparentadas aos núcleos, pese embora a grande diferença dos constituintes e das dimensões do conjunto. Contudo, a informação experimental sobre eles ainda é bastante escassa e fragmentada, tornando-se necessário

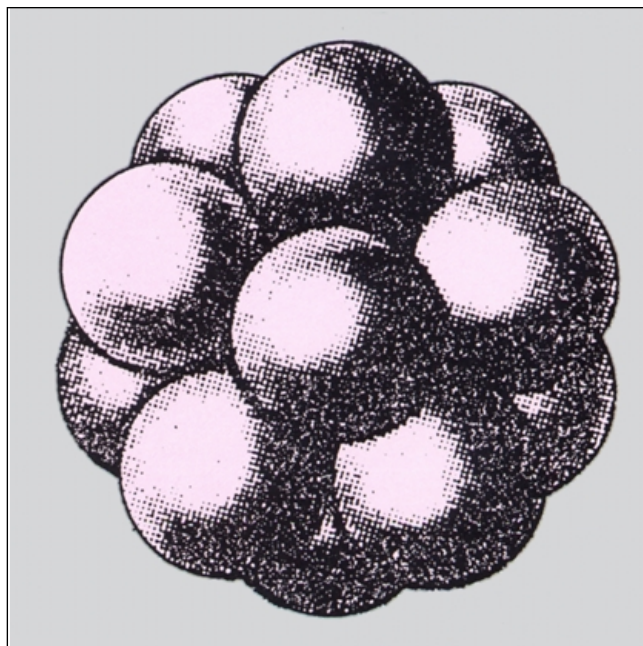


Fig. 1 – Representação esquemática de um núcleo ou de um agregado atômico. Os constituintes são, no primeiro caso, nucleões e, no segundo caso, átomos.

aguardar pelo desenvolvimento de técnicas experimentais mais sofisticadas. Pelo contrário, os agregados de elementos metálicos (como o alumínio, o sódio ou o céscio) são hoje facilmente sintetizados. Nestes, os electrões livres obedecem ainda a um princípio de organização análogo ao dos nucleões no núcleo. Não é, portanto, de estranhar que apresentem, perante uma excitação exterior, um tipo de resposta que faz lembrar, em vários aspectos, a que é fornecida por um núcleo.

Em mecânica quântica, o estado energético de um sistema é caracterizado por um conjunto de números, chamados quânticos. Conhecidos esses números, sabe-se com exactidão a energia do sistema. Partículas materiais como os electrões, os protões e os neutrões são chamadas fermiões e obedecem ao princípio de Pauli (do nome do físico suíço, nascido na Áustria, Wolfgang Pauli), segundo o qual um nível energético individual não pode ser ocupado por mais do que dois fermiões. Um par de fermiões no mesmo estado tem “spins” opostos, sendo o “spin” uma propriedade intrínseca de uma partícula, análoga à rotação interna de uma partícula clássica mas cuja justificação é apenas quântica. Dado um certo conjunto de fermiões independentes, os níveis de energia possíveis num certo potencial são preenchidos por ordem de energia crescente. O potencial é uma construção teórica extremamente útil que, em mecânica clássica, está directamente relacionada com a força e, em mecânica quântica, permite determinar os níveis de energia de um sistema. Os fermiões não podem, por conseguinte, acotovelar-se promiscuamente no mesmo estado energético. Tudo se passa como num hotel onde é interdito alojar mais de

dois hóspedes no mesmo quarto. O princípio de Pauli é, como veremos, fundamental para explicar a ordem tanto nos átomos como nos núcleos e agregados atômicos.

A ORDEM NOS ÁTOMOS

Nos átomos, cujo tamanho é de alguns Ångstroms ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$), o potencial sentido pelos electrões é da responsabilidade quase exclusiva do núcleo. Trata-se do potencial eléctrico, atractivo, proporcional à carga do núcleo e inversamente proporcional à distância ao núcleo (figura 2). O átomo mais simples é o de hidrogénio, que consiste apenas de um protão, positivo, no centro, e um electrão, negativo, em volta. Neste caso, não faz sentido falar de campo médio (a noção de média exige considerações estatísticas e, portanto, um sistema de várias partículas). O único electrão do hidrogénio pode ocupar diferentes níveis de energia, rotulados por números quânticos que são característicos do potencial eléctrico. O electrão quando muda de nível efectua um “salto” energético. Ganha energia se “sobe” (recebendo luz) e perde energia se “desce” (emitindo luz). A unidade típica de energia atômica é o electrão-volt (eV), extraordinariamente pequena quando comparada com as energias comuns da nossa vida quotidiana ($1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$).

No caso de átomos com vários electrões, estes últimos não são independentes, em virtude da respectiva repulsão eléctrica. Constitui, porém, uma boa aproximação considerar os electrões independentes, movendo-se num certo potencial comum. O potencial devido ao núcleo tem então de ser corrigido, levando em conta a interacção entre os electrões. O poten-

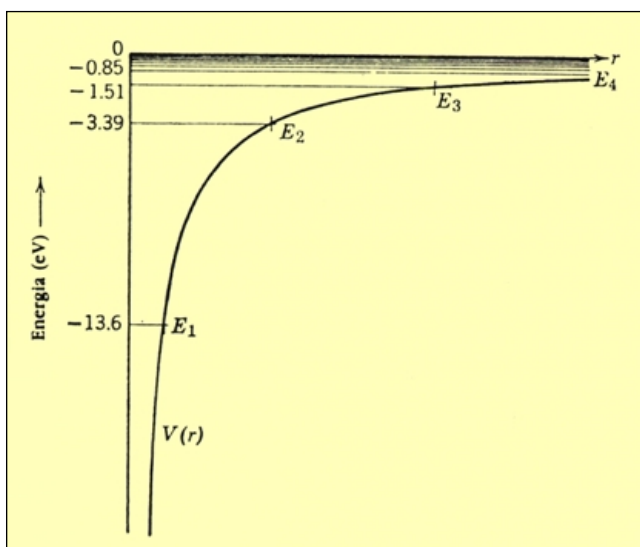


Fig. 2 – Potencial eléctrico do átomo de hidrogénio (inversamente proporcional à distância ao núcleo) e níveis energéticos desse átomo. Os intervalos de energia são cada vez menores à medida que a energia aumenta até que, para energias superiores a zero, surge um contínuo (não representado).

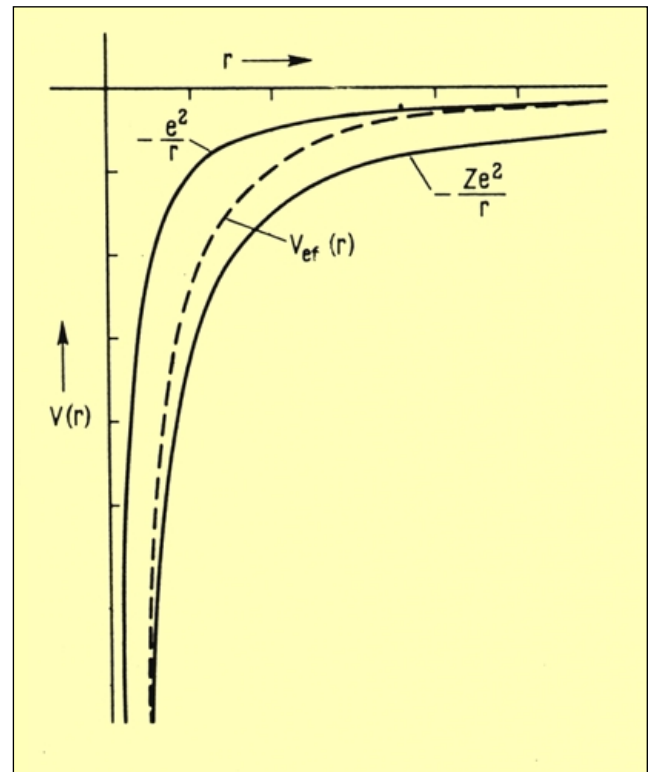


Fig. 3 a) – Potencial efectivo de um átomo com vários electrões.

cial efectivo a que está sujeito um só electrão é, precisamente, o “campo médio”. O princípio de Pauli preside, para cada átomo, ao enchimento dos estados possíveis. O modelo de campo médio é muitas vezes chamado “modelo de camadas”, uma vez que os níveis mais próximos se agrupam em “camadas”. Convém notar que esta imagem de um átomo polieletrónico é uma aproximação: ao contrário do que sucede no problema do átomo de hidrogénio, não existe agora solução exacta.

Vejamus como aparece o campo médio do átomo. O potencial médio varia de átomo para átomo, uma vez que, sendo diferente o número de electrões, é também diferente o efeito de repulsão. Mas, para um electrão nas vizinhanças do núcleo, o efeito de repulsão por parte dos seus parceiros é insignificante comparado com a atracção eléctrica do núcleo de carga Z . Por outro lado, um electrão muito distante tem alguma dificuldade em “sentir” o núcleo (quer dizer, o potencial devido ao núcleo é menos intenso) pelo facto de este estar “tapado” pelos electrões interiores. Designa-se este fenómeno por efeito de “blindagem”. Os $Z-1$ electrões mais interiores “escondem” a maior parte da carga Z do núcleo e o último electrão, lá ao longe, fica sujeito apenas a um potencial devido a uma carga 1, tal como no átomo de hidrogénio (figura 3a).

A partir de um potencial efectivo com essas características e efectuando os cálculos exigidos pela equação quântica fundamental, obtêm-se vários níveis (figura 3b). Chamam-se «números mágicos» aos núme-

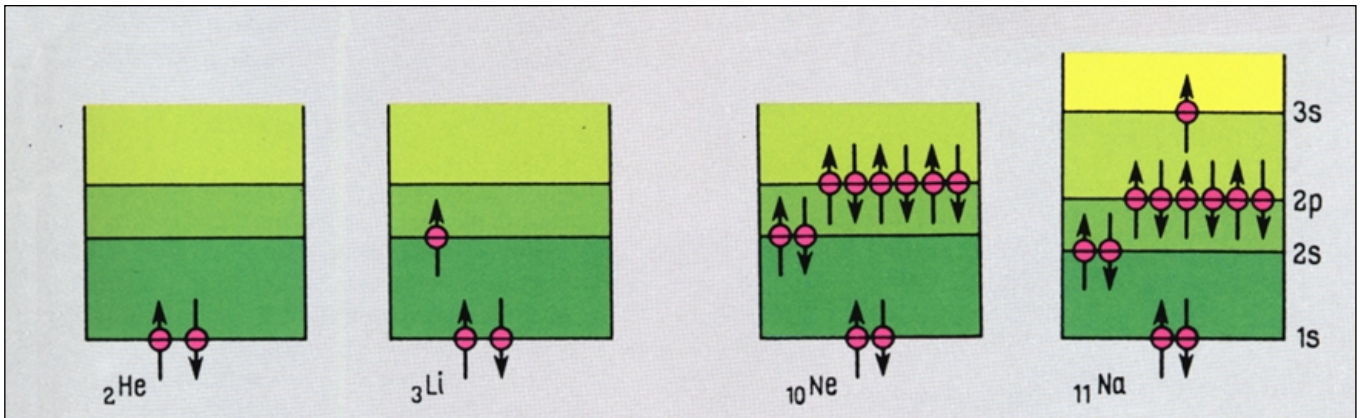


Fig. 3 b) – Esquemas de níveis de alguns átomos – hélio, lítio, néon e sódio – e sua ocupação no estado de mais baixa energia. O hélio e o néon são gases raros, enquanto o lítio e o sódio têm um elétron fora de camadas fechadas. As setas indicam o spin.
 Fonte: T. Mayer-Kuckuk, «Atomphysik», Teubner, Estugarda, 1980.

ros de partículas que correspondem a camadas completas. Os números mágicos para os elétrons são 2, 10, 18, 36, 54, etc. Átomos com esses números de elétrons são dificilmente excitáveis (a camada seguinte à última preenchida está energeticamente distante). Como as reações químicas resultam de rearranjos dos elétrons exteriores, os átomos com números mágicos de elétrons são quimicamente inertes: é o caso do hélio, com 2 elétrons, do néon, com 10, do argônio, com 18, do criptônio, com 36, e do xénon, com 54. Estes elementos aparecem na última coluna da tabela periódica e são conhecidos por gases raros. A energia de ionização – a energia que é necessária para separar o

último elétron – é maior para os gases raros do que para os elementos seus vizinhos (figura 4). A explicação é simples: os gases raros apresentam configurações eletrônicas particularmente estáveis, não sendo fácil arrancar-lhes um elétron.

A ORDEM NOS NÚCLEOS

O átomo tem dimensões muito pequenas comparadas com aquelas que caracterizam o mundo macroscópico mas muito grandes comparadas com as do núcleo. Um tamanho típico de um núcleo é de alguns

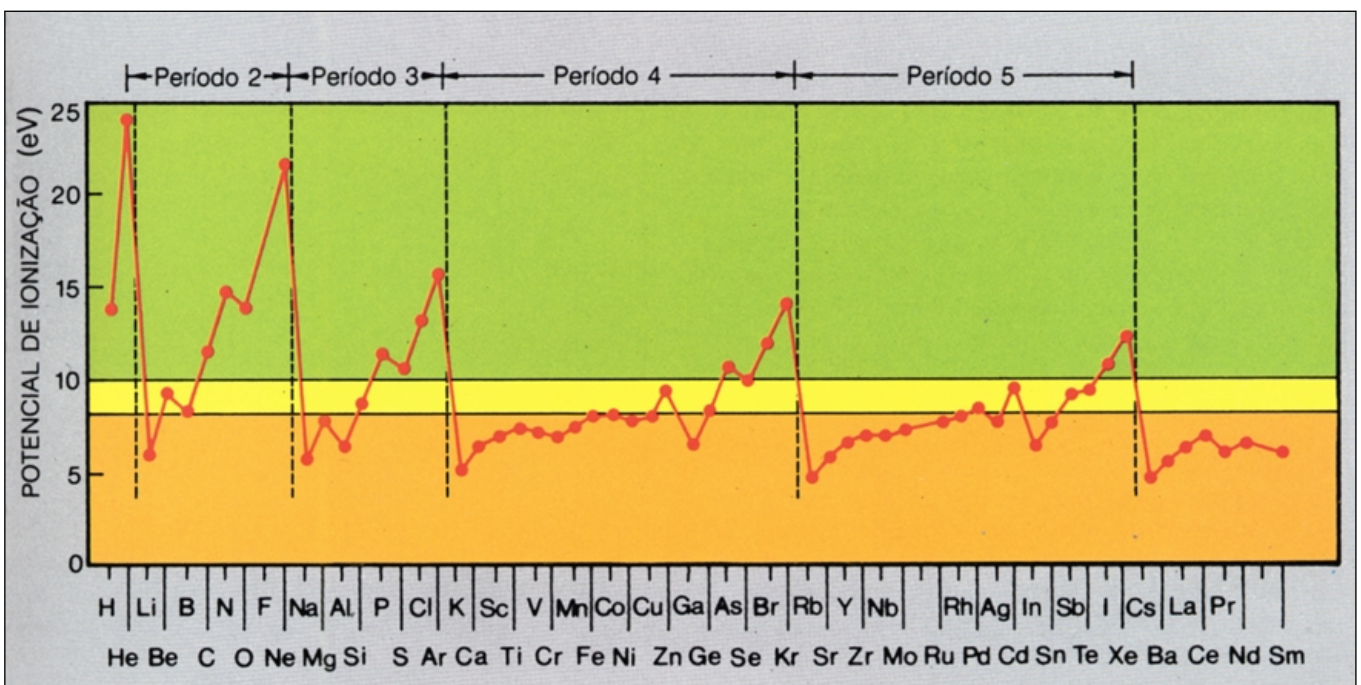


Fig. 4 – Energia de ionização dos elementos da tabela periódica em função do número atômico Z. Notar os máximos para os gases raros, quando Z = 2, 10, 18, 36, e 54.
 Fonte: A. Holden, «The Nature of Solids», Columbia U.P., Nova Iorque, 1965.

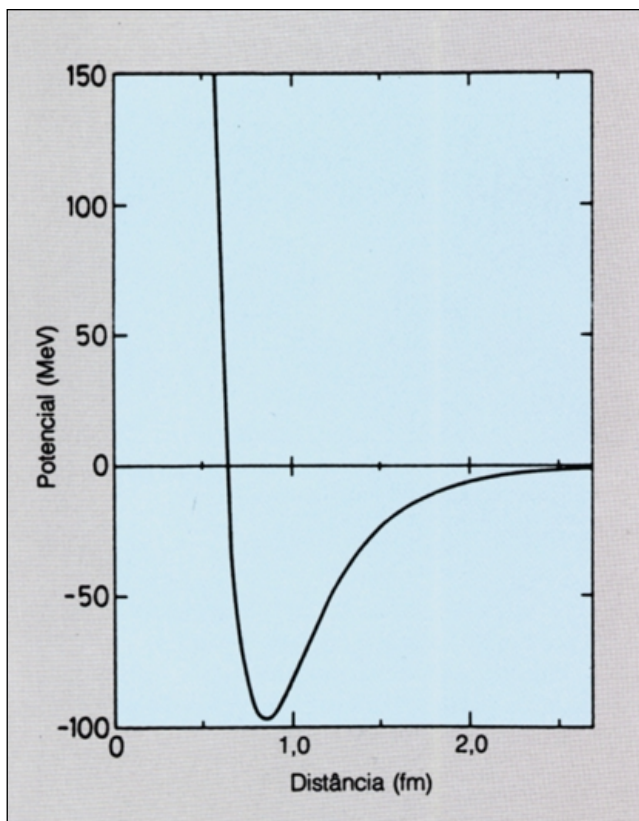


Fig. 5 – Potencial simples representando a interação entre dois nucleões. A força é repulsiva a curtas distâncias (potencial descendente), atractiva a distâncias intermédias (potencial ascendente) e nula a grandes distâncias (potencial nulo).

Fonte: R. Reid, Ann. Phys. 50 (1968) 411.

fermis, sendo $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$. Um núcleo é assim cerca de 10000 vezes menor do que um átomo.

Não obstante essa diferença, a mecânica quântica aplica-se aos núcleos tão bem como aos átomos. Os protagonistas do jogo quântico são agora os prótons e neutrões, que seriam idênticos se não fosse a diferença de carga (o próton é positivo enquanto o neutrão é neutro). Para explicar a coesão do núcleo, é preciso invocar uma força diferente da força eléctrica, uma força forte, suficientemente forte para manter juntos prótons e neutrões no minúsculo núcleo (a repulsão eléctrica entre os prótons levaria, por si só, à desagregação nuclear). Essa força é chamada força nuclear forte. A força entre dois nucleões (prótons ou neutrões) é praticamente nula a distâncias maiores do que 2 fm (figura 5), atractiva a distâncias entre 1 fm e 2 fm, e muito repulsiva para distâncias menores do que cerca de 0,8 fm (dois nucleões não podem, como é evidente, entrar um dentro do outro!). Esta é uma imagem parcial e simplificada da força entre dois nucleões. A força pormenorizada foi determinada a partir de experiências de colisão de um nucleão noutra e das propriedades de núcleos leves, concluindo-se que ela é terrivelmente complicada: a sua descrição exige uma fórmula com dezenas de parâmetros. Hoje em dia, os físicos tentam descrever a força forte a partir da in-

teracção mais fundamental entre os quarks no interior dos nucleões. A força entre dois nucleões é, de certo modo, semelhante à força entre duas moléculas: em ambos os casos se tem uma força entre objectos compostos e complexos.

O núcleo é assim uma colecção de prótons e neutrões interagindo por forças complicadas num espaço muito restrito. Poder-se-ia, portanto, pensar que os constituintes nucleares estivessem sempre a colidir, tal como as moléculas de um líquido normal. Mas os nucleões são fermiões e o princípio de Pauli encarrega-se de manter a ordem. Proíbe a maioria das colisões, porque os estados finais estão ocupados e, por conseguinte, inacessíveis. Os nucleões não colidem frequentemente porque não têm, no final da colisão, para onde ir. O núcleo pode então ser visto como uma gota de um líquido, mas um líquido muito especial: trata-se de um líquido quântico, formado por partículas que obedecem ao princípio de Pauli.

O núcleo é uma democracia, ao contrário de um átomo, esse sítio totalitário dominado pelo núcleo central com mão de ferro. Todos os nucleões participam no governo do núcleo. Em boa aproximação, os nucleões não sentem qualquer força no interior do núcleo (as forças internucleónicas, quando tomadas em média, anulam-se; ver figura 6). Porém, na periferia, existe um potencial atractivo (os nucleões do interior “puxam” um nucleão periférico, impedindo que este abandone o núcleo). Estamos perante uma situação típica de campo médio: é legítimo considerar os nucleões independentes movendo-se num potencial que é devido a todos. Esse potencial, constante no interior e subindo suavemente para zero na fronteira nuclear é, bem entendido, uma construção teórica. Mas,

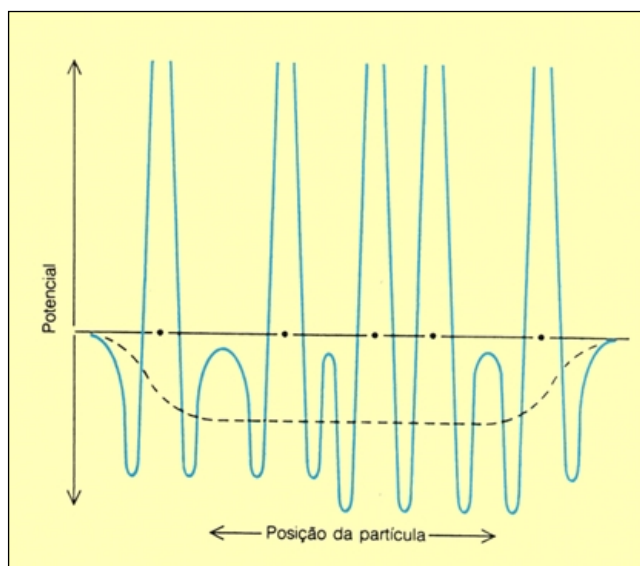


Fig. 6 – Construção do potencial médio a partir das forças entre nucleões do núcleo. A representação aqui é unidimensional, ao passo que a situação real é tridimensional.

Fonte: G. Bertsch, Sci. Amer, May 1983, 40.

como todas as concepções teóricas que triunfam, é eficaz na descrição dos factos experimentais. O problema complicado (e mesmo intratável) de muitos corpos fica reduzido ao problema mais simples (e solúvel!) de um nucleão que se move no seio de um potencial efectivo comum.

Mais rigorosamente, a partícula teórica que se move no campo médio deve ser chamada de quase-partícula. Não se trata de um nucleão sozinho mas de um nucleão imerso no meio nuclear, sujeito ao campo médio devido aos seus companheiros. Enquanto um nucleão real está sujeito a uma força forte, complexa, um quase-nucleão move-se sob a acção de uma força simples, nula no interior do núcleo e muito forte na periferia.

Dois modelos esquemáticos que servem para descrever o potencial nuclear (figura 7) são o oscilador harmónico (o potencial cresce com o quadrado da distância ao centro do núcleo) e o poço rectangular de paredes infinitas (o potencial é constante no interior e sobe verticalmente na superfície nuclear). É no meio

que reside normalmente a virtude: o potencial harmónico não é bom porque impede os nucleões de se escaparem e o potencial rectangular não é bom porque apresenta "esquinas". Os chamados cálculos autoconsistentes, realizados no quadro da aproximação do campo médio, partem de interacções efectivas entre quase-partículas e procuram obter um potencial médio optimizado. O resultado final, qualquer que seja o núcleo, tem uma forma típica: o potencial sobe suavemente para zero a partir de um patamar interior (figura 8a). A densidade correspondente desce para zero a partir de um planalto interior (figura 8b). No modelo de Woods-Saxon, com a forma requerida, os números mágicos, isto é, os números que correspondem ao enchimento de camadas completas, são 2, 8, 20, 40, etc. (figura 7). Encontrou-se, de facto, que os núcleos com 2, 8 e 20 prótons ou neutrões têm propriedades de estabilidade especiais, tal como, em Física Atómica, os átomos dos gases raros. Um núcleo de hélio 4 é duplamente mágico porque tem 2 prótons e 2 neutrões. Um núcleo de oxigénio 16 é duplamente má-

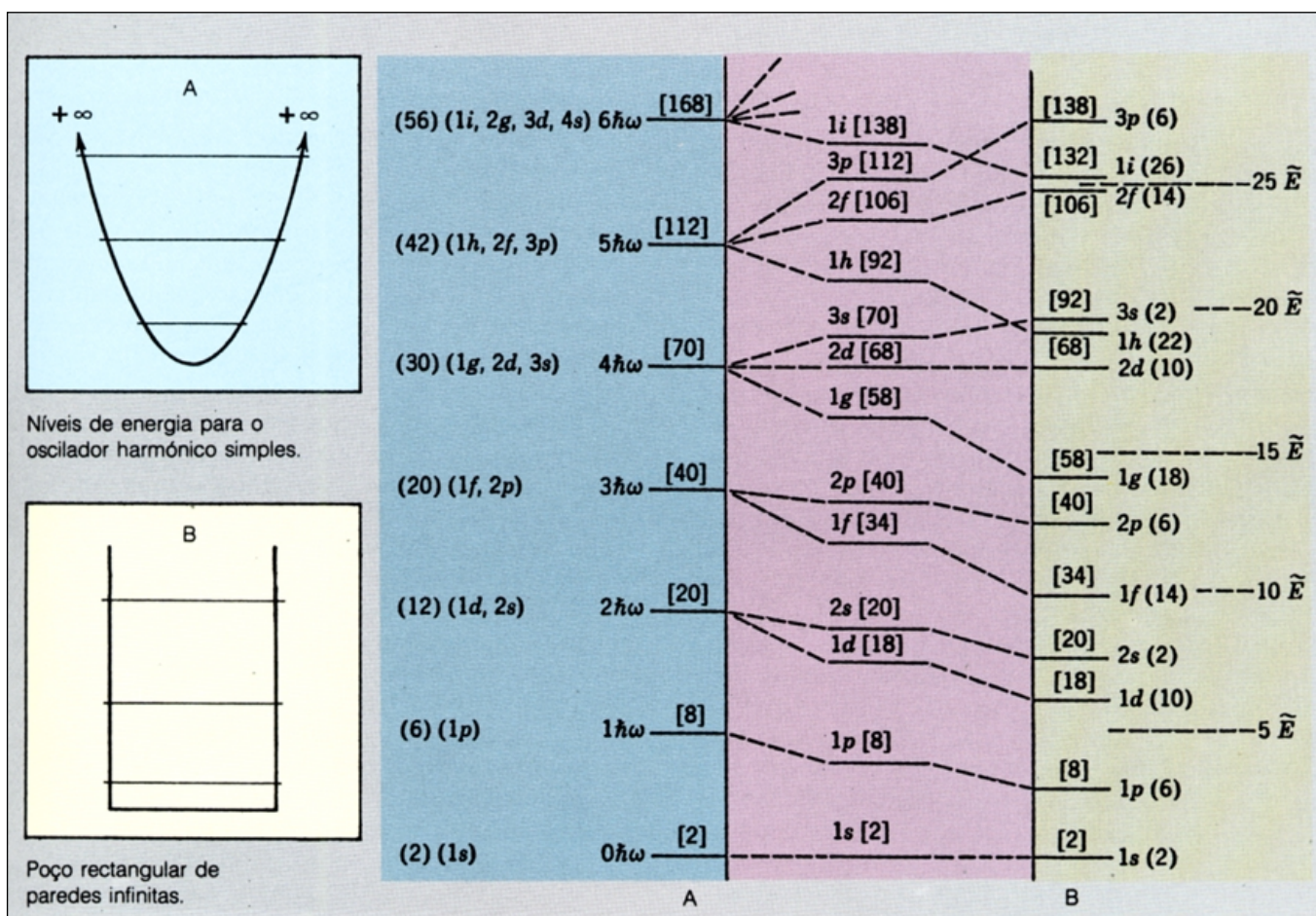


Fig. 7 – Esquemas de níveis de energia para o oscilador harmónico simples (A, acima à esquerda) e para o poço rectangular de paredes infinitas (B, abaixo à esquerda). No meio encontram-se os níveis correspondentes a um potencial intermediário. Entre parêntesis curvos encontra-se o número de partículas que cabem no conjunto de níveis com a energia indicada. Entre parêntesis rectos encontra-se o número total de partículas que podem ser alojadas até ao nível indicado (inclusivê). Os números mágicos para o oscilador harmónico são 2, 8, 20, 40, 70, etc., para o poço rectangular 2, 8, 18, 20, 34, etc., e para o potencial intermediário 2, 8, 20, 40, etc.

Fonte: M. Mayer e J. Jensen, «Elementary theory of nuclear shell structure», J. Wiley, Nova Iorque, 1955.

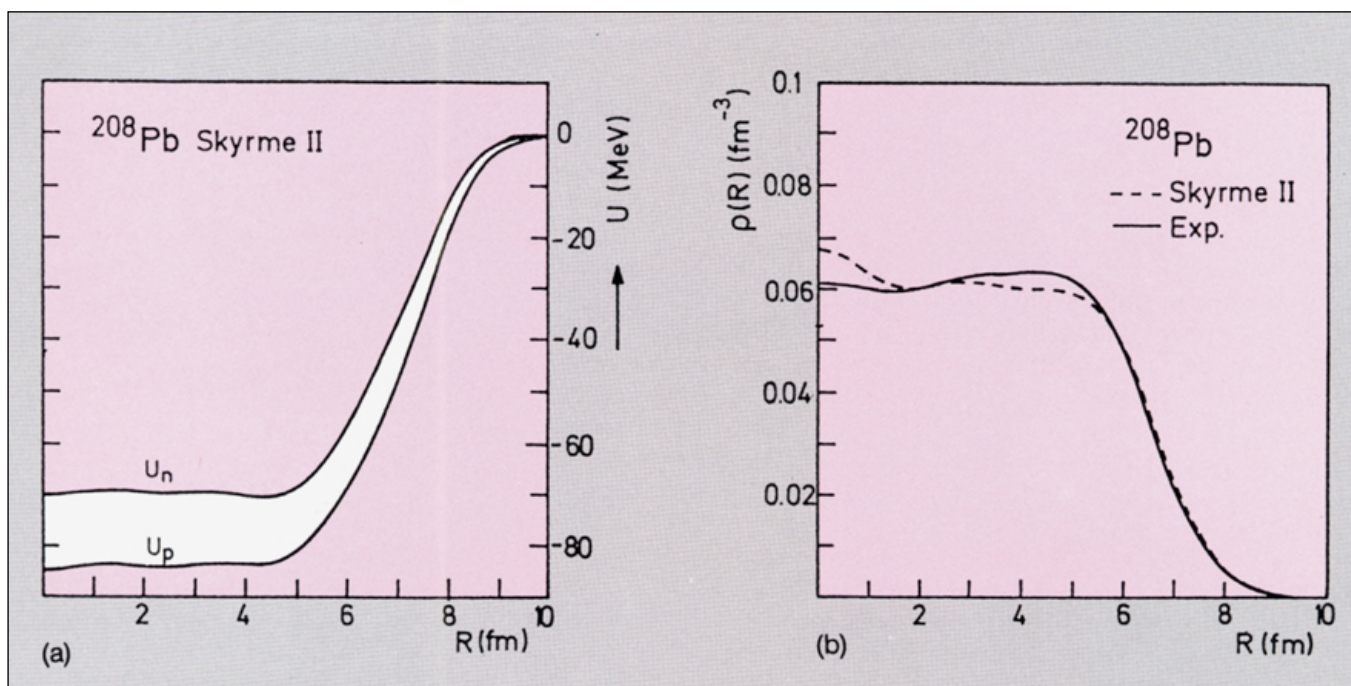


Fig.8 – a) Representação dos potenciais nucleares para neutrões e protões para o chumbo 208, no quadro de uma aproximação de campo médio autoconsistente (usando uma força entre quase-partículas designada por Skyrme II). b) Representação da densidade nuclear correspondente ao potencial anterior e sua comparação com os dados experimentais. O raio nuclear do chumbo 208 é de cerca de 7 fm.
 Fonte: D. Vautherin e D. M. Brink, Phys. Rev. C5 (1972) 626.

gico pois tem 8 protões e 8 neutrões. Um núcleo de cálcio 40 é duplamente mágico já que tem 20 protões e 20 neutrões. A partir do exame das propriedades nucleares verificou-se, contudo, que 40 protões ou neutrões não mostravam estabilidade adicional. Empiricamente, os números mágicos a seguir a 20 são: 28, 50, 82, 126, etc. Por exemplo, o chumbo 208 tem um núcleo duplamente mágico, com os seus 82 protões e 126 neutrões (é, de resto, praticamente o maior núcleo estável que aparece na natureza, já que quase todos os núcleos com massa superior decaem radioativamente vindo parar ao chumbo).

Constituiu um dos grandes avanços da Física Nuclear a conclusão a que chegaram, em 1948, os físicos alemães M. G. Mayer, J. H. D. Jensen, O. Haxel e H. E. Suess de que existia, nos núcleos, uma interacção particular de origem relativista. É a chamada interacção spin-órbita, que também existe nos átomos, embora o seu efeito nestes seja menos relevante. A interacção spin-órbita combinada com o potencial de Woods-Saxon consegue explicar todos os números mágicos superiores a 20 (ver figura 9 na pág. seguinte).

Com a inclusão da interacção spin-órbita, o modelo nuclear de camadas começou a superiorizar-se relativamente aos seus concorrentes no mercado das ideias. O núcleo atómico tinha antes sido considerado uma gota: nos anos 30 o físico alemão Carl von Weizaecker verificou que as energias dos estados de equilíbrio dos núcleos podiam ser bem descritas por uma “fórmula de gota líquida”, onde se somavam termos de volume, superfície e outros (figura 10); o mo-

delo de gota líquida foi generalizado em 1937 por Niels Bohr, tendo sido mais tarde utilizado para explicar a cisão nuclear. O modelo de camadas e o modelo de gota líquida contrastam nas suposições de onde partem e nas imagens que fornecem: o segundo supõe que as partículas nucleares colidem frequentemente, ao passo que o primeiro supõe a quase inexistência de colisões. Hoje sabe-se que o modelo de camadas corresponde melhor à realidade. Com efeito, os nucleões têm um caminho livre médio (distância percorrida, em média, entre duas colisões sucessivas) bem superior ao diâmetro nuclear. Por outro lado, o êxito empírico do modelo de gota líquida, traduzido pelo acordo com a experiência da fórmula de von Weizaecker, é explicável, apesar da concepção errónea que lhe está subjacente sobre a frequência das colisões. O modelo quântico de camadas complementa o de gota líquida, no sentido em que esclarece e elimina as discrepâncias com a experiência deste último. O núcleo é, de facto, um líquido mas um líquido exótico, por obra e graça da mecânica quântica.

Não é de mais encomiar o modelo de camadas. Não se trata de um modelo qualquer, anónimo entre uma multidão de outros, mas “do” modelo nuclear por excelência. As suas previsões têm batido, vezes sem conta, certo com os factos. Por exemplo, o modelo de camadas prevê que núcleos com números mágicos de protões e neutrões sejam esféricos e que núcleos com camadas abertas sejam, mais ou menos, deformados. Com efeito, o campo médio e portanto os níveis de energia individuais mudam com a deformação, poden-

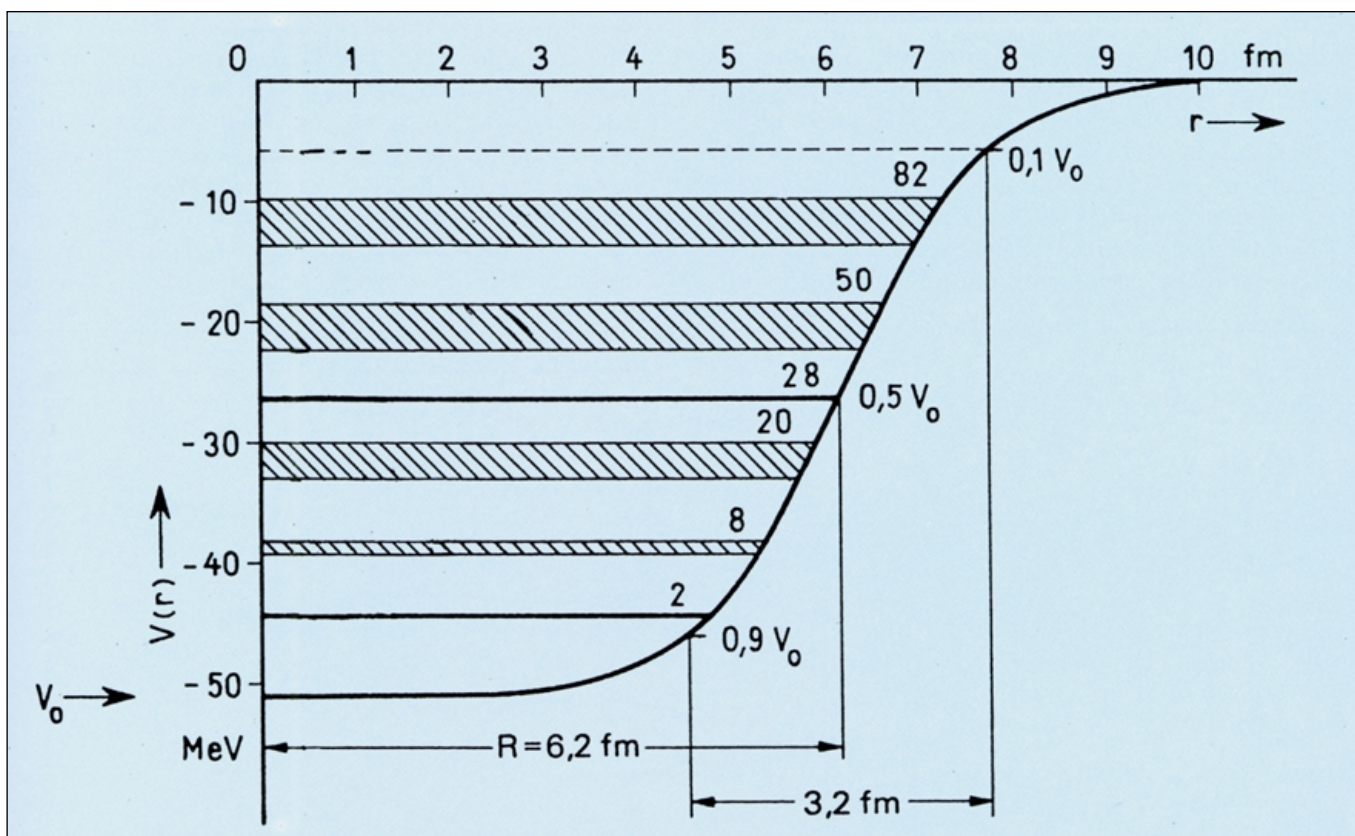


Fig. 9 – Esquema de níveis de neutrões num potencial de Woods-Saxon (considera-se um núcleo com 80 nucleões, cujo raio nuclear é 6,2 fm), incluindo a interação spin-órbita. As zonas a sombreado representam as camadas (agrupamentos de níveis). Os números mágicos são 2, 8, 20, 28, 50, e 82.

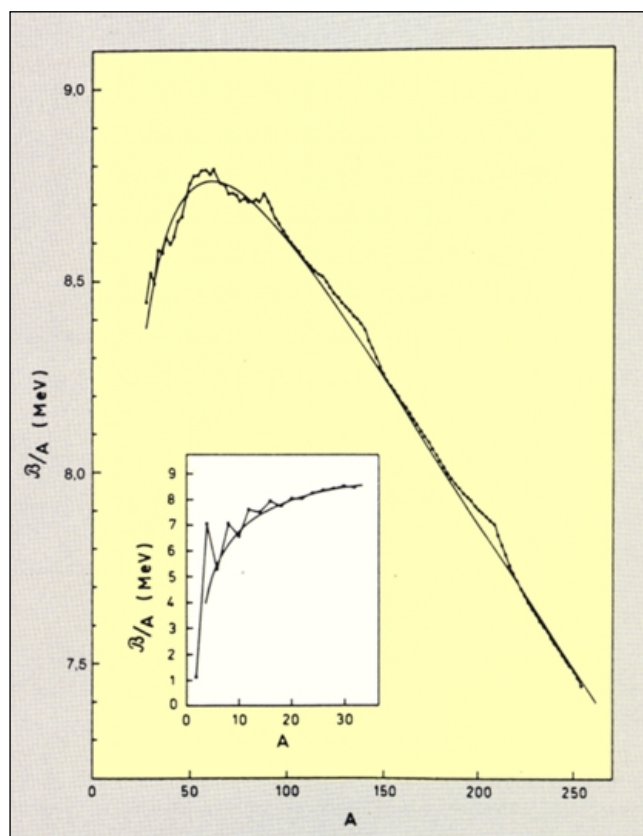
Fonte: T. Mayer-Kuckuk, «Kernphysik», Teubner, Estugarda, 1984.

do acontecer que, para certos números de nucleões, um núcleo alongado tenha uma energia menor do que o mesmo núcleo esférico. Medidas de várias propriedades nucleares confirmaram o vaticínio que o modelo de camadas faz sobre a forma dos núcleos.

Podem-se fornecer mais provas em abono do modelo de camadas. Os núcleos mágicos são particularmente estáveis sendo a sua energia de ligação maior do que a dos seus vizinhos com mais ou menos um nucleão (figura 10). A energia necessária para remover um nucleão (energia de separação) é maior para um núcleo mágico do que para os seus vizinhos. Um dos sucessos recentes do modelo de camadas consistiu na determinação rigorosa da densidade nuclear por meio

Fig. 10 - Energia de ligação nuclear, por nucleão, em função do número de nucleões. A energia de ligação é a diferença entre a energia de um conjunto de nucleões separados e ligados. No quadro interior representa-se a mesma quantidade para núcleos pequenos (repare-se na mudança da escala vertical). Note-se que núcleos muito pesados se cindem porque a energia de ligação por nucleão aumenta. Por outro lado, núcleos leves fundem-se já que então a energia de ligação por nucleão também aumenta. A curva de von Weizsäcker, suave, corresponde a uma média da informação experimental, em zigue-zague. Núcleos com números mágicos de prótons e/ou neutrões têm energias de ligação por nucleão superiores à média.

Fonte: A. Bohr e B. Mottelson, «Nuclear Structure», vol. I, Benjamin, Nova torque, 1969.



da colisão de electrões de alta energia em núcleos pesados (figura 11). A diferença entre, por exemplo, as densidades de carga do chumbo 206 e do tálio 205 corresponde, em boa aproximação, à orbital (distribuição de probabilidade) do protão exterior, tal como é antecipado pelo modelo de camadas (figuras 12a e 12b). Não se poderia esperar melhor desse modelo.

O movimento colectivo de um sistema quântico de muitas partículas consiste de um deslocamento con-

junto e ordenado dos constituintes. Distingue-se de uma excitação de partícula única por envolver, ao contrário desta, vários corpos elementares. Em ambos os casos, a excitação do sistema é devida a uma perturbação exterior. Num núcleo, um exemplo trivial de movimento colectivo consiste na translação do núcleo como um todo no espaço. Um outro exemplo, menos trivial (dá até muito pano para mangas!), é a rotação de um núcleo deformado. Mas os exemplos que nos

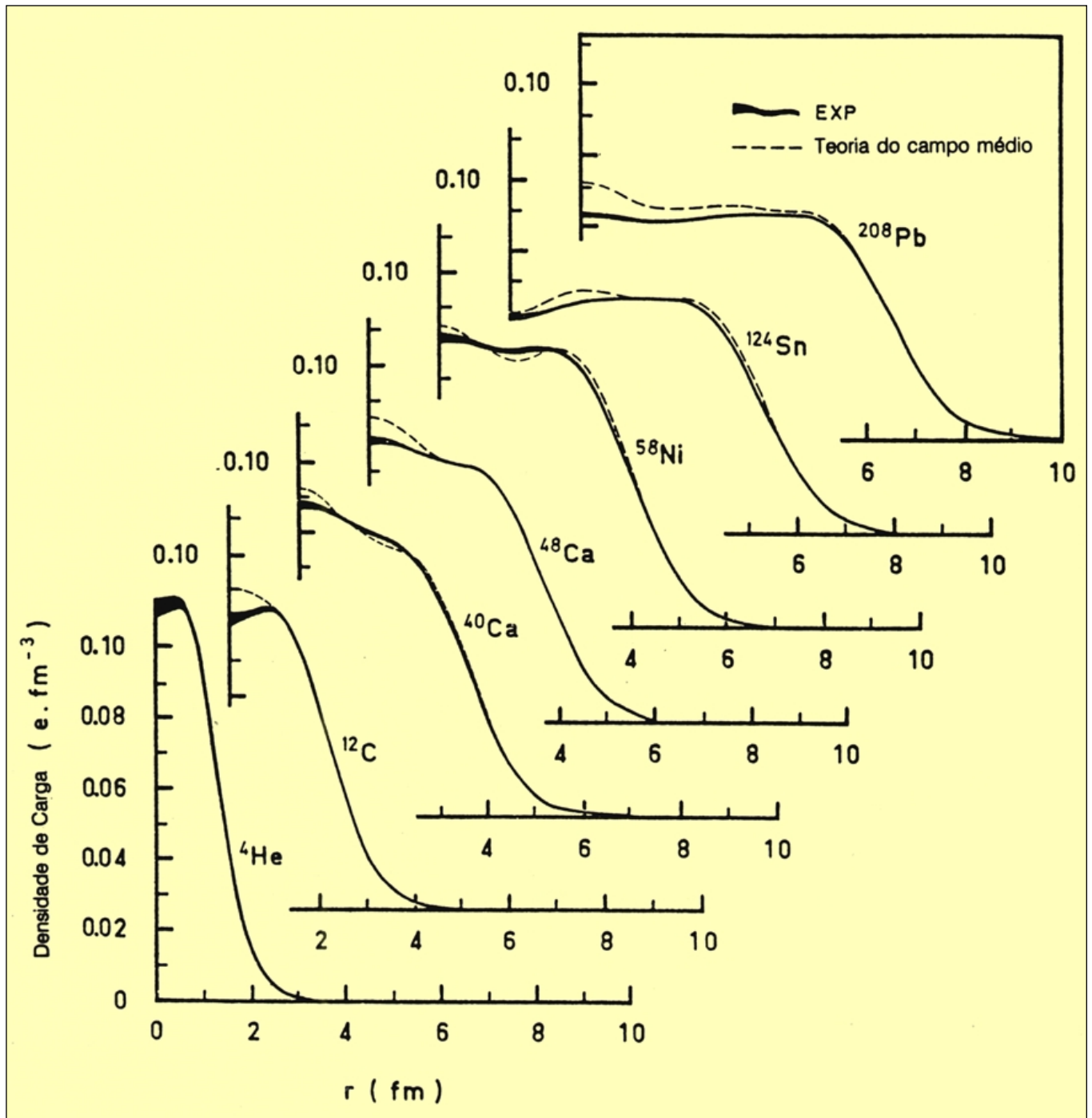


Fig. 11 – Distribuição de carga para vários núcleos na aproximação de campo médio e respectiva comparação com os dados experimentais, obtidos em colisões de electrões rápidos com núcleos. A distribuição de protões é aproximadamente a mesma que a distribuição de neutrões. O raio nuclear aumenta com a raiz cúbica do número de partículas.

Fonte: B. Frois, in R. Ricci (ed.) Proc. 9th Int. Conf. on Nuclear Physics (Florence, 1983), Bolonha, 1983.

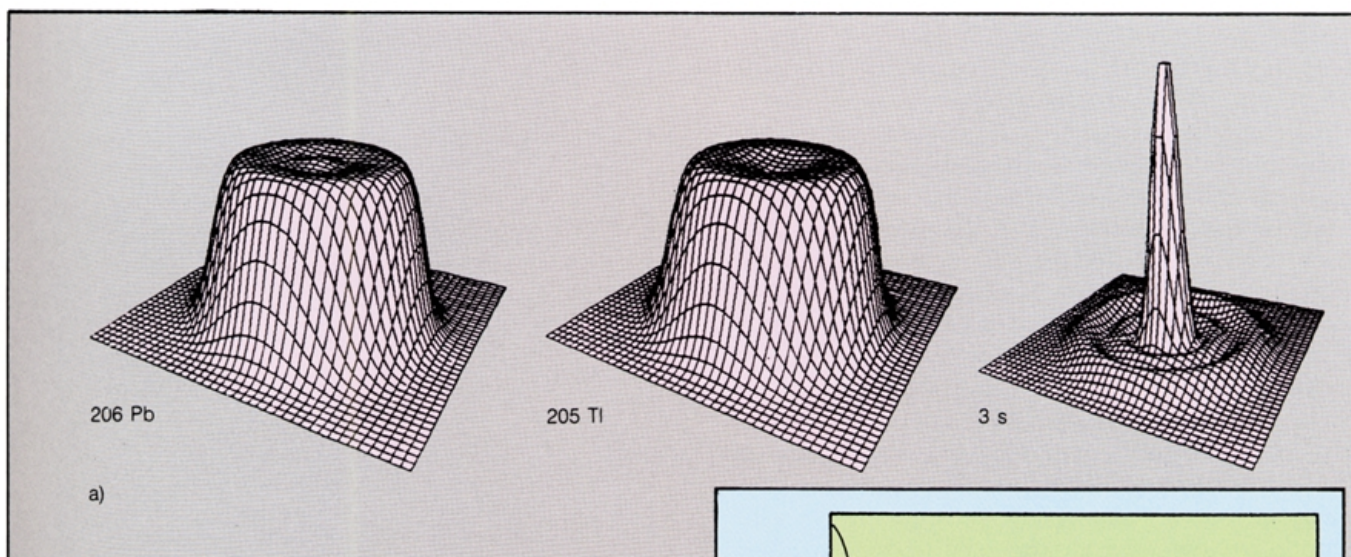
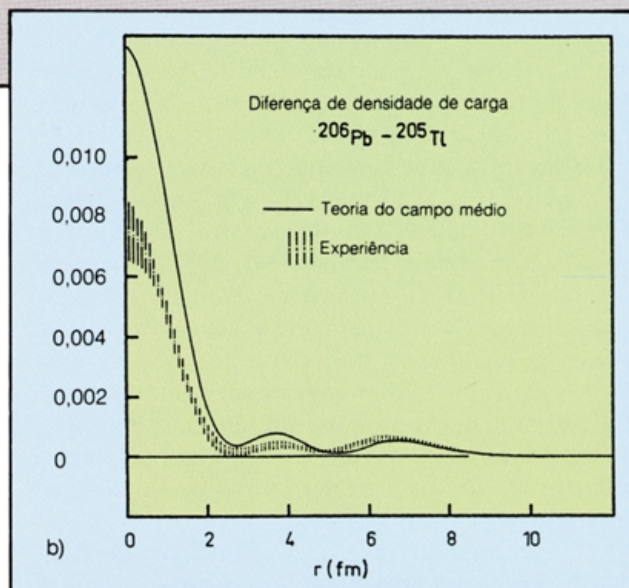


Fig. 12 – a) Representação tridimensional da densidade de carga no chumbo e no tálio, medida em experiências de colisão de electrões. A diferença deve corresponder à distribuição de carga da orbital 3s para um protão. b) A figura compara a diferença de distribuições de carga com a previsão do campo médio, podendo concluir-se que a teoria do campo médio é bastante boa. A incerteza experimental é maior para as medidas da carga no centro do núcleo, quando a discrepância entre a teoria de campo médio e a experiência é também maior.

Fonte: B. Frois, in R. Ricci (ed) Proc. 9th Int. Conf. in Nuclear Physics (Florence, 1983), Bolonha, 1983.



vão aqui interessar são os movimentos de vibração do núcleo em torno da sua forma de equilíbrio.

O modelo de camadas permite explicitar a diferença entre excitações individuais e colectivas. Numa excitação de partícula única, uma partícula sobe para o nível imediatamente acessível (ou outro qualquer, se houver energia suficiente), enquanto num movimento colectivo várias partículas são promovidas quer na mesma camada (se ela estiver incompleta) quer de uma, duas ou mais camadas. As excitações vibracionais de um sistema de fermiões podem ser vistas como promoções energéticas de várias partículas no interior do campo médio. O intervalo de energia entre camadas, que é tipicamente de alguns milhões de electrões-volt (MeV), diminui quando o raio nuclear aumenta (por exemplo, o chumbo 208 tem um intervalo de camadas, relativamente pequeno, de cerca de 7 MeV). Como a profundidade do potencial médio é aproximadamente a mesma para todos os núcleos, núcleos com mais partículas têm de mostrar espaçamentos menores entre níveis.

O primeiro movimento colectivo vibracional descoberto nos núcleos foi, em 1948, a chamada “ressonância dipolar gigante”. Trata-se de um movimento harmónico do conjunto dos protões contra os neutrões, que é ocasionado por uma excitação luminosa exterior (figura 13). Para o obter, lança-se sobre o núcleo radiação gama, que é uma forma de luz invisível,

de frequência e portanto energia muito maior do que as da luz normal. A energia da vibração dipolar é, para o chumbo 208, 14 MeV, correspondente portanto a um salto de duas camadas. De onde vem o sugestivo nome de “ressonância gigante?”. Um oscilador perturbado por uma intervenção exterior está em ressonância se a frequência da excitação for igual a uma sua frequência natural (um pai que empurra ritmicamente o filho no balanço está a aproveitar o fenómeno da ressonância). Uma ressonância dos núcleos é “gigante” quando nela participam a grande maioria dos nucleões, apresentando por isso um grau elevado de colectividade.

Nos últimos quinze anos, devido ao avanço das técnicas experimentais para excitar núcleos (utilizando vários tipos de projecteis como, por exemplo, partículas alfa, que são núcleos de hélio 4) e detectar os produtos da subsequente desexcitação, descobriram-se outras ressonâncias gigantes. Em 1972, encontrou-se a “ressonância quadrupolar gigante”, que consiste na oscilação conjunta de neutrões e protões, passando o núcleo de uma forma esférica a uma forma elipsoidal e

vice-versa (figura 14). Em 1979 encontrou-se a “ressonância monopolar gigante”, que consiste no movimento conjunto dos nucleões de tal maneira que o raio nuclear aumenta e diminui, mantendo o núcleo a mesma forma inicial (figura 15). Esta vibração é também chamada “modo de respiração”. Tal como os pulmões, que abrem e fecham, também o núcleo pode aumentar e diminuir de volume. No caso do chumbo 208, as energias das ressonâncias quadrupolar e monopolar são respectivamente 12 e 14 MeV.

Porém, nos anos 50 e 60, tinha sido detectado um grande número de estados vibracionais dos núcleos, com energia bastante menor que a das ressonâncias gigantes. Esses estados são chamados “modos de baixa energia” uma vez que as respectivas energias são menores que um intervalo típico entre camadas (figura 16). Para o chumbo 208 o estado de mais baixa energia existe a cerca de 2 MeV.

Classificam-se pois as excitações colectivas dos núcleos em modos de alta e baixa energia. Ambos são movimentos de pequena amplitude, isto é, durante a vibração a fronteira nuclear não se desloca mais do que 1 % do raio nuclear. Os núcleos têm assim uma resposta de baixa energia (lenta) e uma resposta de alta energia (rápida). Normalmente, num dado processo de excitação, são excitados simultaneamente modos dos dois tipos, embora em proporções diferentes. A probabilidade de transição do estado fundamental (estado de equilíbrio) do núcleo para um estado de ressonância gigante é, em geral, maior.

O comportamento do núcleo atômico é um pouco bizarro: reage diferentemente conforme o modo como é provocado, tal como uma bola de “Silly Putty”. “Silly Putty” (tradução à letra: “massa de vidraceiro maluca”) é uma substância sintética que serve para fazer um brinquedo muito popular nos Estados Unidos. Uma bola dessa substância, que parece exteriormente plasticina, deforma-se lentamente com os dedos como se fosse realmente plasticina. Mas, se a bola for arremessada contra o chão, saltita como se fosse uma bola de borracha. Uma vez assemelha-se a um líquido viscoso e outras a um sólido elástico. Do mesmo modo, o núcleo parece-se com um líquido quando vibra a baixa energia (comparada com a energia de excitação de uma camada) e com um sólido quando vibra a alta energia.

A história da aplicação do modelo de gota líquida às vibrações nucleares é assaz curiosa. Como foi dito, a generalização dinâmica da fórmula de gota líquida obteve algum sucesso ao descrever o fenómeno da cisão nuclear, que é um processo de baixa energia (a cisão é o prolongamento de um modo quadrupolar de baixa energia). No entanto, esse modelo, proposto pelo dinamarquês Aage Bohr, filho de Niels Bohr, e pelo norte-americano Ben Mottelson nos anos 50, não fornece uma explicação quantitativa das vibrações de baixa energia da generalidade dos núcleos. A energia obtida no modelo de gota líquida é muito superior aos

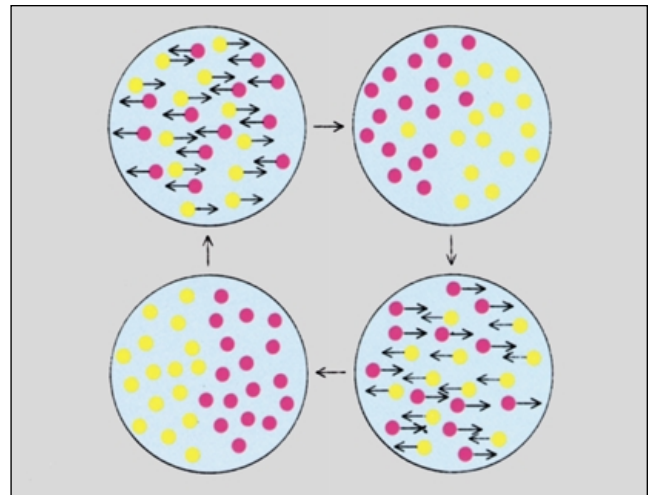


Fig. 13 – Diagrama esquemático da ressonância dipolar gigante nos núcleos. Os prótons oscilam em sentido contrário aos dos nêutrons. A amplitude da oscilação foi exagerada para tornar a imagem mais clara. Fonte: G. Bertsch, Sci. Amer., May 1983, 40.

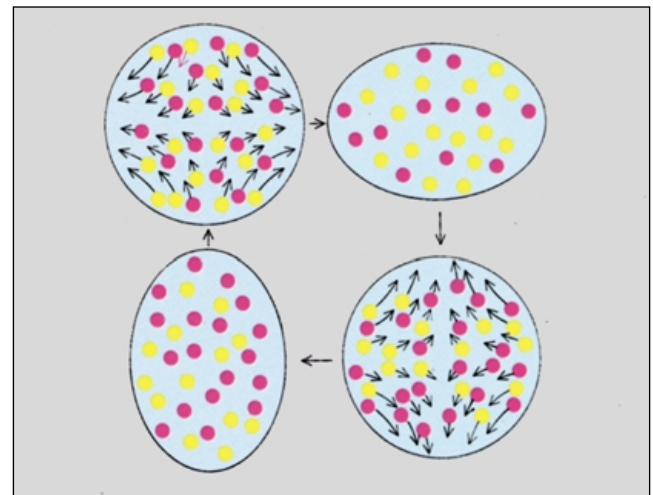


Fig. 14 – Diagrama esquemático da ressonância quadrupolar gigante. O núcleo passa de uma forma esférica a uma forma elipsoidal e vice-versa. Fonte: G. Bertsch, Sci. Amer., May 1983, 40.

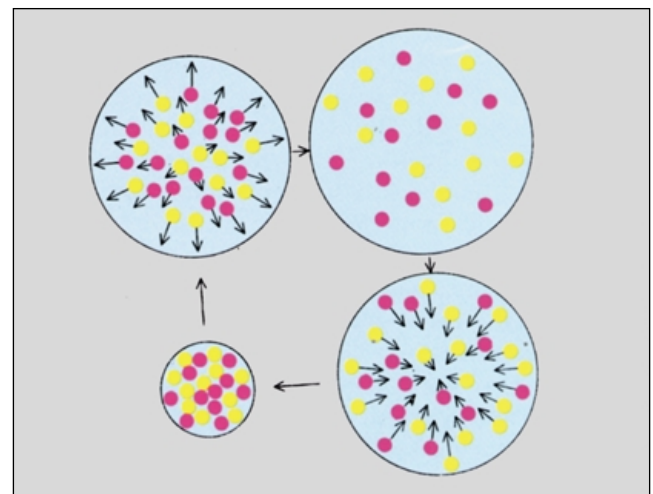


Fig. 15 – Diagrama esquemático da ressonância monopolar gigante. O núcleo aumenta e diminui de raio, mantendo a forma esférica. Fonte: G. Bertsch, Sci. Amer., May. 1983, 40.

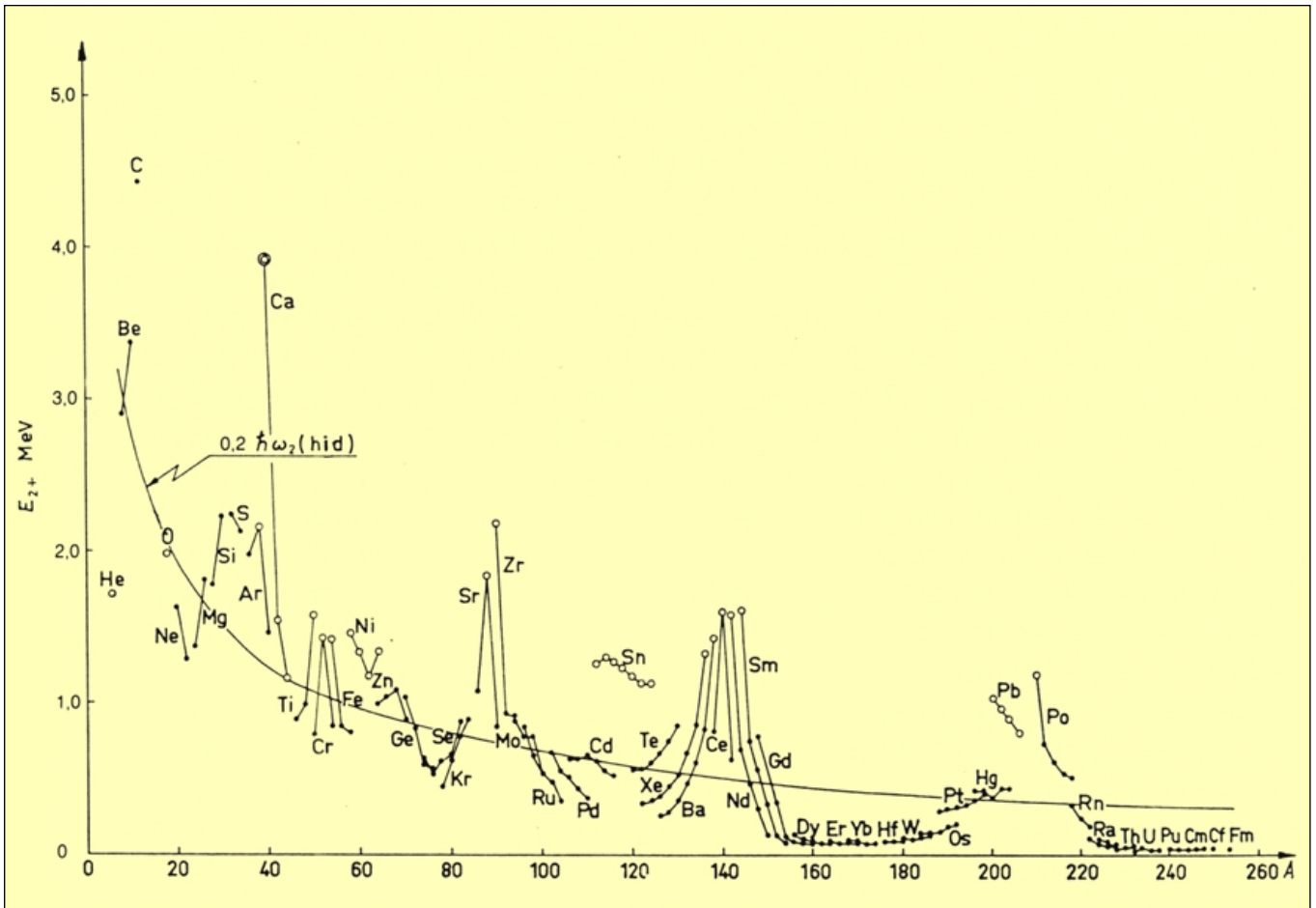


Fig. 16 – Energia da vibração quadrupolar de baixa energia em função do número de nucleões, para núcleos com números pares de prótons e nêutrons. Repare-se que núcleos deformados têm energias de excitação colectiva mais baixa do que núcleos mágicos. A curva suave indica o resultado do modelo de gota líquida renormalizado (isto é, multiplicando a energia que fornece por 0,2). Nesse modelo, a energia é inversamente proporcional à raiz quadrada do número de nucleões.

Fonte: O. Nathan e S. Nilsson, in K. Siegbahn (ed.), “Beta and Gamma Ray Spectroscopy”, North Holland, Amsterdão, 1955.

valores experimentais. Ainda houve quem pensasse que o modelo poderia ser adequado para as ressonâncias gigantes, de energia elevada, mas os mesmos Bohr e Mottelson, ainda antes da ressonância quadrupolar ter sido detectada, partiram de suposições contrárias às do modelo hidrodinâmico para formular uma previsão correcta da energia da vibração quadrupolar. O modelo de gota líquida renormalizado (isto é, multiplicando o seu resultado por um factor menor do que 1) pode, quanto muito, servir para descrever em média os estados de baixa energia (figura 16) mas revelou-se absolutamente inadequado para tratar os estados de alta energia. Contudo, as previsões do modelo de gota líquida para as energias dos modos monopulares e dipolar não são desrazoáveis de todo. Estas excitações de alta energia não têm parceiro de baixa energia, tendo o sucesso parcial do modelo de gota líquida confundido durante algum tempo os investigadores do núcleo...

No modelo de gota líquida, cuja base é macroscópica, a força restauradora tem a ver com a tensão su-

perficial (a força que, ao fim e ao cabo, mantém a coesão de uma gota clássica). Cálculos microscópicos, realizados na aproximação de campo médio, revelaram que a expressão hidrodinâmica para a força restauradora não é adequada para os modos de baixa energia. Efeitos quânticos (relacionados com a existência de camadas) impedem que uma descrição do tipo de gota líquida seja quantitativamente bem sucedida.

O raciocínio hidrodinâmico também não serve para os modos de alta energia. Qual é então o mecanismo responsável pelas ressonâncias gigantes? Descobriu-se que a respectiva força restauradora, do tipo elástico, tem a ver com a resposta rápida do campo médio a uma perturbação. Uma vibração ou “som” no núcleo não se propaga como o som no ar (o som normal não é mais do que uma vibração no ar), antes resultando da existência de campo médio. Não é transmitida por colisões, que são raras nos núcleos atendendo ao grande caminho livre médio dos nucleões, mas pelo próprio campo médio. Quando um nucleão se agita, todo o campo médio se agita com ele. Este fenómeno, típi-

co da matéria de férmions, surge em consequência do princípio de Pauli.

Como as ressonâncias gigantes são altamente colectivas, é natural supor que a sua energia seja bem descrita por uma função do número total A de nucleões. Existe, com efeito, uma fórmula simples (devida ao físico norte-americano George Bertsch) que, sem quaisquer parâmetros ajustáveis, descreve a energia da ressonância quadrupolar gigante da quase totalidade dos núcleos (figura 17). Nessa fórmula entra uma força restauradora que é proporcional à energia cinética média dos nucleões. A energia resultante é inversamente proporcional ao raio do núcleo. Como o raio nuclear cresce com a raiz cúbica de A (este facto tem a ver com a constância da densidade nuclear no interior do núcleo), a energia de ressonância é inversamente proporcional à raiz cúbica de A . Para as energias das ressonâncias monopolar e dipolar existem fórmulas semelhantes, sendo apenas diferente o coeficiente de proporcionalidade. Note-se, porém, que a vibração monopolar não foi identificada na prática para núcleos leves: é necessário um número mínimo de partículas para que esse fenómeno colectivo se manifeste.

Ao contrário da energia, a largura da ressonância, que é uma medida do tempo que dura a vibração, varia bastante de núcleo para núcleo. Uma ressonância

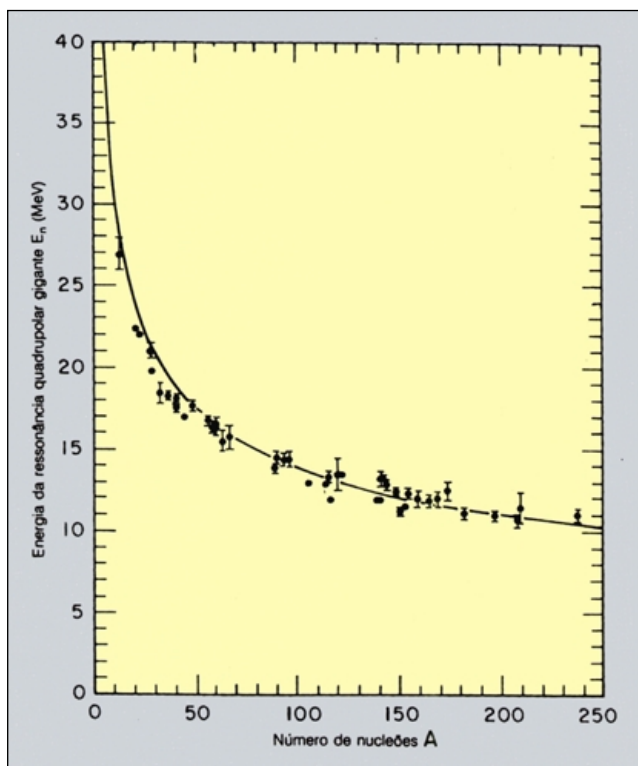


Fig. 17 – Energia da ressonância quadrupolar gigante em função do número de nucleões. A curva suave indica a previsão de uma fórmula simples, devida a G. Bertsch, segundo a qual a energia colectiva é inversamente proporcional à raiz cúbica de A .

Fonte: A. Nix e A. Sierk, Phys. Rev. C21 (1980) 396.

gigante permanece, em geral, pouco tempo: antes de amortecer completamente, o núcleo experimenta tipicamente duas ou três oscilações completas. O problema de calcular o tempo de vida de uma vibração nuclear é bem mais difícil do que o de calcular a respectiva energia. A dificuldade reside principalmente no facto de a largura da ressonância não poder ser explicada no âmbito da aproximação de campo médio. A perda da energia colectiva deve-se à sua dispersão por graus de liberdade individuais.

Além da deformação elipsoidal, que aparece no modo quadrupolar, podem ocorrer deformações mais complicadas. O núcleo pode, por exemplo, mudar de uma forma esférica para uma forma de pera (com três saliências), voltando depois à forma esférica primitiva. Esta deformação diz-se octupolar. Existem menos dados sobre a ressonância octupolar gigante, sendo essa informação proveniente principalmente de núcleos pesados. A experiência permite, todavia, também nesse caso confirmar a validade do modelo de força elástica, que hoje, de resto, é apoiado não só por diversa evidência laboratorial como também por cálculos microscópicos pormenorizados. São ainda possíveis, em princípio, excitações com multipolaridade superior à octupolar, mas, nesse caso, a incerteza experimental revela-se demasiado grande. A largura da ressonância observada é elevada e, por isso, o tempo de vida curto. O próprio modelo dos nucleões independentes permite explicar a “morte” rápida das ressonâncias gigantes de elevada multipolaridade. Esses modos decaem imediatamente uma vez que dão origem a excitações de partícula única. Um nucleão pode ser comparado com um surfista que avança no mar recebendo energia de uma onda. Um tal processo de amortecimento é conhecido por amortecimento de Landau, já que foi descoberto pelo físico soviético Lev Landau no contexto, bastante diferente, do estudo das ondas num plasma electrónico.

Deve ainda ser referido que foram identificadas oscilações monopulares e quadrupolares em que os prótons e neutrões oscilam em oposição, tal como no movimento dipolar gigante, e ainda oscilações em que nucleões com diferentes spin oscilam fora de fase. Estes modos, embora de considerável interesse teórico e experimental, não são aqui considerados.

Finalizando a discussão sobre as ressonâncias gigantes, chamemos a atenção para a relevância que essas excitações assumem para o melhor conhecimento tanto da matéria nuclear como dos núcleos finitos. A energia da ressonância monopolar permite determinar o valor da compressibilidade nuclear, isto é, da maneira como o volume varia com um aumento de pressão. Este resultado é importante para o estudo da vida e morte das estrelas (a explosão de uma estrela depende da resistência da matéria nuclear no seu interior a tremendas pressões gravitacionais). Por sua vez, a ressonância dipolar gigante permite “medir” a forma de um nú-

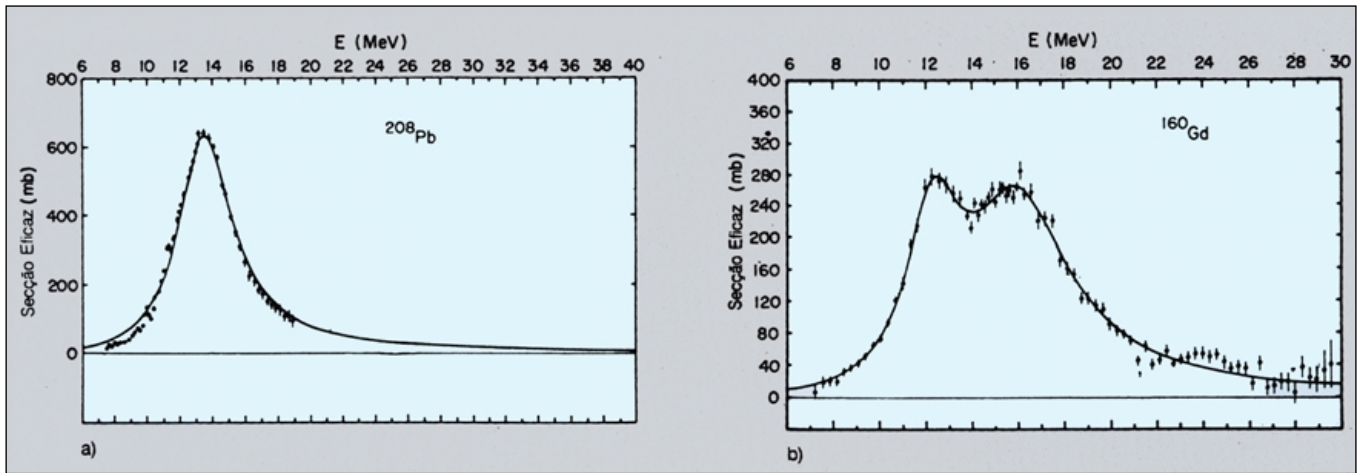


Fig. 18 – Medidas experimentais e descrição teórica da ressonância dipolar gigante (a) no chumbo 208 (que é esférico) e (b) no gadolínio 160 (que é deformado). A seção eficaz, no eixo vertical, mede a probabilidade de absorção de luz gama, cuja energia está indicada no eixo horizontal. O chumbo 208 apresenta um único pico enquanto o gadolínio 160 exhibe dois picos.

Fonte: B. L. Berman e S. C. Fultz, Rev. Mod. Phys 47 (1975), 713.

cleo. O gráfico de absorção de raios gama mostra uma curva em forma de sino, com um só pico, para núcleos cuja forma de equilíbrio é esférica, mas uma curva com dois picos, para um núcleo cuja forma de equilíbrio é elipsoidal (figuras 18a e 18b). Isso significa que existe, no primeiro caso, um comprimento característico (o diâmetro do núcleo) e, no segundo caso, dois comprimentos característicos (altura e largura de um “charuto” ou de um “disco voador”).

A ORDEM NOS AGREGADOS ATÓMICOS

Agregados de hélio são conjuntos de átomos de hélio 3 ou 4. O átomo de hélio 3 é um férmion, tal como um nucleão, uma vez que o seu spin total é 1/2: dois prótons e um neutrão no núcleo perfazem spin 1/2, ao passo que os dois electrões à volta dão spin 0. O hélio 3 é o isótopo menos comum do hélio. O átomo de hélio 4, mais abundante, tem spin total 0: não é por isso um férmion e não nos vai aqui interessar.

As forças entre átomos de hélio 3 são forças muito semelhantes às que existem entre nucleões: repulsivas a muito curtas distâncias e atractivas a distâncias um pouco maiores. Embora a escala de distâncias seja muito maior e a escala de energias muito menor (as distâncias dos agregados de hélio medem-se em Ångstroms e as energias em décimas milésimas do electrão-volt), deve então existir um campo médio num agregado de hélio 3, tal como num núcleo. De facto, o potencial médio que encontramos no caso nuclear e que é intermediário entre o de oscilador e de poço rectangular afigura-se adequado para descrever os estados energéticos desse agregado. Simulações computacionais baseadas em forças interatómicas fiáveis conduziram a um potencial desse tipo (figura 19a). A situação é mais simples do que no caso nuclear uma vez que,

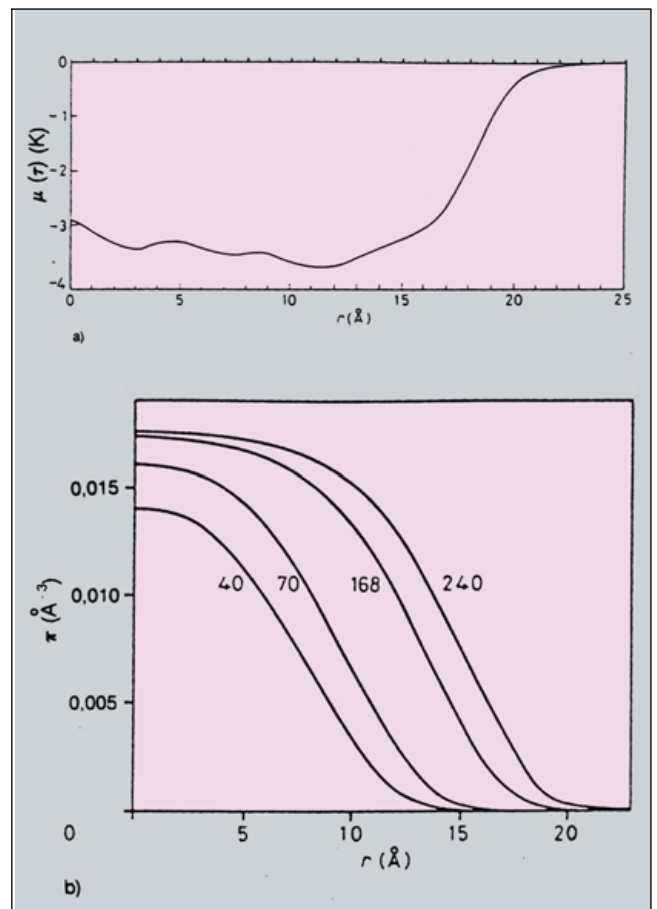


Fig. 19 – a) Potencial de um agregado de hélio 3 com 168 átomos. No eixo vertical, a unidade é o Kelvin ($1 \text{ K} = 8,62 \times 10^{-5} \text{ V}$) e no eixo horizontal a unidade é o Ångstrom. b) Perfis de densidade (numa aproximação semi-clássica, que não leva em conta alguns efeitos quânticos) de agregados de hélio 3 com 40, 70, 168 e 240 átomos. Tal como nos núcleos, a densidade no interior é aproximadamente constante, enquanto o raio aumenta com a raiz cúbica do número de partículas constituintes.

Fonte: S. Stringari, Proc. Int. School Physics Enrico Fermi, North-Holland, Amsterdão 1990, p. 190.

como nos agregados não é importante a interação spin-órbita, os números mágicos são 2, 8, 20, 40, 80, etc.

Os perfis de densidade são também semelhantes aos nucleares, obtendo-se uma densidade constante no interior e um decréscimo rápido para zero na superfície (figura 19b): núcleos e agregados de hélio 3 são sistemas leptodérmicos, isto é, cuja «pele» é fina em comparação com o «corpo». Sabe-se hoje que a energia de qualquer sistema leptodérmico pode ser descrita por uma fórmula de gota líquida. Uma fórmula como a de von Weizaecker aplica-se não só aos núcleos como aos agregados de hélio (note-se que se trata de uma fórmula clássica, atendendo a que não inclui efeitos quânticos de camadas). A energia de um núcleo ou agregado pode ser escrita como a soma de termos de volume, superfície, curvatura e outras correcções adicionais.

Infelizmente, não foram até hoje identificados agregados de hélio isolados (exigem temperaturas muito baixas e técnicas sofisticadas de manipulação) mas tão só agregados de hélio colocados sobre um certo substrato sólido. Não é ainda claro qual é a influência desse substrato nas propriedades observáveis do agregado.

Apresentadas as semelhanças, convém agora enfatizar as diferenças entre um núcleo e um agregado de hélio 3. O limite de um agregado muito grande, com um número quase infinito de átomos, corresponde à superfície livre do hélio 3 que é, ao contrário dos aglomerados finitos, experimentalmente bem conhecida. Na Física Nuclear existe acesso experimental a sistemas com um número finito de nucleões mas o mesmo já não acontece para o caso de uma superfície plana

de matéria nuclear (ou quase plana, como será o caso da superfície de uma estrela de neutrões). A teoria prevê também que não existem agregados de hélio 3 ligados com menos de cerca de 40 átomos, em contraste com o caso nuclear, onde a força é suficientemente forte para conseguir ligar núcleos pequenos.

Foram já previstas teoricamente excitações altamente colectivas dos agregados de hélio 3. O mecanismo responsável por essas «ressonâncias gigantes» é do mesmo tipo que no caso nuclear. Como se trata de um mecanismo característico de fermiões, ele não se pode manifestar no hélio 4. O hélio 4 é um líquido mais normal, sendo plausível que se lhe aplique o modelo hidrodinâmico (pelo menos para agregados suficientemente grandes). Definitivamente, torna-se necessária mais informação experimental sobre os agregados de hélio 3 ou 4: de pouco adianta a teoria correr muito à frente da experiência.

Embora não exista evidência experimental suficiente sobre agregados de hélio, ela está disponível para agregados metálicos, que têm dimensões com a mesma ordem de grandeza e escalas de energia maiores, da ordem de grandeza do electrão-volt. Esses agregados foram fabricados recentemente, tendo logo sido reconhecidas bastantes semelhanças qualitativas com os núcleos atômicos. Apesar das propriedades dos agregados metálicos se deverem, em geral, aos seus electrões livres, que são muito diferentes de nucleões, a ideia de campo médio continua ainda a aplicar-se. Não só esse campo médio foi identificado experimentalmente como foram encontradas vibrações do campo médio, com bastantes semelhanças com a ressonância dipolar gigante dos núcleos.

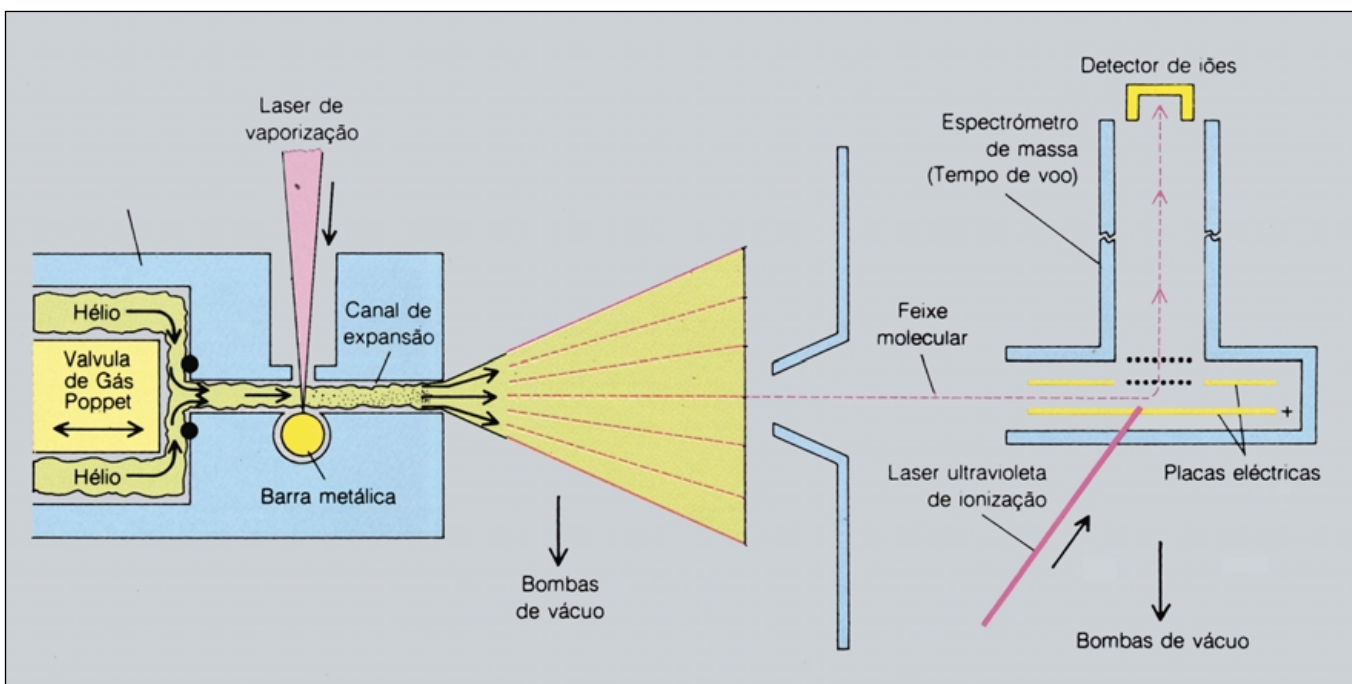


Fig. 20 – Dispositivo experimental para a produção e estudo de agregados metálicos.

Fonte: M. Duncan e D. Rouvray, Sci. Amer., Dec. 1989,110.

O êxito na produção de agregados em laboratório deve-se principalmente aos progressos realizados na tecnologia de feixes moleculares. Numa câmara de vaporização coloca-se uma amostra metálica que se vaporiza com o auxílio de um laser (figura 20). Os átomos que se soltaram podem eventualmente agrupar-se em agregados, que são transportados por um feixe de hélio de alta velocidade ao longo de um canal de saída. O feixe molecular – os agregados podem ser vistos como grandes moléculas – é depois dirigido para um espectrómetro, que mais não é do que um aparelho para medir massas com bastante precisão. Um segundo laser ioniza os agregados de modo a que estes fiquem carregados e possam ser desviados por um campo electromagnético. Os caminhos percorridos pelos agregados no espectrómetro variam conforme a sua massa, ocorrendo assim uma diferenciação de acordo com os tamanhos.

Os agregados constituem uma estrutura intermédia entre os átomos e a matéria extensa (figura 21), tal como os núcleos são estruturas intermédias entre um nucleão e a matéria nuclear, que existe por exemplo nas estrelas de neutrões. Um dos motivos do interesse no actual estudo de agregados consiste no facto de eles estabelecerem uma ponte entre as propriedades da matéria macroscópica normal e dos átomos e moléculas individuais. A sua análise requer tanto métodos da Física do Estado Sólido como da Química Quântica, tornando-se a Física de Agregados uma ocasião excelente de interdisciplinaridade. É curioso notar que a palavra inglesa para «agregado» – «cluster» – provém da língua germânica arcaica – «klustro» –, que significa «amontoamento», tanto de objectos materiais (por exemplo, partículas), como de objectos imateriais (por exemplo, ideias). Os agregados de átomos têm, de facto, propiciado uma agregação frutífera de ideias provenientes dos mais variados domínios.

Num agregado de um metal alcalino como, por exemplo, o sódio, os iões positivos estão localizados em posições de equilíbrio, enquanto os electrões de valência (ou livres) circulam no espaço entre os iões.

Revela-se uma aproximação adequada a chamada «aproximação de geleia», na qual se substituem iões localizados por uma distribuição uniforme de carga positiva dentro do agregado (essa aproximação foi usada com sucesso para estudar algumas propriedades dos sólidos metálicos). Na aproximação de geleia, os electrões interagem com o fundo fixo de carga positiva e entre si.

Uma vez aceite essa aproximação, verifica-se que o modelo de camadas descreve bem o movimento dos electrões no interior do agregado metálico (figura 22a).

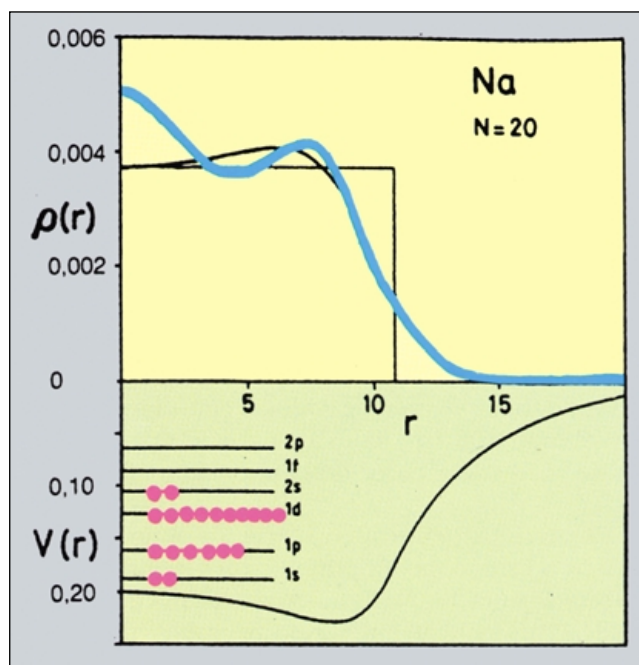


Fig. 22 a) – Potencial e perfis de densidade para a distribuição electrónica num agregado metálico (considera-se um agregado de sódio, com 20 electrões livres). No potencial indicam-se o esquema de níveis e a respectiva ocupação. Para os perfis de densidade, indica-se, a grosso, uma curva correspondente à descrição quântica e, a fino, uma curva semiclassical. O rectângulo representa a «geleia» de carga positiva. A unidade de distância é o bohr, 1 bohr = 0,529 Å; a unidade de densidade é o bohr⁻³ e a unidade de potencial é o hartree, 1 hartree = 27,2 eV.

Fonte: L. Serra et al, Phys. Rev. B 39 (1989) 8247.

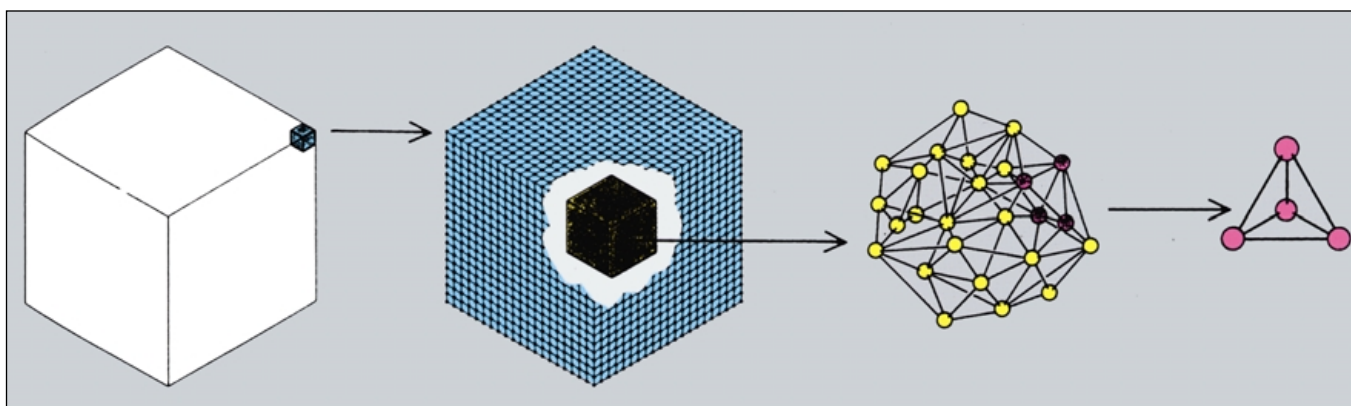


Fig. 21 – Os agregados são estruturas intermédias entre a matéria macroscópica e as unidades microscópicas (moléculas e átomos). Pode-se estudar o modo como variam as propriedades físicas ao passar do mundo macroscópico ao mundo microscópico.

Fonte: M. Duncan e D. Rouvray, Sci. Amer., Dec. 1989, 110.

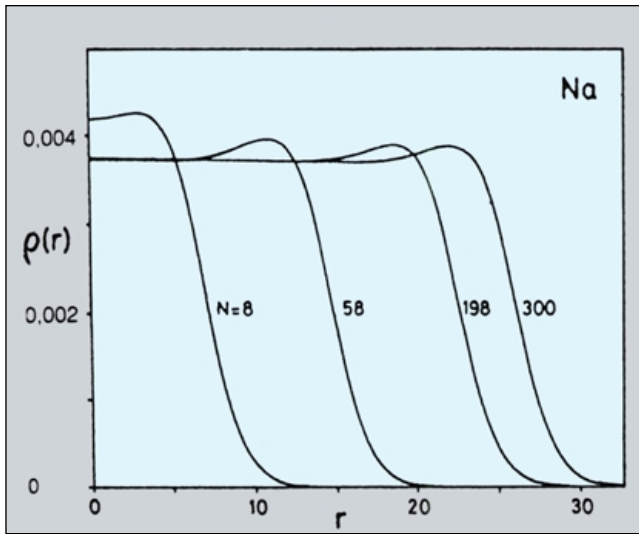


Fig. 22 b) – Perfis de densidade (descrição semiclássica) de agregados de sódio com 8, 58, 198 e 300 átomos. A densidade de carga no interior é aproximadamente constante, enquanto o raio aumenta com a raiz cúbica do número de electrões livres.
 Fonte: L. Serra et al, Phys. Rev. B 39 (1989) 8247.

O potencial comum «sentido» pelos electrões de um agregado, por exemplo de sódio, é constante no interior subindo para zero junto à superfície. O campo médio do agregado é parecido com o campo médio do núcleo.

Os perfis de densidade electrónica obtidos preenchendo o campo médio por electrões independentes são semelhantes aos perfis de densidade nuclear: a densidade é constante no interior do agregado e desce para zero nos bordos (figura 22b). A densidade interior é aproximadamente a mesma para todos os núcleos. Para os agregados metálicos, a densidade electrónica inte-

rior é a mesma para o mesmo metal, mas varia de metal para metal, sendo grande, por exemplo, para o alumínio e pequena para o céσιο. Dado o parentesco entre núcleos atômicos e agregados metálicos, afigura-se plausível uma fórmula de gota líquida para descrever as energias dos estados fundamentais dos agregados. A energia de um conjunto de agregados do mesmo elemento metálico com diferente número de átomos pode, de facto, ser bem parametrizada por uma soma de termos de volume, superfície e curvatura.

O potencial médio do agregado conduz à existência de números mágicos para os electrões. Estes números foram identificados de várias maneiras nos agregados metálicos [figura 23 a) e b)]. Uma demonstração da existência de números mágicos encontra-se, por exemplo, na análise das abundâncias relativas dos agregados de um certo metal. Agregados com 8, 20, 40, 58, etc. electrões, isto é, com números mágicos de electrões, aparecem em maior número no espectrómetro de massa. Outra prova consiste na medida dos potenciais de ionização, que é a energia necessária para extrair um electrão do agregado. Verifica-se que essas energias de separação são maiores para agregados com 8, 20, 40, 58, etc. electrões. Uma das questões que suscita actualmente mais interesse entre os físicos de agregados consiste em averiguar a ocorrência de grandes números mágicos (muito maiores que a centena). Esses números não se manifestam nos núcleos atômicos em virtude da repulsão eléctrica entre protões, que ocasiona a cisão natural de núcleos muito pesados. A tabela periódica dos elementos termina não por falta de níveis a serem preenchidos por electrões mas simplesmente porque o núcleo central se desintegra. Desde os anos 60 que circulam especulações sobre a ocorrência de uma «ilha» de núcleos superpesados,

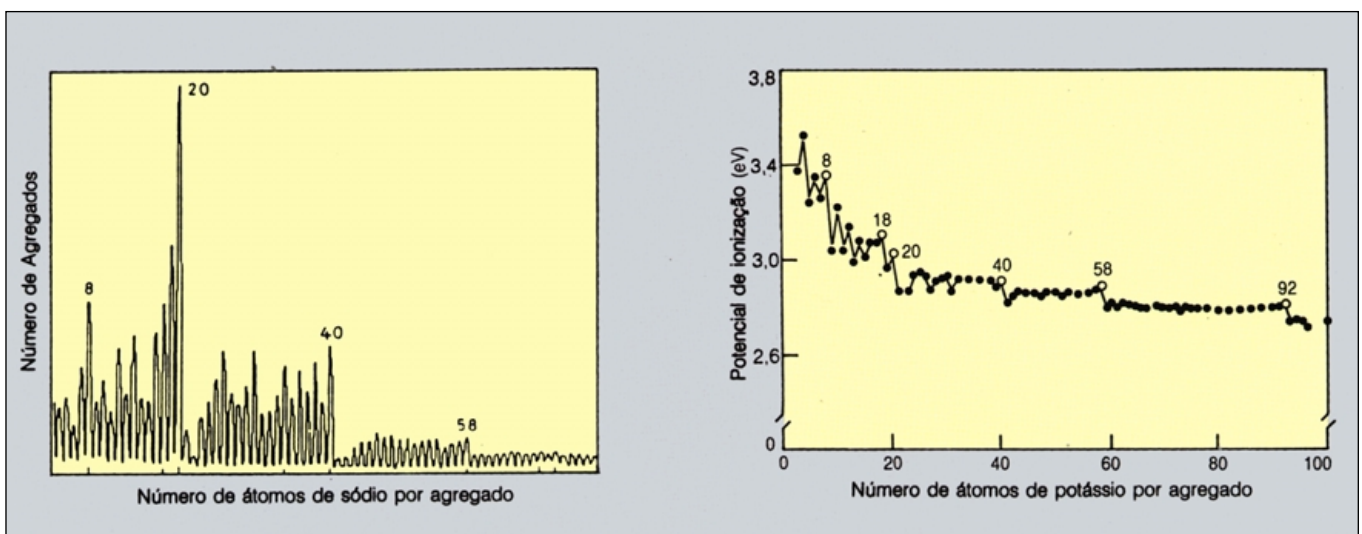


Fig. 23 – Evidência de números mágicos de electrões para agregados: a) Contagem de agregados com um certo número de átomos de sódio num espectrómetro de massa. Existem picos para 8, 20, 40 e 58 electrões livres. b) Potencial de ionização para agregados de potássio em função do número de átomos por agregado. Ocorrem picos para 8, 20, 40 e 58 electrões livres.

Fonte: W. de Heer et al, Solid State Physics 40 (1987) 93 .

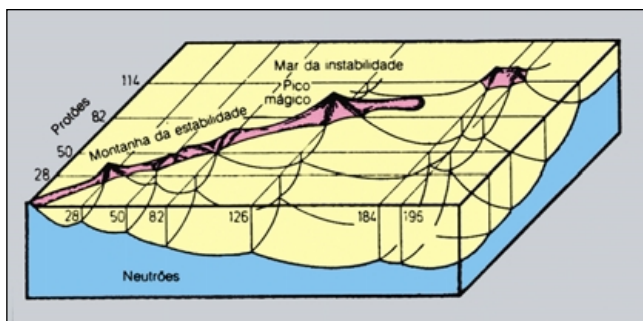


Fig. 24 – Energia de ligação em função do número de neutrões e prótons. A península da estabilidade, com certos picos mágicos, está rodeada de um mar de instabilidade. Suspeita-se que exista uma ilha de núcleos superpesados, com números mágicos 114 para prótons e 184 e 196 para neutrões.

Fonte: T. Mayer-Kuckuk, «Kernphysik», Teubner, Estugarda, 1984.

com números mágicos de neutrões e prótons superiores a 126 e 82 respectivamente (figura 24). A estabilidade adicional proveniente do fecho de camadas conseguiria, de acordo com essas ideias, contrariar a repulsão eléctrica. No entanto, tais núcleos não foram até hoje encontrados na natureza nem sintetizados no laboratório.

O campo médio dos electrões nos agregados metálicos pode ser posto a oscilar por uma perturbação exterior adequada. A energia necessária é bastante menor do que no caso nuclear. Em vez de luz gama usa-se luz visível, por exemplo um feixe laser de cor verde. Foram assim descobertas nos agregados metálicos vibrações colectivas de tipo dipolar. As previsões teóricas baseadas na aproximação do campo médio parecem descrever bem as observações experimentais, à parte um pequeno deslocamento do máximo da luz absorvida relativamente às previsões teóricas. Não foram ainda encontradas excitações de multipolaridade superior a 2 mas, se nos lembrarmos da história da Física Nuclear, talvez se esteja em presença de uma mera e passageira dificuldade de ordem prática.

Como entender os estados de excitação dipolar nos agregados? Os electrões nos metais podem formar ondas de densidade, chamadas plasmões. Quando se tem um plasmão no metal, a densidade electrónica aumenta e diminui periodicamente em cada ponto do espaço. Os plasmões dos agregados aparecem localizados perto da superfície: em virtude da excitação luminosa, os electrões da superfície deslocam-se para cá e para lá contra o fundo fixo de carga positiva. Embora tal fenómeno pareça bem longe da realidade macroscópica, os vitrais que ornamentam as janelas de algumas igrejas enviam a nossos olhos deslumbrados evidência desses plasmões de superfície. Com efeito, a coloração dos vidros é devida a pequenos grãos metálicos que lhes são misturados no processo de fabrico. Os respectivos plasmões superficiais absorvem parte da luz visível recebida.

Tal como nos núcleos, pode-se usar a ressonância dipolar gigante para verificar a forma elipsoidal de agregados com camadas semi-preenchidas. Enviando luz para cima de um agregado com um número de átomos entre dois números mágicos, constata-se que o pico de foto-absorção é duplo, tal como para os núcleos [figura 25 a) e b)]. A aparição de dois picos constitui prova inequívoca da existência de dois comprimentos típicos. Um dos problemas que ocupou o matemático norte-americano, de origem húngara, John von Neumann era: «Pode-se 'ouvir' a forma de um tambor?». Um tambor circular tem um conjunto de sons próprios (emite esses sons em resposta a excitação que é uma pancada; v. figura 26). Um tambor de forma diferente apresenta um espectro acústico diferente. A famosa questão de von Neumann é inversa: dado um espectro de sons, qual é a forma do tambor que os produziu? Idêntica questão se pode colocar a propósito de um sino ou de qualquer outro instrumento de percussão. Um sino com uma forma não convencional originará um som estranho e poder-se-á perguntar qual é a forma do sino, uma vez escutado o respectivo som. Os núcleos e agregados atómicos podem servir de pretexto a uma interrogação do mesmo tipo: a observação do espectro de absorção de luz permite descobrir a forma do agregado!

Toda a gente sabe qual é a utilidade dos núcleos. Mas para que servem os agregados? Voltemos a Feynman. Numa conferência em 1959, Feynman fundou uma nova disciplina – a «nanotecnologia» – com

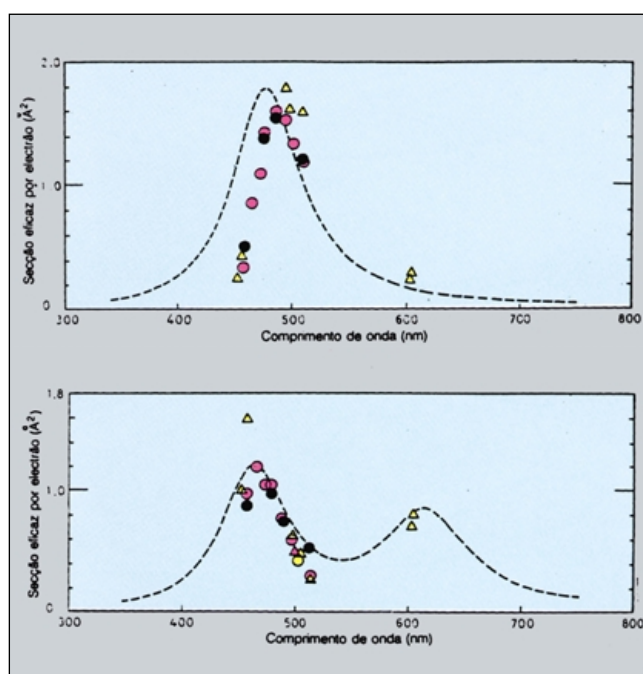


Fig. 25 – Medidas experimentais e descrição teórica da excitação dipolar de um agregado de sódio (a) com 8 (esférico) e (b) 10 átomos (deformado). A secção eficaz por electrão está representada em função do comprimento de onda da radiação absorvida (em nm, com 1 nm = 10 Å).

Fonte: W. Knight, in Proc. Int. School Physics Enrico Fermi, North-Holland, Amsterdão 1990, p. 190.

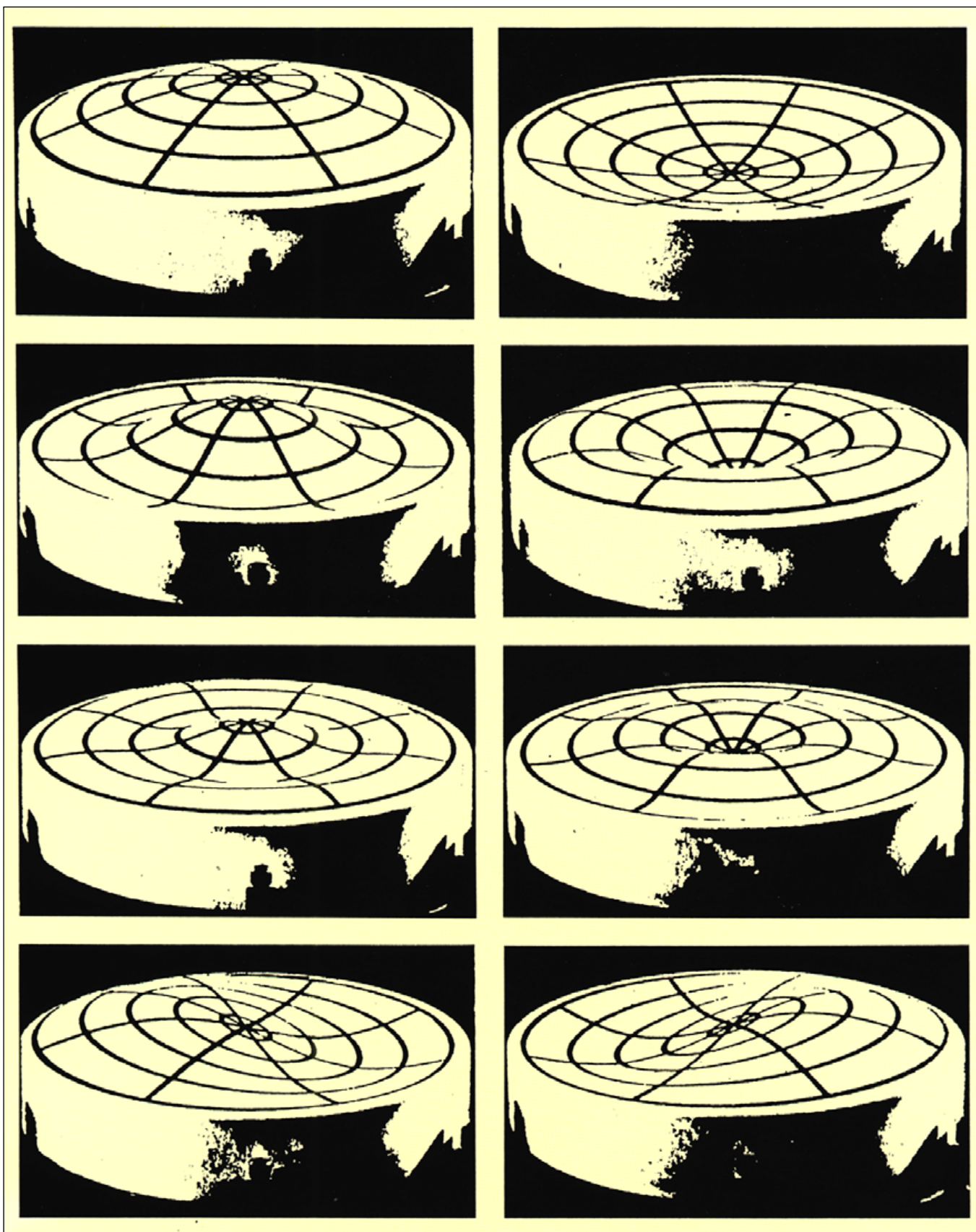


Fig. 26 – Representação de quatro modos de vibração de um tambor circular. Em cada «linha» representa-se um modo por meio de dois instantâneos intervalados de meio período (um período é o tempo de uma vibração completa). Conforme a perturbação exterior, assim se podem excitar vários desses modos.

Fonte: D. Hall, «Musical acoustics: An introduction», Wadsworth Pub. Co., Belmont, 1980.

uma frase que ficou famosa: «Há muito espaço lá em baixo!». Segundo Feynman, não existe nenhum obstáculo fundamental ao arranjo artificial de átomos, para conseguir minúsculas obras de engenharia molecular. Feynman ofereceu até um prêmio a quem conseguisse reduzir de um factor de 1/25000 os caracteres de um livro... Houve, de certeza, quem dissesse: «Está a brincar, Sr. Feynman!». No entanto, em 1990, os cientistas da IBM D. Eigler e E. Schweizer publicaram na revista «Nature» uma comunicação onde anunciavam como, com a ajuda de um microscópio de efeito túnel, tinham conseguido mover e reunir átomos individuais para formar determinados padrões. Ao

primeiro agregado, consistindo de sete átomos de xénon em fila indiana (figura 27 a), seguiu-se um agregado de 35 átomos de xénon (figura 27 b) dispostos para formar as letras «IBM» (nunca se tinha realizado um letreiro publicitário tão pequeno!). O raio atómico do xénon é de 2,2 Å e a altura das letras era 50 Å. Ampliando 50 Å por um factor de 1/2 500 000 (muito além do pretendido por Feynman...) obtêm-se letras de 1 cm de altura.

Os modernos microscópios electrónico e de efeito túnel permitem visualizar directamente os átomos, de modo que hoje somos perfeitamente capazes de convencer um extraterrestre, se este existir, da reali-

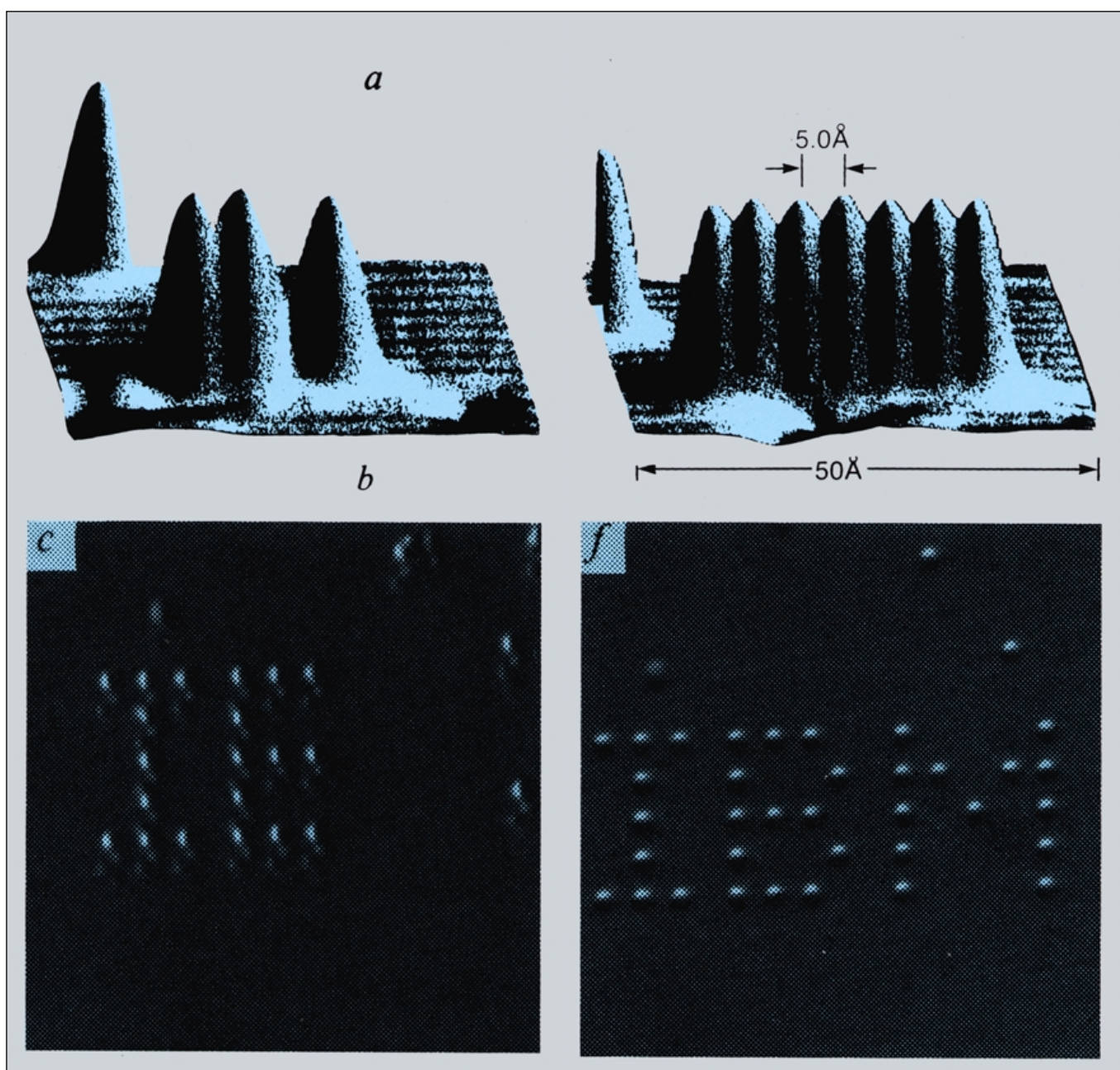


Fig. 27 – a) Preparação de um agregado de átomos de xénon colocados sobre a superfície de um cristal de níquel. Os átomos movem-se um a um com o auxílio da ponta de um microscópio de efeito túnel. b) Preparação de um conjunto de átomos de xénon para formar a palavra «IBM». Cada letra tem 50 Å de altura.

Fonte: D. Eigler e E. Schweizer, Nature 344 (1990), 521.

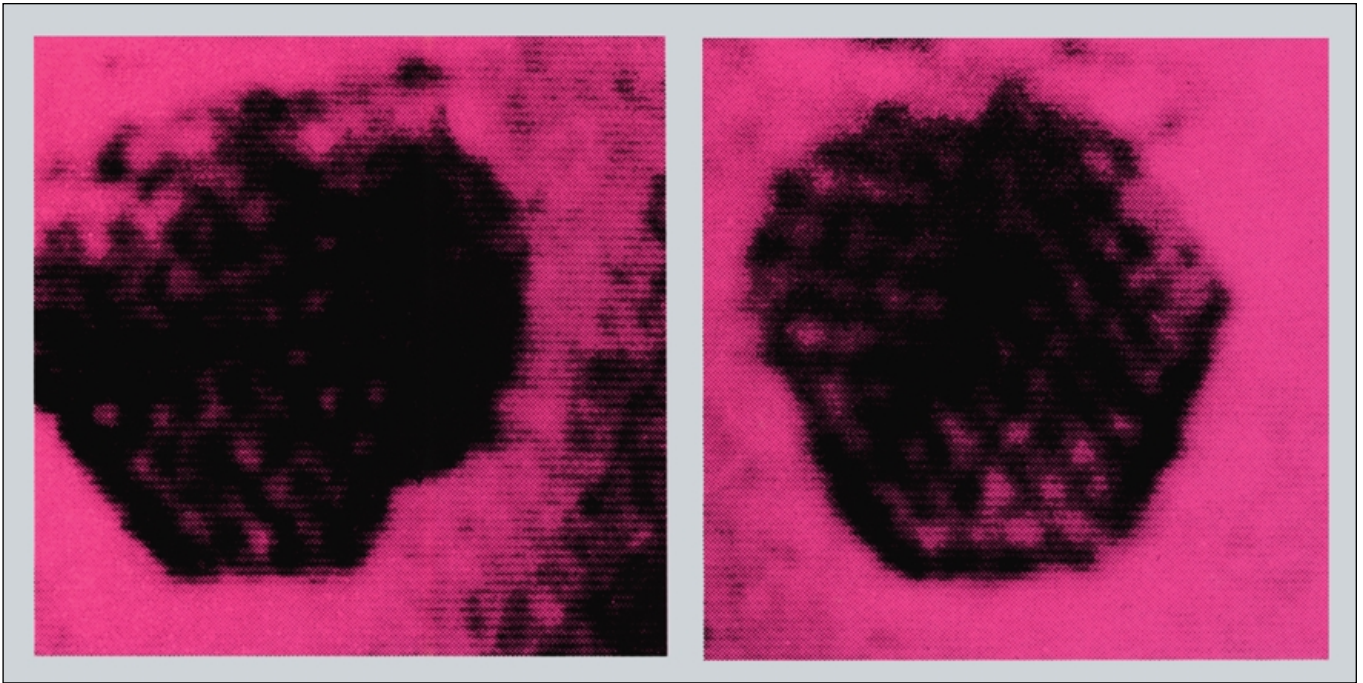


Fig. 28 – Fotografias com microscópio electrónico de um agregado de ouro com 460 átomos (o seu raio é 20 Å)
Fonte: C. Hayashi, *Physics Today*, Dec. 1987, 44.

dade dos átomos, que existem com toda a certeza! Basta pô-lo a espreitar por um bom microscópio... Os agregados atómicos podem até ser filmados com uma câmara de vídeo adequada, sendo assim possível visualizar alguns dos seus movimentos colectivos (figura 28).

Os agregados de xénon constituem apenas um exemplo dos prodígios que recentemente têm sido anunciados: criação de novos materiais (é o caso do «buckminsterfullereno», que é uma nova molécula de carbono que, quando empacotada sob a forma de um cristal molecular e dopada com um metal alcalino, é um supercondutor a altas temperaturas), produtos de nanotecnologia clínica (por exemplo, agregados que se podem deslocar no interior de um corpo humano

transportando substâncias activas para combater um tumor), catalizadores (para facilitar certas reacções químicas, nomeadamente as que têm lugar em chapas fotográficas), etc.

Contudo, os físicos não estudam os agregados ou os núcleos com o fito principal ou exclusivo nas aplicações. As aplicações aparecem normalmente como produtos laterais da infatigável indagação humana. É um facto histórico bem conhecido que a pesquisa dos físicos sobre as forças no coração do átomo acabou por conduzir à exploração da energia nuclear. Só o futuro poderá dizer onde desembocará a nossa actual investigação sobre os agregados, esses «parentes» dos núcleos a uma escala quase macroscópica.

SUGESTÕES DE LEITURA

Sobre Física Nuclear:

G. BERTSCH, "Vibrations of the atomic nucleus", *Scientific American*, May 1983, 40.

T. MAYER-KUCKUK, "Kernphysik", 4.ª ed, Teubner, Estugarda, 1984 (a publicar em português pela F. Gulbenkian, tradução de C. Fiolhais e R. Ferreira Marques).

J. SPETH e A. VAN DER WOUDE, "Giant resonances in nuclei", *Reports of Progress in Physics* 44 (1979) 719.

J. N. URBANO, "O Núcleo Atómico", *Colóquio Ciências* n.º 8, Fundação Calouste Gulbenkian, 1991, pág. 12.

Sobre Física de Agregados:

M. DUNCAN e D. ROUVRAY, "Microclusters", *Scientific American*, Dec. 1989, 110.

W. de HEER et al, "Electronic shell structure and metal clusters", *Solid State Physics* 40 (1987) 93.

S. STRINGARI, "Clusters of quantum liquids", in *Proc. Int. School Physics Enrico Fermi*, North-Holland, Amsterdão 1990, p. 190.