

ção, pode controlar o aquecimento do tumor regulando a potência do gerador de ondas ultra curtas e o tempo de irradiação.

Há dois anos, no Instituto de Física da Academia de Ciências da República Socialista Soviética da Letônia, foram elaborados pela primeira vez os métodos para melhorar as características magnéticas dos glóbulos vermelhos. Dentro dos glóbulos se introduzem partículas coloidais elevando seu magnetismo em dez mil vezes. O emprego do novo tipo de cápsulas magnéticas para a hipertermia local pode, pelo visto, solucionar muitos problemas relacionados com o sistema imunológico e com a retirada de ferro do organismo.

Existem também outras perspectivas. Por exemplo, junto com o ferro podem ser introduzidos, no organismo, medicamentos que contribuem para a recuperação completa do organismo. Além disto com o novo método pode ser tratado não somente o câncer, mas outras enfermidades como as cardiovascularares, a tuberculose e difterentes inflamações.

Até a presente data foram feitos experimentos exitosos em animais. Mas os especialistas opinam que não há razão para duvidar de que o novo método será muito eficaz no tratamento de seres humanos.

PENSE E RESPONDA!

Considere um recipiente que contém uma substância fundida e uma pequena porção sólida da mesma. Como podemos predizer, sem esperar que a solidificação ocorra, o que acontecerá com o volume da substância fundida quando esta solidificar?

27

ÁTOMOS DE RYDBERG

VASON A. C. GALLIAS
DEPTO DE FÍSICA-USF
FLORIANÓPOLIS - SC

Átomo de Rydberg é uma denominação genérica para indicar qualquer átomo que possua um elétron num estado quântico elevado.

Sabemos que elétrons somente podem orbitar átomos se possuírem determinados valores de energia. (A energia é quantizada!). Por exemplo, para um átomo de hidrogênio somente teremos órbitas eletrônicas estáveis para valores da energia dados por $E_n = -\frac{1}{2n^2}$. Átomos de Rydberg são como átomos de hidrogênio em suas propriedades mais essenciais. A semelhança pode ser entendida a partir das idéias mais elementares da estrutura atômica. Cada átomo consiste num núcleo com carga elétrica $+Z$ (i.e. a carga total dos prótons, cada um com carga $+1$) envolto por Z elétrons, cada um com carga -1 . Z é o chamado "número atômico" do átomo. O hidrogênio, que é o caso $Z = 1$, consiste de um único elétron ligado a um núcleo composto de um único próton. Se o elétron mais externo de um átomo que não seja o hidrogênio for promovido para um nível de energia muito alto, ele passará a mover-se numa órbita bastante afastada das orbitas dos outros elétrons. Portanto para este elétron excitado tudo se passa como se ele fosse atraído por um caroço iônico de carga $+1$ (formado pelo núcleo original mais todos os elétrons internos), que é a carga de um núcleo de hidrogênio. Desde que o elétron excitado não passe perto do núcleo, seu movimento será o mesmo que num átomo de hidrogênio. Portanto, a física dos átomos de Rydberg é essencialmente a física do átomo de hidrogênio.

Vale a pena observar ainda que em 1890 o espectroscopista suego Johannes Rydberg obteve uma fórmula empírica para as várias frequências presentes no espectro do hidrogênio. Ele obteve sua fórmula tentando reproduzir analiticamente as frequências medidas em laboratório. É importante observar que ele baseou-se somente em alguns resultados empíricos de Balmer e não possuía nenhum embasamento teórico para explicar a fórmula das frequências

$$\nu = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

A correspondente explicação teórica, como é bem sabido, viria mais tarde com Bohr e Sommerfeld, na mecânica quântica "velha", e com o advento da mecânica quântica propriamente dita.

Quando um elétron de um átomo é excitado numa órbita com número quântico principal elevado e consequentemente longe do caroço iônico, os níveis de energia podem ser descritos muito bem pela fórmula de Rydberg. Esta é a razão porque átomos nestes estados altamente excitados são frequentemente chamados de átomos de Rydberg.

O grande interesse em átomos de Rydberg provém de uma série de propriedades não usuais que estes átomos possuem. Em primeiro lugar, note que átomos de Rydberg são imensos: o "valor esperado" da posição do elétron de Rydberg é proporcional a n^2 . Já se observaram átomos de Rydberg cujo diâmetro se aproxima de centímetros de milímetros, o que é 100.000 vezes maior que o diâmetro do mesmo átomo no estado fundamental. Experiências recentes, realizadas por Jean-Claude Gay na Escola Normal Superior em Paris, permitiram a observação de estados com $n = 300$ em caso! Átomos de Rydberg são tão grandes que átomos menores podem facilmente "passar" através deles. Átomos de Rydberg possuem um tempo de vida extremamente longo. Um átomo ordinariamente excitado geralmente retorna ao estado fundamental em menos de um décimo-milionésimo de segundo. Na escala de fenômenos atômicos os átomos de Rydberg duram quase que "para sempre"; tempos de vida de milésimos de segundo até um segundo são bastante comuns. (Note que o tempo de vida longo a que nos referimos é o que tecnicamente se chama de "tempo de vida radiativo"; se os átomos de Rydberg não estivessem no "vácuo" é importante considerar-se o tempo de vida frente a colisões. É claro que por serem imensos os átomos de Rydberg "se rompem" facilmente em colisões.) Átomos de Rydberg podem ser violentamente distorcidos e até mesmo destruídos por campos elétricos fracos e podem ser "deformados" de modos inesperados por campos magnéticos.

Além das propriedades mencionadas acima, ultimamente existe um crescimento no interesse em átomos de Rydberg devido às suas propriedades radiativas. Como os átomos são grandes, elementos de matriz do dipolo elétrico entre níveis vizinhos - proporcionais a n^2 - são várias ordens de magnitude maiores que as quantidades correspondentes em estados fracamente excitados em átomos ou até mesmo moléculas. Isto faz com que o acoplamento entre estes estados altamente excitados (de Rydberg) e o campo de radiação se

ja extremamente forte. Além disso, transições entre níveis de Rydberg caem no intervalo de ondas milimétricas. Estes fatos fazem dos estados de Rydberg um campo de prova ideal para testes de alguns efeitos básicos de eletrodinâmica quântica. Vejamos como isto acontece.

A invenção do maser (o irmão mais velho do laser) gerou um grande interesse em modelos teóricos que descrevessem a interação de átomos com dois níveis com um único modo de um campo eletromagnético. Embora os primeiros modelos desta interação a tenham tratado de um modo bastante acadêmico (i.e. super idealizado), isto não impediu que uma grande classe de efeitos novos fosse preditos por estes modelos. A maioria destes efeitos não foi observada até o presente, porque era muito difícil realizar-se os experimentos correspondentes, usando-se transições atômicas "ordinárias". Dentre vários efeitos interessantes, baseados em modelos simples da interação entre átomos de dois níveis com um modo de campo eletromagnético, destacamos os seguintes:

- modificação da taxa de emissão espontânea de um único átomo colocado numa cavidade ressonante;
- troca oscilatória de energia entre um átomo e um modo de uma cavidade;
- desaparecimento e reaparecimento quântico de nuvens ópticas induzidas num átomo por um campo ressonante.

Átomos de Rydberg dentro de cavidades são bastante apropriados para se tentar ver estes efeitos. Das propriedades acima mencionadas para os átomos de Rydberg, é importante o fato de que, caindo nas transições na faixa de ondas milimétricas, é possível construir-se cavidades para oscilações em modos baixos que sejam suficientemente grandes (alguns cm) para assegurar tempos de interação longos.

Para concluir esta breve digressão sobre átomos de Rydberg, vamos agora discutir uma experiência realizada por Serge Haroche e colaboradores na Escola Normal Superior em Paris*. A experiência por eles realizada consistiu em medir a transmissão de um feixe de átomos de Rydberg através de uma grade metálica feita com furos retangulares de alguns microns. Eles verificaram experimentalmente que a transmissão decresce linearmente com o quadrado

*Publicada por C. Fabre, M. Gross, J.M. Raimond e S. Haroche em J. Phys. B: Atomic and Molecular Physics 16, L671-7 (1983).

do número quântico principal, com um valor de corte n_c tal que $n > n_c$ nenhum átomo consegue atravessar a grade. É isso mesmo! Eles conseguiram mostrar que os átomos de Rydberg podem ser tão grandes a ponto de não conseguirem atravessar uma grade metálica com furos retangulares de alguns microns. Vemos, então, que átomos de Rydberg podem ser maiores do que objetos manufaturados (como as fendas da grade, por exemplo). Temos, portanto, nos átomos de Rydberg um potencial enorme de experiências para testar o princípio de correspondência quântico \leftrightarrow clássico, que corresponde à passagem n^o quântico baixo \leftrightarrow n^o quântico alto.

A experiência foi realizada com um feixe de átomos de sódio excitados através de dois lasers colineares pulsados. O primeiro laser excitava a transição $3S - 3P$ e o segundo fazia a excitação final $3P - nD$, onde n , dependendo da frequência do laser, podia ser ajustado a qualquer valor entre 23 e 65. Cada pulso gerava em torno de 10^4 átomos. Após serem excitados os átomos continuavam sua trajetória até uma grade de ouro de (1×1) mm, constituída de 70×35 fendas retangulares com (2×20) μ m. As fendas foram feitas usando técnicas de eletroformação. Os átomos que conseguiram passar através das fendas eram detectados através de uma técnica conhecida como "ionização por campo": sabendo-se o grau de excitação dos átomos e fácil aplicar-se o campo elétrico necessário para ionizá-los e, conseqüentemente, contá-los. Deste modo, obteve-se o gráfico mostrado na Fig. 1, que mostra a transmissão T em função do quadrado do número quântico principal. As cruzes correspondem à grade orientada perpendicularmente ao feixe atômico, enquanto os pontos correspondem à grade levemente inclinada (20^o) em relação ao feixe. Considerando-se os átomos classicamente como pequenas

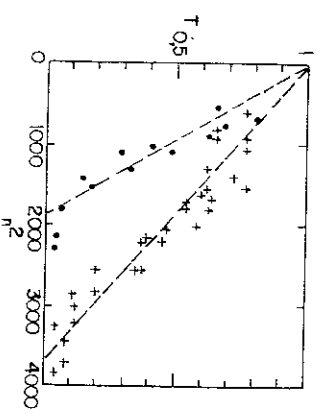


Fig. 1 - Gráfico da transmissão T em função de n^2 . As cruzes correspondem à folha perpendicular ao feixe atômico; os pontos correspondem a uma inclinação da folha de 20^o . As linhas tracejadas correspondem à predição de um modelo simples, considerando os átomos como "esferas-duras".

esferas, era de se esperar uma diminuição na transmissão, o que realmente ocorre. As linhas tracejadas correspondem a predições teóricas supondo os átomos realmente como esferas. Funcional! Note que esta experiência realmente traz de volta um "átomo bolinha" onde, porém, para criar a "bolinha clássica" precisamos sintonizar um laser em ressonância com "níveis quânticos da bolinha".

Esperamos que você esteja convencido da imensa variedade de experiências e cálculos possíveis de se fazer envolvendo átomos de Rydberg. Caso deseje mais detalhes sobre átomos de Rydberg sugerimos os seguintes artigos:

- KLEPPNER, D.; LITTMAN, M. & ZIMMERMAN, M. Highly excited atoms. Scientific American, 244(5): 708, 1981.
- HAROCHE, S. & RAIMOND, J.M. Radiative properties of Rydberg states in resonant cavities. Advances in Atomic and Molecular Physics, 20: 347-411, 1985.
- GALLIAS, J.A.C.; LEUCHS, G.; WALTHER, H. & FIGGER, H. Rydberg atoms and molecules: spectroscopy and radiation interaction. Advances in Atomic and Molecular Physics, 20: 413-66, 1985.

JÁ LHE PERGUNTARAM.....

... como podemos determinar a massa de um corpo que flutua numa superfície de forma retangular, cheia de água, usando somente uma régua? (Bartira Grandi, Depto de Física, UFSC)

Em primeiro lugar, devemos determinar o volume da água deslocada. Para isto, medimos as dimensões da vareta, calculamos a área de sua seção reta e a multiplicamos pelo deslocamento n^o vel da água (medido com a régua) após a remoção do corpo. O produto do volume de água deslocada pela sua massa específica dá a massa de água e conseqüentemente a massa do corpo flutuante.