
ÁTOMOS DE RYDBERG

Jason A. C. Gallas
Departamento de Física – UFSC
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 $E_n = -1/2n^2$. Átomos de Rydberg são como os de hidrogênio em suas propriedades mais essenciais. A semelhança pode ser entendida a partir das idéias mais elementares da estrutura atômica. Cada átomo consiste em um núcleo com carga elétrica $+z$ (i.e., a carga total dos prótons, cada um com uma carga de $+1$) 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 órbitas dos outros elétrons. Portanto, para esse 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 sueco Johannes Rydberg obteve uma fórmula empírica para as várias frequências presentes no espectro do hidrogênio, 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

$$V = R_H(1/m^2 - 1/m'^2).$$

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 conseqüentemente longe do caroço iônico, os níveis de energia podem ser descritos muito bem pela fórmula de Rydberg. Essa é a razão porque átomos nestes estados altamente excitados são freqüentemente chamados de átomos de Rydberg.

O grande interesse nestes provêm de uma série de propriedades não usuais que esses átomos possuem. Em primeiro lugar, note que eles 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 centésimos 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 césio! (Átomos de Rydberg são tão grandes que átomos menores podem facilmente “passar” através deles e 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 estiverem 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). Podem ser violentamente distorcidos e até mesmo destruídos por campos elétricos fracos e “deformados” de modos inesperados por campos magnéticos.

Além das propriedades mencionadas, 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 nos átomos ou até mesmo nas moléculas. Isso faz com que o acoplamento entre os estados altamente excitados (de Rydberg) e o campo de radiação seja extremamente forte. Além disso, transições entre níveis de Rydberg caem no intervalo de ondas milimétricas. Esses 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 dessa interação a tenham tratado de um modo bastante acadêmico (i.e., super idealizado), isso não impediu que uma grande classe de efeitos novos fossem preditos por esses modelos. A maioria dos resultados não foi observada até o presente, porque era muito difícil de se realizar 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:

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

Átomos de Rydberg dentro de cavidades são bastante apropriados para se tentar ver esses efeitos. Das propriedades mencionadas para os átomos em questão, é importante o fato de que, caindo as 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 vamos discutir uma experiência realizada por Serge Haroche e colaboradores na Escola Normal Superior em Paris*. O experimento 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 que a transmissão decresce linearmente com o quadrado do número quântico principal, com um valor de corte n_c tal que para $n > n_c$ nenhum átomo consegue atravessar a grade. É isso mesmo! Conseguiram mostrar que os átomos podem ser tão grandes a ponto de não conseguirem atravessar uma grade metálica com furos retangulares de alguns microns. Vemos, então, que os átomos de

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

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° quântico baixo \leftrightarrow n° quântico alto.

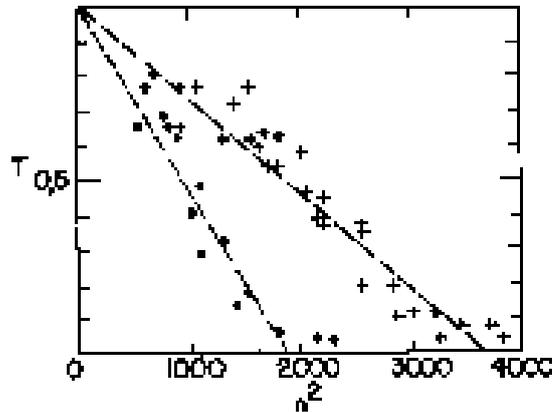


Fig. 1- Gráfico da transmissão T em função de pontos n^2 . As cruces correspondem à folha perpendicular ao feixe atômico; os pontos correspondem a uma inclinação da folha de 20° . As linhas tracejadas correspondem à predição de um modelo simples, considerando os átomos como “esferas duras”.

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 $3P - nD$, em que 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 estes continuavam sua trajetória até uma grade de ouro de (1×1) mm, constituída de 70×35 fendas retangulares com (2×20) μm . As fendas foram feitas através de técnicas de eletroformação. Os átomos que conseguiam passar através das fendas eram detectados através de uma técnica conhecida como “ionização por campo”; sabendo-se o grau de excitação dos átomos é fácil aplicar-se o campo elétrico necessário para ionizá-los e, conseqüentemente, contá-los. Desse modo, obteve-se o gráfico da Fig. 1, que mostra a transmissão T em função do quadrado do número quântico principal. As cruces correspondem à grade orientada perpendicularmente ao feixe atômico, enquanto os pontos correspondem à grade levemente inclinada (20°) em relação ao feixe. Considerando-se os átomos classicamente como pequenas 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. Funciona! Note que essa experiência realmente traz de volta um “átomo bolinha”, 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 estes sugerimos os seguintes artigos:

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