

Ressonâncias de Feshbach

Amilson R. Fritsch

*Universidade do Estado de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos*

Ressonâncias de Feshbach são muito utilizadas em gases frios pois possibilitam mudar o sinal e o valor do comprimento de espalhamento da interação atômica. Com isso, é possível obter condensados estáveis com espécies de comprimento de espalhamento desfavoráveis para condensação e também possibilita a criação de moléculas ultrafrias. Neste trabalho mostramos os principais mecanismos utilizados em ressonâncias de Feshbach e também alguns resultados experimentais de sua utilização.

I. INTRODUÇÃO

Ressonâncias de Feshbach sintonizáveis são uma excelente ferramenta para controle da interação entre os átomos em gases ultrafrios. Todas as propriedades fundamentais dos condensados de Bose-Einstein (BEC), tais como sua forma, suas flutuações, a formação de vórtices, são determinados pela força das interações atômicas. A baixas temperaturas, a energia de interação em uma nuvem de átomos é proporcional a sua densidade e também a um parâmetro atômico chamado de comprimento de espalhamento a , que influencia na dinâmica das colisões, a pode ser positivo ou negativo dependendo se a interação entre os átomos é atrativa ou repulsiva, se $a > 0$ a interação entre os átomos é repulsiva e o condensado é mais estável, se $a < 0$ temos a situação oposta.

Algumas espécies atômicas oferecem propriedades colisionais favoráveis para a obtenção de BEC sem a necessidade de variações externas em suas interações, ^{87}Rb e ^{23}Na são os exemplos mais claros. Em outros casos, o comprimento de espalhamento não é favorável para a obtenção de um BEC, e ressonâncias de Feshbach oferecem uma boa solução para a obtenção destes condensados, por exemplo ^{85}Rb , ^{133}Cs e ^{39}K . Inicialmente, para um bom condensado precisamos que o átomo tenha o valor de a positivo pois condensados sofrem colapsos quando o comprimento de espalhamento é negativo. Também, a , além de positivo, não deve ser muito pequeno, pois o resfriamento evaporativo não será eficiente. Além disso, o comprimento de espalhamento não pode ser muito grande para evitar decaimento rápido por colisões de três corpos. Na prática um bom valor do comprimento de espalhamento está não muito abaixo de 10 nem muito acima de algumas centenas de vezes o raio de Bohr a_0 [1].

Foi predito que o comprimento de espalhamento pode ser modificado por meios externos, como variações do campo magnético [2–4], por meios ópticos [5, 6] e também por radio frequência [7]. Para algumas espécies atômicas, como no ^{85}Rb , o comprimento de espalhamento pode passar de atrativo para repulsivo para determinados valores de campo magnético [8]. Estas modificações aparecem em uma, assim chamada, “Ressonância de Feshbach”.

Espécies com comprimento de espalhamento negativo não são favoráveis para obtenção de um bom condensado. Para ^7Li em um de seus estados internos com $a = -27a_0$, foi obtido um condensado com apenas algumas centenas de átomos, número que é limitado pelo colapso de átomos [9]. Mais tarde, usando a mesma espécie atômica, Khaykovich et al., [10] usaram ressonâncias de Feshbach para alterar o com-

primento de espalhamento para grandes valores positivos ($+40a_0$ e $+200a_0$) e obtiveram um condensado com cerca de 3×10^5 átomos.

Ressonâncias de Feshbach também foram utilizadas para variar o comprimento de espalhamento e obter condensados com ^{85}Rb , seu grande comprimento de espalhamento negativo ($a = -443a_0$ no estado $f = 2, m = -2$) limita o número de átomos condensados em cerca de apenas 100 átomos. O uso de ressonâncias de Feshbach também se mostrou muito eficiente para a obtenção de condensados de ^{133}Cs [11] e também em ^{39}K [12].

II. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE UMA RESSONÂNCIA DE FESHBACH

Uma ressonância de Feshbach consiste em acoplar dois canais de interação atômica aplicando um campo externo. Para explicar como ocorre uma ressonância de Feshbach utilizaremos uma figura que representa dois canais diferentes da energia potencial de interação, representado pelas duas curvas P e Q da figura 1. Para um processo de colisão, tendo pequenas energias, a curva inferior P representa um canal aberto, onde não é possível ter um estado ligado pois a energia cinética dos dois átomos é maior que o limiar de energia do canal. A curva superior Q representa um canal fechado, que pode suportar um estado ligado, pois a energia dos dois átomos está abaixo do limiar de energia do canal.

Uma ressonância de Feshbach ocorre quando a energia total em um canal aberto se aproxima de um estado ligado em um canal fechado. Se os momentos magnéticos dos átomos considerados nos dois canais são diferentes, a posição relativa entre as duas curvas pode ser ajustada por campo magnético. Em consequência, podemos passar de uma situação em que o estado ligado está ligeiramente abaixo do limiar, para uma situação em que o estado ligado está ligeiramente acima do limiar de energia [14]. Este método corresponde a uma ressonância de Feshbach magneticamente sintonizada e pode ser usada em metais alcalinos, pois os estados P e Q estão associados com diferentes configurações de spin e possuem o momento magnético efetivo diferente [13].

Cálculos para a ressonância de Feshbach em campos magnéticos externos foram relatadas para os baixos estados hiperfinos de átomos de Cs [2, 3], Li , Na [4], Rb [15] e K [16]. Elas são tipicamente espaçadas por várias centenas de Gauss.

Introduzida por Moerdijk et al [4], a dependência do com-

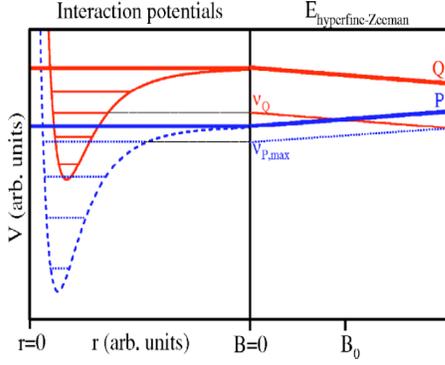


Figura 1: A parte esquerda da figura representa o canal aberto P e o canal aberto Q do potencial de interação dos átomos sem a presença do campo magnético. Na parte direita da figura representa a variação do potencial de interação na presença do campo magnético. Os potenciais de interação são conectados, o limiar do canal aberto é conectado ao estado ligado ν_Q do canal fechado em B_0 . Também é mostrado o maior estado vibracional do canal aberto $\nu_{P,max}$. Fig extraída da ref [13].

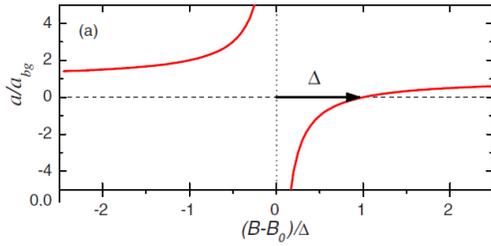


Figura 2: Propriedades da ressonância de Feshbach. O comprimento de espalhamento varia com a variação do campo magnético.

primento de espalhamento a como função do campo magnético B é dada pela simples expressão

$$a(B) = a_{bg} \left(1 - \frac{\Delta}{B - B_0} \right), \quad (1)$$

onde a_{bg} representa o comprimento de espalhamento longe da ressonância, B_0 representa a posição de ressonância onde o comprimento de espalhamento diverge ($a \rightarrow \pm\infty$) e o parâmetro Δ representa a largura da ressonância, melhor representado na figura 2. Abaixo e acima de uma Ressonância de Feshbach, o comprimento de espalhamento tem uma sequência contínua de valores positivos e negativos. Isto permite mudar o sinal do comprimento de espalhamento e obter condensados de Bose-Einstein com átomos naturalmente instáveis.

Ressonâncias de Feshbach foram observadas em diversas espécies atômicas, em ^{23}Na [17], em ^{85}Rb [8] e também em átomos de ^6Li [18, 19].

A figura 3 mostra dados experimentais de um BEC de átomos de sódio opticamente aprisionados. Armadilhas ópticas de dipolo são a principal ferramenta para estudos de

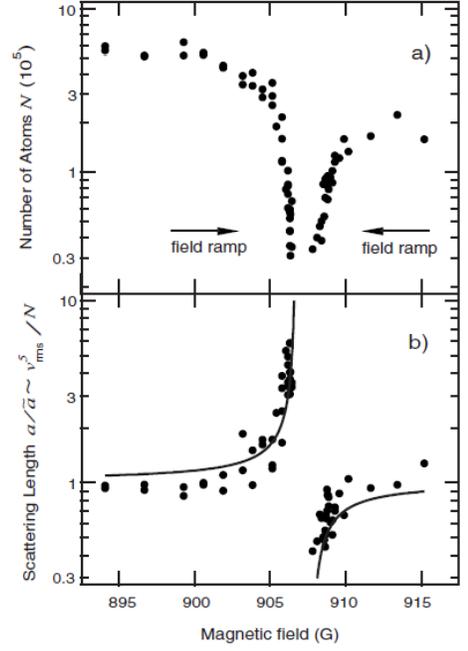


Figura 3: Observação de ressonâncias de Feshbach em ^{23}Na . A figura superior mostra a diminuição de átomos aprisionados perto da ressonância. A figura abaixo mostra o comprimento de espalhamento em função do campo magnético. Fig da ref. [17].

colisões relacionadas a ressonâncias de Feshbach. Potenciais ópticos podem aprisionar átomos em todos os subníveis do estado fundamental eletrônico e permitem a investigação das colisões em todos os canais correspondentes. A grande vantagem do uso de armadilhas ópticas é que o potencial de captura óptico não é afetado por campos magnéticos, já a aplicação de um campo magnético externo para estudos de ressonâncias de Feshbach em átomos magneticamente aprisionados pode influenciar fortemente nos parâmetros da armadilha.

O quadro inferior da figura 3 mostra o comportamento do comprimento de espalhamento próximo da ressonância de Feshbach que comprova a equação 1 (linha sólida). O quadro superior mostra claramente a perda de átomos aprisionados perto da ressonância, esta perda pode estar relacionada com a formação de moléculas perto de uma ressonância de Feshbach.

III. RESSONÂNCIAS DE FESHBACH ÓPTICAS

Campos magnéticos provaram ser uma grande ferramenta para modificar a força de interação entre os átomos ultrafrios alterando seu comprimento de espalhamento. Utilizando luz proveniente de laser também podemos induzir uma ressonância de Feshbach e obter resultados semelhantes. Isto possibilita saber como um BEC pode responder com a incidência da luz. Aqui não discutiremos com muito detalhamento as ressonâncias ópticas de Feshbach, apenas faremos uma breve

explicação sobre a teoria e apresentaremos alguns resultados experimentais de sua obtenção.

Proposto por Fedichev *et al* [5] a ideia é usar luz quase ressonante com a transição de um par de átomos colidindo e um nível rovibracional de um estado eletrônico excitado para induzir uma ressonância de Feshbach e manipular o sinal e o valor do comprimento de espalhamento dos átomos.

Ressonâncias ópticas de Feshbach podem oferecer algumas vantagens experimentais sobre as ressonâncias produzidas por campos magnéticos, pois dependem da intensidade e frequência do laser que podem ser variadas rapidamente. As transições ópticas são sempre obtidas, mesmo quando ressonâncias de Feshbach magnéticas não existem.

A variação do comprimento de espalhamento em BEC foi obtida experimentalmente pela primeira vez por Theis *et al* [20] em um BEC de ^{87}Rb ($F = 1, m_F = -1$) onde cruzaram com uma ressonância óptica de Feshbach. Utilizando um laser com intensidade de aproximadamente $500\text{W}/\text{cm}^2$, eles conseguiram mudar o comprimento de espalhamento de $10a_0$ para $190a_0$. Para mudar opticamente o comprimento de espalhamento eles utilizaram o laser sintonizado perto de uma ressonância que acopla o canal de entrada dos átomos livres com um estado molecular excitado (ver quadro inserido na figura 4), isto varia a função de onda e consequentemente o comprimento de espalhamento.

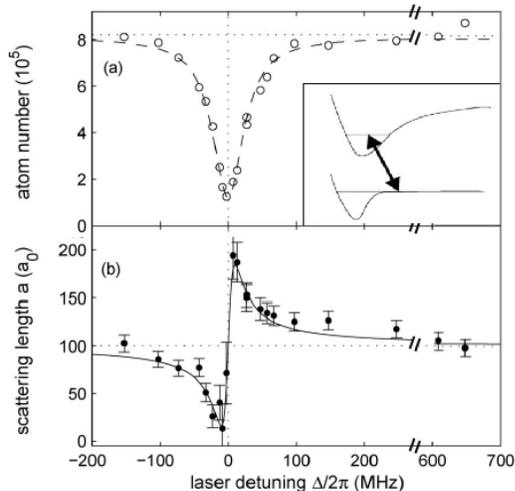


Figura 4: Ressonâncias ópticas de Feshbach. A figura (a) mostra a diminuição do número de átomos em função da dessintonia do laser. A figura (b) mostra os dados obtidos experimentalmente para o comprimento de espalhamento e a linha contínua representa a equação 2. Figura adaptada da ref. [20].

Bohn e Julienne [21, 22] descrevem as expressões analíticas para o comprimento de espalhamento alterado por incidência do laser sobre os átomos. A taxa de transição ressonante entre o estado contínuo e o estado molecular, Γ_{stim} , é proporcional à intensidade do laser. No experimento de Theis *et al* o valor de Γ_{stim} era três ordens de grandeza menor que a taxa de decaimento espontâneo Γ_{spon} . Isso permite fazer a aproximação $\Gamma_{stim} \ll \Gamma_{spon}$ e obter uma expressão

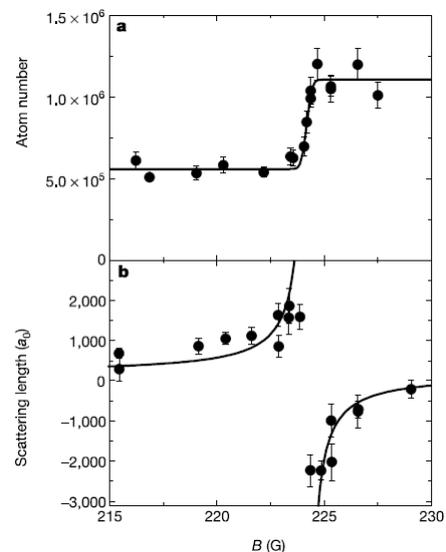


Figura 5: Formação de moléculas em ^{40}K . A parte superior mostra o desaparecimento de átomos perto de 224G indicando o aparecimento de moléculas. A parte inferior mostra o comprimento de espalhamento do ^{40}K em função do campo magnético. Fig da referência [26].

aproximada para o comprimento de espalhamento, dada por

$$a = a_{bg} + \frac{1}{2k_i} \frac{\Gamma_{stim}\Delta}{\Delta^2 + (\Gamma_{spon}/2)^2}, \quad (2)$$

onde a_{bg} é o comprimento de espalhamento na ausência de luz, Δ é a dessintonia do laser, e $\hbar k_i$ é o momento relativo da colisão. A figura 4 mostra o gráfico da equação e os dados obtidos experimentalmente por Theis *et al* [20] para um BEC de ^{87}Rb .

IV. FORMAÇÃO DE MOLÉCULAS

Ressonâncias de Feshbach também são usadas para acoplar pares de átomos colidindo transformando em moléculas. Aqui apresentaremos apenas os métodos utilizados e alguns resultados experimentais da formação de moléculas.

As primeiras evidências da formação de moléculas apareceram no experimento de Donley *et al*, eles aplicaram pulsos de campo magnético dependentes do tempo em um BEC ^{85}Rb , próximos a uma ressonância de Feshbach. Monitorando a dependência do número de átomos em função da duração do pulso magnético eles observaram evidências da formação de moléculas.

Em 2003 vários grupos relataram a formação de moléculas em gases degenerados de Fermi e também em BEC. Vários métodos foram desenvolvidos para a formação de moléculas próximos a uma ressonância de Feshbach, o mais comum deles usualmente é tratado como “rampa de Feshbach”. O método, proposto por Timmermans *et al.* 1999 [23], van Abeelen and Verhaar 1999b [24], e Mies *et al.* 2000 [25], consiste em fazer uma rampa de campo magnético próximo

a uma ressonância de Feshbach, começando com um valor de $B > B_0$, onde os átomos não possuem um estado ligado, passando por $B = B_0$, e terminando em um valor de $B < B_0$. Isso torna possível o acoplamento ressonante entre dois átomos em um canal aberto e um estado molecular ligado. Na figura 5 são apresentados os resultados experimentais de Regal *et al* para um gás degenerado de Fermi de ^{40}K . A prova da criação de moléculas é o desaparecimento de átomos quando o campo diminuído abaixo de $224G$ e o aparecimento de átomos quando a rampa de campo é feita acima deste valor.

V. CONCLUSÃO

Ressonâncias de Feshbach, desde que foram descobertas, tornaram-se uma ferramenta de fundamental importância

para a realização de condensados com espécies de comprimento de espalhamento desfavoráveis, tornando possível um estudo mais aprofundado de suas propriedades mais fundamentais. Utilizando campos magnéticos é possível mudar a interação átomo-átomo em gases ultrafrios, através da mudança do comprimento de espalhamento. Algumas vezes o alto campo magnético necessário para o aparecimento de uma ressonância de Feshbach se torna um inconveniente para se obter experimentalmente, e utilizando meios ópticos também é possível obtê-las. As ressonâncias ópticas de Feshbach, podem ser obtidas utilizando luz laser, e só dependem da frequência e intensidade do laser, que não são difíceis se serem modificadas no laboratório.

As ressonâncias de Feshbach também tornaram possível a formação de moléculas ultrafrias, abrindo caminho para um amplo campo de novos estudos.

-
- [1] Chin, C., Grimm, R., Julienne, P., and Tiesinga, E. Feshbach resonances in ultracold gases. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1225-1286 (2010).
- [2] Tiesinga, E., Moerdijk, A. J., Verhaar, B. J. and Stoof, H. T. C. Conditions for Bose-Einstein condensation in magnetically trapped atomic cesium. *Phys. Rev. A* **46**, R1167-R1170 (1992).
- [3] Tiesinga, E. Verhaar, B. J. and Stoof, H. T. C. Threshold and resonance phenomena in ultracold ground-state collisions. *Phys. Rev. A* **47**, 4114-4122 (1993).
- [4] Moerdijk, A. J., Verhaar, B. J. and Axelsson, A. Resonances in ultracold collisions of ^6Li , ^7Li and ^{23}Na . *Phys. Rev. A* **51**, 4852-4861(1995).
- [5] Fedichev, P. O., Kagan, Yu., Shlyapnikov, G. V. and Walraven, J. T. M. Influence of nearly resonant light on the scattering length in low-temperature atomic gases. *Phys. Rev. Lett.* **77**, 2913 (1996).
- [6] Bohn, J. L. and Julienne, P. S. Prospects for influencing the scattering lengths with far-off-resonant light. *Phys. Rev. A* **56**, 1486-1491 (1997).
- [7] Moerdijk, A. J., Verhaar, B. J. and Nagtegaal, T. M. Collisions of dressed ground-state atom. *Phys. Rev. A* **53**, 4343-4351 (1996).
- [8] Roberts, J. L., Clausen, N. R., Burke, J. P., Greene, C. H. Jr., Cornell, E. A. and Wieman, C. E. Resonant magnetic field control of elastic scattering in cold ^{85}Rb . *Phys. Rev. Lett.* **81**,5109-5112 (1998).
- [9] Bjadley, C. C., Sackett, C. A. and Hulet, R. G. Bose-Einstein condensation of lithium: Observation of limited condensate number. *Phys. Rev. Lett.* **78**, 985-989 (1997).
- [10] Khaykovich, L., Schrech, F., Ferrari, G., Bourdel, T., Cubizolles, J., Carr, L. D., Castin, Y. and Salomon, C. Formation of a matter-wave bright soliton. *Science* **296**, 1290-1293 (2002).
- [11] Weber, T., Herbig, J., Mark, M., Nägerl, H.-C. and Grimm, R. Three-body recombination at large scattering lengths in an ultracold atomic. *Science* **299**, 232-235 (2003a).
- [12] Roati, G., Zaccanti, M., D'Enrico, C., Catani, J., Modugno, M., Simoni, A., Inguscio, M., and Modugno, G. ^{39}K Bose-Einstein condensate with tunable interactions. *Phys. Rev. Lett.* **99**, 010403 (2007).
- [13] Marcelis, B., van Kempen, E. G. M., Verhaar, B. J. and Kokkelmans S. J. J. M. F. Feshbach resonances with large background scattering length: Interplay with open-channel resonances. *Phys. Rev. A* **70**, 012701 (2004).
- [14] Stringari, S. and Pitaevskii, L. *Bose-Einstein Condensation*. (Oxford University, London - 2003).
- [15] Vogels, J. M. *et al*. Prediction fo Feshbach resonances in collisions of ultracold rubidium atoms. *Phys. Rev. A* **56**, R1067-R1070 (1997).
- [16] Boesten, H. M. J. M., Vogels, J. M., Tempelaars, J. G. C. and Verhaar, B. J. Properties of cold collisions of ^{39}K atoms and of ^{41}K atoms in relation to Bose-Einstein condensation. *Phys. Rev. A* **54**, R3726-R3729 (1996).
- [17] Inouye, S., Andrews, M. R., Stenger, J., Miesner, M. J., Stamper-Kurn, D. M. and Ketterle, W. Observation of Feshbach resonances in a Bose-Einstein condensate. *Nature (London)* **392**, 151-154.
- [18] Houbiers, M., Stoof, H. T. C, McAlexander, W. I. and Hulet, R. *Phys. Rev. A* **57**, R1497 (1998).
- [19] O'Hara, K. M., Hemmer, S. L., Granade, S. R., Gehm, M. E. and Thomas J. E. *Phys. Rev. A* **66**, 041401 (R) (2002).
- [20] Theis, M., Thalhammer, G., Winkler, K., Hellwig, M., Ruff, G., Grimm, R. and Hecker Denschlag, J. Tuning the scattering length with an optically induced Feshbach resonance. *Phys. Rev. Lett.* **93**, 123001 (2004).
- [21] Bohn, J. L., and Julienne, P. S. Semianalytic treatment of two-color photoassociation spectroscopy and control of cold atoms. *Phys. Rev. A* **54**, R4637-R4640 (1996).
- [22] Bohn, J. L., and Julienne, P. S. Semianalytic theory of laser-assisted resonant cold collisions. *Phys. Rev. A* **60**, 414-425 (1999).
- [23] Timmermans, E., Tommasini, P., Hussein, M. and Kerman, A. Feshbach resonances in atomic Bose-Einstein condensates. *Phys. Rep.* **315**, 199-230 (1999).
- [24] van Abeelen, F. A. and Verhaar, B. J. Timedependent Feshbach resonance scattering and anomalous decay of a Na Bose-Einstein condensate. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1550 (1999).
- [25] Mies, F. H., Tiesinga, E. and Julienne, P. S. Manipulation of Feshbach resonances in ultracold atomic collisions using time-dependent magnetic fields. *Phys. Rev. A* **61**, 022721.
- [26] Regal, C. A., Ticknor, C.J., Bohn, L. and Jin, D. S. Creation of ultracold molecules from a Fermi gas of atoms. *Nature London* **424**, 47-50 (2003a).