

Misturas de Condensados de Bose-Einstein

Edwin Pedrozo Peñafiel

Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 14 de Novembro de 2012

Resumo

Uma descrição geral das mais relevantes propriedades de condensados de Bose-Einstein mistos é feita. As condições necessárias para a obtenção de uma mistura de condensados estável é apontada e discutida. A importância de estes sistemas também é destacada neste trabalho, devido à grande variedade de estudos e testes que podem ser feitos com estes sistemas, por exemplo, estudos de propriedades termodinâmicas, interação da radiação com a matéria, transferência de propriedades quântica de um condensado para o outro, entre outras.

Introdução

As manifestações macroscópicas de certos efeitos quânticos são sempre surpreendentes e acabam revelando efeitos inesperados como é o caso da superfluidez do Hélio, efeito Hall quântico e outros. Dentro desta classe de efeitos, a condensação de Bose-Einstein (em inglês BEC-Bose-Einstein Condensation) em gases a baixas densidades é um efeito interessante que somente foi observado recentemente graças ao advento e avanço das modernas técnicas para resfriar e confinar átomos neutros. Observações deste tipo devem revelar propriedades do sistema que nos possibilite entender importantes detalhes de sistemas quânticos degenerados, quem sabe fornecendo evidências para um melhor entendimento do comportamento da superfluidez, entre outros efeitos.

A produção experimental de Condensação de Bose-Einstein em amostras gasosas de átomos alcalinos em armadilhas magnéticas abriu um novo campo de pesquisas tanto experimental quanto teórico extremamente rico e excitante que ainda se encontra em forte expansão. A disponibilidade de sistemas macroscópicos em um regime completamente quântico abre um leque imenso de possibilidades de estudos, desde testes de Física Básica, em estatística quântica, por exemplo, ou da observação do comportamento de ondas coerentes de matéria, em óptica atômica, lasers de átomos e outros, até o uso dessas características para o desenvolvimento de sistemas no ramo da informação quântica.

Com o aprimoramento das técnicas experimentais a variedade de sistemas disponíveis para estudo aumentou enormemente. Hoje, misturas de condensados de bósons de espécies diferentes ou da mesma espécie em diferentes estados hiperfinos, em diversos tipos de armadilhas não puramente magnéticas são sistemas de estudo que tem permitido grande avanço de diversas

áreas. Além dos sistemas mistos de bósons diferentes, ainda existem muitos estudos em misturas de bósons e férmions, em sistemas de átomos não-alcinos, em controle da interação entre os átomos condensados através de ressonâncias de Feshbach e muitos outros sistemas extremamente interessantes que mantém bastante amplo o horizonte dos fenômenos a serem estudados nessa área. Dentre tais perspectivas estão estudos envolvendo vórtices quânticos e sua transferência de uma espécie para outra.

1 Misturas de Condensados Boson-Boson (Descrição geral)

O mais simples exemplo de condensados multicomponentes, é uma mistura de duas espécies bosônicas, o qual pode ser de dois átomos diferentes ou isótopos da mesma espécie [2]. Só para apontar de maneira geral, a função de onda numa mistura de duas espécies é dada por

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_{N_1}; \mathbf{r}'_1, \dots, \mathbf{r}'_{N_2}) = \prod_{i=1}^{N_1} \phi_1(\mathbf{r}_i) \prod_{i=1}^{N_2} \phi_2(\mathbf{r}'_i) \quad (1)$$

e a equação de Gross-Pitaevskii (GPE) independente do tempo é

$$-\frac{\hbar^2}{2m_1} \nabla^2 \psi_1 + V_1(\mathbf{r})\psi_1 + U_{11} |\psi_1|^2 \psi_1 + U_{12} |\psi_2|^2 \psi_1 = \mu_1 \psi_1 \quad (2)$$

e

$$-\frac{\hbar^2}{2m_2} \nabla^2 \psi_2 + V_2(\mathbf{r})\psi_2 + U_{22} |\psi_2|^2 \psi_2 + U_{12} |\psi_1|^2 \psi_2 = \mu_2 \psi_2 \quad (3)$$

Neste caso aparece uma GPE para cada espécie, porém com um termo de acoplamento (U_{12}) entre elas, o qual dá conta da interação entre os dois condensados. Nestas equações tem-se introduzido os potenciais químicos para cada espécie (μ_1, μ_2), os quais tem que garantir que o número de átomos de cada espécie deve ser conservado, portanto, a interação conserva separadamente o número de átomos das duas espécies. As constantes U_{11} , U_{22} e $U_{12} = U_{21}$ estão relacionadas aos respectivos comprimentos de espalhamento a_{11} , a_{22} e $a_{12} = a_{21}$ por $U_{ij} = 2\pi\hbar^2 a_{ij}/m_{ij}$ ($i, j = 1, 2$), e onde $m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j)$ é a massa reduzida para um átomo i e j .

Uma das condições fundamentais para um sistema de condensado misto (duas espécies) é a estabilidade,

a qual está dada por [2]

$$U_{11} > 0, \quad U_{22} > 0, \quad U_{11}U_{22} > U_{12}^2 \quad (4)$$

A primeira condição garante a estabilidade contra o colapso quando apenas a densidade da primeira componente é variada, e portanto, é equivalente à exigência de que os modos de som com grandes comprimentos de onda sejam estáveis nessa componente. A segunda condição descreve o mesmo para a segunda espécie. A condição final assegura que nenhuma perturbação em que a densidade de ambas as componentes são variadas pode diminuir o energia.

A condição de estabilidade pode ser entendida fisicamente com essa última condição, o qual é equivalente à

$$U_{11}U_{22} - U_{12}^2 > 0 \quad (5)$$

Usando $U_{ij} = 2\pi\hbar^2 a_{ij}/m_{ij}$, podemos exprimir esta última como [3]

$$a_{11}a_{22} > \frac{(m_1 + m_2)^2}{4m_1m_2} a_{12}^2 \quad (6)$$

Isto significa que se a interação individual intra-espécies for maior do que a interação inter-espécies vamos ter estabilidade, mas se fosse ao contrário, teríamos uma condição de separabilidade, ou seja, uma repulsão.

Experimentalmente uma mistura de condensados de duas espécies é conseguida usando a técnica de “*sympathetic cooling*” [4]. Inicialmente esta técnica foi usada para resfriar e atingir o regime degenerado de uma espécie que não pode ser eficientemente resfriada por evaporação direta, como nos casos do ${}^6\text{Li}$ e ${}^{41}\text{K}$ [6]. As limitações nestes sistemas são devidas aos limites impostos pelo laser cooling [5]. No caso descrito na Ref. [4] átomos de Potássio são resfriados por *sympathetic cooling* com uma amostra de átomos de Rubídio resfriada por evaporação.

Os sistemas experimentais são baseados nas convencionais duplas MOT (Magneto-optical trap). Uma MOT, digamos MOT1, carrega o vapor de ambas espécies, que logo de atingir o limite Doppler são transferidas para uma segunda câmara com uma pressão muito menor onde serão recapturadas para formar o MOT2. Neste estágio resfriamento evaporativo é realizado sobre a espécie que é eficientemente resfriada com esta técnica, que no caso do exemplo que estamos tratando (Ref. [4]) é o Rubídio. Além disso, ambas as amostras são monitoradas usando técnicas de imagem [7]. O processo detalhado da evaporação é descrito na Ref. [4]. No começo do resfriamento as duas amostras são afetadas pela mudança no campo magnético e portanto são resfriadas, mas mantendo a população de átomos de K constante. Na realidade, também existem perdas de átomos de K na primeira parte da evaporação, as quais podem ser minimizadas mudando a velocidade da rampa de evaporação. Durante toda a evaporação ($\sim 50\text{ s}$ neste caso), a temperatura da nuvem de K segue à do Rb , o qual indica uma alta eficiência na termalização inter-espécies (Fig. 1).

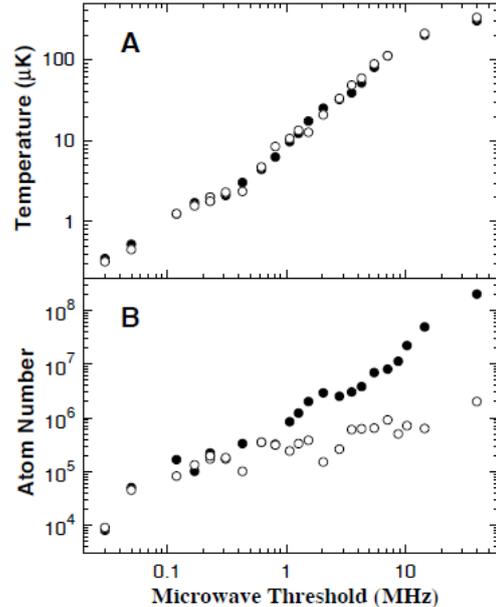


Fig. 1. Evolução do número de átomos (A) e a temperatura (B) das duas espécies atômicas na armadilha magnética como função do limiar de evaporação por micro-ondas do Rb . Os círculos sólidos correspondem a ${}^{87}\text{Rb}$ e os círculos abertos a ${}^{41}\text{K}$. Gráfico tirado da Ref. [4].

Nesta fase da evaporação, a eficiência do *sympathetic cooling* é sustentado pelo grande número de colisões entre as duas espécies. A figura 2, mostra a imagem das duas espécies, onde o Rb é inicialmente resfriado e este resfria ao K devido à termalização que acontece depois do grande número de colisões. No final do processo o número de átomos de cada espécie é aproximadamente igual como é mostrado claramente pela figura 1.

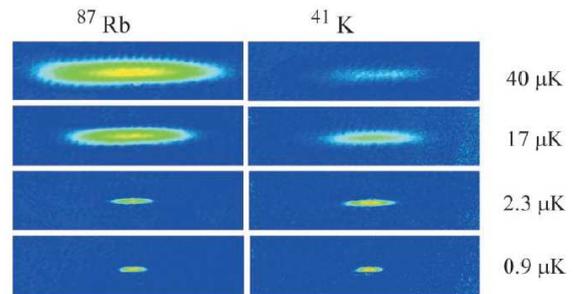


Fig. 2. Imagens de absorção do Rb e K em quatro momentos diferentes do *sympathetic cooling*. Nota-se que a densidade da amostra de K incrementa conforme incrementa o tempo de contato térmico entre as duas espécies. Gráfico tirado da Ref. [4]

2 Misturas de BEC em diferentes estados hiperfinos (mesmo isótopo)

Este tipo de misturas também é chamada de condensado de espinors por ser composto por átomos em diferentes estados de spin. A primeira realização experimen-

tal deste tipo de mistura foi feita em 1997 pelo grupo do JILA, obtendo uma mistura de átomos de ^{87}Rb em diferentes estados hiperfinos, $F = 2$, $m_F = 2$ e $F = 1$, $m_F = -1$ [8]. As misturas de estados hiperfinos de um mesmo isótopo se diferenciam de misturas de isótopos distintos porque os átomos podem sofrer transições entre estados hiperfinos, enquanto transições que convertem um isótopo em outro não são muito prováveis de acontecer [2].

Transições entre diferentes estados hiperfinos podem influenciar as propriedades de equilíbrio se a energia por partícula é comparável ou maior que a diferença de energia entre os estados hiperfinos. Em armadilhas magnéticas é difícil atingir tais condições, devido ao fato dos potenciais de aprisionamento serem dependentes do estado hiperfino particular. No entanto, em armadilhas ópticas o potencial é independente do estado hiperfino, permitindo que a dinâmica do spin seja investigada, [2]. Este tipo de misturas em armadilhas ópticas foram realizadas experimentalmente pela primeira vez pelo grupo de W. Ketterle no MIT [9, 10].

Uma parte importante que deve ser mencionada é que no caso de misturas de espécies diferentes a interação conserva o número total de partículas de cada espécie, o qual não é mais válido quando a condensação acontece em estados hiperfinos diferentes do mesmo isótopo. Isto pode ser entendido considerando um átomo no estado $m_F = -1$, este átomo pode ser espalhado por um átomo no estado $m_F = 1$, e como consequência deste espalhamento os dois átomos tem a possibilidade de ficar no estado $m_F = 0$, o qual quebra a conservação do número de átomos em ambos os estados [2].

Para entender melhor este tipo de misturas, analisemos o caso específico do experimento descrito na Ref. [8]. Nesse experimento usou-se o convencional resfriamento e aprisionamento por laser seguido de aprisionamento magnético e resfriamento evaporativo. A mistura é feita com átomos de ^{87}Rb nos diferentes estados hiperfinos $|F = 1, m = -1\rangle$ e $|F = 2, m = 2\rangle$. A nuvem de átomos no estado $|1, -1\rangle$ foi resfriada usando resfriamento evaporativo, e a nuvem de átomos no estado $|2, 2\rangle$ foi resfriada por contato térmico com os átomos no estado $|1, -1\rangle$ previamente resfriados. Este é o mecanismo chamado de *sympathetic cooling* descrito na seção anterior. Um destaque importante deve ser feito enquanto refere-se ao comportamento dos átomos nos dois estados de spin quando estão tanto no estado condensado e não condensado. Quando os dois condensados são sobrepostos, novas características aparecem na sua interação.

O experimento começa populando os diferentes estados hiperfinos mediante um bombeamento óptico, isto é feito com pulsos de luz nas frequências $5S_{1/2}(F = 1) \rightarrow 5P_{3/2}(F' = 2)$ e o $F = 2 \rightarrow F' = 2$. Com as polarizações adequadas da luz consegue-se popular com uma eficiência de aproximadamente 90% os estados $|1, -1\rangle$ e $|2, 2\rangle$. O passo seguinte é criar a mistura, usando *sympathetic cooling*. Se as duas nuvens estão na mesma temperatura, a nuvem $|1, -1\rangle$ é mais fracamente confinada que a nuvem no estado $|2, 2\rangle$ devido

à diferença de momentos magnéticos [7] (formula 1.75). Isto faz com que os átomos em $|1, -1\rangle$ sejam preferentemente removidos pelo campo de radio frequência (rf). Assim, os átomos em $|2, 2\rangle$ são resfriados por colisões com os átomos $|1, -1\rangle$ resfriados por evaporação. Devido ao fato que os dois estados sentem diferentes forças magnéticas mas a mesma força gravitacional, a nuvem de átomos em $|2, 2\rangle$ deve ficar ligeiramente acima da nuvem de átomos em $|1, -1\rangle$, isto é mostrado na figura 3, onde a separação entre os dois condensados foi incrementada diminuindo a constante de mola da armadilha com o intuito de incrementar o deslocamento devido à gravidade [8].

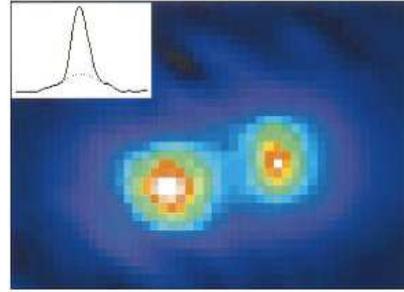


Fig. 3. Imagem de absorção mostrando os dois condensados $|2, 2\rangle$ (esquerda) e $|1, -1\rangle$ (direita). Os condensados estão separados devido à inclinação gerada pela componente da força gravitacional ao longo da direção fraca da constante de mola. As partes não condensadas (violeta e azul escuro) ainda estão superpostas. Gráfico tirado da Ref. [8].

Para obter a imagem seletiva de cada estado da mistura, o feixe de prova deve ser ligeiramente modificado. Um feixe de imagem é colocado ressonante na transição $F = 2 \rightarrow F' = 2$ o qual permite obter a imagem da nuvem no estado $|2, 2\rangle$. depois disso, um segundo feixe de prova é colocado com a transição $F = 1 \rightarrow F' = 2$, isto permite fazer uma imagem de absorção de todos os átomos independente do estado inicial [8]. A figura 4 mostra as imagens dos condensados.

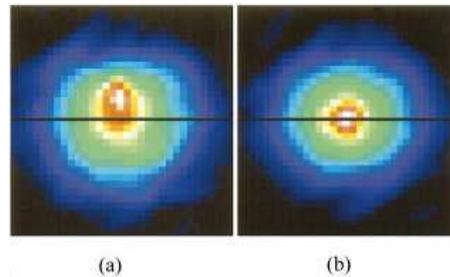
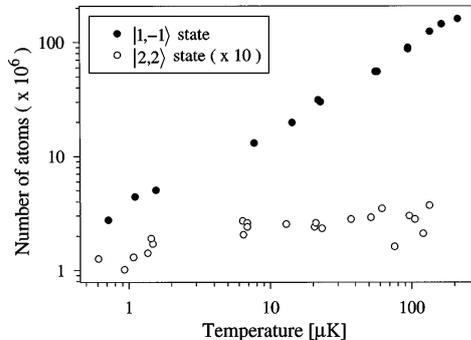


Fig. 4. A nuvem de dois condensados sobrepostos é iluminada, fazendo com que só os átomos $|2, 2\rangle$ sejam visíveis. (a) O condensado (Branco, vermelho e amarelo) é deslocado para cima como relação ao centro da nuvem não condensada (verde, azul e violeta) devido a interações com o condensado $|1, -1\rangle$ (os átomos $|1, -1\rangle$ não são visíveis). (b) Uma nuvem de átomos resfriada a uma temperatura similar a (a). A linha preta é uma guia a través do centro de cada nuvem térmica. Gráfico tirado da Ref. [8].

Com a técnica de *sympathetic cooling* (neste caso, [8]) quase não perda de átomos do estado $|2, 2\rangle$. Quase

a metade dos átomos $|2, 2\rangle$ permanecem depois das colisões, contrario como acontece com os átomos no estado $|1, -1\rangle$, os quais são permanecem aproximadamente $\frac{1}{60}$ do número inicial de átomos. Assim, para resfriar as duas espécies por *sympathetic cooling* e atingir um condensado de aproximadamente o mesmo número de átomos, devemos ter inicialmente um maior número de átomos no estado a ser resfriado por evaporação.



Número de átomos nos estados $|1, -1\rangle$ e $|2, 2\rangle$ numa nuvem de duas espécies como função da temperatura durante o processo de *evaporative sympathetic cooling*. A nuvem está sendo resfriada desde a temperatura inicial na armadilha magnética até exatamente acima da temperatura de condensação. Gráfico tirado da Ref. [8].

Só com intuito de expandir um pouco a discussão, é necessário apontar que uma parte importantíssima no que tem a ver com misturas, são as ditas misturas de fermions-bósons [11], estes sistemas tem sido desenvolvidos desde há quase uma década e são peça fundamental para estudo de fenômenos muito importantes e interessantes como efeitos de estatística puramente quântica, tais como as implicações do princípio de exclusão de Pauli nas propriedades de espalhamento do sistema [11]. Além de muitas outras aplicações, estes sistemas estão se convertendo em um grande suporte experimental para muitos fenômenos físicos, já que podem se usar como simuladores quânticos, etc.

Conclusões

Da discussão anterior vemos que misturas de condensados tem uma ampla variedade de formas de serem criadas, passando pela questão de que estas misturas podem ser compostas por átomos diferentes, também com átomos iguais porém, em estados hiperfinos diferentes, em sistemas contendo bósons e férmios como destacado no parágrafo anterior. Também, estas misturas tem sido criadas em diferentes tipos de armadilhas como são as magnéticas e as ópticas.

Uma maneira muito eficiente de atingir a condensação de varias espécies é usando a técnica chamada de *sympathetic cooling* a qual tem sido utilizada para produzir os tipos de misturas mencionados no texto, e a qual permitiu o resfriamento de férmios abaixo da temperatura de Fermi de isótopos fermiônicos. Atualmente tem-se trabalhado arduamente neste tipo de sistemas. Uma descrição para sistemas com mais de

duas componentes é dada na Ref. [3].

Por último é importante repetir que estes sistemas mistos são importantes para muitos estudos, entre os quais destacam-se espectroscopia de alta resolução e metrologia [12], teste de teorias fundamentais [4] e química de átomos (moléculas) ultrafrias.

Referências

- [1] Garcías-Ripoll, J. J. and Pérez-García, V. M. Stable and Unstable Vortices in Multicomponent Bose-Einstein Condensates, PRL **84**, 19, p. 4264, 2000.
- [2] Pethick, C. J. and Smith, H. Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases. United Kingdom: Cambridge University Press, 2002.
- [3] Courtille, Ph. W., Bagnato, V. S., Yukalov, V. I. Bose-Einstein condensation of trapped atomic gases, Lasers Physics **11**, 6, p. 659-800, 2001.
- [4] Modugno, G. et al. Bose-Einstein condensation of Potassium atoms by sympathetic cooling, Science **294**, p. 1320, 2012.
- [5] Prevedelli, M., Trapping and cooling of potassium isotopes in a double-magneto-optical-trap apparatus, PRA **59**, 1, p. 886, 1999.
- [6] Ferrari, G. Collisional Properties of Ultracold K-Rb Mixtures, PRL **89**, 5, p. 053202-1, 2002.
- [7] Courtille, Ph. W. Leitura em Optica Atômica: A Física dos Gases Frios, <http://www.ifsc.usp.br/~strontium/>, 2012.
- [8] Myatt, C. J. et al. Production of Two Overlapping Bose-Einstein Condensates by Sympathetic Cooling, PRL **78**, 4, p. 586, 1997.
- [9] Stamper-kurn, D. M. et al. Optical confinement of a Bose-Einstein condensate, PRL **80**, 10, p. 2027, 1998.
- [10] Stenger, J. et al. Spin domain in ground-state Bose-Einstein condensate, Nature **396**, p. 345, 1998.
- [11] Two-Species mixture of quantum degenerate Bose and Fermi gases, PRL **88**, 16, p. 160401-1, 2002.
- [12] C. W. Oates, E. A. Curtis, L. Hollberg, Opt. Lett. **25**, 1603 (2000).