

Condensação de Bose-Einstein em gases de Fermi ultrafrios



Leonardo W. T. Barros

Condensação de Bose-Einstein em gases de Fermi ultrafrios

- 1) Introdução
- 2) Técnicas de Resfriamento
- 3) Mar de Fermi
- 4) Pares de Cooper
- 5) Teoria BCS
- 6) Resfriando um gás de Fermi
- 7) Ressonância de Feshbach e interações
- 8) BEC molecular
- 9) Condensado BCS
- 10) Cruzamento BCS-BEC
- 11) Conclusão

Introdução

- Os experimentos com átomos ultrafrios permitem que se criem sistemas quânticos bem controlados de muitos corpos. Dizemos que um sistema apresenta comportamento quântico quando o comprimento de onda de matéria das partículas é de uma ordem de grandeza igual ou superior ao espaçamento entre essas partículas.
- Um gás atômico de átomos pesados e baixa densidade apenas terá comportamento quântico evidente a temperaturas próximas do zero absoluto. As técnicas de confinamento e resfriamento mais modernas permitem a obtenção de milhões de átomos confinados a temperaturas da ordem de 10^2 nK, com densidades da ordem de 10^{14} átomos por centímetro cúbico.

Introdução

- A essas temperaturas baixíssimas, é relevante para o comportamento do gás se o mesmo é composto de bósons, partículas de spin inteiro, ou de férmions, partículas de spin semi-inteiro e que obedecem ao princípio da exclusão de Pauli.
- Gases de Bose ultrafrios têm sido amplamente estudados pelo menos desde que os condensados de Bose-Einstein (BEC), estado da matéria em que um grande número de bósons ocupa o mesmo estado quântico, foram teoricamente previstos, em 1925, por Albert Einstein com base nos trabalhos de Satyendra Nath Bose.

Introdução

- A história da física experimental de Condensados de Bose-Einstein se iniciou apenas em 1995, quando o desenvolvimento de técnicas de resfriamento, como o resfriamento a laser e o resfriamento evaporativo por ondas de rádio, permitiu a observação de condensados de átomos bosônicos.
- Os BECs têm sido usados experimentalmente, desde então, para estudar temas como coerência, vórtices e superfluidez, que já eram discutidos teoricamente nas décadas anteriores. Em diferentes experimentos, a condensação foi observada com diferentes átomos, como o Rubídio-87, Sódio-23 e Lítio-7.

Sistema de vácuo

- As técnicas de resfriamento usadas em gases de bósons envolvem o confinamento dos gases em armadilhas óptico-magnéticas.
- A primeira câmara de vácuo serve como fonte para a segunda, que é onde ocorrerá o resfriamento. Uma sequência de técnicas de laser cooling são aplicadas e, por fim, há a transferência do gás de uma armadilha MOT pra uma puramente magnética.

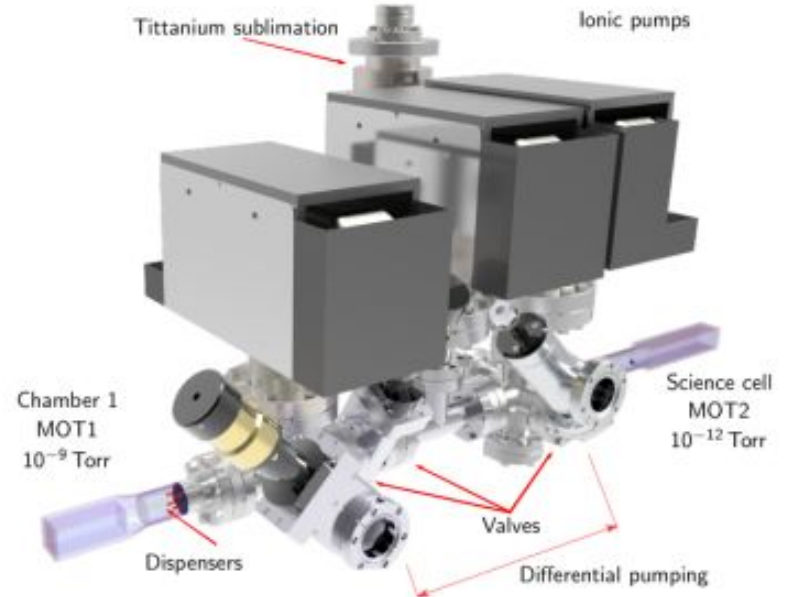


Figura 1. Sistema de duas câmaras de vácuo. Retirado de [1]

Resfriamento evaporativo

- Os átomos mais energéticos em uma armadilha magnética têm um separação de seus subníveis Zeeman em torno de 20 MHz. Então, é usada uma radiação de RF com esta frequência. Os átomos mais energéticos serão removidos da nuvem, após uma termalização, a energia média dos átomos tornou-se menor. A nova separação dos subníveis Zeeman dos átomos mais quentes passa a ser menor que 20 MHz. A frequência de RF é lentamente reduzida e, ao final do processo, é obtido um BEC.

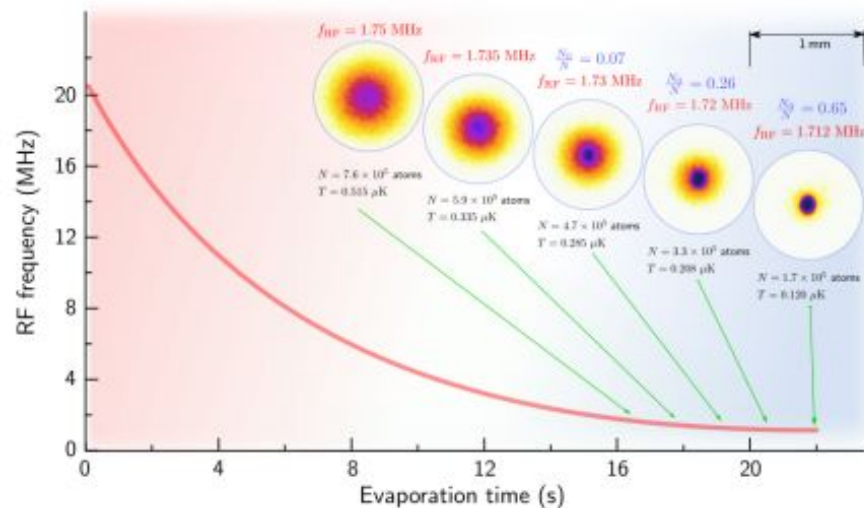


Figura 2. Rampa de resfriamento evaporativo.
Retirado de [1]

Imagem de um BEC

- O condensado de Bose-Einstein é observado com o uso da técnica do imageamento no tempo de voo. O condensado é liberado da armadilha, e um feixe de laser é lançado sobre ele. A imagem da “sombra” do condensado é captada por uma CCD. Uma imagem do background é também adquirida, e, assim, se obtém a imagem do condensado.

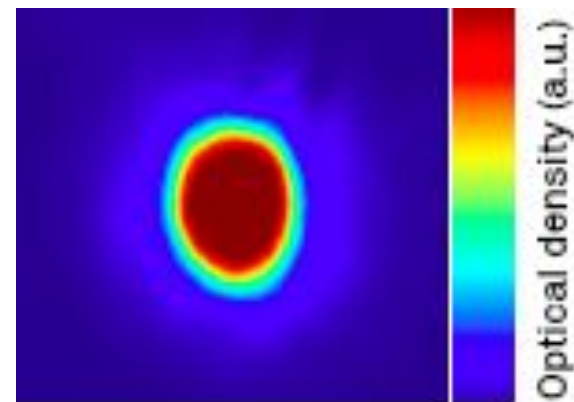


Figura 3. Imagem de um condensado de Bose-Einstein em expansão livre.

Mar de Fermi

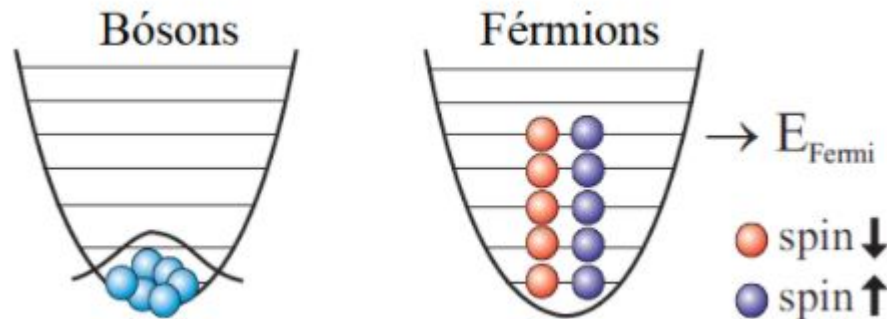


Figura 4. Bósons em um estado degenerado e Mar de Férmions.
Adaptado de [3]

- Em um sistema devidamente resfriado, os bósons, partículas de spin inteiro, tendem a ocupar o mesmo estado quântico, aquele de menor energia, quando a temperatura do sistema é baixa o suficiente. Há, então, a formação de um BEC. Como dois férmions indistinguíveis não podem ocupar o mesmo estado quântico. O comportamento de um sistema atômico fermiônico próximo do zero absoluto é, então, caracterizado pelo que se convencionou chamar Mar de Férmions, situação em que os níveis de energia mais baixos estão todos preenchidos, cada um por dois férmions de spins opostos. A energia de Fermi é definida como a energia do nível mais alto em um sistema fermiônico quando a temperatura atinge o zero absoluto.

Pares de Cooper

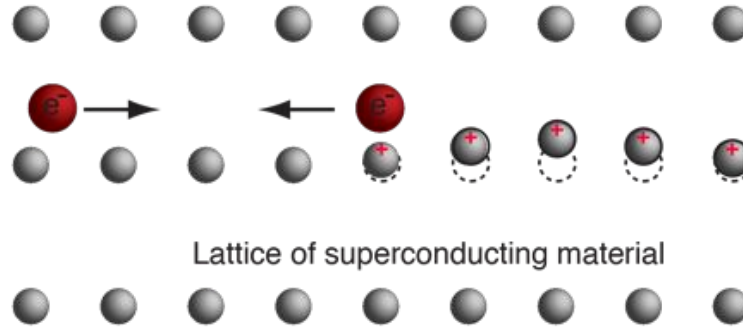


Figura 5. Emparelhamento de Cooper em um cristal. Retirado de [<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/coop.html>]

- Em uma liga metálica, os elétrons têm um comportamento que pode ser aproximado pelo de uma partícula livre. Entretanto, a distorção causada entre algum elétron e as cargas positivas do metal podem distorcer uma rede cristalina. A densidade de carga positiva próxima a esse elétron aumenta, e, a uma determinada distância, um efeito análogo surge desse desbalanceamento com um outro elétron. Assim, esses elétrons estarão ligados/emparelhados. A nível quântico, o emparelhamento é interpretado como elétron-fônon, sendo o fônon a quantização da vibração coletiva das cargas positivas do cristal. A energia do elétron emparelhado é inferior à energia de Fermi, o que evidencie o estado ligado.

Teoria BCS e supercondutores

- Os pares de Cooper são mais resistentes às vibrações no interior do cristal, já que serão mantidos em movimento pela atração entre os pares. Assim, os pares de Cooper se movem no cristal sofrendo pouca ou nenhuma influência das vibrações térmicas do material.
- Pares serão formados até que um determinado ponto de equilíbrio seja alcançado. A teoria BCS foi elaborada como solução aproximada para o problema de muitos corpos em questão. O estado BCS consiste da perda de correlação entre os férmions através da superfície de Fermi no espaço de momento. Os pares estão altamente sobrepostos no espaço e não podem, dessa forma, ser considerados como bósons.

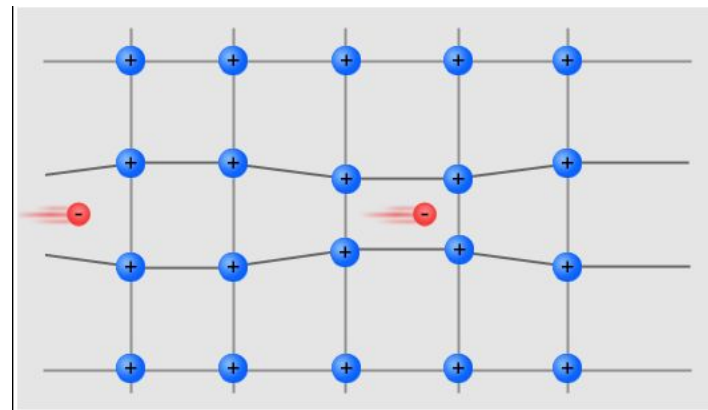


Figura 6. Pares de Cooper se movendo em um cristal.

Resfriando um gás de Fermi

- No experimento apresentado por *Regal et al* (2004), os átomos fermiônicos utilizados foram de ^{40}K . Assim como na geração de BEC, é usada uma combinação de *laser cooling* e resfriamento evaporativo. Entretanto, diferentemente do caso dos bósons, a baixas temperaturas as colisões entre férmions indistinguíveis não são permitidas.



Figura 7. Armadilha óptica para confinar um gás de férmions. Retirado de [3]

- O átomo de ^{40}K possui 10 estados de spin ($f=9/2$). Os estados $m_f=9/2$ e $m_f=7/2$ podem ser armadilhados com uma razoável sobreposição.

Ressonância de Feshbach e interações

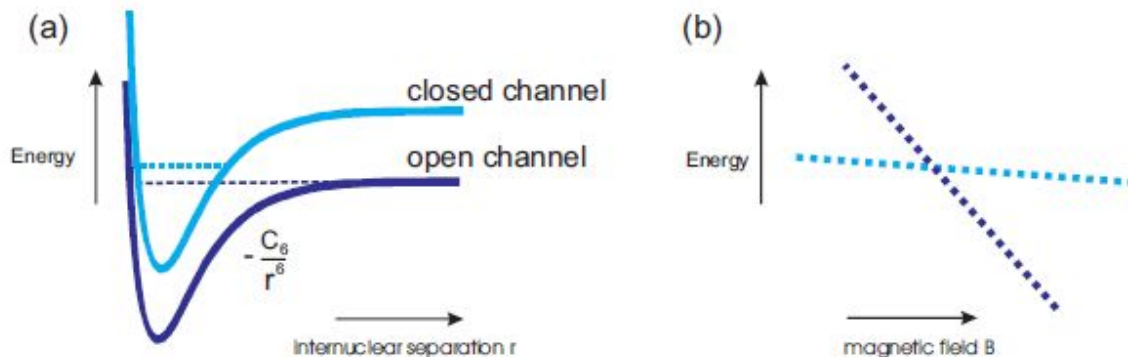


Figura 8. (a) Ressonâncias de Feshbach. (b) Energia de um dos estados ligados e energia de colisão de dois átomos livres. Retirado de [3]

- A forma como os átomos fermiônicos podem se emparelhar depende da interação interatômica que é estabelecida. Em sistemas atômicos, o potencial atrativo é dado, inicialmente, pelas interações de van der Waals entre os átomos.
- Uma ressonância de Feshbach ocorre quando a energia de um dos estados ligados, coincide (ou se aproxima) com a energia de colisão de dois átomos livres. O campo externo aplicado ao sistema nesta situação é chamado campo de Feshbach, B_0 .

Criação de moléculas

- Próximo à ressonância de Feshbach, a aplicação de um campo ligeiramente superior ao valor da ressonância e a sua gradual redução faz com que se formem estados ligados moleculares.

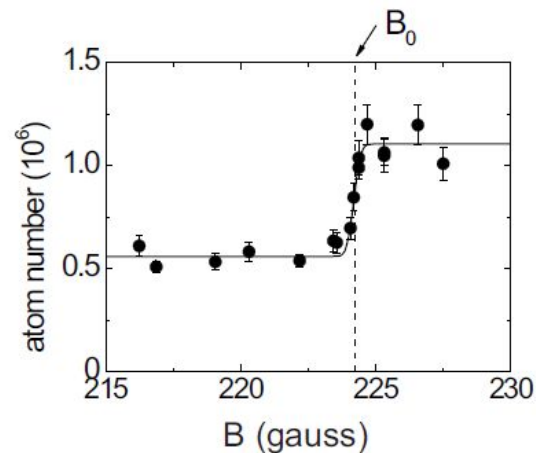


Figura 10. Perda de átomos devido à formação de moléculas. Retirado de [3]

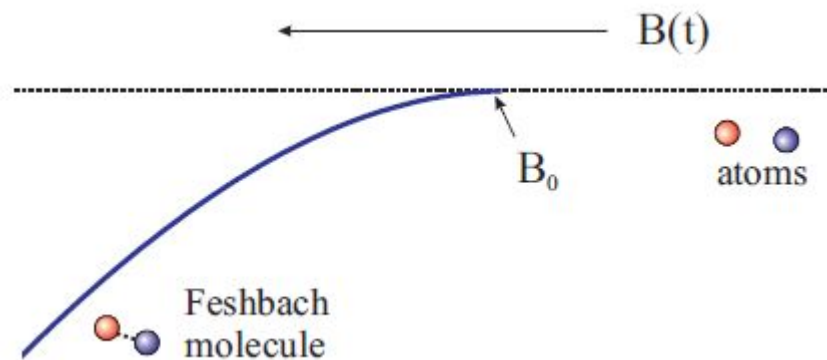


Figura 9. Criação de molécula de Feshbach. Retirado de [3]

BEC molecular

- Foi obtido, então, um condensado molecular. Na imagem ao lado, é possível observar a distribuição de momento da temperatura inicial de $0.19 T_f$ até a temperatura final de $0.1 T_f$. Abaixo, a fração condensada em função da temperatura.

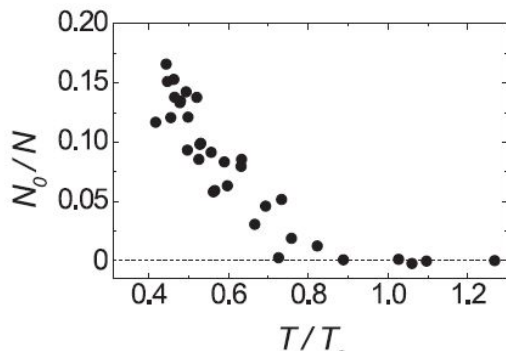


Figura 11. Fração condensada em função da temperatura.
Retirado de [3]

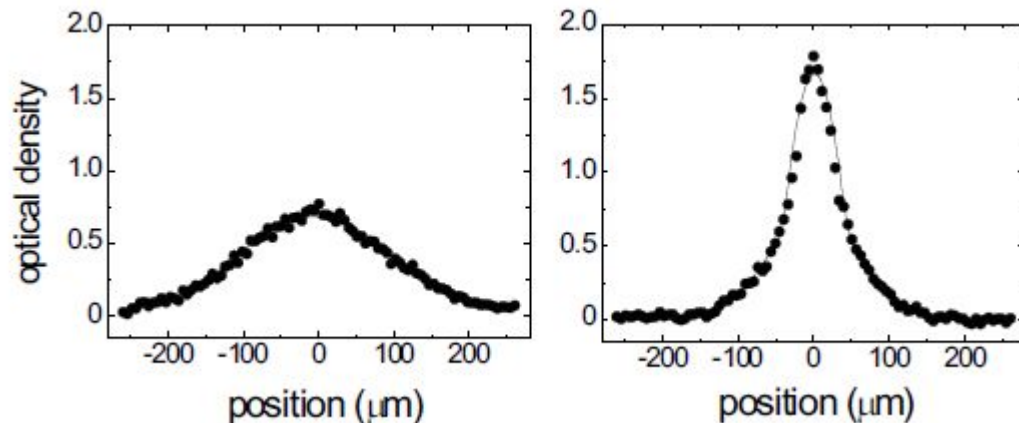


Figura 12. Distribuição de momento. Na esquerda, $T = 0.19 T_f$. Na direita, $T = 0.1 T_f$. Retirado de [3]

Condensado BCS

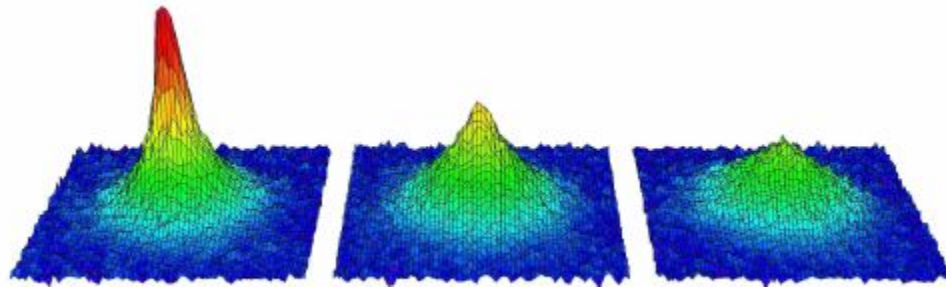


Figura 13. Imagem de tempo de voo mostrando a condensação de pares de Cooper. $\Delta B = 0,55, 0,25$ e $0,12$ G, da esquerda para a direita [2]

- Embora a condensação de Bose-Einstein seja um fenômeno de bósons, e não de férmions, condensados fermiônicos podem ser formados em um sistema através do emparelhamento de férmions. No caso de condensados de pares de Cooper, o caráter fermiônico dos átomos passa a ser relevante. Os pares de Cooper apresentam dimensões muito superiores às de moléculas, não podendo, assim, ser interpretados como partículas independentes.

Cruzamento BEC-BCS

- Existe um regime, conhecido como regime de cruzamento BCS-BEC, em que o sistema se apresenta de maneira tal que tanto características das moléculas quanto dos pares de Cooper são relevantes. O ponto limite dessa região de cruzamento é aquele em que os férmions emparelhados não apresentam energia de ligação. Nessa região, os pares terão algumas propriedades de moléculas e outras de pares de Cooper.

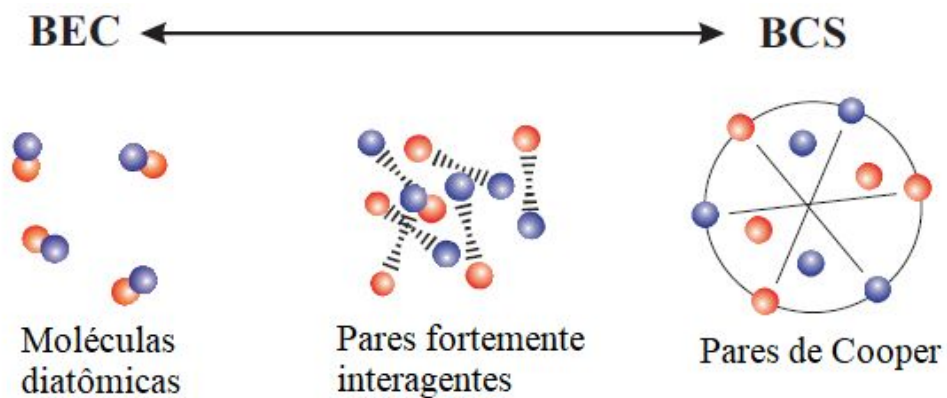


Figura 14. Cruzamento BEC-BCS. Adaptado de [2].

Cruzamento BEC-BCS

- A condensação foi observada tanto no lado BCS quanto no lado BEC do cruzamento, sendo a condensação de pares de Cooper caracterizada por um tempo de vida mais longo, com a imagem de tempo de voo feita após 30 ms, o que é muito maior que o tempo de vida de um BEC molecular.
- Para os condensados de pares, a fração condensada observada com um tempo de espera de 30 ms foi sempre pelo menos 70% daquela observada para um tempo de espera de 2 ms.

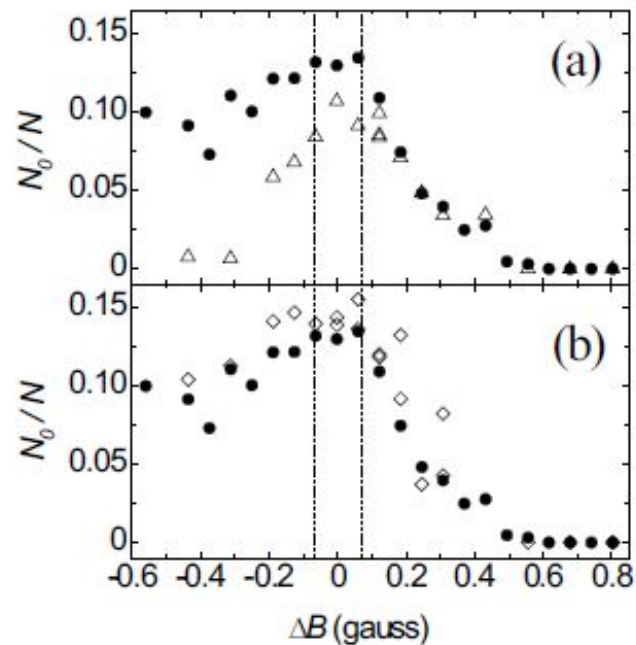


Figura 14. fração condensada em função do desvio do campo magnético aplicado em relação ao valor do campo na ressonância de Feshbach [2].

Conclusão

- Foram apresentadas neste artigo as principais ideias envolvidas na criação de condensados fermiônicos. O que determina qual tipo de condensado será gerado é a intensidade da interação atômica, que pode ser controlada por meio do desvio entre o campo magnético aplicado e o valor do campo na ressonância de Feshbach. Para campos ligeiramente menos intensos do que o valor de ressonância, ocorre o BEC e, para campos ligeiramente mais intensos, ocorre o condensado de pares. Os condensados de pares apresentam tempo de vida mais longo que os condensados moleculares e foi visto que, no valor de ressonância, a fração condensada atinge o seu máximo.



Cindy Regal, Deborah Jin e Markus Greiner, responsáveis pelo primeiro experimento capaz de gerar um condensado fermiônico.

Referências

1. F. A. J. Vivanco, Investigations on momentum distributions and disorder in strongly out-of-equilibrium trapped Bose gases. PhD thesis.
2. C. Regal, et al. Observation of Resonance Condensation of Fermionic Atom Pairs. Phys. Rev. Lett. 92, 040403 (2004).
3. C. Regal. Experimental realization of BCS-BEC crossover physics with a Fermi gas of atoms. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Physics, University of Colorado, Boulder, USA. 2005.
4. M. H. Anderson, et al. Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor. Science 269, 198-201 (1995).
5. K. B. Davis et al., Phys. Rev. Lett. 75, 3969 (1995).
6. L. N. Cooper. Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas. Phys. Rev. 104, 1189-1190 (1956).
7. J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer. Theory of superconductivity. Phys. Rev. 108, 1175 (1957).
8. M. Randeria, in Bose-Einstein Condensation, edited by A. Griffin, D. W. Snoke, and S. Stringari (Cambridge University, Cambridge, 1995), pp. 355–392.
9. M. Holland, S. J. J. M. F. Kokkelmans, M. L. Chiofalo, and R. Walser, Phys. Rev. Lett. 87, 120406 (2001).