

Superfluidez e coerência de condensados de Bose-Einstein

Seminário de Física Atômica e
Molecular

Michelle Alejandra Moreno Armijos
23 Nov 2021

Instituto de Física de São Carlos USP

Conteúdo

- Introdução
- Coerência
 - Matriz de densidade de um corpo
 - Interferência entre dois condensados
 - Laser atômico
- Superfluidez
 - O critério de Landau
 - Pesquisa atual
 - Conclusão



Introdução

- 1924: N. Bose e A. Einstein apresentaram a teoria do condensado como um novo estado da matéria.
- 1995: E. Cornell e C. Wieman primeiro BEC de rubídio (JILA-NIST)
W. Ketterle BEC átomos de sódio
Interesse na natureza "muito fria" do condensado.
- 1997: W. Ketterle (MIT)
Coerência, sua fase, ordem de longo alcance, superfluidez.

Premio Nobel de 2001



Photo from the Nobel Foundation archive.
Eric A. Cornell

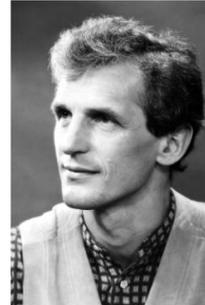


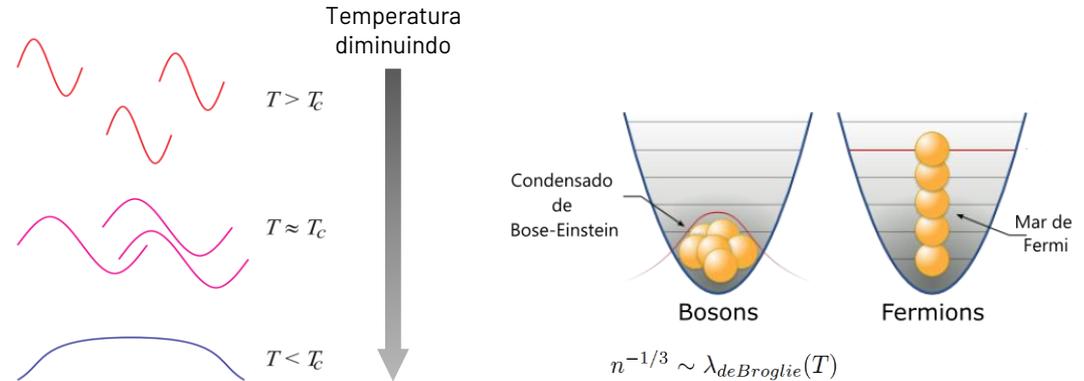
Photo from the Nobel Foundation archive.
Wolfgang Ketterle



Photo from the Nobel Foundation archive.
Carl E. Wieman

Introdução

- 1924: N. Bose e A. Einstein apresentaram a teoria do condensado como um novo estado da matéria.
- 1995: E. Cornell e C. Wieman primeiro BEC de rubídio (JILA-NIST)
W. Ketterle BEC átomos de sódio
Interesse na natureza "muito fria" do condensado.
- 1997: W. Ketterle (MIT)
Coerência, sua fase, ordem de longo alcance, superfluidez.



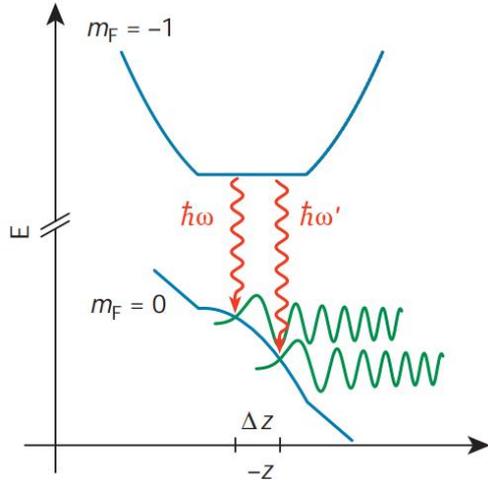
Coerência de um BEC

- Coerência e a matriz de densidade de um corpo

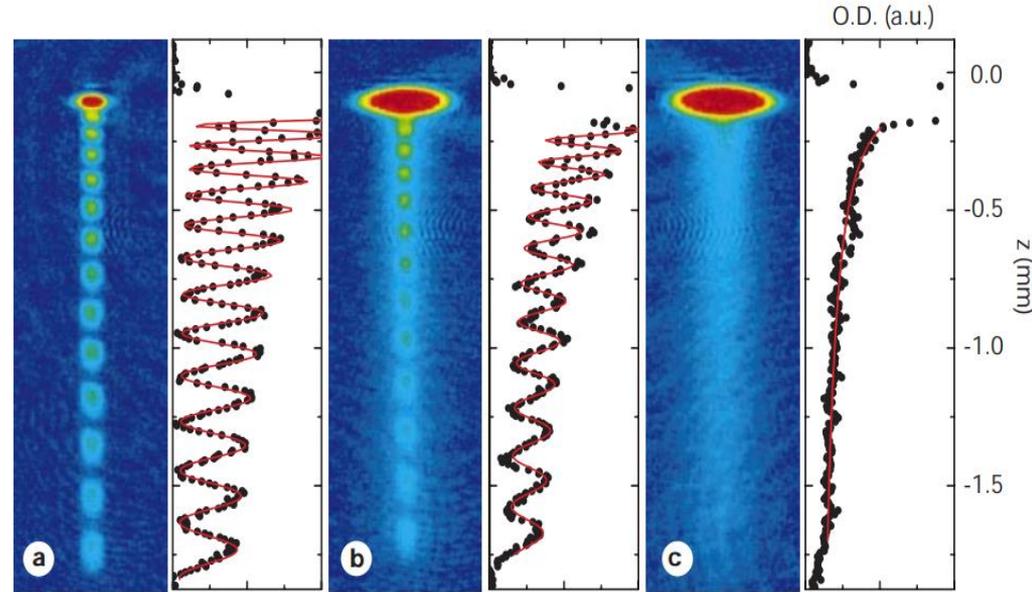
Coerência espacial de um gás de Bose aprisionado

I. Bloch *et al.* (2000)

Foi criada uma fenda dupla para átomos aprisionados magneticamente usando ondas de rádio com dois componentes de frequência.



Esquema de medição da coerência espacial



Bloch *et al.* Measurement of the spatial coherence of a trapped Bose gas at the phase transition. *Nature*, 403 (6766), 2000.

Coerência e matriz de densidade de um corpo

Densidade de um corpo no estado fundamental: $n^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \Psi_0^*(\mathbf{r})\Psi_0(\mathbf{r}') = \sqrt{n(\mathbf{r})}\sqrt{n(\mathbf{r}')}$

$$s = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad \text{comprimento de coerência}$$

- A densidade diagonal $n(r)$, **não** fornece informação sobre efeitos de longo alcance.
- Informação sobre o comportamento da matriz de densidade fora da diagonal pode ser obtida a partir de experimentos de **interferometria**.

A fase inicial de cada onda é fixada pelo $\hat{\Psi}$ na posição $z = \pm d/2$ de cada fenda

O padrão de interferência será proporcional a

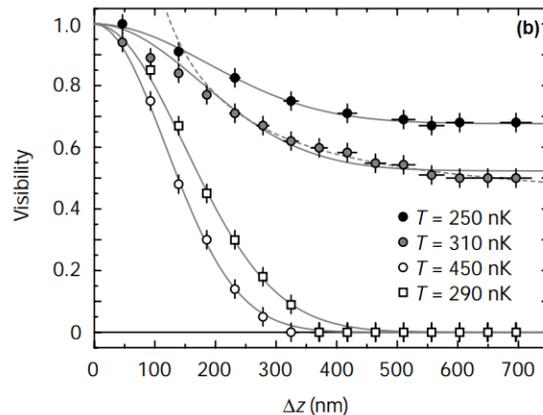
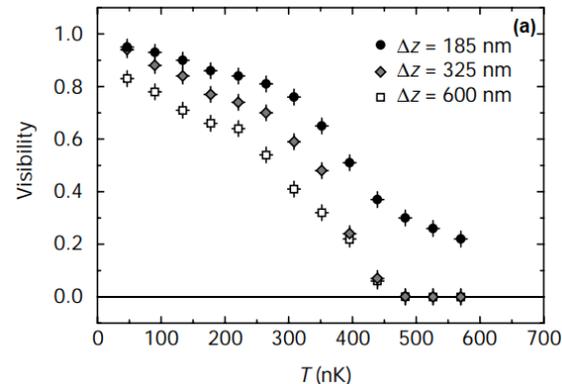
$$\langle \hat{\Psi}(z + d/2)\hat{\Psi}^\dagger(z - d/2) \rangle$$

Fator de visibilidade

$$V = \frac{n^{(1)}(z + d/2, z - d/2)}{n(z)}$$

Comprimento de onda térmico

$$\lambda_T = \sqrt{2\pi\hbar^2/mk_B T}$$

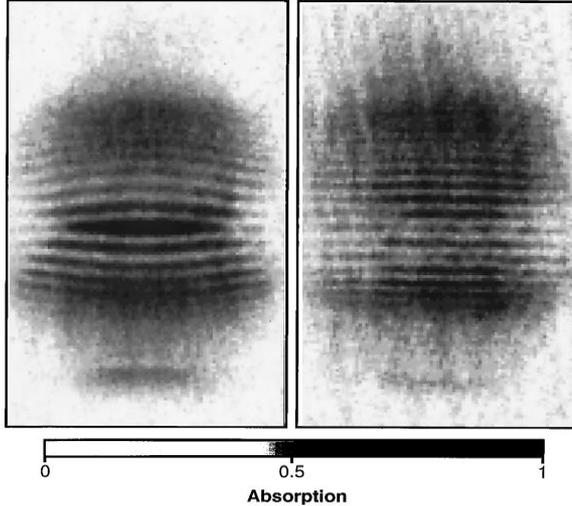


Coerência de um BEC

- Coerência entre dois condensados

Coerência entre dois condensados

Interferência produzida por dois condensados inicialmente separados, que se expandem livremente após serem liberados da armadilha



M.R. Andrews et al. *Science*, 275 (5300), 1997.

Valores típicos

$$\begin{aligned} t &\approx 40 \text{ ms} \\ d &\approx 40 \text{ } \mu\text{m} \\ \Delta z &\approx 20 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

A fase S de cada condensado para longos tempos é descrita pela lei

$$S(\mathbf{r}, t) \longrightarrow \frac{1}{2} \frac{m\mathbf{r}^2}{\hbar t} \quad \text{não depende da forma inicial do potencial}$$

A função de onda no tempo $t = 0$

$$\Psi(\mathbf{r}) = \Psi_a(\mathbf{r}) + e^{i\Phi} \Psi_b(\mathbf{r}) \quad \longrightarrow \quad \Psi_a^*(\mathbf{r}) \Psi_b(\mathbf{r}) \approx 0$$

Assumindo que estão alinhados no eixo z .

A fase relativa é

$$\Phi + S(x, y, z+d/2) - S(x, y, z-d/2) = (md/\hbar t)z + \Phi$$

Quando os condensados de sobrepõem, a densidade é:

$$n(\mathbf{r}, t) = n_a(\mathbf{r}, t) + n_b(\mathbf{r}, t) + 2\sqrt{n_a(\mathbf{r}, t)n_b(\mathbf{r}, t)} \cos\left(\frac{md}{\hbar t}z + \Phi\right)$$

A distância entre os máximos é:

$$\Delta z \approx \frac{2\pi\hbar t}{md}$$

Comprimento de onda de de Broglie

Coerência de um BEC

- Correlações de densidade em gases de Bose

Correlações de densidade em gases de Bose

Energia de interação de um gas de Bose:

$$E_{int} = \frac{U_0 V}{2} \langle \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \rangle$$

Introduzimos a **função de distribuição de pares** como uma medida adimensional de correlações entre diferentes átomos

$$g_2(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \frac{V^2}{N(N-1)} \langle \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}') \hat{\psi}(\mathbf{r}') \hat{\psi}(\mathbf{r}) \rangle$$

Para grandes $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ as correlações são desprezíveis

$$\langle \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}') \hat{\psi}(\mathbf{r}') \hat{\psi}(\mathbf{r}) \rangle \longrightarrow (N/V)^2 \quad g_2 \longrightarrow 1$$

Para pequenas separações

Se examinamos o valor esperado no caso de um **condensado puro**, temos:

$$\langle \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \rangle = \frac{N(N-1)}{V^2} \simeq n^2$$

No caso de um **gás acima de T_c** , temos:

$$\langle \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \rangle = 2n^2$$

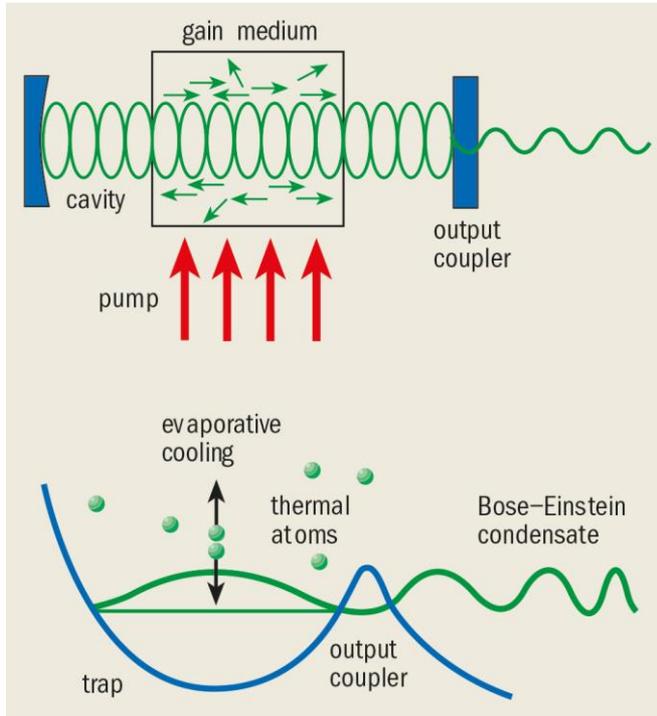
Para pequenas separações a função de distribuição de pares no estado não condensado é o dobro que para um condensado puro com a mesma densidade

Se ambas estão presentes (condensado e excitações térmicas)

$$\langle \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \rangle = n_0^2 + 4n_0 n_{ex} + 2n_{ex}^2$$

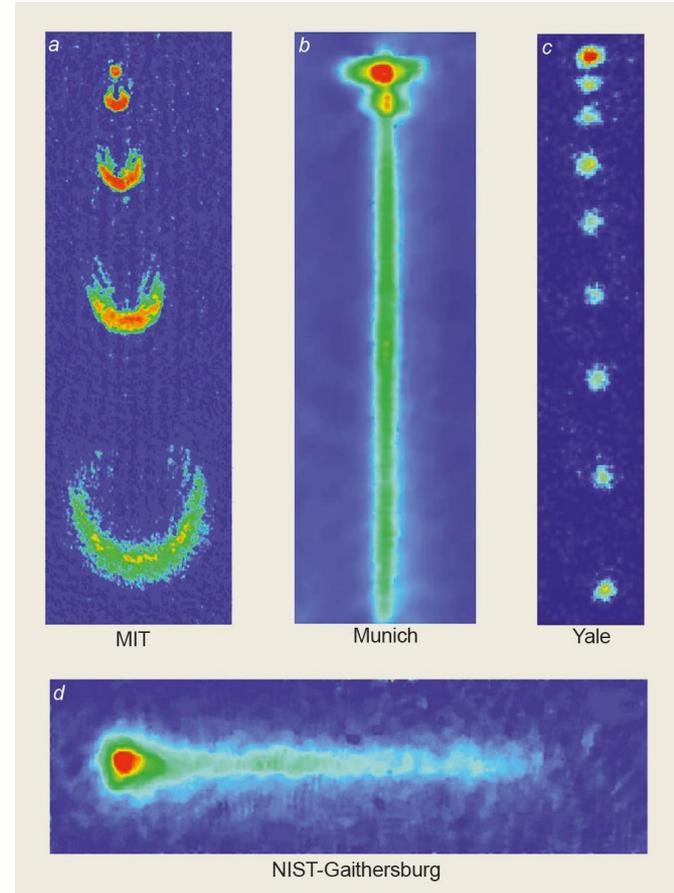
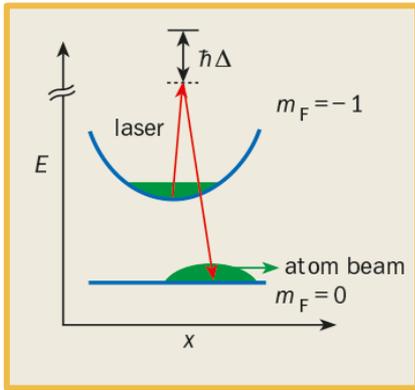
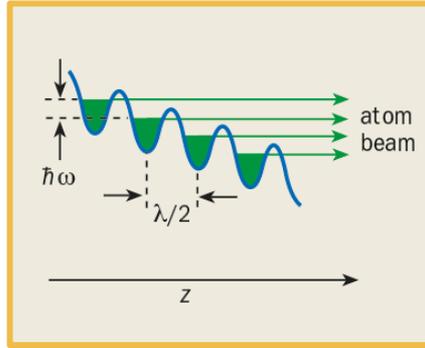
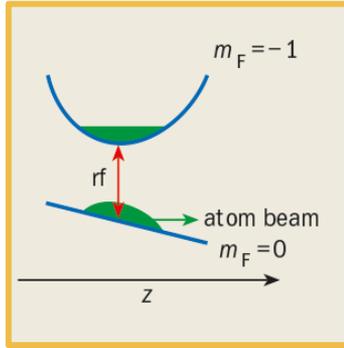
Laser atômico

Fonte de átomos coerentes



- O análogo óptico deste dispositivo é uma cavidade ressonante altamente excitada em um modo.
- A chave para fazer um laser atômico é extrair os átomos de forma coerente da armadilha.
- O acoplamento de saída (output coupling) pode ser feito transferindo os átomos de estados confinados para outros que não estão, normalmente alterando um grau interno de liberdade, como os seus estados magnéticos.

Laser atômico



Superfluidez

- Um superfluido não sofre dissipação ao fluir através de um tubo.
- É um notável fenômeno quântico que foi descoberto no estudo do hélio líquido em 1938 por P. Kapitza. Fritz London estudou a conexão entre a superfluidez e a existência de um condensado.
- L. D. Landau recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1962 por sua teoria da superfluidez para as propriedades do ^4He líquido a uma temperatura abaixo de 2.17 K.
- As fortes interações do ^4He dificulta a sua descrição teórica, e experimentalmente, seus parâmetros de densidade e comprimento de interação não podem ser ajustados.

Superfluididez

- 0 critério de Landau

O critério de Landau

Landau explicou que se o espectro de **excitação** satisfaz certos critérios, o movimento do fluido **não causa a dissipação de energia**.

Consideramos um condensado no estado fundamental e um **obstáculo** pesado se move com velocidade constante v através dele.

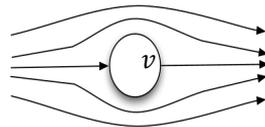
Que velocidade é possível para que as excitações sejam criadas?

A energia do sistema em um referencial que se move com velocidade \mathbf{v} é:

$$E(\mathbf{v}) = E - \mathbf{p} \cdot \mathbf{v} + \frac{1}{2} M v^2$$

No referencial onde o obstáculo está em repouso:

$$E(\mathbf{v}) = E_0 + \frac{1}{2} M v^2$$



Agora consideramos um estado com uma única excitação de momento \mathbf{p}

Referencial original

Referencial em movimento

$$E_{ex}(\mathbf{v}) = E_0 + \epsilon_p \quad E_{ex}(\mathbf{v}) = E_0 + \epsilon_p - \mathbf{p} \cdot \mathbf{v} + \frac{1}{2} M v^2$$

Energia necessária para criar uma excitação (no referencial que se move com o obstáculo):

$$\epsilon_p - \mathbf{p} \cdot \mathbf{v}$$

O potencial produzido é **estático**, portanto o obstáculo é incapaz de transferir energia para o fluido

$$v = \epsilon_p / p$$

A velocidade mínima na qual é possível criar excitações

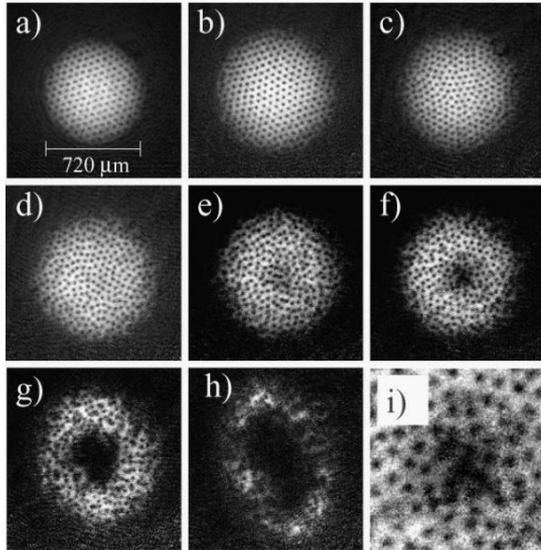
$$v_c = \min \left(\frac{\epsilon_p}{p} \right)$$

Superfluididez

- Pesquisa atual

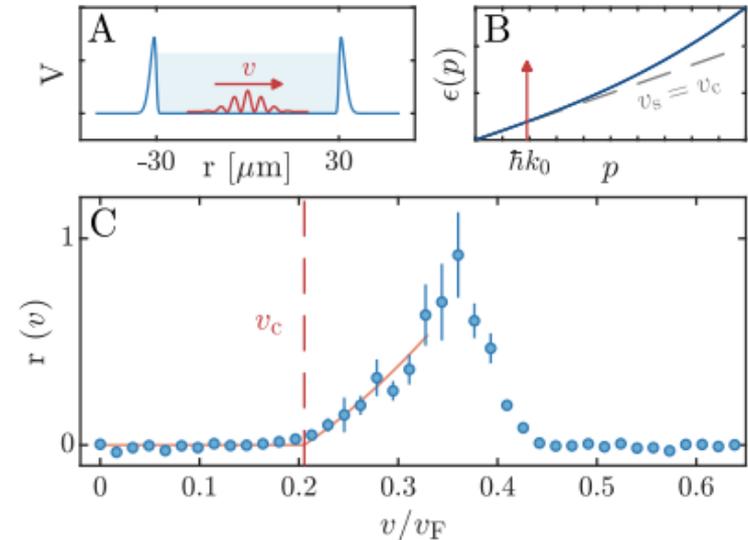
Pesquisa atual sobre superfluidez

- **Vórtices:** Uma manifestação de superfluidez é a ocorrência de **correntes quantizadas** e persistentes, chamadas de vórtices. Em um superfluido, um vórtice quântico **carrega o momento orbital angular** quantizado, permitindo assim que o superfluido gire.



P. Engels et al. Phys. Rev. Lett. 90(17), 2013

- **Superfluidez em gases de Fermi:** Em 2021 foi demonstrada superfluidez em um gás de Fermi 2D de lítio, movendo um potencial periódico através do sistema e observando nenhuma dissipação abaixo de uma velocidade crítica.

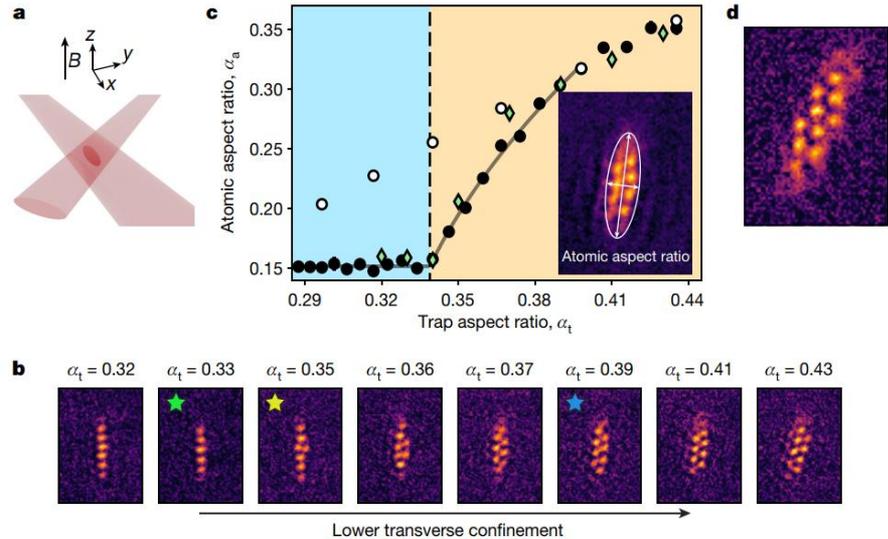


L. Sobirey, et al. Science, 372(6544), 2021.

Pesquisa atual sobre superfluidez

- Supersólidos: estado sólido superfluido

Apresentam simultaneamente propriedades associadas a um sólido e a um superfluido. Como um sólido, **possuem ordem cristalina**, manifestando-se como uma modulação periódica da densidade das partículas; mas ao contrário de um sólido típico, eles também têm **propriedades de superfluido**, resultantes da deslocalização de partículas coerentes através do sistema.



Norcia et al. Nature 596, 7872 (2021)

Conclusão

- Mostramos que os condensados de Bose-Einstein possuem interessantes propriedades de coerência que os tornam semelhantes à luz laser. O laser atômico fornece potenciais aplicações para **medição de precisão**.
- Uma analogia próxima também existe entre a luz térmica e os gases bosônicos térmicos. Existem, no entanto, diferenças importantes devido à existência de **interações átomo-átomo**.
- Hoje em dia, é possível observar superfluidez diretamente em isótopos de hélio e em gases atômicos ultrafrios, mas as características novas sobre seu comportamento **coerente, topológico** (vórtices, solitons) e **dinâmico** ainda são um assunto importante de pesquisa teórica e experimental.



Obrigada

