

Tunneling Quantistico Macroscopico con Atomi Ultrafreddi

Luca Salasnich

INO-CNR, Dipartimento di Fisica "Galileo Galilei", Università di Padova

Padova, 19 gennaio, 2011

In collaborazione con

Francesco Ancilotto (CNISM, Univ. of Padova)

Giovanni Mazzaella (CNISM, Univ. di Padova)

Flavio Toigo (CNISM, Univ. di Padova)

Argomenti generali

- Fenomeni quantistici a temperature ultrabasse
- Condensazione di Bose-Einstein in gas atomici
- Equazione di Gross-Pitaevskii e tunneling macroscopico

Argomenti specifici degli ultimi 3 anni

- fermioni superfluidi e transizione BCS-BEC
- miscele bosoniche e fermioniche
- vortici quantizzati e solitoni
- onde sonore nei fluidi quantistici
- tunneling macroscopico con bosoni e fermioni
- “gatti di Schrödinger” ed “entanglement”

Fenomeni quantistici a temperature ultrabasse

Sappiamo che ogni particella “elementare” ha un momento angolare intrinseco, detto **spin** S .

Tutte le particelle si dividono in due gruppi:

– **bosoni**, con spin S che è un multiplo intero della costante di Planck \hbar :

$$S = n\hbar, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

– **fermioni**, con spin S che è un multiplo semi intero di \hbar :

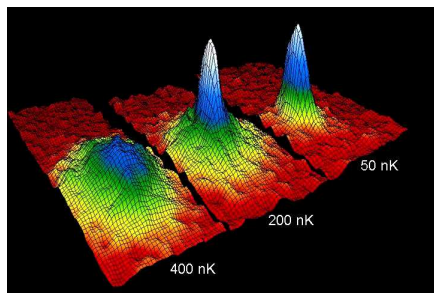
$$S = \frac{n}{2}\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Esempi: ${}^4_2\text{He}$ è un bosone, mentre ${}^3_2\text{He}$ è un fermione.

Condensazione di Bose-Einstein in gas atomici

Nel 1995 Eric Cornell, Carl Wieman and Wolfgang Ketterle¹ hanno ottenuto la condensazione di Bose-Einstein raffreddando vapori atomici di ^{87}Rb e ^{23}Na .

Per questi sistemi molto diluiti ed ultrafreddi la temperatura critica è circa $T_c \simeq 100$ nanoKelvin.



Profili di densità di un gas di rubidio: formazione del condensato di Bose-Einstein.

¹Premi Nobel per la Fisica 2001

Condensazione di Bose-Einstein in gas atomici

In questi esperimenti gli atomi ultrafreddi sono confinati in una trappola armonica

$$U(\mathbf{r}) = \frac{1}{2}m\omega^2(x^2 + y^2 + z^2) \quad (1)$$

prodotta da campi magnetici (interazione con dipolo magnetico dell'atomo) o campi elettrici (interazione con dipolo elettrico dell'atomo). La temperatura critica di condensazione di Bose-Einstein per un gas di Bose ideale in trappola armonica risulta

$$k_B T_c \simeq \hbar\omega N^{1/3}, \quad (2)$$

e la frazione condensata segue la legge

$$f_0 = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^3. \quad (3)$$

Nei sistemi reali la frazione condensata a temperature nulla può essere molto diversa da 1. In particolare,

- nei gas atomici diluiti: $f_0 \simeq 99\%$
- nell'elio 4 liquido: $f_0 \simeq 10\%$
- nei superconduttori metallici: $f_0 \simeq 0.01\%$

Equazione di Gross-Pitaevskii e tunneling macroscopico

Per i condensati atomici di Bose-Einstein la funzione d'onda $\psi(\mathbf{r}, t)$ che descrive N bosoni nello stesso stato quantico soddisfa l'**equazione di Gross-Pitaevskii**

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(\mathbf{r}) + \frac{4\pi\hbar^2 a_s}{m} (N-1) |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 \right] \psi(\mathbf{r}, t), \quad (4)$$

dove $U(\mathbf{r})$ è il potenziale esterno ed a_s è la lunghezza di scattering del potenziale di interazione tra gli atomi.

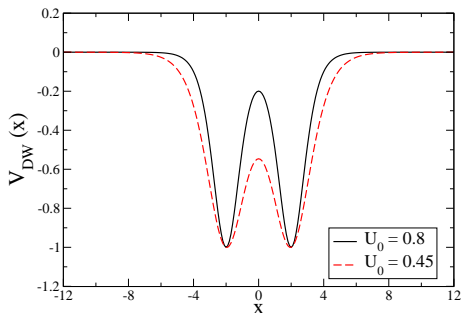
Recentemente il nostro gruppo ha studiato le proprietà statiche e dinamiche di un condensato di Bose-Einstein soggetto ad un potenziale esterno del tipo

$$U(\mathbf{r}) = V_{DW}(x) + \frac{1}{2} m \omega_{\perp}^2 (y^2 + z^2), \quad (5)$$

dove $V_{DW}(x)$ è un potenziale a doppia buca.

In questo modo si analizza **tunneling quantistico macroscopico** di atomi condensati da una buca all'altra.

Equazione di Gross-Pitaevskii e tunneling macroscopico



Potenziale a doppia $V_{DW}(x)$ buca utilizzato nelle simulazioni con l'equazione di Gross-Pitaevskii.

Il tunneling quantistico macroscopico con gli atomi (neutri) di Bose condensati è l'analogo dell'**effetto Josephson dei superconduttori** (giunzione Josephson). I nostri risultati teorici sono in buon accordo con le evidenze sperimentali.²

²O. Morsch and M. Oberthaler, Rev. Mod. Phys. **78**, 179 (2006).

Equazione di Gross-Pitaevskii e tunneling macroscopico

I nostri risultati, ottenuti utilizzando l'equazione di Gross-Pitaevskii, la teoria del funzionale densità e la teoria quantistica dei campi, suggeriscono l'esistenza di effetti non ancora osservati:

- tunneling macroscopico con fermioni superfluidi³
- tunneling macroscopico con più componenti bosoniche condensate⁴
- collasso dinamico nel tunneling macroscopico⁵
- tunneling macroscopico e gatti di Schrödinger⁶

³LS, N. Manini, and F. Toigo, Phys. Rev. A **77**, 043609 (2008); F. Ancilotto, LS, and F. Toigo, Phys. Rev. A **79**, 033627 (2009).

⁴G. Mazzarella, M. Moratti, M. Salerno, LS, and F. Toigo, J. Phys. B **42**, 125301 (2009).

⁵G. Mazzarella and LS, Phys. Rev. A **82**, 033611 (2010).

⁶G. Mazzarella, LS, A. Parola, and F. Toigo, submitted for publication.

Il nostro gruppo cerca studenti motivati che vogliono fare una tesi (laurea, laurea magistrale, dottorato) su questi argomenti.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

“Dobbiamo sapere. Sapremo!”



David Hilbert (1862-1943)