

Gas ultrafreddi di atomi fermionici e la bosonizzazione dei fermioni

Luca Salasnich

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università di Padova

Congresso Nazionale SIF
Tavola rotonda "Enrico Fermi - Ieri, oggi e domani"
Padova, 26 Settembre 2016

- Bosoni e fermioni: alcune proprietà
- Gas ultrafreddi e condensazione di Bose-Einstein
- Bosonizzazione dei fermioni con atomi ultrafreddi
- Conclusioni

Bosoni e fermioni: alcune proprietà (I)

Oggi sappiamo che ogni particella ha un momento angolare intrinseco, detto **spin** $\vec{S} = (S_x, S_y, S_z)$, caratterizzato da due numeri quantici s ed m_s , dove per s fissato si ha $m_s = -s, -s + 1, \dots, s - 1, s$, ed inoltre

$$S_z = m_s \hbar, \quad (1)$$

con \hbar ($1.054 \cdot 10^{-34}$ Joule \times secondi) la costante di Planck ridotta.

Tutte le particelle si dividono in due gruppi:

– **bosoni**, caratterizzati da s numero naturale:

$$s = 0, 1, 2, 3, \dots$$

– **fermioni**, caratterizzati da s numero semi-naturale:

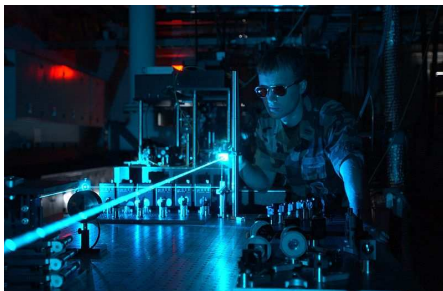
$$s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \dots$$

Esempi: il fotone è un bosone ($s = 1$, $m_s = -1, 1$), mentre l'elettrone è un fermione ($s = \frac{1}{2}$, $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$).

Tra le "particelle non elementari": l'elio ${}^4_2\text{He}$ è un bosone ($s = 0$, $m_s = 0$), mentre l'elio ${}^3_2\text{He}$ è un fermione ($s = \frac{1}{2}$, $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$).

Bosoni e fermioni: alcune proprietà (III)

Nel 1955 i primi dispositivi a **luce laser** furono ideati da Charles Townes, Nikolay Basov e Aleksandr Prokhorov (Nobel 1964).

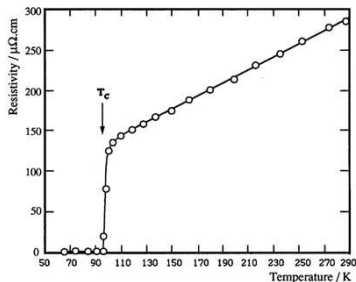


Il **laser ottico** è l'esempio più eclatante di **condensazione di Bose-Einstein** (non all'equilibrio termodinamico): i fotoni (massa nulla e spin 1) del fascio hanno

- i) la stessa energia (monocromaticità),
- ii) la stessa quantità di moto (unidirezionalità),
- iii) la stessa fase (coerenza).

Bosoni e fermioni: alcune proprietà (IV)

Facciamo un passo indietro. Nel 1911 Heike Kamerlingh Onnes osservò che nel mercurio (Hg) al di sotto di $T_c = 4.16$ Kelvin la resistenza elettrica diventa nulla: **superconduttività** (Nobel 1913).



Diversi materiali sono superconduttori al di sotto di una temperatura critica T_c . Nel 1957 John Bardeen, Leon Cooper and Robert Schrieffer suggerirono che nella superconduttività, a causa del reticolo ionico, coppie di elettroni si comportano come singoli bosoni (Nobel 1972). E' un esempio di **bosonizzazione dei fermioni**, suggerita negli anni 50 da Fritz London, Lev Landau (Nobel 1962) e Vitaly Ginzburg (Nobel 2003).

Bosoni e fermioni: alcune proprietà (V)

Temperatura critica T_c di alcuni materiali superconduttori a pressione atmosferica.

Material	Symbol	T_c (Kelvin)
Aluminium	${}_{13}^{27}\text{Al}$	1.19
Tin	${}_{50}^{120}\text{Sn}$	3.72
Mercury	${}_{80}^{202}\text{Hg}$	4.16
Lead	${}_{82}^{208}\text{Pb}$	7.20
Neodymium	${}_{60}^{142}\text{Nb}$	9.30

Nel 1986 Karl Alex Müller e Johannes Georg Bednorz scoprirono i **superconduttori ad alta temperatura** (Nobel 1987). Questi materiali ceramici (cuprati) possono raggiungere la temperatura critica di 133 Kelvin.

Per questi materiali ad alta temperatura critica, i meccanismi che portano alla **bosonizzazione dei fermioni (elettroni)** non sono ancora completamente compresi.

Bosoni e fermioni: alcune proprietà (VI)

I **materiali superconduttori** hanno molte interessanti proprietà. Per esempio la levitazione di un materiale magnetico sopra un superconduttore (effetto Meissner).



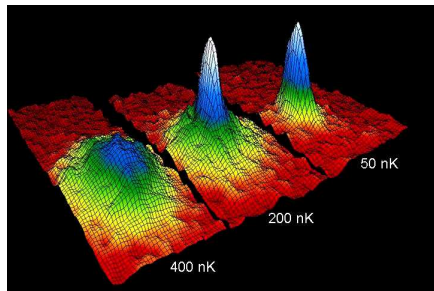
Alcune **applicazioni tecnologiche** dei **superconduttori**:

- treni MAGLEV, basati sulla levitazione magnetica (mag-lev);
- SQUIDS, capaci di misurare campi magnetici estremamente deboli;
- intensi campi magnetici per la Risonanza Magnetica negli ospedali.

Atomi ultrafreddi e la condensazione di Bose-Einstein (I)

Nel 1995 Eric Cornell, Carl Wieman e Wolfgang Ketterle hanno ottenuto la condensazione di Bose-Einstein raffreddando gas atomici bosonici di ^{87}Rb e ^{23}Na (Premo Nobel 2001).

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

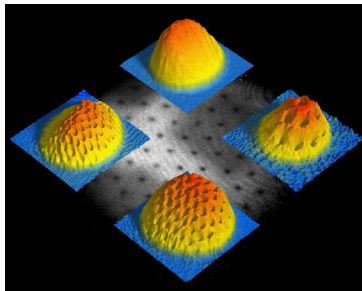


Profili di densità di un gas di rubidio: formazione del condensato di Bose-Einstein. Per il ^{87}Rb lo spin nucleare totale vale $I = \frac{3}{2}$, lo spin elettronico totale vale $S = \frac{1}{2}$, e lo spin atomico totale vale $F = 1$ o $F = 2$: l'atomo neutro di ^{87}Rb è un bosone.

Atomi ultrafreddi e la condensazione di Bose-Einstein (II)

Un'interessante conseguenza della condensazione di Bose-Einstein negli **atomi ultrafreddi** è la possibilità di generare **vortici quantizzati**, dove la velocità del fluido \vec{v} segue la seguente **legge quantistica macroscopica**:

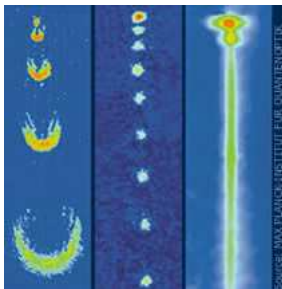
$$\oint \vec{v} \cdot d\vec{r} = \frac{\hbar}{m} 2\pi k, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$



Formazione di vortici quantizzati in gas condensati di atomi di ^{87}Rb . Il numero di vortici aumenta all'aumentare della frequenza rotazionale del sistema.

Atomi ultrafreddi e la condensazione di Bose-Einstein (III)

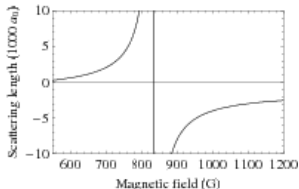
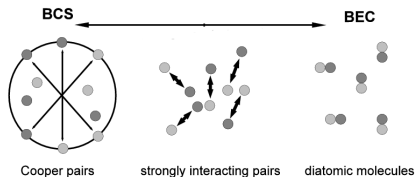
Un importante traguardo raggiunto sperimentalmente è **il laser atomico**: un condensato di Bose-Einstein di atomi ultrafreddi che si propaga a velocità costante ed in modo collimato (**onda coerente di materia**).



Per questi recentissimi laser atomici non sono ancora ben definiti i possibili campi di applicazione, diversamente dal laser ottico.

Bosonizzazione dei fermioni con atomi ultrafreddi (I)

Nel 2004 è stato ottenuto sperimentalmente il **BCS-BEC crossover** con gas ultrafreddi di atomi fermionici (^{40}K o ^6Li).¹



Questa evidenza diretta della **bosonizzazione dei fermioni** è stata ottenuta utilizzando una risonanza di Fano-Feshbach, la quale permette di modificare la lunghezza di scattering a_s del potenziale interatomico dei fermioni

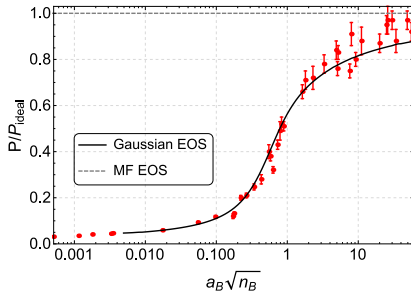
$$a_s = a_{bg} \left(1 + \frac{\Delta_B}{B - B_0} \right), \quad (2)$$

tramite un campo magnetico esterno B .

¹C.A. Regal et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 040403 (2004).

Bosonizzazione dei fermioni con atomi ultrafreddi (II)

Nel 2014 il **BCS-BEC crossover** è stato ricavato anche con **atomi fermionici di ^6Li** intrappolati in una **configurazione quasi bidimensionale** tramite un potenziale ottico.



Nella figura la pressione P del gas atomico in funzione della lunghezza di scattering bosone-bosone a_B . I quadrati rossi sono i dati sperimentali². La linea continua è ottenuta con la teoria sviluppata dal nostro gruppo³ assumendo **temperatura nulla (zero assoluto!)**.

²V. Makhlov et al. Phys. Rev. Lett. **112**, 045301 (2014)

³G. Bighin and L. Salasnich, Phys. Rev. B **93**, 014519 (2016)

Conclusioni

Per concludere desidero ricordare alcune parole di **Enrico Fermi** che sono, penso, di stimolo per molti che si occupano di ricerca scientifica:



“Siamo circondati dall'ignoto e la vocazione dell'uomo di scienza è di spostare in avanti le frontiere della nostra conoscenza in tutte le direzioni, non solo in quelle che promettono più immediati compensi o applausi.”

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!