

Superconduttività e Superfluidità

Luca Salasnich

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università di Padova
luca.salasnich@unipd.it

Master in Comunicazione delle Scienze
Padova, 24 marzo 2018

- Bosoni e fermioni: alcune proprietà
- La superconduttività
- La superfluidità
- La luce laser
- La condensazione di Bose negli atomi ultrafreddi
- Referenze bibliografiche

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:

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

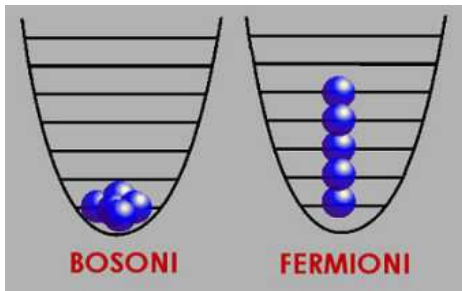
Esempi: il fotone è un bosone ($s = 1$, $m_s = -1, 1$), mentre l'elettrone è un fermione ($s = \frac{1}{2}$, $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$).

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 (II)

Una fondamentale evidenza sperimentale: **bosoni e fermioni hanno un comportamento molto diverso!!**

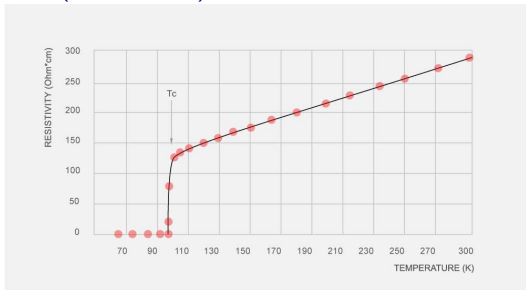
- Bosoni identici possono occupare lo stesso stato quantico, cioè possono stare vicini l'uno all'altro; se tutti i bosoni sono nello stesso stato quantico di singola particella si ha la **condensazione di Bose-Einstein**.
- Fermioni identici NON possono occupare lo stesso stato quantico, cioè devono stare lontani l'uno dall'altro: **principio di esclusione di Pauli**.



Bosoni e fermioni in una trappola armonica.

La superconduttività (I)

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).



Oggi sappiamo che 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).

La superconduttività (II)

Temperatura critica T_c di alcuni materiali superconduttori a pressione atmosferica.

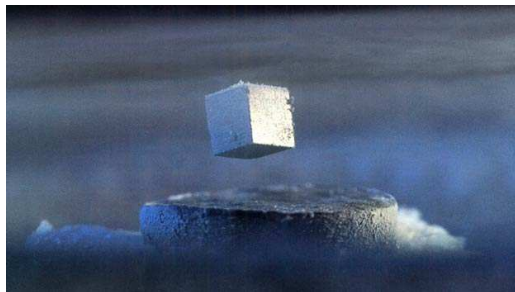
| Material | Symbol | T_c (Kelvin) |
|-----------|--------------------------|----------------|
| Aluminium | ${}^{27}_{13}\text{Al}$ | 1.19 |
| Tin | ${}^{120}_{50}\text{Sn}$ | 3.72 |
| Mercury | ${}^{202}_{80}\text{Hg}$ | 4.16 |
| Lead | ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ | 7.20 |
| Neodymium | ${}^{142}_{60}\text{Nb}$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

La superconduttività (III)

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



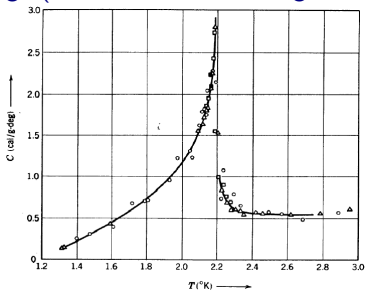
Alcune **applicazioni tecnologiche** dei **superconduttori**:

- 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.

La superfluidità (I)

La **superfluidità** è la proprietà caratteristica di un fluido con **viscosità nulla**, che può perciò fluire senza perdere energia cinetica.

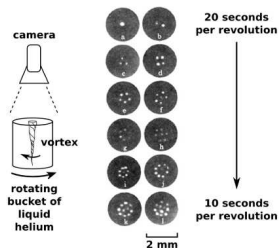
È stata scoperta nel 1937 da **Pyotr Kapitza** (Nobel 1978), il quale trovò che, a pressione atmosferica, al di sotto di $T_\lambda = 2.16$ Kelvin l'elio 4 (^4He) non solo rimane liquido ma mostra **viscosità nulla**. Inoltre a T_λ il calore specifico diverge (diventa infinitamente grande).



In 1938 **Fritz London** diede una prima spiegazione teorica della superfluidità dell'elio 4 sulla base della condensazione di Bose-Einstein (BEC), ma **Laszlo Tisza** e **Lev Landau** (Nobel 1962) furono capaci di descrivere fenomenologicamente la superfluidità senza invocare la BEC.

La superfluidità (II)

In the 1950s **Lars Onsager**, **Richard Feynman** (Nobel 1965), and **Alexei Abrikosov** (Nobel 2003) suggerirono che i **superfluidi possono avere vortici quantizzati**.



Linea vorticoso: densità superfluida n_s e modulo della **velocità superfluida** v_s in funzione della coordinata radiale cilindrica R .

$$n_s(R) \simeq n_s(\infty) \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{R^2}{\xi^2}} \right) \quad \text{and} \quad v_s(R) = \frac{\hbar}{m} \frac{q}{R^2}$$

Vortici quantizzati sono stati **osservati sperimentalmente** nella luce laser, nei superconduttori, nei superfluidi, e nei gas atomici ultrafreddi.

La luce laser (I)

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).

La luce laser (II)

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

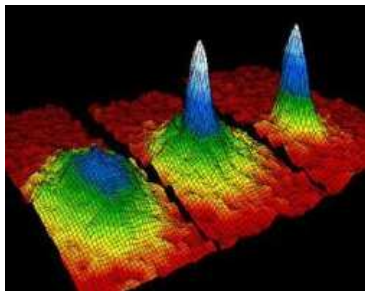
I **laser** trovano oggi applicazione in svariati campi:

- **lavorazione di materiali** (foratura, taglio, saldatura);
- **misure industriali e civili** (interferometri laser per metrologia, misuratori di diametri di fili, granulometri, rugosimetri, sistemi di rilievo di campi di deformazione);
- **telecomunicazioni e fibre ottiche**;
- **medicina** (in Oftalmologia, in Chirurgia Generale, in Chirurgia con microscopio operatorio, in Chirurgia endoscopica).

La condensazione di Bose negli atomi ultrafreddi (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 (Premio Nobel 2001).

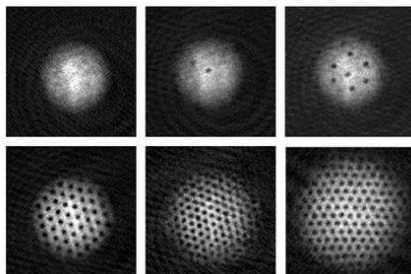
Per questi sistemi bosonici molto diluiti ed ultrafreddi la temperatura critica è circa $T_c \simeq 100$ nanoKelvin.



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.

La condensazione di Bose negli atomi ultrafreddi (II)

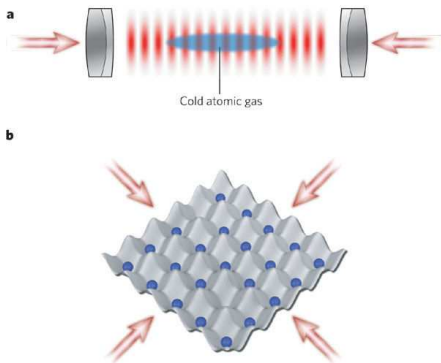
Un'interessante conseguenza della condensazione di Bose-Einstein negli atomi ultrafreddi è la possibilità di generare vortici quantizzati.



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

La condensazione di Bose negli atomi ultrafreddi (III)

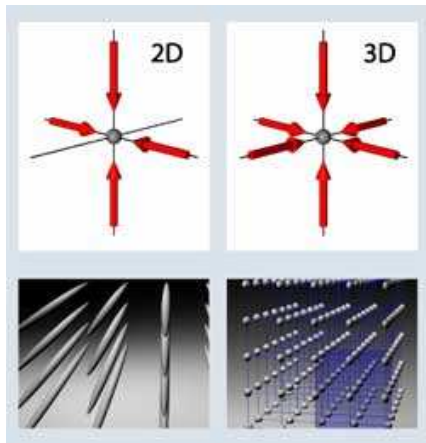
Nel 2002 il gruppo di Immanuel Block a Monaco ha ottenuto, tramite l'interferenza di fasci laser contropropaganti all'interno di una cavità delimitata da specchi, un **reticolo ottico** stazionario in grado di intrappolare gli atomi ultrafreddi.



Il potenziale periodico risultante può intrappolare atomi neutri nei minimi del **reticolo ottico**, utilizzando il momento di dipolo atomico.

La condensazione di Bose negli atomi ultrafreddi (IV)

Negli ultimi anni gli studi sugli **atomi intrappolati con la luce** (atomi in reticoli ottici) si sono raffinati.



Modificando l'intensità e la forma del reticolo ottico ora è possibile intrappolare gli atomi in configurazioni molto diverse: da molti atomi per sito fino ad un singolo atomo per sito.

Referenze bibliografiche

Testi divulgativi per approfondimenti:

- H. Haaken, Nel senso della sinergetica (Di Renzo, Roma, 2005).
- L. Pietronero, Complessità e altre storie (Di Renzo, Roma, 2007).
- L. Lugiato, Divertirsi con la ricerca. Viaggio curioso nell'ottica moderna (Di Renzo, Roma, 2007).
- M. Inguscio, Fisica atomica allo zero assoluto (Di Renzo, Roma, 2012).

Testo semidivulgativo per approfondimenti:

- L. Maccone, L. Salasnich, Meccanica quantistica, caos e sistemi complessi, (Carocci Editore, Roma, 2008).

Testo tecnico per approfondimenti:

- J. Annett, Superconductivity, Superfluids, and Condensates (Oxford Univ. Press, Oxford, 2004).