

Fenomeni Quantistici Macroscopici

Luca Salasnich

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

Padova, Aprile 2020

- Cosa sono in fenomeni quantistici macroscopici?
- Bosoni e fermioni: alcune proprietà
- La luce laser
- La superconduttività
- La superfluidità
- La condensazione di Bose negli atomi ultrafreddi
- Referenze bibliografiche

Cosa sono in fenomeni quantistici macroscopici?

In Fisica i **fenomeni quantistici macroscopici** sono tutti quei fenomeni strettamente collegati con il concetto di **occupazione macroscopica di uno stato quantistico di singola particella o di due particelle**, in termini tecnici si parla di **condensazione di Bose-Einstein**.

I principali **fenomeni quantistici macroscopici** sono:

- i) la luce laser
- ii) la superconduttività
- iii) la superfluidità
- iv) la condensazione di Bose negli atomi ultrafreddi

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:

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

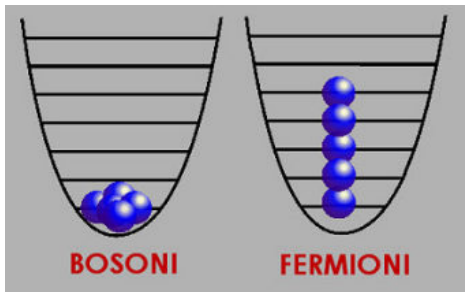
Esempi: il fotone è un bosone ($s = 1$, $m_s = -1, 1$), mentre l'elettrone è un fermione ($s = \frac{1}{2}$, $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$).

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 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)

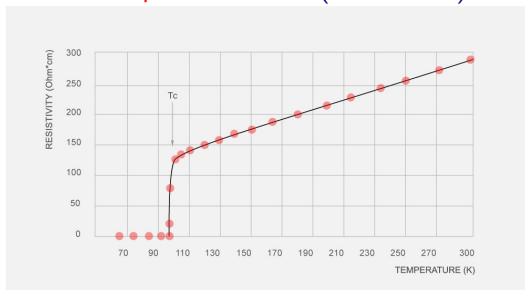
LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

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 superconduttività (I)

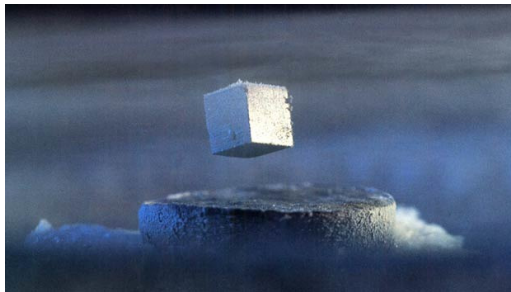
Facciamo un passo indietro. Nel 1911 Heike Kamerlingh Onnes osservò che nel mercurio (Hg) al di sotto di $T_c = 4.16$ Kelvin la resistenza elettrica diventa nulla: **superconduttività** (Nobel 1913).



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).

La superconduttività (II)

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



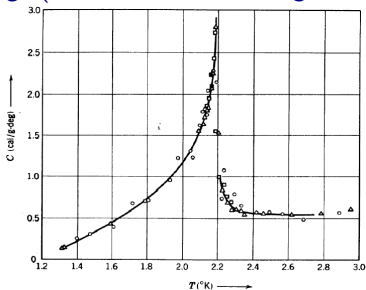
Alcune **applicazioni tecnologiche** dei **superconduttori**:

- 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.

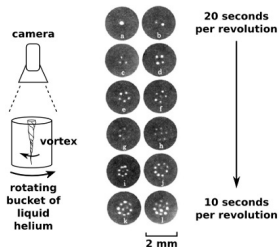
È stata scoperta nel 1937 da **Pyotr Kapitza** (Nobel 1978), il quale trovò che, a pressione atmosferica, al di sotto di $T_\lambda = 2.16$ Kelvin l'elio 4 (^4He) non solo rimane liquido ma mostra **viscosità nulla**. Inoltre a T_λ il calore specifico diverge (diventa infinitamente grande).



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 .

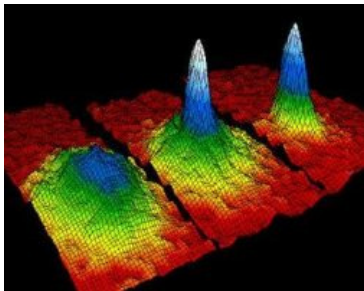
$$n_s(R) \simeq n_s(\infty) \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{R^2}{\xi^2}} \right) \quad \text{and} \quad v_s(R) = \frac{\hbar}{m} \frac{q}{R^2}$$

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

La 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).

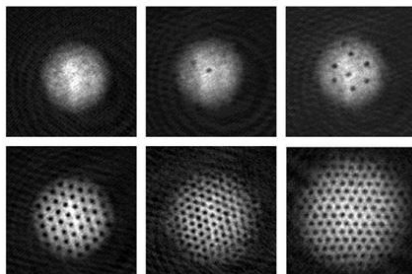
Per questi sistemi bosonici molto diluiti ed ultrafreddi la temperatura critica è circa $T_c \simeq 100$ nanoKelvin.



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)

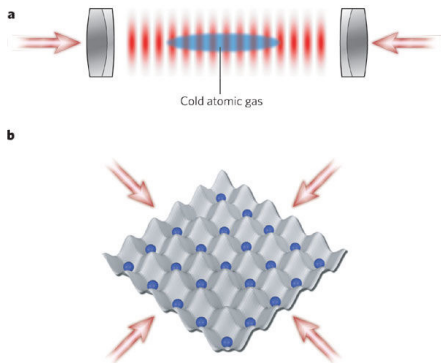
Un'interessante conseguenza della condensazione di Bose-Einstein negli atomi ultrafreddi è la possibilità di generare **vortici quantizzati**.



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)

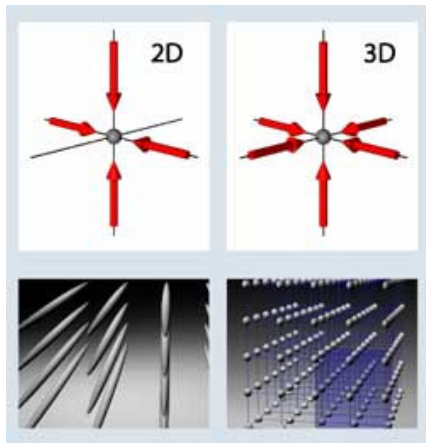
Nel 2002 il gruppo di Immanuel Block a Monaco ha ottenuto, tramite l'interferenza di fasci laser contropropaganti all'interno di una cavità delimitata da specchi, un **reticolo ottico** stazionario in grado di intrappolare gli atomi ultrafreddi.



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).