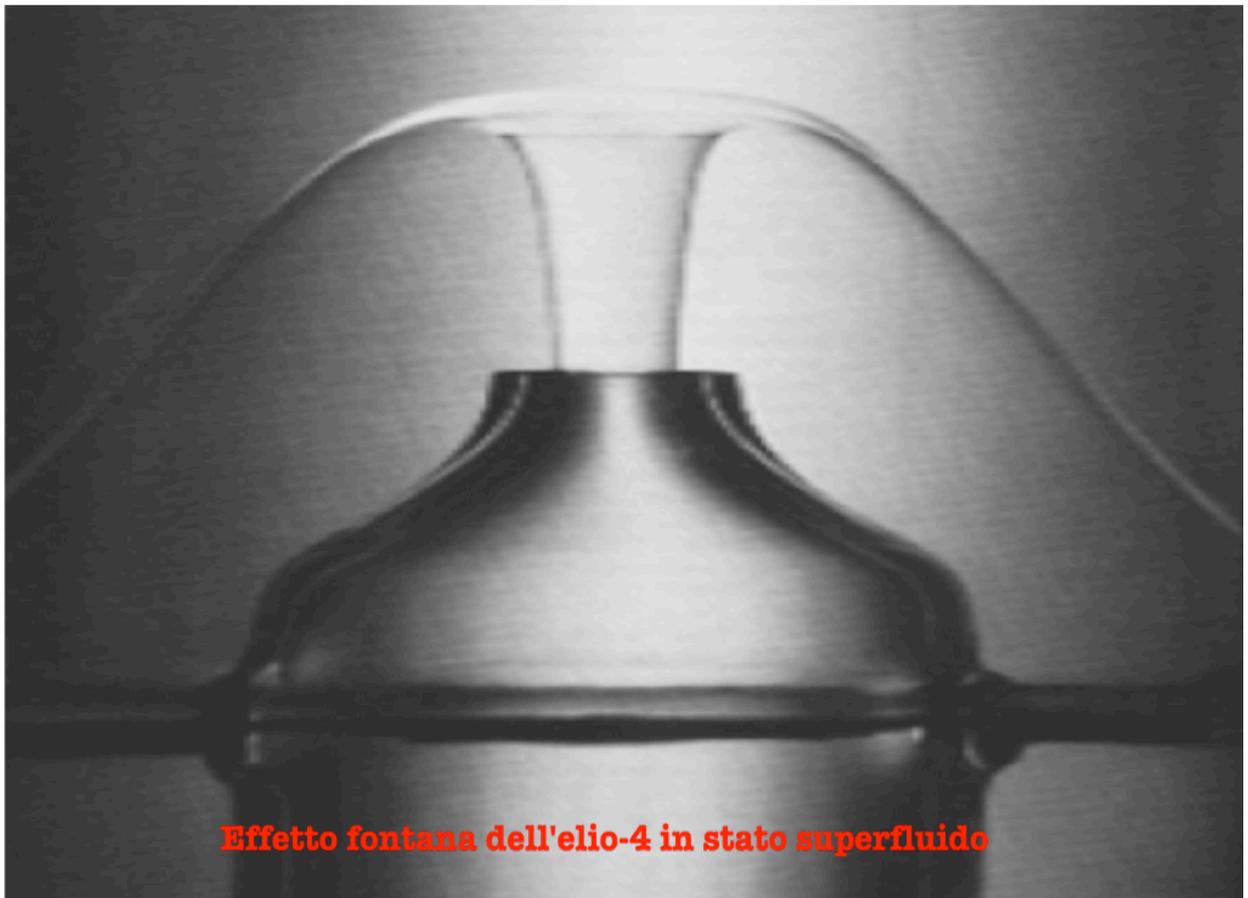


# Che cosa è la superfluidità

Dr . Daniele Di Gioacchino  
**COLD Laboratory**

INFN - Frascati National Laboratory- Research Division  
e-mail: [daniele.digioacchino@lnf.infn.it](mailto:daniele.digioacchino@lnf.infn.it)

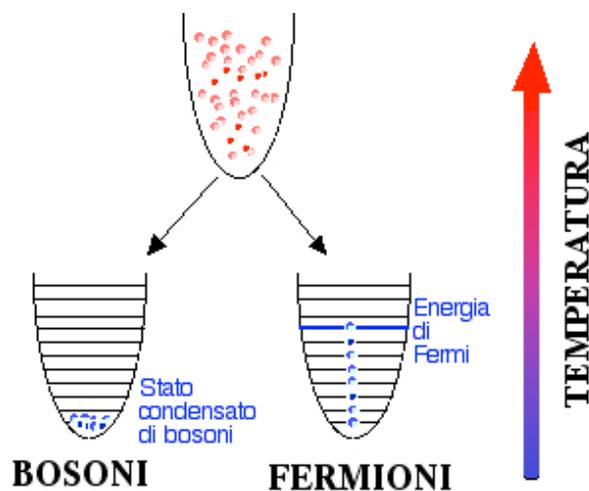


L'insieme delle proprietà che caratterizzano l'elio liquido quando si trova ad una temperatura prossima allo zero assoluto viene indicato come Superfluidità. Quando l'elio liquido viene raffreddato al di sotto di una certa temperatura critica, che per l'isotopo 4 dell'elio ( $^4\text{He}$ ) è di circa 2K, questo si comporta come se fosse un fluido "perfetto", ossia scorre senza attrito in un tubo capillare.

Per capire il fenomeno della superfluidità è necessario utilizzare concetti che appartengono alla Meccanica Quantistica. Cercheremo di vedere quali sono i punti chiave di questa formulazione, rimandando a testi più specialistici per approfondire l'argomento.

Per descrivere il comportamento macroscopico di un insieme di particelle quantistiche, come appunto gli atomi di elio, è necessario aprire una parentesi importante sulla "statistica" a cui queste particelle obbediscono, in modo da poter descrivere un grande numero di atomi su scala macroscopica a partire dalla leggi cui obbediscono le singole particelle. I sistemi di particelle quantistiche mostrano due differenti comportamenti che dipendono dal valore che assume il loro momento angolare totale,  $J$ , somma del momento angolare orbitale,  $L$ , e del momento angolare intrinseco, o spin,  $S$ . Il momento angolare è connesso con il momento magnetico.

Si chiamano "bosoni" tutte quelle particelle con momento magnetico che è multiplo intero ( $1, 2, \dots, N$ ) della costante di Planck  $h$  mentre si dicono "fermioni" quelle particelle il cui momento magnetico è multiplo semi intero ( $1/2, 3/2, \dots, N/2$ ) di  $h$ . I bosoni si differenziano dai fermioni perché, dato un insieme di livelli energetici accessibili alle particelle del sistema, i bosoni possono andare ad occupare tutti quanti lo stesso livello mentre i fermioni possono andare ad occupare solo livelli lasciati liberi dalle altre.



Il diverso comportamento in funzione della temperatura di un sistema di Bosoni e di Fermioni.

Tornando agli atomi di  $^4\text{He}$ , vediamo che essi appartengono alla categoria dei bosoni, dato che possiedono momento magnetico intero. In un sistema di bosoni, per minimizzare l'energia del sistema tutte le particelle vanno ad occupare tipicamente il livello con energia minore (vedi figura precedente). Occupando lo stesso livello, il 'comportamento' di tutte le particelle diviene lo stesso e il sistema manifesta così un elevato grado di *coerenza*. In realtà, la condizione di occupazione macroscopica del

medesimo stato quantico si realizza solo a temperature molto basse perché non appena il sistema viene scaldato si introduce un moto di agitazione termica che sposta le particelle dallo stato energetico più basso a quelli più elevati. Questa osservazione ci spiega perché un liquido costituito da atomi di  $^4\text{He}$ , raffreddato alla temperatura di 2K, subisce una transizione di fase raggiungendo un *alto grado di coerenza*. Una delle manifestazioni di tale coerenza è proprio la capacità di fluire in tubi capillari senza manifestare attriti misurabili.

## **Spiegazione qualitativa della superfluidità dell'elio**

I sistemi quantistici possono esistere solo in alcuni stati stabili e l'energia può essere scambiata con l'ambiente circostante solo in quantità discrete. Poniamo che l'elio superfluido scorra in un capillare con una certa velocità  $v$  per temperature prossime allo zero assoluto. Se c'è dell'attrito sulle pareti, una parte dell'energia cinetica si dissipa in calore causando un rallentamento. L'elio allora si scalda e questo, in termini quantistici, significa che avvengono transizioni verso stati eccitati. Ma proprio perché si tratta di un sistema quantistico, l'atomo di elio non può ricevere energia in modo continuo: uno stato eccitato stabile può essere raggiunto solo se c'è energia sufficiente per compiere la transizione. Definiremo la velocità corrispondente a questa energia minima "velocità di soglia", o "velocità critica".

Il fenomeno della superfluidità avviene quando l'energia del sistema è tale che la velocità raggiunta dall'elio ha valori minori della velocità di soglia, così da non consentire transizioni verso stati eccitati. Il sistema resta dunque nello stato fondamentale, ed il liquido fluisce senza dissipazione nel capillare.

## **2) Esistono altre sostanze con questo comportamento?**

Fenomeni dovuti ad una fase "coerente" della materia si osservano anche in sistemi che non hanno proprietà bosoniche, come gli elettroni in un metallo.

Gli elettroni hanno infatti spin semi-intero, e dunque obbediscono alla statistica di Fermi. In questo caso si parla di "superconduttività", un fenomeno che ha molti aspetti in comune con la superfluidità. Vediamo qualitativamente in cosa consiste.

A temperatura ambiente siamo abituati al fatto che per produrre un flusso di elettroni in un conduttore, cioè una corrente elettrica, dobbiamo applicare in continuazione un campo elettrico esterno che funge in qualche modo da 'motore' per queste particelle. Questa azione continua del motore è necessaria perché gli elettroni dissipano la loro energia in seguito ad urti con le vibrazioni degli ioni del reticolo cristallino e con gli altri elettroni. Questo, ad esempio, è il motivo per cui un filo di rame attraversato da una corrente elettrica si scalda.

In alcuni materiali, invece, scendendo al di sotto di una certa temperatura detta "temperatura critica", si osserva che la corrente si mantiene inalterata anche se il campo elettrico applicato viene spento e persiste per un tempo pressoché infinito. Questo comportamento conferma che lo stato elettronico è altamente coerente, e vi è una forte analogia col caso dell'elio superfluido: la corrente persistente di elettroni in un filo si può in qualche modo mettere in relazione con il moto senza attrito degli atomi di elio in un tubo capillare.

L'analogia tra i fenomeni di superfluidità (bosonica) e superconduttività (fermionica) non è però solo qualitativa.

Ecco la spiegazione:

l'interazione degli elettroni con le vibrazioni reticolari (fononi) degli ioni del reticolo del metallo provoca un'interazione efficace *attraente* tra gli elettroni, che si legano tra loro formando delle *coppie*. Queste coppie, cosiddette *coppie di Cooper* dal fisico che per primo formulò la teoria della superconduttività, hanno carattere bosonico, dato che il momento magnetico di una coppia è la somma di quelli degli elettroni che la costituiscono, ed è dunque un multiplo intero di  $h$ . Il sistema di elettroni in un metallo, al di sotto della temperatura critica, si comporta dunque in un certo senso come un sistema di particelle bosoniche, che come tali sono in grado di fluire senza dissipare energia se la temperatura è sufficientemente bassa.

### **3) Ci sono usi industriali o scientifici che sfruttano questa caratteristica ?**

Un'importante applicazione tecnologica della superfluidità avviene nei cosiddetti “refrigeratori a diluizione”:

Per raggiungere temperature di qualche milliKelvin si fa “evaporare” l'elio-3 nell' elio-4 liquido. Tale refrigeratore utilizza una miscela di questi due isotopi. Per temperature inferiori a 0.85 K le due fasi si separano e si rimuove l'elio-3 dalla miscela e si possono raggiungere temperature del sistema dell' ordine di 10 mK.

Per quanto riguarda altre applicazioni della superfluidità in campo scientifico si possono fare alcuni esempi:

- a) nel campo della chimica, l'elio-4 superfluido è stato usato nelle tecniche di spettroscopia come “solvente quantistico”. Questa analisi, chiamata “spettroscopia a nano gocce di elio”, è di interesse negli studi delle molecole di gas, in quanto una singola molecola in un mezzo superfluido dà alla molecola libertà di rotazione. In questo modo la molecola si comporta come se fosse in fase gassosa.
- b) nel settore della ricerca aerospaziale, dove temperature inferiori ad 1 K sono di difficile attuazione. Grazie alla superfluidità, l'elio liquido produce un film che assicura una completa copertura ed un omogeneo raffreddamento delle pareti del contenitore dove verranno effettuate le misure.

Inoltre ha grande importanza sia scientifica che industriale lo stato superconduttivo nei materiali. Alcune ricadute tecnologiche sono ad esempio:

- La produzione di alti campi magnetici del valore di decine di Tesla. Questo è possibile grazie ai magneti superconduttori, dato che i materiali magnetici convenzionali (come ad esempio il ferro) presentano dei limiti di saturazione .
- Il trasporto e accumulo dell' energia elettrica a bassissima dissipazione.

- I treni a levitazione magnetica, che sfruttano l'effetto Meissner (l'espulsione delle linee di flusso del campo magnetico che avviene in un materiale superconduttore al di sotto della temperatura critica).
- Lo sfruttamento delle proprietà quantistiche del campo magnetico in giunzioni superconduttrici (SQUID) per produrre sensori magnetici ad altissima sensibilità.
- Computazione e crittazione quantistica nella trasmissione di informazioni riservate....

---

*Una nota generale sui fermioni:*

*Se fosse violato il principio di Pauli, gli orbitali elettronici degli atomi avrebbero tutti la stessa energia e pertanto collasserebbero in orbitali vicinissimi al nucleo atomico, facendo diventare la materia milioni di milioni di volte più densa dell'acqua, come la materia collassata di cui sono fatte le stelle nane bianche, il che impedirebbe ogni forma di vita. E' il principio di Pauli che ci consente di esistere in quanto la struttura della materia di cui è fatto l'universo dipende in ultima analisi da questa variabile*

---