

Accademia dei Lincei
Roma 5 Aprile 2021

Fasi esotiche della materia quantistica: i superfluidi



Sandro Stringari

Università di Trento



CNR-INO



Come anticipato nella lezioni precedenti, la Natura divide le **particelle elementari** in due grandi categorie:

- **Fermioni** (elettroni, neutroni, protoni, atomi con numero dispari di fermioni)
- **Bosoni** (fotoni, atomi con numero pari di fermioni)

Un esempio importante:

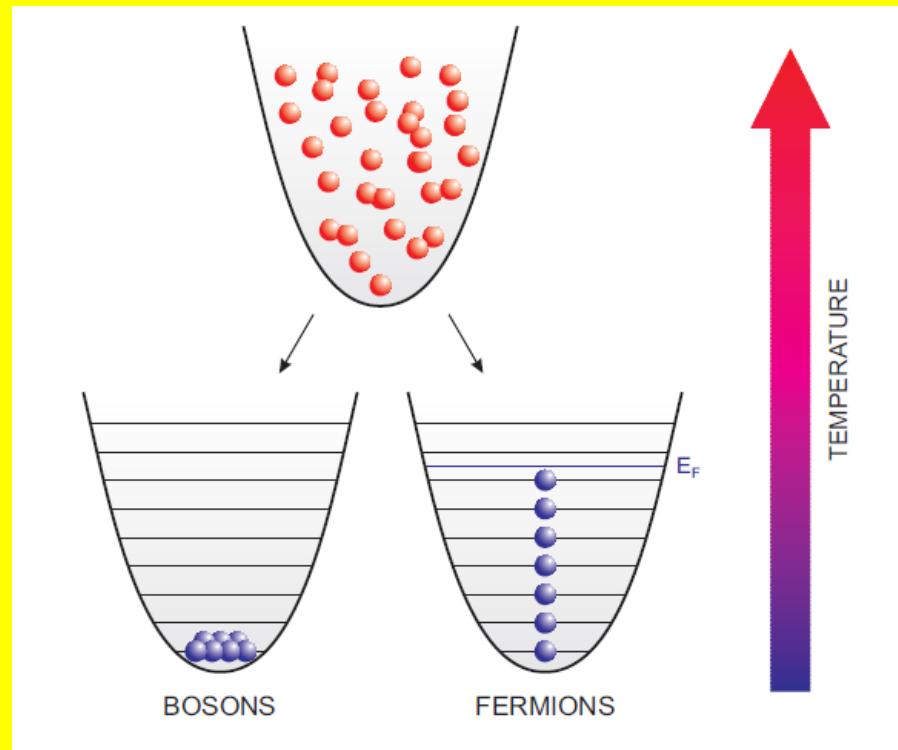
Gli atomi di **He4** (2 protoni, 2 neutroni, 2 elettroni) sono **bosoni**

Gli atomi di **He3** (2 protoni, 1 neutrone, 2 elettroni) sono **fermioni**

[Anche sistemi composti da più elementi si comportano come particelle elementari, se i gradi di libertà interni non sono attivati termicamente]

Le differenti proprietà quantistiche dei bosoni e dei fermioni sono all'origine di **proprietà termodinamiche molto differenti**

A differenza dei fermioni, che obbediscono al principio di esclusione di Pauli, i bosoni possono occupare lo stesso stato microscopico, dando luogo, a temperature ultrabasse, al fenomeno della condensazione di Bose-Einstein.

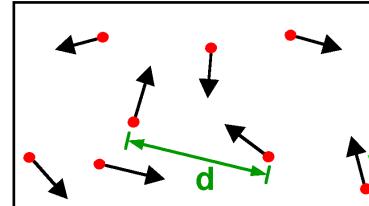


La meccanica quantistica associa ad ogni particella un onda (onda di materia). Il **dualismo particella-onda** è uno degli aspetti più intriganti della fisica quantistica.

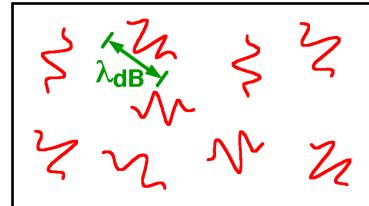
Usando il linguaggio delle onde possiamo dire che a temperature alte il gas è descritto da tante onde incoerenti scorrelate tra loro. In presenza di condensazione Bose-Einstein, al di sotto di una temperatura critica, parte di queste onde dà luogo a un'onda gigante di materia.

Allo zero assoluto tutte le onde si confondono in questa onda gigante di materia

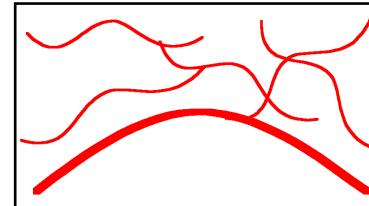
What is Bose-Einstein condensation (BEC)?



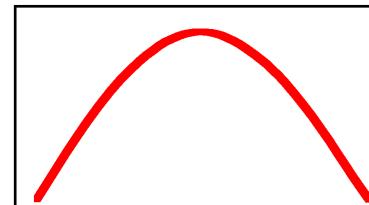
High Temperature T:
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"



Low Temperature T:
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"



$T=T_{crit}$:
Bose-Einstein Condensation
 $\lambda_{dB} \approx d$
"Matter wave overlap"



$T=0$:
Pure Bose condensate
"Giant matter wave"

In un gas atomico la condensazione di Bose-Einstein ha luogo per temperature inferiori al valore critico

$$k_B T_{BEC} = \frac{3.3}{m} \hbar^2 n^{2/3}$$

dove $\hbar = 1.054 \times 10^{-27} g \frac{cm^2}{sec}$ è la costante di Planck

$k_B = 1.410^{-16} erg/^0K$ è la costante di Boltzmann

m è la massa di ogni singolo atomo

$n = N/V$ è la densità del gas

Quanto vale T_{BEC} ?

Consideriamo ad esempio l'aria che respiriamo.

La densità vale $n \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ e prendendo per la massa quella dell'azoto molecolare si ottiene che la temperatura di transizione è una piccolissima frazione di grado sopra lo zero assoluto (circa -273 gradi centigradi)

Questo ci fa capire che la realizzazione della condensazione di Bose-Einstein con sistemi atomici richiede il raggiungimento di temperature ultrabasse.

Ci pone altresì il problema di capire cosa succede agli stati fisici della materia alle basse temperature.

Infatti abbassando la temperatura quasi tutti i sistemi abbandonano la fase gassosa. Prima liquefano e poi solidificano.

Ad esempio l'azoto diventa liquido a -196 gradi centigardi e solidifica a -210 gradi. La liquefazione dei gas (azoto, ossigeno etc.) ha oggigiorno un impatto applicativo molto importante in campo scientifico, industriale, medico etc..



Quando il sistema solidifica il moto degli atomi viene congelato e gli effetti della meccanica quantistica non sono più in grado di dar luogo al fenomeno della condensazione di Bose-Einstein.

L'unico sistema che non solidifica mai a pressione atmosferica è l'**olio** che rimane in **fase liquida** fino allo **zero assoluto**. Questo è la conseguenza di due fattori importanti:

- La massa leggera dell'olio che amplifica gli effetti della meccanica quantistica
 - Le interazioni ultradeboli che caratterizzano i gas nobili di cui l'olio è per l'appunto il gas più leggero.
-
- Per questi motivi l'olio liquido è diventato un sistema di fondamentale importanza per studiare gli effetti della **meccanica quantistica alle basse temperature**

Tipico diagramma di fase P(T) della quasi totalità dei sistemi fisici:

Per qualsiasi valore della pressione (anche a pressioni bassissime) abbassando la temperatura **il sistema entra nella fase solida.**

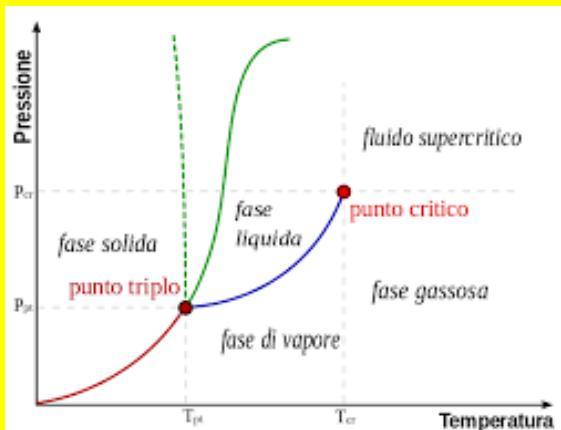
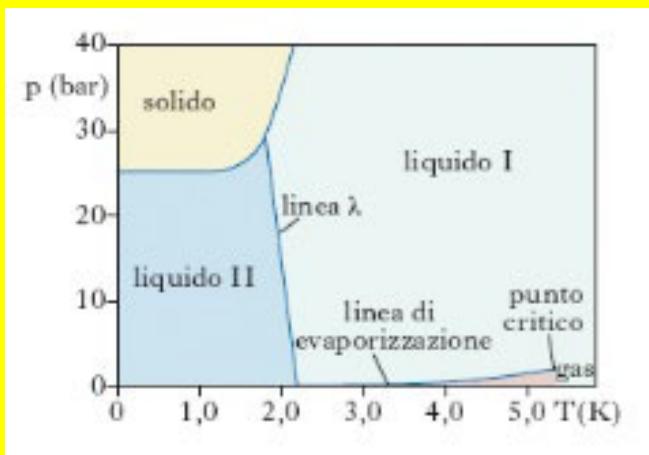
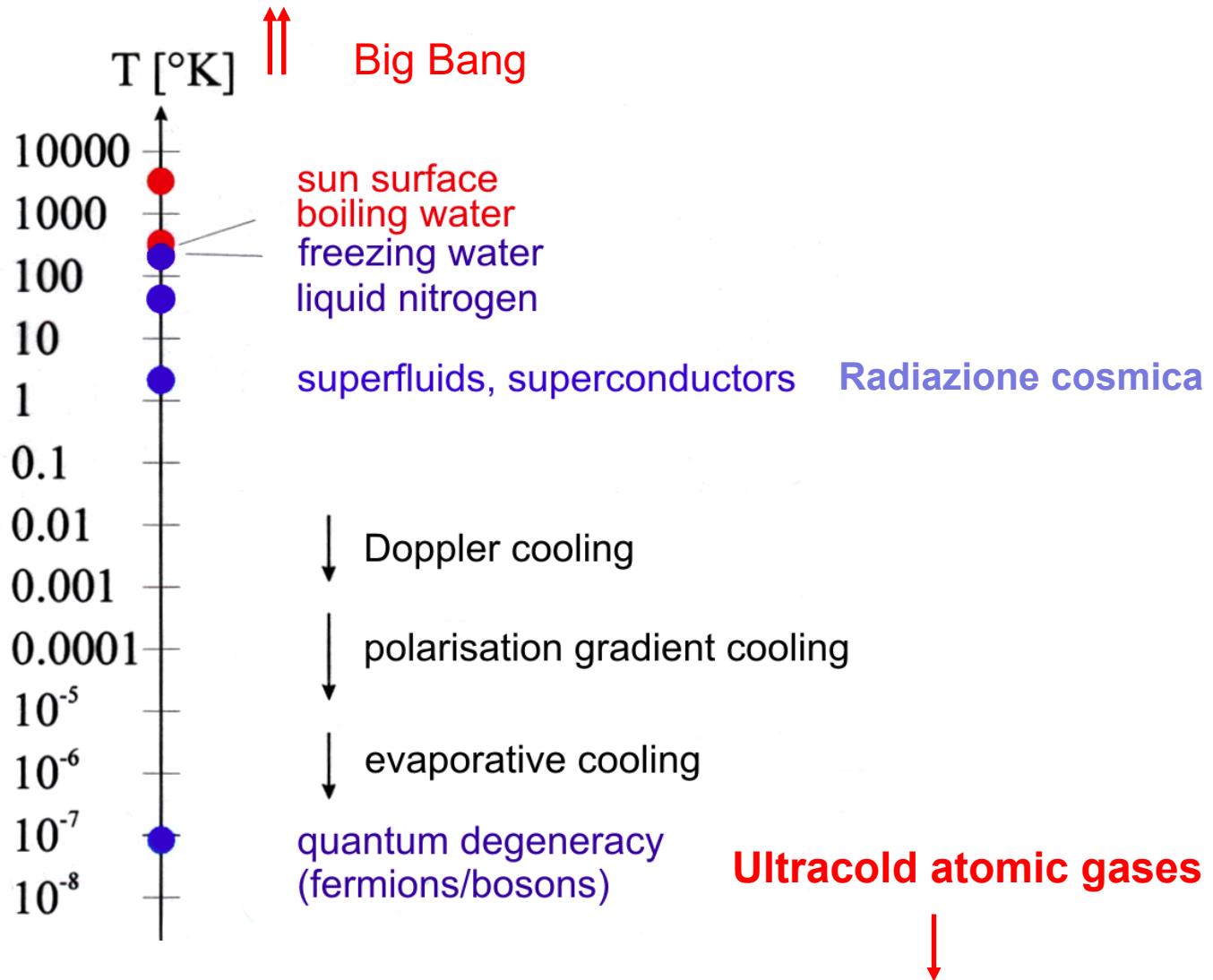


Diagramma di fase nel caso dell'**olio**

Per pressioni inferiori a 27 atmosfere **l'olio rimane liquido anche allo zero assoluto !!**



Scala delle temperature



La temperatura più alta

$$T = 4 \times 10^{12} \text{ K}$$

Cern-Ginevra



La temperatura più bassa

$$T = 4 \times 10^{-10} \text{ K}$$

MIT-Cambridge

 GUINNESS WORLD RECORDS™

MEDIA | ABOUT GWR | CONTACT US

FIND A WORLD RECORD

leanhardt

Enter keywords separated by a space
e.g., pogo stick, longest fingernails

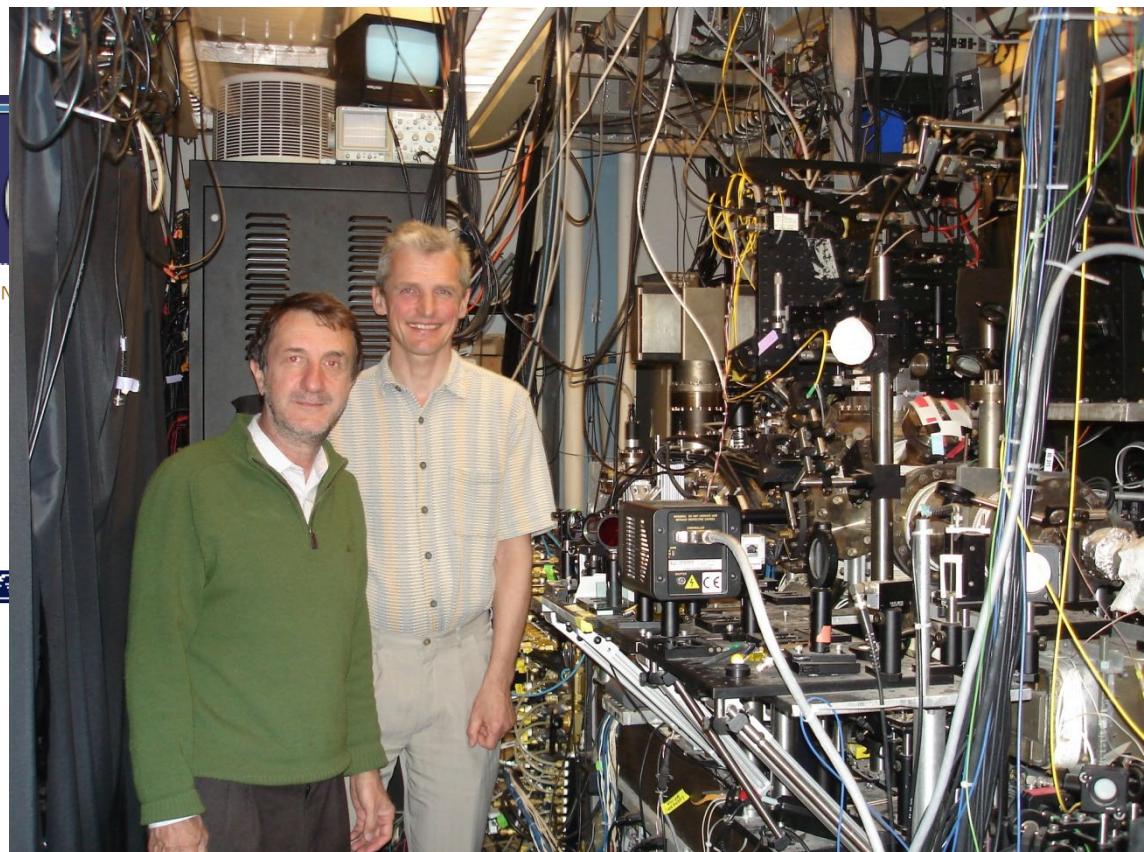
BE A RECORD BREAKER

FAQs

SCIENCE AND TECHNOLOGY << AMAZING FEATS

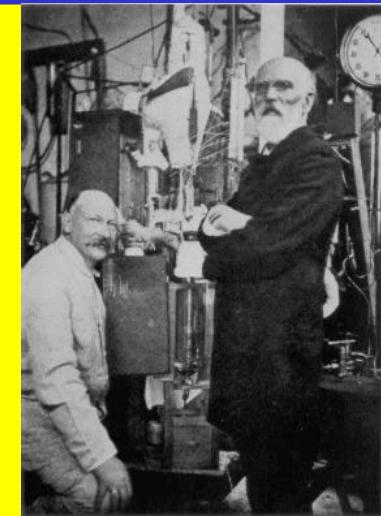
Lowest Manmade Temperature

The lowest manmade temperature achieved so far is 450 picokelvin. It was achieved by a team of scientists at the Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, Massachusetts, USA: A.E. Leanhardt, T.A. Pasquini, M. Saba, A. Schirotzek, Y. Shin, D. Kielpinski, D.E. Pritchard and W. Ketterle. The results were published in *Science* magazine on September 12, 2003.



Prima del 1908 si pensava che l'elio rimanesse un gas a tutte le temperature.

Nel 1908 Kamerlingh Onnes (nella foto insieme a Van der Waals) realizza a Leida la liquefazione dell'elio a -269 gradi centigradi.



L'elio rimane liquido fino allo zero assoluto (-273 gradi centigradi).

Inizia la grande stagione delle basse temperature

1911: Kammerlingh Onnes scopre a Leida la **supercondutività** (assenza di resistenza elettrica, premio Nobel 1913)

1932: Keesom e Clusius misurano a Leida la **transizione lambda** del calore specifico dell'elio liquido

1938: Scoperta della **superfluidità**

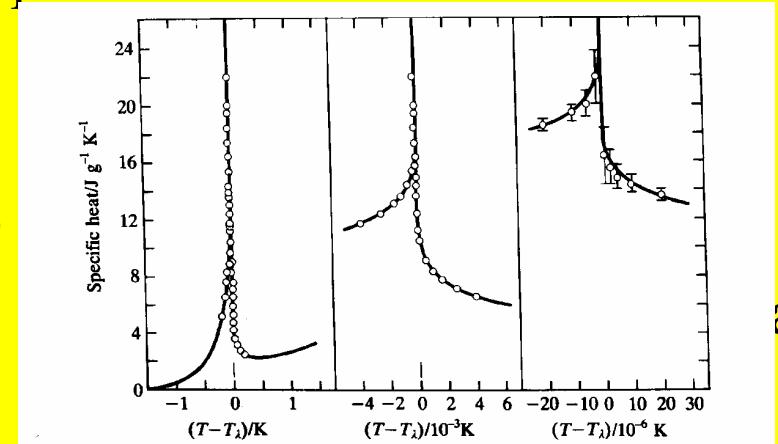
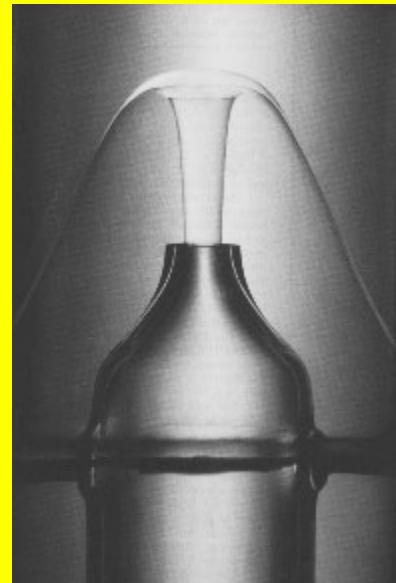
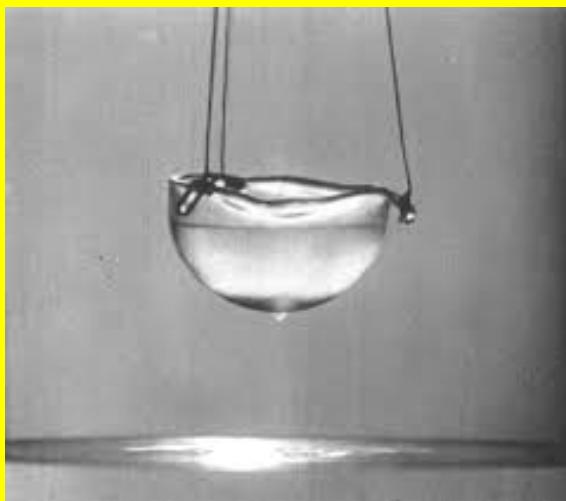
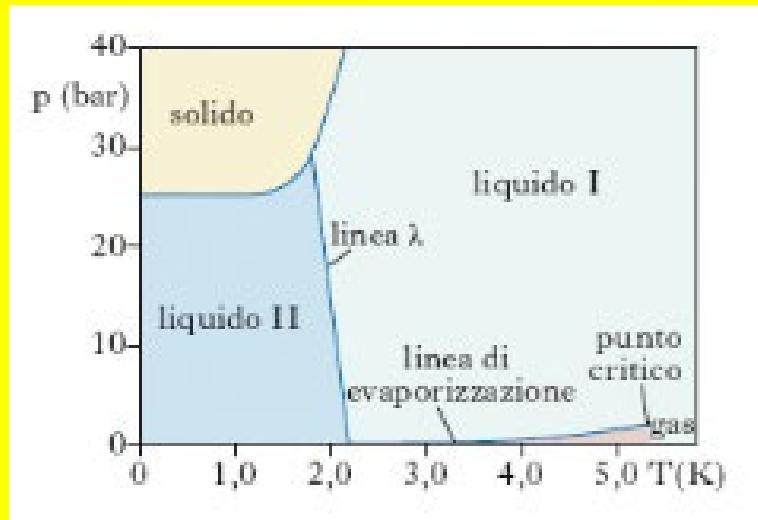


Fig. 15.3. The specific heat of liquid ${}^4\text{He}$ under the saturated vapour pressure as a function of $T - T_\lambda$. The width of the small vertical line just above the origin indicates the portion of the diagram shown expanded (in width) in the curve directly to the right (after Buckingham and Fairbank [193].)

La linea lambda segna la transizione tra due fasi dell'elio liquido (I e II). Solo nel 1938 vennero scoperte le proprie straordinarie della fase II che d'ora in poi venne chiamata **fase superfluida**, caratterizzata dall'**assenza di viscosità** e dalla capacità del fluido di risalire le pareti di un recipiente o scorrere all'interno di canali senza attrito.

La scoperta fu effettuata da Allen e Miesener a Cambridge e da Kapitza (Premio Nobel 1978) a Mosca



A differenza di un fluido normale, l'elio superfluido sgocciola senza attrito attraverso canali microscopici prodotti sulla base di un bicchiere di vetro



Questo contenitore
presenta minuscoli fori

Il legame con la condensazione di Bose-Einstein

Subito dopo la scoperta
della superfluidità
Fritz London ebbe
l'intuizione di legare la
superfluidità
alla condensazione
di Bose-Einstein

644

NATURE APRIL 9, 1938, VOL. 141

the effective mass m^* being of the order of magnitude of the mass of the atoms. But in the present case we are obliged to apply Bose-Einstein statistics instead of Fermi statistics.

(3) In his well-known papers, Einstein has already discussed a peculiar condensation phenomenon of the 'Bose-Einstein' gas; but in the course of time the degeneracy of the Bose-Einstein gas has rather got the reputation of having only a purely imaginary existence. Thus it is perhaps not generally known that this condensation phenomenon actually represents a discontinuity of the derivative of the specific heat (phase transition of third order). In the accompanying figure the specific heat (C_v) of an ideal Bose-Einstein gas is represented as a function of T/T_0 , where

$$T_0 = \frac{\hbar^2}{2\pi m^* k} \left(\frac{n}{2,615} \right)^{2/3}.$$

With m^* = the mass of a He atom and with the mol. volume $\frac{N_A}{n} = 27.6$ cm.³ one obtains $T_0 = 3.09^\circ$. For $m < m^*$ the specific heat is given by

Institut Henri Poincaré,
Paris.
March 5.

¹ Fröhlich, H., *Physica*, **4**, 639 (1937).
² Allen, J. F., and Jones, H., *NATURE*, **141**, 243 (1938).
³ Simon, F., *NATURE*, **133**, 529 (1934).
⁴ London, F., *Proc. Roy. Soc., A*, **153**, 576 (1936).
⁵ Rollin, *Physica*, **2**, 557 (1935); Keesom, W. H., and Keesom, H. P., *Physica*, **3**, 359 (1936); Allen, J. F., Peierls, R., and Zaki Uddin, M., *NATURE*, **140**, 62 (1937).
⁶ Burton, E. F., *NATURE*, **135**, 265 (1935); Kapitza, P., *NATURE*, **141**, 74 (1938); Allen, J. F. and Misener, A. D., *NATURE*, **141**, 73 (1938).

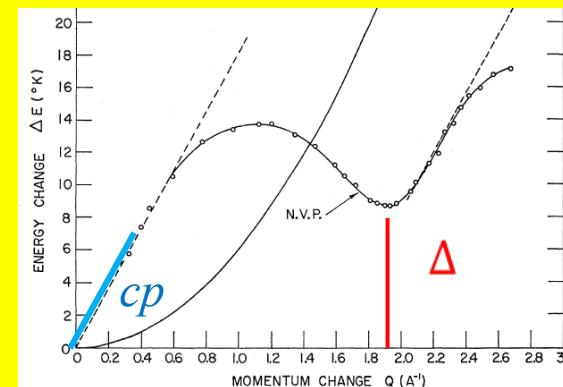
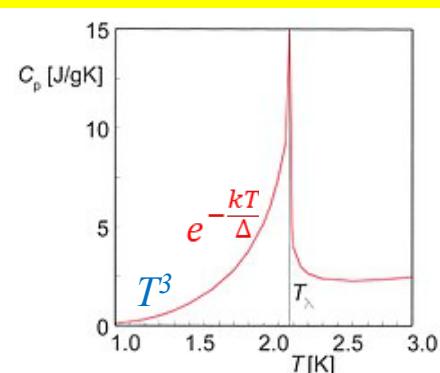
Puzzle. A causa delle interazioni che caratterizzano la fase liquida dell'elio la condensazione di Bose-Einstein coinvolge solo una frazione degli atomi, circa il 10 % a temperatura zero. Viceversa la superfluidità coinvolge tutto il sistema a T=0.

Le nuove teorie sulla superfluidità

Dopo la scoperta sperimentale della superfluidità, Landau (Premio Nobel 1962) sviluppò la teoria delle **eccitazioni elementari** e stabilì il cosiddetto **criterio di Landau** secondo cui un fluido può scorrere senza attrito a contatto con la parete se la velocità è inferiore a un valore critico stabilito dalle proprietà di queste eccitazioni.



Sulla base delle misure del calore specifico a temperature basse e in vicinanza della transizione lambda riuscì a predire le struttura delle eccitazioni elementari (**fononi** a bassi momenti, **minimo rotonico** a momenti più alti) la cui eccitazione termica contribuisce al calore specifico con dipendenze differenti dalla temperatura



Le nuove teorie sulla superfluidità

Landau sviluppò altresì la **teoria dei due fluidi** (fluido normale e fluido superfluido che coesistono a temperatura finita). La teoria (inizialmente introdotta da Titsza) predice fenomeni nuovi come ad esempio la propagazione del cosiddetto **second sound**, un ‘onda di entropia’ ben distinto dal suono ordinario che è invece un’‘onda di pressione’. Il second sound fu osservato sperimentalmente in elio superfluido da Peshkov (1944).

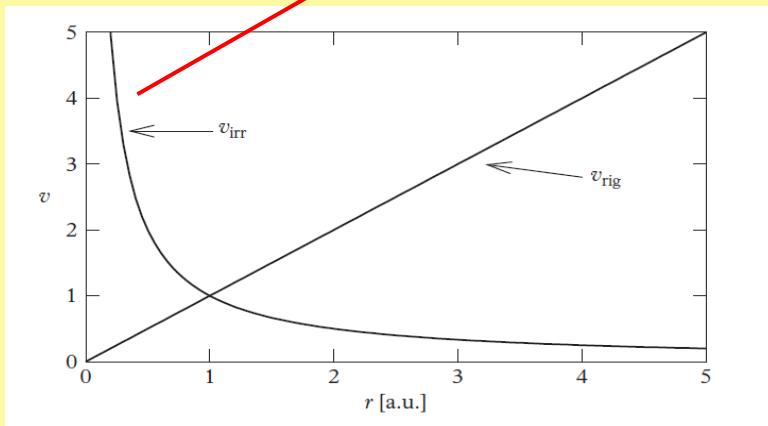
Dal punto di vista **microscopico** la teoria della superfluidità e la comprensione del **legame tra la condensazione di Bose-Einstein e la superfluidità** ha coinvolto negli anni seguenti i fisici teorici più famosi dell’epoca (Onsager, premio Nobel 1968, Penrose, Premio Nobel 2020, Bogoliubov, Feynman, premio Nobel 1965) ed è tuttora oggetto di studi teorici e sperimentali nei gas atomici ultrafreddi dove la BEC è più facile da studiare.

PROPRIETA' ROTAZIONALI DEI SUPERFLUIDI

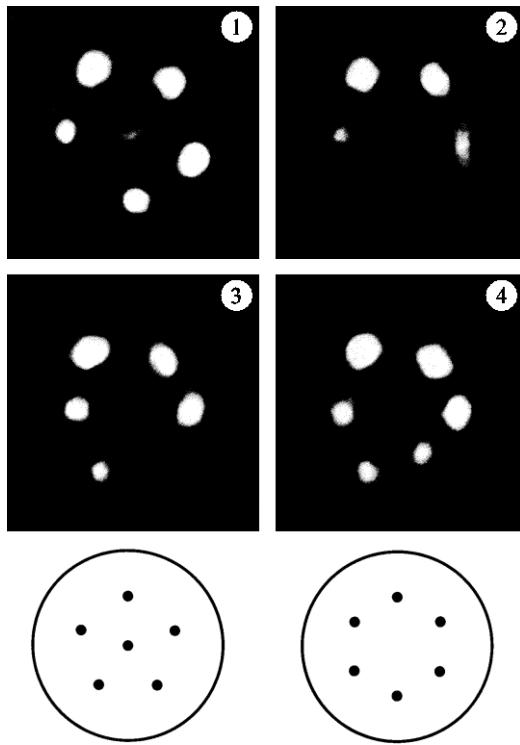
I superfluidi ruotano in maniera diversa dai sistemi classici.

In particolare **non posson ruotare in maniera rigida**

L'unica maniera per trasportare momento angolare è grazie alla **formazione di vortici** (piccolo tornado nei quali la velocità diverge quando ci avviciniamo alla linea del vortice)

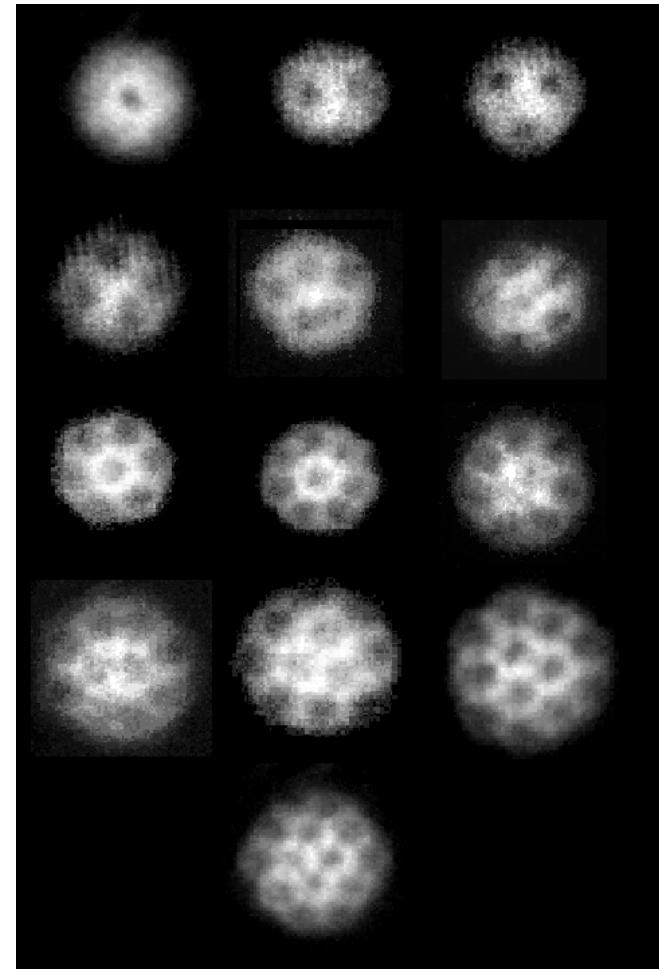


Vortici in elio superfluido
Prime teorie: Onsager,
Feynman (anni 50)
Prime misure: Hall e
Vinen (1956)



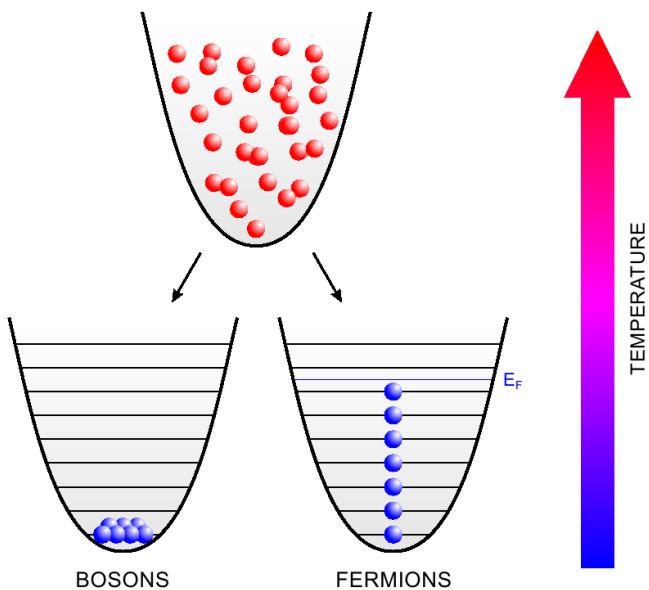
Yarmchuck e Packard 1982

Vortici in un BEC gas
(Jila, ENS, Mit, 2000-2001)



Chevy et al. 2001

CI PUO' ESSERE CONDENSAZIONE DI BOSE-EINSTEIN E SUPERFLUIDITA NEI GAS DI FERMI ?



Come conseguenza del principio di esclusione di Pauli i fermioni non possono condensare. Tuttavia i fermioni possono interagire tra di loro e possono dare luogo alla **formazione di coppie** che sono dei bosoni e possono esibire la **condensazione di Bose-Einstein**

‘Visualizzazione’ di un gas di fermioni di Debbie Jin che nel 2003 realizzò sperimentalmente la condensazione di Bose-Einstein di molecole ottenute a partire da un gas di fermioni interagenti.

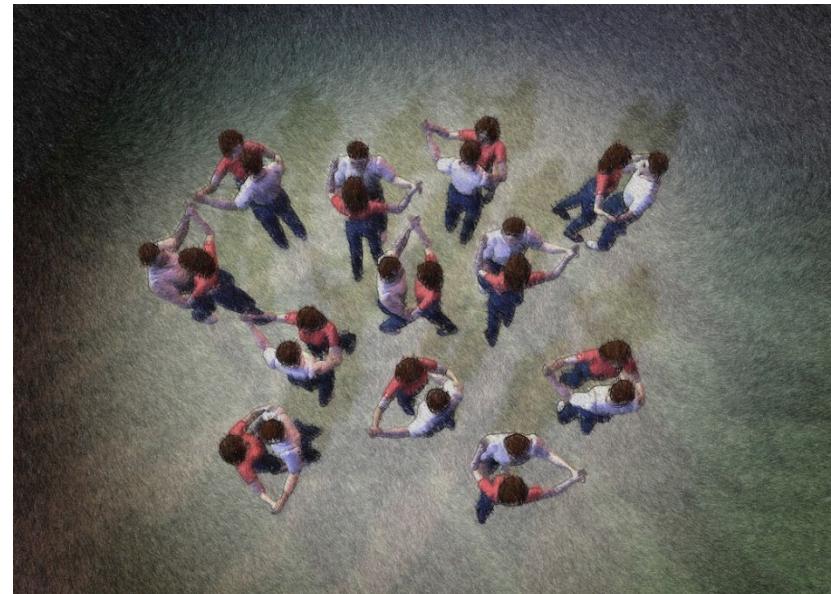
I fermioni in maglia bianca (maschi) interagiscono con i fermioni in maglia rossa (femmine). I fermioni sono alla ricerca del loro ‘partner’



‘Visualizzazione’ di un gas di fermioni di Debbie Jin che nel 2003 realizzò sperimentalmente la condensazione di Bose-Einstein di molecole ottenute a partire da un gas di fermioni interagenti.

I fermioni in maglia bianca (maschi) interagiscono con i fermioni in maglia rossa (femmine). I fermioni sono alla ricerca del loro ‘partner’

Le coppie si sono formate. Ciascuna coppia di fermioni e’ un bosone **e i bosoni possono condensare**



La formazione di coppie bosoniche nei sistemi fermionici interagenti è alla base della **superfluidità fermionica** ottenuta sperimentalmente in He3 liquido
(gli atomi di He3 sono fermioni !)

(Osheroff, Lee, Richardson, premio Nobel 1996)

La temperatura critica che caratterizza la transitione alla fase superfluida è **moltò più bassa rispetto a quella di He4**
(conseguenza importante del differente comportamento quantistico dei due isotopi dell'elio)

La superfluidità fermionica è attualmente investigata in maniera sistematica nei gas atomici ultrafreddi.

La formazione di coppie bosoniche nei sistemi fermionici è alla base del fenomeno della **supercondutività degli elettroni** che sarà discussa nella prossima lezione.

Alcuni messaggi importanti da ricordare:

- La natura divide le particelle elementari in due categorie (**bosoni e fermioni**)
- La **superfluidità** è un fenomeno quantistico profondamente legato alla **condensazione di Bose-Einstein** (BEC)
- Nei sistemi dove le particelle elementari sono atomi la superfluidità avviene a **temperature molto basse**
- I superfluidi **non esibiscono viscosità**, possono attraversare canali microscopici e risalire le pareti di un recipiente senza attrito. Possono ruotare soltando formando dei **vortici**.
- **BEC e superfluidità** non sono limitate ai sistemi bosonici, ma hanno luogo **anche nei sistemi fermionici**, tramite la formazione di coppie che sono bosoni e possono condensare