

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA “ETTORE MAJORANA”

CONDENSATI DI BOSE-EINSTEIN

Candidato:
Roberto De Angelis

Relatore:
Chiar.mo Prof. Francesco Priolo
Correlatore:
Dott.ssa Maria Josè Lo Faro

Contenuti

Nel lavoro qui riportato verranno affrontati i seguenti argomenti nel seguente ordine:

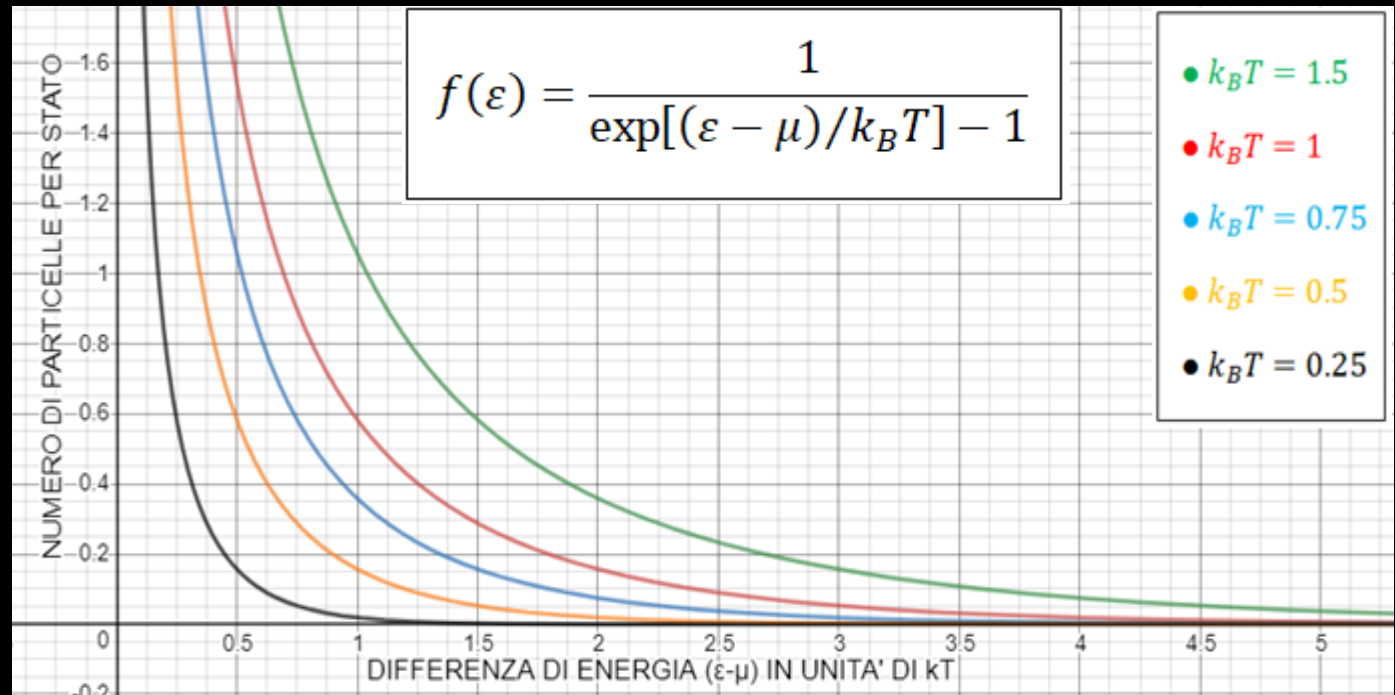
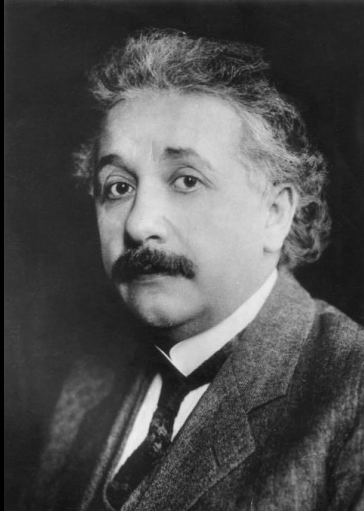
1. Introduzione storica e teoria dei gas di Bose.
2. Tecniche sperimentali di raffreddamento e confinamento.
3. Realizzazione del condensato in vapori atomici di rubidio.

Introduzione ai condensati

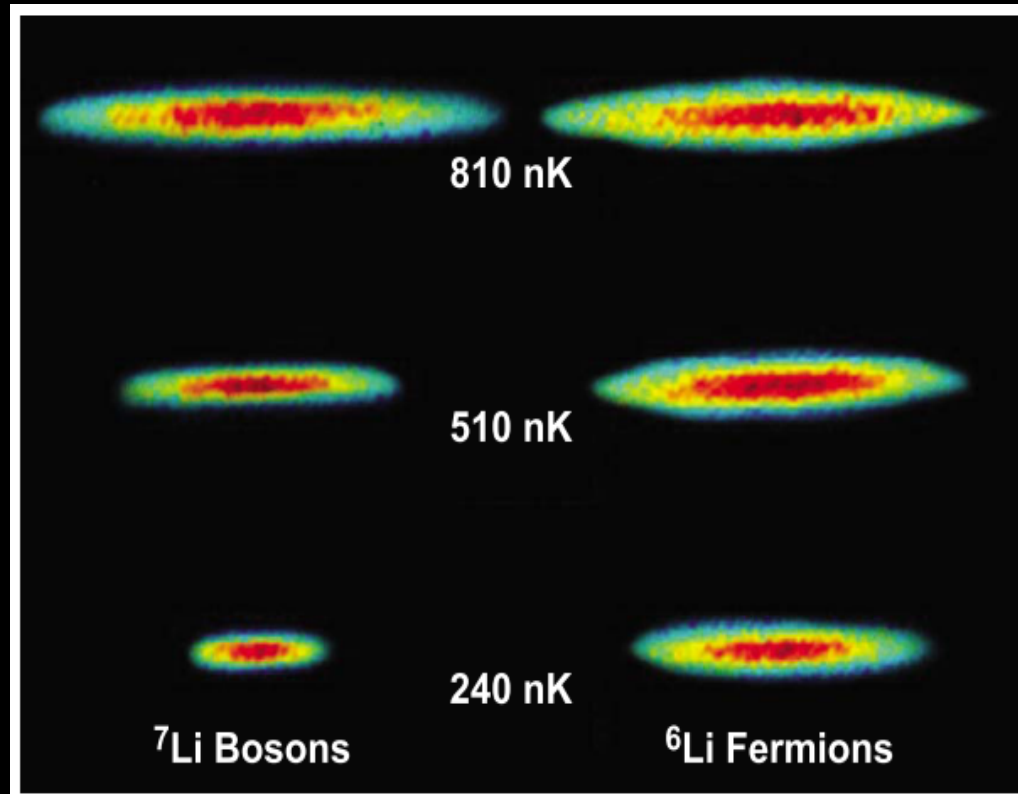
3

1924: Bose ricava l'espressione dell'emissione di radiazione di corpo nero da considerazioni statistiche.

1925: Einstein estende il modello di Bose a particelle indistinguibili non interagenti, nasce la statistica di Bose-Einstein.



Raffreddamento simultaneo di un gas bosonico (litio-7) e di uno fermionico (litio-6) fino allo stato di degenerazione quantistica.



“Una separazione è effettuata; una frazione condensa, il resto rimane sotto forma di gas ideale saturo” [1]

[1] Einstein A. Sitzungsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss. 3 (1925).

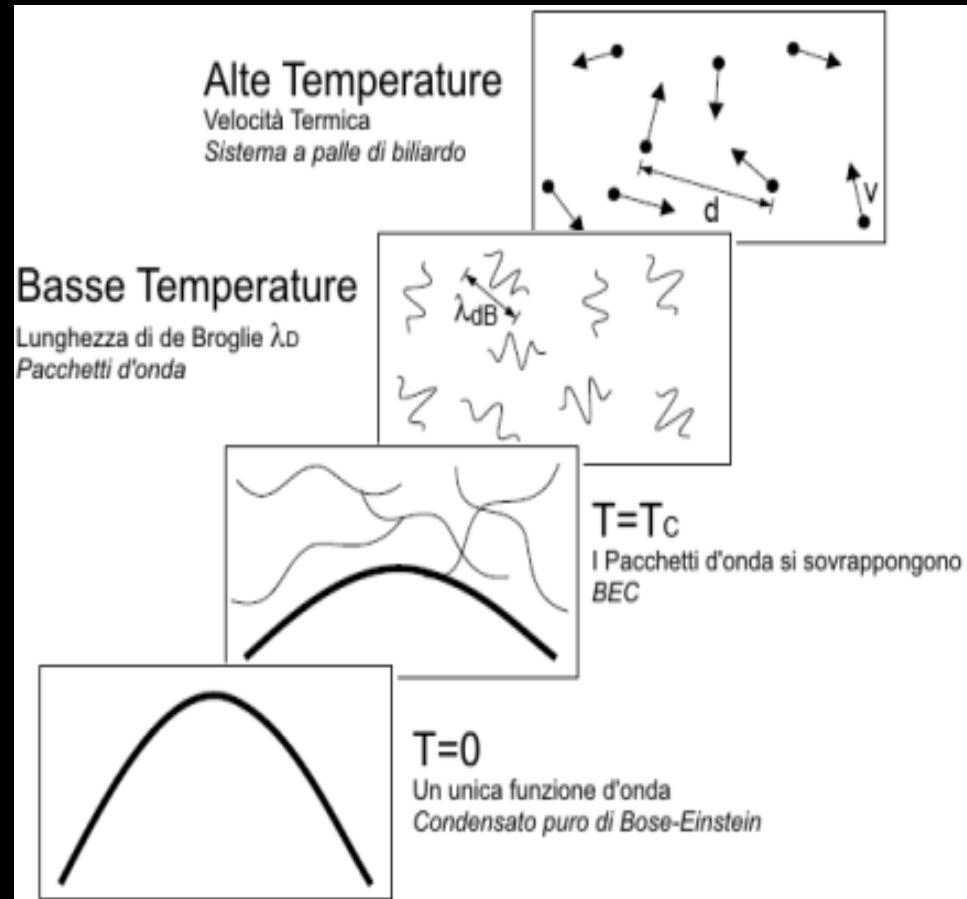
Teoria dei condensati

Ogni particella è caratterizzata dalla sua lunghezza d'onda termica di de Broglie:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{(2\pi mk_B T)^{\frac{1}{2}}}$$

Al diminuire di T si ha una sovrapposizione delle onde di materia.

Si osserva il condensato alla temperatura critica T_c , quando $\lambda \geq d$.



Fasi della condensazione in funzione di T

La realizzazione del condensato comincia confinando magneticamente un campione atomico. Tipicamente si adoperano potenziali armonici:

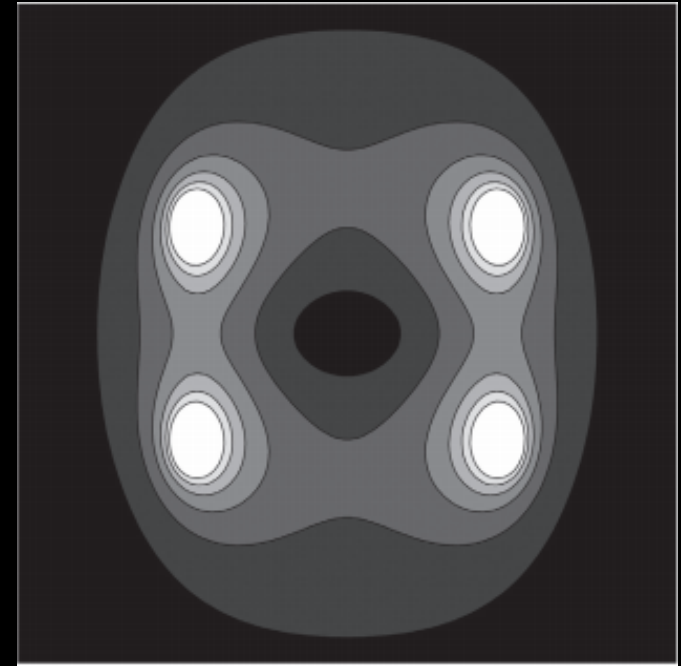
$$V(\vec{r}) = \frac{m}{2} (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2)$$

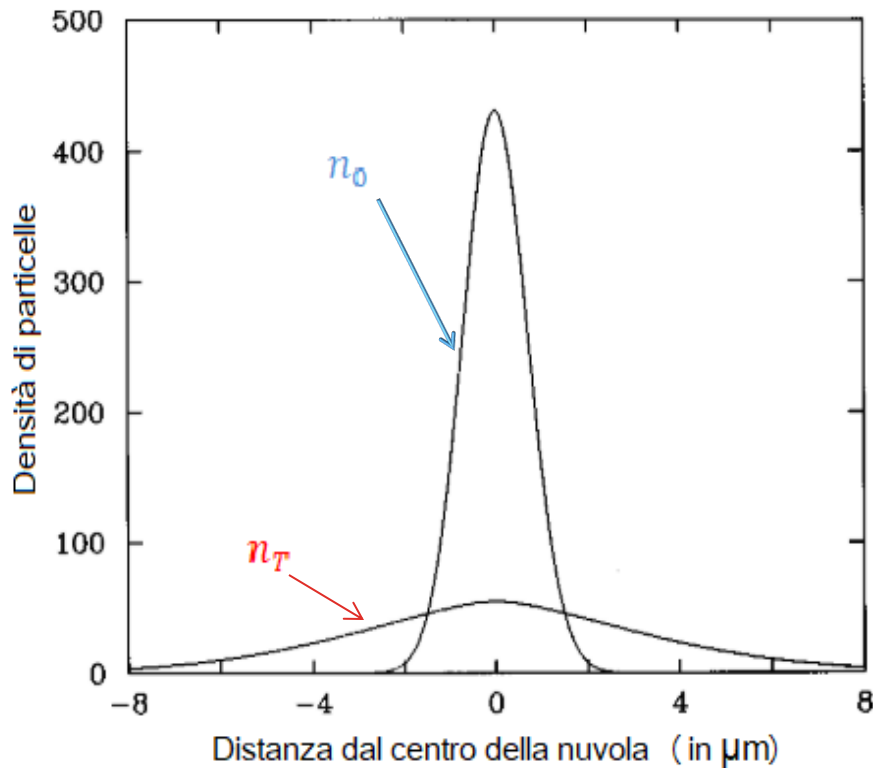
Nell'ipotesi di non interazione tra le particelle, la funzione d'onda dello stato fondamentale del sistema è:

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N) = \prod_{i=1}^N \phi_{i,n_i}(\vec{r}_i); \quad \phi_{i,0}(\vec{r}_i) = \left(\frac{m\omega_{ho}}{\pi\hbar}\right)^{\frac{3}{4}} \exp\left[-\frac{m}{2\hbar}(\omega_x x_i^2 + \omega_y y_i^2 + \omega_z z_i^2)\right]$$

Le dimensioni della nuvola atomica sono fissate dalla lunghezza caratteristica dell'oscillatore:

$$a_{ho} = \left(\frac{\hbar}{m\omega_{ho}}\right)^{\frac{1}{2}}$$





A qualunque temperatura $T > 0$ si hanno due componenti nel campione, la frazione condensata n_0 e la frazione distribuita termicamente n_T .

Frazione non condensata:

$$n_T = N - n_0 = \zeta(3) \left(\frac{k_B T}{\hbar \omega_{ho}} \right)^3$$

Temperatura critica:

$$k_B T_C^0 = \hbar \omega_{ho} \left(\frac{N}{\zeta(3)} \right)^{1/3} = 0.94 \hbar \omega_{ho} N^{1/3}$$

Frazione di particelle condensate:

$$\frac{n_0}{N} = 1 - \left(\frac{T}{T_C^0} \right)^3$$

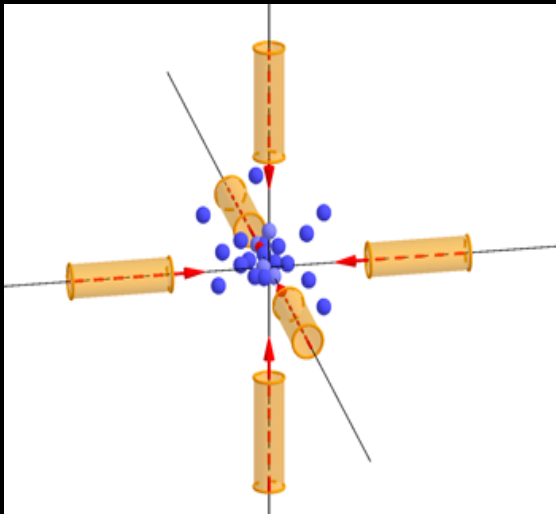
Panoramica tecniche sperimentali ⁸

Raffreddamento laser

Limite Doppler:

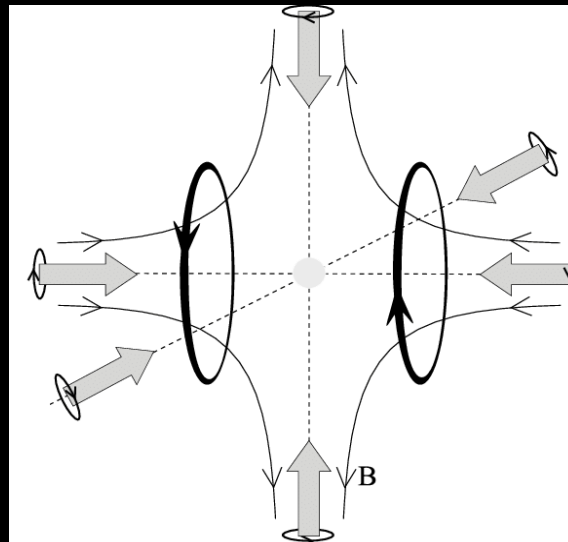
$$k_B T_D = \hbar \frac{\Gamma}{2}$$

Temperature minime dell'ordine dei 100 μ K.



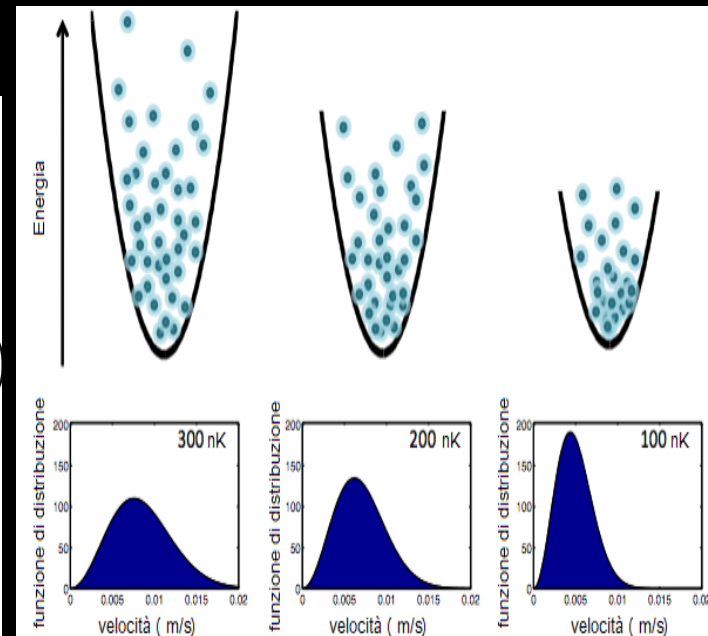
Trappole magneto-ottiche

Potenziale di confinamento approssimabile ad un potenziale armonico.

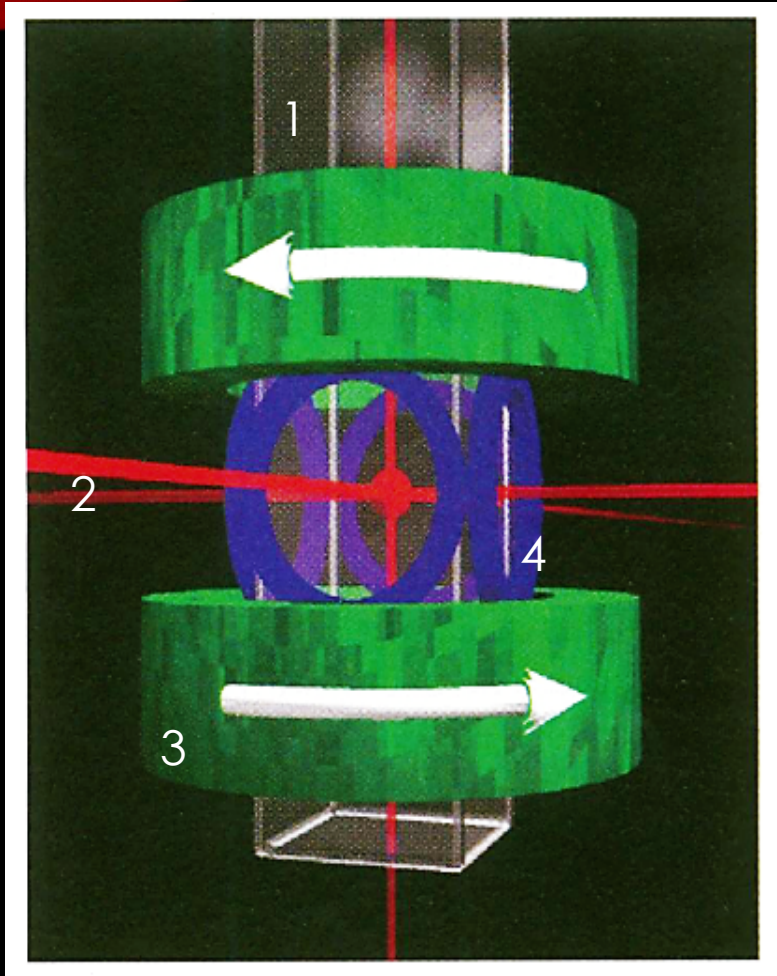


Raffreddamento evaporativo

Termalizzazione per collisioni. Temperature minime dell'ordine dei 100 nK.



Condensato di B-E in atomi di rubidio-87

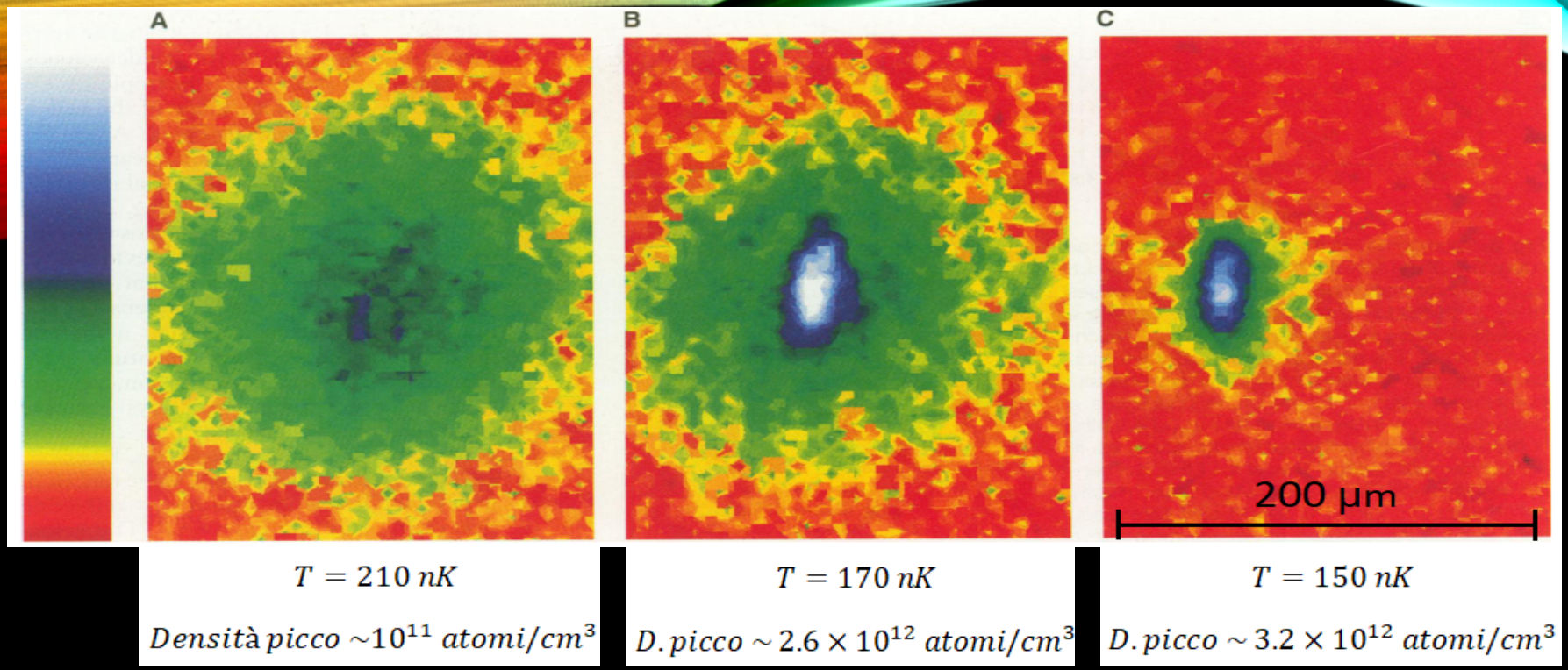


1995: *l'annus mirabilis*.

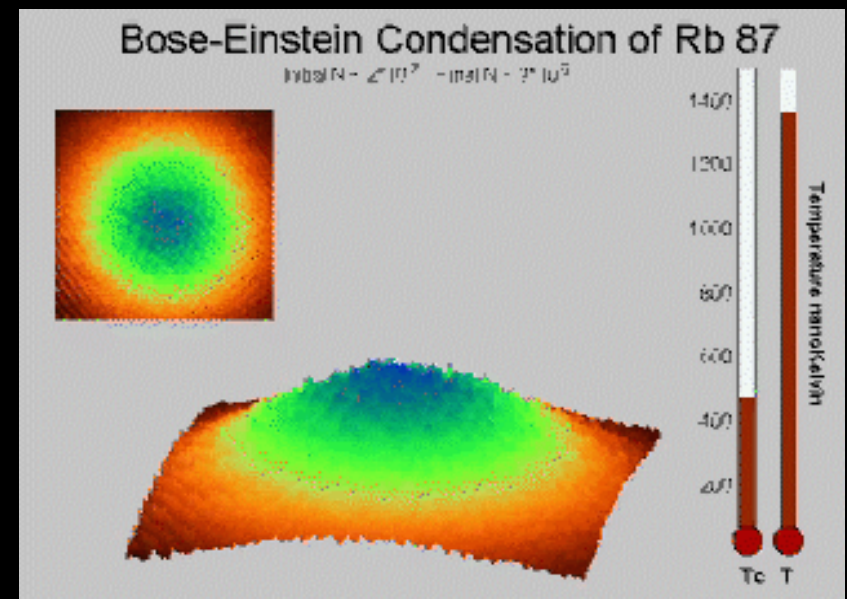
Schema dell'apparato usato nei laboratori NIST-JILA [2]:

1. Cella di vetro per il vuoto ultra-alto di $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$;
2. Tre coppie di laser contro-propaganti a 780 nm di 1.5 cm di diametro;
3. Spire anti-Helmoltz (in verde);
4. Spire per il campo magnetico trasverso rotante a 7.5 MHz (in blu).

[2] Anderson M. H. e altri; "Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor", *Science* **269**, 5221 (1995).



Distribuzione di velocità degli atomi nel campione: (A) subito prima dell'apparizione del condensato, (B) subito dopo la formazione (C) dopo che un'ulteriore fase di raffreddamento evaporativo ha lasciato un campione di condensato quasi puro.

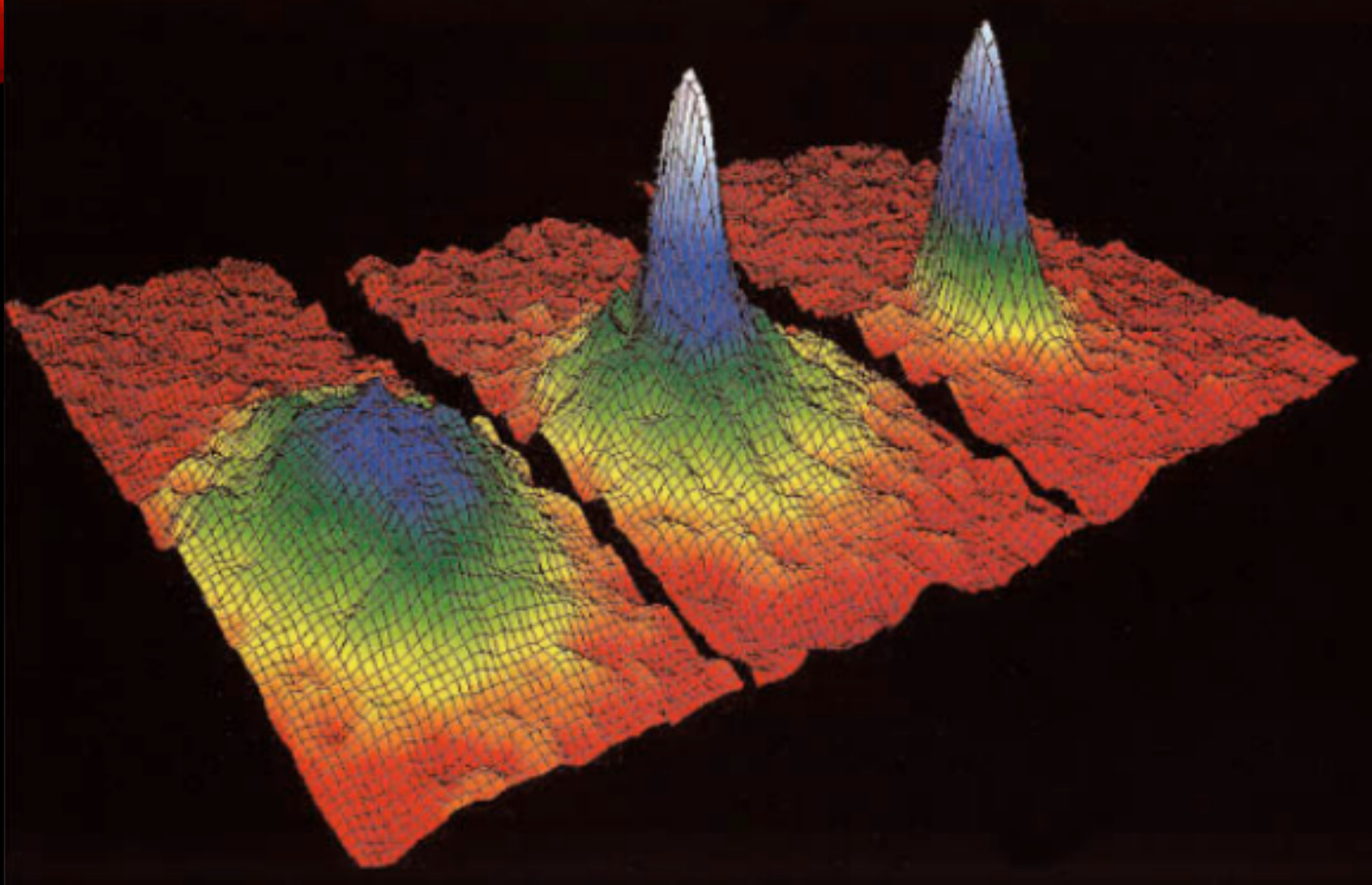


Conclusioni

La realizzazione della condensazione di Bose-Einstein è da considerarsi come una delle principali conquiste della fisica sperimentale degli ultimi 25 anni.

La scoperta si afferma come ulteriore importante conferma della teoria dei quanti, consentendo di raggiungere un grado di comprensione senza precedenti sul comportamento di sistemi bosonici a temperature ultra-basse.

I significativi e continui sviluppi tecnologici danno oggi la possibilità di esplorare la fisica criogenica con crescente chiarezza e capacità di manipolazione delle condizioni sperimentali, stimolando l'interesse per la ricerca a livello internazionale.



Grazie per l'attenzione.