

La fisica degli atomi ultrafreddi: principi ed applicazioni

Markus Cirone

Palermo, 21 Maggio 2009

- Termodinamica
- Livelli energetici atomici
- *Laser cooling*: principi
- *Evaporative cooling*: principi
- Applicazioni:
 - Test dei fondamenti della meccanica quantistica
 - Misure di precisione
 - Creazione di stati “esotici” di materia
 - *Quantum Simulators - Quantum Information*

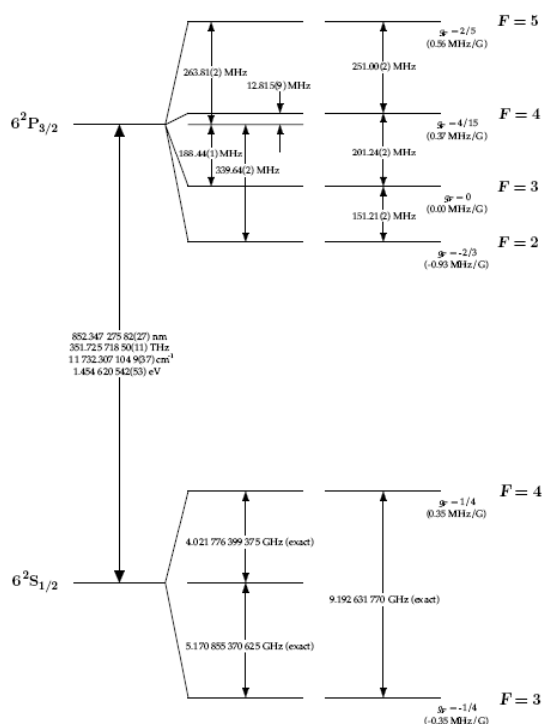
Termodinamica - 1

- I principi della termodinamica:
 - Due sistemi messi a contatto finiscono per raggiungere la stessa temperatura (**principio zero**)
 - Il calore è una forma di energia (**primo principio**)
 - Il calore è una forma di energia meno nobile delle altre (**secondo principio**)
 - Non è possibile raggiungere lo zero assoluto (**terzo principio**)

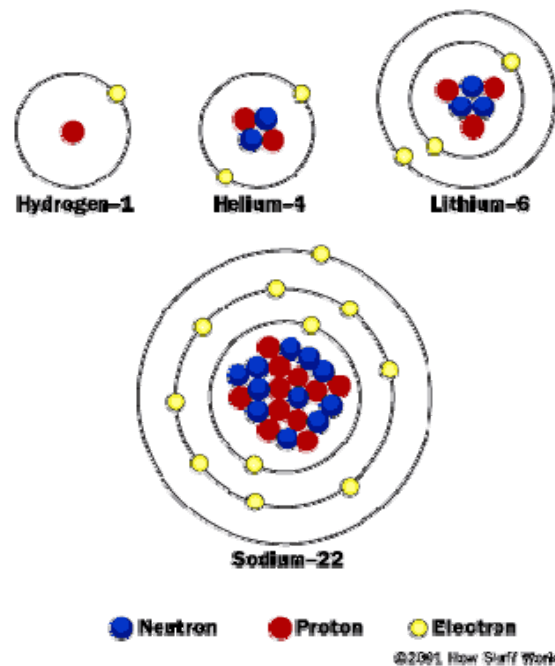
Termodinamica - 2

- Il principale meccanismo di raffreddamento di un corpo avente temperatura T si basa sul principio zero della termodinamica
- La temperatura della radiazione di fondo dell'universo è di circa 3 K
- Temperature minori di 3 K sono difficilmente presenti nell'universo
- Raggiungere temperature minori di 3 K in laboratorio richiede uno sforzo particolare, ma porta alla scoperta di fenomeni nuovi e insoliti

Livelli energetici - 1

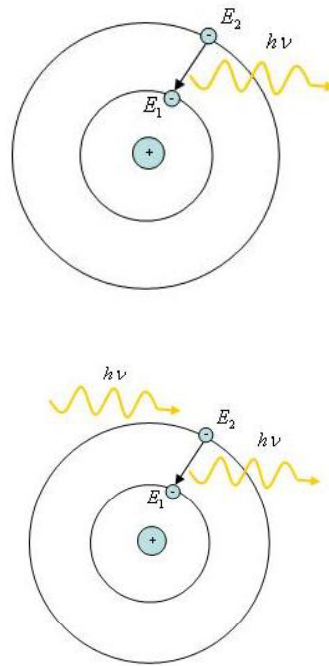


Isotopes of Hydrogen, Helium, Lithium and Sodium



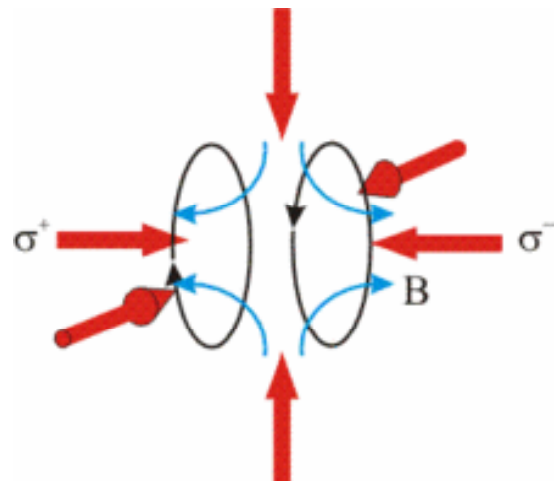
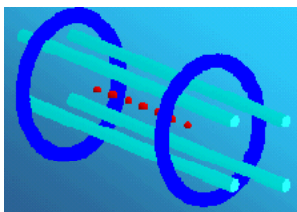
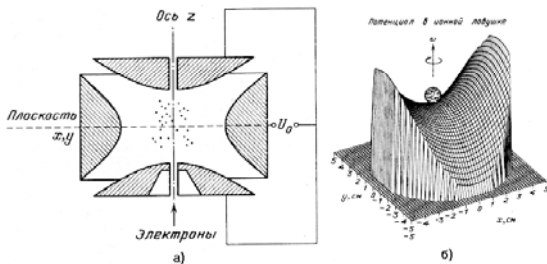
Livelli energetici - 2

- La transizione da livelli di energia maggiore a quelli di energia minore (decadimento) avviene per
 - **Emissione spontanea**
 - **Emissione stimolata**
- La transizione inversa (assorbimento) è solo **stimolata**
- La frequenza della luce assorbita o emessa dipende dalle energie dei livelli atomici coinvolti



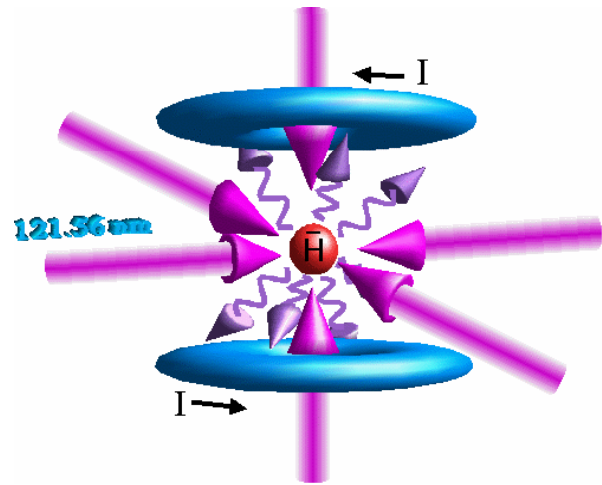
Intrappolamento di atomi

- Per atomi carichi (ioni) si sfruttano campi statici e oscillanti
- Per atomi neutri si usano campi magnetici e fasci laser



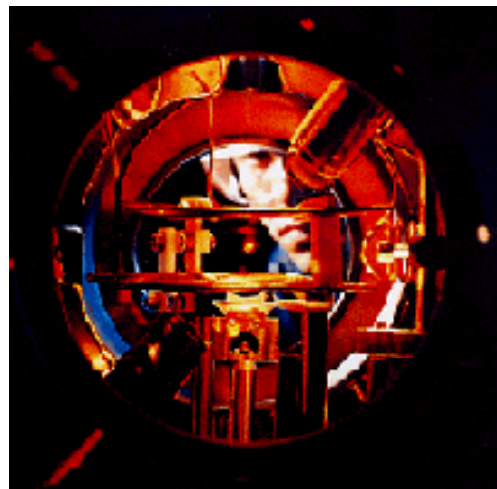
Laser cooling - 1

- Fasci laser di frequenza opportuna (quasi risonante) sono diretti sull'atomo in moto
- La frequenza vista dall'atomo è più alta quando va incontro alla radiazione e più bassa quando se ne allontana (effetto Doppler)



Laser cooling - 2

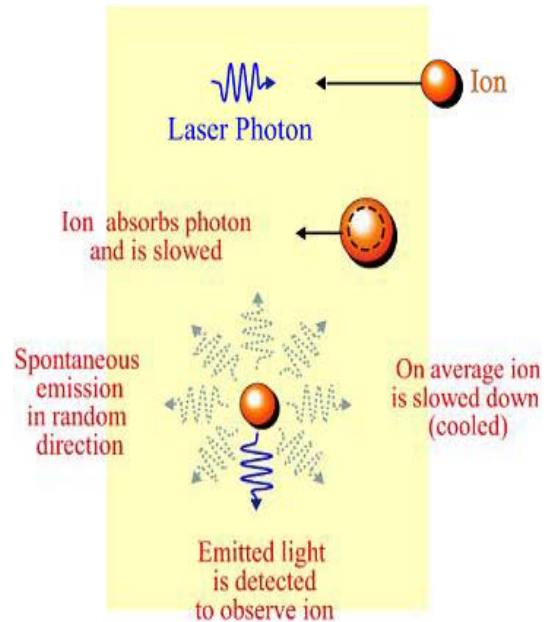
- L'energia persa dall'atomo nel processo di emissione è maggiore di quella acquisita nel processo di assorbimento.
- L'energia in più viene dall'energia cinetica dell'atomo, che dunque rallenta e si raffredda.



Laser cooling – Limite di diffusione

- I fotoni assorbiti hanno tutti la stessa quantità di moto
- I fotoni emessi hanno direzione casuale (rinculo atomico casuale, diffusivo come il moto browniano)
- In media, la velocità dell'atomo diminuisce; funziona fino al limite di diffusione

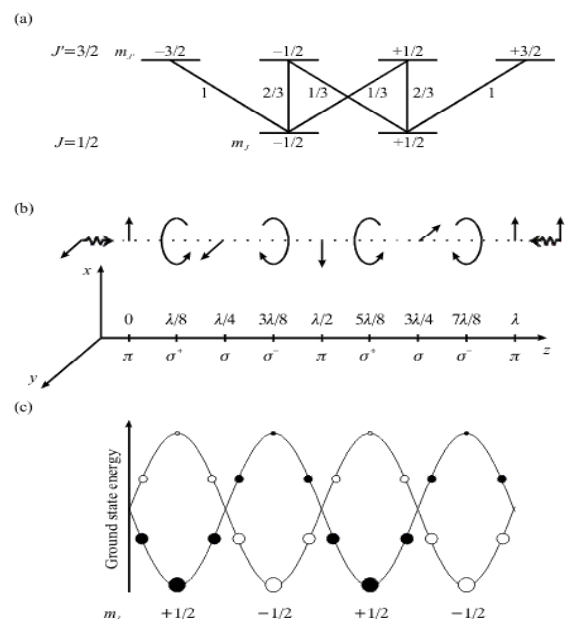
$$T_D = \hbar / (2k_B \tau) \sim 200 \mu\text{K}$$



Laser cooling – Limite di rinculo

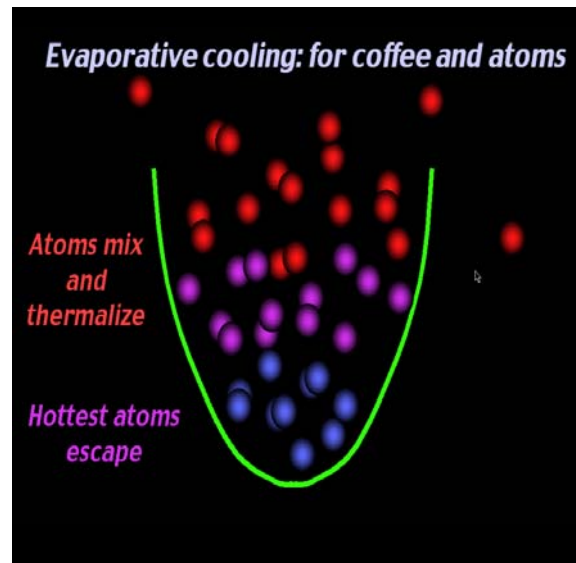
- All'inizio degli anni '90 sono stati registrati i primi casi di raffreddamento sub-Doppler
- La spiegazione sta nella complessità dei livelli energetici (molti livelli coinvolti)
- Premi Nobel 1997: Claude Cohen-Tannoudji, Steve Chu, Bill Phillips
- Limite di rinculo:

$$T_R = \hbar^2 / (mk_B \lambda^2) \sim 1 \mu\text{K}$$



Evaporative cooling

- Il raffreddamento per evaporazione è una tecnica diversa dal laser cooling.
- Avviene in trappole magnetiche, dove solo alcuni stati atomici restano intrappolati
- Con impulsi rf si cambia stato agli atomi più caldi che vanno via (evaporano)
- Si raggiungono temperature dell'ordine di **10 nK**



Applicazioni – Stati quantistici

- “Spesso negli esperimenti pensati assumiamo di condurre esperimenti su un singolo atomo, il che comporta conseguenze ridicole; è bene quindi affermare che non possiamo fare esperimenti con singoli atomi, così come non possiamo allevare dinosauri negli zoo” E. Schrödinger, 1952
- A fine anni ‘70 sono stati realizzati esperimenti con singoli atomi intrappolati.
- Negli anni ‘90 sono stati realizzati stati atomici fortemente quantistici (stato fondamentale o. a., stati “squeezed”, “gatti di Schrödinger”, ecc.)

Applicazioni – Misure di precisione

- Gli atomi ultrafreddi sono ideali per misurare con precisione i loro parametri fisici fondamentali (frequenze di transizione, momenti magnetici, durata di intervalli temporali, ecc.)

Coherence in Microchip Traps

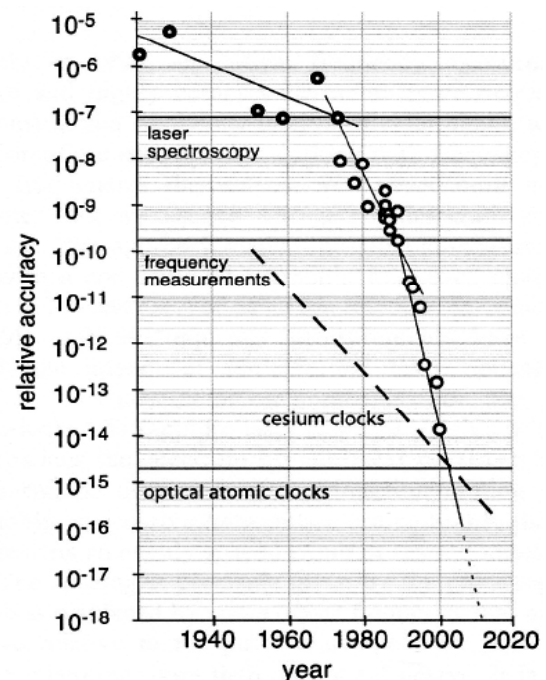
Philipp Treutlein,* Peter Hommelhoff,† Tilo Steinmetz, Theodor W. Hänsch, and Jakob Reichel
*Max-Planck-Institut für Quantenoptik und Sektion Physik der Ludwig-Maximilians-Universität,
Schellingstr. 4, 80799 München, Germany*

(Received 27 November 2003; published 21 May 2004)

We report the coherent manipulation of internal states of neutral atoms in a magnetic microchip trap. Coherence lifetimes exceeding 1 s are observed with atoms at distances of 5–130 μm from the microchip surface. The coherence lifetime in the chip trap is independent of atom-surface distance within our measurement accuracy and agrees well with the results of similar measurements in macroscopic magnetic traps. Because of the absence of surface-induced decoherence, a miniaturized atomic clock with a relative stability in the 10^{-13} range can be realized. For applications in quantum information processing, we propose to use microwave near fields in the proximity of chip wires to create potentials that depend on the internal state of the atoms.

Applicazioni – Misure di precisione

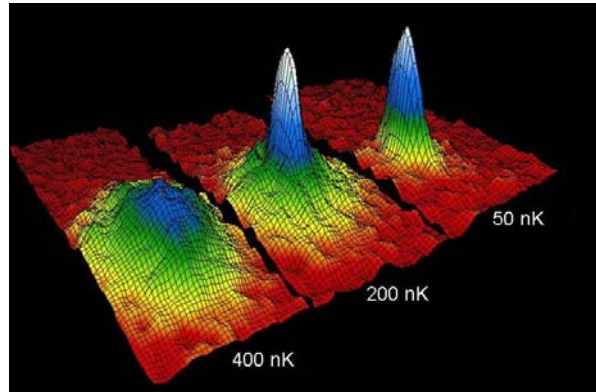
- Misure precise sono richieste per definire gli standard e unità di misura e testare teorie cosmologiche
- Misure precise sono sempre più necessarie nella tecnologia moderna (e.g., GPS)
- Premi Nobel 2005: J. Hall, T. W. Hänsch



Applicazioni – Stati “esotici” - 1

- Nel 1995 sono stati realizzati i primi “condensati di Bose-Einstein” (BEC), uno stato della materia previsto teoricamente nel 1925. In un BEC tutti gli atomi hanno la stessa funzione d’onda.
- Premi Nobel 2001: E. Cornell, C. Wieman, W. Ketterle

I condensati sono superfluidi (fluidi privi di attrito)



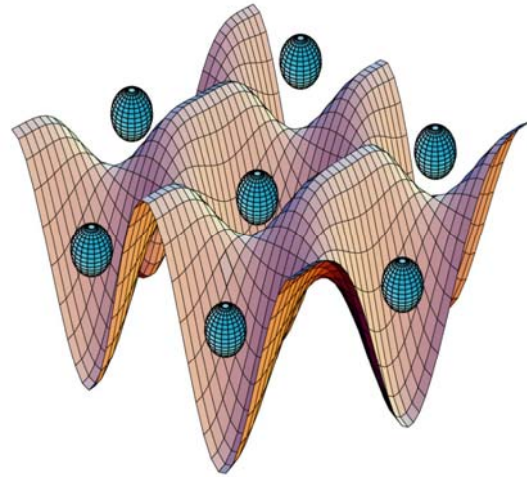
Applicazioni – Stati “esotici” 2

- Nel 2001 è stato ottenuto il primo “gas di Fermi” (analogo del BEC per fermioni).
- Meccanismi di accoppiamento tra fermioni sono alla base della superconduttività
- Coesistenze spaziali di diversi gas di Fermi e BEC promettono “nuova fisica”



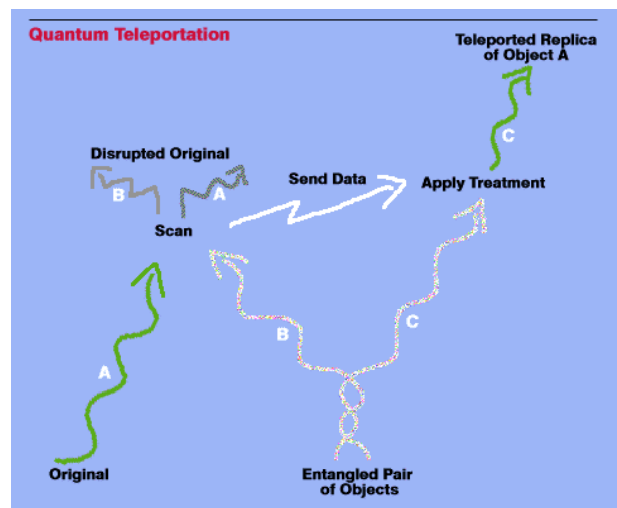
Applicazioni – *Quantum simulators*

- Con i gas ultrafreddi possiamo realizzare sistemi fisici che “simulano” altri sistemi, più difficili da studiare (atomi fermionici in reticolo ottico = elettroni in un reticolo cristallino)
- Sono più controllabili
- Sono più accessibili
- Range di parametri più estesi



Applicazioni – Quantum Information

- La codifica dell'unità di informazione in bit quantistici consente progressi impossibili con bit classici
- Crittografia intrinsecamente sicura
- Nuovi algoritmi intrinsecamente più veloci
- Esperimenti “fantascientifici”: il teletrasporto



Grazie per l'attenzione!