

Come costruire un computer quantistico

Oliver Morsch

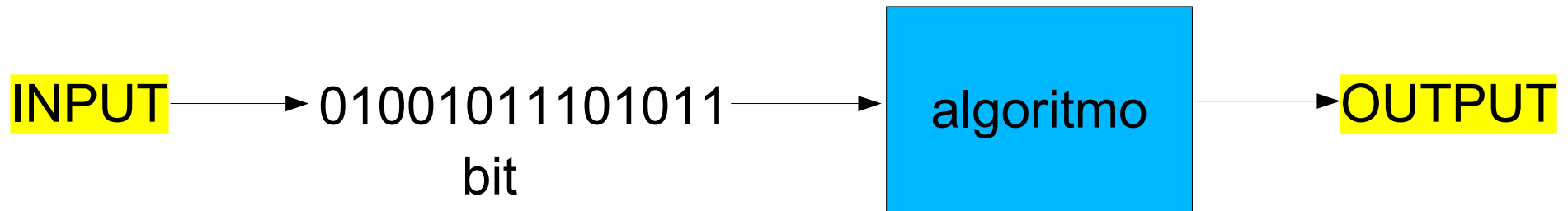
CNR-INFM, Dipartimento di Fisica, Università di Pisa

- **Introduzione:** Fisica quantistica
- **La fisica del c.q.:** La sovrapposizione e gli stati entangled
- **Problemi della realizzazione:** decoerenza; criteri di Di Vincenzo
- **Stato dell'arte:** i sistemi fisici sotto indagine
- **Tre approcci in più dettaglio:** NMR, ioni intrappolati, reticoli ottici
- **Prospettive per il futuro:** quando si potrà comprare un c.q.?

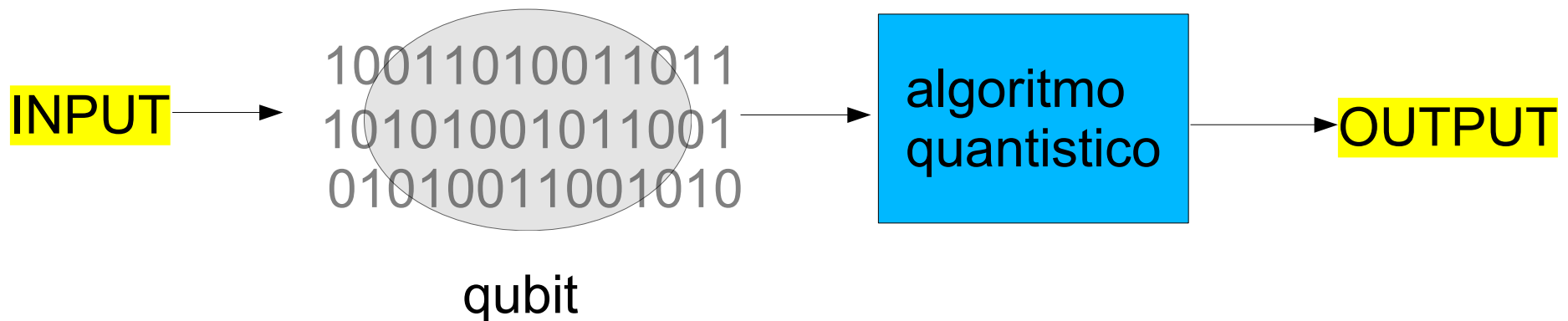
Introduzione:

Cos'è un computer quantistico?

computer classico:



computer quantistico:



Introduzione:

a cosa serve un computer quantistico?

sfruttando il parallelismo quantistico diventano possibili algoritmi efficienti per problemi che con algoritmi classici non si possono risolvere in tempi utili

algoritmo di Shor:

fattorizzazione di numeri;
tempo di calcolo cresce come L^3 anziché $\exp(L^{1/3})$

algoritmo di Grover:

ricerca in un database;
tempo di ricerca cresce come $\sqrt{N}$ anziché $N/2$

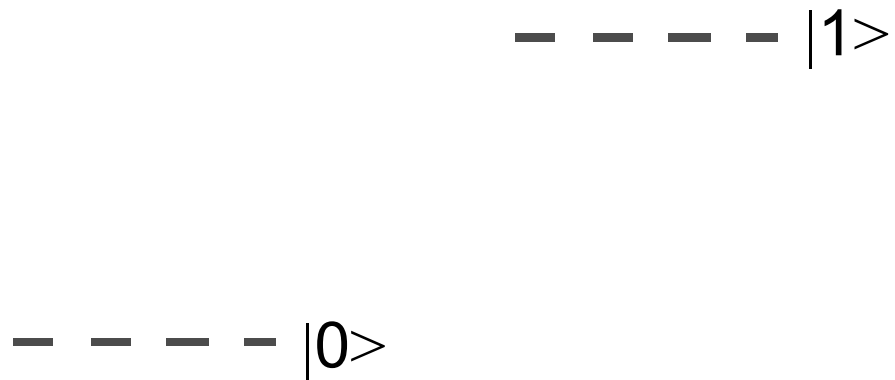
algoritmo di Deutsch-Josza:

decidere se una moneta è truccata;
basta 1 tentativo anziché 2

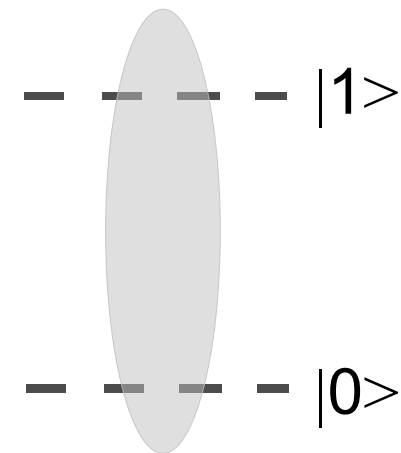
Principi della fisica quantistica

sovrapposizione

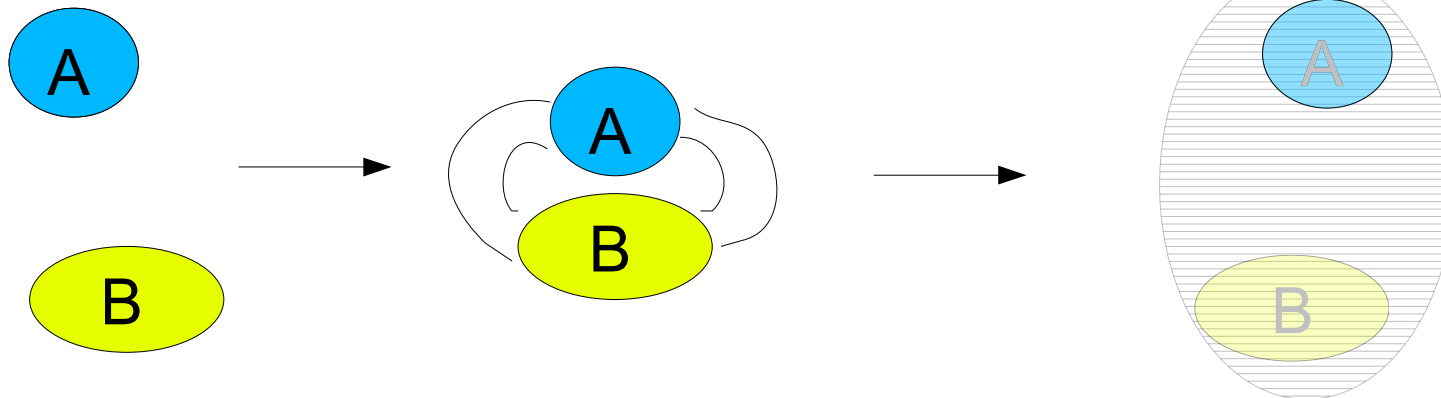
fisica classica



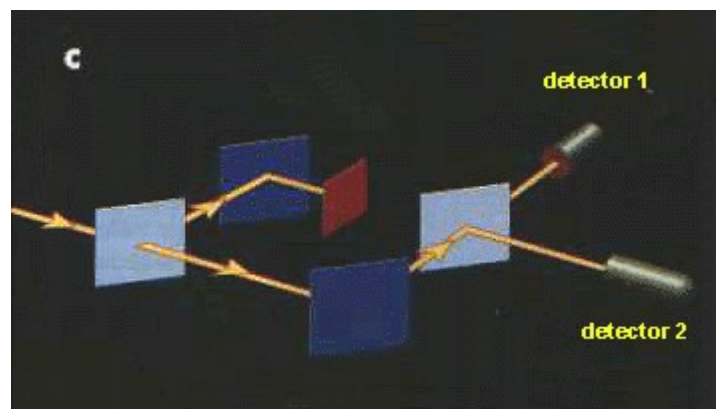
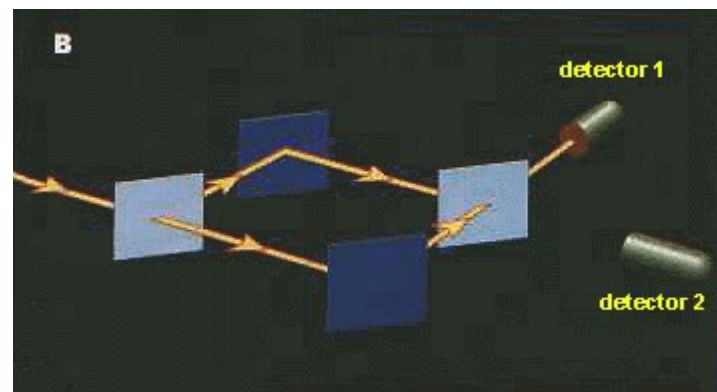
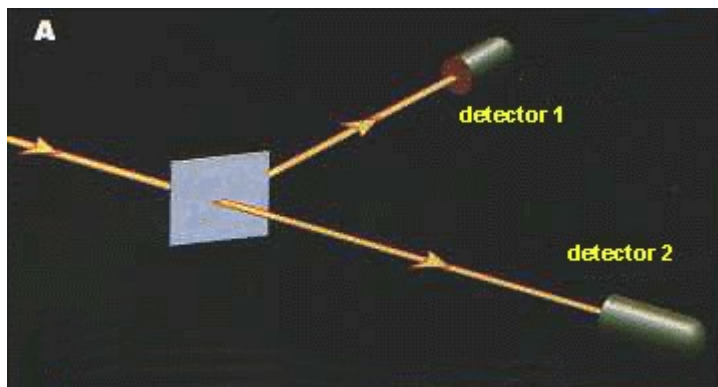
fisica quantistica



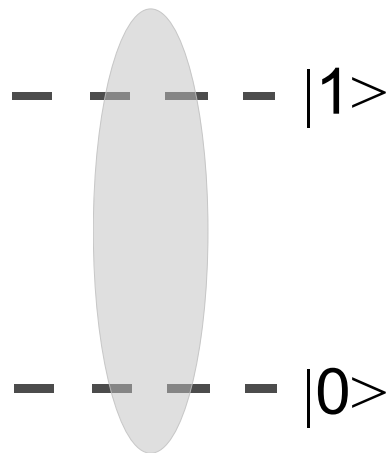
stati entangled



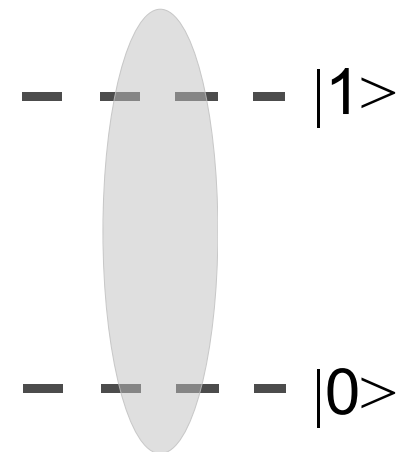
Fisica quantistica: *principio di sovrapposizione*



Problemi della realizzazione: *decoerenza*



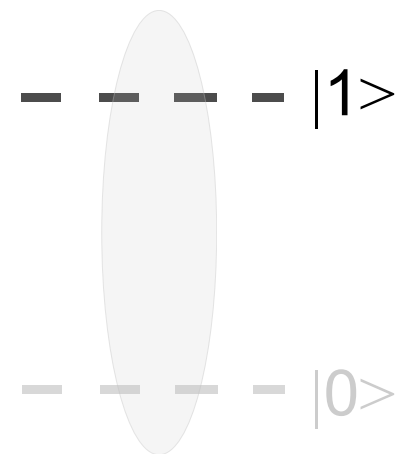
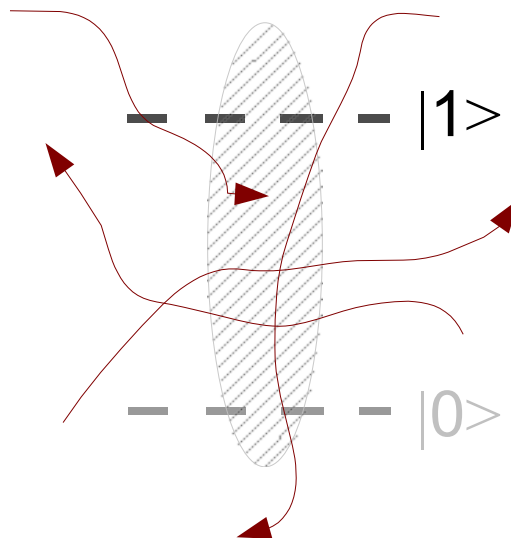
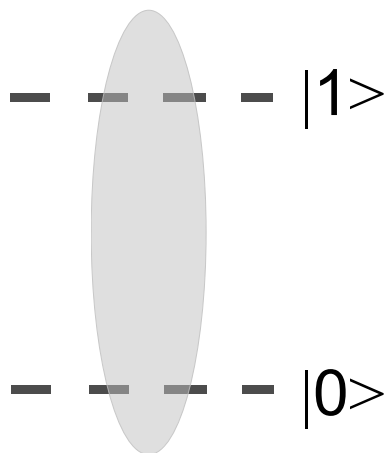
situazione ideale



sovrapposizione degli
stati $|0\rangle$ e $|1\rangle$



evoluzione nel tempo



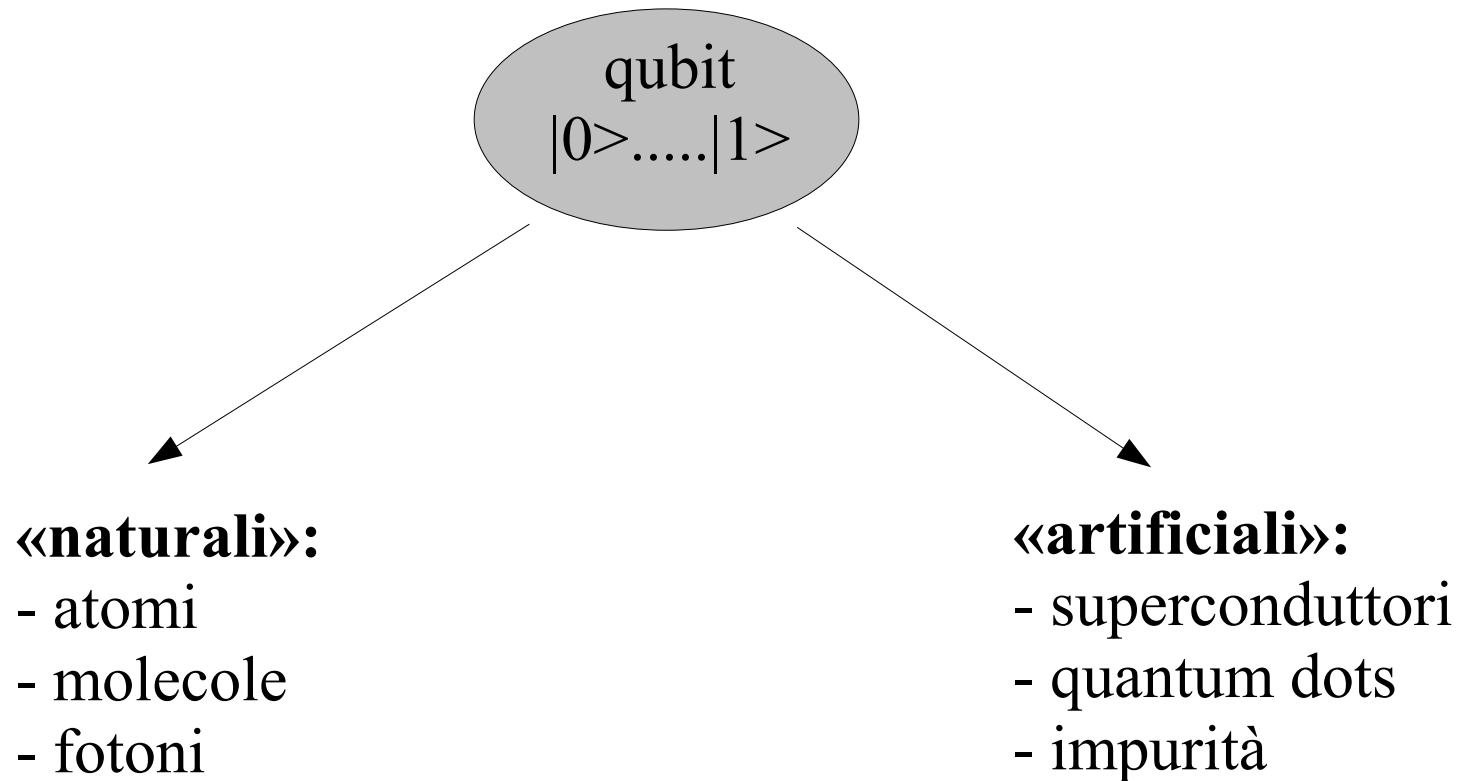
Cosa ci vuole: *I criteri di Di Vincenzo*

- Scalabilità e qubits ben definiti
- Possibilità di inizializzare lo stato dei qubit
- Tempo di coerenza molto maggiore al tempo di un gate
- Un set universale di gates quantistici
- Possibilità di leggere selettivamente i qubits

e in più, per creare reti di computer quantistici:

- possibilità di convertire qubit stazionari in qubit volanti
- possibilità di trasmettere qubit volanti

Qubits «naturali» ed «artificiali»

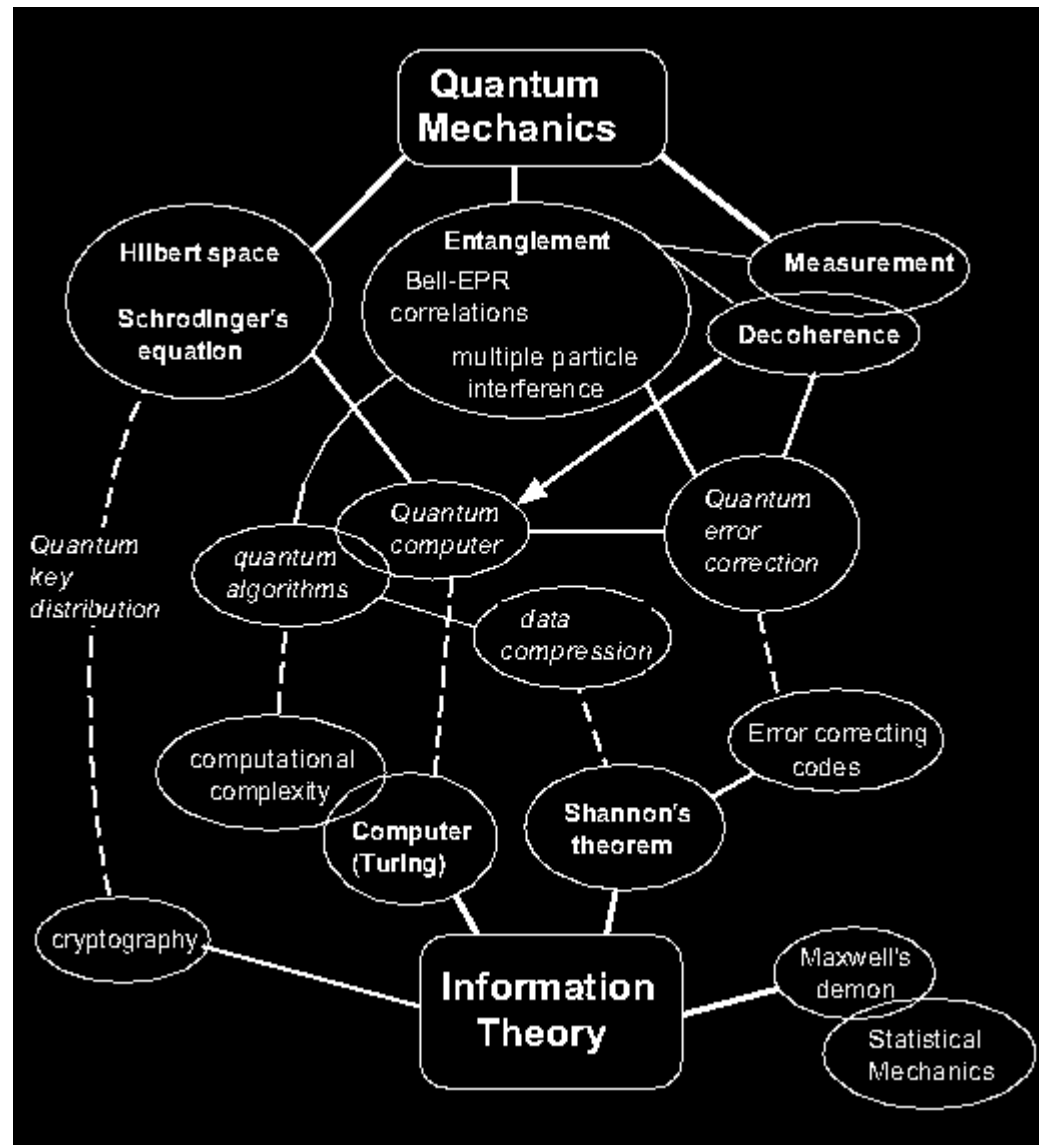


Stato dell'arte:

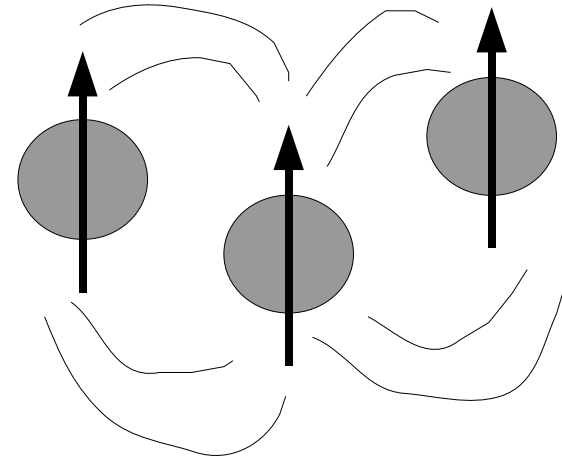
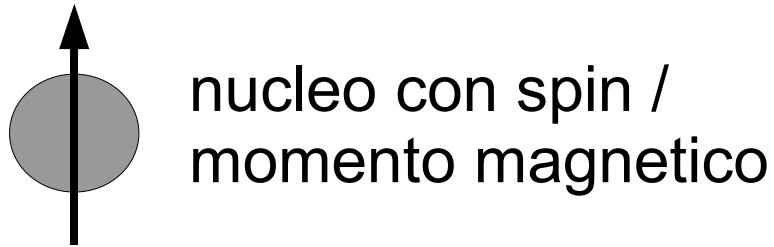
I sistemi fisici sotto indagine

- **NMR (risonanza magnetica):** spin nucleari in una molecola
- **Ioni intrappolati:** stato interno dell'ione
- **Reticoli ottici:** stato interno di atomi dentro un potenziale periodico
- **Cavity QED**
- **Q.C. ottico**
- **Stato solido**
- **Superconduttori**

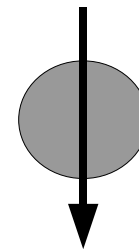
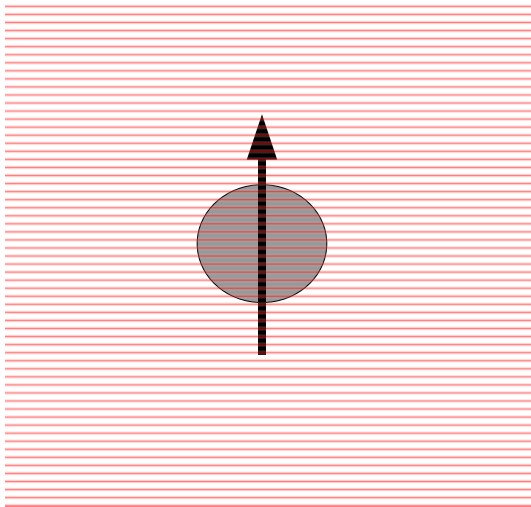
Informatica $\leftrightarrow$ fisica quantistica



NMR (risonanza magnetica)



campo elettromagnetico



questa frequenza
dipende da
interazioni con altri
spin

lo spin cambia direzione per
una frequenza ben definita
del campo elettromagnetico

Computer quantistico NMR

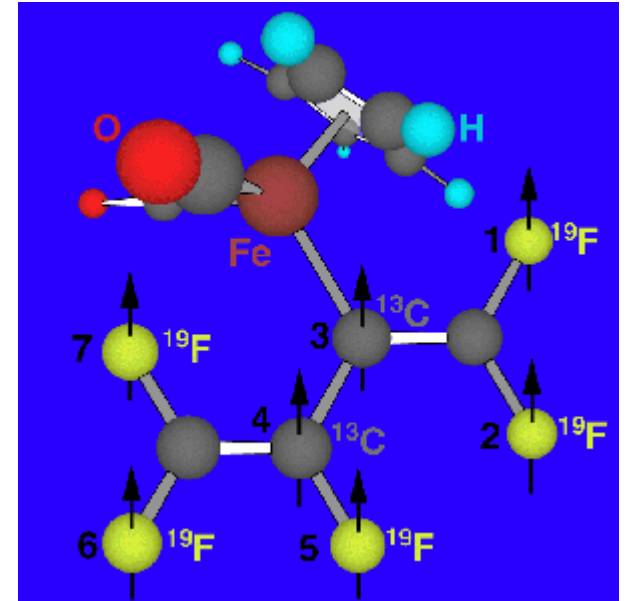
con NMR, si può estrarre l'architettura di una molecola



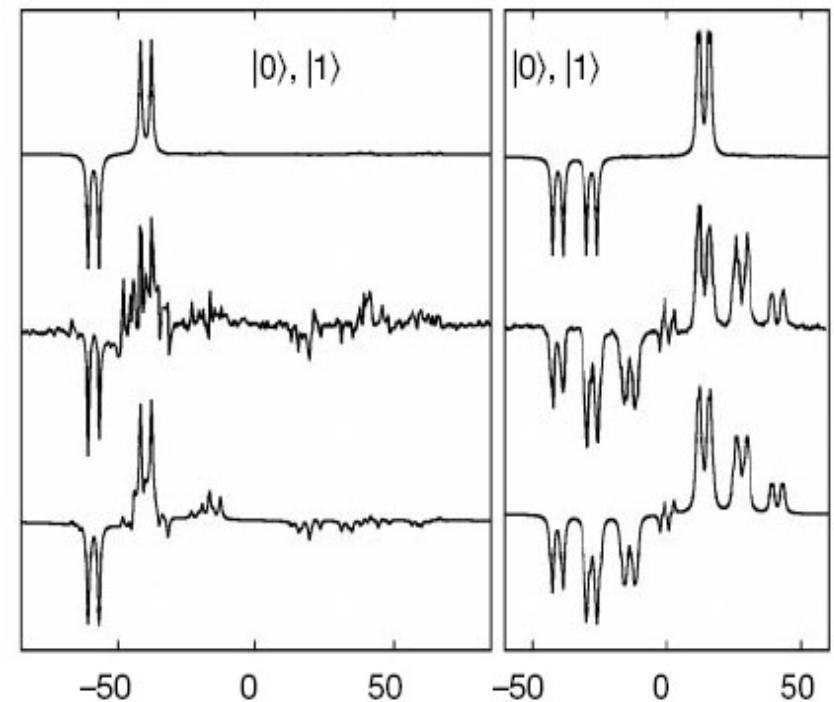
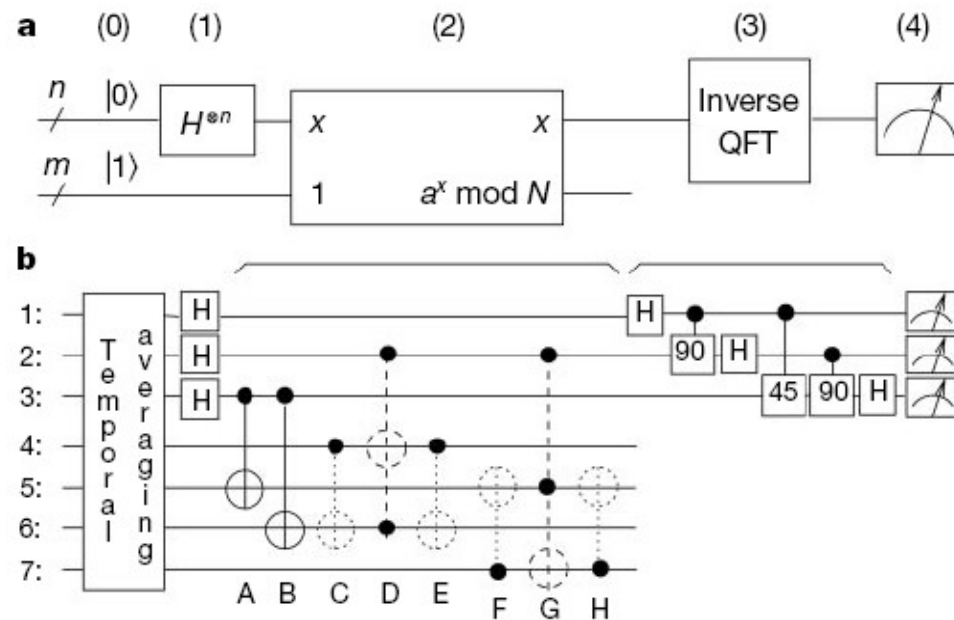
conoscendo l'architettura della molecola, con NMR si può agire in maniera controllata sui suoi spin



agendo sugli spin e sfruttando le loro interazioni, si può inizializzare un registro e si possono applicare dei gates



Computer quantistico NMR



Computazione quantistica con ioni: *la proposta di Cirac e Zoller (1995)*

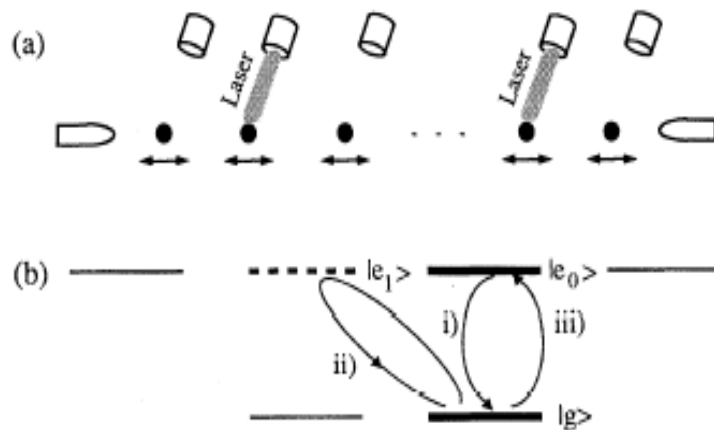


FIG. 1. (a) N ions in a linear trap interacting with N different laser beams; (b) atomic level scheme.

In this Letter we show that a set of N cold ions interacting with laser light and moving in a linear trap [7] provides a realistic physical system to implement a quantum computer. The distinctive features of this system are (i) it allows the implementation of n -bit quantum gates between any set of (not necessarily neighboring) ions, (ii) decoherence can be made negligible during the whole computation, and (iii) the final readout can be performed with unit efficiency.

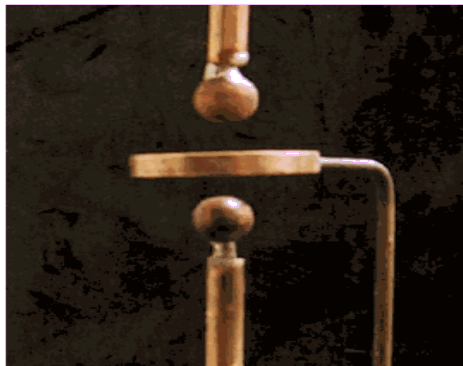
Cenni storici: la trappola di Paul



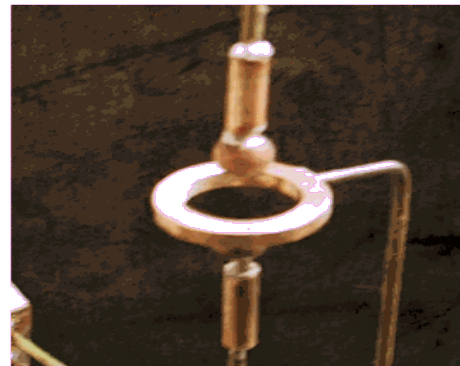
W. Paul 1958: trappola dinamica per ioni; usata per riferimenti stabili di frequenza

The Simple Paul Trap

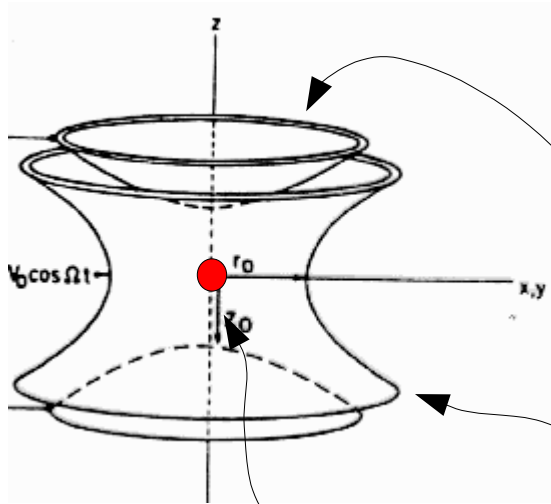
Edge View



One-Quarter Up



Ioni intrappolati: *tecniche*



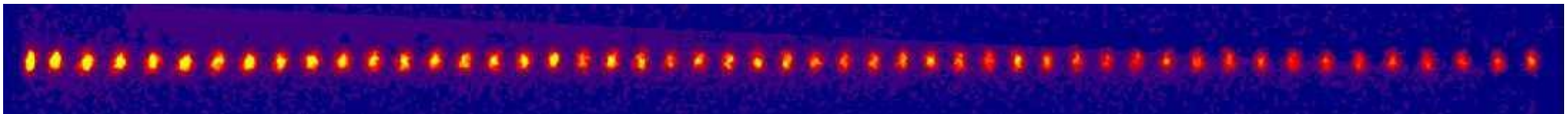
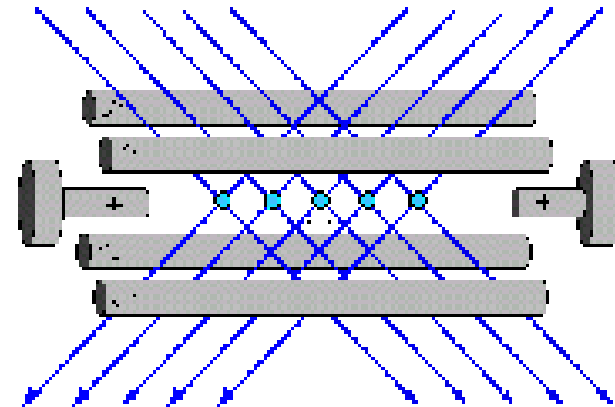
tecnica di base: la trappola di Paul

campi elettrici oscillanti che creano una trappola stabile (“sella ruotante”)

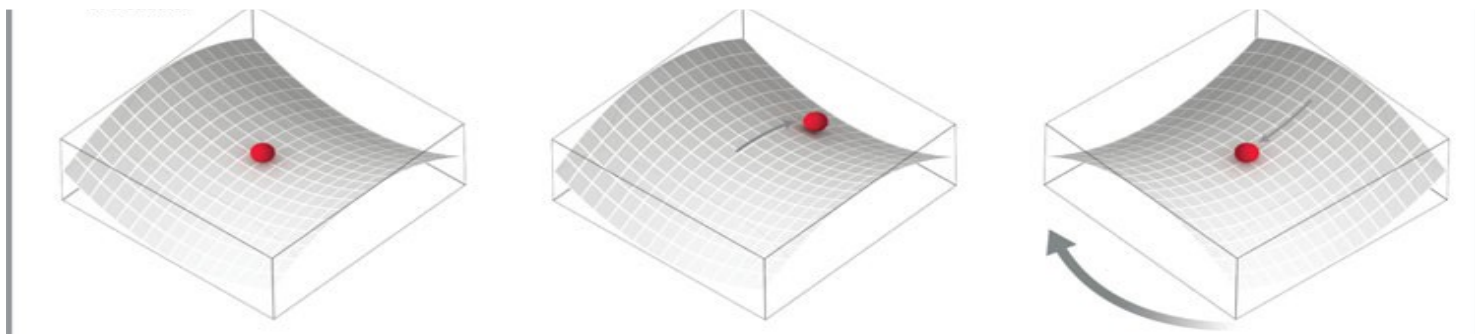
ione intrappolato

trappola di Paul **lineare**

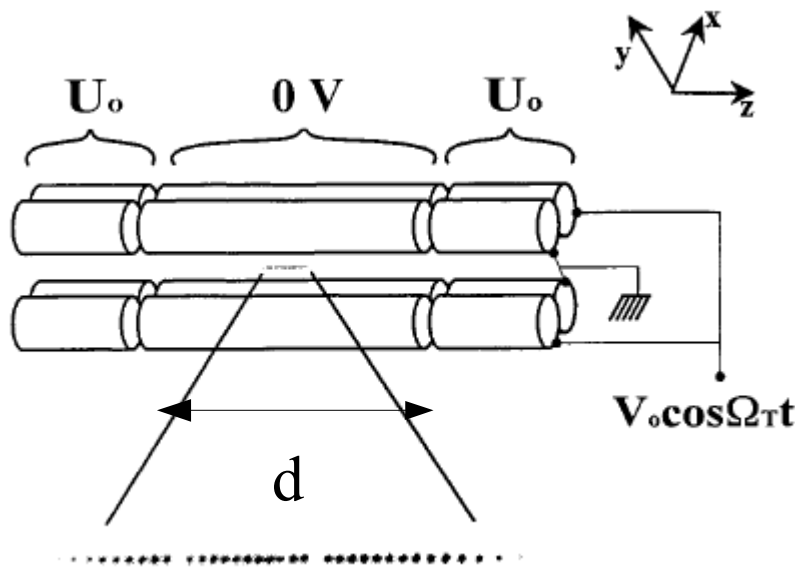
catena di ioni interagenti tramite repulsione di Coulomb



La «sella ruotante»

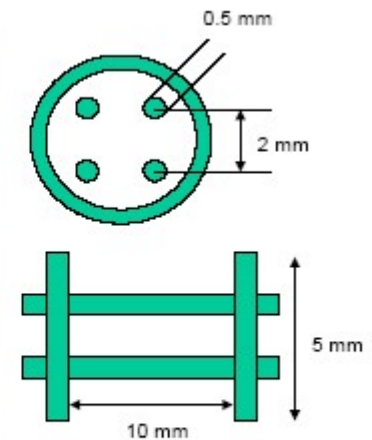
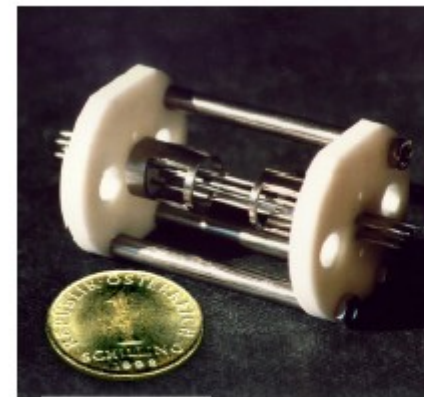


Trappola di Paul: *parametri tipici*

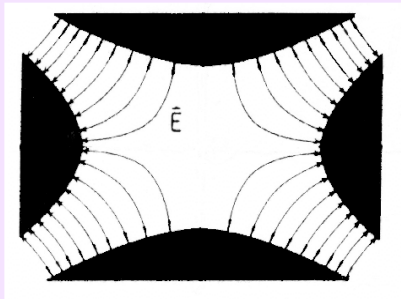


separazione degli elettrodi:
100 micrometri fino a alcuni mm;

campo r.f.: 10-300 Mhz;
 $V_0 \sim 100 \text{ V}$



The Quadrupole Electric Field



$$\kappa \approx 0.05$$

$$\omega_z \approx 700 \text{ kHz}$$

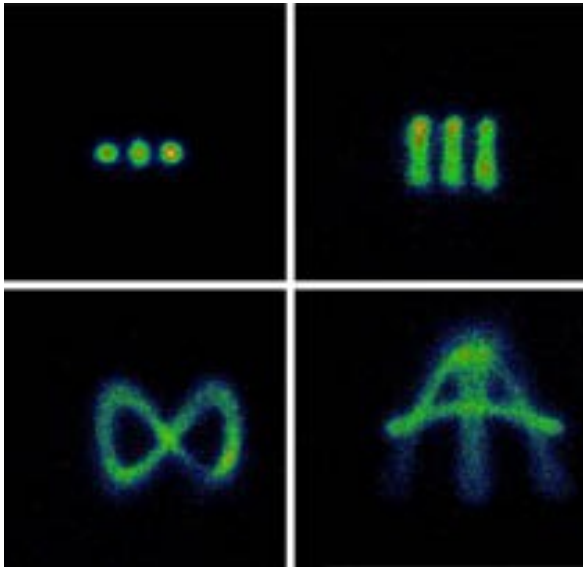
$$\omega_{x,y} \approx 1.2 - 2 \text{ MHz}$$

=> **frequenza radiale di trappola:**
da 100 kHz a 10 Mhz;

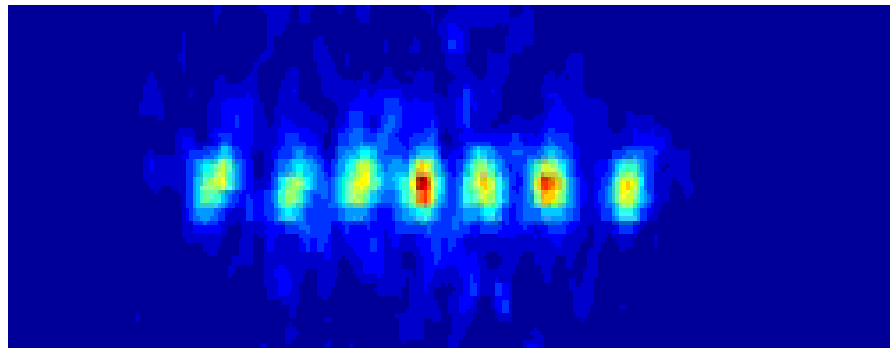
separazione tra due ioni:

1 micrometro fino a 15 micrometri

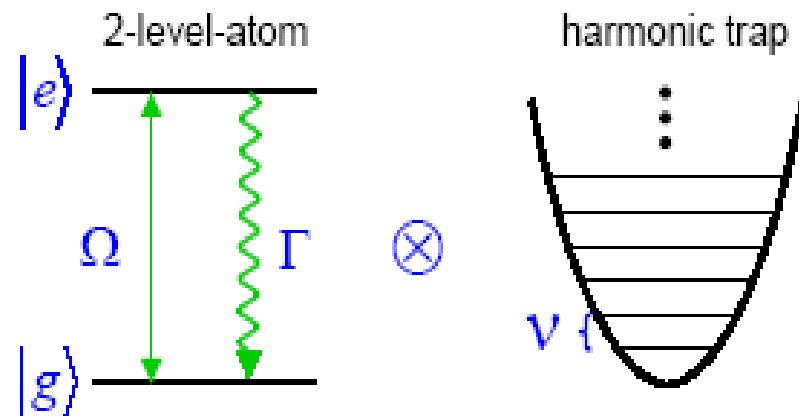
Ioni intrappolati: *tecniche*



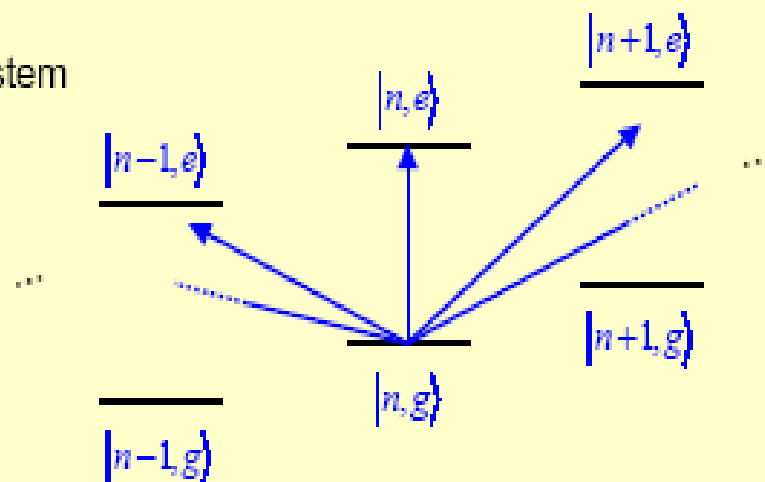
creazione di stati di moto degli ioni ->
stati entangled



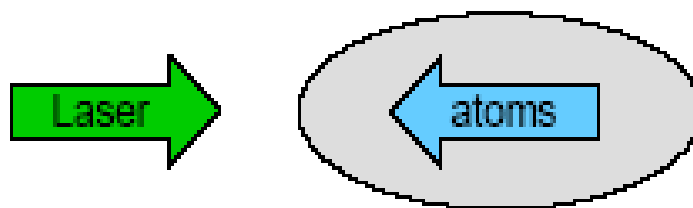
Moto quantistico degli ioni



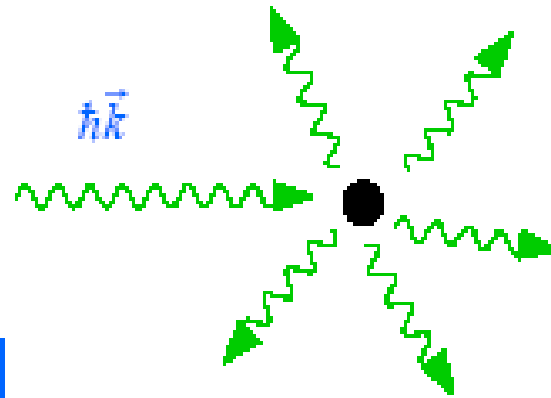
coupled system



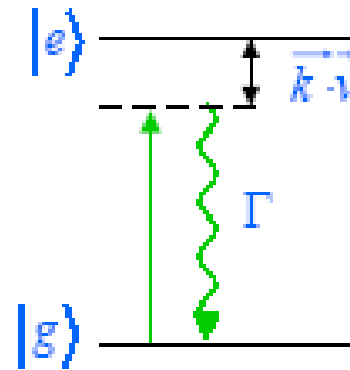
Raffreddamento laser



momentum transfer $\hbar \vec{k}_{abs} - \hbar \vec{k}_{em}$



$$\frac{|\hbar \vec{k}|}{m} = \Delta v \approx 1 \text{ cm/s}$$



$$\Delta \vec{p} = n \hbar \vec{k}_{abs} + \underbrace{\sum \hbar \vec{k}_{em}}_{=0}$$

$$\Delta \vec{p} = \langle n \rangle \hbar \vec{k}_{abs}$$

Doppler cooling limit:

$$E_D = \hbar \frac{\Gamma}{2}$$

Realizzazione del CNOT

VOLUME 75, NUMBER 25

PHYSICAL REVIEW LETTERS

18 DECEMBER 1995

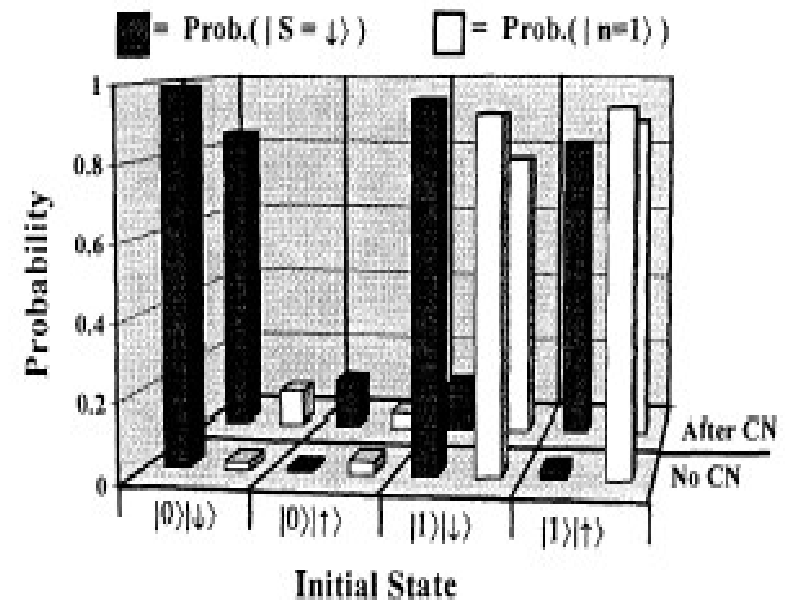
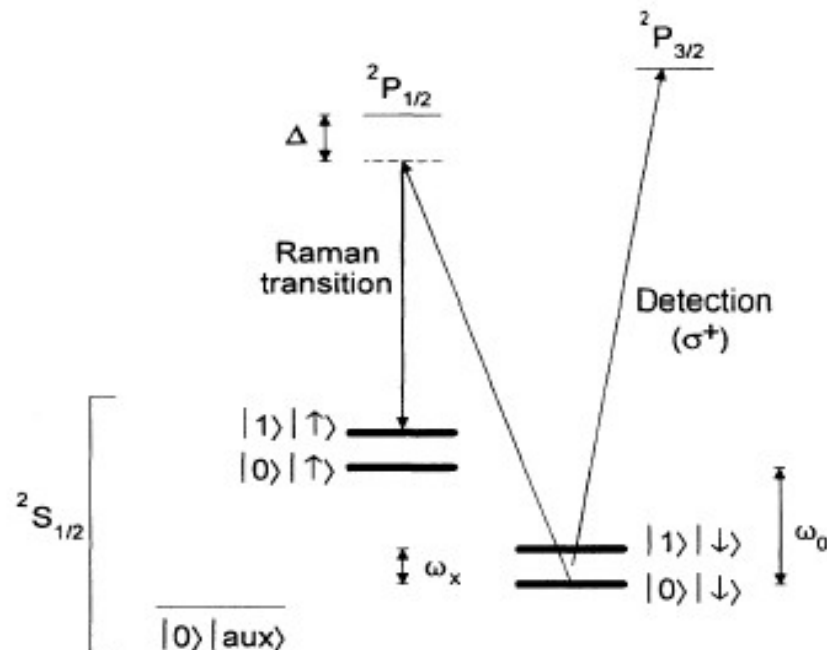
Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate

C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano, and D. J. Wineland

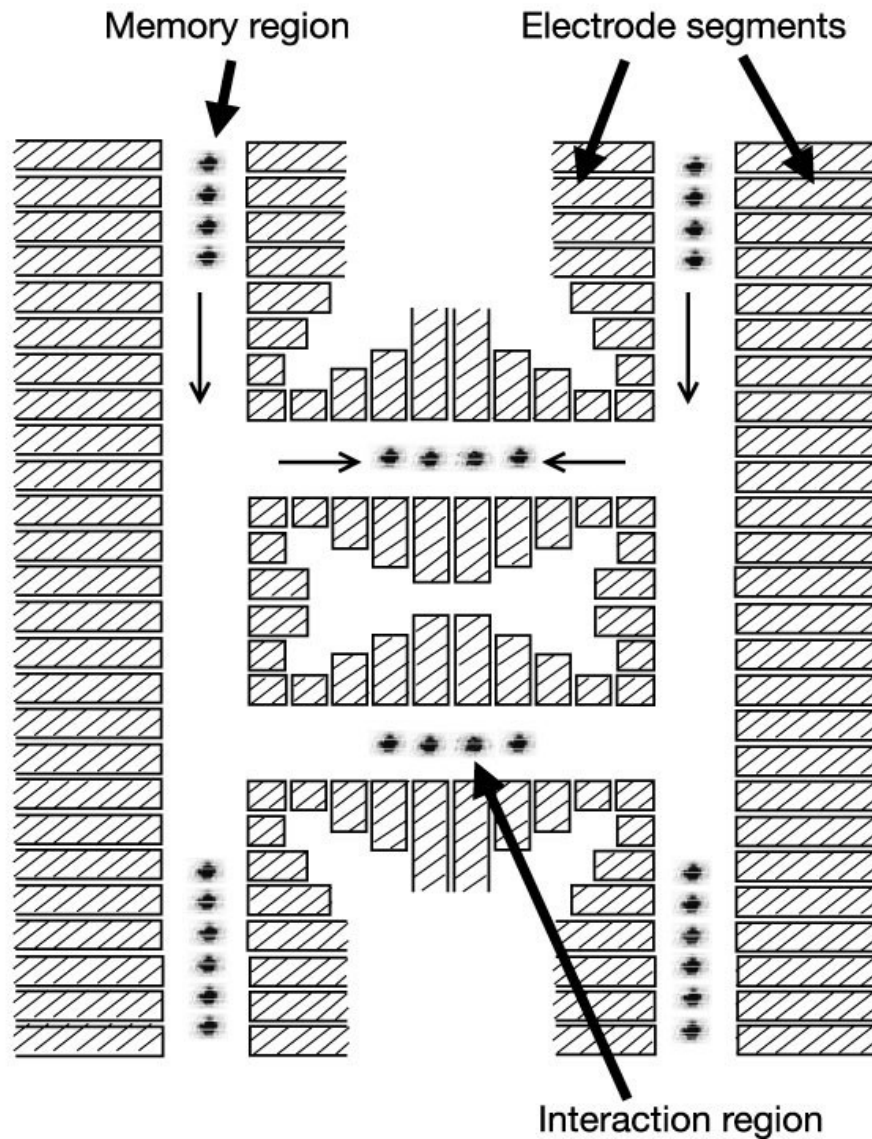
National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80303

(Received 14 July 1995)

We demonstrate the operation of a two-bit “controlled-NOT” quantum logic gate, which, in conjunction with simple single-bit operations, forms a universal quantum logic gate for quantum computation. The two quantum bits are stored in the internal and external degrees of freedom of a single trapped atom, which is first laser cooled to the zero-point energy. Decoherence effects are identified for the operation, and the possibility of extending the system to more qubits appears promising.

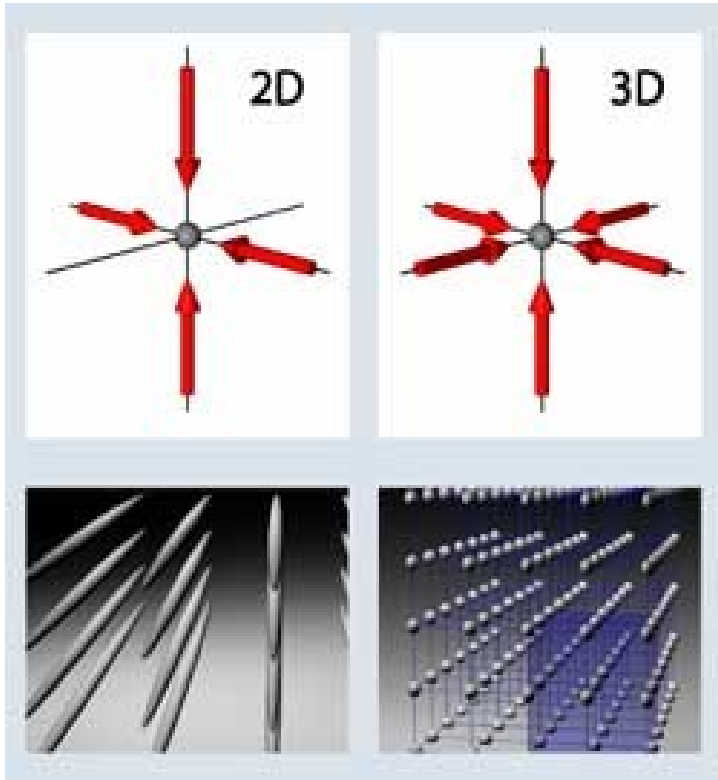


Ioni intrappolati: *tecniche*



Nature **417**, 709

Atomi neutri in reticoli ottici



vantaggi:

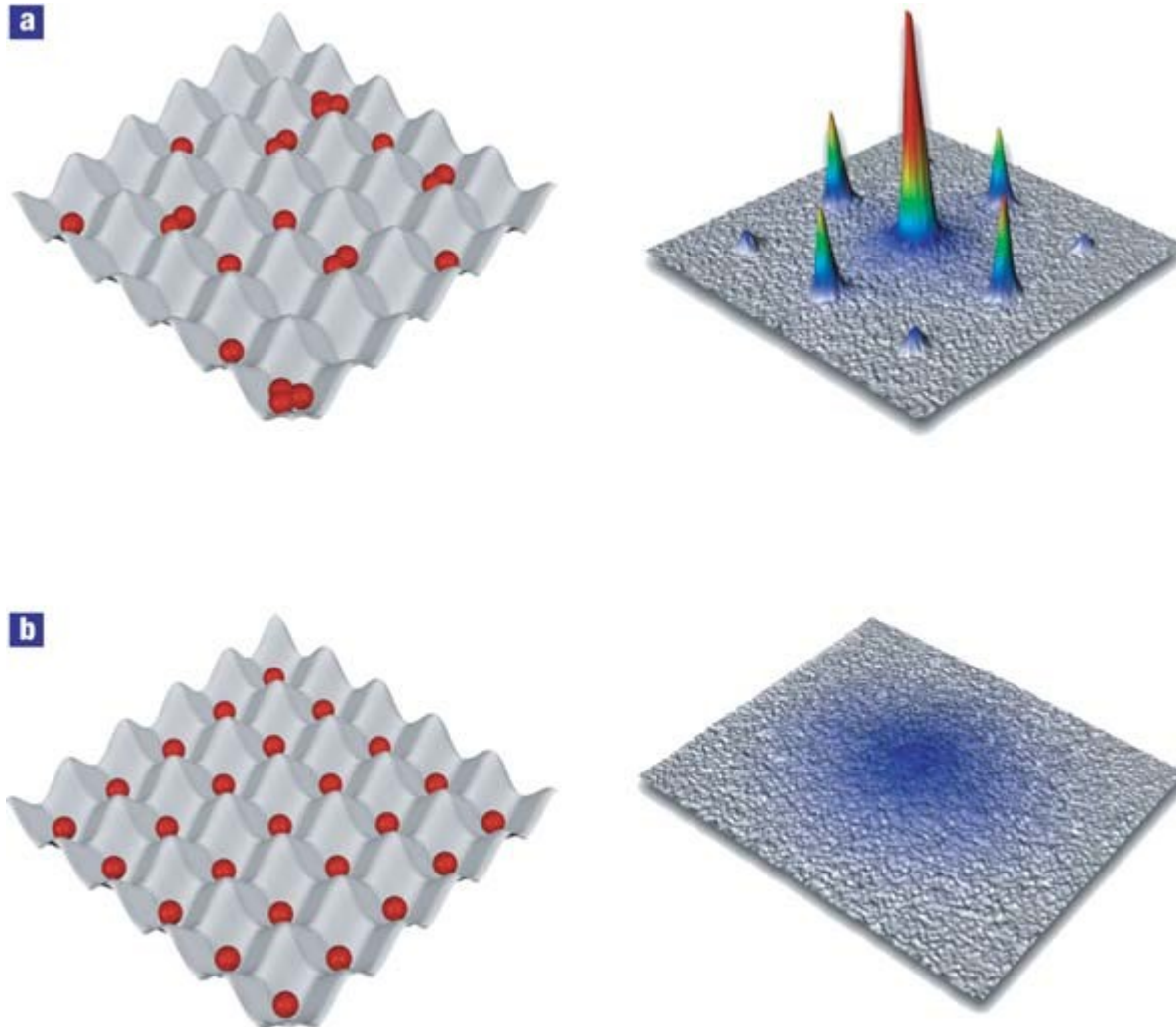
- controllo eccellente sulla geometria del reticolo
- atomi neutri interagiscono meno con l'ambiente
- sfrutta tecnologie ben studiate

svantaggi:

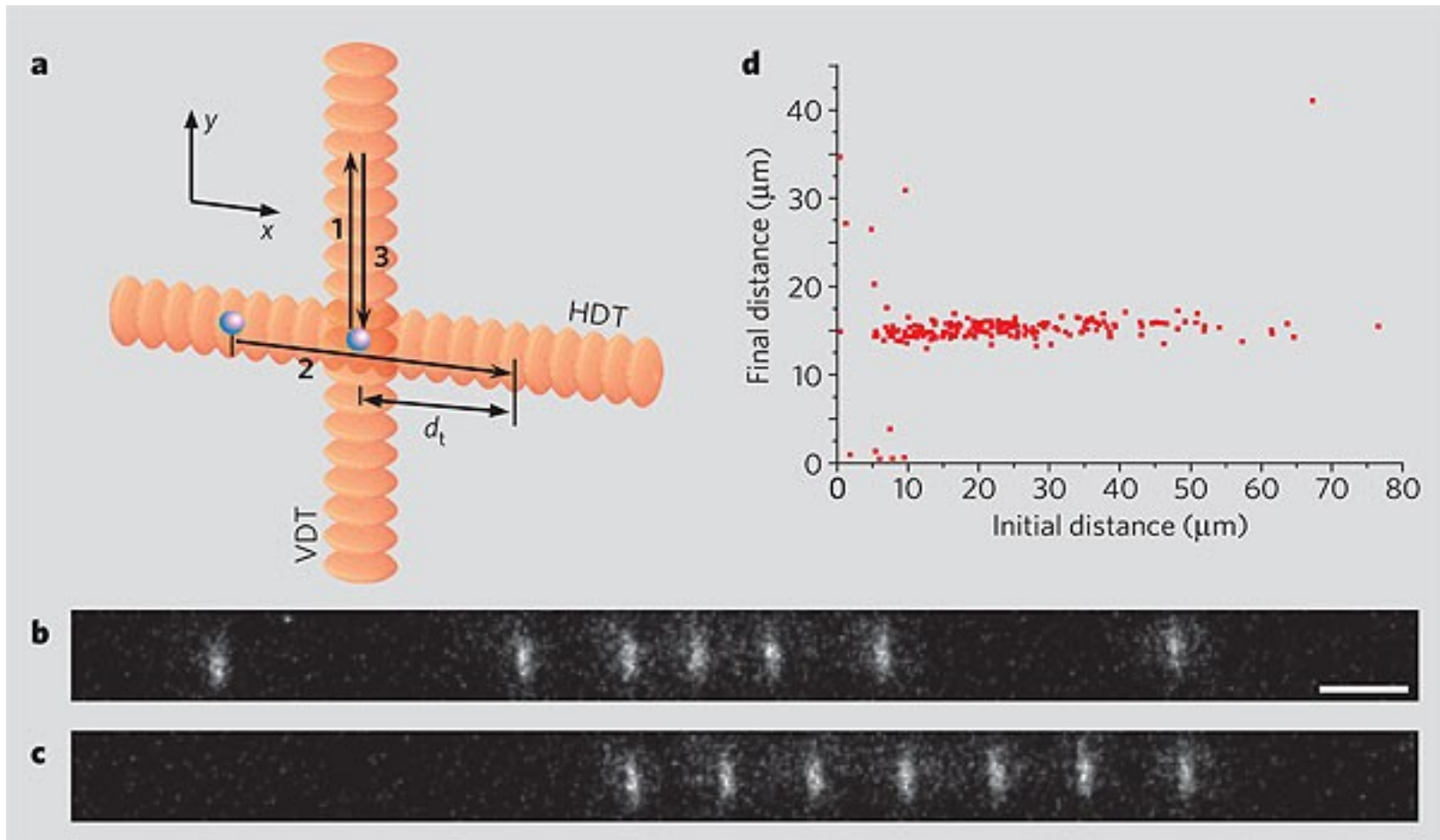
- difficile accedere a un singolo atomo
- mancanza di un'interazione forte tra gli atomi

fasci laser incrociati creano un “cristallo artificiale” in cui gli atomi vengono intrappolati in delle mini-gabbie

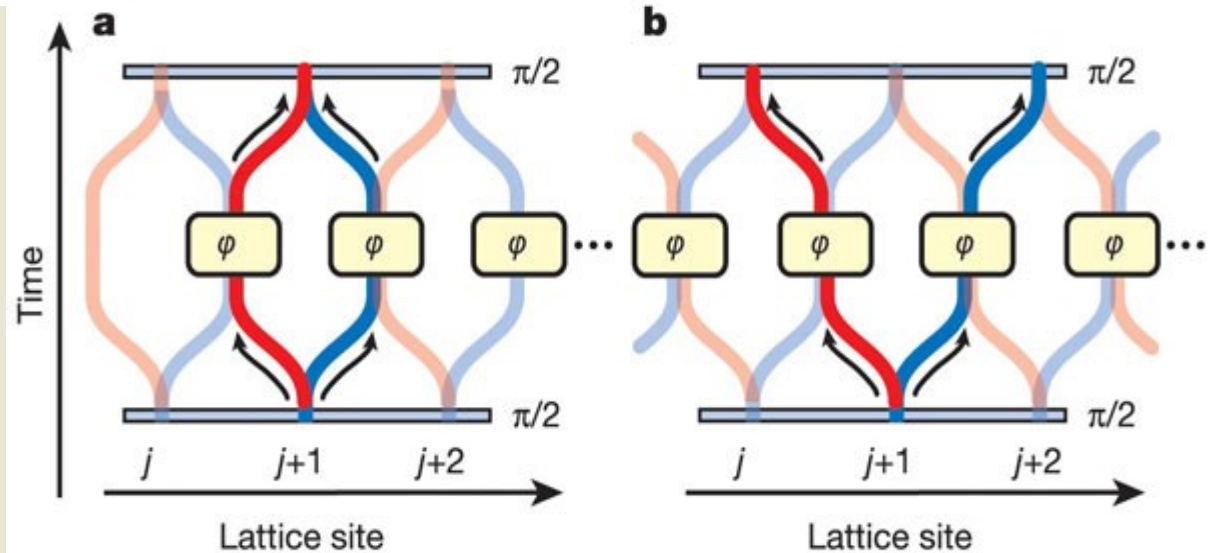
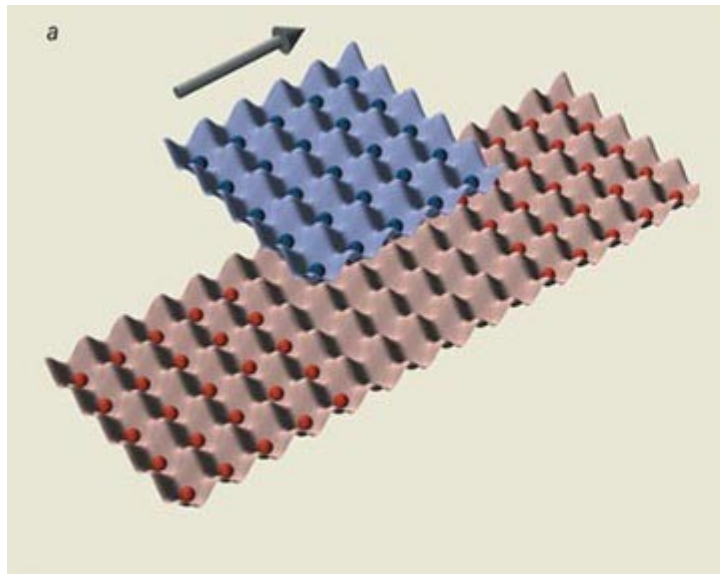
L'isolante di Mott



Approcci alternativi



Atomi neutri in reticoli ottici: *creazione di stati entangled*



Nature **425**, 937

NMR, ioni, reticoli: *cosa riescono a fare?*

NMR: algoritmo di Deutsch-Josza; algoritmo di Shor (fattorizza 15)

Nature **393**, 143; **414**, 883

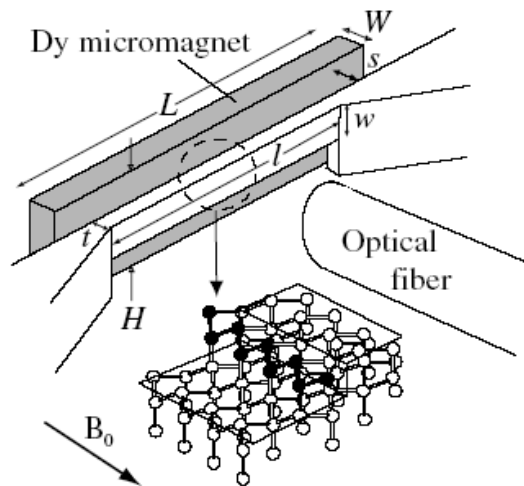
ioni: algoritmo di Deutsch-Josza; CNOT gate

Nature **421**, 48; Phys. Rev. Lett. **89**, 267901

reticoli: creazione di stati entangled

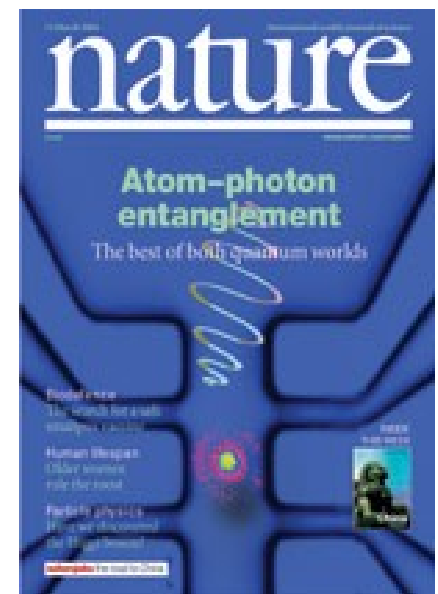
Nature **425**, 937

Prospettive per il futuro: *alcuni sviluppi recenti*



proposte per c.q. in cristalli di Si usando NMR; tecnologie già molto sviluppate, sembra fattibile

realizzazione di uno stato entangled tra un atomo e un fotone: possibilità di trasmissione di informazione quantistica



Prospettive per il futuro: *quando si potrà comprare un c.q.?*

risposta facile: nessuno lo sa!

però.....

- computer quantistici sono utili per scopi ben definiti, perciò basterebbe avere un 'plug-in', per esempio, per la fattorizzazione
- strada facendo, si imparano molte cose sulla fisica quantistica
- al momento, varie tecnologie vengono esplorate, è presto per dire quale sarà quella vincente
- nel caso peggiore: se non si può realizzare, almeno si impara perchè non si può

Il 'road map' dell' ARDA: *obiettivi per il futuro*

entro il 2007:

- stati entangled 'on-demand'
- correzione di errori ripetitiva
- trasferimento coerente di informazione quantistica
- sistema con 10 qubit

entro il 2012:

- implementazione di un algoritmo con resistenza agli errori
- 'benchmark': c.q. più complesso di una simulazione classica
- sistema con 50 qubit

