



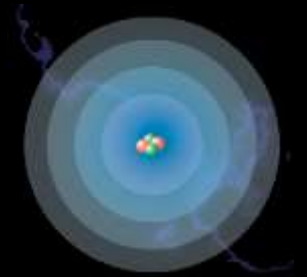
L'officina del Meccanico Quantistico

Dal gatto di Schrödinger
al Quantum Computing

Fabio Chiarello

*Istituto di Fotonica e Nanotecnologie
Consiglio Nazionale delle Ricerche*





La bizzarra teoria dei quanti

«Se credete di aver capito la teoria dei quanti, vuol dire che non l'avete capita» (Richard P. Feynman)

«Quelli che non rimangono scioccati, la prima volta che si imbattono nella meccanica quantistica, non possono averla compresa» (Niels Bohr)

Sistema fisico

Porzione di realtà, insieme di elementi interagenti, con proprietà e leggi ben definite

colori

calore

masse

velocità

posizione

luce

pressione

elettricità

suono

elettricità

movimento

temperatura



Stato di un sistema fisico

Condizione particolare del sistema, insieme dei parametri che lo caratterizzano



Ipotesi: il “realismo”

C'è qualcosa come "lo stato reale" di un sistema fisico che esiste obiettivamente, indipendentemente da ogni osservazione o misurazione e che in linea di principio si descrive con i mezzi di espressione della fisica.

(A. Einstein)

1) Lo stato di un sistema è **sempre** definito (al limite è sconosciuto)



2) In un certo istante, un sistema può trovarsi in **uno ed un solo** stato



Ipotesi: il "realismo"

C'è qualcosa come "lo stato reale" di un sistema fisico che esiste obiettivamente, indipendentemente da ogni osservazione o misurazione e che in linea di principio si descrive con i mezzi di espressione della fisica

(A. Einstein)

1) Lo stato di un sistema è **sempre** definito (al limite è sconosciuto)

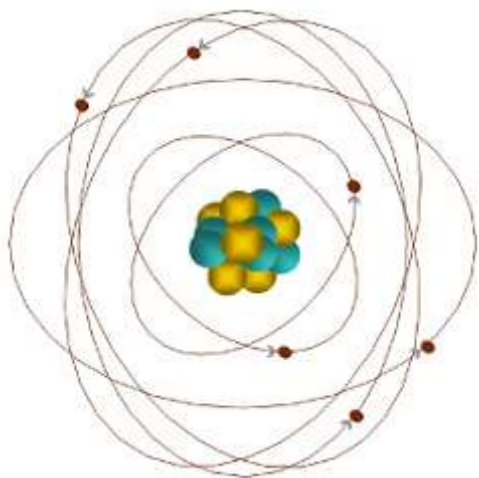


2) In un certo istante un sistema può trovarsi in **uno** **un solo** stato



Esempio: modello “planetario” dell’atomo

- Nucleo (Neutroni e Protoni) circondato da elettroni



Modello "classico"



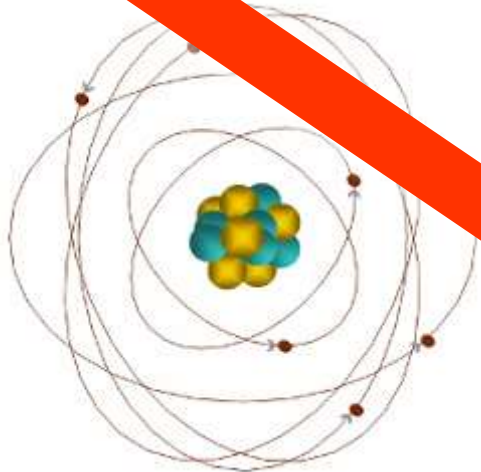
*Nube di elettroni
come sciame di api*



Sistema solare

Esempio: modello "planetario" dell'atomo

- Nucleo (Neutroni e Protoni) circondato da elettroni



Modello "classico"



*Nube di elettroni
come sciame di api*

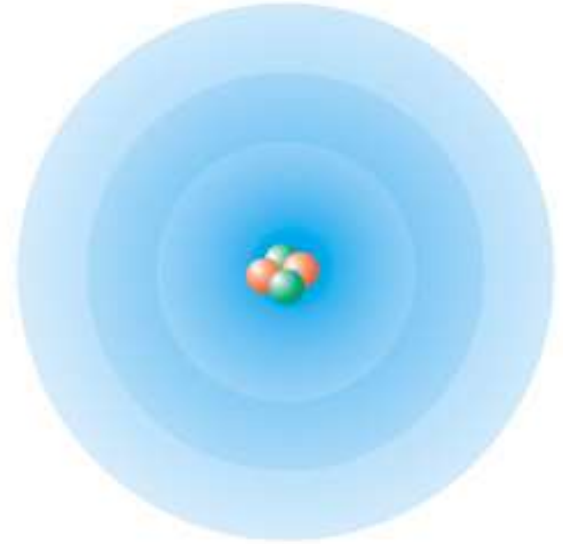


Sistema solare

Atomo

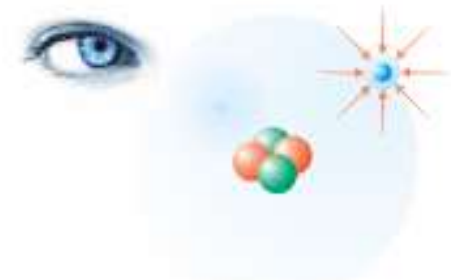
Un SINGOLO elettrone è “**delocalizzato**” tutt’intorno al nucleo

- *È contemporaneamente ovunque*
- *Ma non è in nessun posto preciso*



Ma se misuro la sua posizione, si “**localizza**” (“sceglie” una posizione):

- *Il punto è scelto in modo casuale*
- *Funzione d’onda: probabilità di ritrovarlo in un punto piuttosto che in un altro*



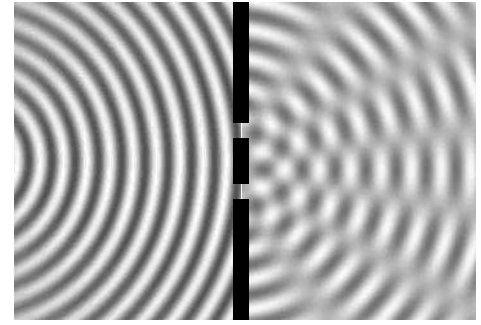
Cos'è la luce?



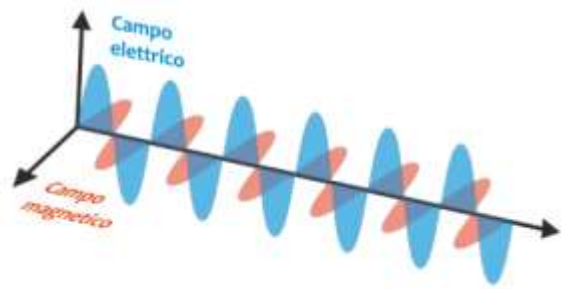
Newton (1642-1727):
particelle



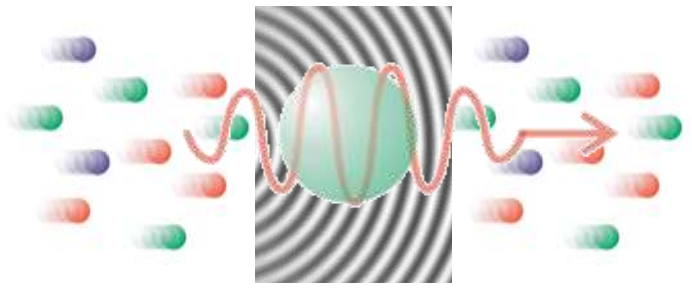
Huygens (1678):
onda



Maxwell (1865):
onda elettromagnetica

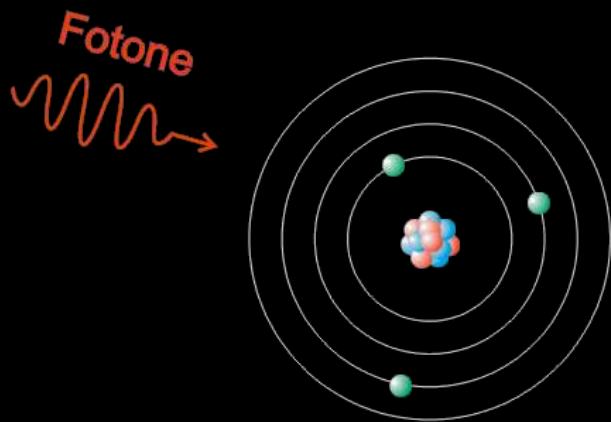


Plank (1900):
dualismo onda/particella



Meccanica Quantistica

Fotoni e atomi



Salto →

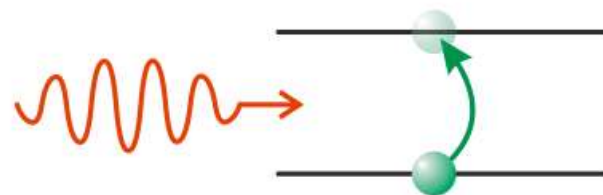
→ Energia del fotone →

→ frequenza (colore)

Salto piccolo → rosso

Salto grande → viola

Assorbimento



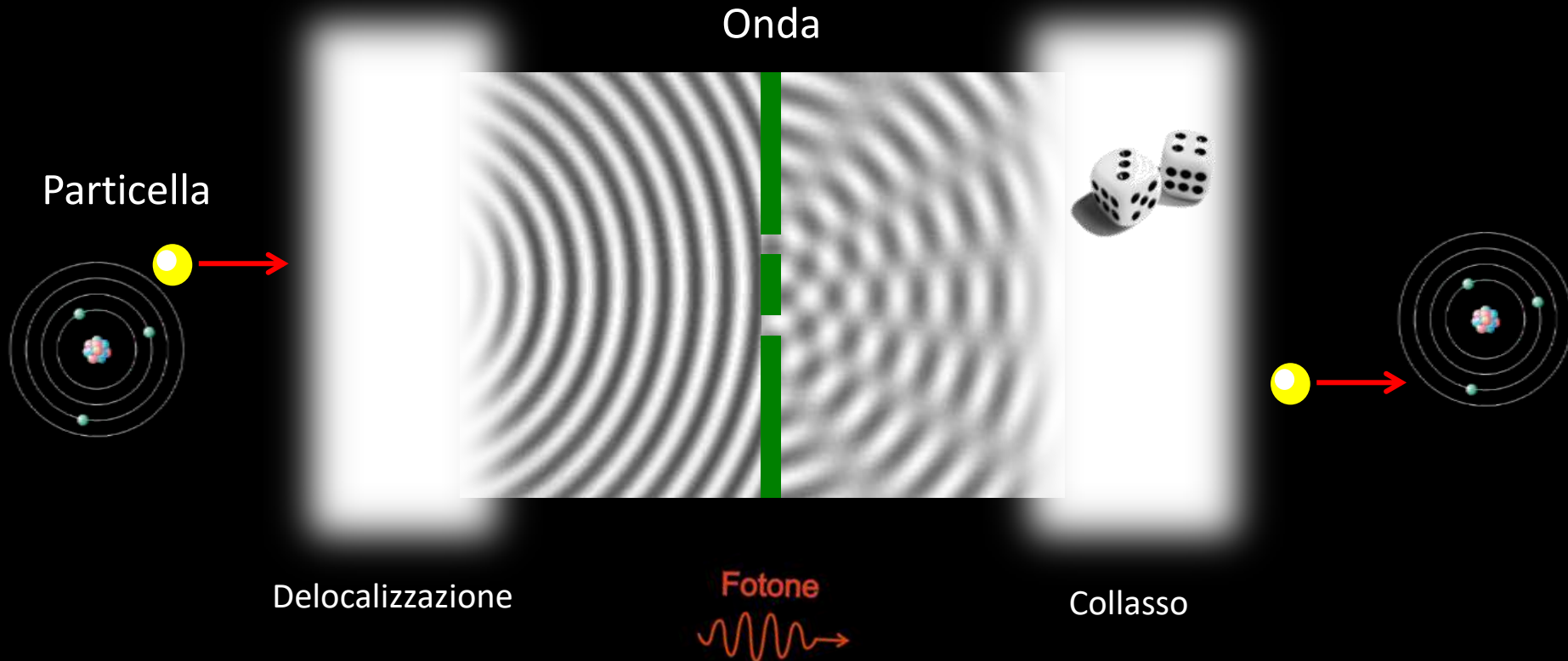
Assorbito un fotone di energia esattamente uguale al salto

Emissione



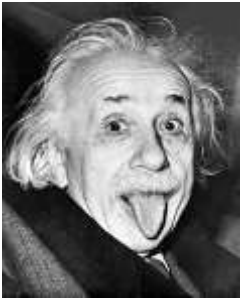
Emesso un fotone di energia esattamente uguale al salto

Dualismo onda/particella



Collasso della funzione d'onda

- Una particella si può delocalizzare. E' nota la "funzione d'onda" con la legge che la governa (equazione di Schroedinger)
- ma al momento dell'osservazione la particella si localizza in una posizione scelta in modo del tutto casuale: il risultato è sempre imprevedibile



“Dio non gioca a dadi con l’universo.” (A. Einstein)



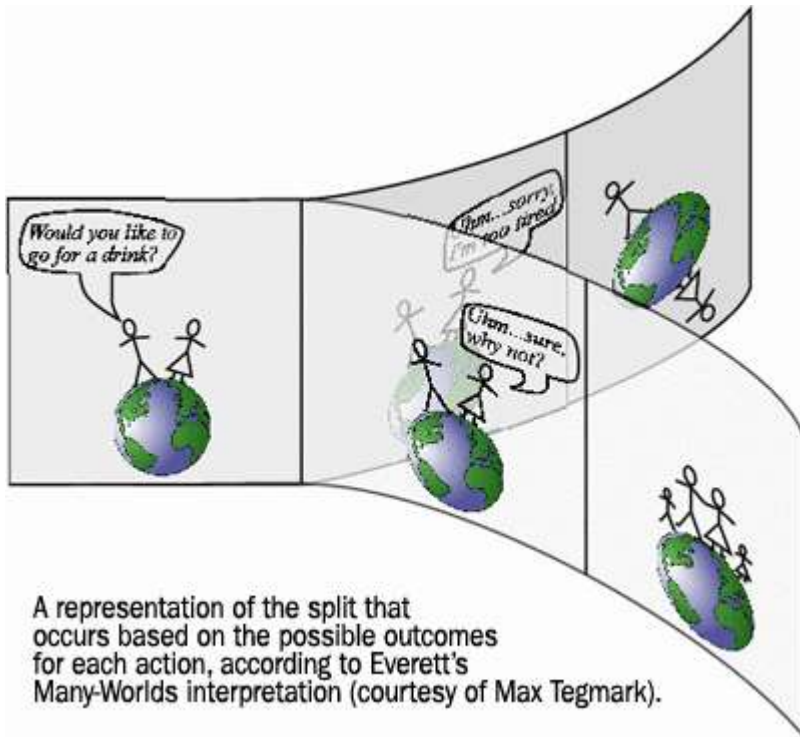
“Piantala di dire a Dio che cosa fare con i suoi dadi.” (Niels Bohr)

- Perché la funzione d'onda collassa? Perché agisce una “coscienza” che la osserva? Perché la misura disturba il sistema?

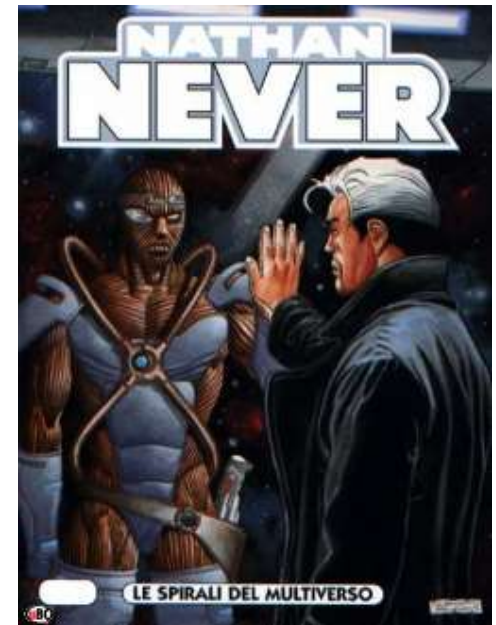
Meccanica quantistica ed universi paralleli

Interpretazione di Hugh Everett III (1957):

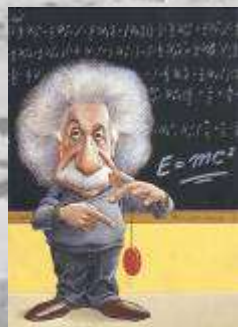
- Ci sono molti universi paralleli sovrapposti. La sovrapposizione di stati ne è una manifestazione
- Ogni osservazione separa gli universi



A representation of the split that occurs based on the possible outcomes for each action, according to Everett's Many-Worlds interpretation (courtesy of Max Tegmark).



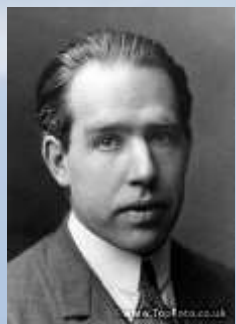
La teoria dei quanti: qualche opinione



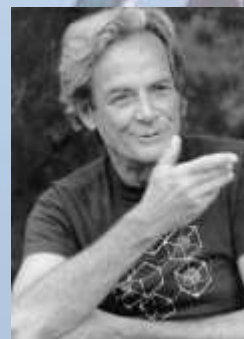
***Più la teoria dei quanti ha successo, più sembra una sciocchezza.
(Albert Einstein)***



***Non mi piace, e mi spiace di averci avuto a che fare.
(Erwin Schrödinger)***

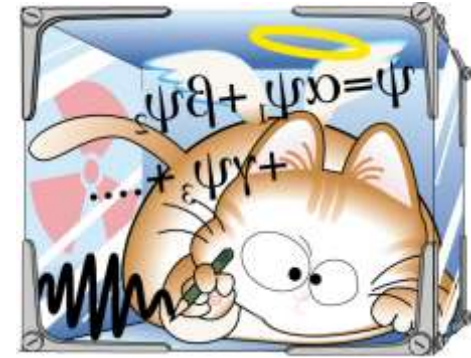


Quelli che non rimangono scioccati, la prima volta che si imbattono nella meccanica quantistica, non possono averla compresa. (Niels Bohr)



***Penso si possa tranquillamente affermare che nessuno capisce la meccanica quantistica.
(Richard Feynman)***

Il gatto di Schroedinger (1935)



- Un nucleo radioattivo può decadere o no (sovrapposizione quantistica)
- Se decade, si rompe una bottiglia di veleno e il gatto muore
- Se l'atomo è in una sovrapposizione "decaduto/non decaduto", il gatto è in una sovrapposizione "morto/vivo"!!!

Effetto tunnel

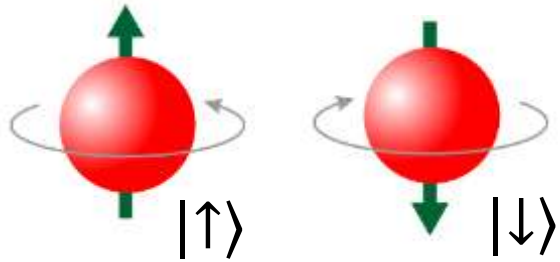
Grazie alla delocalizzazione una particella può avere probabilità non nulla di passare attraverso una barriera

TUNNEL EFFECT 2

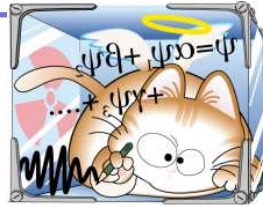
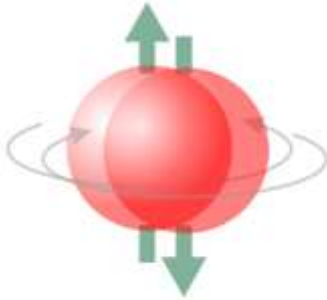


Spin

«Rotazione» particella (elettrone, protone, ...)



Sovrapposizione quantistica



Notazione «Bra-Ket» di Dirac

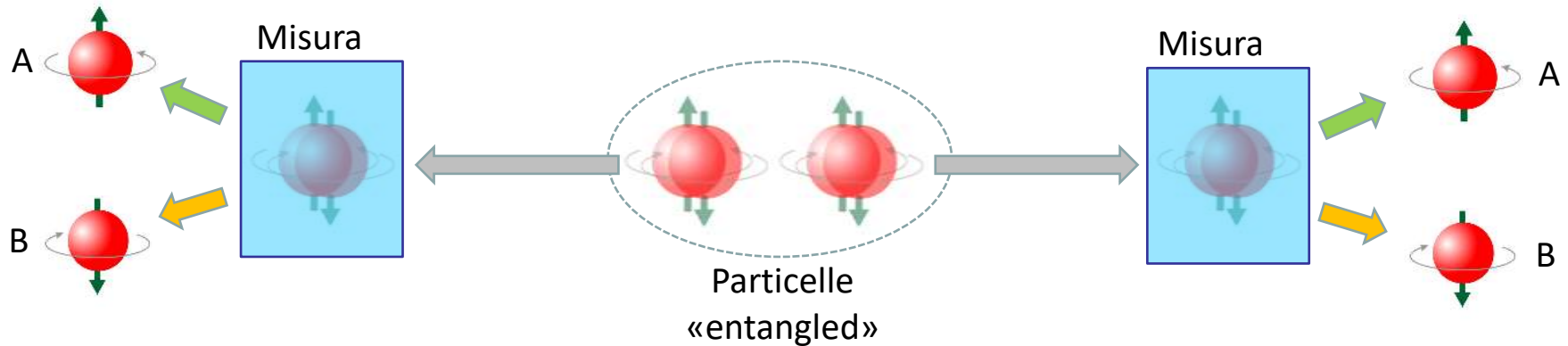
$$|\psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

$$|a|^2 + |b|^2 = 1$$

Entanglement

Paradosso EPR (Einstein, Podolsky, Rosen)

- 2 particelle, in sovrapposizione $|\psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- Particelle «entangled»: hanno sempre entrambe lo stesso stato
- Separo le particelle
- Misura: risultato casuale \uparrow oppure \downarrow
- Completamente casuale, ma sempre lo stesso per entrambe



Come è possibile?

- a. Si sono messe d'accordo e noi non ce ne siamo accorti (variabili nascoste)?
- b. Oppure comunicano più velocemente della luce?

$$|\psi\rangle = a|\uparrow\uparrow\rangle + b|\downarrow\downarrow\rangle$$



Un calcolatore quantistico?

«Se il settore dell'automobile si fosse sviluppato come l'industria informatica, oggi avremmo veicoli che costano 25 dollari e fanno 500 Km con un litro»

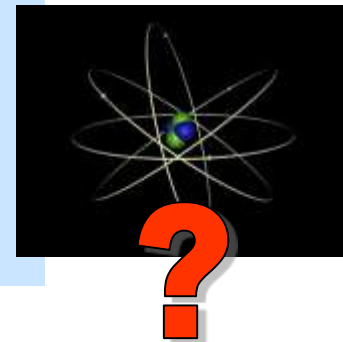
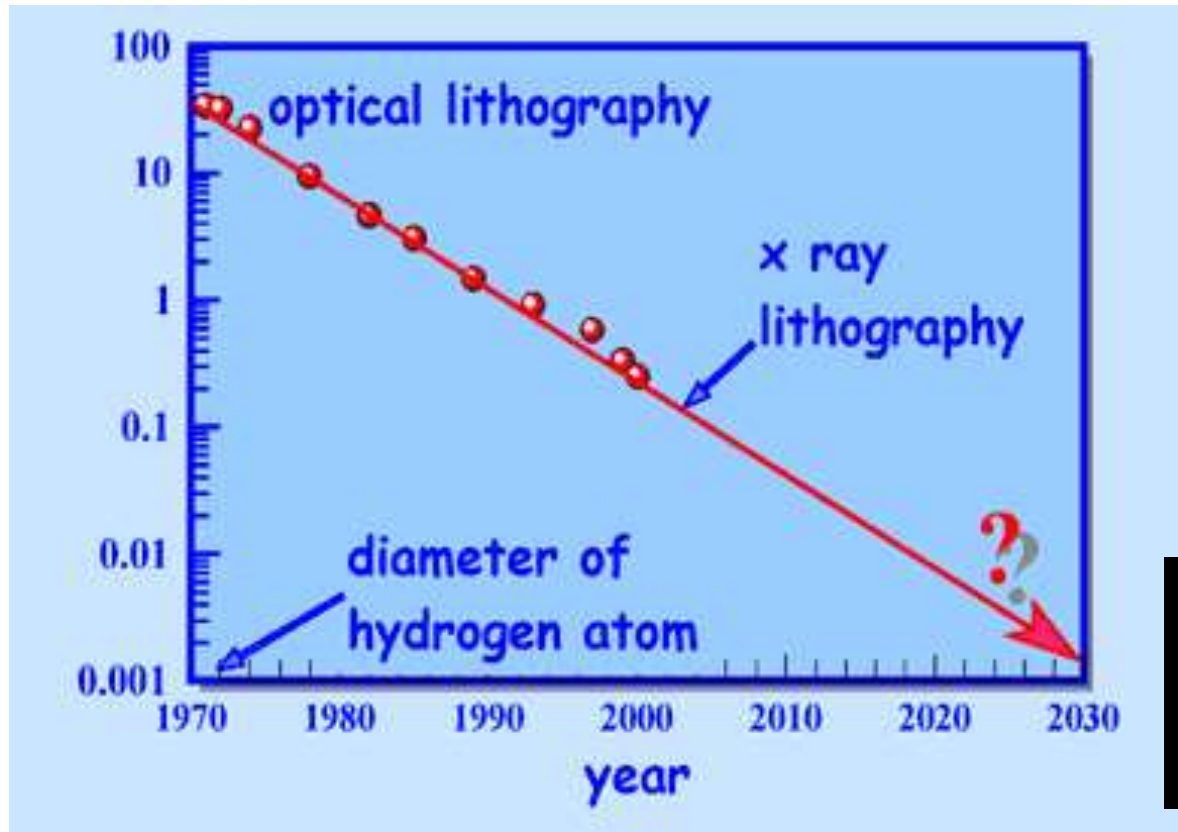
(Bill Gates)

« Se le auto funzionassero come i software, si bloccherebbero due volte al giorno senza motivo e l'unica soluzione sarebbe reinstallare il motore»

(anonimo dirigente General Motors)

Legge di Moore: il limite

- Più sono piccoli i dispositivi più ce ne sono, e più è potente il processore
- Più sono piccoli, meno valgono le leggi che conosciamo (classiche)
- Nuove leggi: meccanica quantistica. E' un limite?

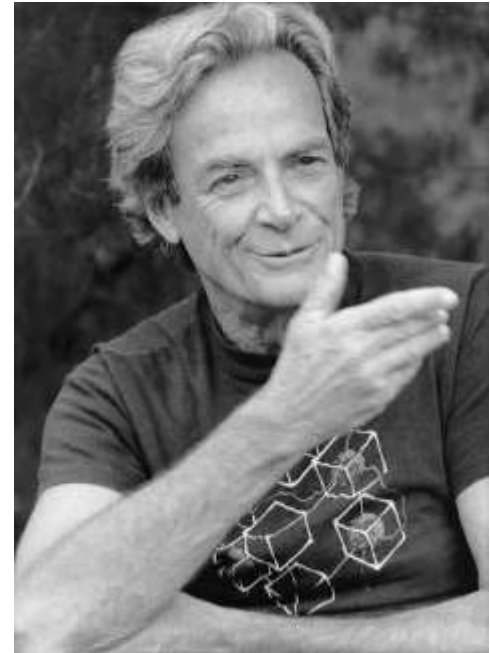


Dove si può arrivare?

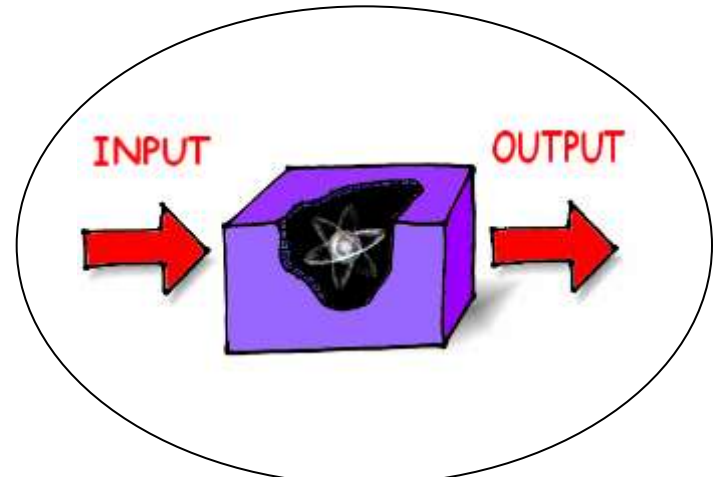
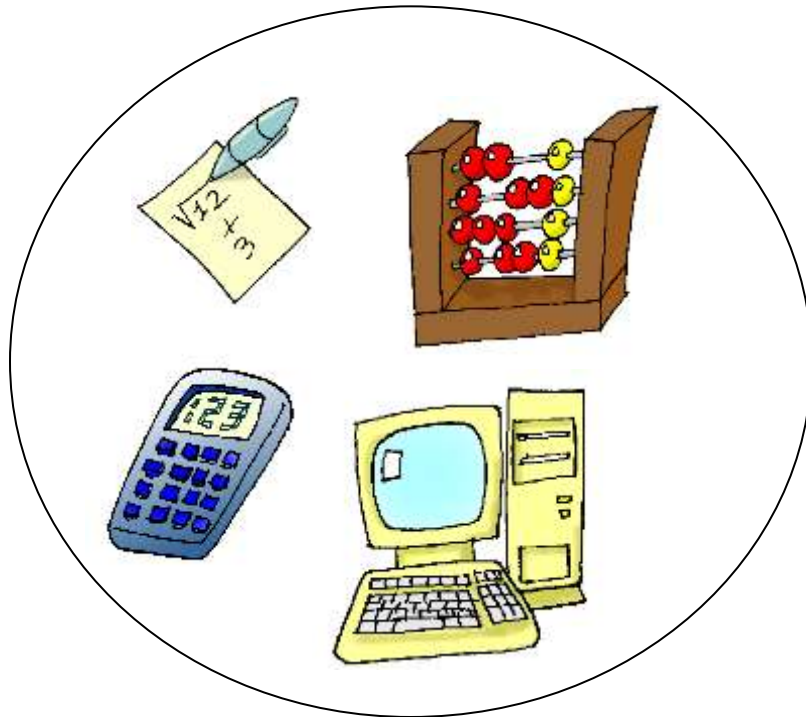
L'idea di Feynman

“Alcuni calcoli potrebbero essere svolti in modo molto più efficiente utilizzando sistemi quantistici invece che classici”

(1982, R.P. Feynman)



Strumenti classici



Calcolatore quantistico

I limiti del calcolo classico

Fattorizzazione: scomposizione di un numero in prodotto di numeri primi

18

=

1 × 2 × 3 × 3

Ora provate a fattorizzare

1143816257578888676692357799761466120102182
9672124236256256184293570693524573389783097
123563958705058989075147599290026879543541
= ?

Quanto tempo occorre?



- **129 cifre** \Rightarrow 8 mesi di calcolo nel 1994 (1600 computer in parallelo)
- **250 cifre** $\Rightarrow 10^6 = 1\,000\,000$ di anni di calcolo
- **1000 cifre** $\Rightarrow 10^{25} =$ **10 000 000 000 000 000 000 000 000 000** anni



Il limite invalicabile dell'informatica (classica)



- Il tempo di risoluzione cresce in modo esponenziale con il numero di cifre!
- Problema “intrattabile” per un calcolatore (classico)

- Ideale come “serratura” per l'informazione (difficile da forzare)
- Crittografia



**Computer quantistico
(algoritmo di Shor, 1994)**

1000 cifre \Rightarrow qualche minuto!!!

Vincere la complessità...

- **Crittografia**

- “rompere” i codici
- ma anche proteggere meglio i dati



- **Simulazione di sistemi complessi** (biologia, farmaci, genetica, fisica...)

- Cura di malattie
- Meno test su animali
- Energia
-



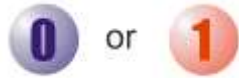
- **Andare oltre i propri limiti**

- Uno dei principali “motori” dell’uomo!



Il bit quantistico (Qubit)

BIT: elemento di informazione classica



Stato "0" oppure "1"

QUBIT: elemento di informazione quantistica



Sovrapposizione "0" e "1"

REGISTRO: sequenza di N bit, con 2^N stati possibili



1010011101100110010100....

REGISTRO: sequenza di N qubit, in una sovrapposizione di 2^N stati possibili



01001...0 e 01101... e 10001... e ...

OPERAZIONE: su uno dei 2^N stati del registro

011 × 010 = 110

OPERAZIONE:
contemporaneamente su tutti i 2^N stati del registro!

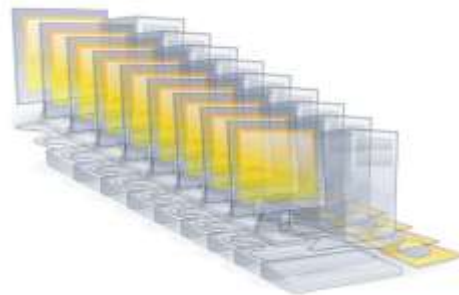
Cioè 2^N operazioni in un solo passaggio!

Parallelismo quantistico

Classicamente: Per aumentare la potenza di calcolo posso usare N computer in parallelo



Quantisticamente: è come se utilizzassi il “parallelo” di una “singola macchina” con “se stessa” in altri “universi paralleli”



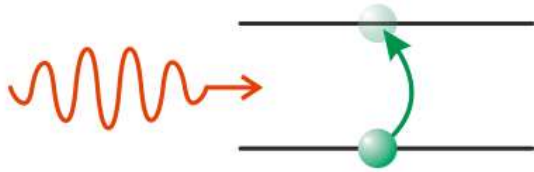
Se la mia macchina è caratterizzata da N qubit, avrò il parallelo di 2^N stati

$$N = 30 \Rightarrow 2^N \sim 1\,000\,000\,000$$

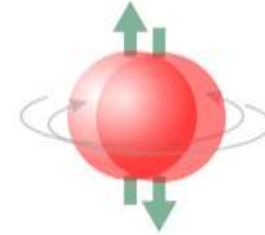
Come si costruisce un computer quantistico?

Servono sistemi fisici a 2 stati. Manipolabili, accoppiabili, misurabili

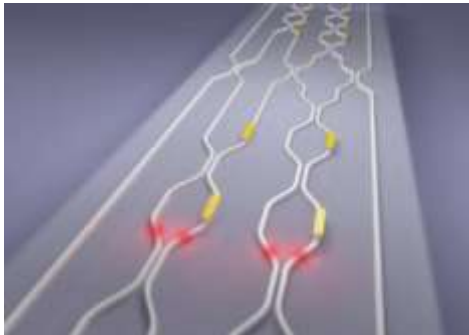
Livelli atomici



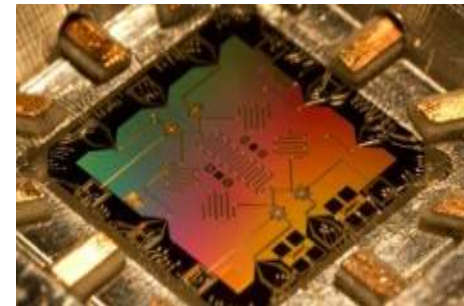
Spin atomici



Fotoni



Superconduttori

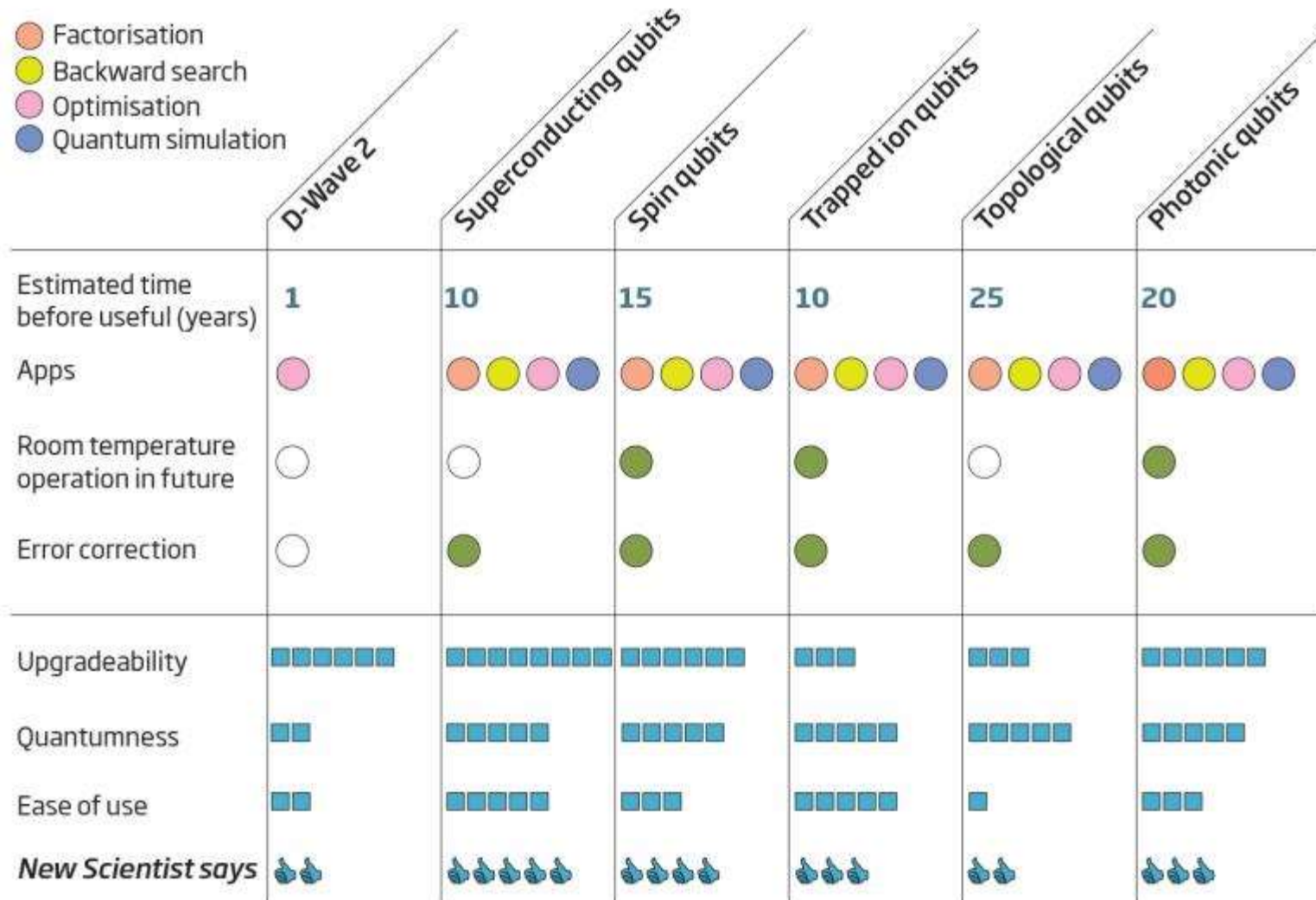


Quanto siamo lontani?

Which quantum computer is right for you?

There are many types to choose from. Here's how they compare and our all-important verdict

- Factorisation
- Backward search
- Optimisation
- Quantum simulation



Dove siamo?

2013 D-Wave two



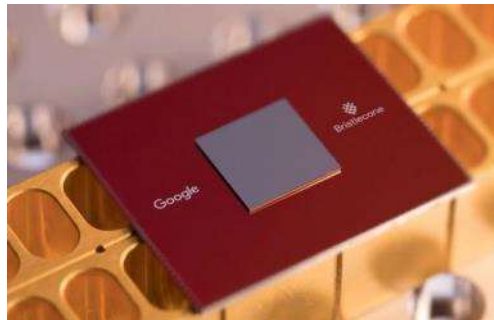
512 «qubits»

2016 IBM Quantum Experience



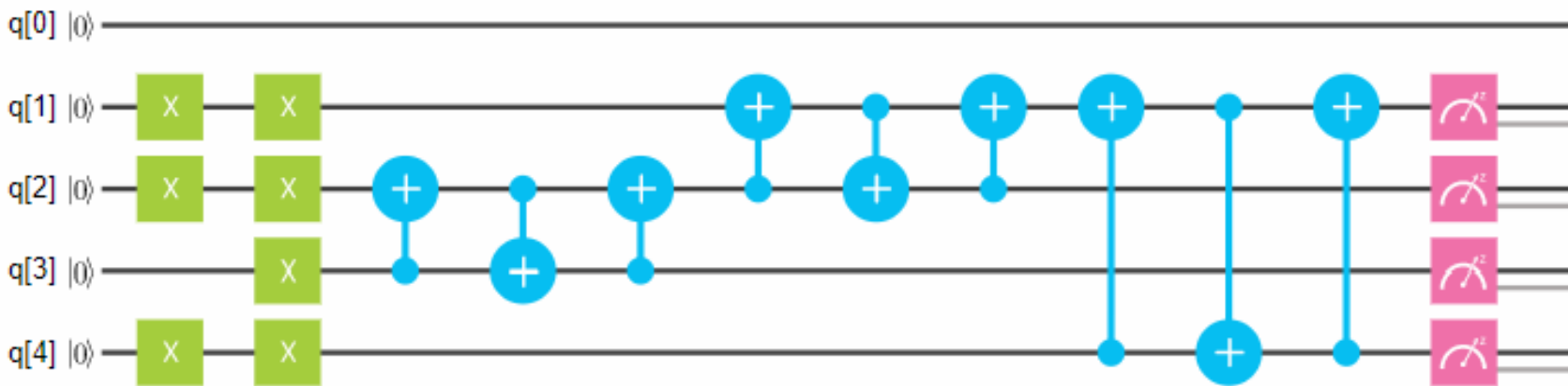
20 qubits – «cloud»

2018 Google Bristlecone Quantum Processor



72 qubits

Algoritmi quantistici



IBM Q: quantumexperience.ng.bluemix.net

Grover N=2 A=00 Add a description

Backend: ibmqx2 My Units: 15 Experiment Units: 3

Switch to Qasm Editor Run Simulate

GATES: id, X, Y, Z, H, S, S†, +, T, T†

BARRIER OPERATIONS

```

1 include "qelib1.inc";
2 qreg q[5];
3 creg c[5];
4
5 h q[1];
6 h q[2];
7 s q[1];
8 s q[2];
9 h q[2];
10 cx q[1],q[2];
11 h q[2];
12 s q[1];
13 s q[2];
14 h q[1];
15 h q[2];
16 x q[1];
17 x q[2];
18 h q[2];
19 cx q[1],q[2];
20 h q[2];
21 x q[1];
22 x q[2];
23 h q[1];
24 h q[2];
25 measure q[1] -> c[1];
26 measure q[2] -> c[2];
27

```

Import QASM Download QASM

Bibliografia minima

Facebook.it/officinaquantica



Grazie dell'attenzione!