



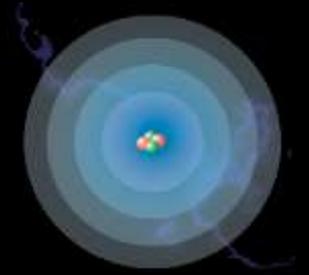
# L'officina del Meccanico Quantistico

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)

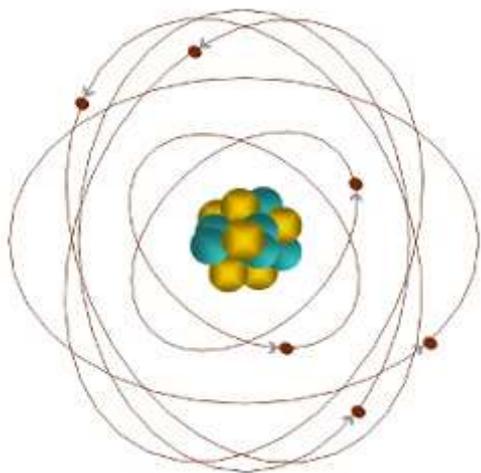


2) In un certo istante un sistema può trovarsi in **uno** **un solo** stato



# Esempio: modello “planetario” dell’atomo

- Nucleo (Neutroni e Protoni) circondato da elettroni



*Modello "classico"*



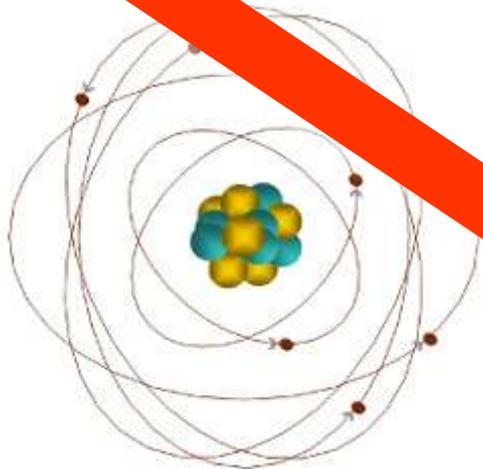
*Nube di elettroni  
come sciame di api*



*Sistema solare*

# Esempio: modello "planetario" dell'atomo

- Nucleo (Neutroni e Protoni) circondato da elettroni



*Modello "classico"*



*Nube di elettroni  
come sciame di api*

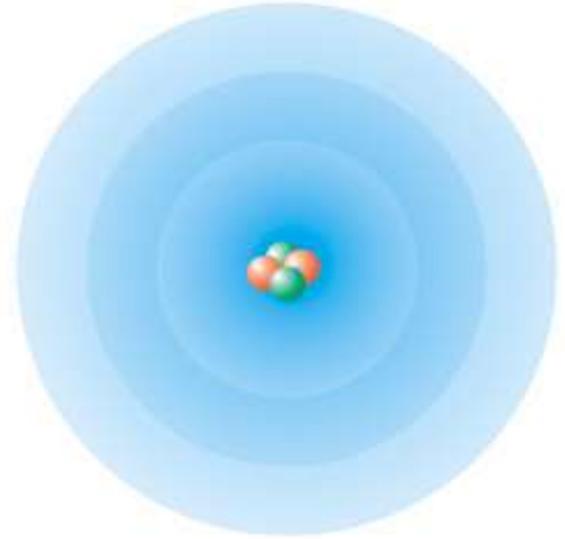


*Sistema solare*

# Atomo

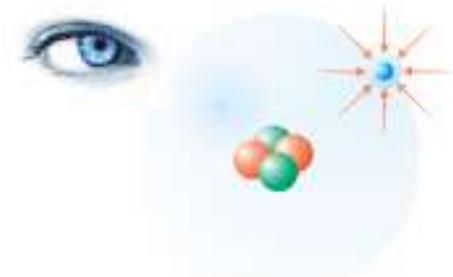
Un SINGOLO elettrone è “**delocalizzato**” tutt’intorno al nucleo

- *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*



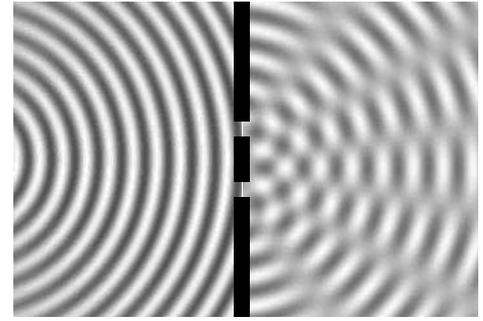
# Cos'è la luce?



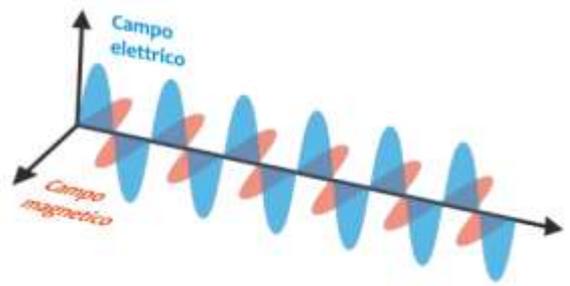
**Newton (1642-1727):**  
particelle



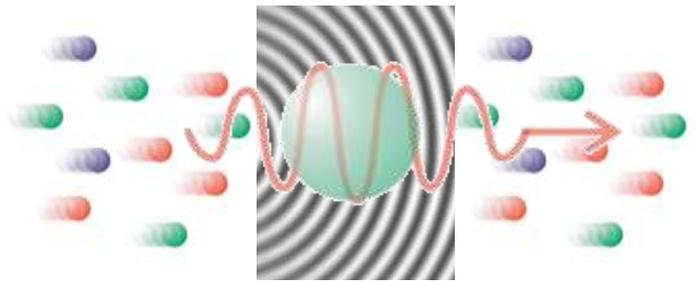
**Huygens (1678):**  
onda



**Maxwell (1865):**  
onda elettromagnetica

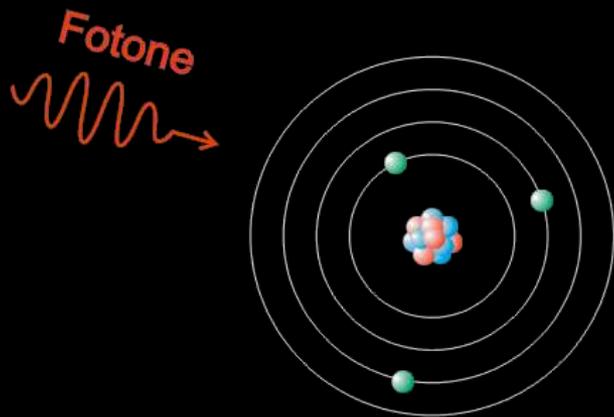


**Plank (1900):**  
dualismo onda/particella



**Meccanica Quantistica**

# Fotoni e atomi



Salto →

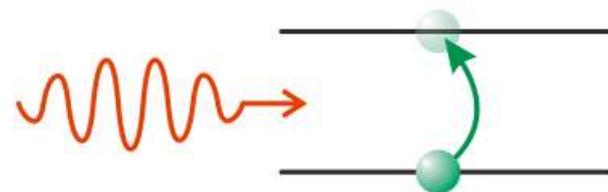
→ Energia del fotone →

→ frequenza (colore)

*Salto piccolo → rosso*

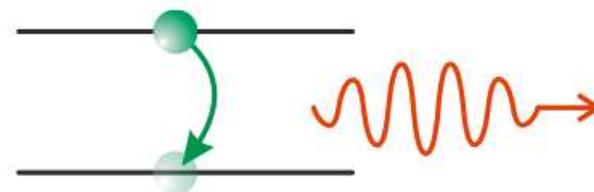
*Salto grande → viola*

## Assorbimento



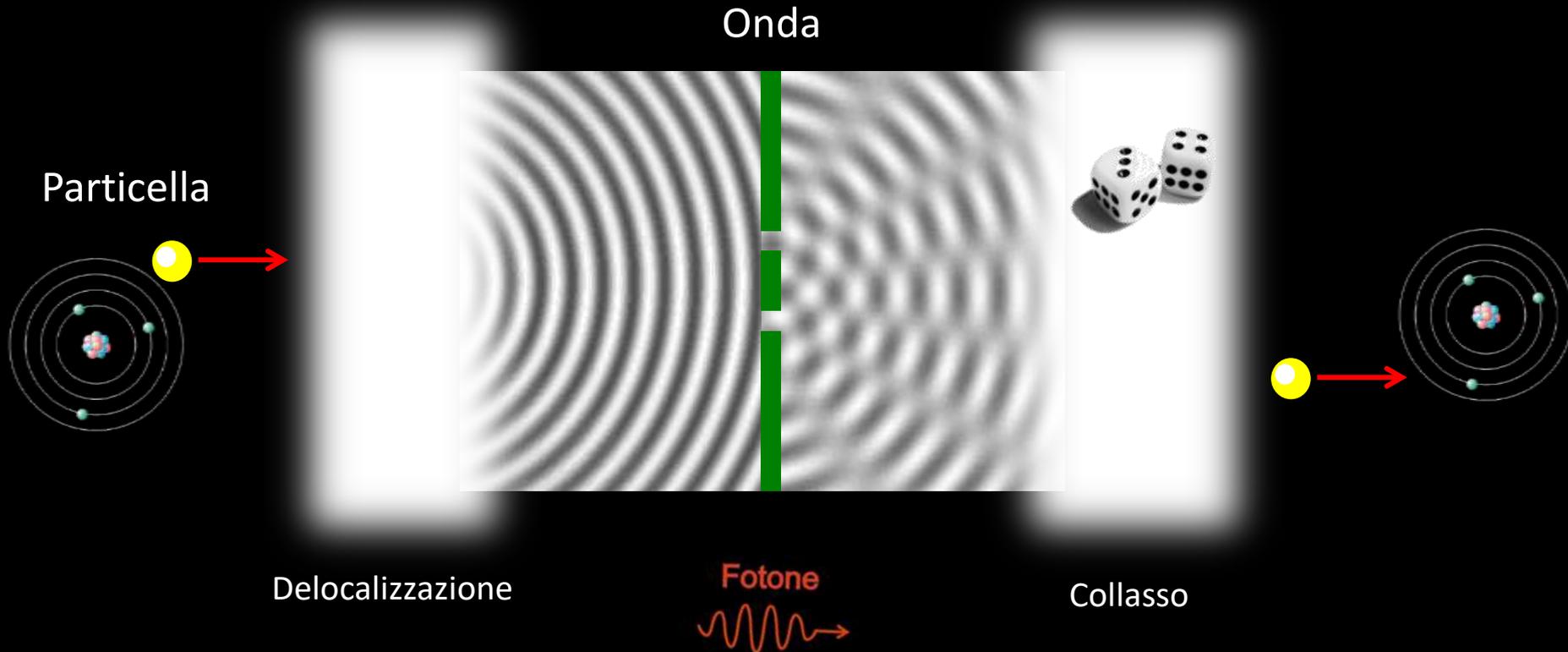
Assorbito un fotone di energia esattamente uguale al salto

## Emissione



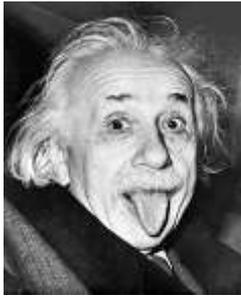
Emesso un fotone di energia esattamente uguale al salto

# 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)



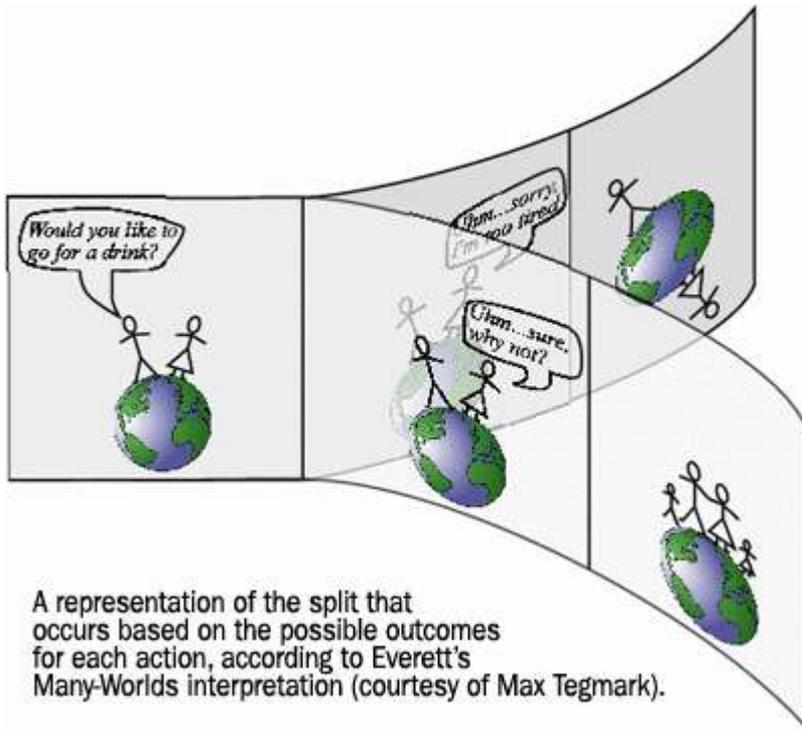
“Piantala di dire a Dio che cosa fare con i suoi dadi.” (Niels Bohr)

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

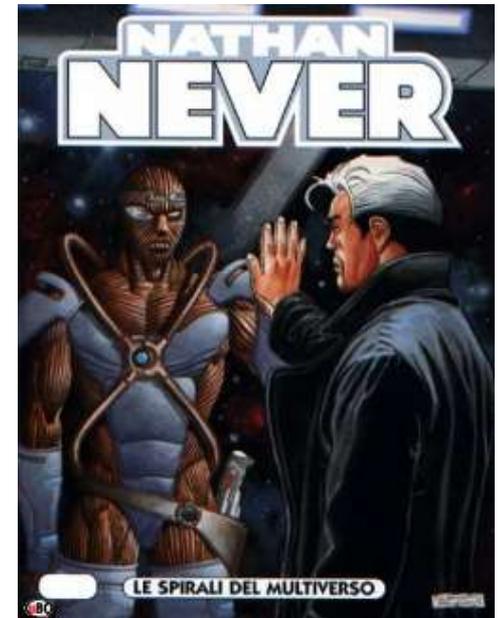
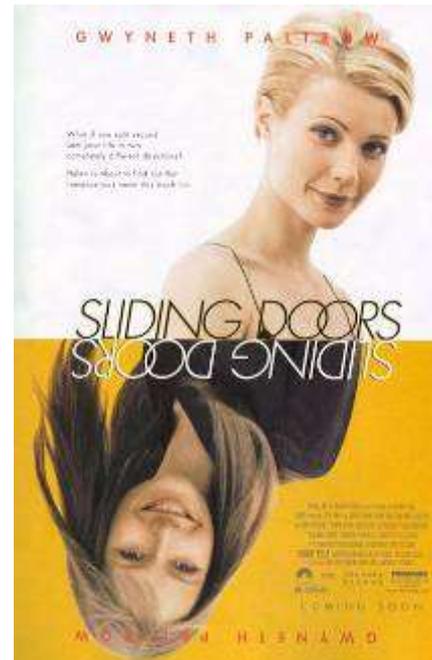
# Meccanica quantistica ed universi paralleli

Interpretazione di Hugh Everett III (1957):

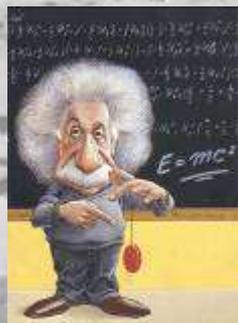
- Ci sono molti universi paralleli sovrapposti. La sovrapposizione di stati ne è una manifestazione
- Ogni osservazione separa gli universi



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



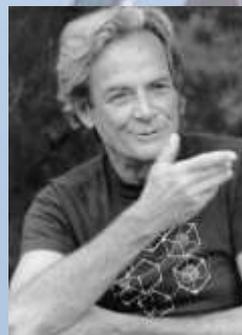
***Più la teoria dei quanti ha successo, più sembra una sciocchezza.  
(Albert Einstein)***



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

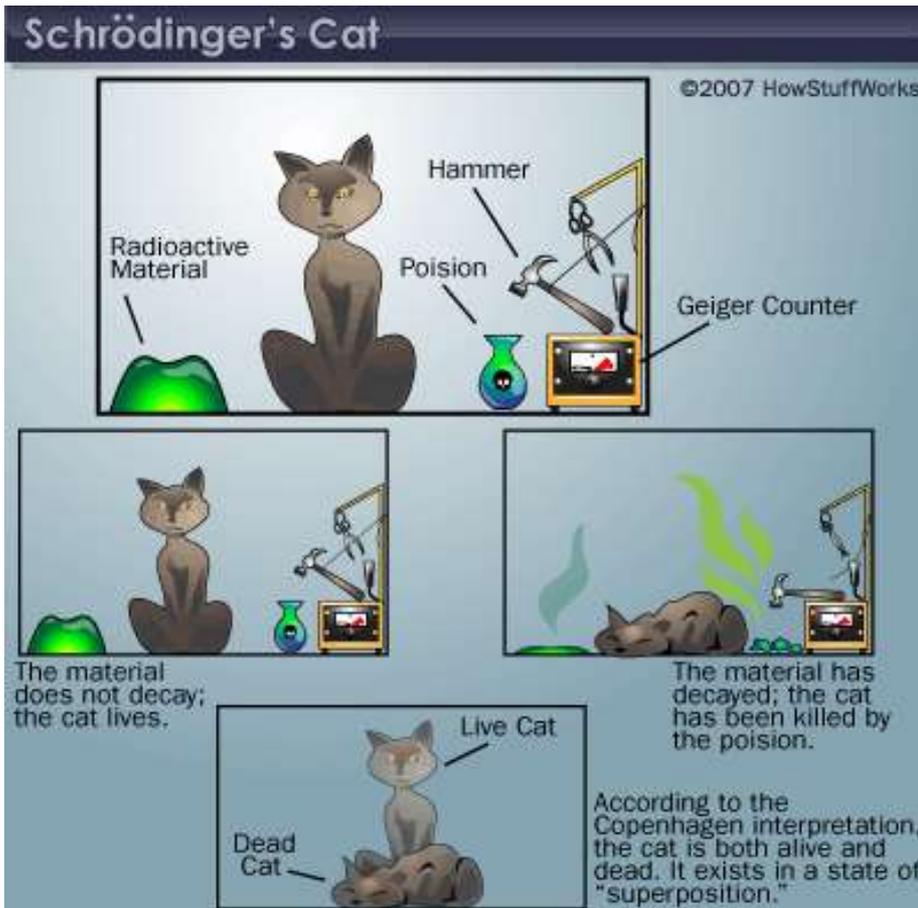
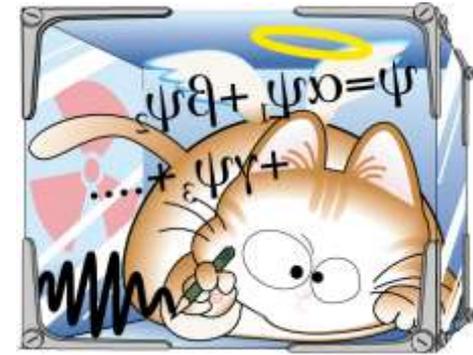


***Quelli che non rimangono scioccati, la prima volta che si imbattono nella meccanica quantistica, non possono averla compresa. (Niels Bohr)***



***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

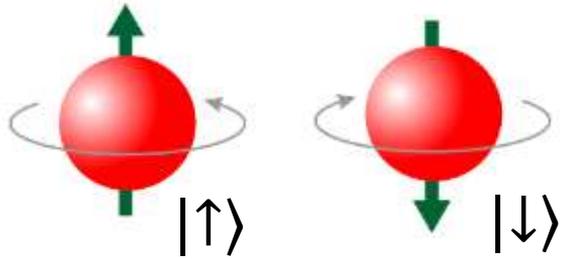
Grazie alla delocalizzazione una particella può avere probabilità non nulla di passare attraverso una barriera

## TUNNEL EFFECT 2

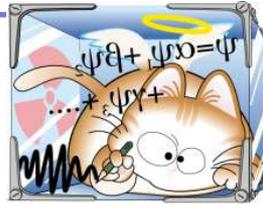
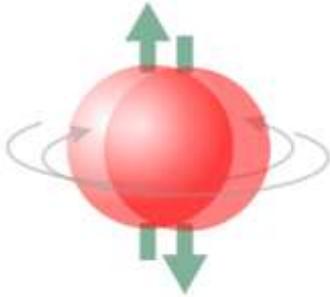


# Spin

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



Sovrapposizione quantistica



Notazione «Bra-Ket» di Dirac

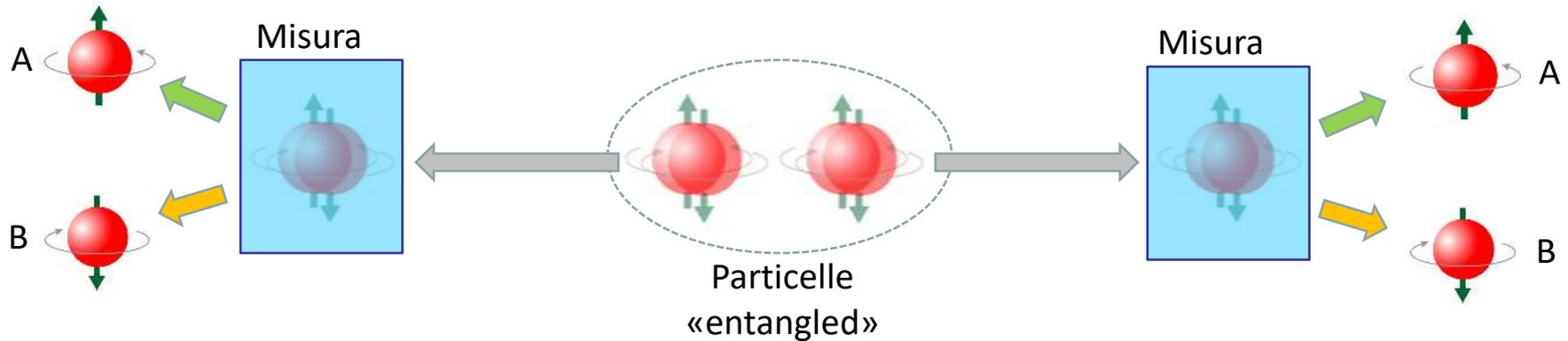
$$|\psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

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

# 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»

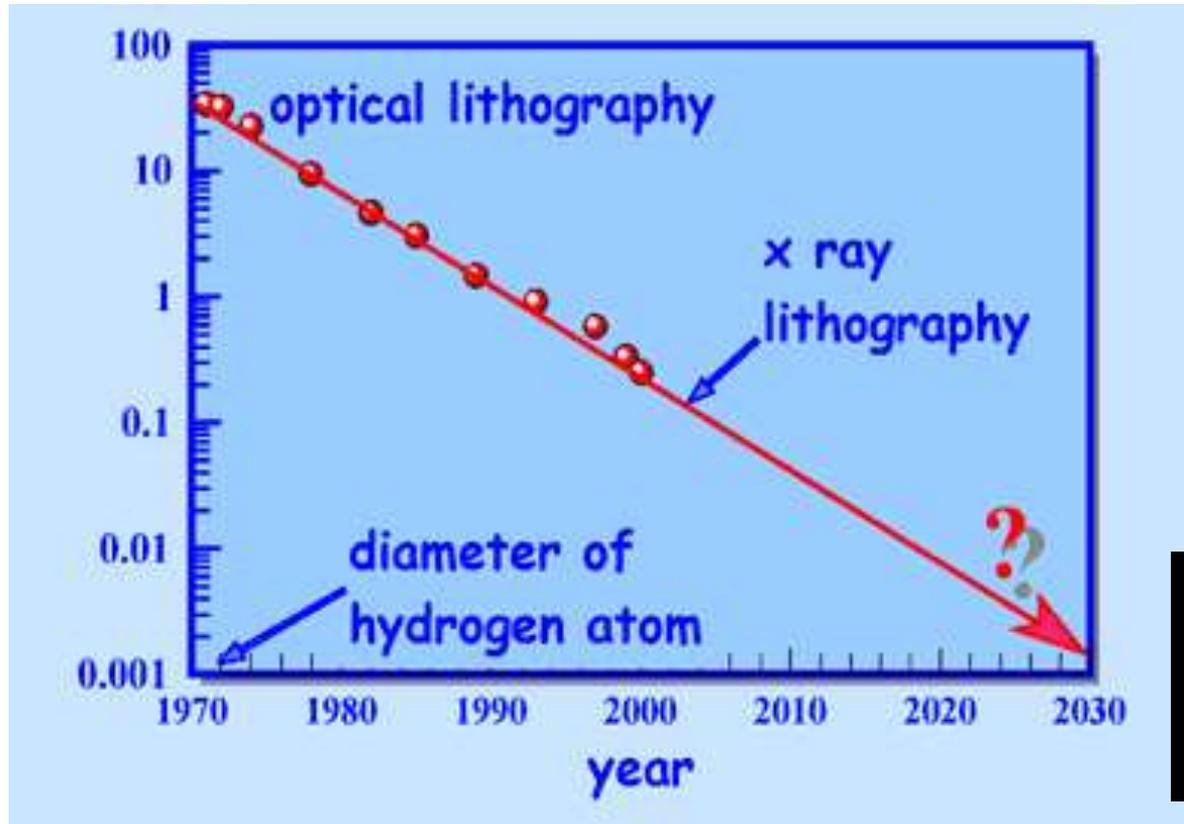
(Bill Gates)

« 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?

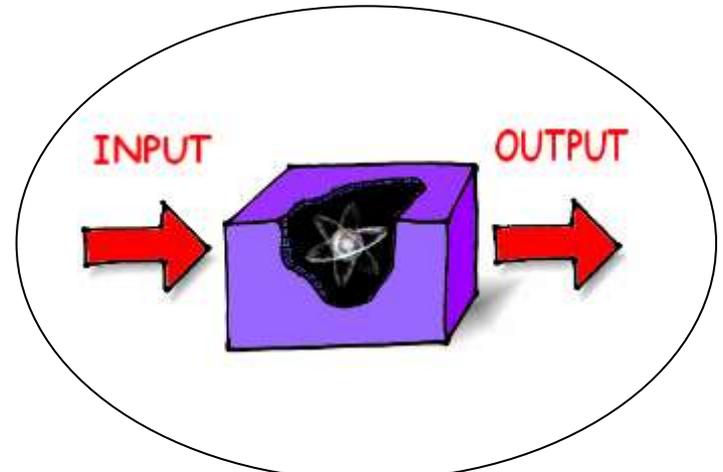
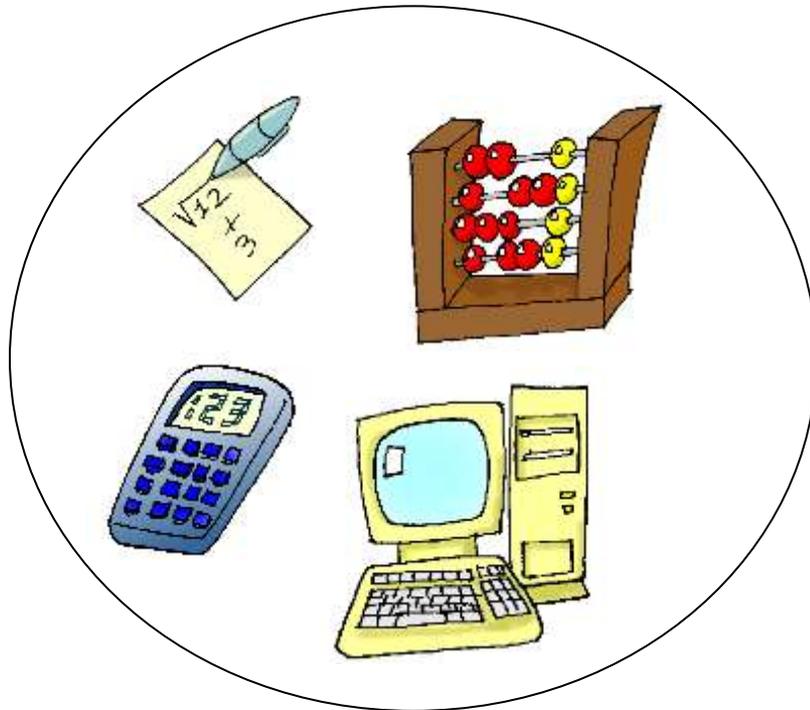
# L'idea di Feynman

“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...

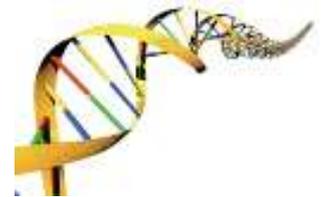
- **Crittografia**

- “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
- ....



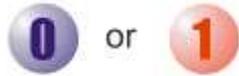
- **Andare oltre i propri limiti**

- 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!

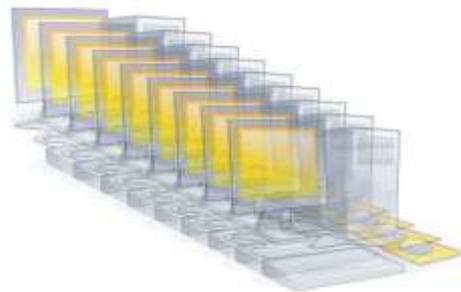
*Cioè  $2^N$  operazioni in un solo passaggio!*

# 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”



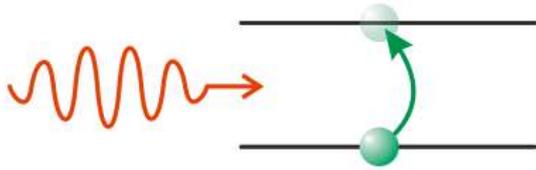
Se la mia macchina è caratterizzata da N qubit, avrò il parallelo di  $2^N$  stati

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

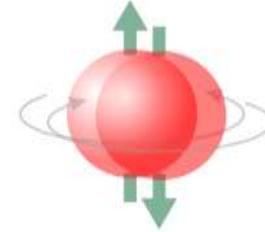
# Come si costruisce un computer quantistico?

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

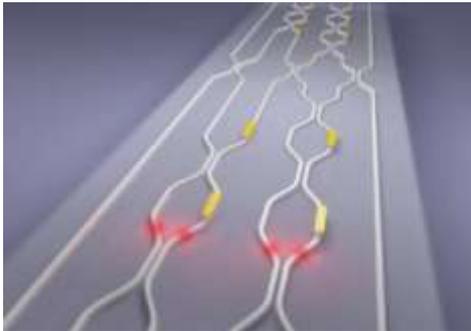
Livelli atomici



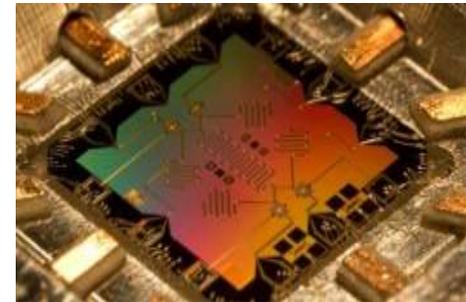
Spin atomici



Fotoni



Superconduttori

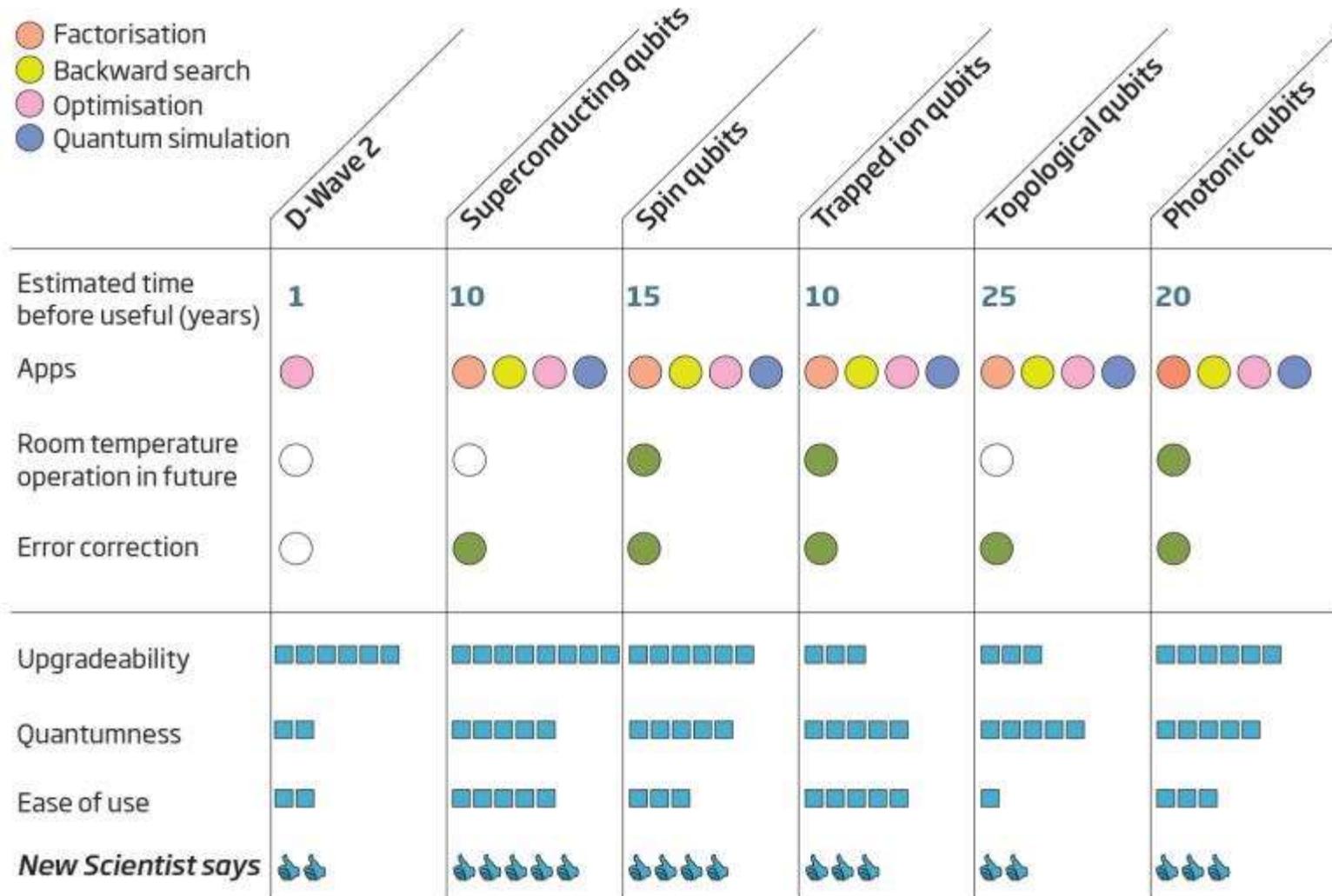


# Quanto siamo lontani?

## 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



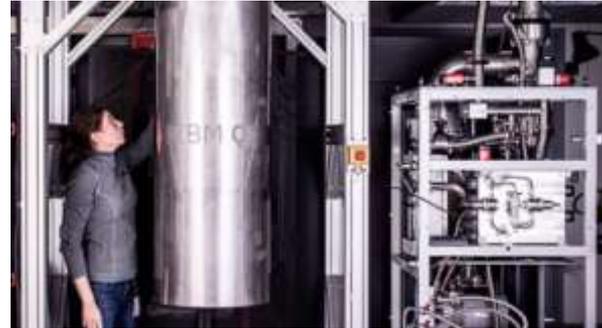
# Dove siamo?

## 2013 D-Wave two



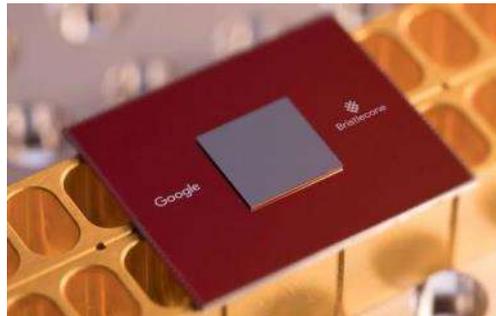
512 «qubits»

## 2016 IBM Quantum Experience



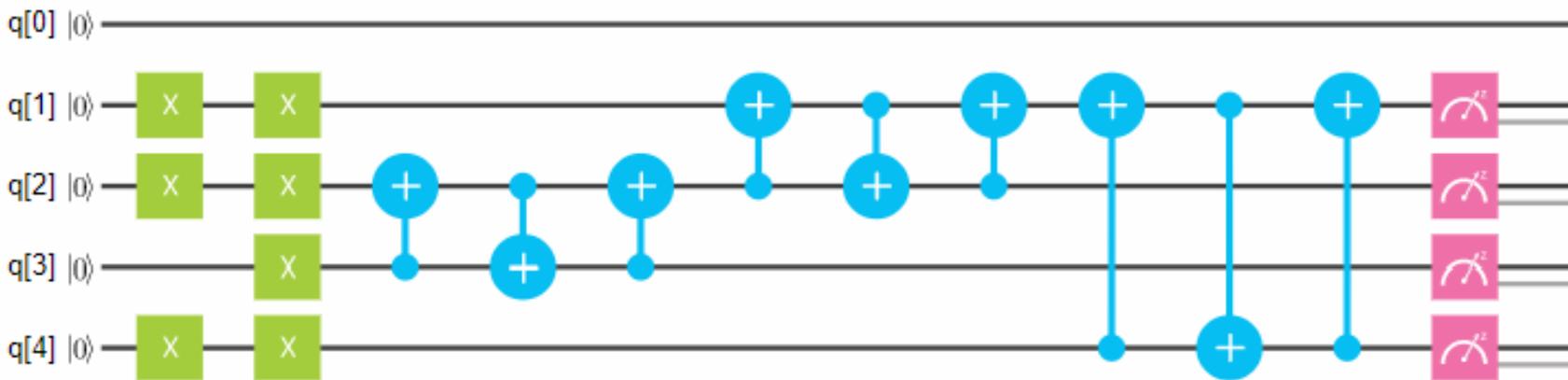
20 qubits – «cloud»

## 2018 Google Bristlecone Quantum Processor



72 qubits

# Algoritmi quantistici



IBM Q: [quantumexperience.ng.bluemix.net](https://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

```

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!*