Tecnologie quantistiche

dal computer quantistico alle telecomunicazioni

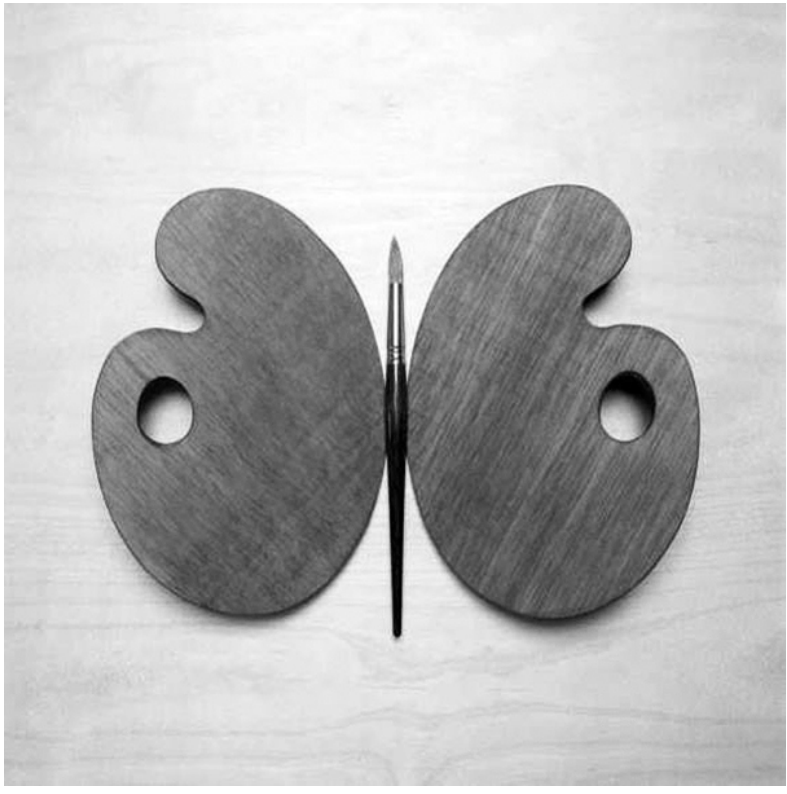
Lorenzo Maccone

Dipartimento di Fisica,
INFN Sez. Pavia,
Universita' di Pavia

maccone@unipv.it

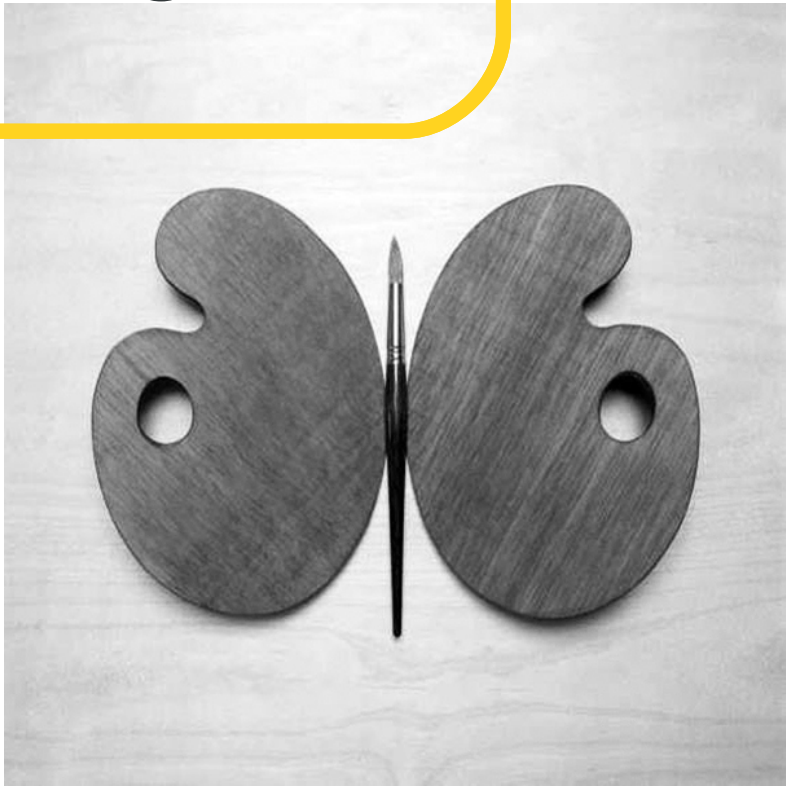
www.qubit.it

Tecnologia quantistica?



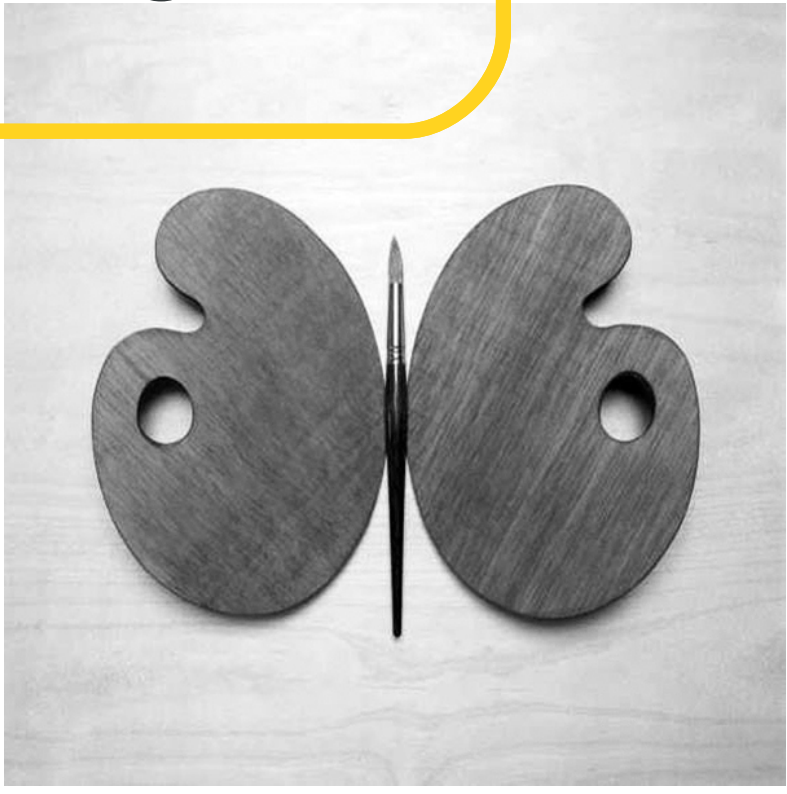
Tecnologia quantistica?

Applicazione della meccanica quantistica a problemi tecnologici



Tecnologia quantistica?

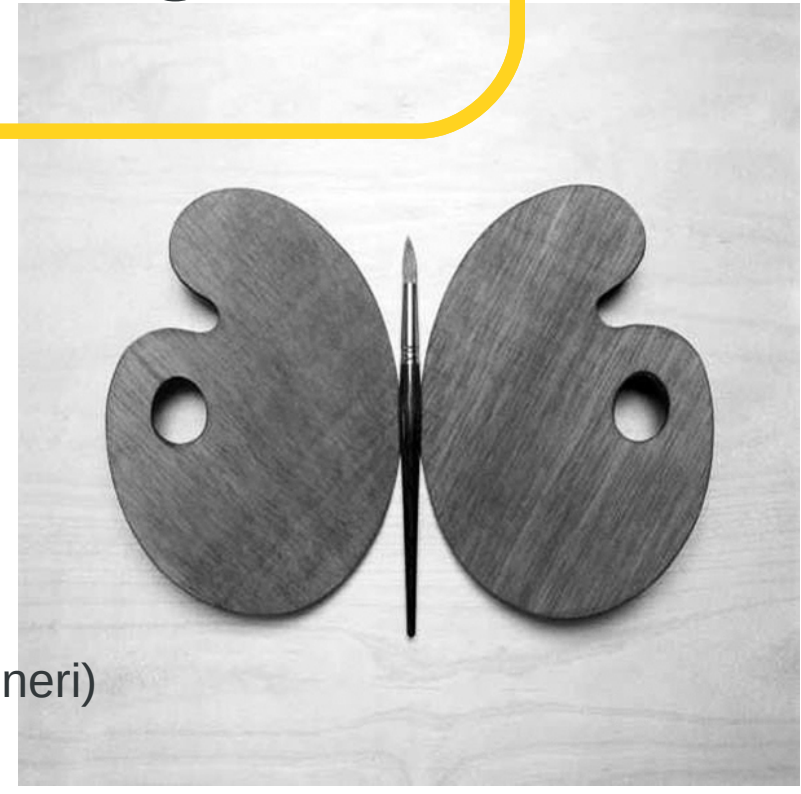
Applicazione della meccanica quantistica a problemi tecnologici



Oggi e' ambito di ricerca avanzata

Tecnologia quantistica?

Applicazione della meccanica quantistica a problemi tecnologici



Oggi e' ambito di ricerca avanzata

(ci lavorano ancora i fisici, piu' che gli ingegneri)

Cos'e' la meccanica quantistica?

Cos'e' la meccanica quantistica?

La teoria fisica che descrive il nostro mondo

Cos'e' la meccanica quantistica?

La teoria fisica che descrive il nostro mondo

Non ne vediamo gli effetti nella vita di tutti i giorni: I nostri sensi sono limitati

Perche' usare la meccanica quantistica?

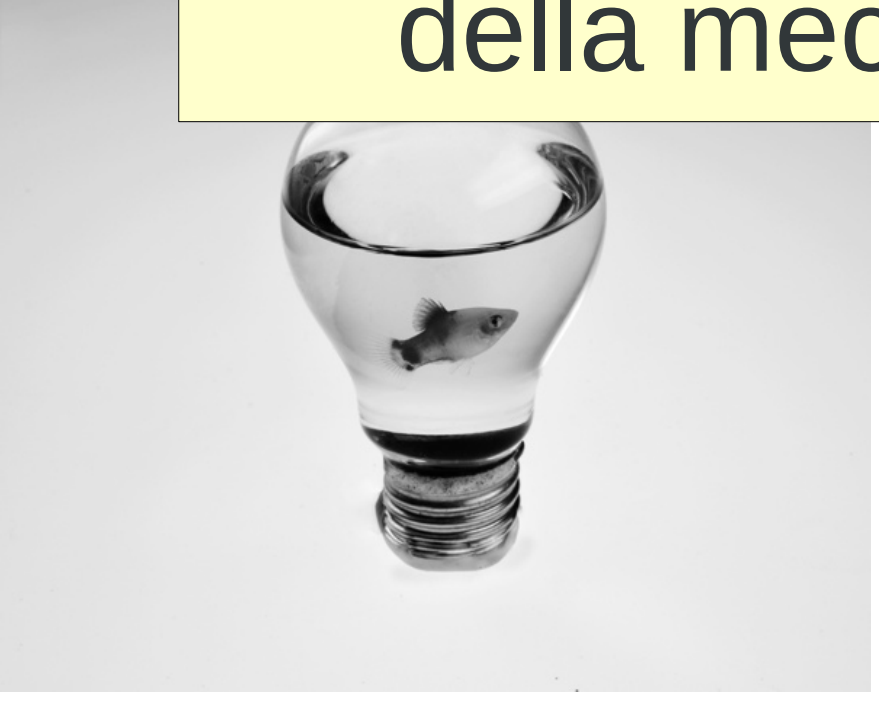
Perche' usare la meccanica quantistica?

Viviamo in un mondo quantistico, ma nella vita di tutti i giorni ne vediamo una minima parte (il sottoinsieme descritto dalla fisica classica).

Perche' usare la meccanica quantistica?

Viviamo in un mondo quantistico, ma nella vita di tutti i giorni ne vediamo una minima parte (il sottoinsieme descritto dalla fisica classica).

Quale e' l'aspetto veramente nuovo della meccanica quantistica?



Complementarieta'!

Complementarieta'!

Ogni sistema ha **proprieta' complementari,** che **non** possono essere contemporanea-mente conosciute con precisione

Complementarieta'!

Ogni sistema ha **proprieta' complementari,** che **non** possono essere contemporanea-mente conosciute con precisione

proprietà: qualcosa che si può misurare, per esempio la posizione, la velocità, il peso

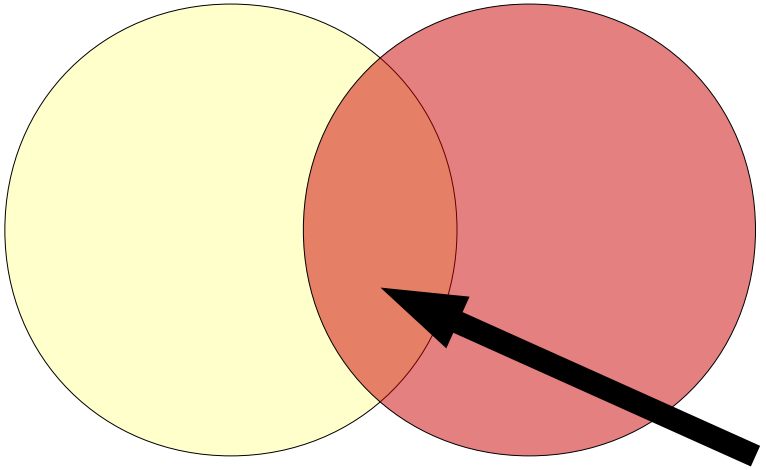
Complementarieta'!

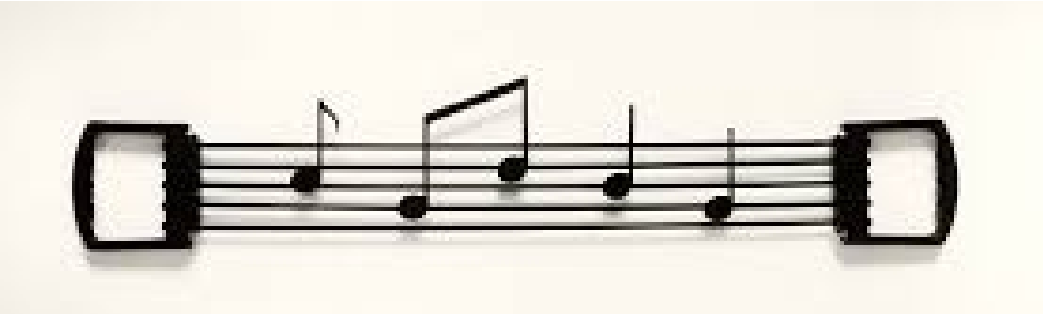
Ogni sistema ha **proprieta' complementari,** che **non** possono essere contemporanea-mente conosciute con precisione

proprietà: qualcosa che si può misurare, per esempio la posizione, la velocità, il peso

Proprieta' complementari si ottengono “sovrapponendo”: principio di sovrapposizione q.

Metafora per la complementarietà:

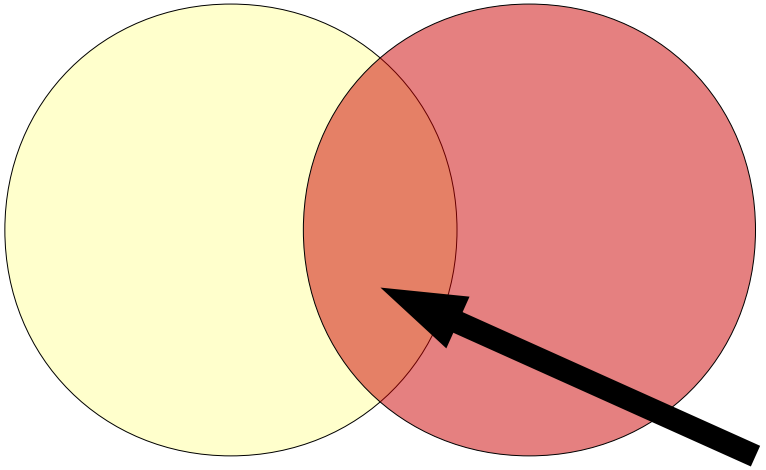


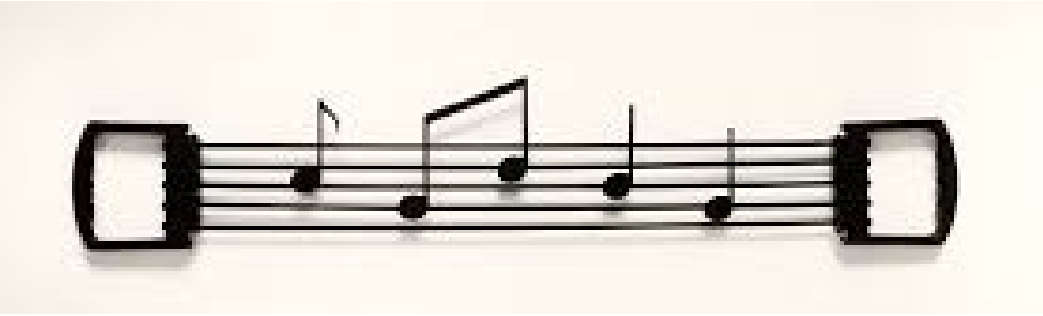


arancione è giallo+rosso

“arancionità” è complementare a giallo/rosso

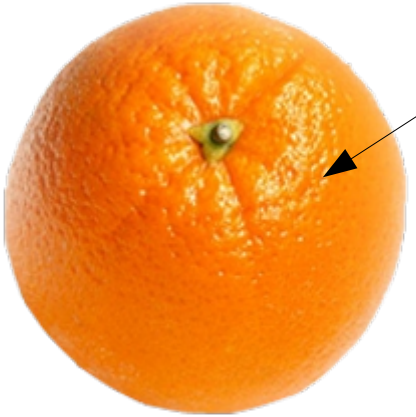
Metafora per la complementarietà:





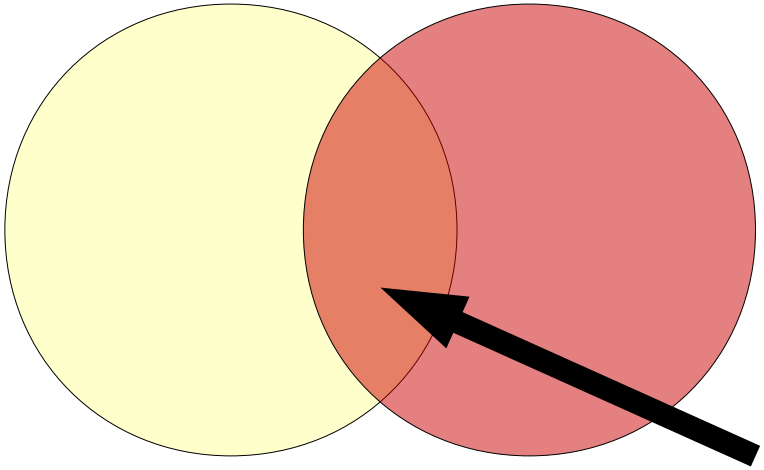
arancione è giallo+rosso

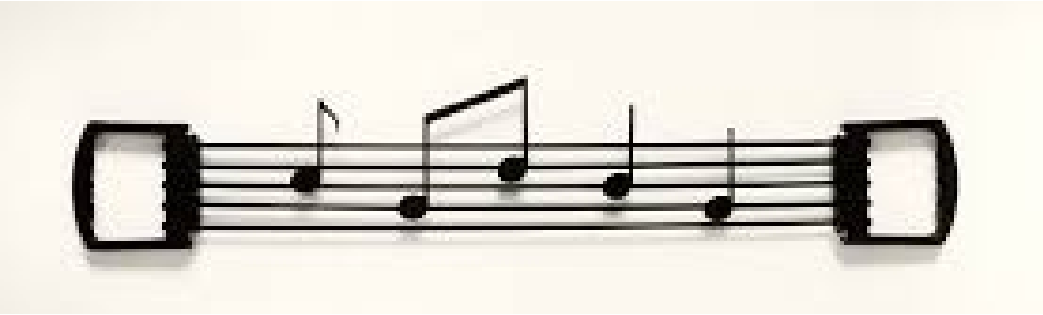
“arancionità” è complementare a giallo/rosso



arancia non è nè gialla nè rossa, è contemporaneamente gialla e rossa.

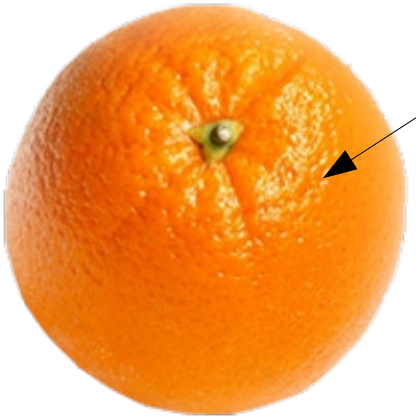
Metafora per la complementarietà:





arancione è giallo+rosso

“arancionità” è complementare a giallo/rosso



metafora incompleta:
riguarda un'unica proprietà (colore),
mentre la complementarietà
quantistica riguarda proprietà diverse
(posizione, velocità,etc.)

Relazioni di indeterminazione di Heisenberg

conseguenza dell'esistenza di proprieta' complementari

piu' conosco bene una proprieta'

meno conosco bene le sue proprieta' complementari

Relazioni di indeterminazione di Heisenberg

conseguenza dell'esistenza di proprieta' complementari

piu' conosco bene una proprieta'

meno conosco bene le sue proprieta' complementari

esempio: posizione e momento

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Per la nostra mente non abituata a concetti quantistici, questo è difficile (impossibile?) da “capire”:

cosa vuol dire che la posizione della mia auto non è definita?! Dov'è la mia auto!?

Non vediamo la complementarietà (e l'indeterminazione) nella vita di tutti i giorni.

Conosciamo sia la posizione che la velocità della nostra auto (SPERIAMO!)

Non vediamo la complementarietà (e l'indeterminazione) nella vita di tutti i giorni.

Conosciamo sia la posizione che la velocità della nostra auto (SPERIAMO!)

perchè non conosciamo nessuna delle due molto precisamente: se sapessimo che l'auto ha una velocità di 50.123153428941234132142412... Km/h (32 cifre), perderemmo informazione sulla sua posizione per qualche cm.

Non vediamo la complementarietà (e l'indeterminazione) nella vita di tutti i giorni.

Conosciamo sia la posizione che la velocità della nostra auto (SPERIAMO!)

perchè non conosciamo nessuna delle due molto precisamente: se sapessimo che l'auto ha una velocità di 50.12315342894123413214241 2... Km/h (32 cifre), perderemmo informazione sulla sua posizione per qualche cm.

Il record di misura più precisa al mondo è 18 cifre!!!

La complementarieta' deriva dall'ignoranza?

Posso dire che la proprieta' complementare ha un valore intrinseco **sconosciuto?**

La complementarieta' deriva dall'ignoranza?

Posso dire che la proprieta' complementare ha un valore intrinseco **sconosciuto?**

NOOOOO!!!!!

La complementarieta' deriva dall'ignoranza?

Posso dire che la proprieta' complementare ha un valore intrinseco **sconosciuto?**

NOOOOO!!!!!

Devo dire che la proprieta' ***non ha valore*** prima della misura!

La complementarieta' deriva dall'ignoranza?

Posso dire che la proprieta' complementare ha un valore intrinseco **sconosciuto?**

NOOOOO!!!!!

Devo dire che la proprieta' ***non ha valore*** prima della misura!

Perche'?!

La complementarieta' deriva dall'ignoranza?

Posso dire che la proprieta' complementare ha un valore intrinseco **sconosciuto?**

NOOOOO!!!!!

Devo dire che la proprieta' ***non ha valore*** prima della misura!

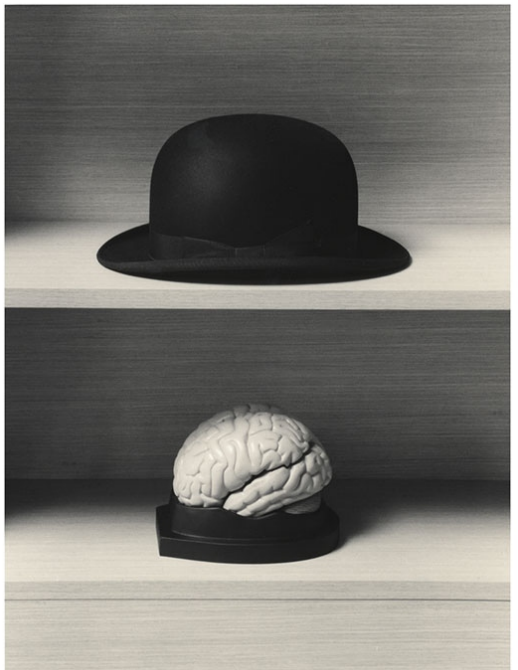
Perche'?! ➡ T. di Bell

T. Bell: la meccanica quantistica e'

“non counterfactual definite”

(cioe' le proprieta' non hanno valori predefiniti senza una misura)

oppure nonlocale in senso Einsteiniano

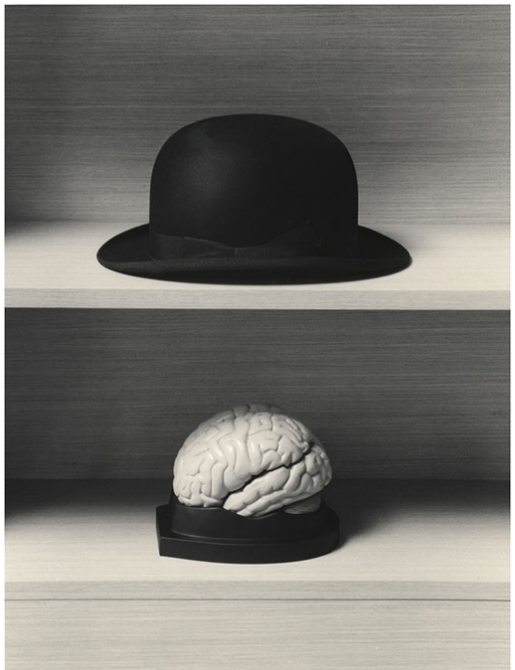


T. Bell: la meccanica quantistica e'

“non counterfactual definite”

(cioe' le proprieta' non hanno valori predefiniti senza una misura)

~~oppure nonlocale in senso Einsteiniano~~



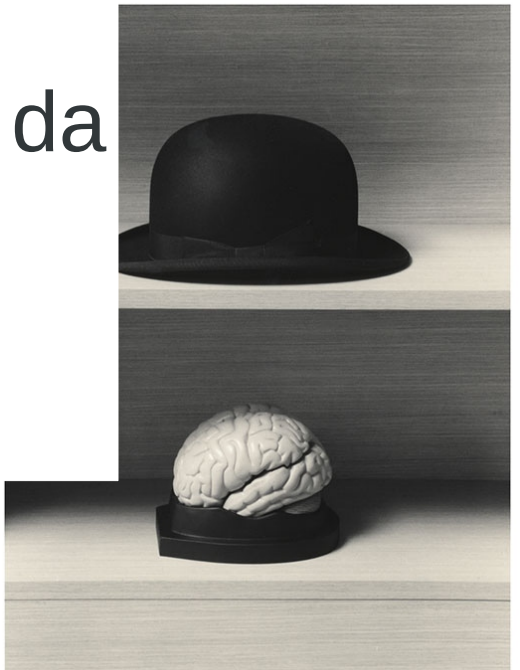
T. Bell: la meccanica quantistica e'

“non counterfactual definite”

(cioe' le proprieta' non hanno valori predefiniti senza una misura)

~~oppure nonlocale in senso Einsteiniano~~

dimostrazione:
una disuguaglianza che e' soddisfatta da **tutte** le teorie CD e LOCALI.



T. Bell: la meccanica quantistica e'

“non counterfactual definite”

(cioe' le proprieta' non hanno valori predefiniti senza una misura)

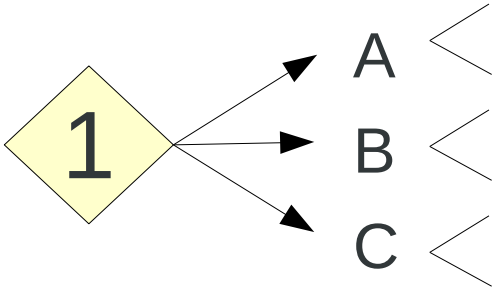
~~oppure nonlocale in senso Einsteiniano~~

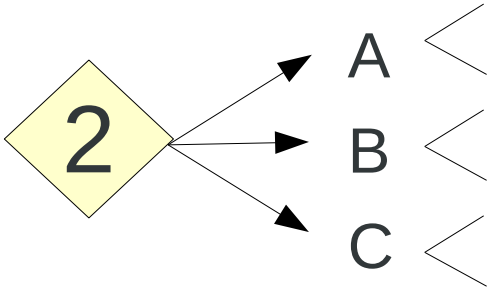
dimostrazione:
una disuguaglianza che e' soddisfatta da **tutte** le teorie CD e LOCALI.

La MQ viola questa disuguaglianza, quindi o non vale CD o non vale LOCALITA'

Disuguaglianza di Bell

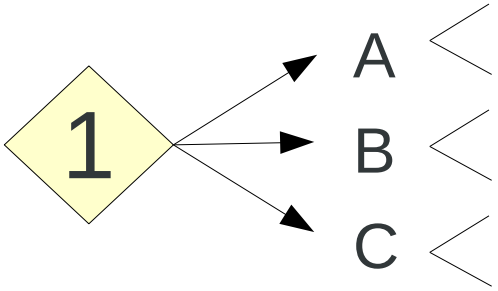
tre proprieta' dicotomiche di due oggetti

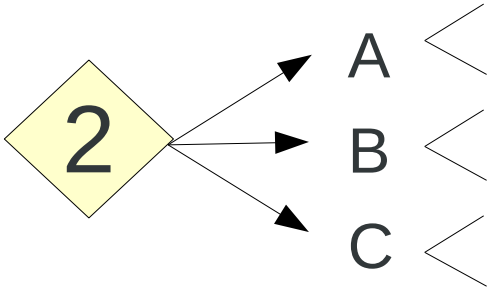




Disuguaglianza di Bell

tre proprieta' dicotomiche di due oggetti



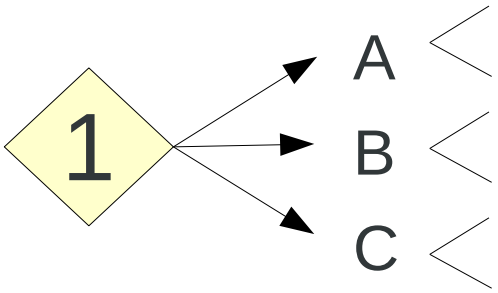


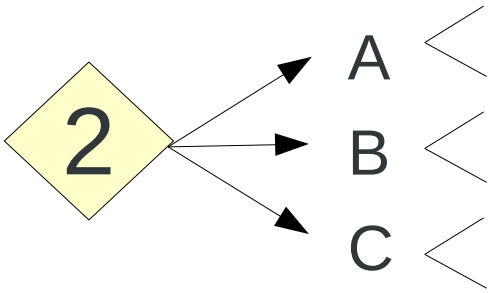
due monete:

- A: d'oro o di rame
- B: liscia o ruvida
- C: grande o piccola

Disuguaglianza di Bell

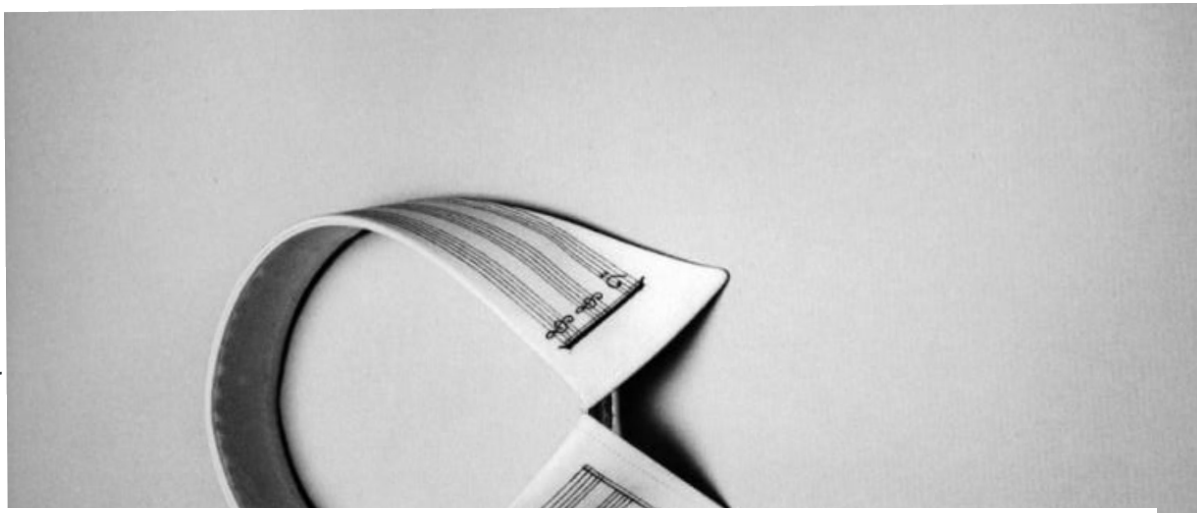
tre proprieta' dicotomiche di due oggetti





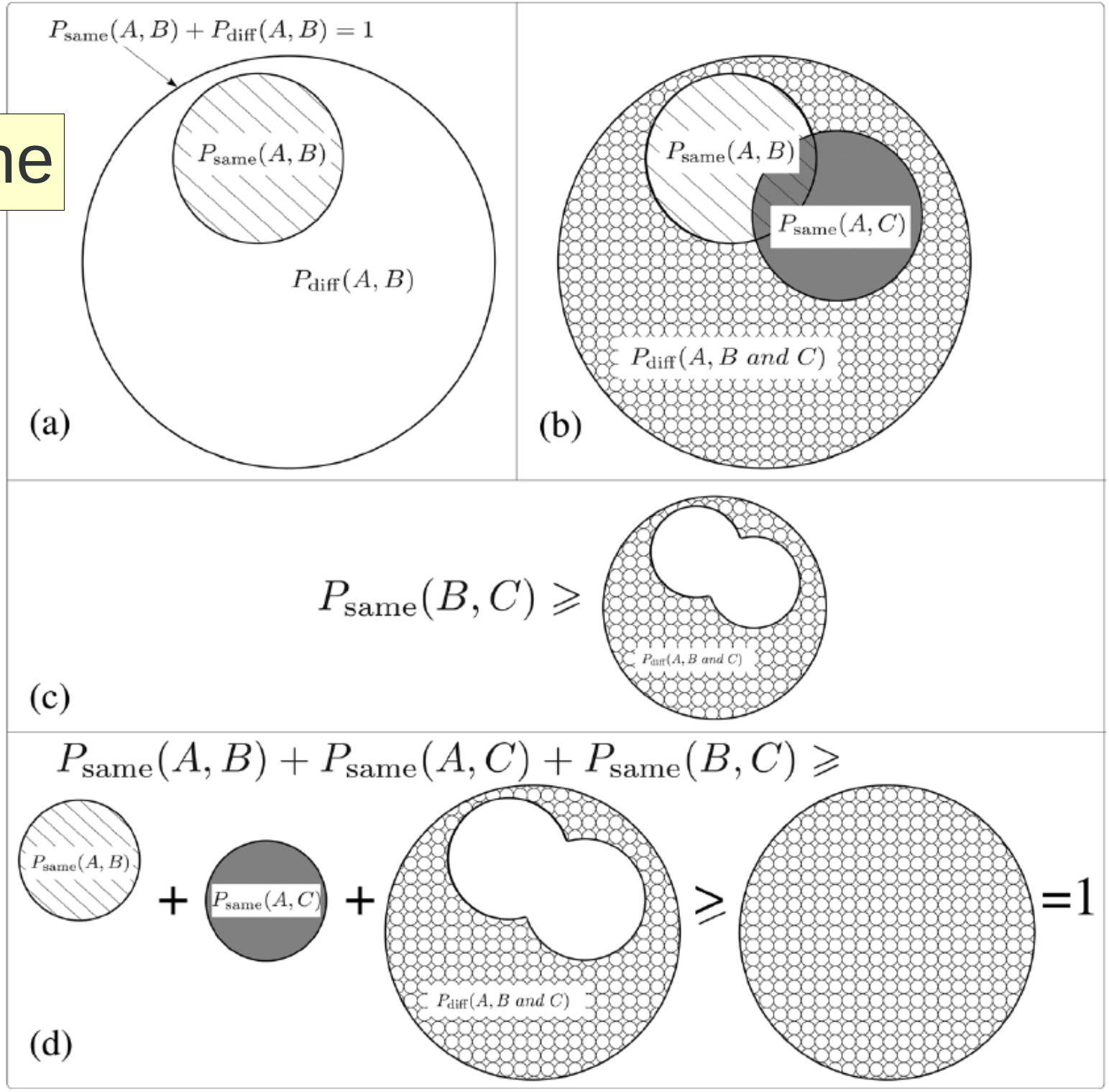
due monete:

- A: d'oro o di rame
- B: liscia o ruvida
- C: grande o piccola



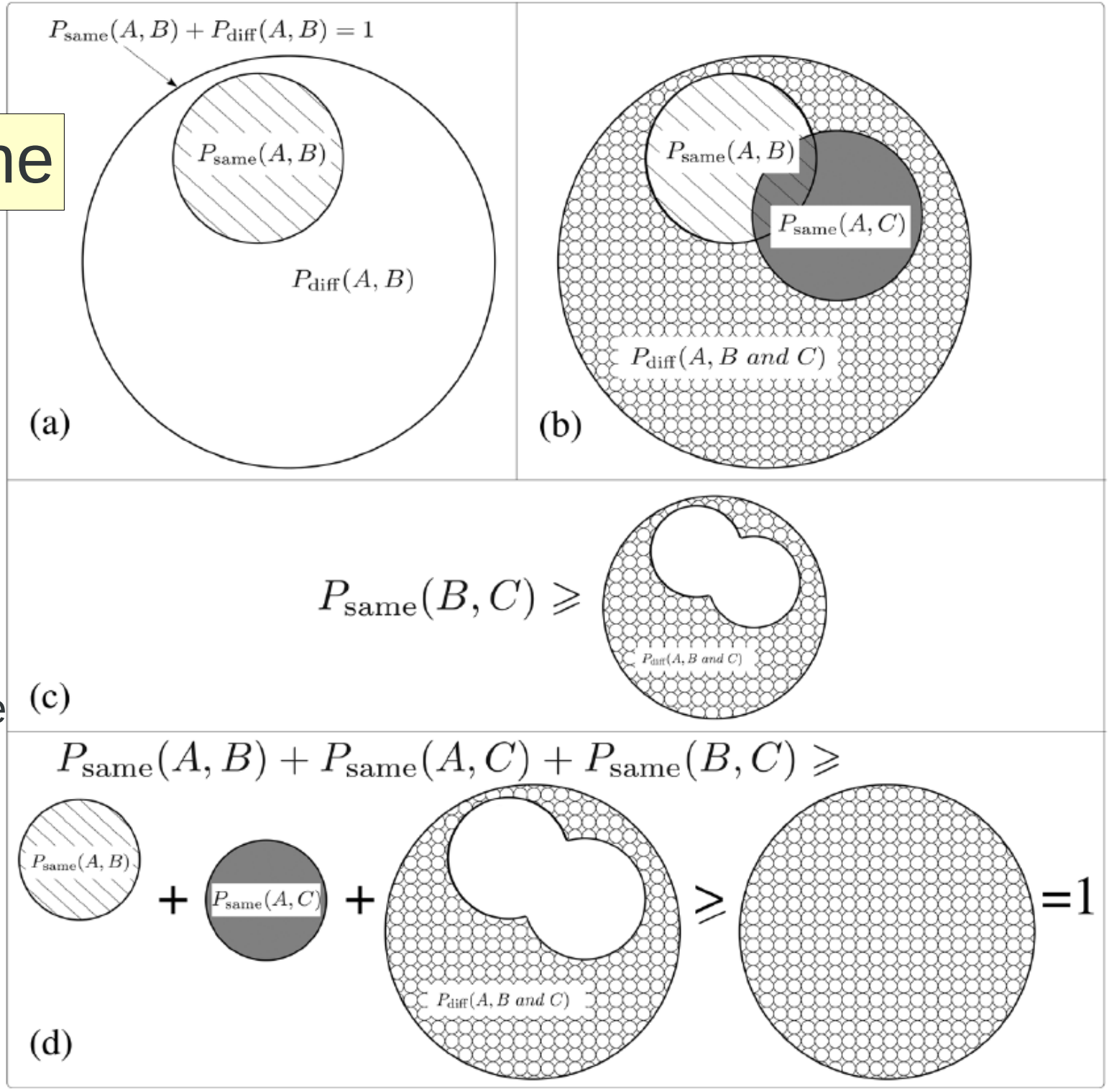
$$P_{\text{same}}(A,B) + P_{\text{same}}(A,C) + P_{\text{same}}(B,C) \geq 1$$

Dimostrazione



Dimostrazione

dimostrazione non vale se la misura di una proprieta' modifica l'altra (nonlocalita') oppure se non posso assegnare le tre probabilita' contemporaneamente (non CD)



MQ viola disuguaglianza di Bell

Due sistemi a due livelli con le proprieta':

$$A:\begin{cases}|a_0\rangle \equiv |0\rangle \\ |a_1\rangle \equiv |1\rangle,\end{cases} \qquad B:\begin{cases}|b_0\rangle \equiv \frac{1}{2}|0\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|1\rangle \\ |b_1\rangle \equiv \frac{\sqrt{3}}{2}|0\rangle - \frac{1}{2}|1\rangle,\end{cases} \qquad C:\begin{cases}|c_0\rangle \equiv \frac{1}{2}|0\rangle - \frac{\sqrt{3}}{2}|1\rangle \\ |c_1\rangle \equiv \frac{\sqrt{3}}{2}|0\rangle + \frac{1}{2}|1\rangle.\end{cases}$$

$$|\Phi^+\rangle = \frac{|a_0a_0\rangle + |a_1a_1\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{|b_0b_0\rangle + |b_1b_1\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{|c_0c_0\rangle + |c_1c_1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$P_{\text{same}}(A,B) + P_{\text{same}}(A,C) + P_{\text{same}}(B,C) = \frac{3}{4} < 1$$

Recap:

Recap:

- MQ ha proprieta' complementari

Recap:

- MQ ha proprieta' complementari

- non posso conoscere contemporaneamente i valori di proprieta' complementari (e.g. posiz-momento)

Recap:

- MQ ha proprieta' complementari

- non posso conoscere contemporaneamente i valori di proprieta' complementari (e.g. posiz-momento)

- questa impossibilita' NON viene da ignoranza di valori pre-esistenti

Recap:

- MQ ha proprieta' complementari

- non posso conoscere contemporaneamente i valori di proprieta' complementari (e.g. posiz-momento)

- questa impossibilita' NON viene da ignoranza di valori pre-esistenti

teorema di Bell: Se ci fossero valori pre-esistenti (CD) e la teoria e' locale, allora dovrebbe valere la disuguaglianza. Invece non vale.

Recap:

- MQ ha proprieta' complementari

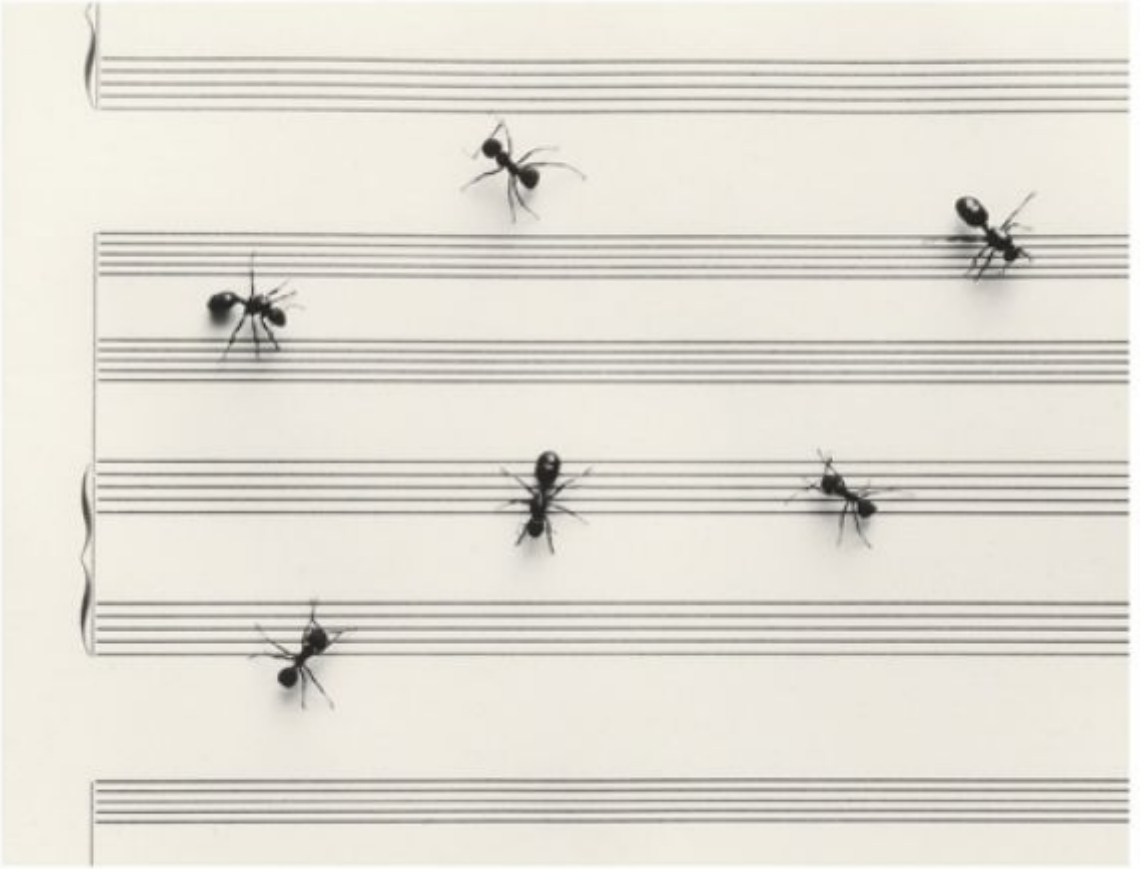
- non posso conoscere contemporaneamente i valori di proprieta' complementari (e.g. posiz-momento)

- questa impossibilita' NON viene da ignoranza di valori pre-esistenti

teorema di Bell: Se ci fossero valori pre-esistenti (CD) e la teoria e' locale, allora dovrebbe valere la disuguaglianza. Invece non vale.

- proprieta' complementari non hanno valori pre-esistenti alla misura

Torniamo alle tecnologie quantistiche....



Visto che il nostro mondo e' quantistico, perche' limitare la nostra tecnologia al sottoinsieme classico?!

Visto che il nostro mondo e' quantistico, perche' limitare la nostra tecnologia al sottoinsieme classico?!

Tecnologie quantistiche

- Trasmissione di info
- Misurazioni ultraprecise
- Crittografia
- Computazione avanzata
- Aumento nell'efficienza di motori, celle fotovoltaiche, etc.
- Aumento della velocita' dei computer
- etc....

Cosa si guadagna a usare MQ?

Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono gia' risolti efficientemente con MC

Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono gia' risolti efficientemente con MC

Altri problemi: MOLTO!

Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono gia' risolti efficientemente con MC

Altri problemi: MOLTO!

Uno degli scopi principali oggi delle quantum technologies:

Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono gia' risolti efficientemente con MC

Altri problemi: MOLTO!

Uno degli scopi principali oggi delle quantum technologies:

scoprire nuovi ambiti dove MQ aiuta!

la ricerca oggi in Europa

la ricerca oggi in Europa

Quantum technologies flagship:

L'Europa oggi ha deciso di investire (10^9 euro) sulle tecnologie quantistiche, realizzando che la tecnologia del futuro sara' basata sulla MQ.

la ricerca oggi in Europa

Quantum technologies flagship:

L'Europa oggi ha deciso di investire (10^9 euro) sulle tecnologie quantistiche, realizzando che la tecnologia del futuro sara' basata sulla MQ.

OTTIME PROSPETTIVE DI CARRIERA NELLA RICERCA NEI PROSSIMI 10 ANNI in Europa

la ricerca oggi in Europa

Quantum technologies flagship:

L'Europa oggi ha deciso di investire (10^9 euro) sulle tecnologie quantistiche, realizzando che la tecnologia del futuro sara' basata sulla MQ.

OTTIME PROSPETTIVE DI CARRIERA NELLA RICERCA NEI PROSSIMI 10 ANNI in Europa

Consiglio a chi vuole fare ricerca:

la ricerca oggi in Europa

Quantum technologies flagship:

L'Europa oggi ha deciso di investire (10^9 euro) sulle tecnologie quantistiche, realizzando che la tecnologia del futuro sara' basata sulla MQ.

OTTIME PROSPETTIVE DI CARRIERA NELLA RICERCA NEI PROSSIMI 10 ANNI in Europa

Consiglio a chi vuole fare ricerca:

FATE CIO' CHE VI PIACE

(ma se questo argomento vi piace, senz'altro conviene approfondire)

Di cosa stiamo parlando?!?

Esempi di tecnologie quantistiche

- Quantum computer

  computazioni rapidissime

- Metrologia quantistica

  misure alla precisione ultima

- telecomunicazioni

  trasmissione di informazione

Cos'e' un computer quantistico?

Cos'e' un computer quantistico?

un computer che utilizza fenomeni quantistici per svolgere computazioni

Cos'e' un computer quantistico?

un computer che utilizza fenomeni quantistici per svolgere computazioni

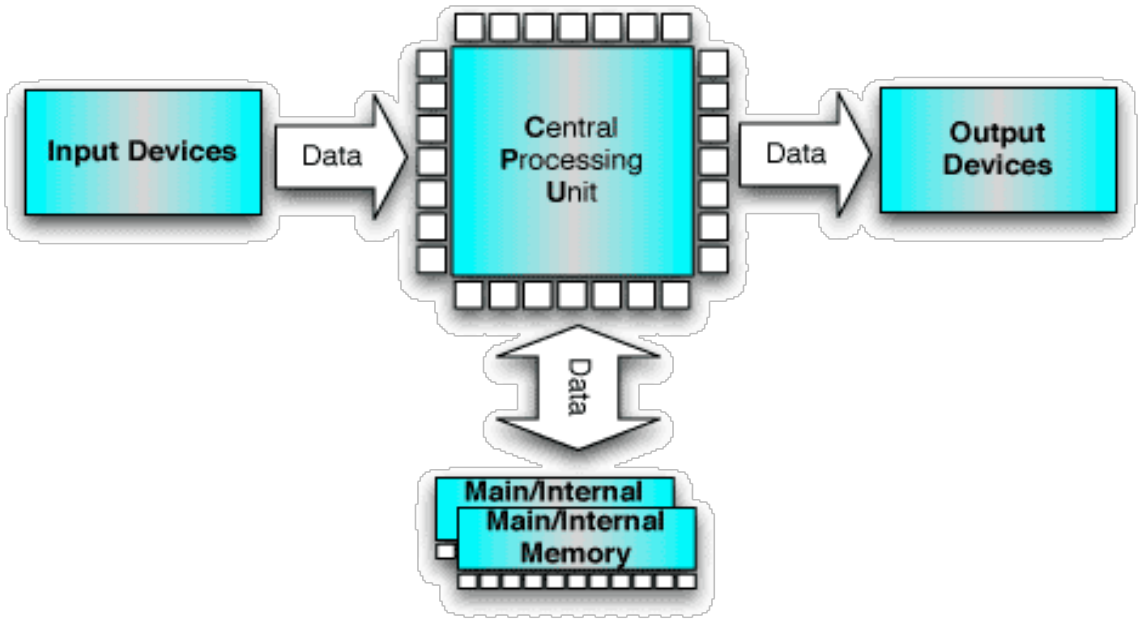
- Complementarieta' (principio di sovrapposizione)
- Entanglement

Cosa ci si guadagna ad usare un quantum computer?

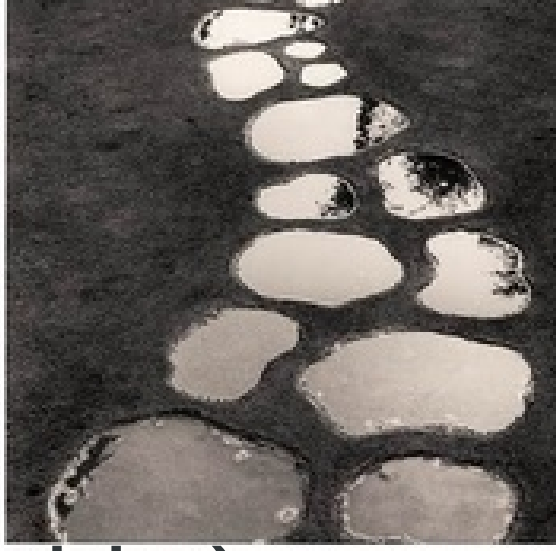
Cosa ci si guadagna ad usare un quantum computer?

Puo' svolgere tutte le computazioni di un computer classico, ma e' molto piu' veloce per alcuni calcoli (non per tutti)

Come funziona?

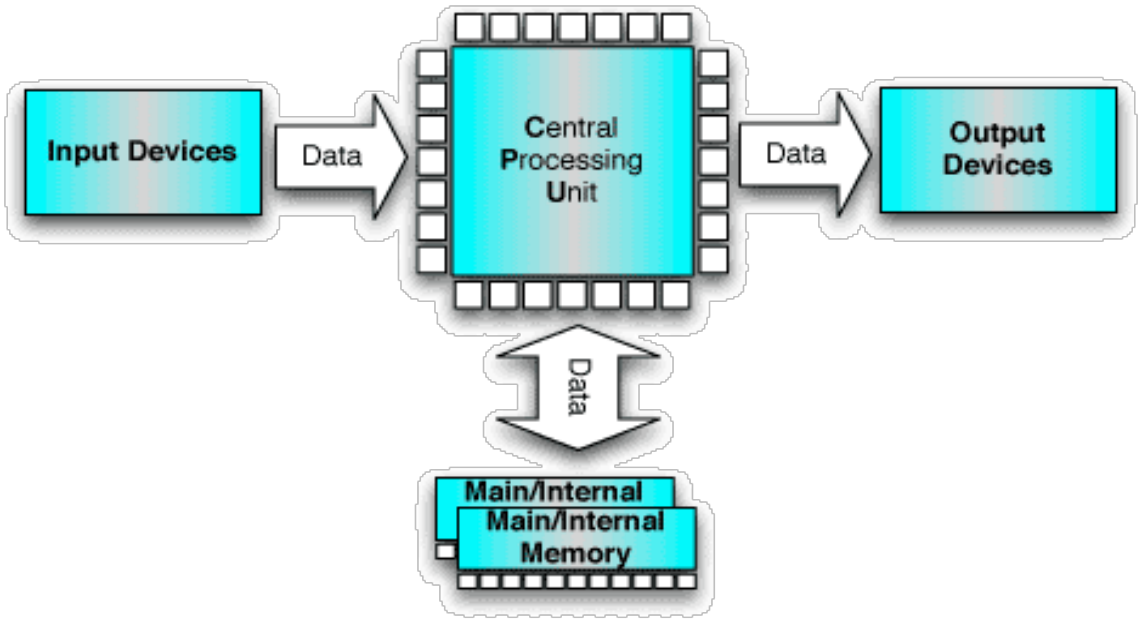


Come funziona?

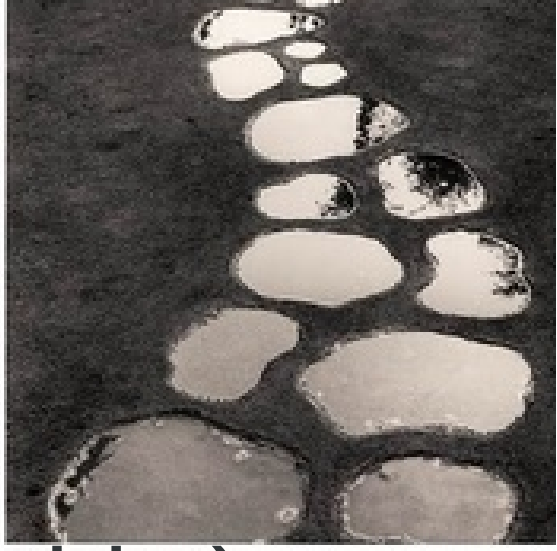


Computer classico:

input: informazione (codificata in bits)

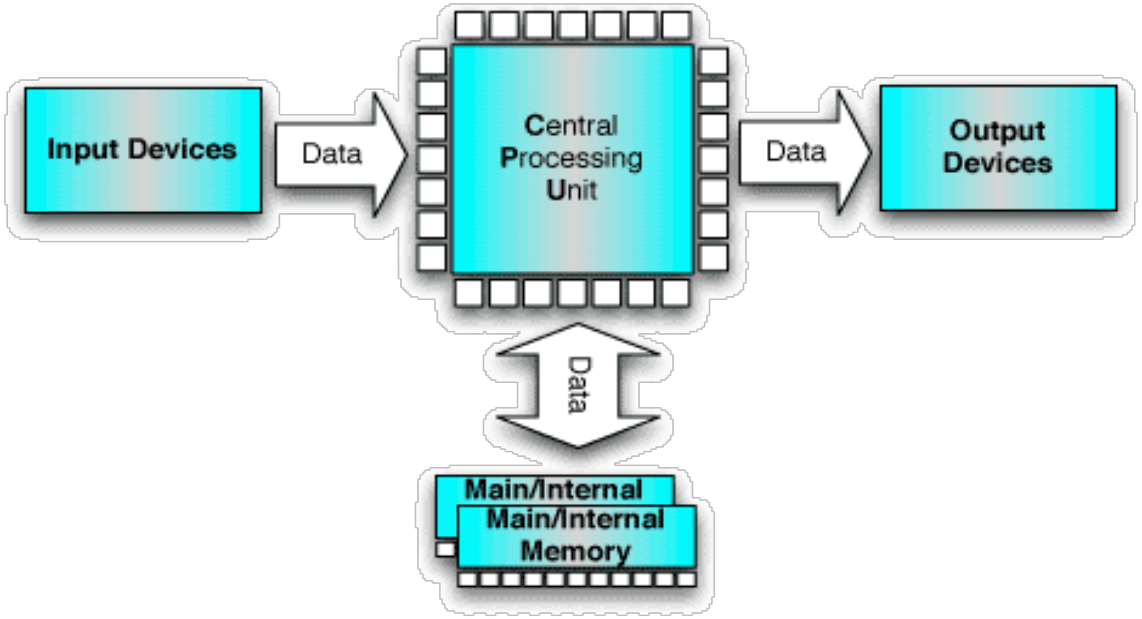


Come funziona?

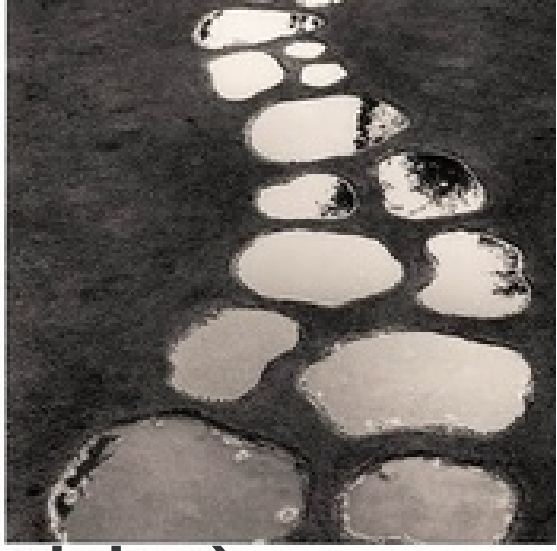


Computer classico:

input: informazione (codificata in bits)
elaborazione: circuiti elettronici (svolgono operazioni matematiche sui bits)

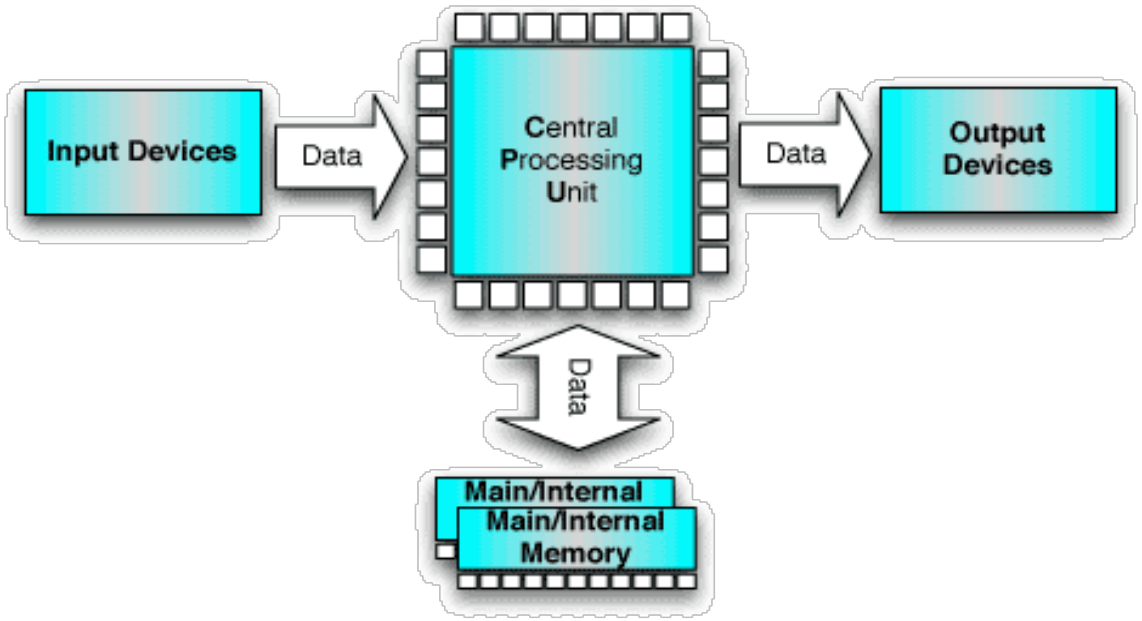


Come funziona?



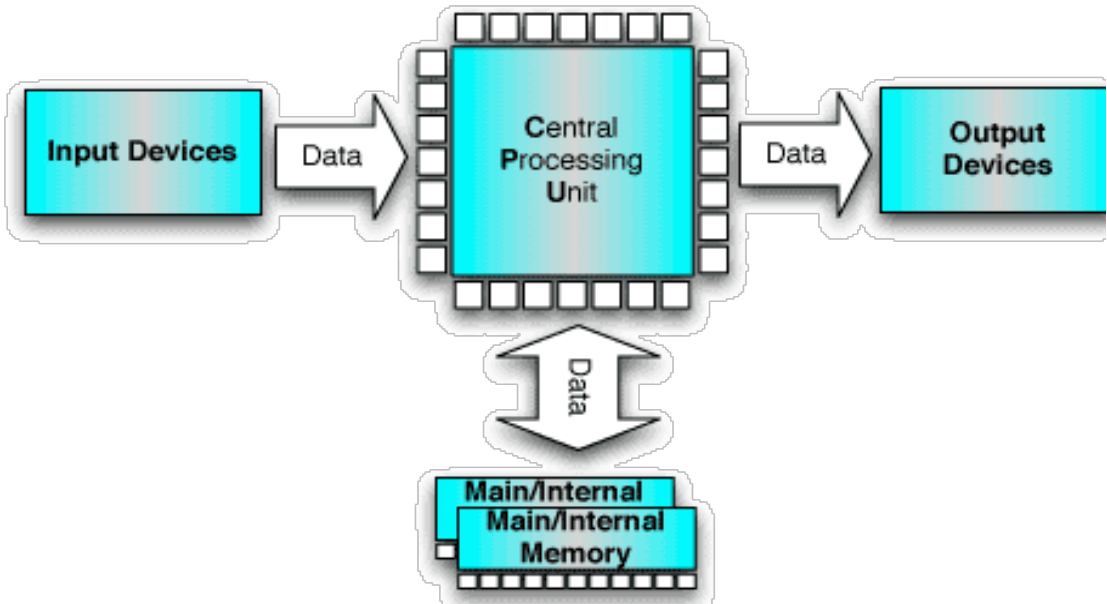
Computer classico:

input: informazione (codificata in bits)
elaborazione: circuiti elettronici (svolgono operazioni matematiche sui bits)
output: risultato



Come funziona?

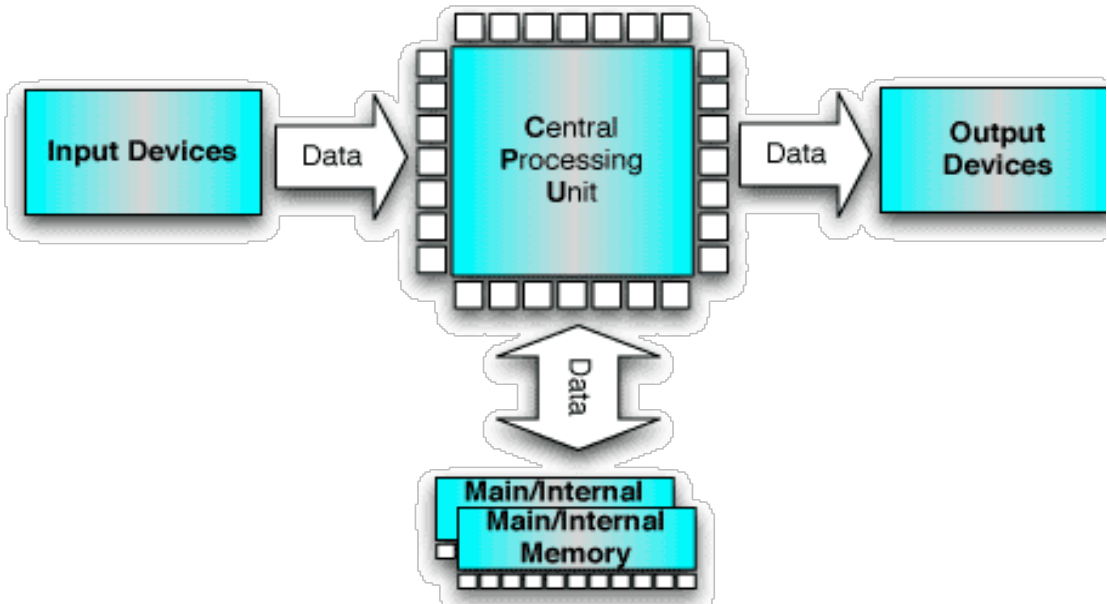
Computer quantistico:



Come funziona?

Computer quantistico:

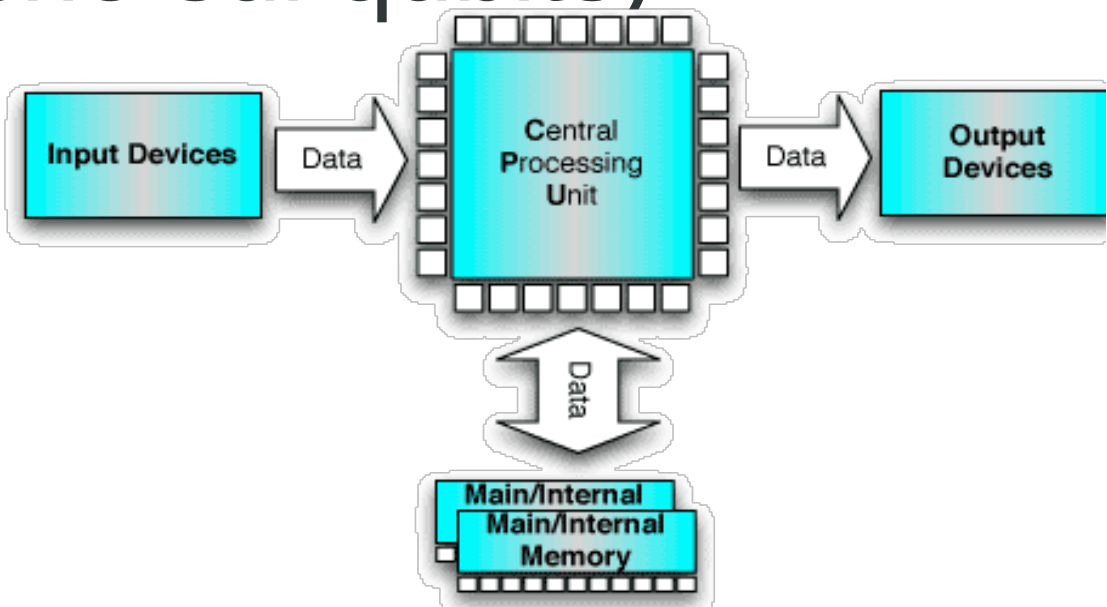
input: informazione (codificata in *quantum* bits: qubits)



Come funziona?

Computer quantistico:

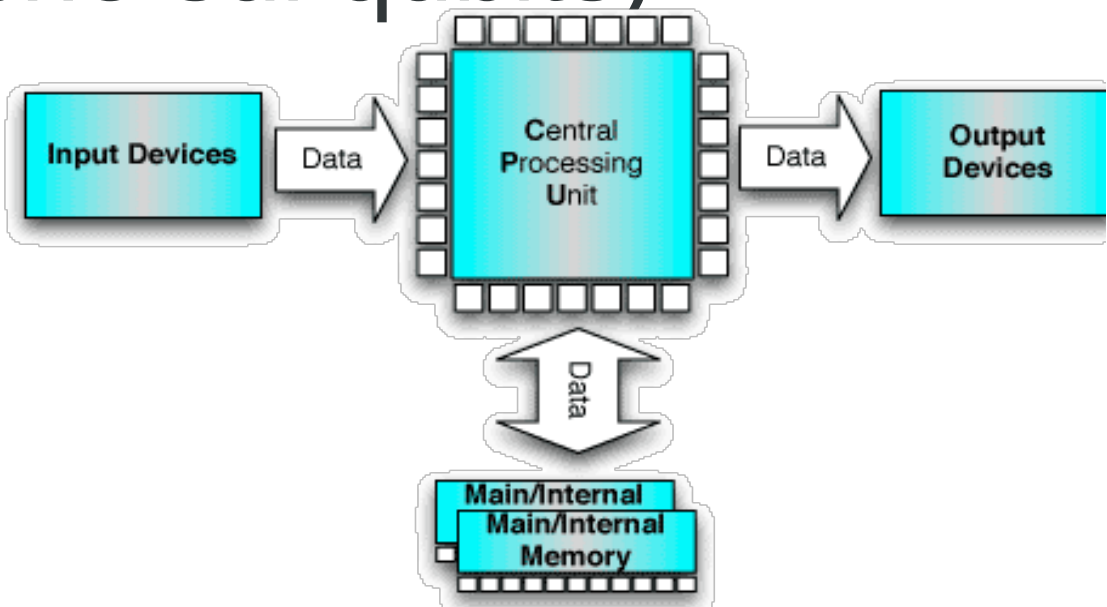
input: informazione (codificata in *quantum* bits: qubits)
elaborazione: circuiti quantistici (svolgono operazioni matematiche sui qubits)



Come funziona?

Computer quantistico:

input: informazione (codificata in *quantum* bits: qubits)
elaborazione: circuiti quantistici (svolgono operazioni matematiche sui qubits)
output: risultato



Cos'e' un qubit?

Cos'e' un qubit?

Un sistema quantistico a due livelli.

Per esempio lo spin di un elettrone: +1/2 e -1/2.

Cos'e' un qubit?

Un sistema quantistico a due livelli.

Per esempio lo spin di un elettrone: +1/2 e -1/2.

Posso chiamare “0” e “1” i due livelli.

Cos'e' un qubit?

Un sistema quantistico a due livelli.

Per esempio lo spin di un elettrone: +1/2 e -1/2.

Posso chiamare “0” e “1” i due livelli.

e' un sistema quantistico: puo' accedere a fenomeni quantistici come la sovrapposizione (complementarieta'), entanglement, etc.

Perche' la complementarieta' e' utile in un computer quantistico?

Sembra piu' che altro una limitazione!

Perche' la complementarieta' e' utile in un computer quantistico?

Sembra piu' che altro una limitazione!

Ma un quantum bit puo' usare le proprieta' complementari di un bit!!!

Perche' la complementarieta' e' utile in un computer quantistico?

Sembra piu' che altro una limitazione!

Ma un quantum bit puo' usare le proprieta' complementari di un bit!!!

proprieta' di un bit: {0, 1}
proprieta' di un qubit: {0,1}; {+,-}; {+i,-i} ...

Perche' la complementarieta' e' utile in un computer quantistico?

Sembra piu' che altro una limitazione!

Ma un quantum bit puo' usare le proprieta' complementari di un bit!!!

proprieta' di un bit: {0, 1}
proprieta' di un qubit: {0,1}; {+,-}; {+i,-i} ...

sono tutte proprieta' complementari: una sola e' conoscibile ad un certo istante, ma se sono abbastanza furbo, posso usarle tutte nella mia computazione

Esempio: algoritmo di Deutsch-Jozsa

ho una scatola che calcola una funzione di un bit: f(0)=a; f(1)=b. Voglio scoprire se a=b, *usando la scatola* ***una*** *volta sola!!*

Esempio: algoritmo di Deutsch-Jozsa

ho una scatola che calcola una funzione di un bit: f(0)=a; f(1)=b. Voglio scoprire se a=b, *usando la scatola* ***una*** *volta sola!!*

uso {+,-} invece di {0,1}: e' complementare, quindi un qubit “+” non e' ne' 0, ne' 1.

In un certo senso e' **contempora-neamente 0 e 1**

Esempio: algoritmo di Deutsch-Jozsa

ho una scatola che calcola una funzione di un bit: f(0)=a; f(1)=b. Voglio scoprire se a=b, *usando la scatola* ***una*** *volta sola!!*

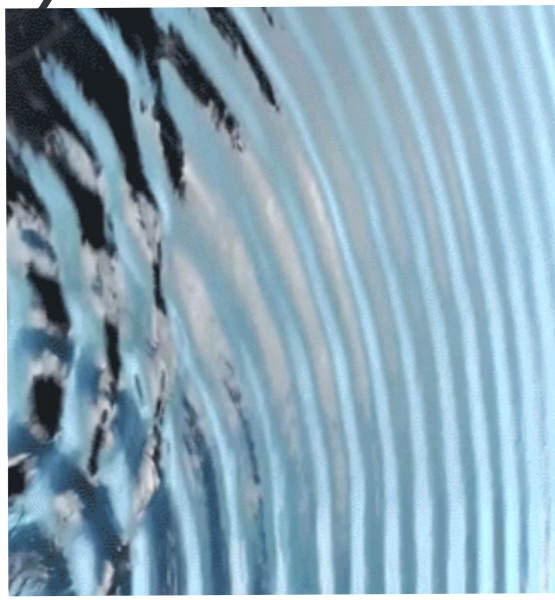
uso {+,-} invece di {0,1}: e' complementare, quindi un qubit “+” non e' ne' 0, ne' 1.

In un certo senso e' **contemporaneamente 0 e 1**

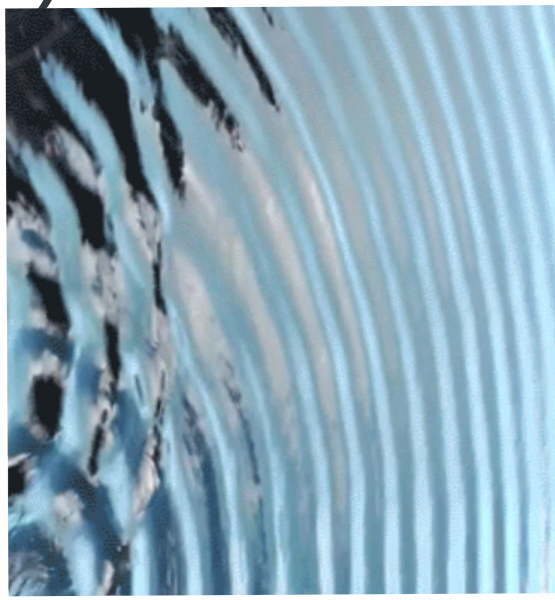
uso **un solo** qubit “+” scopro se a=b!

L'algoritmo di Deutsch-Jozsa (per una scatola con n bits di input) puo' scoprire se una funzione e' bilanciata o costante con un aumento esponenziale in n di velocita' rispetto ad algoritmi classici deterministici. Se uno considera algoritmi classici probabilistici, allora c'e' un incremento di solo un fattore due...

la sovrapposizione c'e' anche in sistemi continui classici (onde in uno stagno)

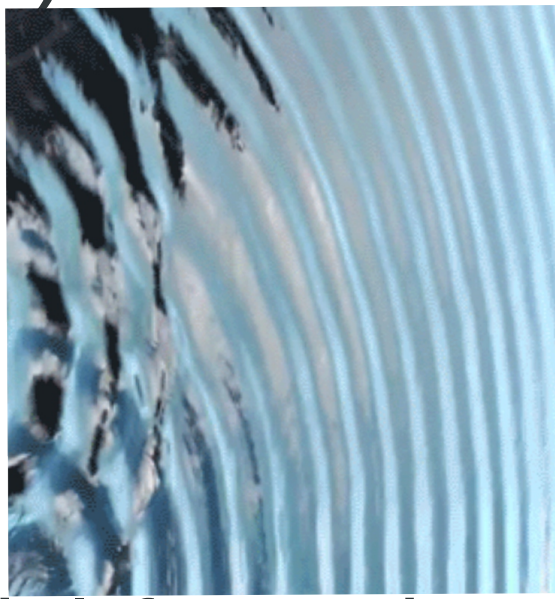


la sovrapposizione c'e' anche in sistemi continui classici (onde in uno stagno)



il quantum computer e' solo un computer analogico?!?

la sovrapposizione c'e' anche in sistemi continui classici (onde in uno stagno)

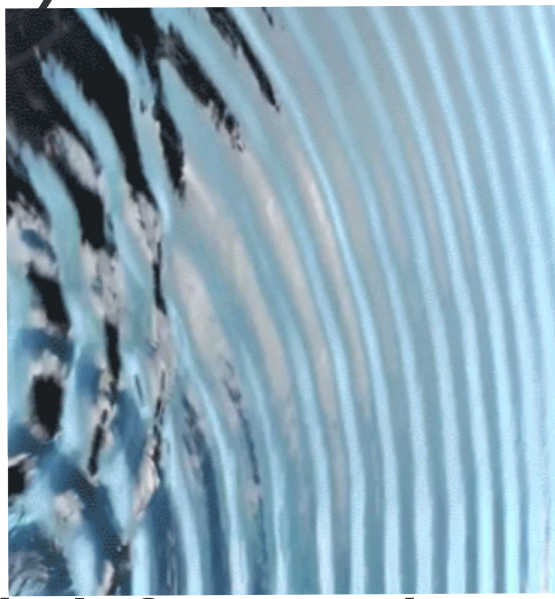


il quantum computer e' solo un computer analogico?!?

NO!

I computer analogici sono limitati dal fatto che basta un minimo errore per rovinare tutto.
E' per questo che usiamo computer digitali!

la sovrapposizione c'e' anche in sistemi continui classici (onde in uno stagno)



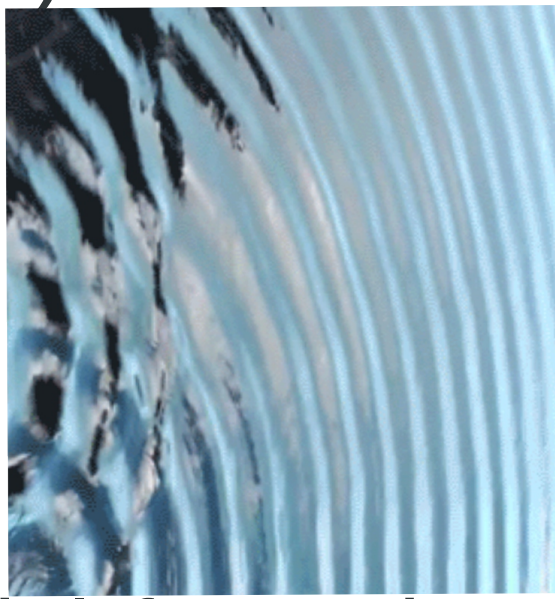
il quantum computer e' solo un computer analogico?!?

NO!

I computer analogici sono limitati dal fatto che basta un minimo errore per rovinare tutto.
E' per questo che usiamo computer digitali!

Quantum error correction (Peter Shor): si possono correggere gli errori.

la sovrapposizione c'e' anche in sistemi continui classici (onde in uno stagno)



il quantum computer e' solo un computer analogico?!?

NO!

I computer analogici sono limitati dal fatto che basta un minimo errore per rovinare tutto.
E' per questo che usiamo computer digitali!

Quantum error correction (Peter Shor): si possono correggere gli errori.

il QC ha i vantaggi di computer analogici e digitali

cos'e' l'entanglement?

cos'e' l'entanglement?

correlazione tra variabili complementari.

cos'e' l'entanglement?

correlazione tra variabili complementari.

Anche se non sono definite contemporaneamente, possono essere **correlate**

cos'e' l'entanglement?

correlazione tra variabili complementari.

Anche se non sono definite contemporaneamente, possono essere **correlate**

{0,1}; {+,-} sono complementari: un qubit non puo' avere proprieta' 0 e -. Solo una delle due e' definita,

ma due qubit possono avere *stesse* proprieta' anche complementari: se misuro {0,1} su entrambi ottengo lo stesso risultato e se misuro {+,-} su entrambi, ottengo di nuovo lo stesso risultato!

cos'e' l'entanglement?

correlazione tra variabili complementari.

Anche se non sono definite contemporaneamente, possono essere **correlate**

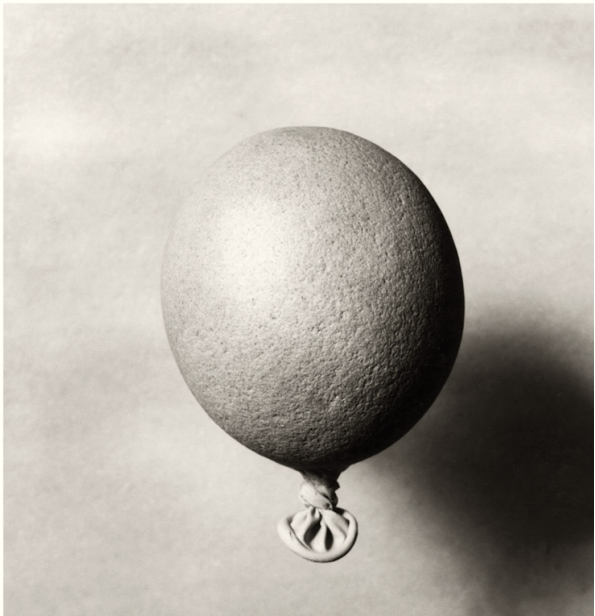
{0,1}; {+,-} sono complementari: un qubit non puo' avere proprieta' 0 e -. Solo una delle due e' definita,

ma due qubit possono avere *stesse* proprieta' anche complementari: se misuro {0,1} su entrambi ottengo lo stesso risultato e se misuro {+,-} su entrambi, ottengo di nuovo lo stesso risultato!

(scoperto da Einstein e battezzato da Schroedinger)

$$\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{|++\rangle + |--\rangle}{\sqrt{2}}$$

tutti gli algoritmi quantistici usano entanglement?



tutti gli algoritmi quantistici usano entanglement?

Fino a qualche anno fa si pensava di si': algoritmi senza entaglement avrebbero potuto essere simulati efficientemente su un computer classico

invece esistono altri fenomeni quantistici (discord) che possono anche essere usati (gergo: DQC1)

quali calcoli sono piu' veloci su un quantum computer?

quali calcoli sono piu' veloci su un quantum computer?

E' molto difficile scrivere software specifico per un quantum computer: bisogna saper sfruttare sapientemente la complementarieta'!

quali calcoli sono piu' veloci su un quantum computer?

E' molto difficile scrivere software specifico per un quantum computer: bisogna saper sfruttare sapientemente la complementarieta'!

ad oggi esistono molti algoritmi. I piu' famosi:

Fattorizzazione
Grover search
Simulazione di sistemi quantistici

fattorizzazione: dato un numero a devo cercare i numeri b e c tali che $a=b \times c$

fattorizzazione: dato un numero a devo cercare i numeri b e c tali che $a=b \times c$

quasi tutti i sistemi crittografici in uso oggi sono basati sull'assunzione che fattorizzare numeri grandi e' molto difficile (anche se e' semplice verificare la soluzione: basta moltiplicare i due numeri)

fattorizzazione: dato un numero a devo cercare i numeri b e c tali che $a=b \times c$

quasi tutti i sistemi crittografici in uso oggi sono basati sull'assunzione che fattorizzare numeri grandi e' molto difficile (anche se e' semplice verificare la soluzione: basta moltiplicare i due numeri)

NON e' difficile per un quantum computer!

Questa fu la scoperta (Peter Shor) che fece decollare la computazione quantistica

fattorizzazione: dato un numero a devo cercare i numeri b e c tali che $a=b \times c$

quasi tutti i sistemi crittografici in uso oggi sono basati sull'assunzione che fattorizzare numeri grandi e' molto difficile (anche se e' semplice verificare la soluzione: basta moltiplicare i due numeri)

NON e' difficile per un quantum computer!

Questa fu la scoperta (Peter Shor) che fece decollare la computazione quantistica

Oggi abbiamo vari protocolli crittografici post-quantum: sicuri anche contro un quantum computer

Grover search: ricerca in un database non strutturato

Grover search: ricerca in un database non strutturato

dal numero di telefono devo cercare in un elenco telefonico il nome associato

Grover search: ricerca in un database non strutturato

dal numero di telefono devo cercare in un elenco telefonico il nome associato

e' utile anche per velocizzare la soluzione di problemi dove e' difficile calcolare una soluzione, ma e' facile verificare se ho trovato una soluzione (problemi NP):

Grover search: ricerca in un database non strutturato

dal numero di telefono devo cercare in un elenco telefonico il nome associato

e' utile anche per velocizzare la soluzione di problemi dove e' difficile calcolare una soluzione, ma e' facile verificare se ho trovato una soluzione (problemi NP):

Provo tutte le possibili soluzioni sequenzialmente!

simulazione di sistemi quantistici

simulazione di sistemi quantistici

La dimensione dello spazio degli stati di un sistema quantistico aumenta esponenzialmente con il numero di gradi di liberta'.

simulazione di sistemi quantistici

La dimensione dello spazio degli stati di un sistema quantistico aumenta esponenzialmente con il numero di gradi di liberta'.

Impossibile simulare sistemi quantistici mediamente complicati su computer classici:

lo stato di 300 qubits e' descritto da 2^{300} numeri!

esistono quantum computer?

esistono quantum computer?

Solo piccoli!

esistono quantum computer?

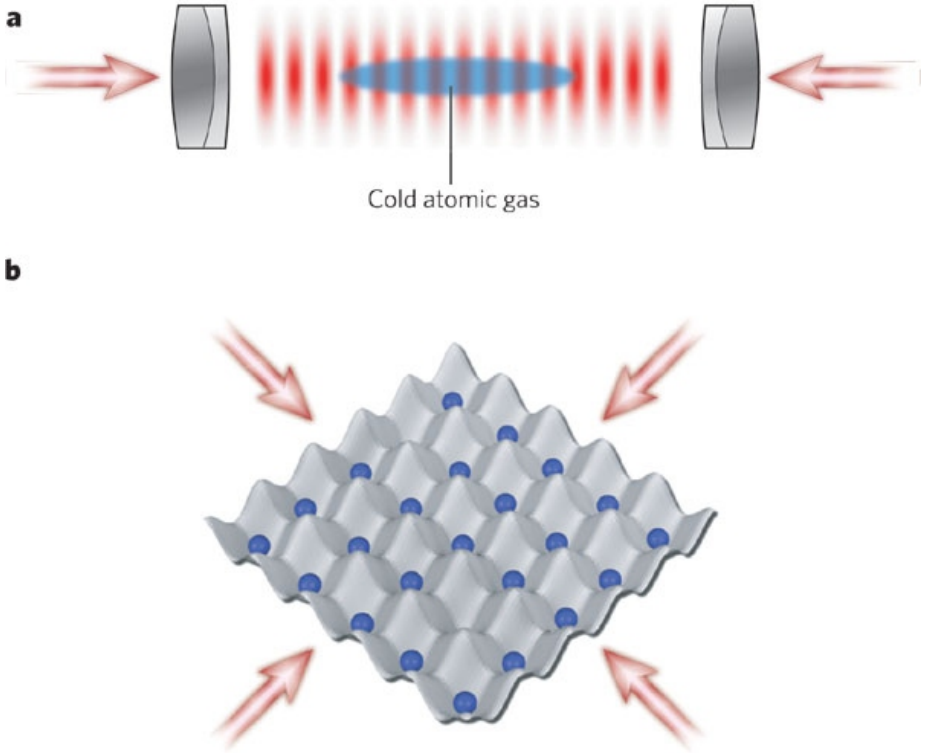
Solo piccoli!

Molti gruppi stanno cercando di creare un quantum computer: non e' ancora chiaro quale sia la tecnologia piu' promettente

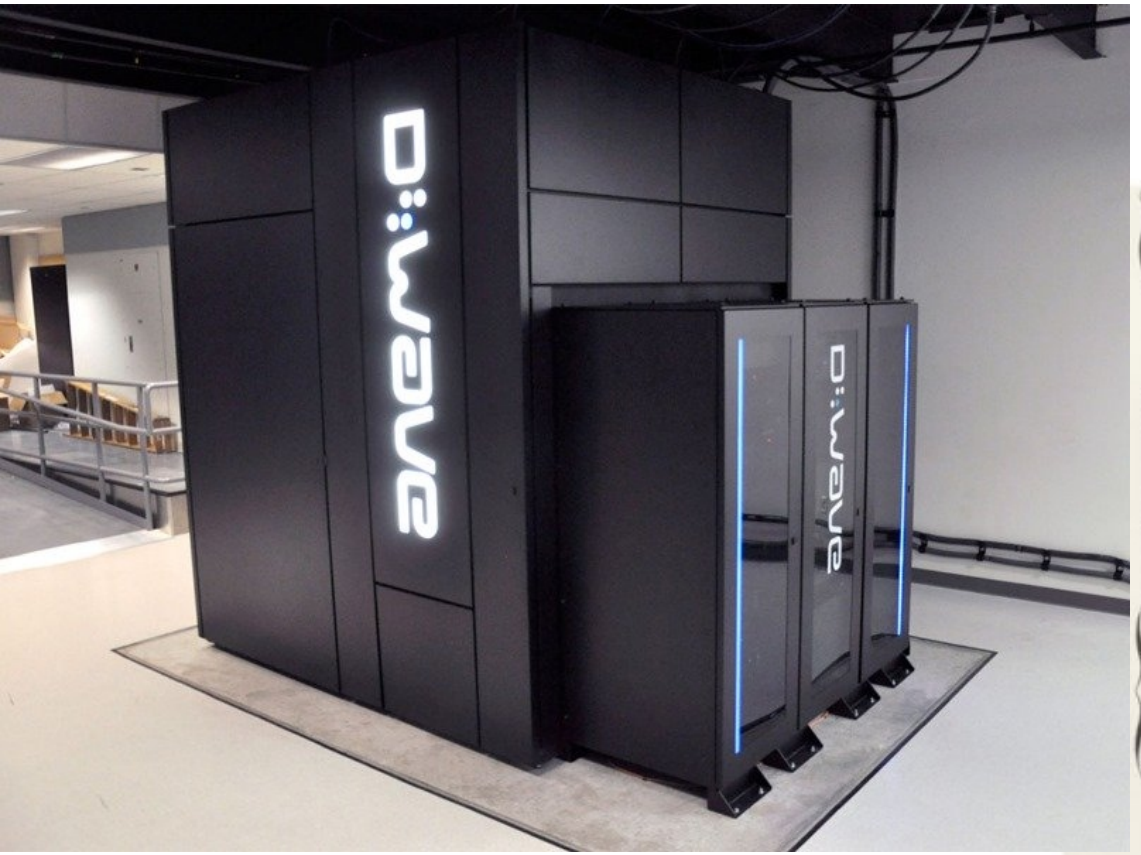
esistono quantum computer?

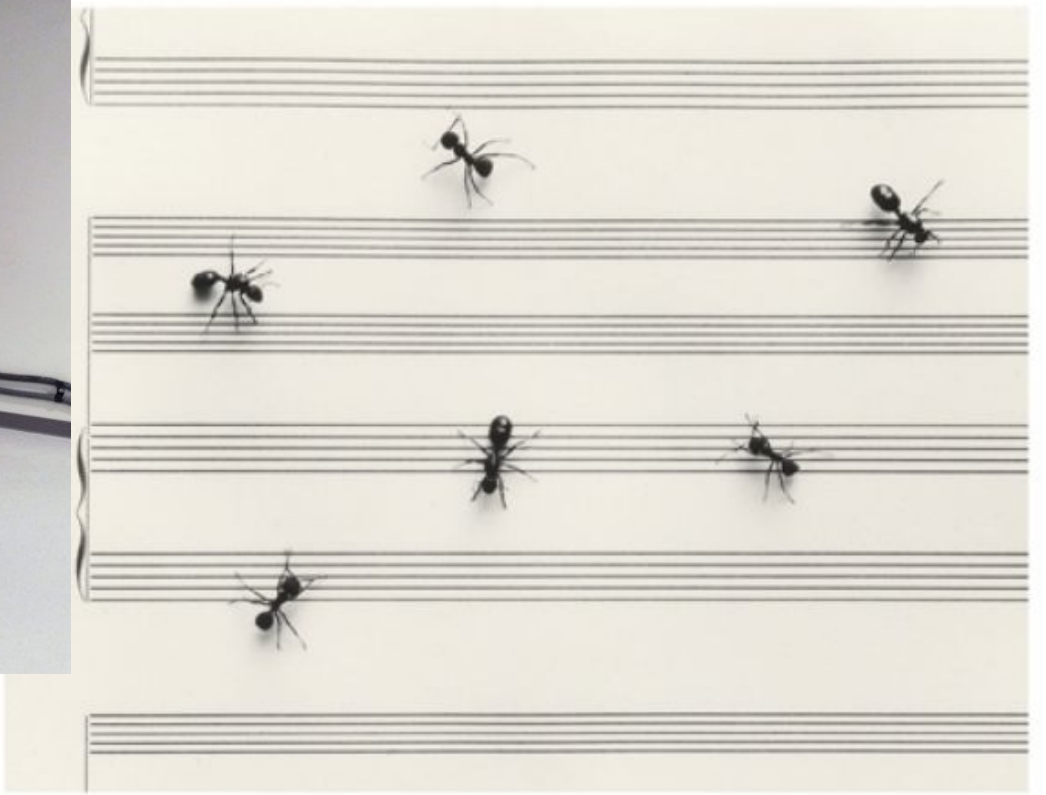
Solo piccoli!

Molti gruppi stanno cercando di creare un quantum computer: non e' ancora chiaro quale sia la tecnologia piu' promettente
forse optical lattice?



Oggi potete comprare (10M$) un “quantum computer” da D-WAVE, un'azienda canadese (Google, NASA, etc.), ma non e' un “vero” quantum computer: non ha dimostrato un vero speedup contro i migliori algoritmi classici





quando avremo un vero quantum computer?

quando avremo un vero quantum computer?

Non lo so

quando avremo un vero quantum computer?

Non lo so

Difficile fare previsioni sulla tecnologia senza rendersi ridicoli!

quando avremo un vero quantum computer?

Non lo so

Difficile fare previsioni sulla tecnologia senza rendersi ridicoli!

> "I think there is a world market for maybe five computers."
>
> Thomas Watson,
> president of IBM

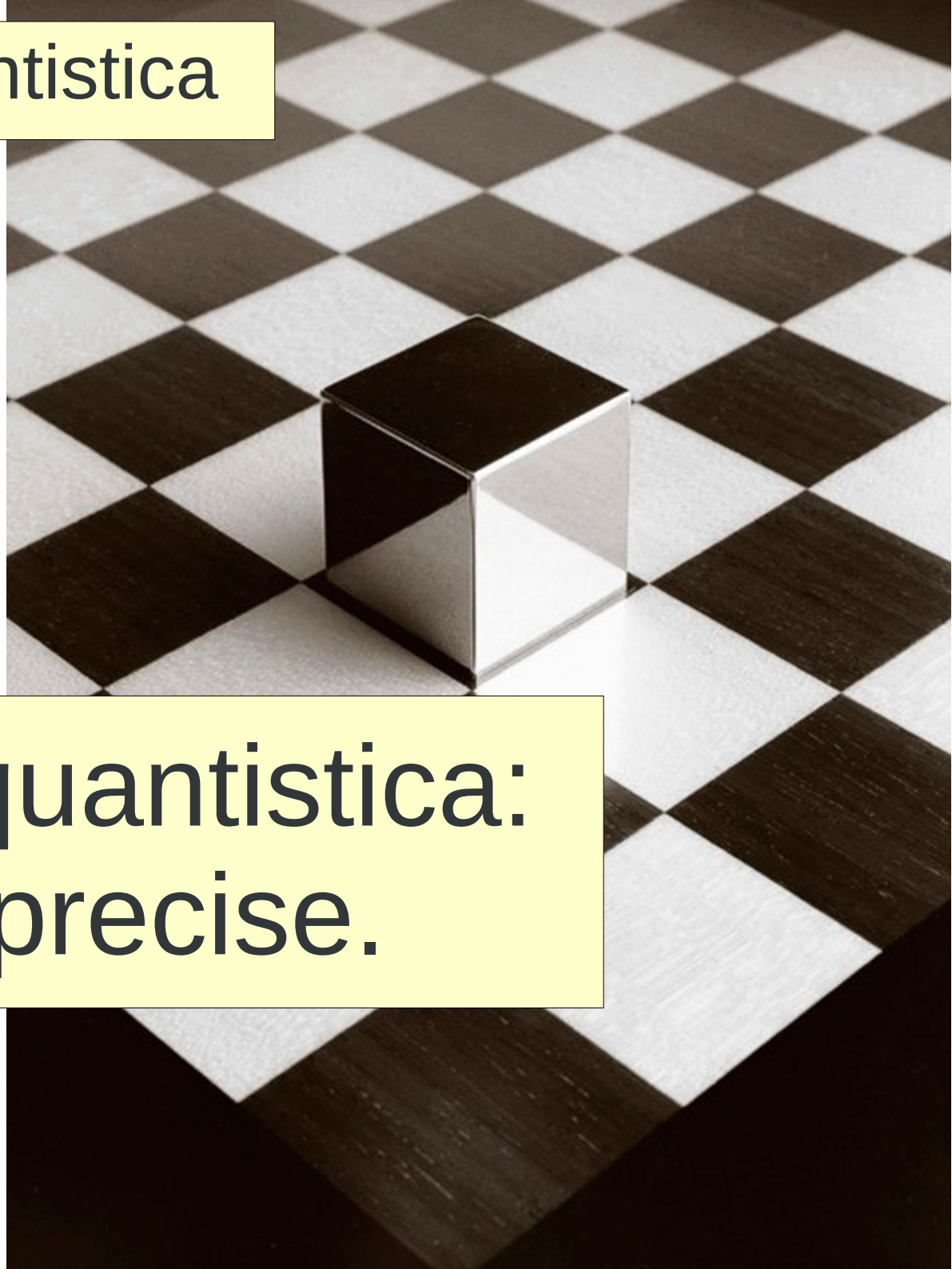
i miei risultati in quantum computation

Quantum RAM: memoria quantistica ad accesso casuale (brevettata).

Quantum Private Queries: algoritmo per fare una ricerca su Google senza che Google possa sapere cosa hai cercato.

Blind quantum computation: Alice fa eseguire una computazione al computer di Bob ma lui (in controllo del computer) non puo' sapere cosa lei ha calcolato.

Altra tecnologia quantistica



Metrologia quantistica: misure ultraprecise.

Cos'e' una misurazione? 3 stadi

Cos'e' una misurazione? 3 stadi

1. Preparazione dell'apparato di misura

Cos'e' una misurazione? 3 stadi

1. Preparazione dell'apparato di misura

2. Interazione con l'oggetto da misurare

Cos'e' una misurazione? 3 stadi

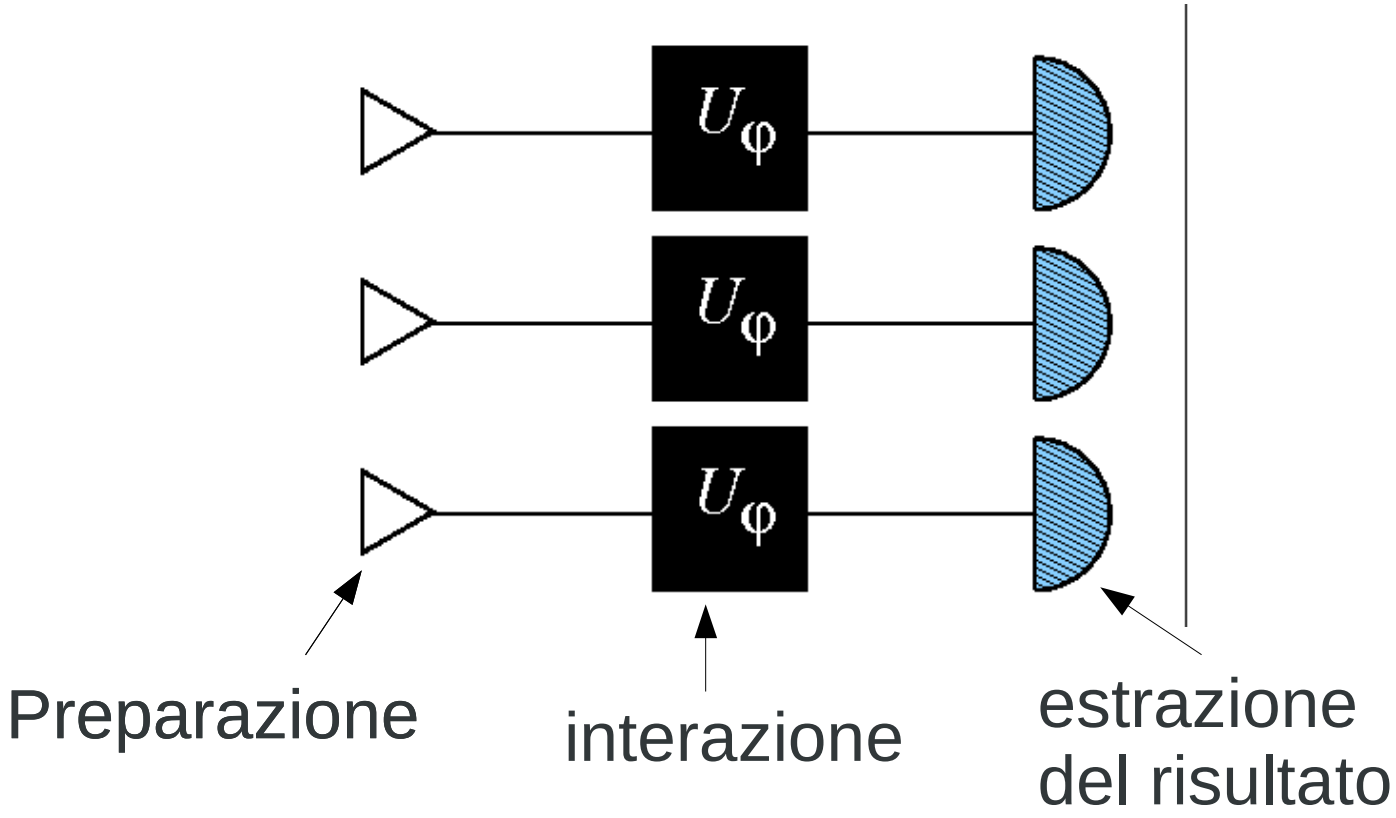
1. Preparazione dell'apparato di misura

2. Interazione con l'oggetto da misurare

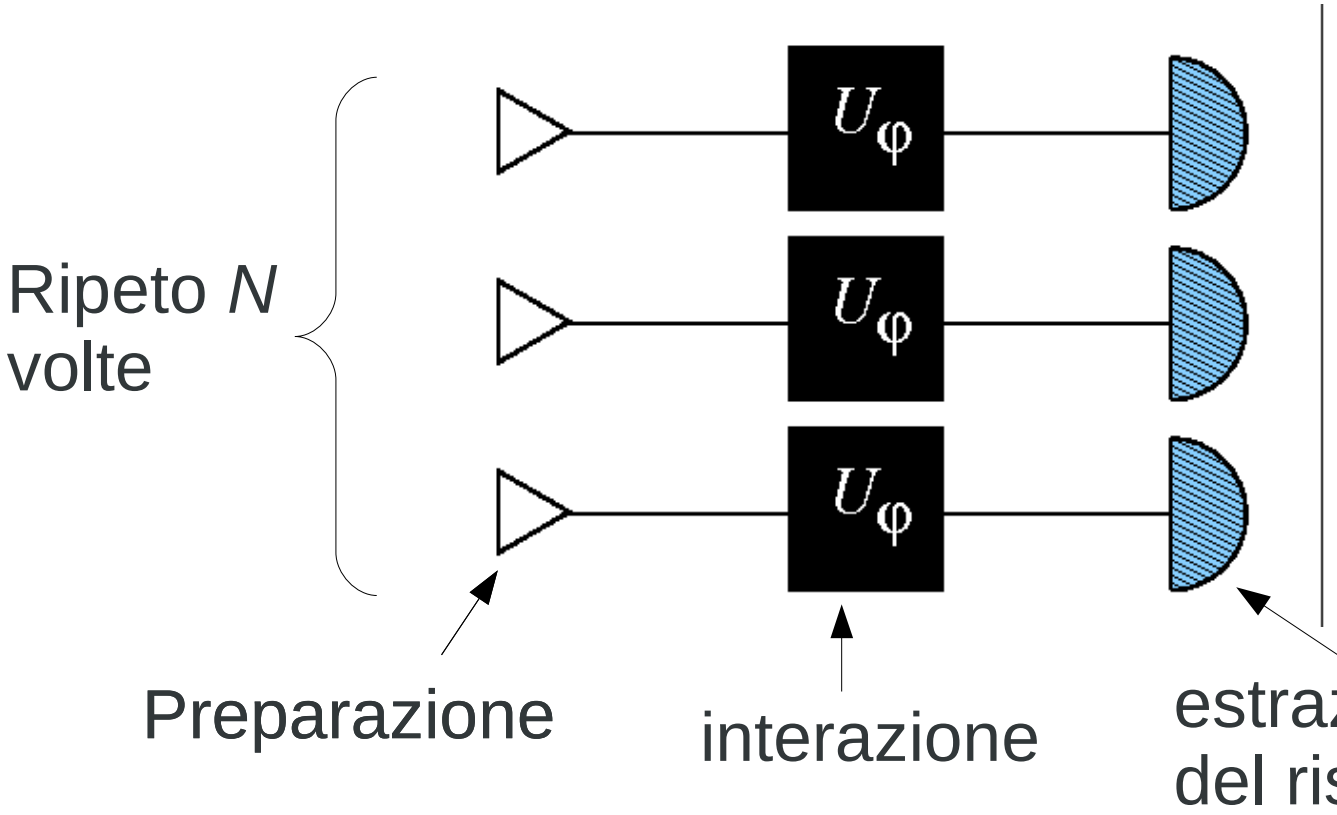
3. Estrazione del risultato

(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)

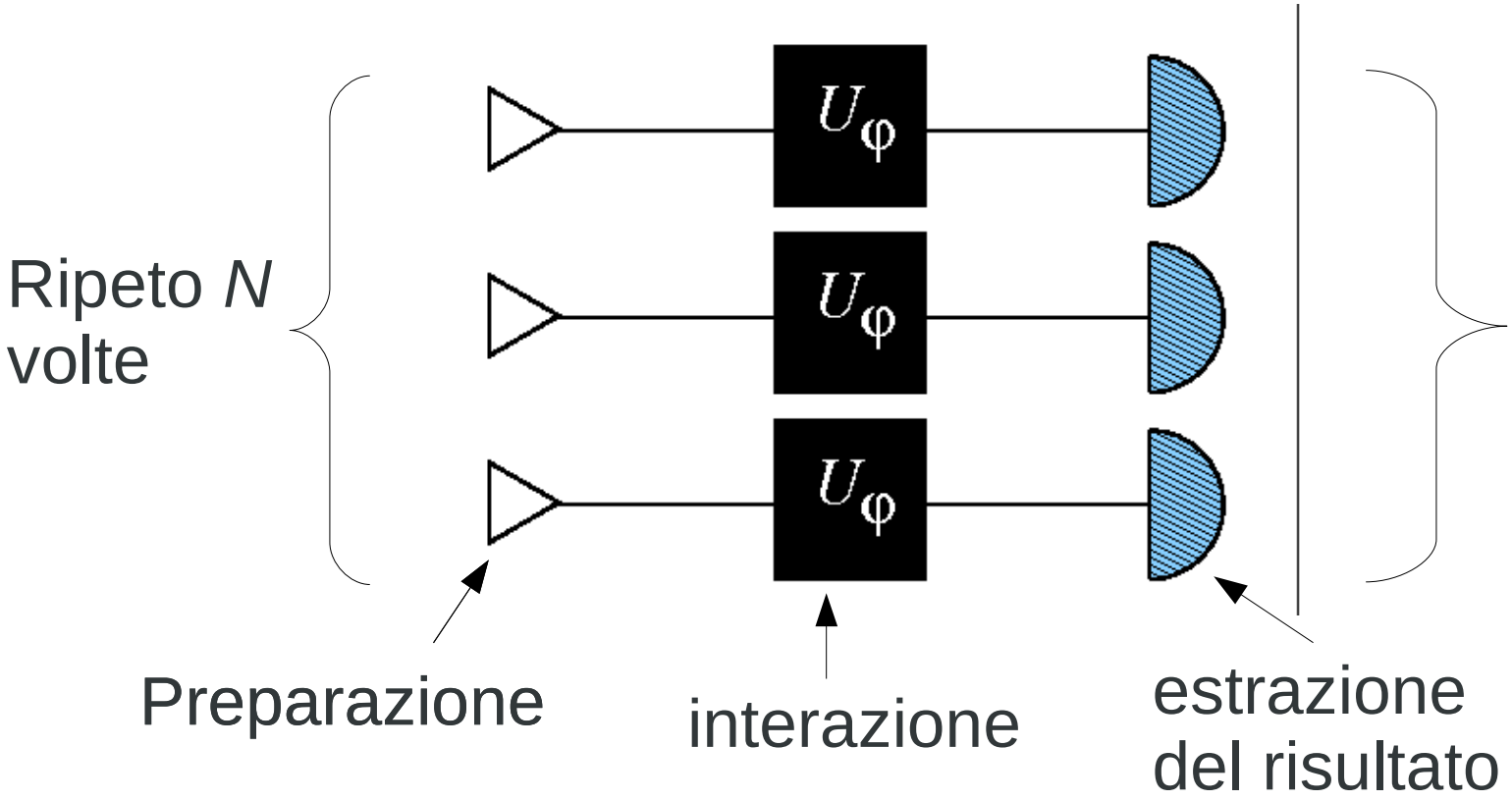
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



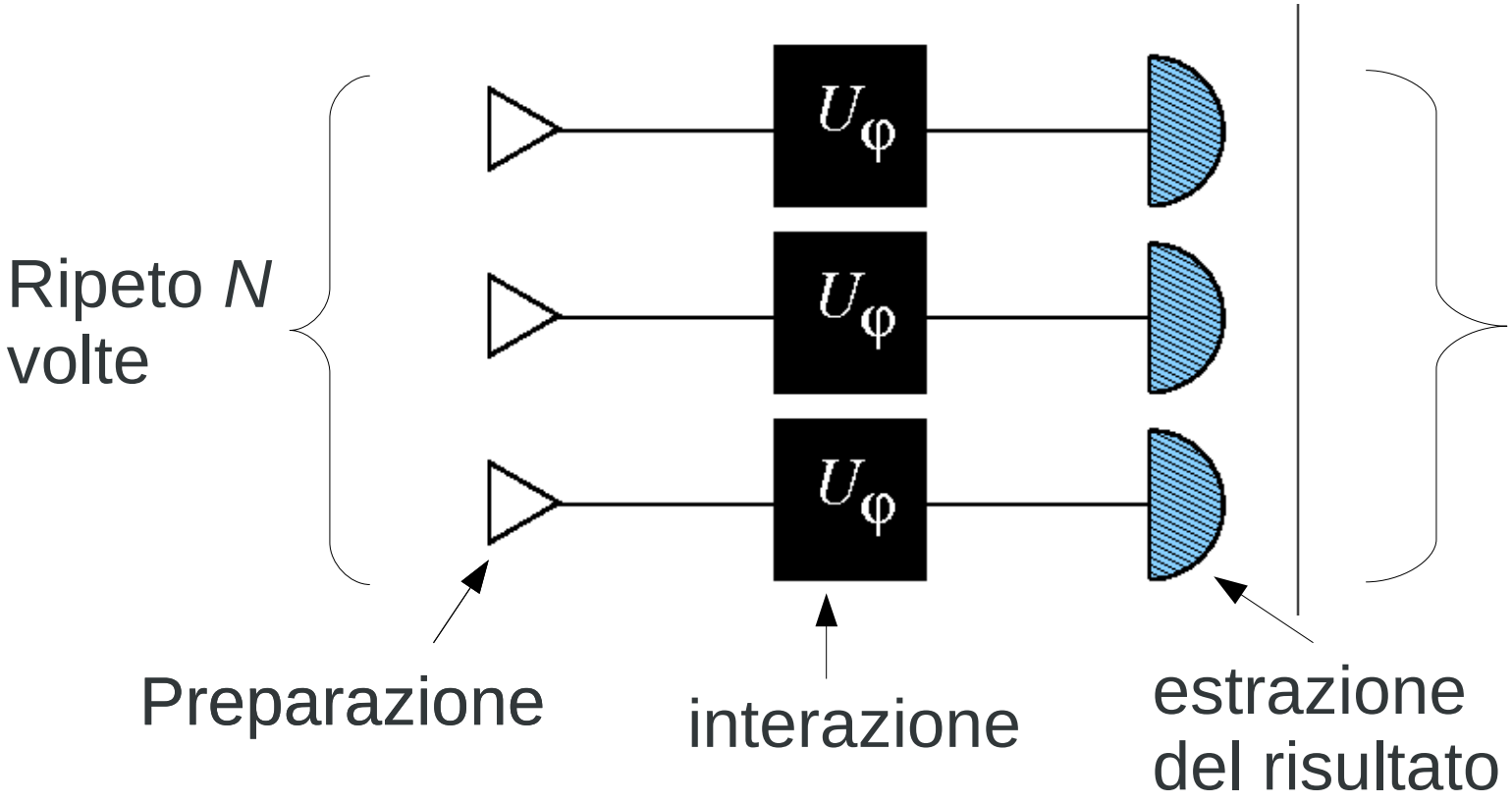
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)

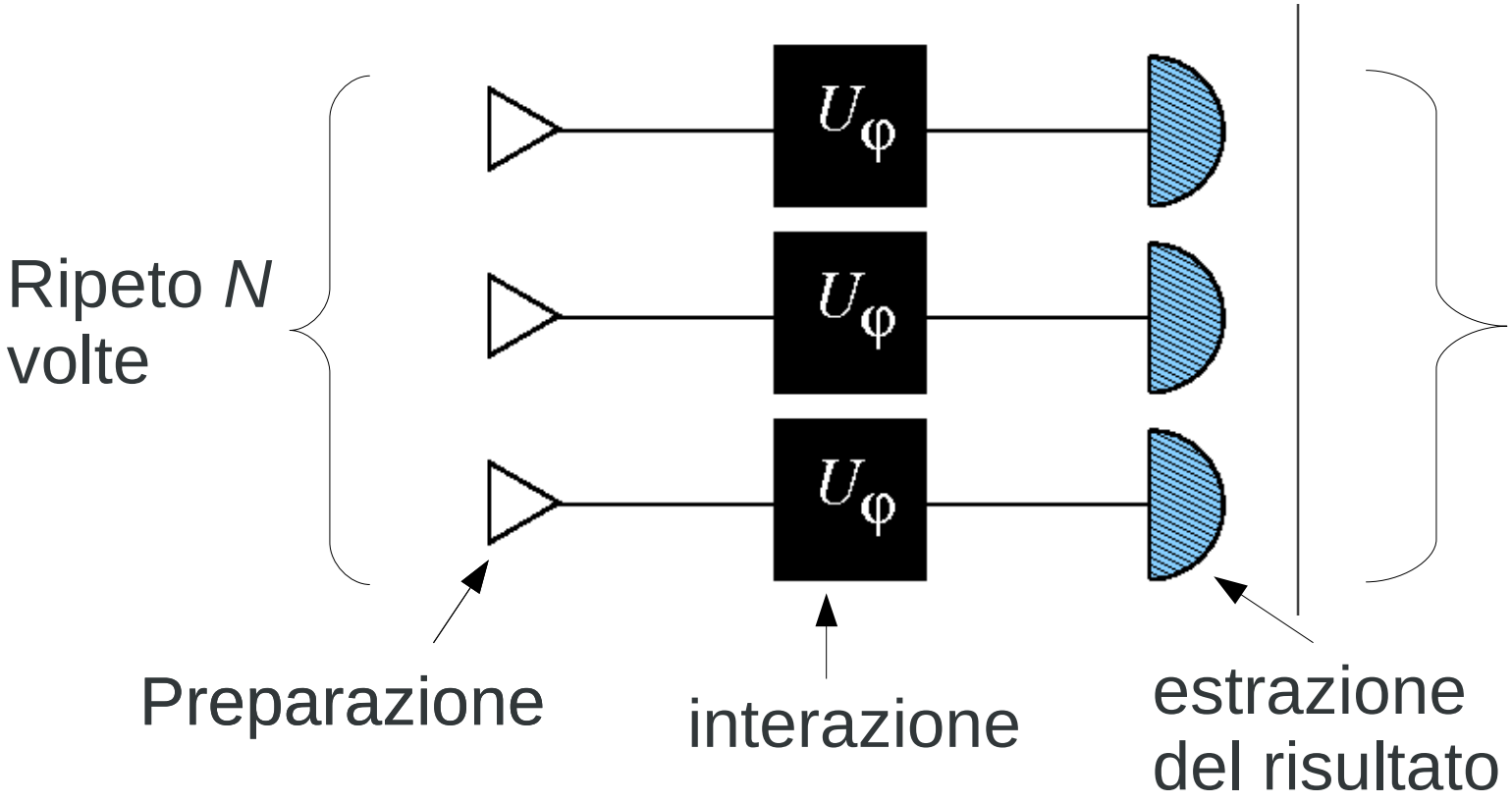


(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

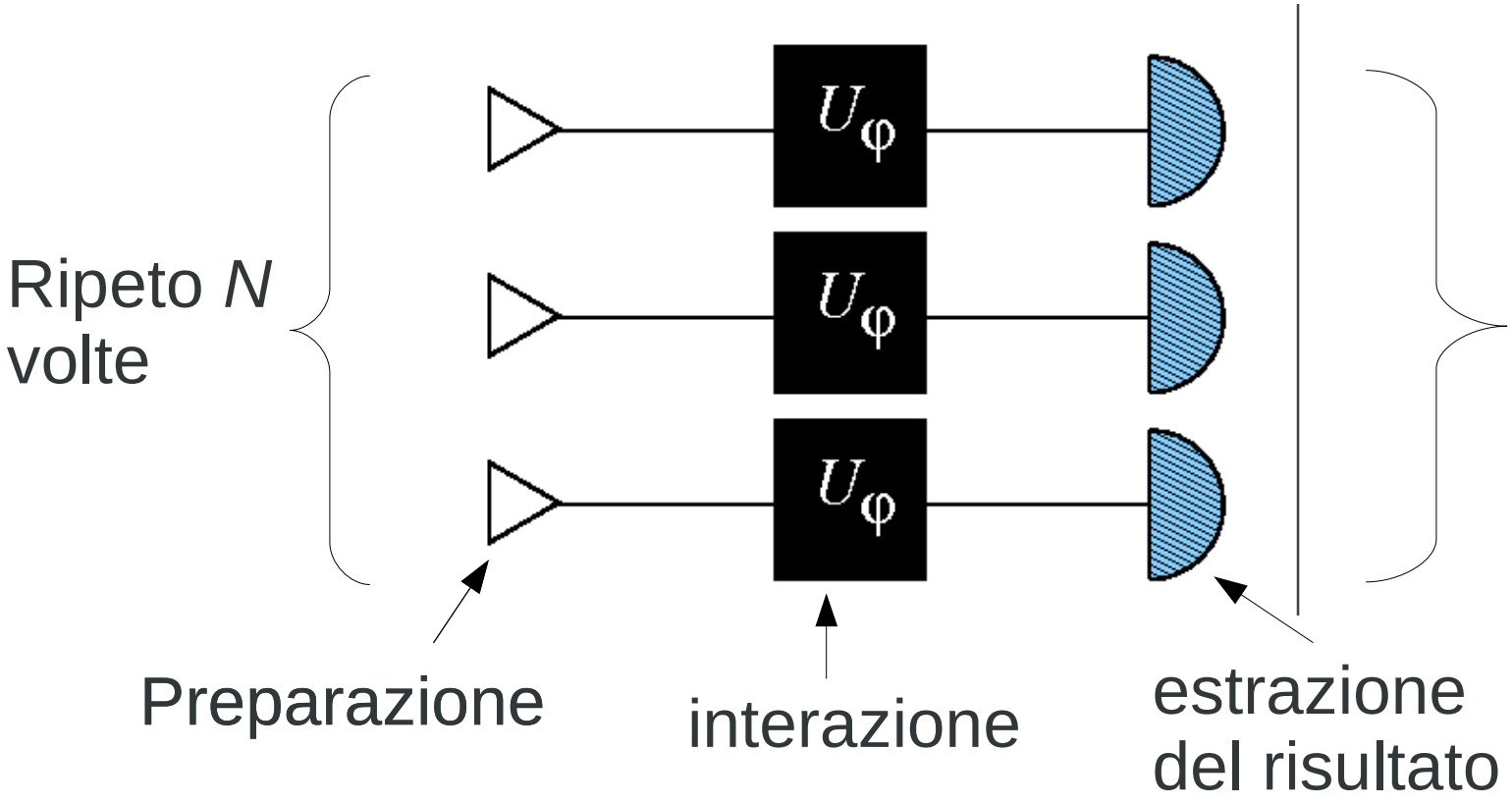
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

Errore?

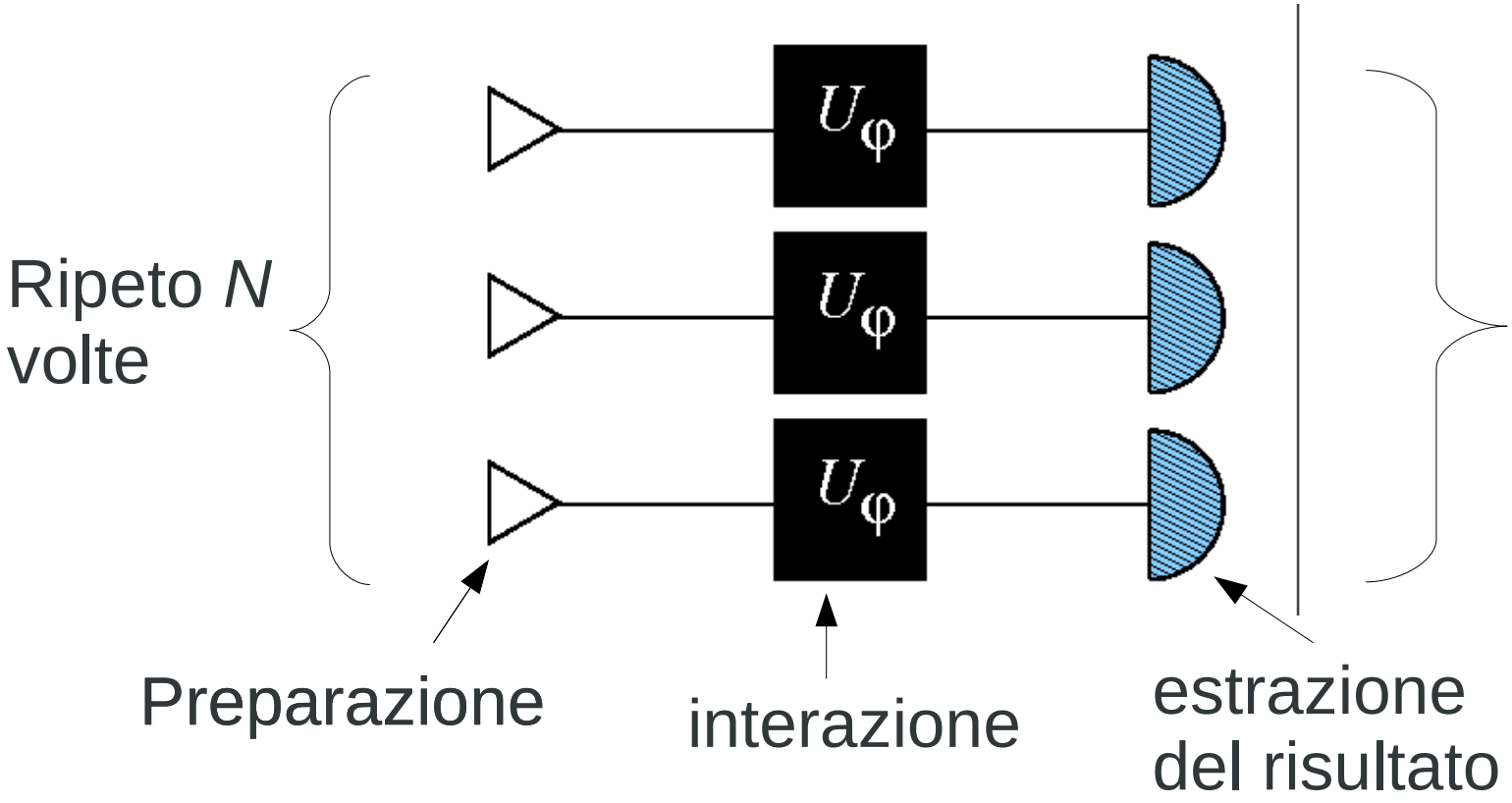
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

Errore? $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$

(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

Errore? $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (teorema del limite centrale)

Errore → $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

Errore → $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

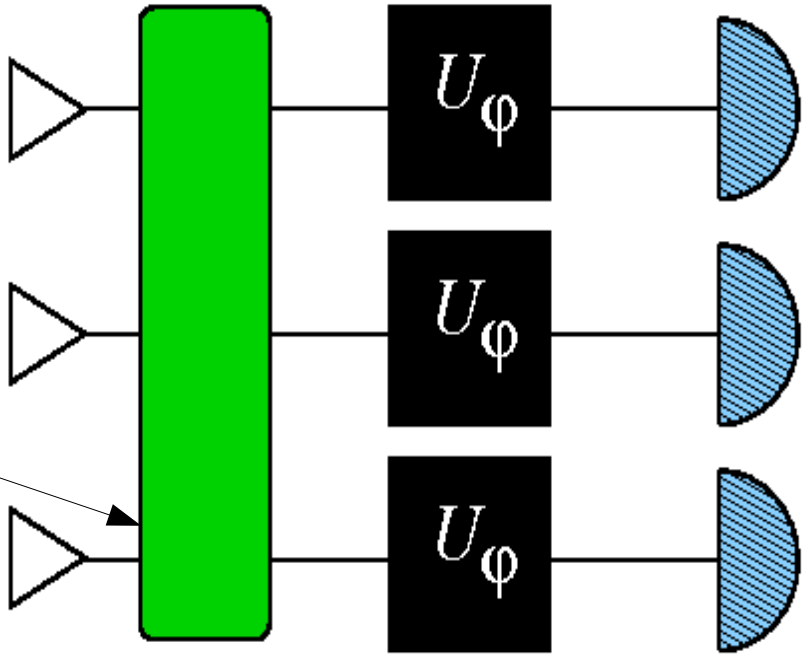
SI'!!

Errore → $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

SI'!!

se uso entanglement tra gli apparati di misura

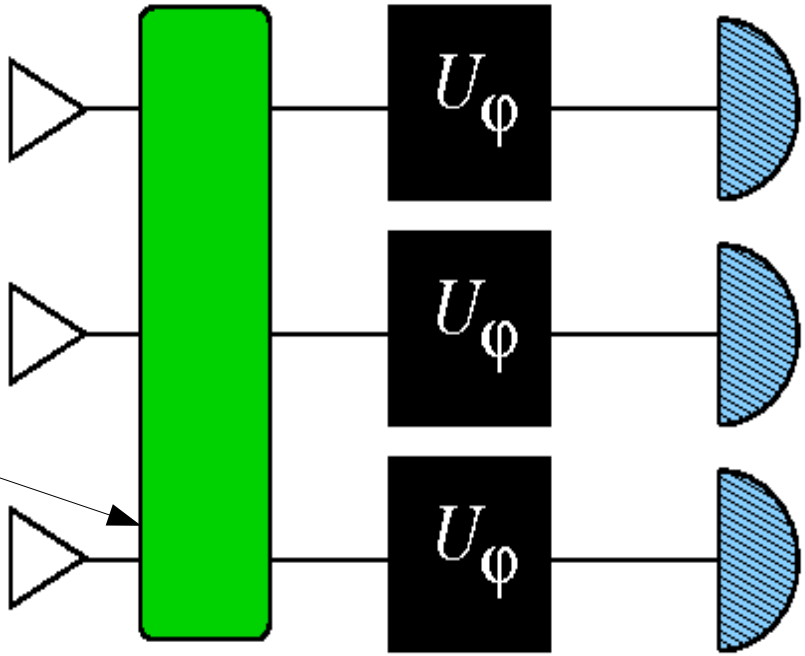


Errore → $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

SI'!!

se uso entanglement tra gli apparati di misura



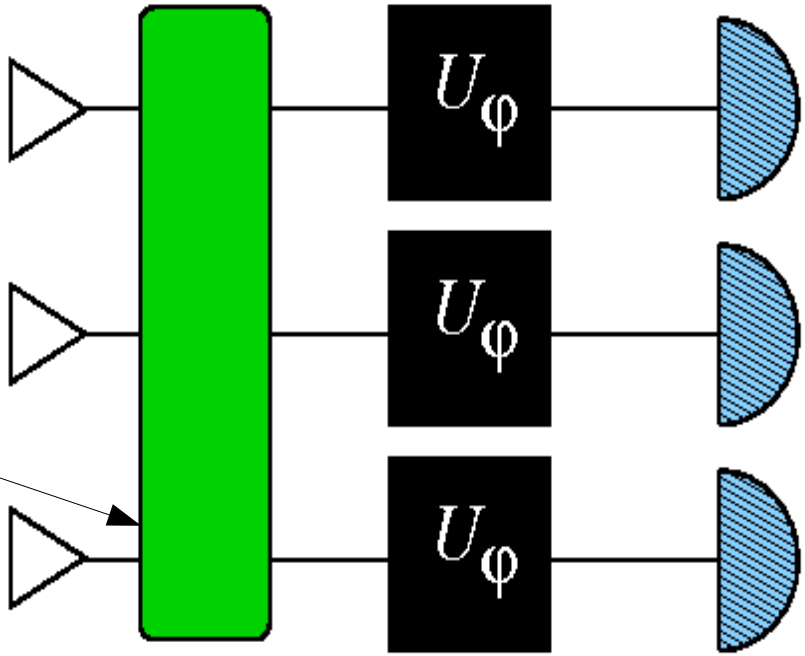
posso **ridurre** l'errore a $\Delta\varphi \propto \frac{1}{N}$

Errore → $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

SI'!!

se uso entanglement tra gli apparati di misura



posso **ridurre** l'errore a $\Delta\varphi \propto \frac{1}{N}$ (Heisenberg bound)

Tecniche applicabili a qualunque tipo di misura!!

- Misura di posizione e tempo (quantum gps)
- Misure interferometriche (onde gravitaz, etc.)
- Orologi atomici
- etc.

Altra tecnologia quantistica

Telecomunicazioni quantistiche

Quanta informazione posso trasmettere?

Quanta informazione posso trasmettere?

Perche' costano cosi' tanto i gigabyte del mio telefono?

Perche' non posso scaricare da internet un film in 1 secondo?

Quanta informazione posso trasmettere?

Perche' costano cosi' tanto i gigabyte del mio telefono?

Perche' non posso scaricare da internet un film in 1 secondo?

Capacita' di canale

Quanta informazione posso trasmettere?

Perche' costano cosi' tanto i gigabyte del mio telefono?

Perche' non posso scaricare da internet un film in 1 secondo?

Capacita' di canale

misura la capacita' di un canale di comunicazione (onde radio per il cellulare, cavo telefonico per l'adsl) di trasmettere informazione

segnali elettrici nel cavo telefonico=elettroni

onde radio=fotoni

segnali elettrici nel cavo telefonico=elettroni

onde radio=fotoni

l'informazione e' codificata in sistemi fisici

segnali elettrici nel cavo telefonico=elettroni

onde radio=fotoni

l'informazione e' codificata in sistemi fisici

quindi e' la fisica a dire quanta informazione posso trasmettere!!

segnali elettrici nel cavo telefonico=elettroni

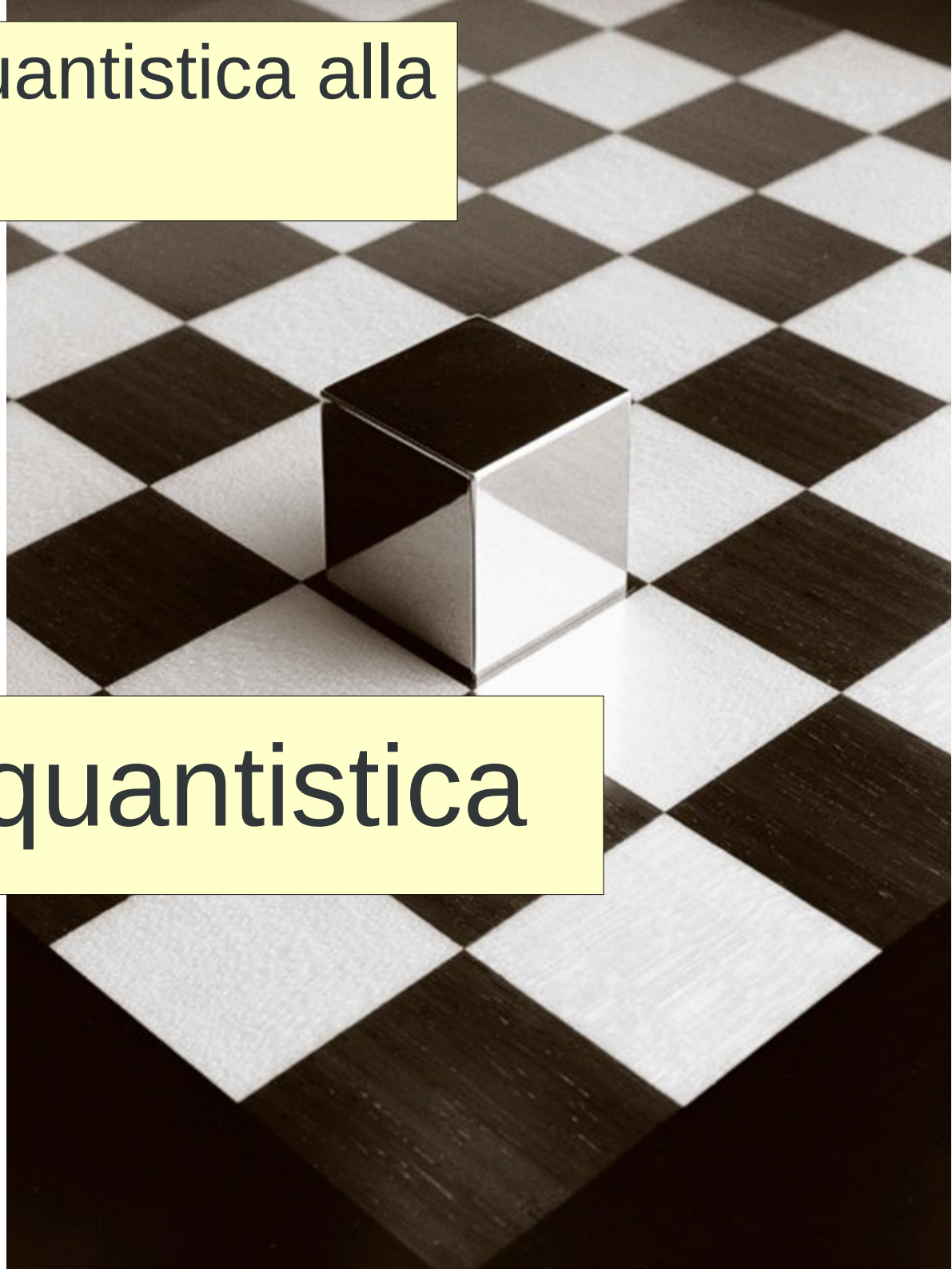
onde radio=fotoni

l'informazione e' codificata in sistemi fisici

quindi e' la fisica a dire quanta informazione posso trasmettere!!

in telecomunicazioni siamo molto vicini ai limiti quantistici!
Ad esempio: in comunicazioni via satellite.

Altra applicazione quantistica alla telecomunicazione



Crittografia quantistica

tutti i sistemi crittografici in uso oggi (whatsapp) si basano su assunzioni: **assumiamo che l'avversario non sia abbastanza potente.**

tutti i sistemi crittografici in uso oggi (whatsapp) si basano su assunzioni: **assumiamo che l'avversario non sia abbastanza potente.**

(abbiamo gia' visto che se il nostro avversario ha un computer quantistico siamo fritti!)

tutti i sistemi crittografici in uso oggi (whatsapp) si basano su assunzioni: **assumiamo che l'avversario non sia abbastanza potente.**

(abbiamo gia' visto che se il nostro avversario ha un computer quantistico siamo fritti!)

crittografia quantistica=sicurezza incondizionata

tutti i sistemi crittografici in uso oggi (whatsapp) si basano su assunzioni: **assumiamo che l'avversario non sia abbastanza potente.**

(abbiamo gia' visto che se il nostro avversario ha un computer quantistico siamo fritti!)

crittografia quantistica=sicurezza incondizionata

per scoprire i nostri segreti, l'avversario dovrebbe violare le leggi fisiche

tutti i sistemi crittografici in uso oggi (whatsapp) si basano su assunzioni: **assumiamo che l'avversario non sia abbastanza potente.**

(abbiamo gia' visto che se il nostro avversario ha un computer quantistico siamo fritti!)

crittografia quantistica=sicurezza incondizionata

per scoprire i nostri segreti, l'avversario dovrebbe violare le leggi fisiche

→ impossibile!

crittografia quantistica: applicazione della **complementarieta'**

crittografia quantistica: applicazione della **complementarieta'**

codificate l'informazione su un sistema che puo' avere due possibili valori complementari e fate in modo che solo il destinatario possa sapere quali sono

crittografia quantistica: applicazione della **complementarieta'**

codificate l'informazione su un sistema che puo' avere due possibili valori complementari e fate in modo che solo il destinatario possa sapere quali sono

L'avversario e' bloccato dal principio di indeterminazione!!!

Incondizionatamente sicura?!

Incondizionatamente sicura?!

Solo se l'implementazione e' corretta in tutto!

Incondizionatamente sicura?!

Solo se l'implementazione e' corretta in tutto!

La prima implementazione dimostrativa era totalmente insicura:
l'apparato era rumorosissimo.

“click” se una proprieta'
“clock” se l'altra

Incondizionatamente sicura?!

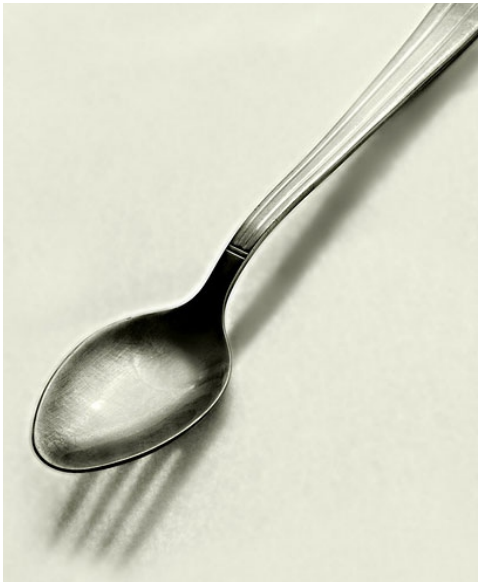
Solo se l'implementazione e' corretta in tutto!

La prima implementazione dimostrativa era totalmente insicura:
l'apparato era rumorosissimo.

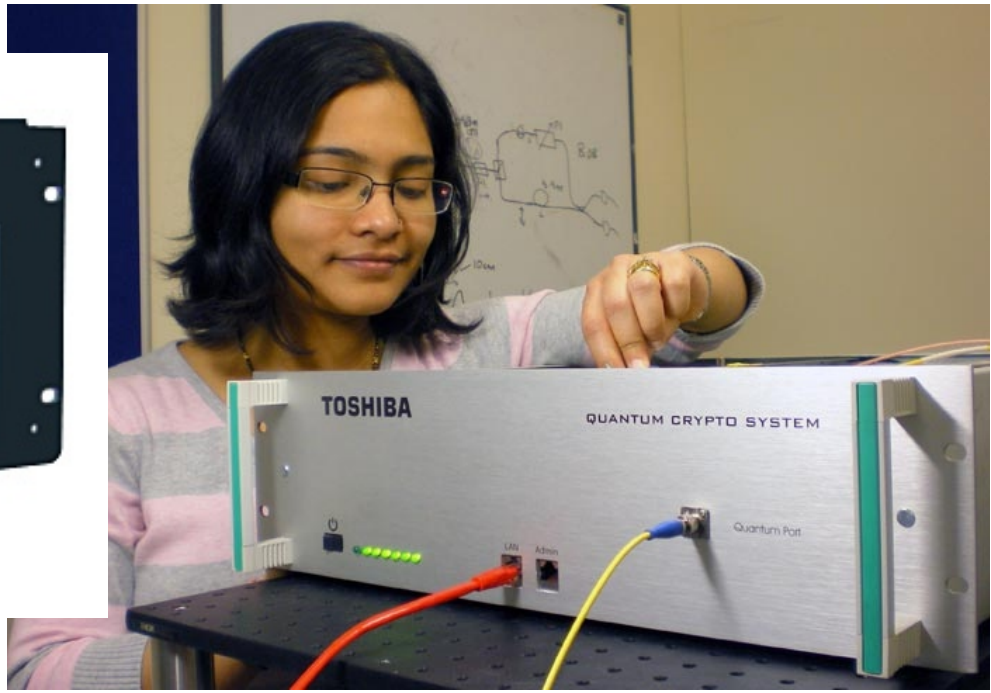
“click” se una proprieta'
“clock” se l'altra

Bastava che l'avversario ascoltasse

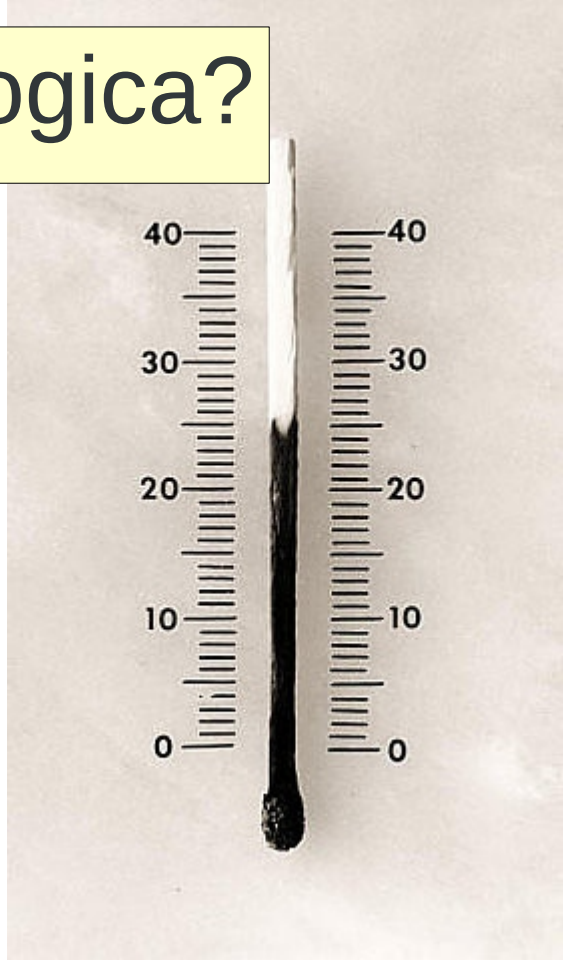
crittografia quantistica: e' la tecnologia quantistica piu' matura



esistono gia' implementazioni commerciali

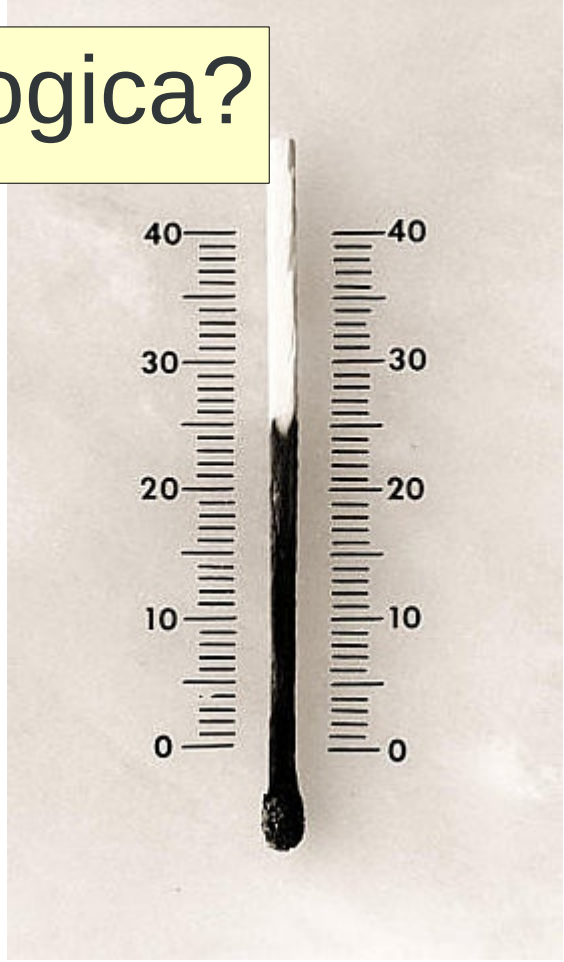


q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?

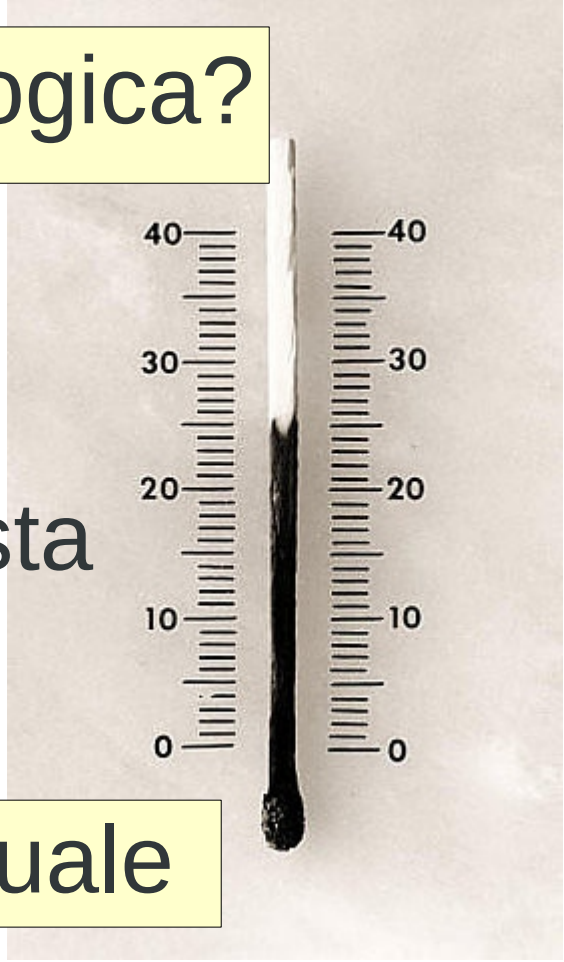


q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?

NO!



q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?

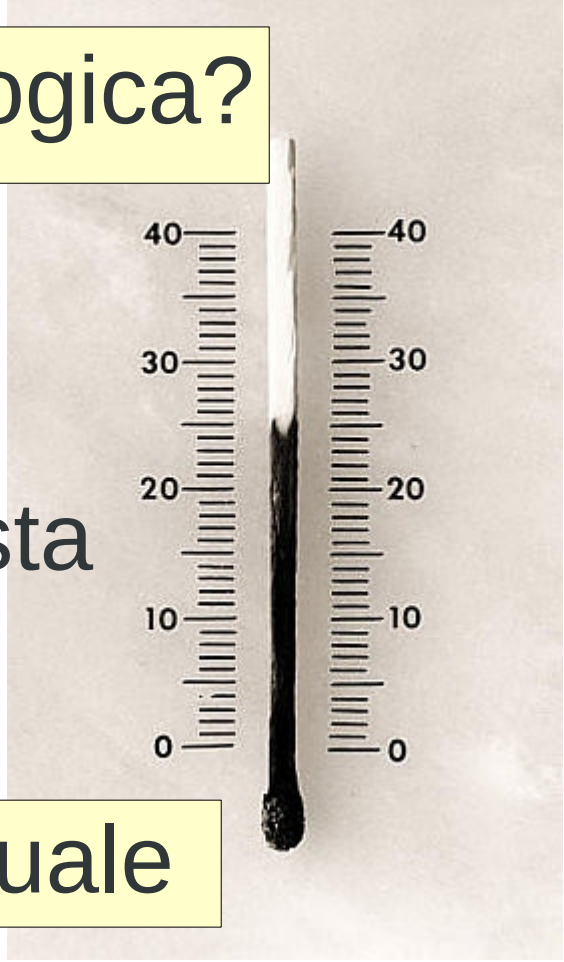


NO!

analizzare la fisica dal punto di vista dell'elaborazione di informazione:

rivoluzione anche a livello concettuale

q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?



NO!

analizzare la fisica dal punto di vista dell'elaborazione di informazione:

rivoluzione anche a livello concettuale

esempio: gravita' quantistica!

Le ultime idee sulla fisica quantistica dei buchi neri vengono dal pensare quali tipi di operazioni uno potrebbe fare con un buco nero.

Di cosa ho parlato?

- Complementarieta' (o sovrapposizione) ed entanglement

- Le tecnologie quantistiche: perche' MQ e cosa sono
  - Il quantum computer: usare qubits invece di bits
  - Metrologia quantistica

- telecomunicazioni quantistiche

- tq: rivoluzione tecnologica, ma anche concettuale

Take home message

Lorenzo Maccone
maccone@unipv.it

[Figure: Chema Madoz]

Quantum technology:
il futuro della tecnologia..
ma non solo!

Perche' usare la meccanica quantistica?

Viviamo in un mondo quantistico, ma nella vita di tutti i giorni ne vediamo una minima parte (il sottoinsieme descritto dalla fisica classica).

Favola del girino che vive nella pozzanghera e una notte vede le stelle per la prima volta!

Perche' usare la meccanica quantistica?

Viviamo in un mondo quantistico, ma nella vita di tutti i giorni ne vediamo una minima parte (il sottoinsieme descritto dalla fisica classica).

Favola del girino che vive nella pozzanghera e una notte vede le stelle per la prima volta!

La scoperta della MQ e' come scoprire le stelle

Perche' usare la meccanica quantistica?

Viviamo in un mondo quantistico, ma nella vita di tutti i giorni ne vediamo una minima parte (il sottoinsieme descritto dalla fisica classica).

Favola del girino che vive nella pozzanghera e una notte vede le stelle per la prima volta!

La scoperta della MQ e' come scoprire le stelle

improvvisamente il nostro mondo si espande!

Parole chiave:

Parole chiave:

standard quantum limit (SQL)

Parole chiave:

standard quantum limit (SQL)

limite (precisione, efficienza, velocita', etc.)

raggiungibile con fenomeni classici

Parole chiave:

standard quantum limit (SQL)

limite (precisione, efficienza, velocita', etc.)
raggiungibile con fenomeni classici

Heisenberg bound

Parole chiave:

standard quantum limit (SQL)

limite (precisione, efficienza, velocita', etc.)
raggiungibile con fenomeni classici

Heisenberg bound

limite ultimo (imposto dalla fisica)

Parole chiave:

standard quantum limit (SQL)

limite (precisione, efficienza, velocita', etc.) raggiungibile con fenomeni classici

Heisenberg bound

limite ultimo (imposto dalla fisica)

tecnologie quantistiche: se SQL<Heisenberg