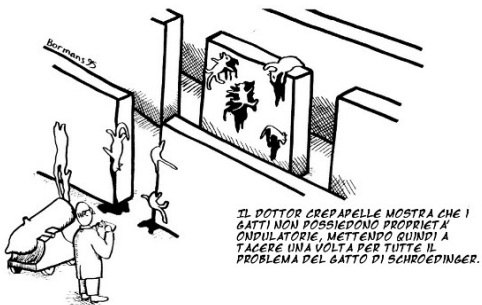


# Una storia di paradossi, disuguaglianze e baffi

Gianluigi Filippelli

Liceo "C. Cavalleri", Parabiago (Milano). 22/02/2018

# Il fondamentale contributo dei gatti alla meccanica quantistica



[Video 1](#) (Minute Physics) — [Video 2](#) (Open University)

# Voci interiori

## Albert Einstein

La meccanica quantistica è certamente imponente. Ma una voce interiore mi dice che non è ancora reale. La teoria dice molto, ma non ci conduce realmente più vicino al segreto del grande vecchio. Io, in ogni caso, sono convinto che Egli non gioca a dadi.

# Paradosso EPR

- ❶ la descrizione quanto-meccanica della realtà data dalla funzione d'onda non è completa

# Paradosso EPR

- 1 la descrizione quanto-meccanica della realtà data dalla funzione d'onda non è completa
- 2 quando gli operatori corrispondenti a due quantità fisiche non commutano le due quantità non possono avere una realtà simultanea

# Paradosso EPR

- 1 la descrizione quanto-meccanica della realtà data dalla funzione d'onda non è completa
- 2 quando gli operatori corrispondenti a due quantità fisiche non commutano le due quantità non possono avere una realtà simultanea

## Conclusione

La negazione di (1) implica la negazione di (2) quindi *La descrizione della realtà fisica data dalla funzione d'onda non è completa.*

# Paradosso EPR

- 1 la descrizione quanto-meccanica della realtà data dalla funzione d'onda non è completa
- 2 quando gli operatori corrispondenti a due quantità fisiche non commutano le due quantità non possono avere una realtà simultanea

## Conclusione

*Mentre abbiamo così mostrato che la funzione d'onda non fornisce una descrizione completa della realtà fisica, lasciamo aperta la questione se esista o meno una descrizione di tale genere. Crediamo, comunque, che una tale teoria è possibile.*

## La proposta di David Bohm: le origini



Nel 1924 propose per l'elettrone l'esistenza di un orologio interno, parte di un meccanismo da cui un'onda pilota guiderebbe la particella. Tale proposta venne abbandonata dallo stesso de Broglie.



# La proposta di David Bohm

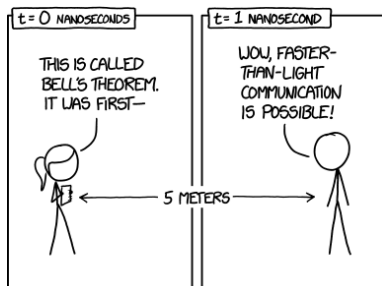


La velocità di ciascuna particella dipende dall'equazione principale che dipende dalla configurazione iniziale dell'universo. Esiste una configurazione che non può essere osservata: essa è costituita dalle variabili nascoste.

# Il teorema di Bell

## L'enunciato

Nessuna teoria fisica delle variabili nascoste locali può mai riprodurre tutte le predizioni della meccanica quantistica



BELL'S SECOND THEOREM:  
MISUNDERSTANDINGS OF BELL'S THEOREM  
HAPPEN SO FAST THAT THEY VIOLATE LOCALITY.

# La disuguaglianza di Bell

*a* quelli con un'altezza superiore a 1.73 m  
*b* quelli con più di 50.03 euro in tasca  
*c* quelli di sesso maschile



# La disuguaglianza di Bell

$a$  quelli con un'altezza superiore a 1.73 m

$b$  quelli con più di 50.03 euro in tasca

$c$  quelli di sesso maschile

$$N(a, b, \bar{c}) + N(\bar{a}, \bar{b}, c) \geq 0$$



# La disuguaglianza di Bell

$a$  quelli con un'altezza superiore a 1.73 m

$b$  quelli con più di 50.03 euro in tasca

$c$  quelli di sesso maschile

$$N(a, b, \bar{c}) + N(\bar{a}, \bar{b}, c) \geq 0$$

$$N(a, b, c) + N(a, \bar{b}, c) + N(a, b, \bar{c}) + N(\bar{a}, \bar{b}, c) \geq N(a, b, c) + N(a, \bar{b}, c)$$



# La disuguaglianza di Bell

$a$  quelli con un'altezza superiore a 1.73 m

$b$  quelli con più di 50.03 euro in tasca

$c$  quelli di sesso maschile

$$N(a, b, \bar{c}) + N(\bar{a}, \bar{b}, c) \geq 0$$

$$N(a, b, c) + N(a, \bar{b}, c) + N(a, b, \bar{c}) + N(\bar{a}, \bar{b}, c) \geq$$

$$N(a, b, c) + N(a, \bar{b}, c)$$

$$N(a, b) + N(\bar{b}, c) \geq N(a, c)$$



# La disuguaglianza di Bell

$a$  quelli con un'altezza superiore a 1.73 m

$b$  quelli con più di 50.03 euro in tasca

$c$  quelli di sesso maschile

$$N(a, b, \bar{c}) + N(\bar{a}, \bar{b}, c) \geq 0$$

$$N(a, b, c) + N(a, \bar{b}, c) + N(a, b, \bar{c}) + N(\bar{a}, \bar{b}, c) \geq$$

$$N(a, b, c) + N(a, \bar{b}, c)$$

$$N(a, b) + N(\bar{b}, c) \geq N(a, c)$$

$$N(a, b) + N(\bar{b}, c) \not\geq N(a, c)$$



## *Mi si sono intrecciati i diti*



*Entanglement* → Intricazione



# Cos'è l'entanglement

Il primo a utilizzare il termine fu Erwin Schroedinger in un articolo successivo a quello del paradosso EPR

## Le conclusioni di Schroedinger

*Il paradosso potrebbe essere sciolto, però, se un'osservazione non fosse legata a un momento preciso. Ciò, però, renderebbe l'attuale interpretazione della meccanica quantistica priva di significato, poiché al momento gli oggetti delle sue predizioni sono considerati il risultato di misure in determinati momenti di tempo.*

# Cos'è l'entanglement

## Una definizione

Secondo la meccanica quantistica è possibile realizzare un insieme costituito da due particelle caratterizzato da determinati valori globali di alcune osservabili. Ciò comporta che il valore misurato per una particella di una proprietà definita dell'insieme influenzi istantaneamente il corrispondente valore dell'altra, che risulterà tale da mantenere il valore globale iniziale. Ciò rimane vero anche nel caso le due particelle si trovino distanziate, senza alcun limite spaziale.

# Testare l'entanglement

1969 John Clauser con Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt  
proposta di un esperimento per testare le teorie delle variabili nascoste

1972 John Clauser con Stuart Freedman:  
esecuzione dell'esperimento

# Testare l'entanglement

1969 John Clauser con Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt  
proposta di un esperimento per testare le teorie delle variabili nascoste

1972 John Clauser con Stuart Freedman:  
esecuzione dell'esperimento

1982: Alain Aspect, Philippe Grangier, Gérard Roger

# Testare l'entanglement

1969 John Clauser con Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt  
proposta di un esperimento per testare le teorie delle variabili nascoste

1972 John Clauser con Stuart Freedman:  
esecuzione dell'esperimento

1982: Alain Aspect, Philippe Grangier, Gérard Roger

1998: Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon,  
Harald Weinfurter, Anton Zeilinger

1998: W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden, N. Gisin

# Testare l'entanglement

1969 John Clauser con Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt  
proposta di un esperimento per testare le teorie delle variabili nascoste

1972 John Clauser con Stuart Freedman:  
esecuzione dell'esperimento

1982: Alain Aspect, Philippe Grangier, Gérard Roger

1998: Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon,  
Harald Weinfurter, Anton Zeilinger

1998: W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden, N. Gisin

2007: Simon Gröblacher, Tomasz Paterek, Rainer Kaltenbaek,  
Caslav Brukner, Marek Zukowski, Markus Aspelmeyer, Anton Zeilinger

2015 B. Hensen, *et al.*

# Testare l'entanglement

1969 John Clauser con Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt  
proposta di un esperimento per testare le teorie delle variabili nascoste

1972 John Clauser con Stuart Freedman:  
esecuzione dell'esperimento

1982: Alain Aspect, Philippe Grangier, Gérard Roger

1998: Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon,  
Harald Weinfurter, Anton Zeilinger

1998: W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden, N. Gisin

2007: Simon Gröblacher, Tomasz Paterek, Rainer Kaltenbaek,  
Caslav Brukner, Marek Zukowski, Markus Aspelmeyer, Anton Zeilinger

2015 B. Hensen, *et al.*

Crolla il realismo locale

# Testare l'entanglement

1969 John Clauser con Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt  
proposta di un esperimento per testare le teorie delle variabili nascoste

1972 John Clauser con Stuart Freedman:  
esecuzione dell'esperimento

1982: Alain Aspect, Philippe Grangier, Gérard Roger

1998: Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon,  
Harald Weinfurter, Anton Zeilinger

1998: W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden, N. Gisin

2007: Simon Gröblacher, Tomasz Paterek, Rainer Kaltenbaek,  
Caslav Brukner, Marek Zukowski, Markus Aspelmeyer, Anton Zeilinger

2015 B. Hensen, *et al.*

Esperimento per verificare la violazione della  
disuguaglianza di Leggett



# Testare l'entanglement

1969 John Clauser con Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt  
proposta di un esperimento per testare le teorie delle variabili nascoste

1972 John Clauser con Stuart Freedman:  
esecuzione dell'esperimento

1982: Alain Aspect, Philippe Grangier, Gérard Roger

1998: Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon,  
Harald Weinfurter, Anton Zeilinger

1998: W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden, N. Gisin

2007: Simon Gröblacher, Tomasz Paterek, Rainer Kaltenbaek,  
Caslav Brukner, Marek Zukowski, Markus Aspelmeyer, Anton Zeilinger

2015 B. Hensen, *et al.*

essa implica che il realismo e alcuni tipi  
di non-località non sono compatibili

# Teoria dell'informazione quantistica

- No-cloning: l'informazione quantistica non può essere copiata con fedeltà assoluta, e quindi neanche letta con fedeltà assoluta. (William Wootters, 1982).
- L'informazione quantistica può invece essere trasferita con fedeltà assoluta, a patto che l'originale venga distrutto nel processo. Il teletrasporto quantistico è stato ottenuto per la prima volta da Nielsen, Klenn e LaFlamme nel 1998.
- Ogni misura compiuta su di un sistema quantistico distrugge la maggior parte dell'informazione, lasciandolo in uno stato base. L'informazione distrutta non può essere recuperata. Ciò è una derivazione diretta dai postulati della meccanica quantistica (PMQ).

# Teoria dell'informazione quantistica

- Anche se in qualche caso è possibile conoscere esattamente in che stato base si troverà il sistema dopo una misura, il più delle volte avremo solo previsioni probabilistiche. Anche questo deriva direttamente dai PMQ.
- Alcune osservabili non possono avere simultaneamente valori definiti con precisione, per il principio di indeterminazione di Heisenberg. Ciò ci impedisce sia di stabilire con esattezza le condizioni iniziali prima del calcolo, sia di leggere i risultati con precisione.
- L'informazione quantistica può essere codificata, e solitamente lo è, tramite correlazioni non-locali tra parti differenti di un sistema fisico. In pratica, si utilizza l'entanglement.

# Teoria dell'informazione quantistica

## Qubit

Unità dell'informazione quantistica, equivalente al bit.

Sistema quanto-meccanico a due stati, come la polarizzazione di un singolo fotone (polarizzazione verticale e orizzontale). I qubit possono trovarsi in una sovrapposizione dei due stati, proprietà fondamentale nell'informazione e nella computazione quantistica.

La logica è dunque non booleana (tipo logica a più valori) come aveva già mostrato George Mackey (seconda metà degli anni Cinquanta del XX secolo).

# Teoria dell'informazione quantistica

## Qubit ed entanglement

I qubit possono esibire entanglement.

L'entanglement è un ingrediente necessario per la computazione quantistica. Anche sistemi come il teletrasporto quantistico fanno uso dell'entanglement. Se un calcolo quantistico non coinvolge qubit intrecciati, allora può essere perfezionato con la stessa efficienza dalla computazione classica.

# Teoria dell'informazione quantistica

## Qubit ed entanglement

I qubit possono esibire entanglement.

L'entanglement è un ingrediente necessario per la computazione quantistica. Anche sistemi come il teletrasporto quantistico fanno uso dell'entanglement. Se un calcolo quantistico non coinvolge qubit intrecciati, allora può essere perfezionato con la stessa efficienza dalla computazione classica.

- [Timeline della computazione quantistica su en.wiki](#)

## Il punto di vista sperimentale



La conclusione che si può trarre  
è più una questione di gusto che di logica  
e si può dedurre che  
tale discussione  
è irrilevante per la scienza.

Alain Aspect - 2007