

# Il gatto di Schroedinger: vivo, morto, oppure...?



Lorenzo Maccone

Dip. Fisica, INFN Pavia,  
Università di Pavia

[maccone@unipv.it](mailto:maccone@unipv.it)

**Q**Uit  
quantum information  
theory group  
[www.qubit.it](http://www.qubit.it)



Di cosa parlero?



Mostrerò



quanto è **strana** la descrizione del  
mondo data dalla meccanica  
quantistica

# il gatto!?!



# il gatto!?!

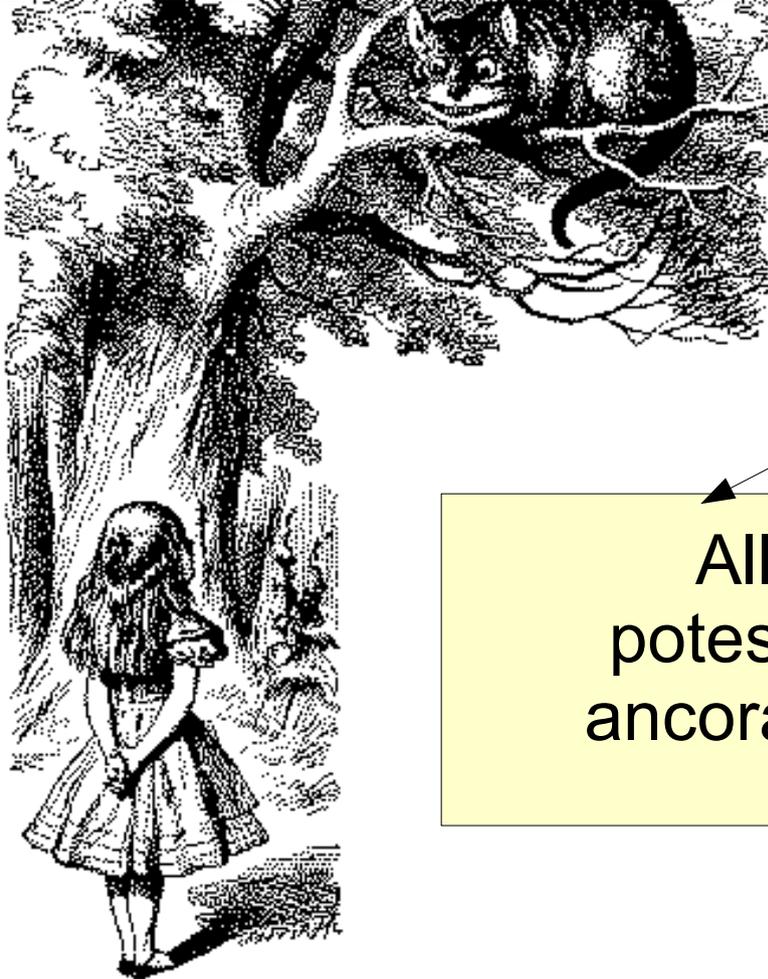
è un argomento “provocatorio”  
pubblicato da Schroedinger nel  
1935 e sviluppato durante una  
corrispondenza con Einstein



# il gatto!?!

è un argomento “provocatorio”  
pubblicato da Schroedinger nel  
1935 e sviluppato durante una  
corrispondenza con Einstein

All'epoca si pensava ancora che la MQ  
potesse essere **sbagliata** o **incompleta**, ma  
ancora oggi **non c'è consenso** su come vada  
risolto il problema gatto!



# il gatto!?!



è un argomento “provocatorio”  
pubblicato da Schroedinger nel  
1935 e sviluppato durante una  
corrispondenza con Einstein

All'epoca si pensava ancora che la MQ  
potesse essere **sbagliata** o **incompleta**, ma  
ancora oggi **non c'è consenso** su come vada  
risolto il problema gatto!

Schroedinger e Einstein (assieme a Bohr, Heisenberg, Dirac, von Neumann)  
sono i padri fondatori della meccanica quantistica  
(anche se Einstein non ne fu mai soddisfatto!)

(Premio Nobel di Einstein per effetto fotoelettrico, meccanica quantistica, NON per la relatività!)

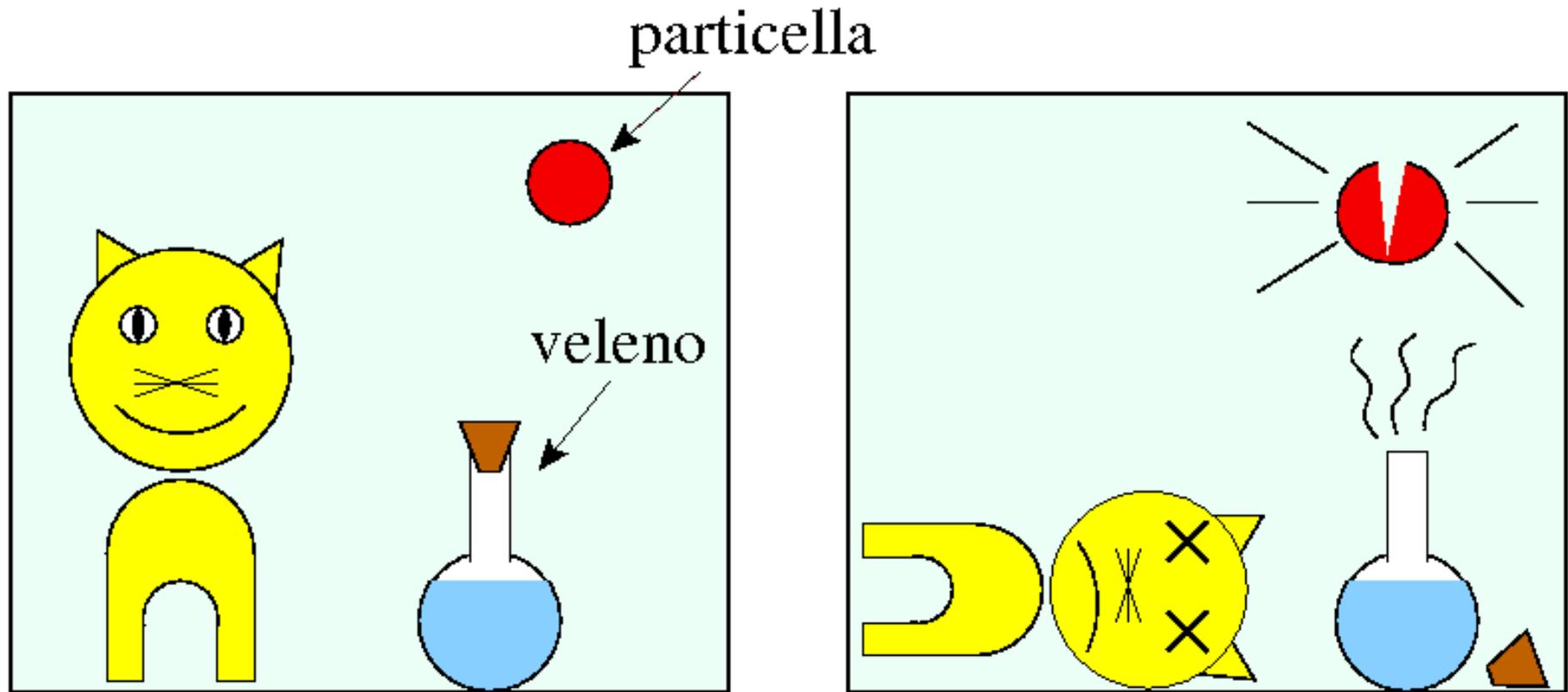
## Il gatto di Schroedinger

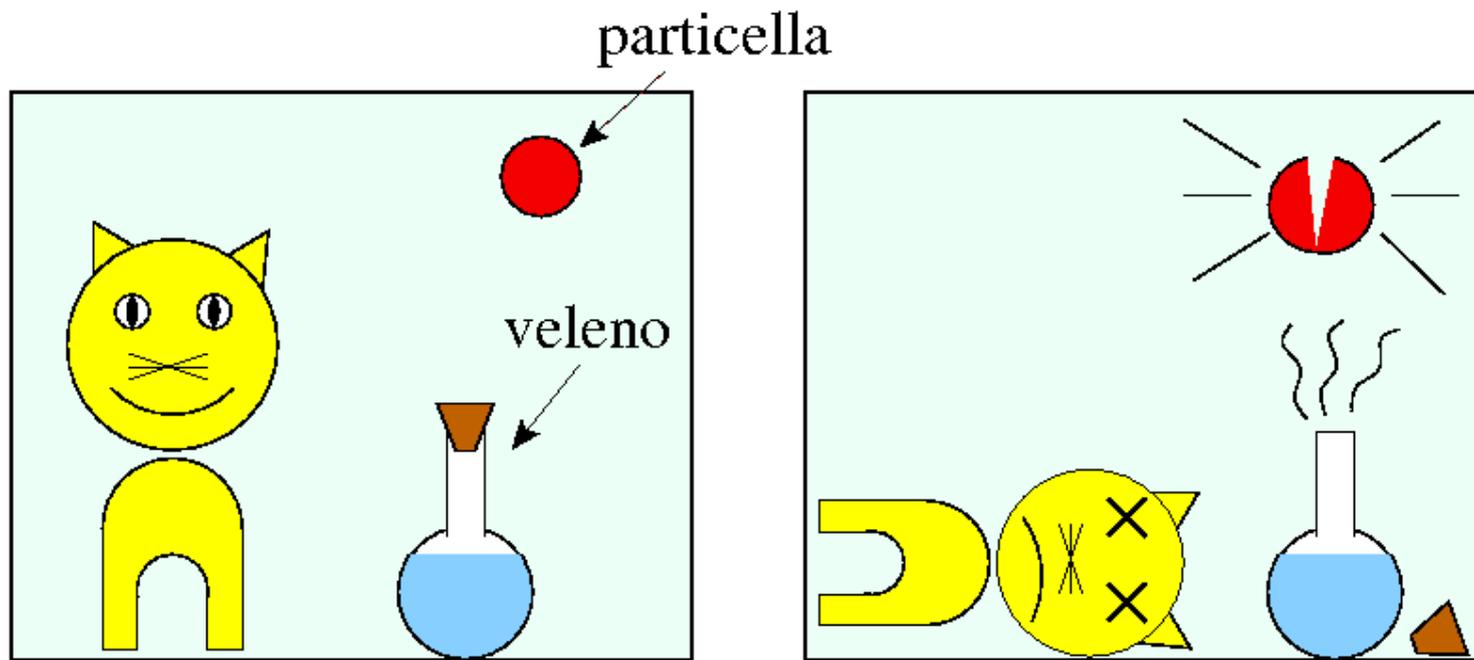
Mettiamo un gatto in una scatola *perfettamente* isolata.

# Il gatto di Schroedinger

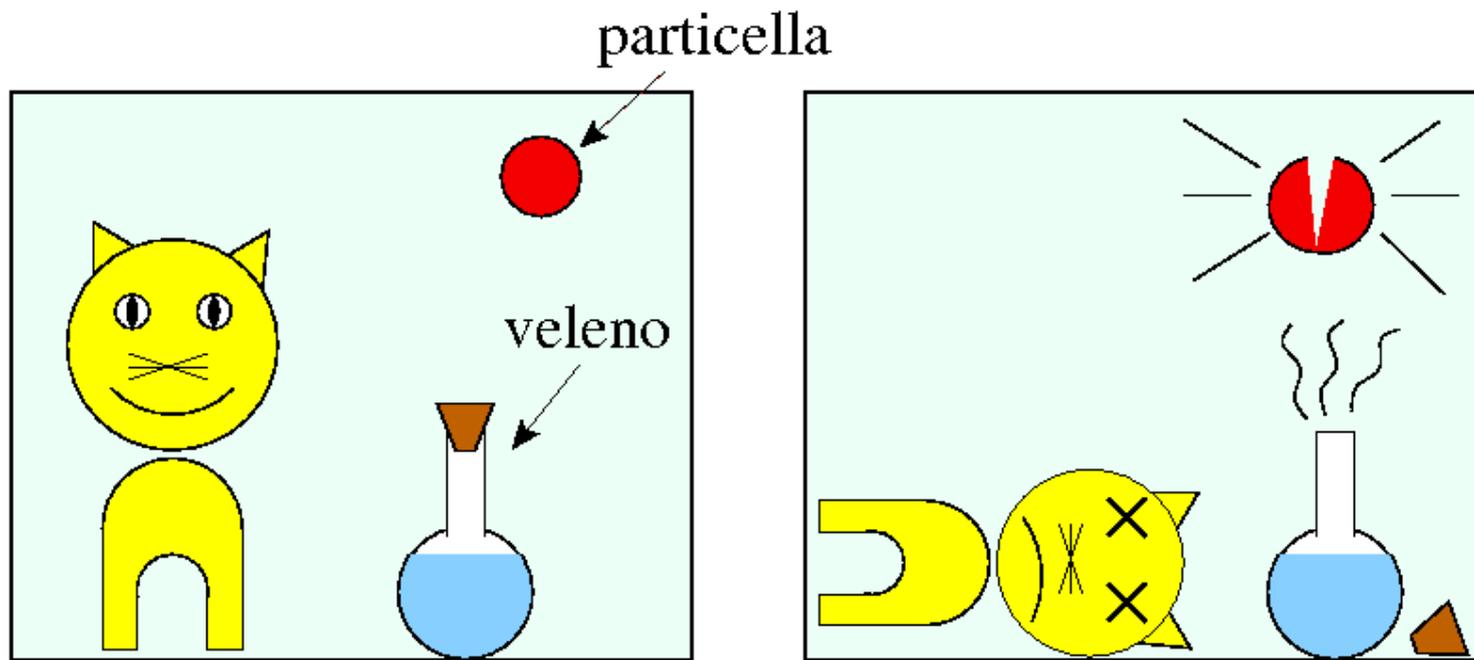
Mettiamo un gatto in una scatola *perfettamente* isolata.

Una boccetta di veleno si apre e uccide il gatto quando una particella radioattiva decade.



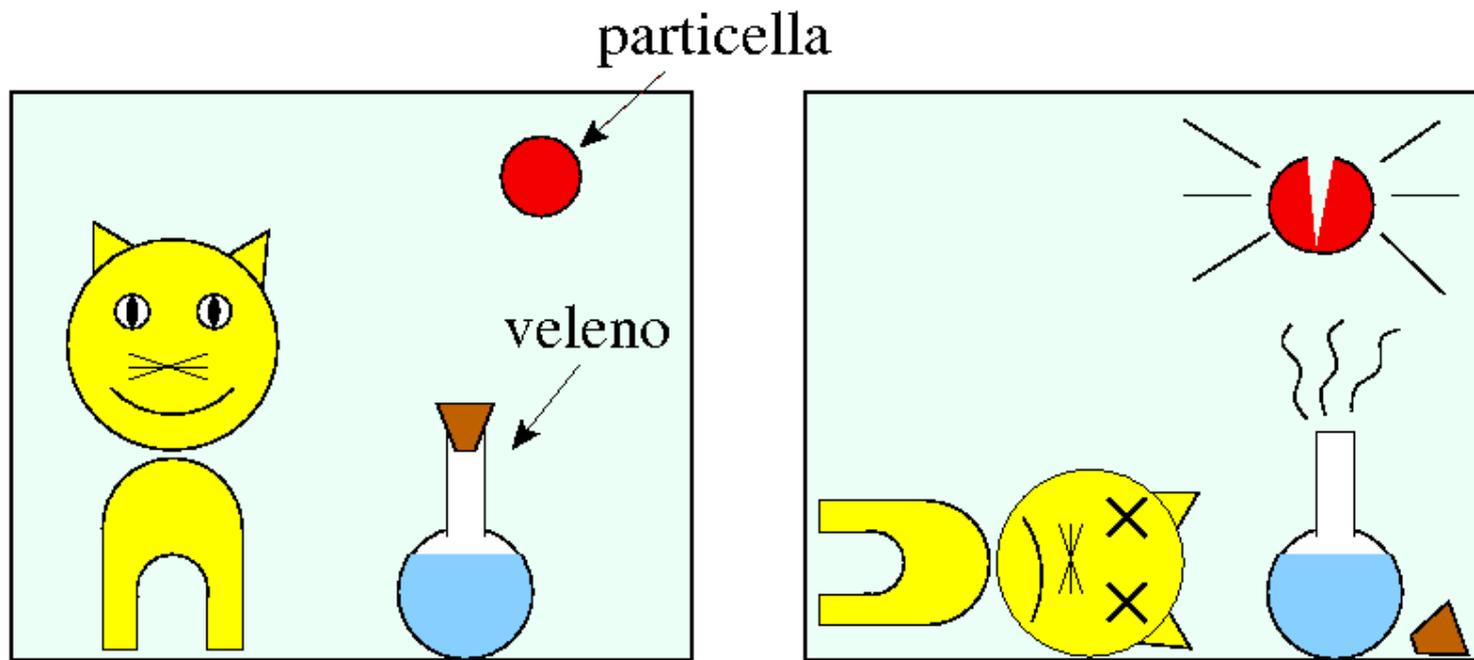


Usiamo una particella con un tempo di dimezzamento di 1 ora: dopo 1 ora ha una probabilità  $1/2$  di decadere.



Usiamo una particella con un tempo di dimezzamento di 1 ora: dopo 1 ora ha una probabilità  $1/2$  di decadere.

Cosa succederà?

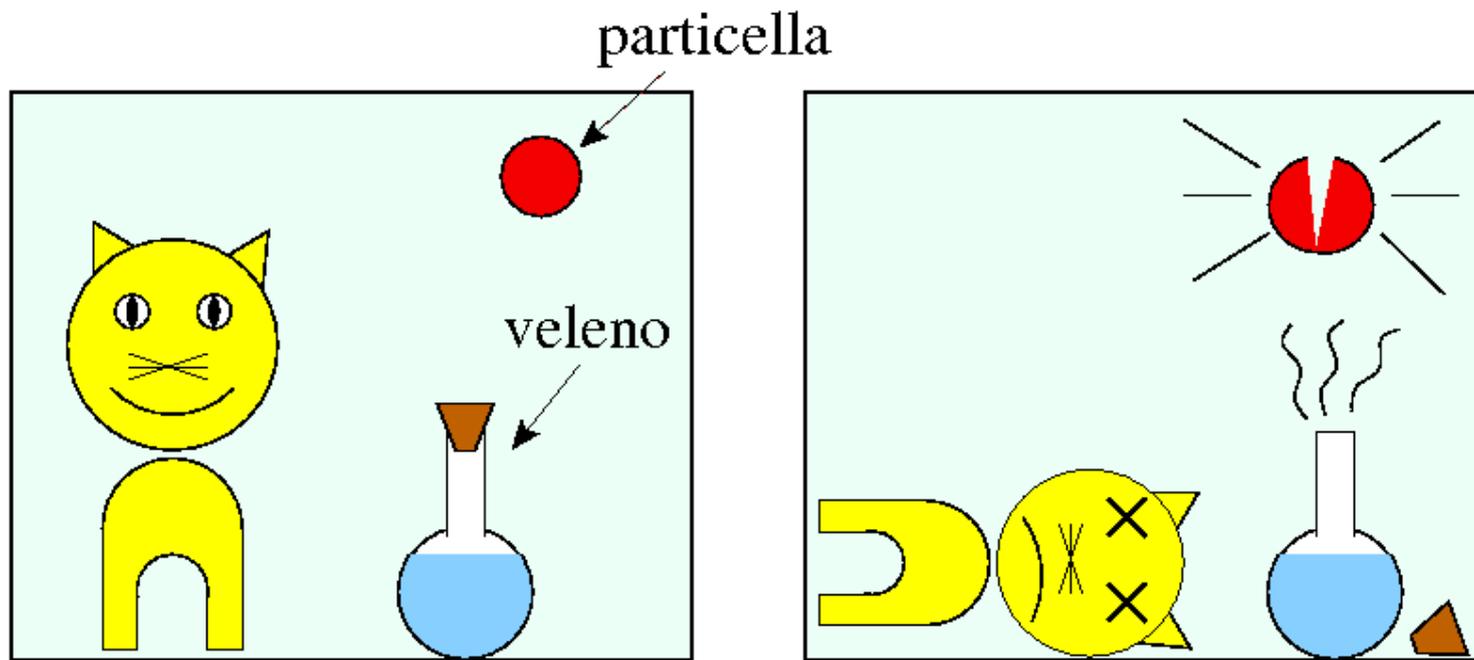


Usiamo una particella con un tempo di dimezzamento di 1 ora: dopo 1 ora ha una probabilità  $1/2$  di decadere.

Cosa succederà?

**OVVIO!**

Il gatto sarà vivo o morto con probabilità  $1/2$



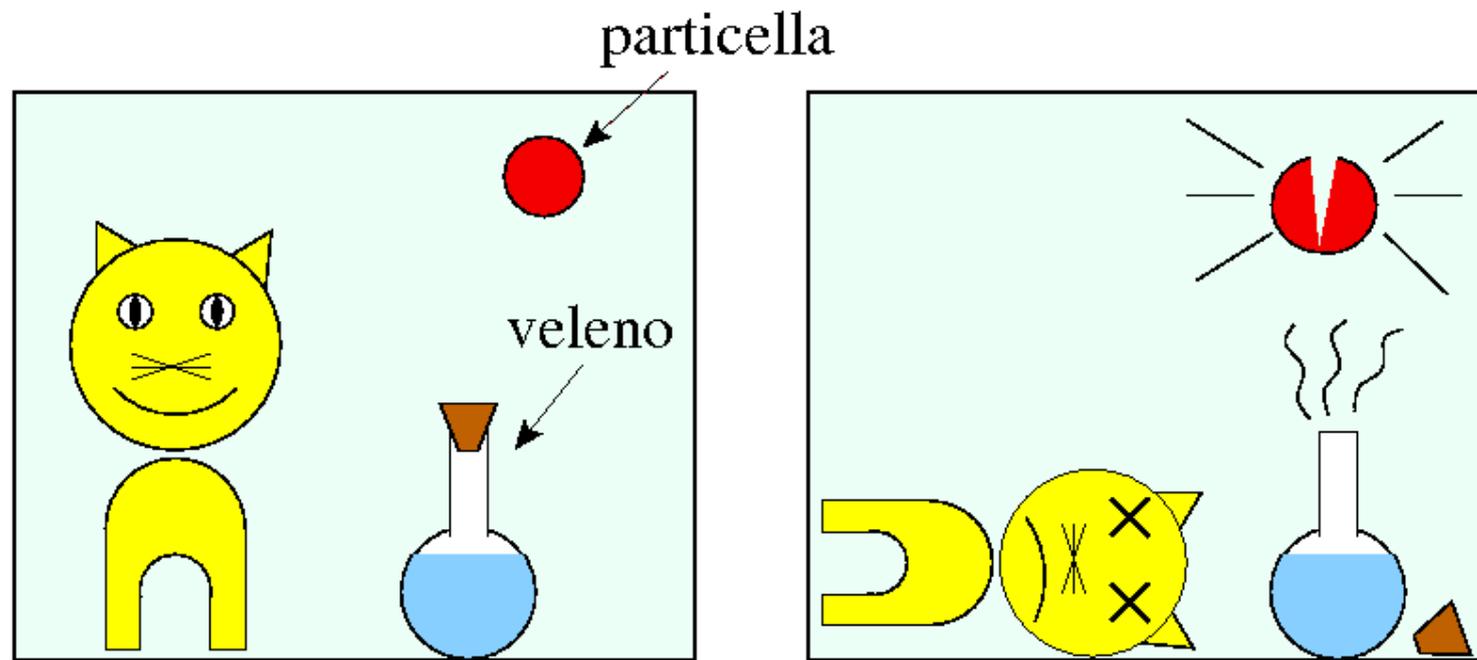
Usiamo una particella con un tempo di dimezzamento di 1 ora: dopo 1 ora ha una probabilità  $1/2$  di decadere.

Cosa succederà?

**OVVIO!**

Il gatto sarà vivo o morto con probabilità  $1/2$

Non c'è nulla di strano in ciò, semplicemente non sappiamo se il gatto è vivo o morto



Usiamo una particella con un tempo di dimezzamento di 1 ora: dopo 1 ora ha una probabilità  $1/2$  di decadere.

Cosa succederà?

**OVVIO!**

Il gatto sarà vivo o morto con probabilità  $1/2$

Non c'è nulla di strano in ciò, semplicemente non sappiamo se il gatto è vivo o morto

**Dov'è il paradosso?!**

Il paradosso sta nella differenza tra  
“**mistura**” e “**sovrapposizione**”

Il paradosso sta nella differenza tra  
“**mistura**” e “**sovrapposizione**”

$$\rho = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto|)$$

(non so se il gatto e' vivo o morto:  
e' vivo o morto con prob. 1/2)

Il paradosso sta nella differenza tra  
“**mistura**” e “**sovrapposizione**”

$$\rho = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto|)$$

(non so se il gatto e' vivo o morto:  
e' vivo o morto con prob. 1/2)

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|vivo\rangle + |morto\rangle)$$

cosa significa?

Il paradosso sta nella differenza tra  
“**mistura**” e “**sovrapposizione**”

$$\rho = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto|)$$

(non so se il gatto e' vivo o morto:  
e' vivo o morto con prob. 1/2)

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|vivo\rangle + |morto\rangle)$$

cosa significa?

$$\rho_{gatto} = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto| + |vivo\rangle\langle morto| + |morto\rangle\langle vivo|)$$

termini di interferenza

Il paradosso sta nella differenza tra  
“**mistura**” e “**sovrapposizione**”

$$\rho = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto|)$$

$$\rho_{gatto} = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto| \\ + |vivo\rangle\langle morto| + |morto\rangle\langle vivo|)$$

Che differenza c'e'?!?

Per capirlo, abbiamo bisogno del

## **Principio di complementarietà**



Per capirlo, abbiamo bisogno del

**Principio di complementarietà:  
NON è POSSIBILE CONOSCERE TUTTE LE  
PROPRIETÀ CHE UN OGGETTO PUÒ AVERE**



Per capirlo, abbiamo bisogno del

**Principio di complementarietà:**

**NON è POSSIBILE CONOSCERE TUTTE LE  
PROPRIETÀ CHE UN OGGETTO PUÒ AVERE**

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



Per capirlo, abbiamo bisogno del

**Principio di complementarietà:  
NON è POSSIBILE CONOSCERE TUTTE LE  
PROPRIETÀ CHE UN OGGETTO PUÒ AVERE**

Se una proprietà ha un valore ben definito, le proprietà complementari NON hanno valore.



Per capirlo, abbiamo bisogno del

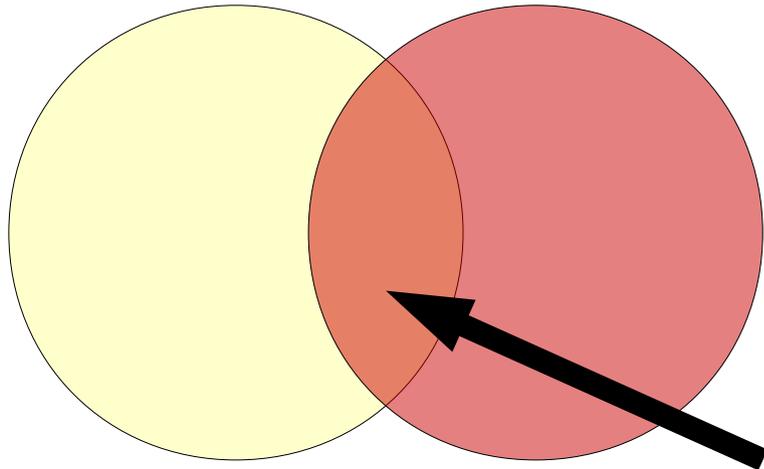
**Principio di complementarietà:  
NON è POSSIBILE CONOSCERE TUTTE LE  
PROPRIETÀ CHE UN OGGETTO PUÒ AVERE**

Se una proprietà ha un valore ben definito, le proprietà complementari NON hanno valore.

ESISTONO PROPRIETÀ COMPLEMENTARI

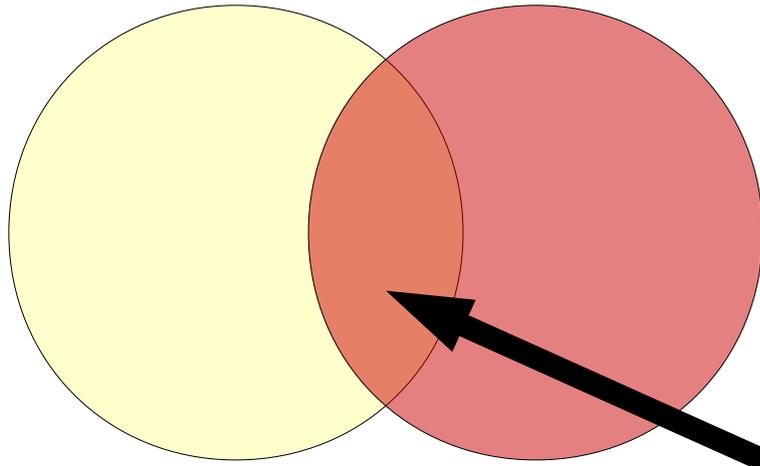


# Metafora per la complementarità:



arancione è giallo+rosso

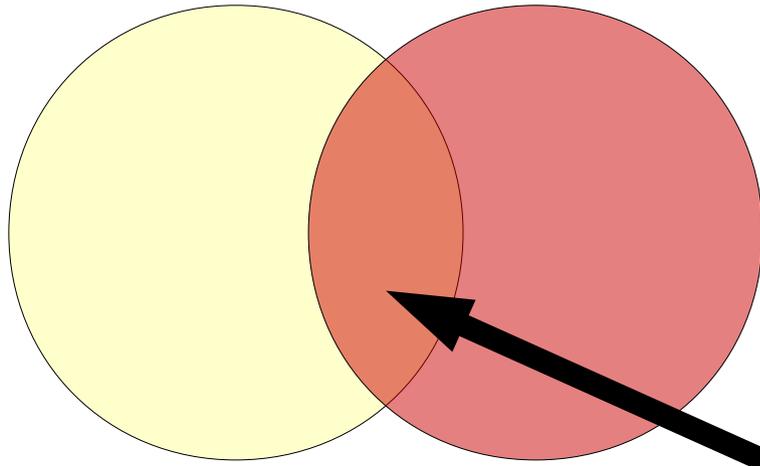
# Metafora per la complementarità:



arancione è giallo+rosso

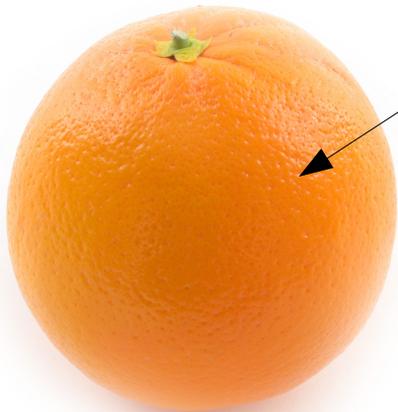
“arancionità” è complementare a giallo/rosso

# Metafora per la complementarità:



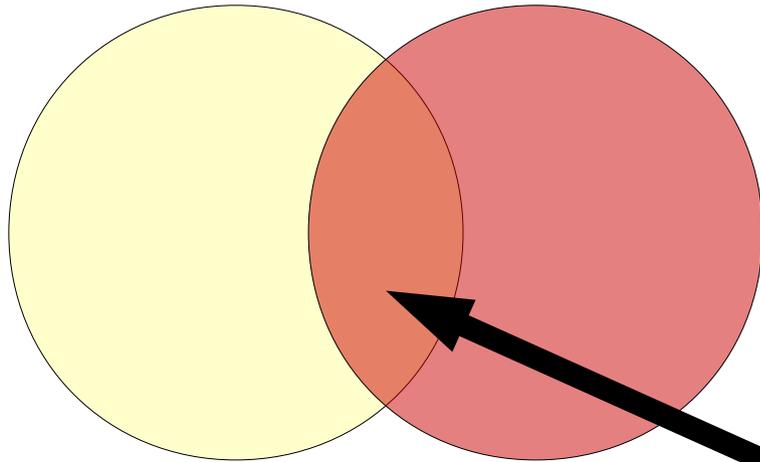
arancione è giallo+rosso

“arancionità” è complementare a giallo/rosso



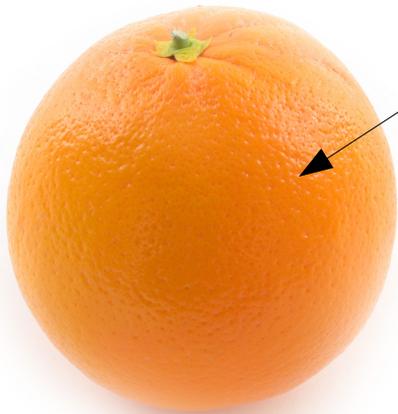
arancia non è nè gialla nè rossa, è contemporaneamente gialla e rossa.

# Metafora per la complementarità:



arancione è giallo+rosso

“arancionità” è complementare a giallo/rosso



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

**Cosa vuol dire che le proprietà  
complementari non hanno valore?**

# **Cosa vuol dire che le proprietà complementari non hanno valore?**

**Forse hanno un valore “nascosto”? Magari hanno un qualche valore ma semplicemente NON LO CONOSCO?**

# Cosa vuol dire che le proprietà complementari non hanno valore?

Forse hanno un valore “nascosto”? Magari hanno un qualche valore ma semplicemente **NON LO CONOSCO?**

**NO!!!!!!!!!!!!!!**



# Cosa vuol dire che le proprietà complementari non hanno valore?

Forse hanno un valore “nascosto”? Magari hanno un qualche valore ma semplicemente **NON LO CONOSCO?**

# **NO!!!!!!!!!!!!!!**

- T. di Bell
- Contestualita'
- Argomento GHZ

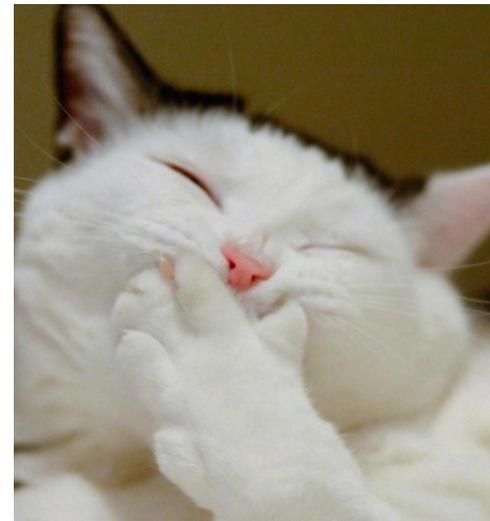


**principio di complementarità: proprietà complementari non sono definite.**



**T. Bell**

AJP 81, 854 (2013)



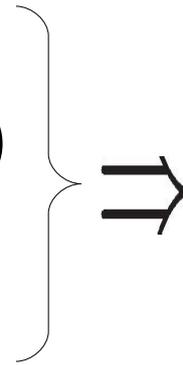
# T. Bell

AJP 81, 854 (2013)

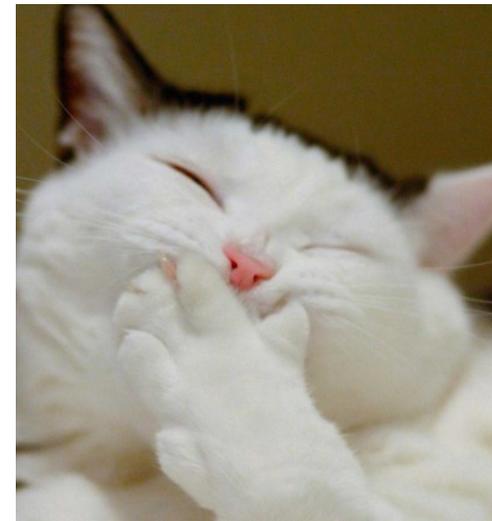
- Counterfactual determinism (esistono proprieta' anche quando non si misura)

**AND**

- Localita' di Einstein



disuguaglianza (violata dalla MQ)



# T. Bell

AJP 81, 854 (2013)

•Counterfactual determinism (esistono proprieta' anche quando non si misura)

**AND**

•Localita' di Einstein



disuguaglianza (violata dalla MQ)

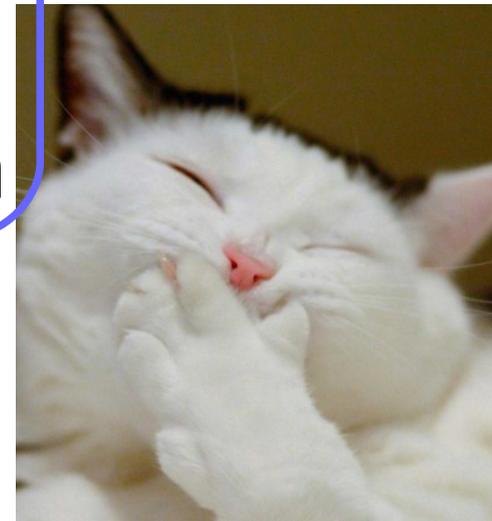
cioe':

MQ ⇒

•No counterfactual  
determinism

**OR**

•No localita' di Einstein



# T. Bell

AJP 81, 854 (2013)

•Counterfactual determinism (esistono proprieta' anche quando non si misura)

**AND**

•Localita' di Einstein



disuguaglianza (violata dalla MQ)

cioe':

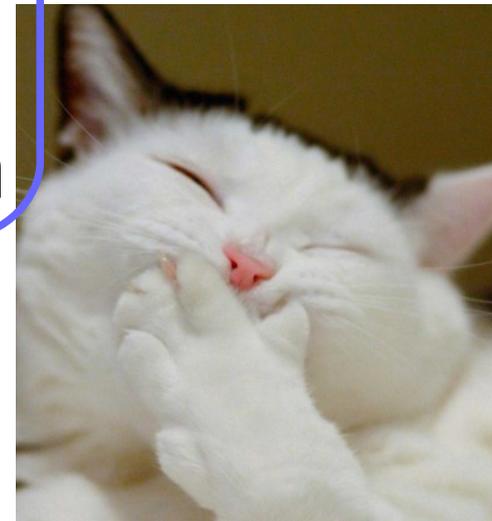
MQ ⇒

•No counterfactual  
determinism

**OR**

•No localita' di Einstein

cioe': se vogliamo la localita', dobbiamo eliminare CD:



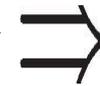
# T. Bell

AJP 81, 854 (2013)

•Counterfactual determinism (esistono proprieta' anche quando non si misura)

**AND**

•Localita' di Einstein



disuguaglianza (violata dalla MQ)

cioe':

MQ ⇒

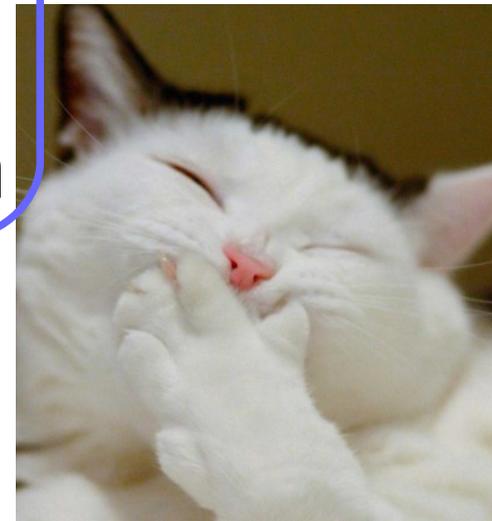
•No counterfactual  
determinism

**OR**

•No localita' di Einstein

cioe': se vogliamo la localita', dobbiamo

eliminare CD: **no proprieta'!!!!**



**GHZ**

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle)$$

# GHZ

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle)$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x |\Psi\rangle = -|\Psi\rangle$$

Autostato con aval +1

Autostato con aval -1

# GHZ

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle)$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x |\Psi\rangle = -|\Psi\rangle$$

Autostato con aval +1

Autostato con aval -1

aval:

$$m_{1x}m_{2y}m_{3y} = m_{1y}m_{2x}m_{3y} = m_{1y}m_{2y}m_{3x} = 1$$

$$m_{1x}m_{2x}m_{3x} = -1$$

# GHZ

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle)$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$$

aval:

$$m_{1x}m_{2y}m_{3y} = m_{1y}m_{2x}m_{3y} = m_{1y}m_{2y}m_{3x} = 1$$

$$m_{1x}m_{2x}m_{3x} = -1$$

“Elementi di realta' locale”,  
secondo la definizione di Einstein

stato con aval +1

stato con aval -1

# GHZ

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle)$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$$

aval:

$$m_{1x}m_{2y}m_{3y} = m_{1y}m_{2x}m_{3y} = m_{1y}m_{2y}m_{3x} = 1$$

$$m_{1x}m_{2x}m_{3x} = -1$$

...ma  $m_y^2 = 1$

“Elementi di realta' locale”,  
secondo la definizione di Einstein

stato con aval +1

stato con aval -1

il prodotto dei primi tre non da' l'ultimo!!!

# GHZ

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle)$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y$$

$$\sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x$$

$$\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$$

aval:

$$m_{1x}m_{2y}m_{3y} = m_{1y}m_{2x}m_{3y} = m_{1y}m_{2y}m_{3x} = 1$$

$$m_{1x}m_{2x}m_{3x} = -1$$

...ma  $m_y^2 = 1$

il prodotto dei primi tre non da' l'ultimo!!!

“Elementi di realta' locale”,  
secondo la definizione di Einstein

stato con aval +1

stato con aval -1

⇒ **IMPOSSIBILE** assegnare le proprieta'  
(dire che gli aval sono proprieta') indip dalla misura compiuta

# Conseguenza:

La piu' semplice interpretazione di

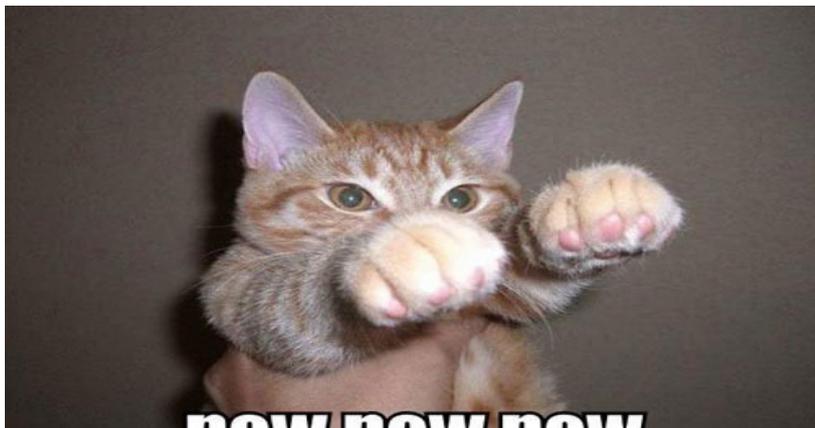
- T. di Bell
- Contestualita'
- Argomento GHZ



**principio di complementarità: proprietà  
complementari non sono definite  
contemporaneamente.**

# Relazioni di indeterminazione di Heisenberg

conseguenza dell'esistenza di proprietà complementari



# Relazioni di indeterminazione di Heisenberg

conseguenza dell'esistenza di proprieta' complementari

**piu' e' definita una proprieta'**

**meno sono definite le sue proprieta' complementari**



# Relazioni di indeterminazione di Heisenberg

conseguenza dell'esistenza di proprieta' complementari

**piu' e' definita una proprieta'**

**meno sono definite le sue proprieta' complementari**

esempio: posizione e momento



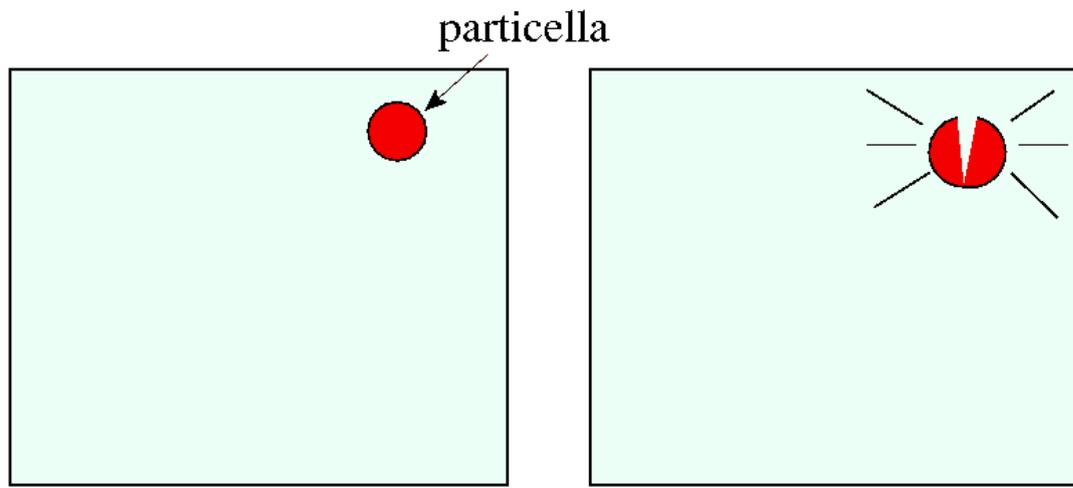
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

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

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!?



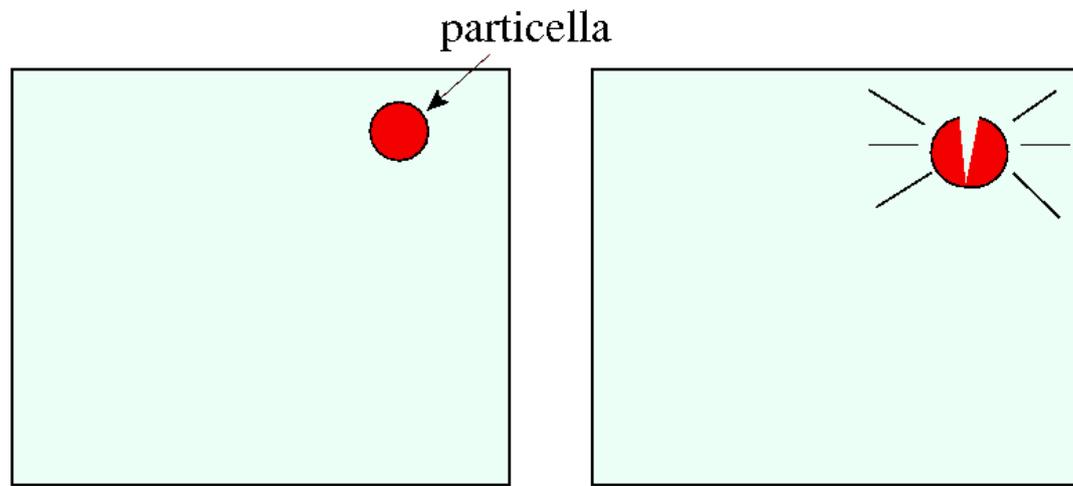


La particella ha due proprietà complementari:

decaduta/non decaduta

complementare

più/meno



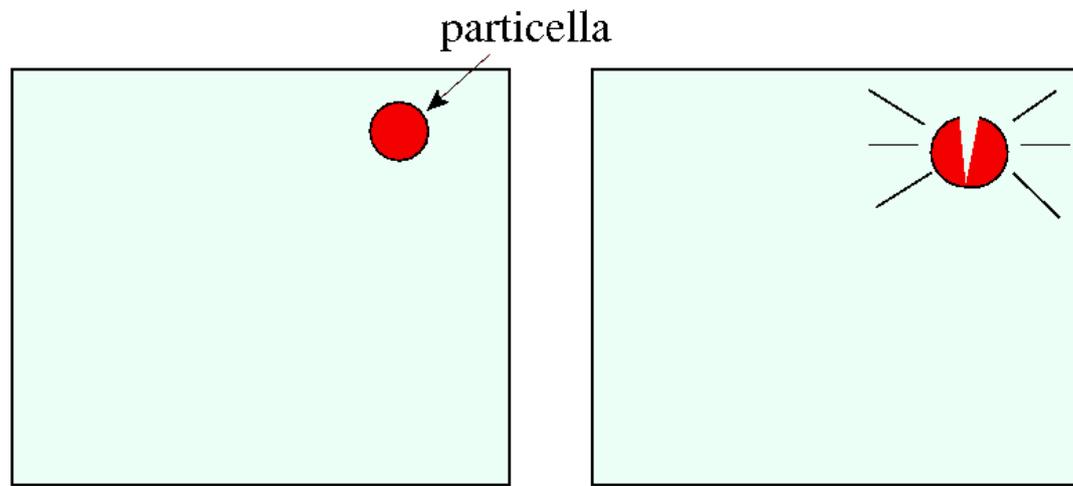
La particella ha due proprietà complementari:

decaduta/non decaduta

complementare

più/meno

è una proprietà facilmente misurabile (interferometria quantistica), ma non è riconducibile a niente che ci sia familiare.



La particella ha due proprietà complementari:

decaduta/non decaduta

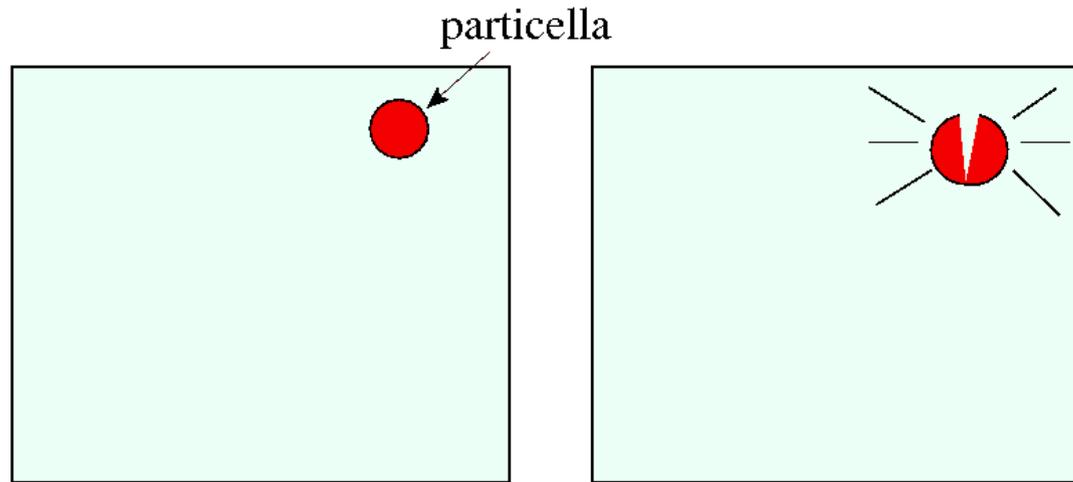
complementare

più/meno

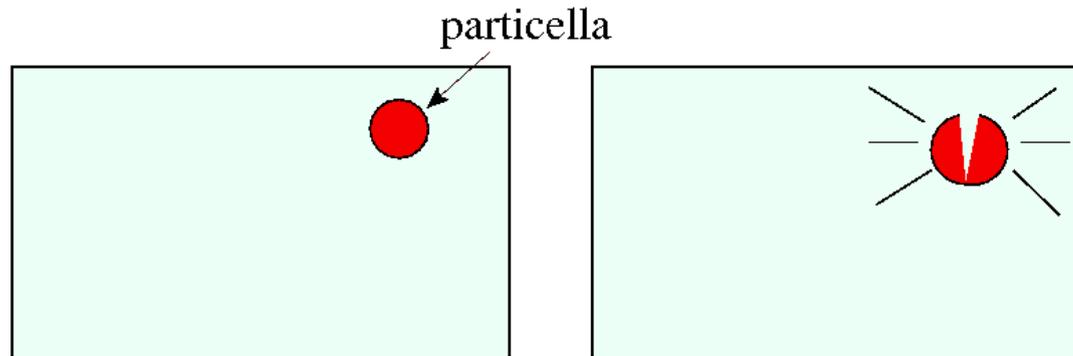
è una proprietà facilmente misurabile (interferometria quantistica), ma non è riconducibile a niente che ci sia familiare.

Problema semantico! Non esistono strutture mentali note a cui ricondurre questa proprietà!  
In maniera approssimativa si può dire che è legata alle proprietà ondulatorie della particella

Dopo un'ora, una particella con tempo di dimezzamento di un'ora è una **particella Più**

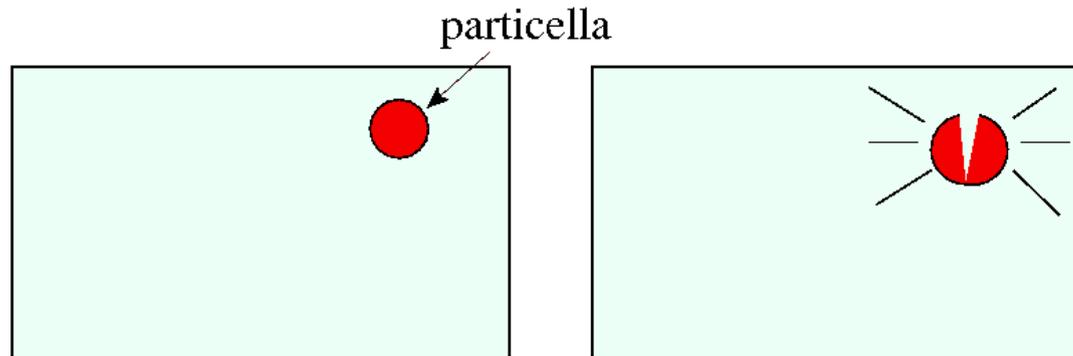


Dopo un'ora, una particella con tempo di dimezzamento di un'ora è una **particella Più**



**Siccome la scatola è isolata, il gatto eredita le proprietà della particella.**

Dopo un'ora, una particella con tempo di dimezzamento di un'ora è una **particella Più**

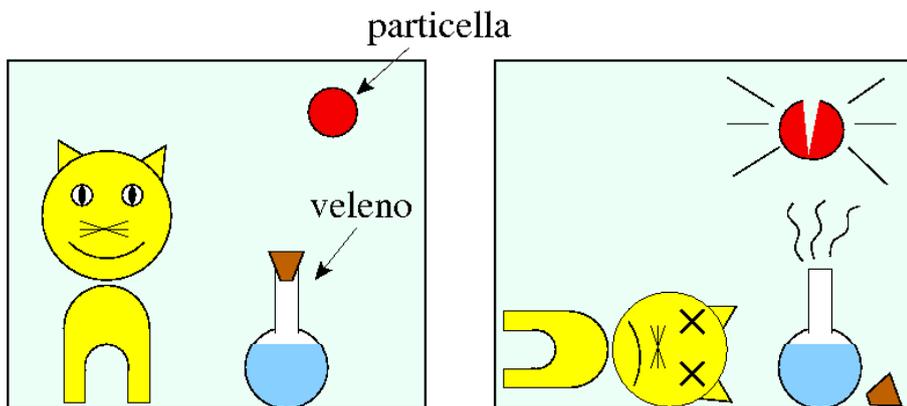


**Siccome la scatola è isolata, il gatto eredita le proprietà della particella.**

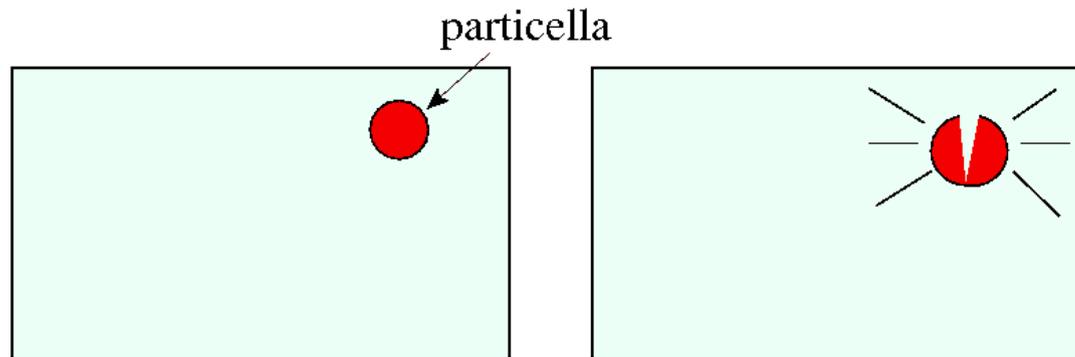
**decaduta/non decaduta  
morto / vivo**

complementare

**più/meno**



Dopo un'ora, una particella con tempo di dimezzamento di un'ora è una **particella Più**

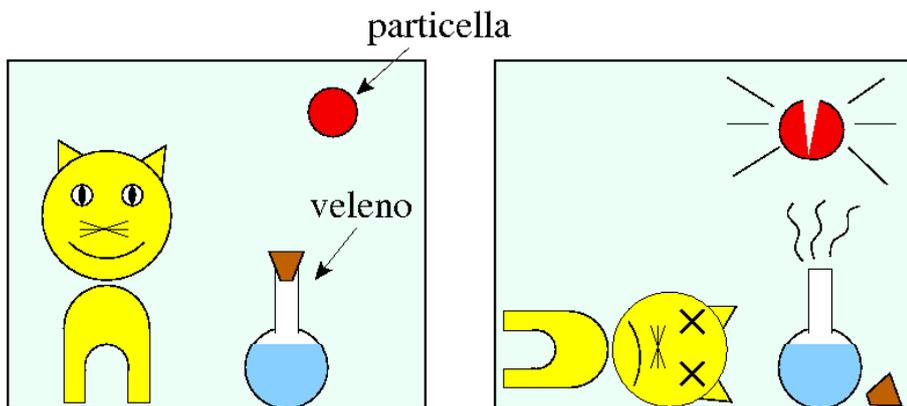


**Siccome la scatola è isolata, il gatto eredita le proprietà della particella.**

**decaduta/non decaduta  
morto / vivo**

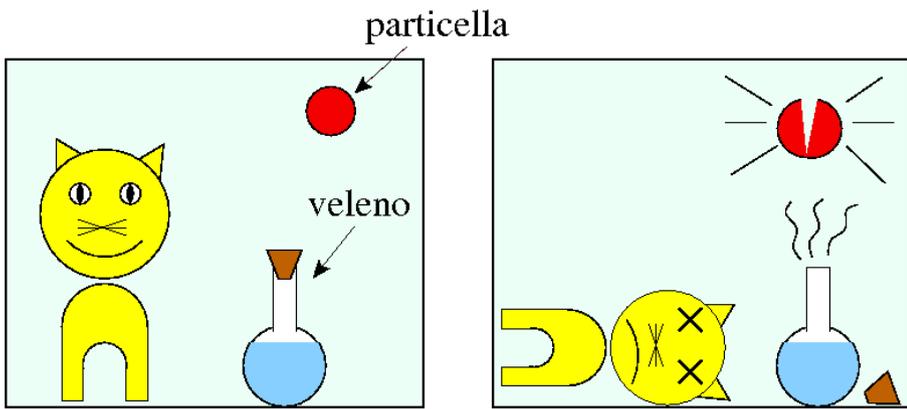
complementare

**più/meno**



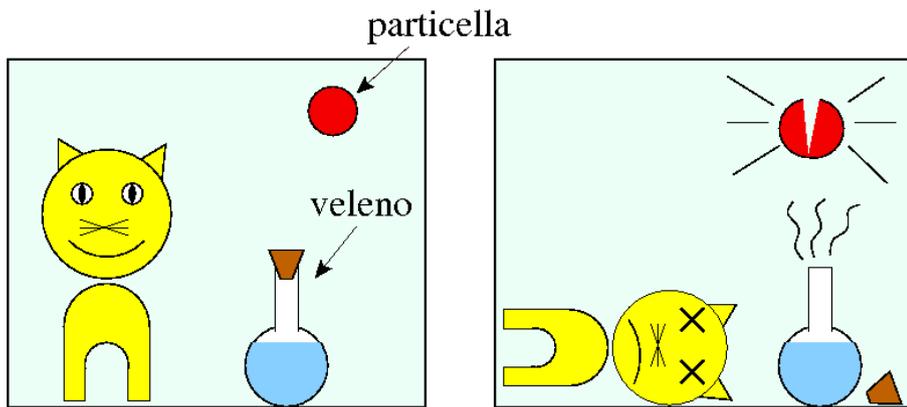
abbiamo creato un gatto più

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{vivo} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{morto} \end{array} \right\rangle \right)$$



abbiamo creato un  
**gatto più**

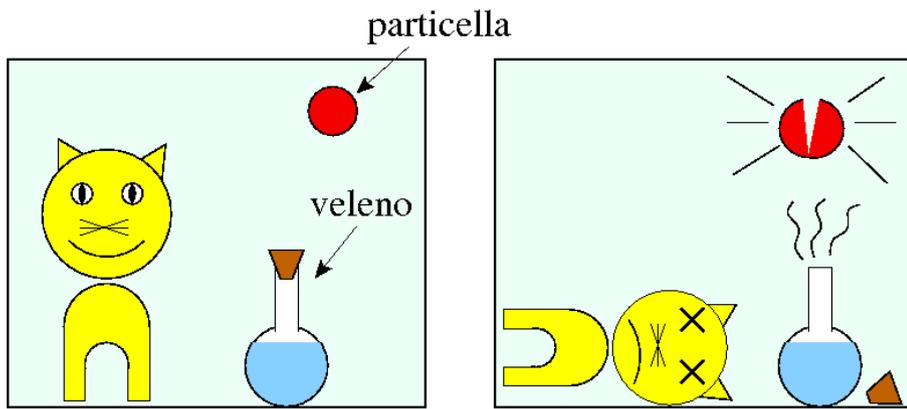
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto vivo} \\ \text{particella} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto morto} \\ \text{particella} \end{array} \right\rangle \right)$$



abbiamo creato un  
**gatto più**

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto vivo} \\ \text{gatto morto} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto morto} \\ \text{gatto vivo} \end{array} \right\rangle \right)$$

... ma **più** è complementare a **vivo/morto**, quindi un **gatto più non è nè vivo nè morto**



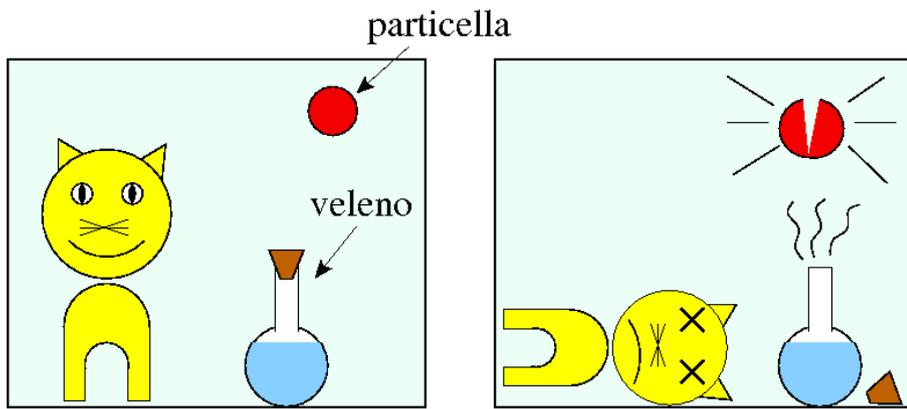
abbiamo creato un  
**gatto più**

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto vivo} \\ \text{gatto morto} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto morto} \\ \text{gatto vivo} \end{array} \right\rangle \right)$$

... ma **più** è complementare a **vivo/morto**, quindi un **gatto più non è nè vivo nè morto**

per mancanza di definizione migliore (problema semantico) diciamo che

**il gatto più è contemporaneamente vivo e morto!!!**



abbiamo creato un  
**gatto più**

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto vivo} \\ \text{gatto morto} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto morto} \\ \text{gatto vivo} \end{array} \right\rangle \right)$$

... ma **più** è complementare a **vivo/morto**, quindi un **gatto più non è nè vivo nè morto**

per mancanza di definizione migliore (problema semantico) diciamo che

**il gatto più è contemporaneamente vivo e morto!!!**

ecco dov'è il paradosso: tutti noi abbiamo visto gatti vivi e gatti morti. Sappiamo anche immaginarci un gatto che è vivo o morto con prob. 1/2 (non sappiamo il suo stato di salute)

.. ma nessuno ha mai visto un gatto contempor. vivo E morto!

Il gatto **piu'** e' una “**sovrapposizione**”

$$\rho = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto|)$$

(non so se il gatto e' vivo o morto:  
e' vivo o morto con prob. 1/2)

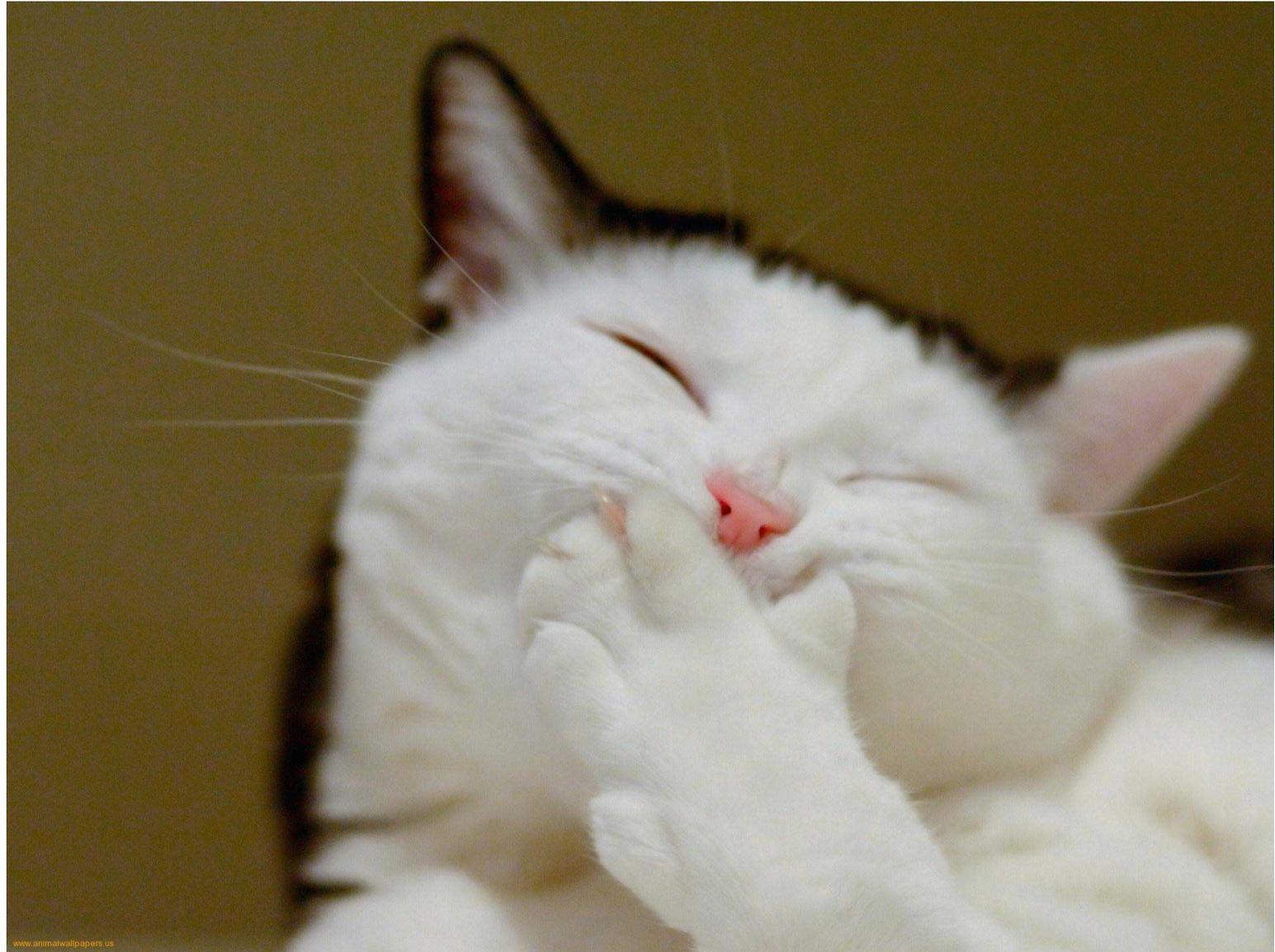
$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|vivo\rangle + |morto\rangle)$$

non e' ne' vivo ne' morto...

$$\rho_{gatto} = \frac{1}{2}(|vivo\rangle\langle vivo| + |morto\rangle\langle morto| + |vivo\rangle\langle morto| + |morto\rangle\langle vivo|)$$

termini di interferenza

è possibile dare proprietà  
“più” a qualcosa?



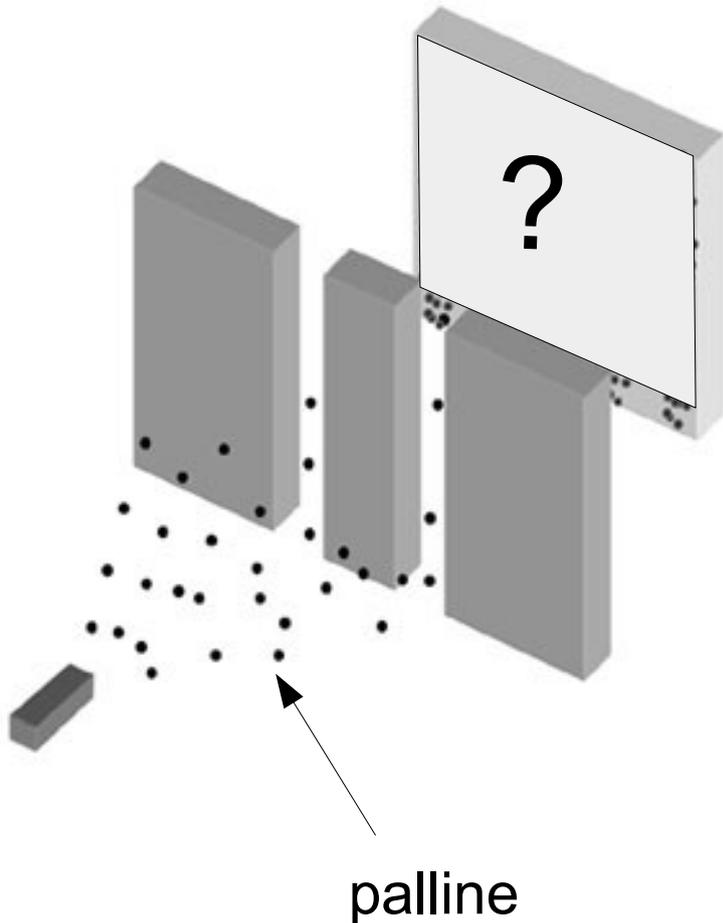
Esperimenti?

Possiamo “vedere” oggetti più?

# Esperimenti?

## Possiamo “vedere” oggetti più?

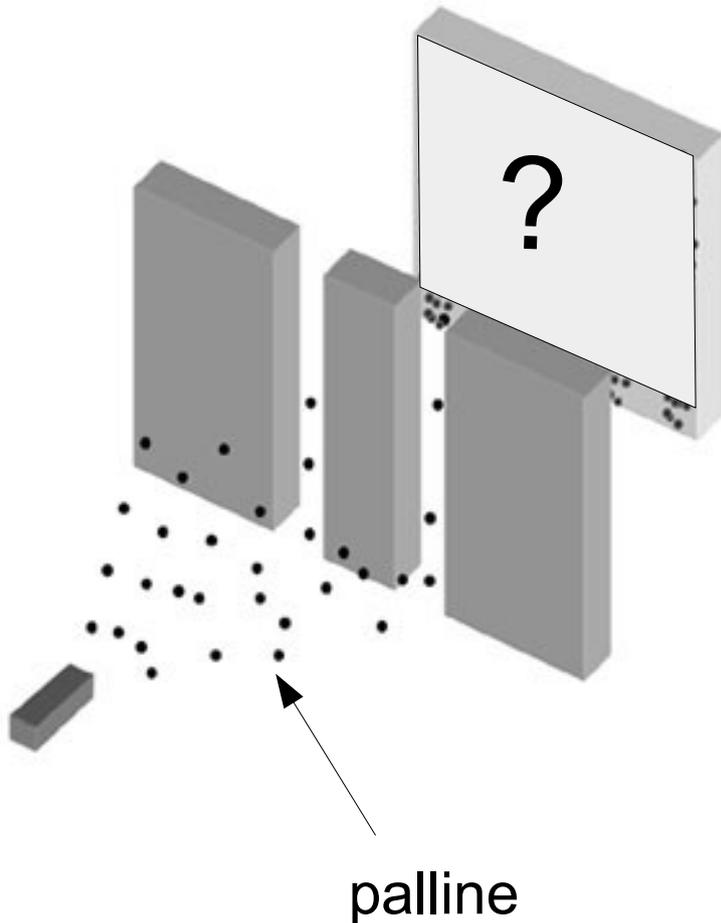
### Doppia fenditura:



# Esperimenti?

## Possiamo “vedere” oggetti più?

### Doppia fenditura:

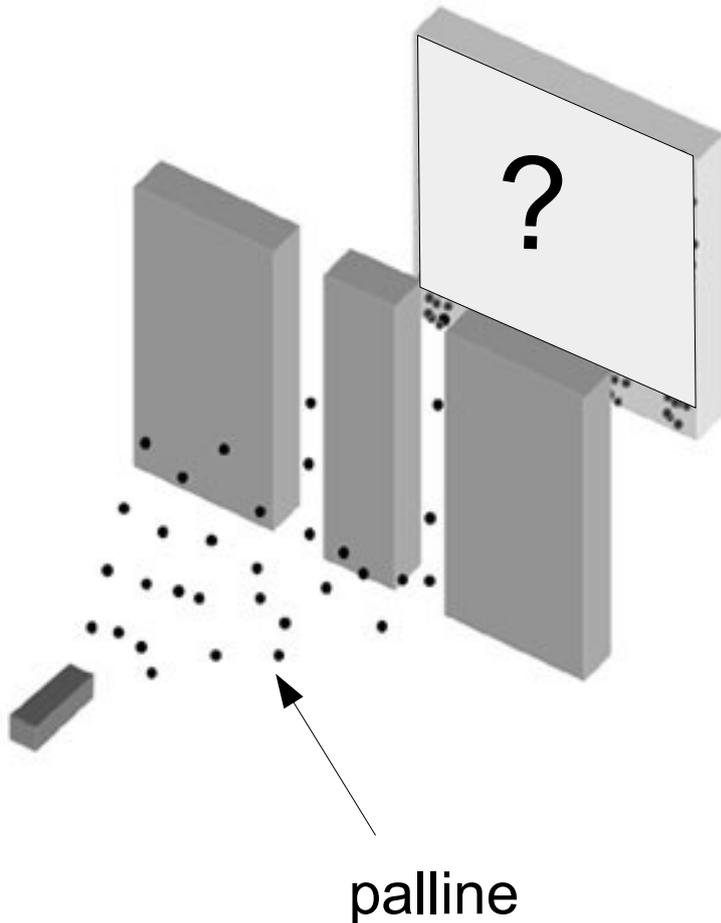


cosa vedo sullo schermo?

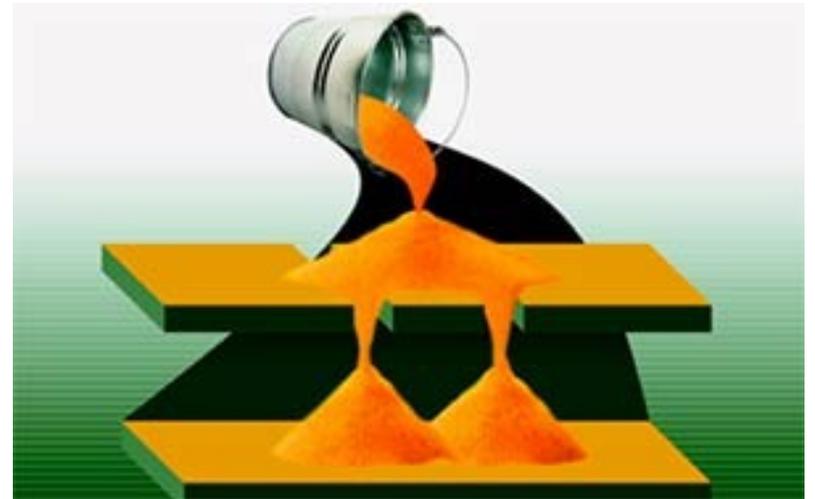
# Esperimenti?

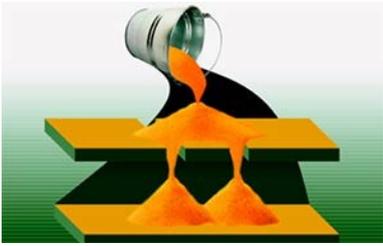
## Possiamo “vedere” oggetti più?

### Doppia fenditura:

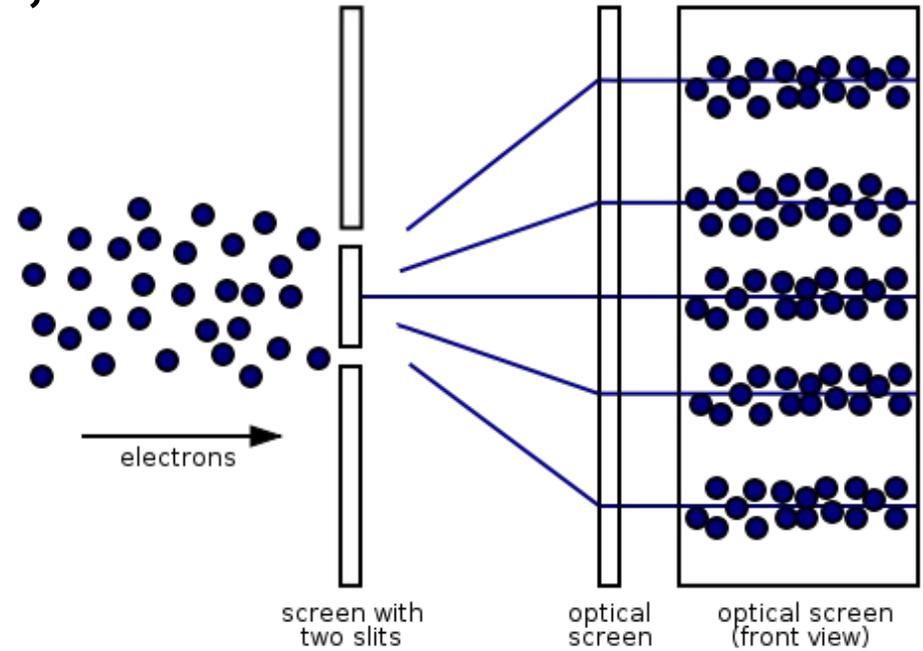


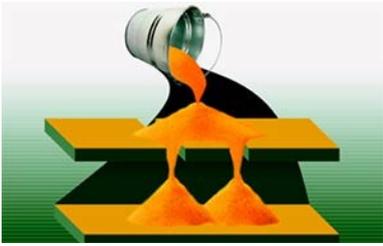
cosa vedo sullo schermo?





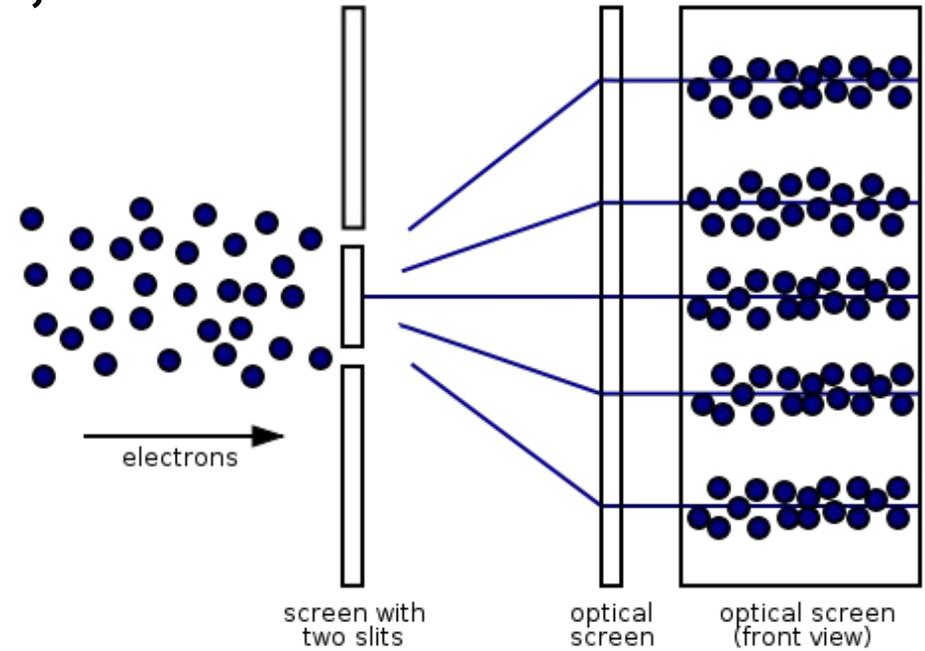
NO! Non vedo due mucchietti, ma

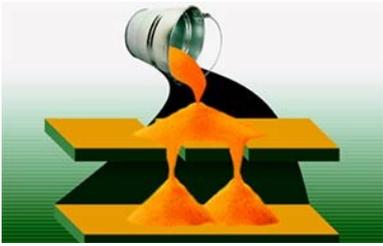




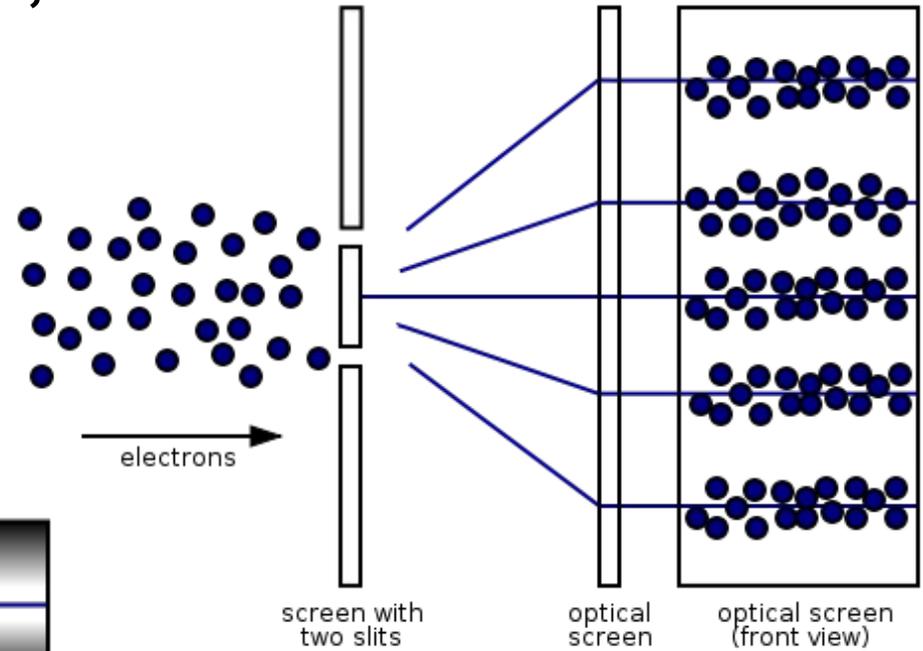
NO! Non vedo due mucchietti, ma

*in appropriate condizioni*

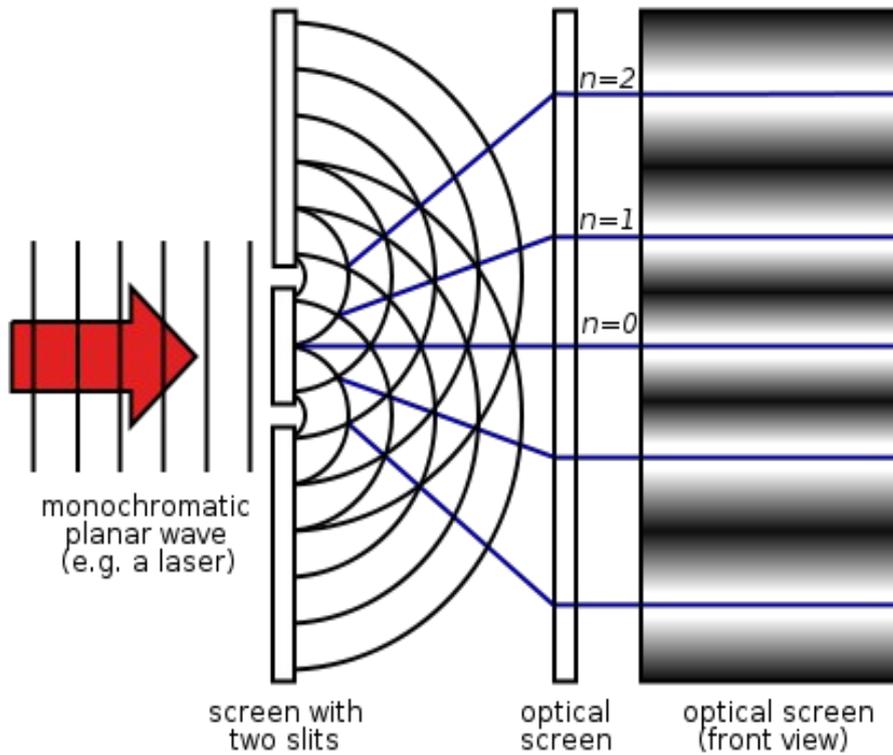


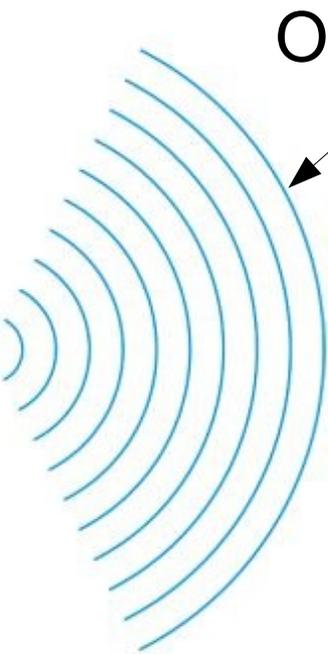
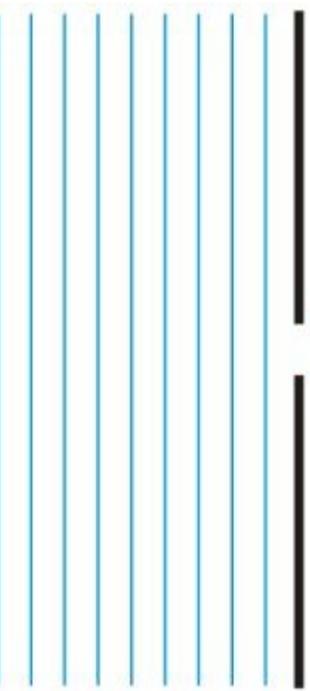


NO! Non vedo due mucchietti, ma



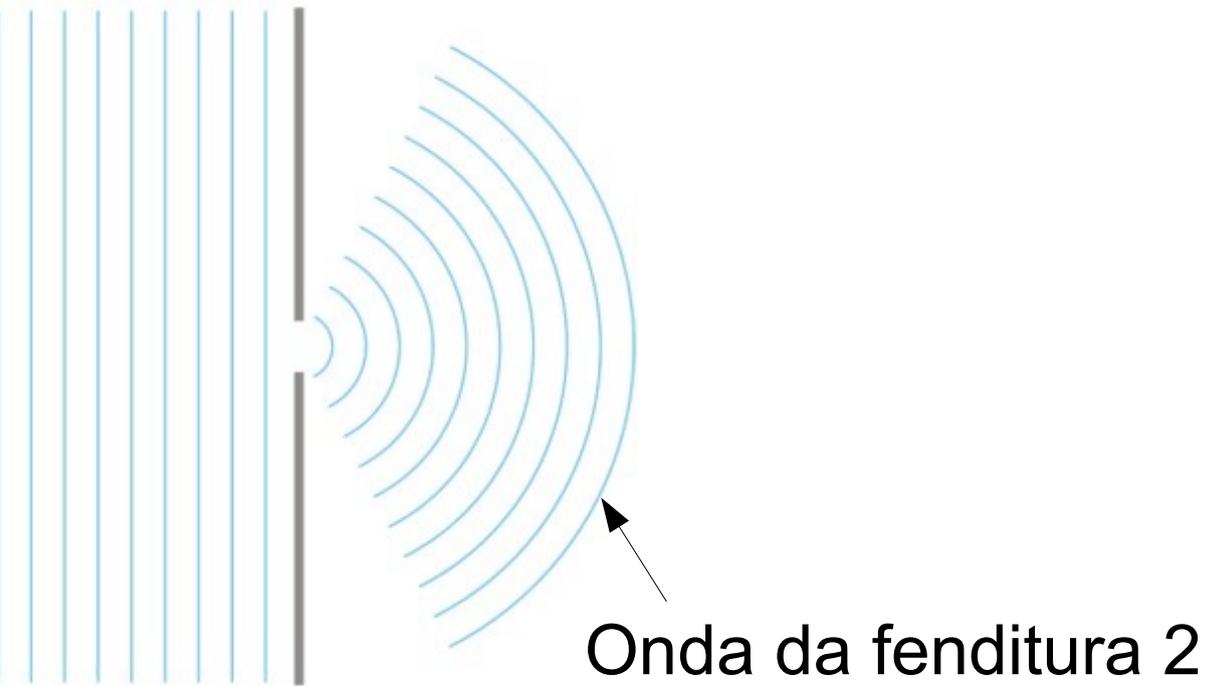
Si puo' spiegare con le onde:



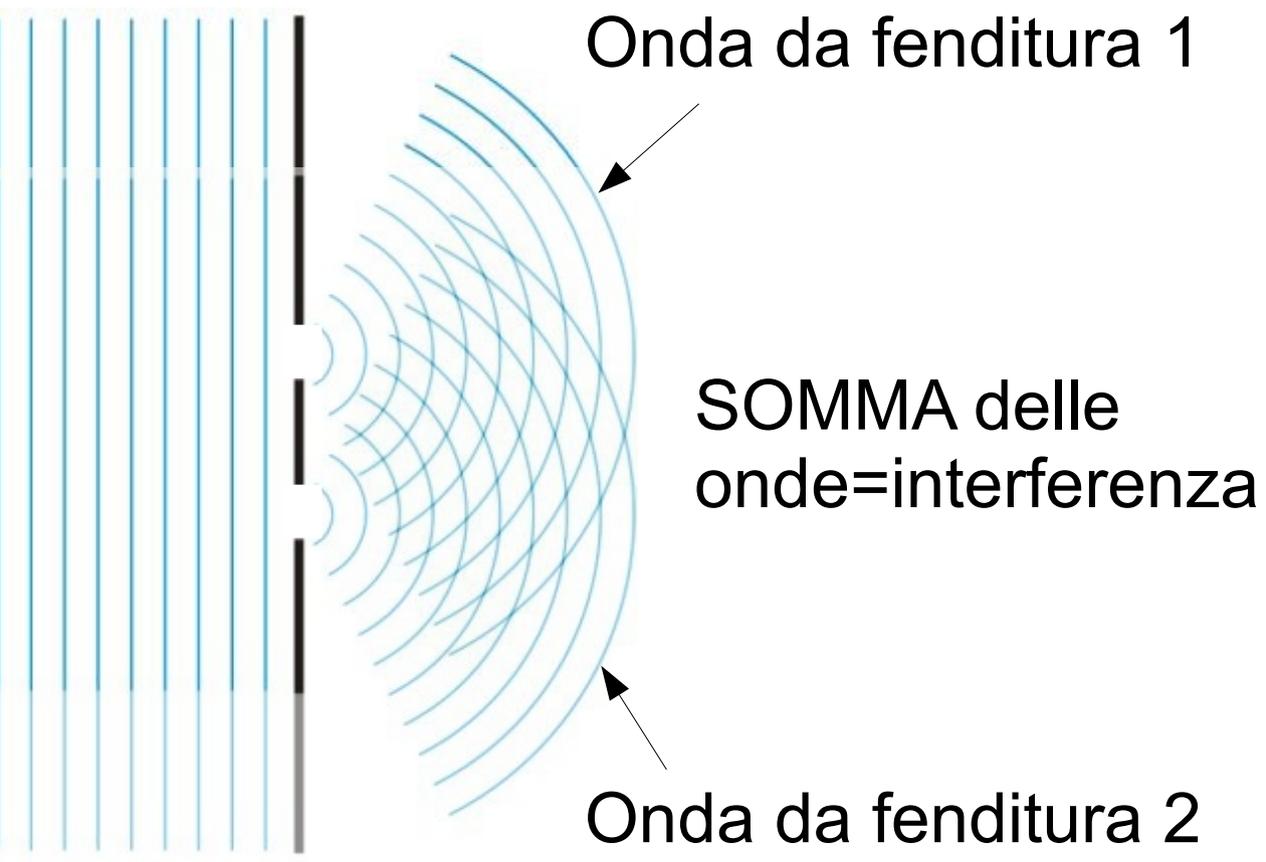


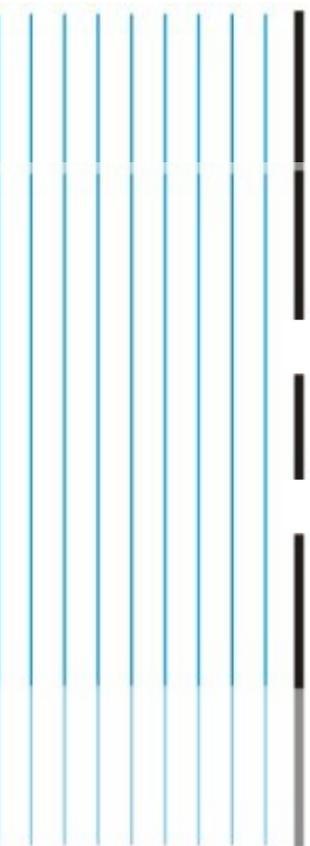
Onda da fenditura 1





Onda da fenditura 2

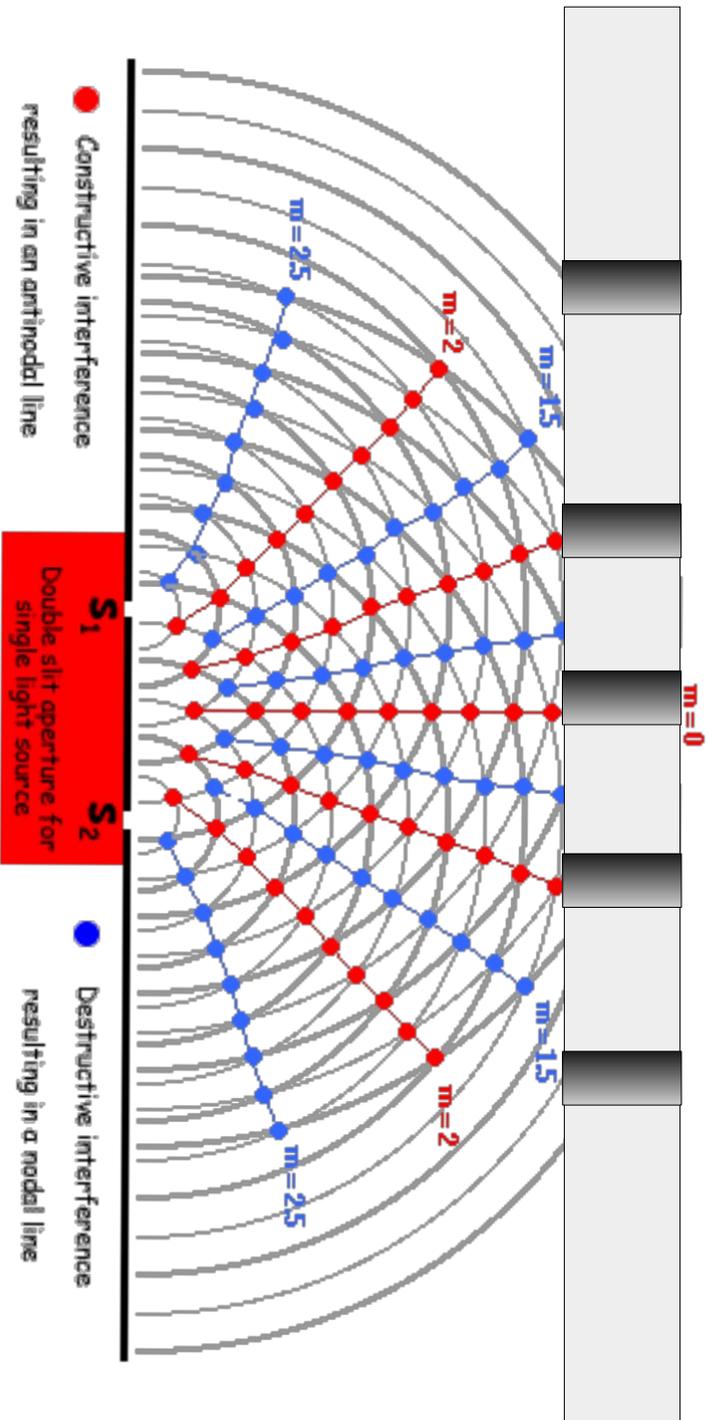




Onda da fenditura 1

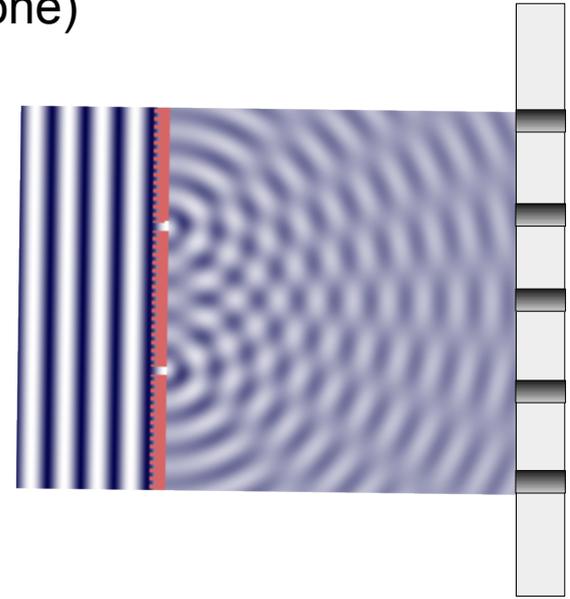
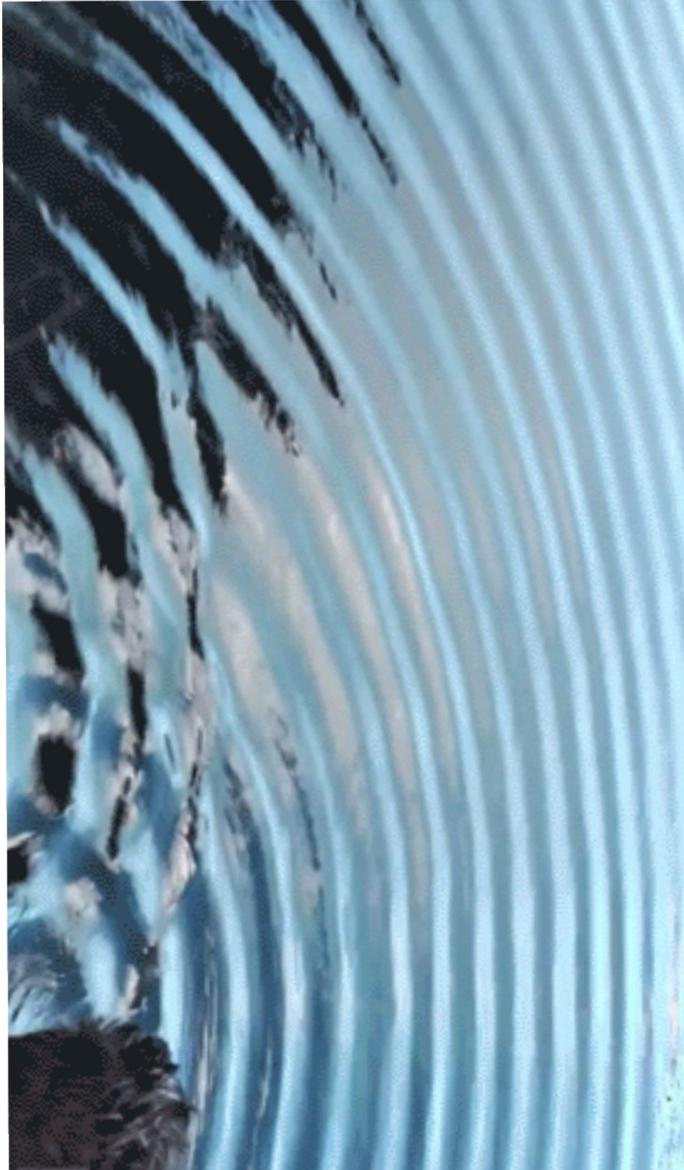
Onda da fenditura 2

SOMMA delle onde=interferenza

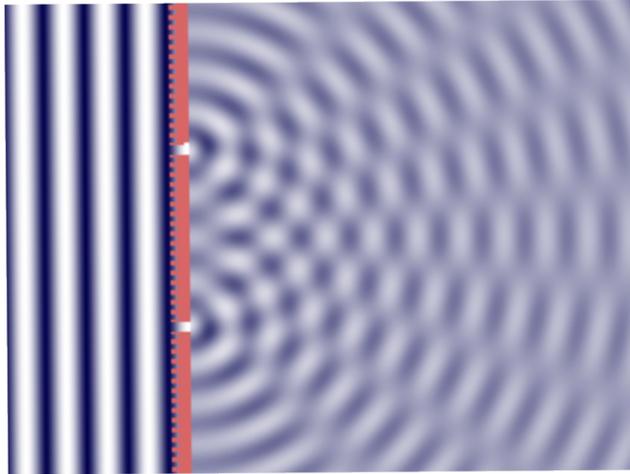


# Le palline si comportano come onde!!

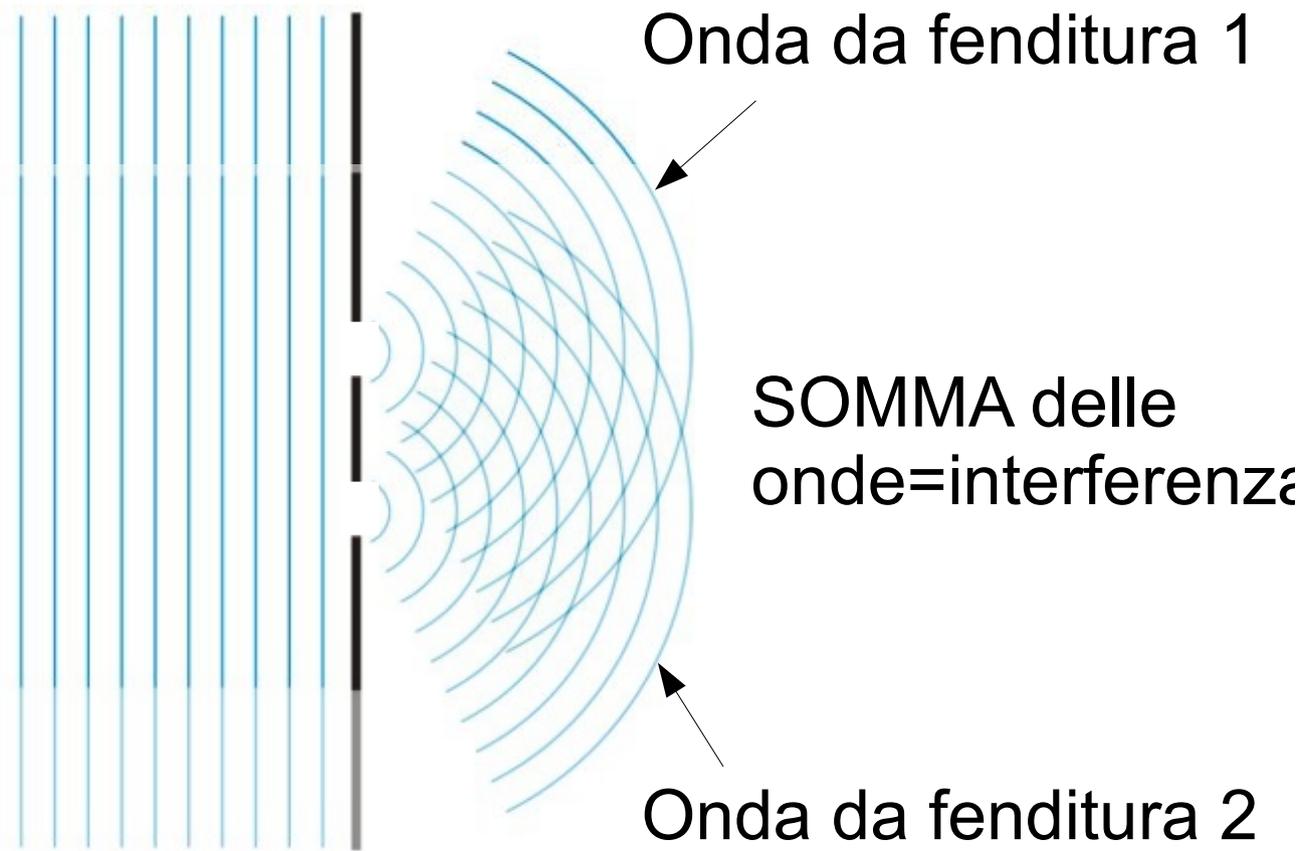
(se le fenditure hanno la giusta dimensione)



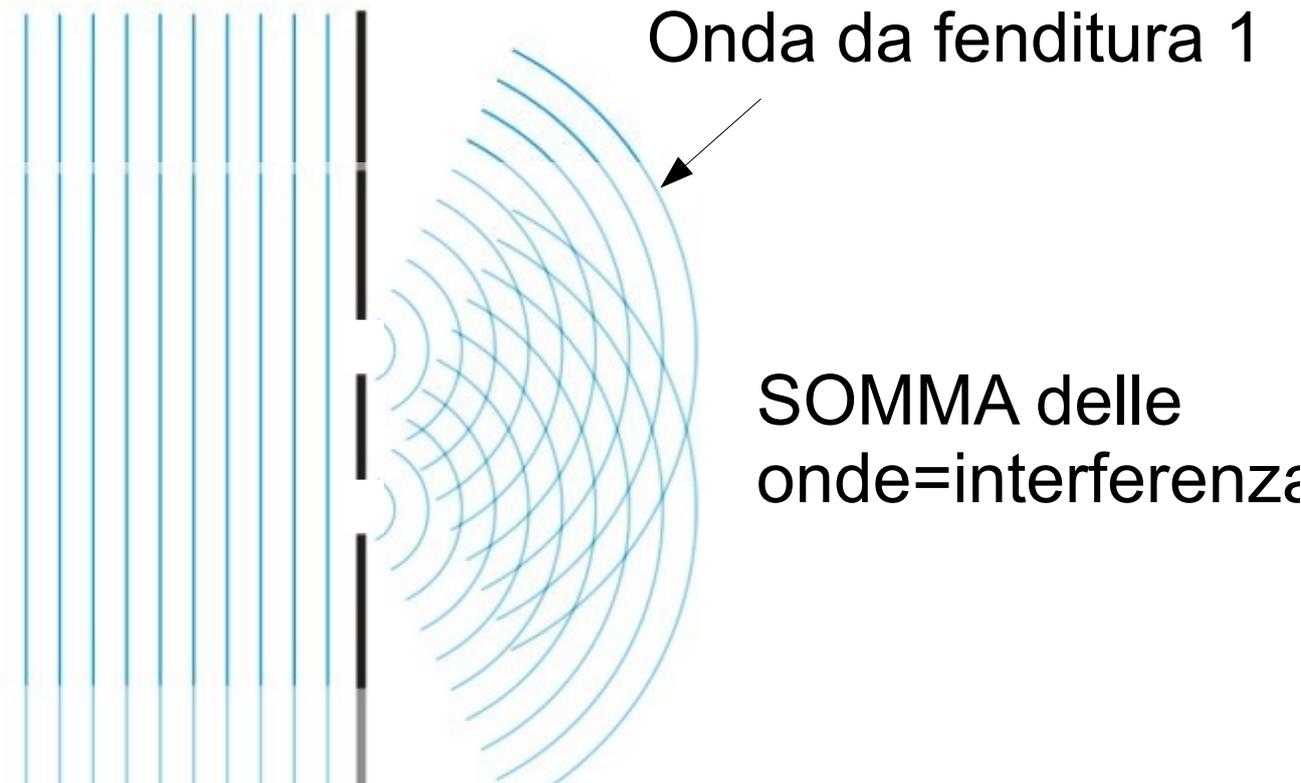
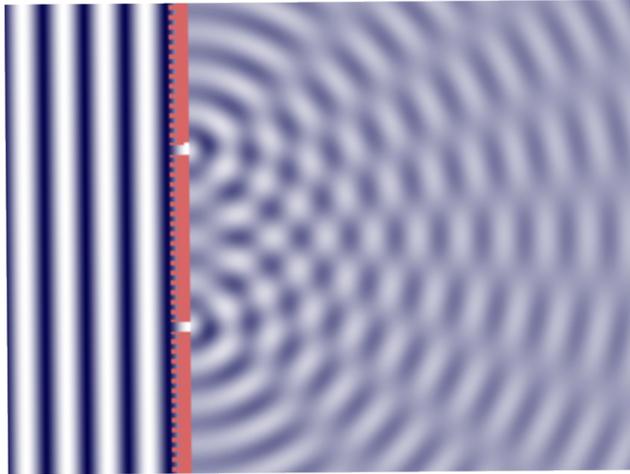
# Da quale fenditura passa l'onda/pallina?



Interferenza



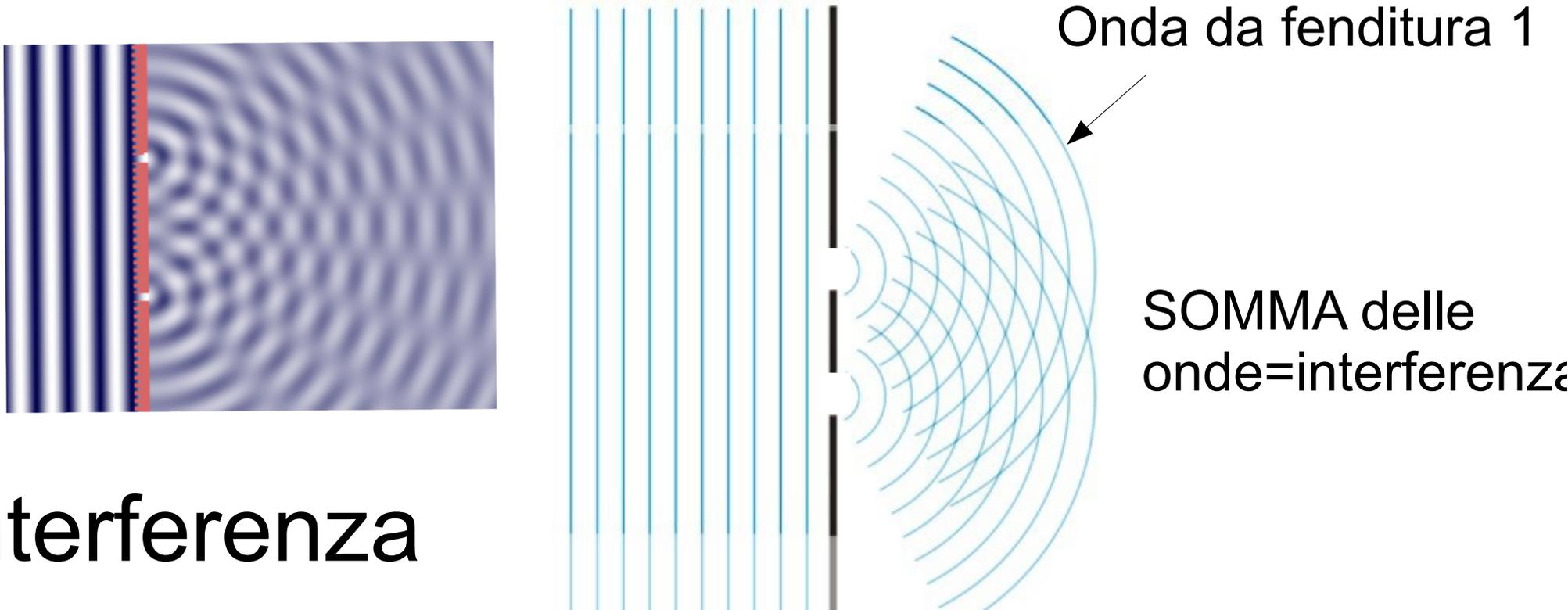
# Da quale fenditura passa l'onda/pallina?



## Interferenza

La pallina passa **CONTEMPORANEAMENTE**  
attraverso le due fenditure

# Da quale fenditura passa l'onda/pallina?



## Interferenza

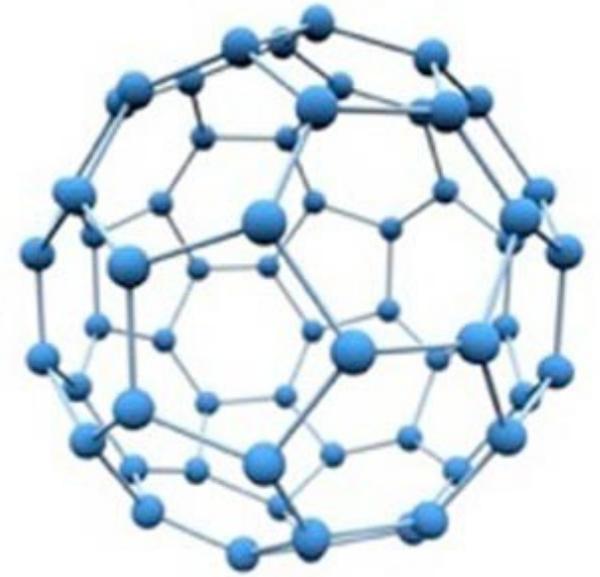
La pallina passa **CONTEMPORANEAMENTE**  
attraverso le due fenditure

Pallina più: cioè è passata dalla

fenditura destra “+” dalla fenditura sinistra perchè

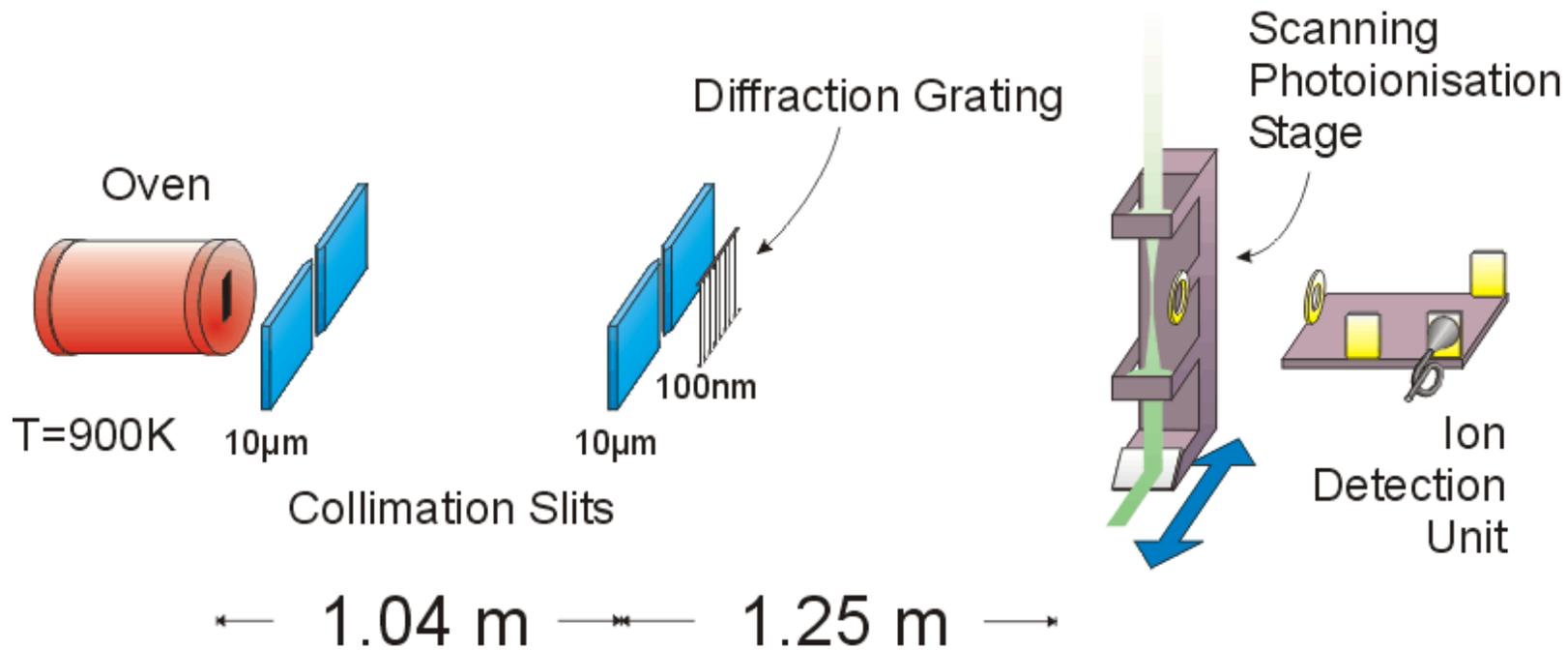
l'onda finale è ***onda destra+onda sinistra***

# Esperimento



$C_{60}$

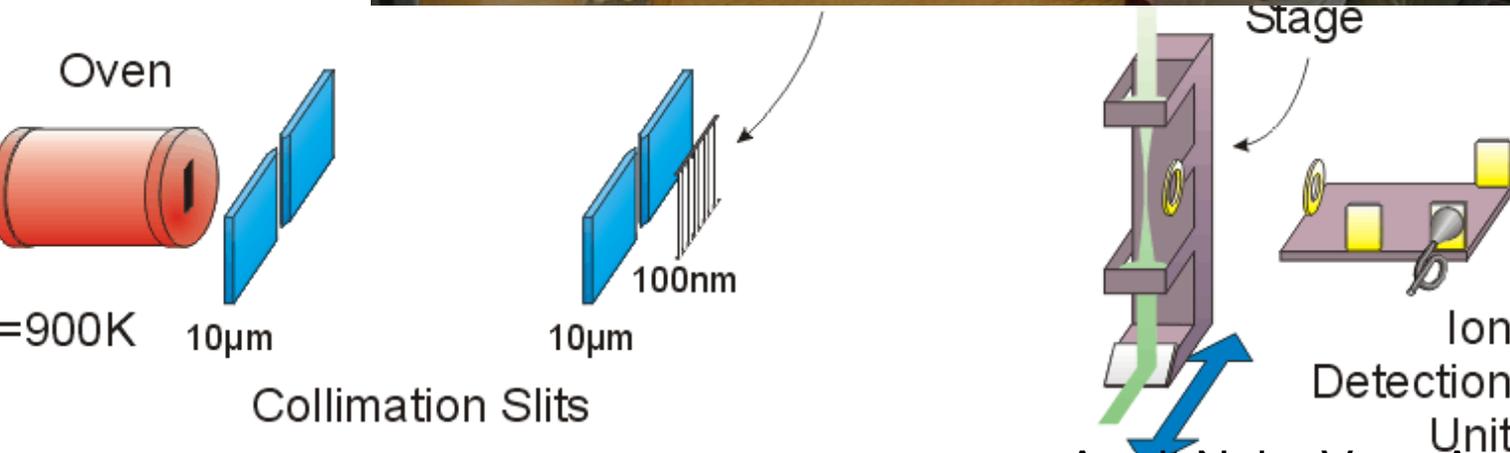
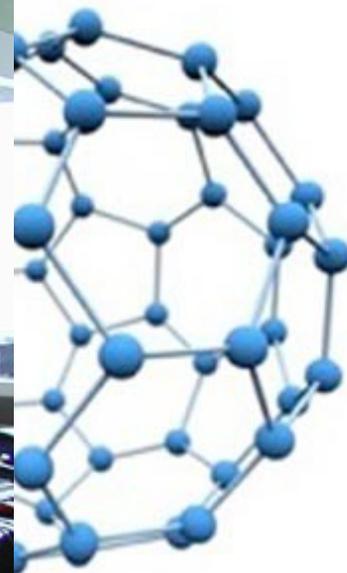
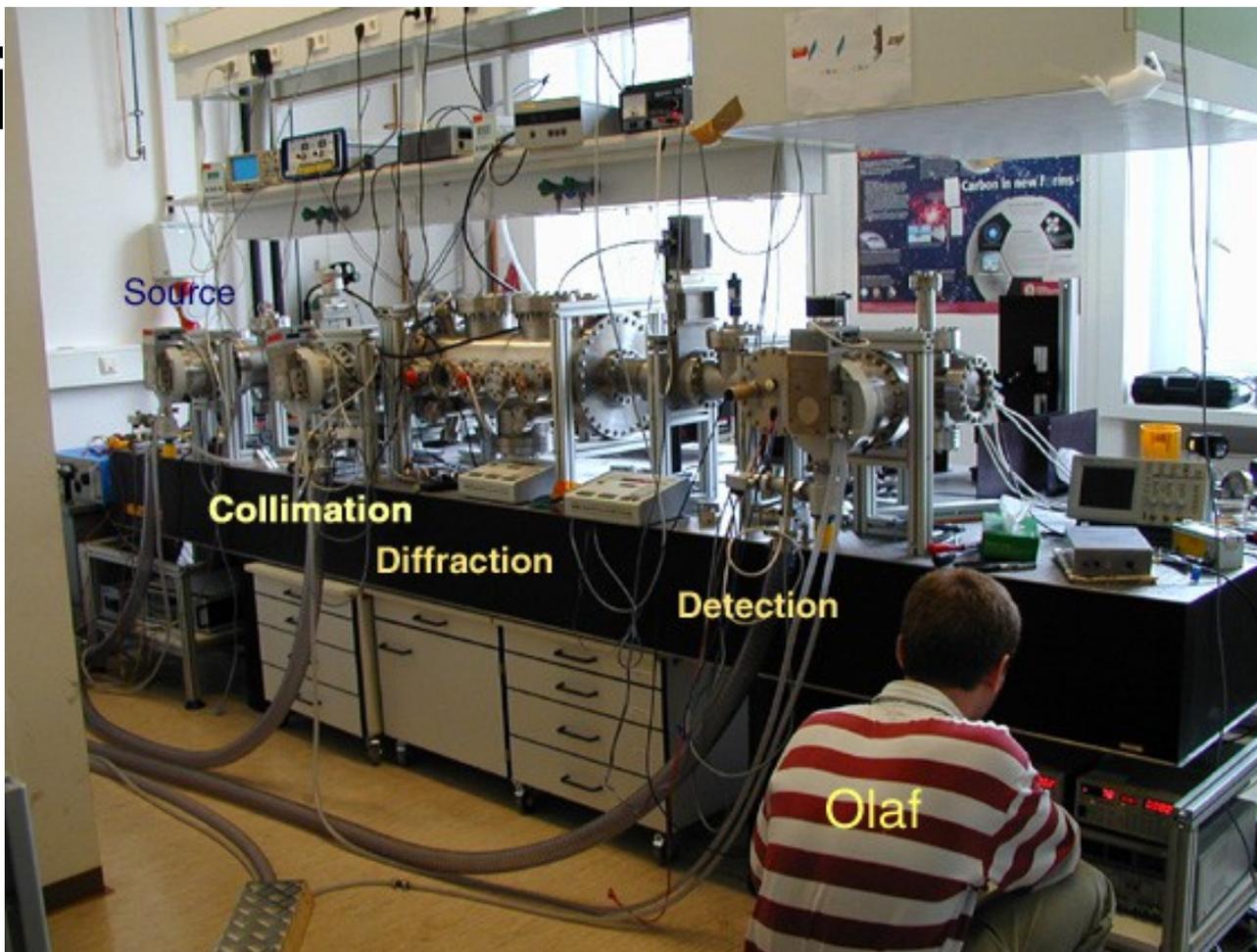
# Esperimento



Pressure  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  mbar

Arndt, Nairz, Voss-Andreae, Keller, van der Zouw, Zeilinger, Nature 401, 680-682, 14 (1999)

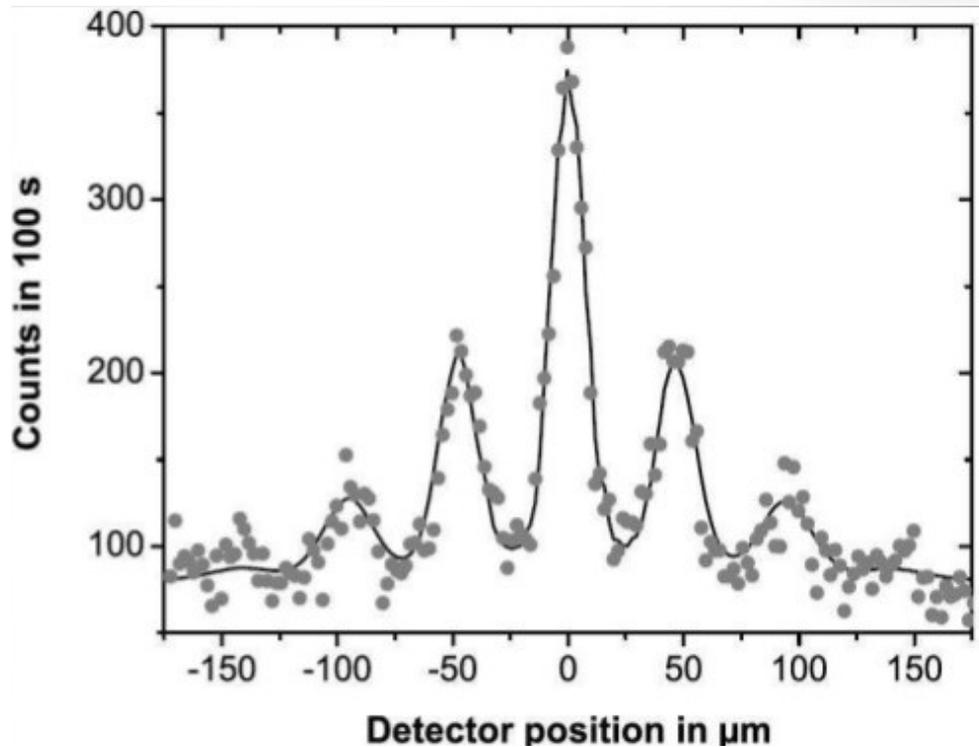
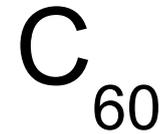
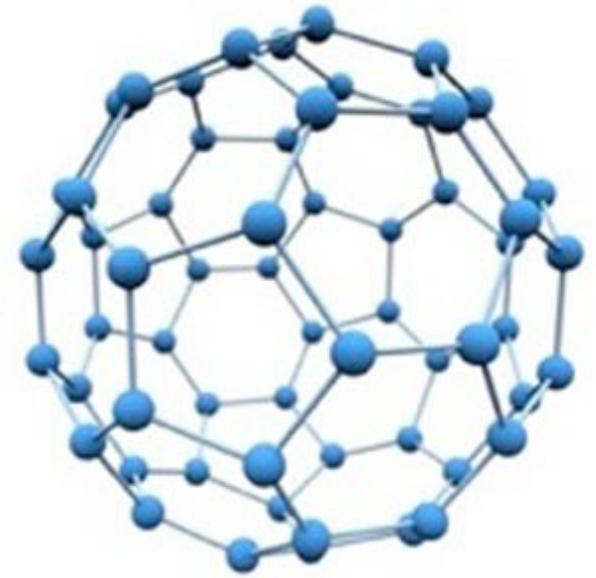
# Esperi



← 1.04 m → 1.25 m →

Arndt, Nairz, Voss-Andreae, Keller, van der Zouw, Zeilinger, Nature 401, 680-682, 14 (1999)

# Esperimento

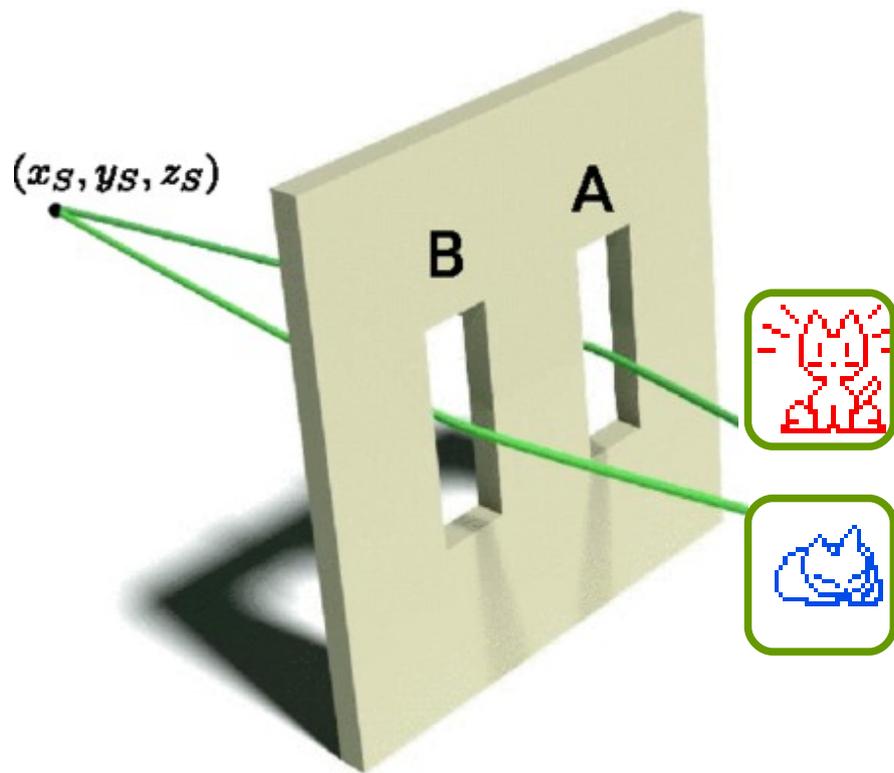


Record attuale:  
ca. 7000 masse atomiche.  
Futuro:  
virus, amebe, specchi.

Gatti?!?

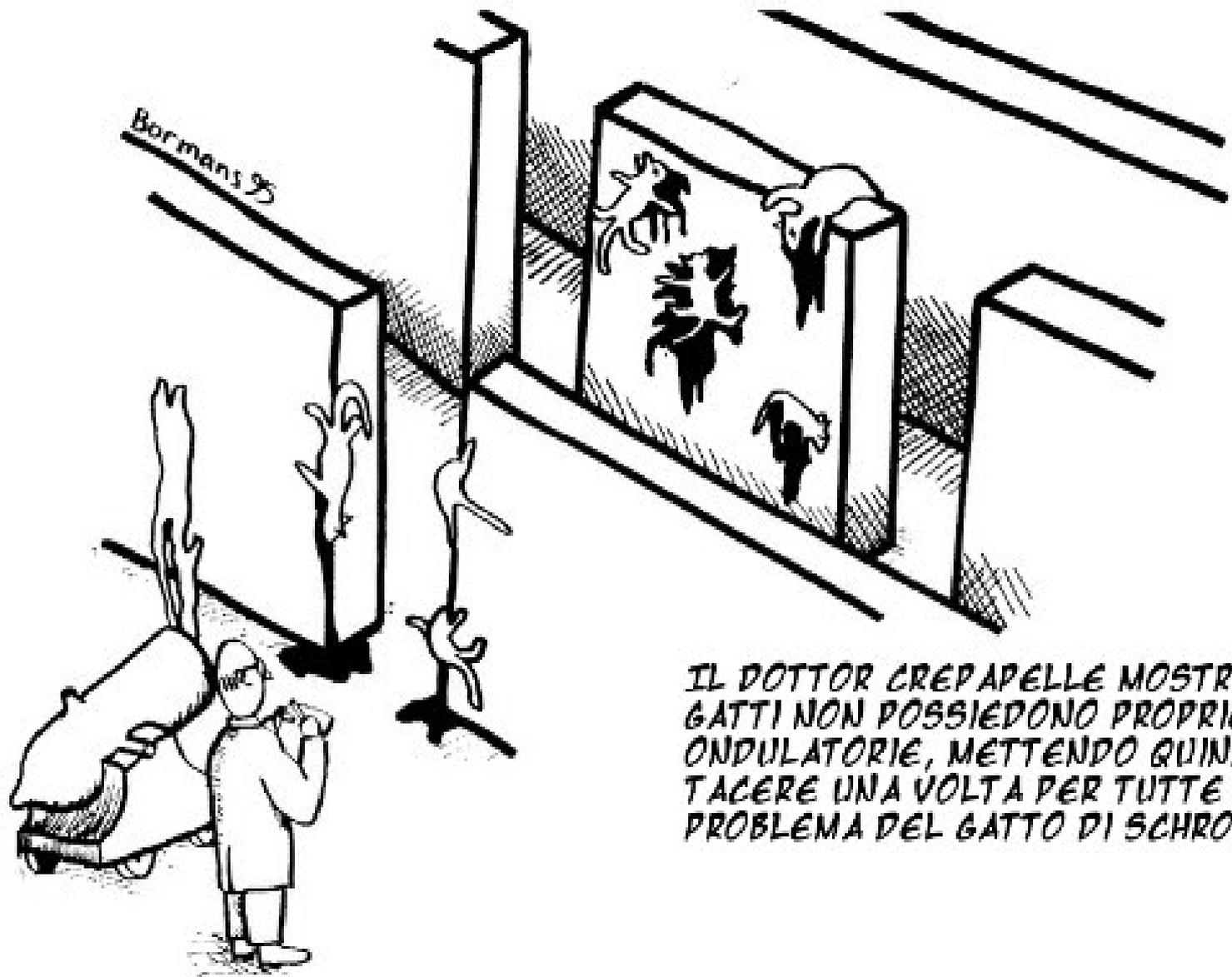
Arndt, Nairz, Voss-Andrae, Keller, van der Zouw,  
Zeilinger, Nature 401, 680-682, 14 (1999)

che c'entra la  
doppia fenditura  
con il gatto?!



= gatto più

d



*IL DOTTOR CREPAPELLE MOSTRA CHE I GATTI NON POSSIEDONO PROPRIETA' ONDULATORIE, METTENDO QUINDI A TACERE UNA VOLTA PER TUTTE IL PROBLEMA DEL GATTO DI SCHROEDINGER.*

d



EPAPELLE MOSTRA CHE I  
SIEDONO PROPRIETA'  
METTENDO QUINDI A  
OLTA PER TUTTE IL  
GATTO DI SCHROEDINGER.

Chi ha capito bene come fare questi  
esperimenti e' Anton Zeilinger

**proprietà più/meno:**

# **SOVRAPPOSIZIONE QUANTISTICA**

**a “+” b**

**a “-” b**

“+” e “-” se **SOMMO** o **SOTTRAGGO** le onde che passano dalle due fenditure.

finora ho parlato di **gatto più**

un **gatto meno** è *l'opposto*  
di un **gatto più**

(così come un gatto vivo è l'opposto di un gatto morto)



finora ho parlato di **gatto più**

un **gatto meno** è *l'opposto*  
di un **gatto più**

(così come un gatto vivo è l'opposto di un gatto morto)

gatto più e meno sono entrambi interferenze  
quantistiche di gatto vivo e morto



finora ho parlato di **gatto più**



un **gatto meno** è *l'opposto*  
di un **gatto più**

(così come un gatto vivo è l'opposto di un gatto morto)

gatto più e meno sono entrambi interferenze  
quantistiche di gatto vivo e morto

i gatti meno sono simili ai gatti più:  
anch'essi sono contemporaneamente  
vivi e morti.

Domanda ovvia!!



Domanda ovvia!!

Perchè nessuno ha mai visto un gatto più o meno?!?



Domanda ovvia!!

Perchè nessuno ha mai visto un gatto più o meno?!? cioè

Perchè la complementarietà quantistica non si vede nella vita di tutti i giorni?



Domanda ovvia!!

Perchè nessuno ha mai visto un gatto più o meno?!?            cioè

Perchè la **complementarietà quantistica** non si vede nella vita di tutti i giorni?

al punto che c'è un **problema semantico**: non abbiamo parole per descrivere il gatto più: semplicemente non abbiamo esperienza diretta di questi fenomeni



Domanda ovvia!!

Perchè nessuno ha mai visto un gatto più o meno?!? cioè

Perchè la **complementarietà quantistica** non si vede nella vita di tutti i giorni?

al punto che c'è un **problema semantico**: non abbiamo parole per descrivere il gatto più: semplicemente non abbiamo esperienza diretta di questi fenomeni



Per Schroedinger e Einstein il gatto era una **provocazione**:

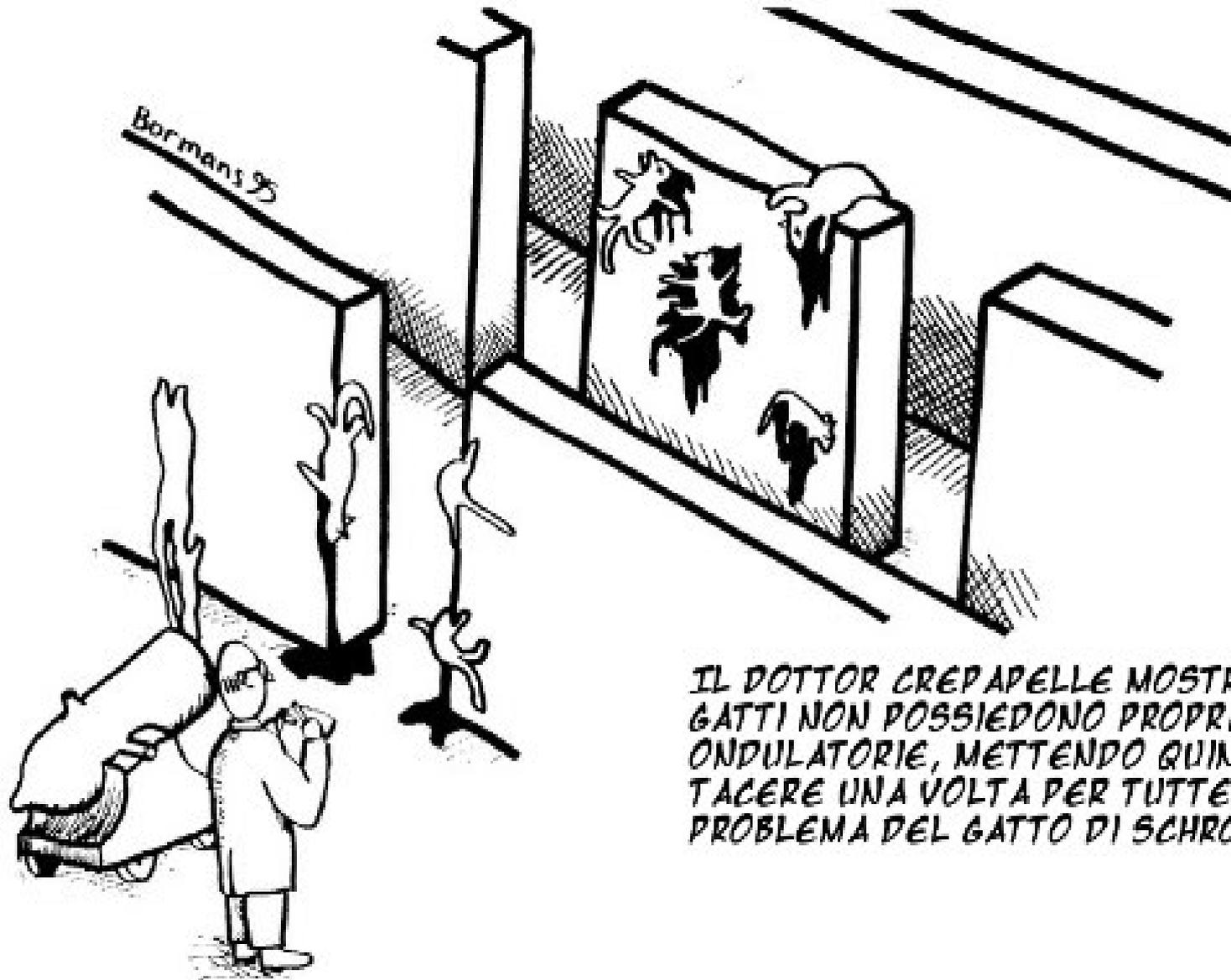
La meccanica quantistica è sbagliata (o incompleta)!

All'epoca in modo naive si pensava che MQ=micro, MC=macro. Schroedinger con il gatto fa vedere che NON è vero!: effetti quantistici possono “contaminare” anche macro

Abbiamo visto che non è difficile creare un gatto più (esperimento di Schroedinger).

quello che è difficile (**difficilissimo**)  
è **misurare** la proprietà più/meno su  
oggetti grossi come un gatto.





IL DOTTOR CREPAPELLE MOSTRA CHE I GATTI NON POSSIEDONO PROPRIETA' ONDULATORIE, METTENDO QUINDI A TACERE UNA VOLTA PER TUTTE IL PROBLEMA DEL GATTO DI SCHROEDINGER.



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



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 nessuna delle due e' definita molto precisamente: se preparassimo un'auto con una velocità di 50.123153428941234132142412... Km/h (32 cifre), perderemmo la definizione della 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!)

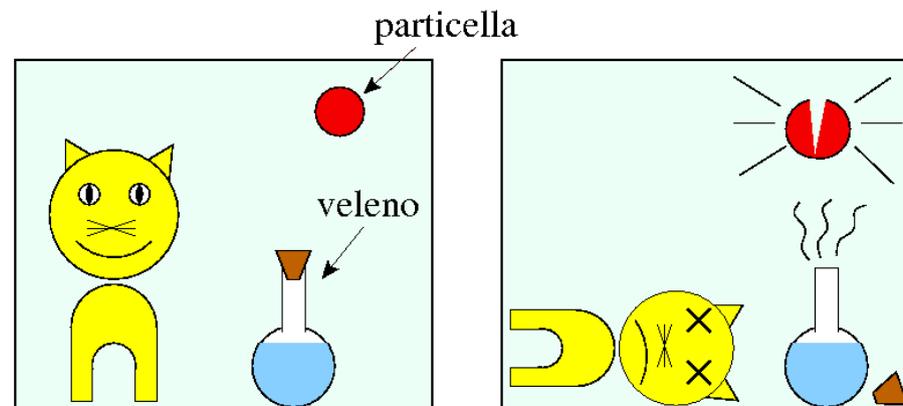


perchè nessuna delle due e' definita molto precisamente: se preparassimo un'auto con una velocità di 50.123153428941234132142412... Km/h (32 cifre), perderemmo la definizione della sua posizione per qualche cm.

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

... e il gatto?

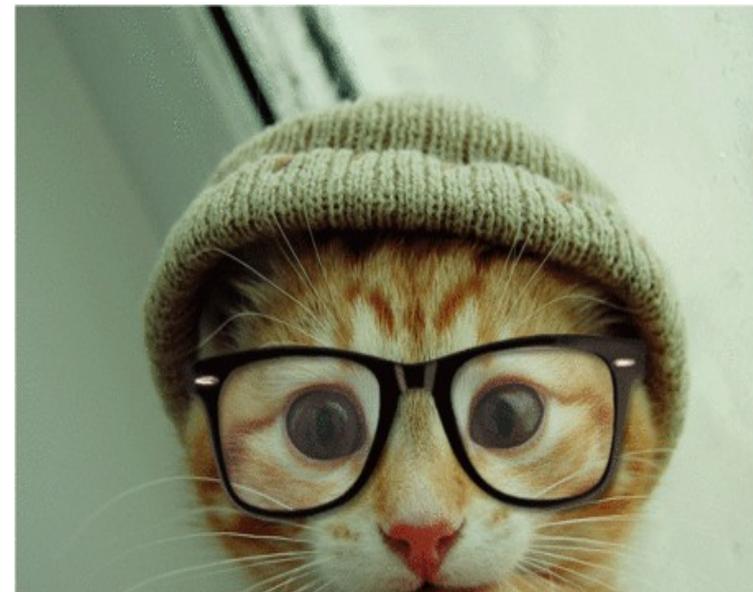
analogo: dovremmo controllare la posizione del gatto con precisione di 30 cifre (è più leggero di un'auto) per poter accedere alla proprietà più/meno



Abbiamo visto che non è difficile creare un gatto più (esperimento di Schroedinger).

quello che è difficile (**difficilissimo**)  
è **misurare** la proprietà più/meno su  
oggetti grossi come un gatto.

è molto facile invece misurare  
la proprietà complementare:  
vivo/morto che pero' non è  
definita in un gatto più!



Abbiamo visto che non è difficile creare un gatto più (esperimento di Schroedinger).

quello che è difficile (**difficilissimo**) è **misurare** la proprietà più/meno su oggetti grossi come un gatto.

è molto facile invece misurare la proprietà complementare: vivo/morto che pero' non è definita in un gatto più!

Cosa succede a misurare una proprietà non definita?



Cosa dice la meccanica quantistica?



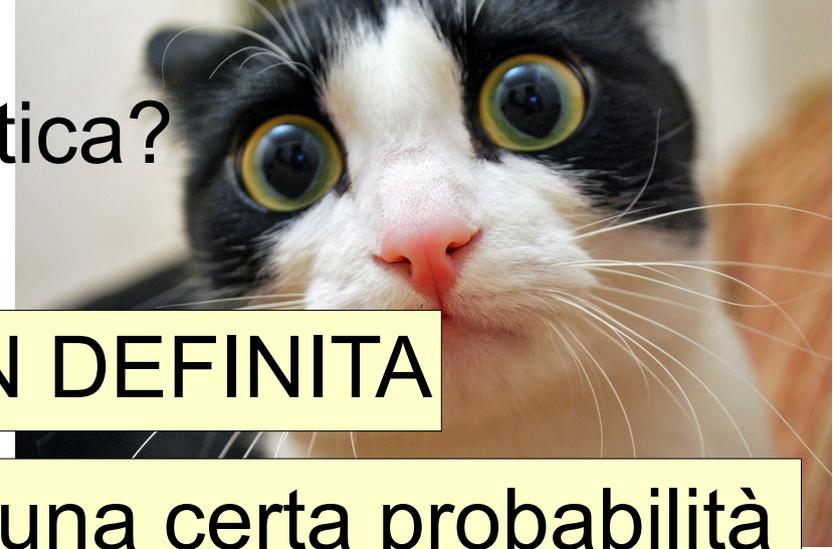
Cosa dice la meccanica quantistica?



Se si guarda una proprietà **NON DEFINITA**

vedo uno dei possibili valori con **una certa probabilità**

Cosa dice la meccanica quantistica?



Se si guarda una proprietà **NON DEFINITA**

vedo uno dei possibili valori con **una certa probabilità**

Se misuro la proprietà vivo/morto del “gatto più” trovo

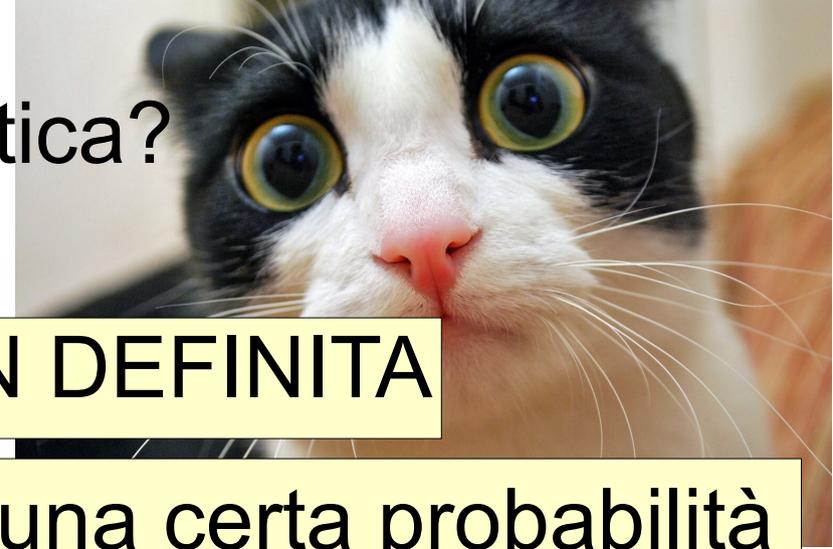
vivo con probabilità  $1/2$



morto con probabilità  $1/2$



Cosa dice la meccanica quantistica?



Se si guarda una proprietà **NON DEFINITA**

vedo uno dei possibili valori con **una certa probabilità**

Se misuro la proprietà vivo/morto del “gatto più” trovo

vivo con probabilità  $1/2$



morto con probabilità  $1/2$



è una **probabilità fondamentale**, NON è dovuta alla nostra **ignoranza!!** Semplicemente vivo/morto non è definito..

→ (di un gatto più conosciamo tutte le proprietà definite!)

# Problemi aperti della fisica moderna

(la probabilità tipicamente viene dall'ignoranza: diciamo che abbiamo probabilità  $1/2$  di testa e  $1/2$  di croce perchè non sappiamo se è testa o croce)



# Problemi aperti della fisica moderna

(la probabilità tipicamente viene dall'ignoranza: diciamo che abbiamo probabilità  $1/2$  di testa e  $1/2$  di croce perchè non sappiamo se è testa o croce)

**Da dove viene la probabilità?!?**

cioè, perchè l'analisi di una proprietà non definita dà lo stesso risultato dell'ignoranza?



# Problemi aperti della fisica moderna

(la probabilità tipicamente viene dall'ignoranza: diciamo che abbiamo probabilità  $1/2$  di testa e  $1/2$  di croce perchè non sappiamo se è testa o croce)

**Da dove viene la probabilità?!?**

cioè, perchè l'analisi di una proprietà non definita dà lo stesso risultato dell'ignoranza?

BOH!!!!



# Problemi aperti della fisica moderna

(la probabilità tipicamente viene dall'ignoranza: diciamo che abbiamo probabilità  $1/2$  di testa e  $1/2$  di croce perchè non sappiamo se è testa o croce)

**Da dove viene la probabilità?!?**

cioè, perchè l'analisi di una proprietà non definita dà lo stesso risultato dell'ignoranza?

BOH!!!!

nessuno lo sa! Potremmo pensare a una via di mezzo: gatto vivo, ma moribondo!!



# Problemi aperti della fisica moderna

(la probabilità tipicamente viene dall'ignoranza: diciamo che abbiamo probabilità  $1/2$  di testa e  $1/2$  di croce perchè non sappiamo se è testa o croce)

**Da dove viene la probabilità?!?**

cioè, perchè l'analisi di una proprietà non definita dà lo stesso risultato dell'ignoranza?

BOH!!!!

nessuno lo sa! Potremmo pensare a una via di mezzo: gatto vivo, ma moribondo!!

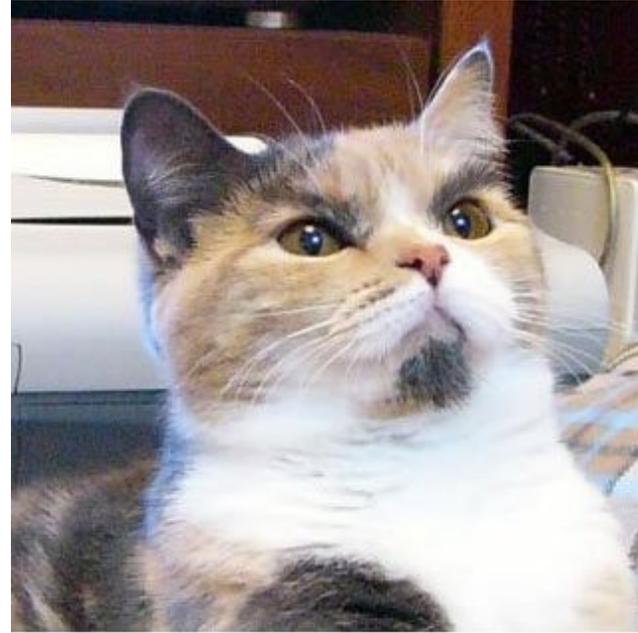
**“Problema della misura”**, vigorosamente dibattuto.



**Gatto:** siamo sicuri di questa spiegazione?

**Gatto:** siamo sicuri di questa spiegazione?

**CERTO!!**

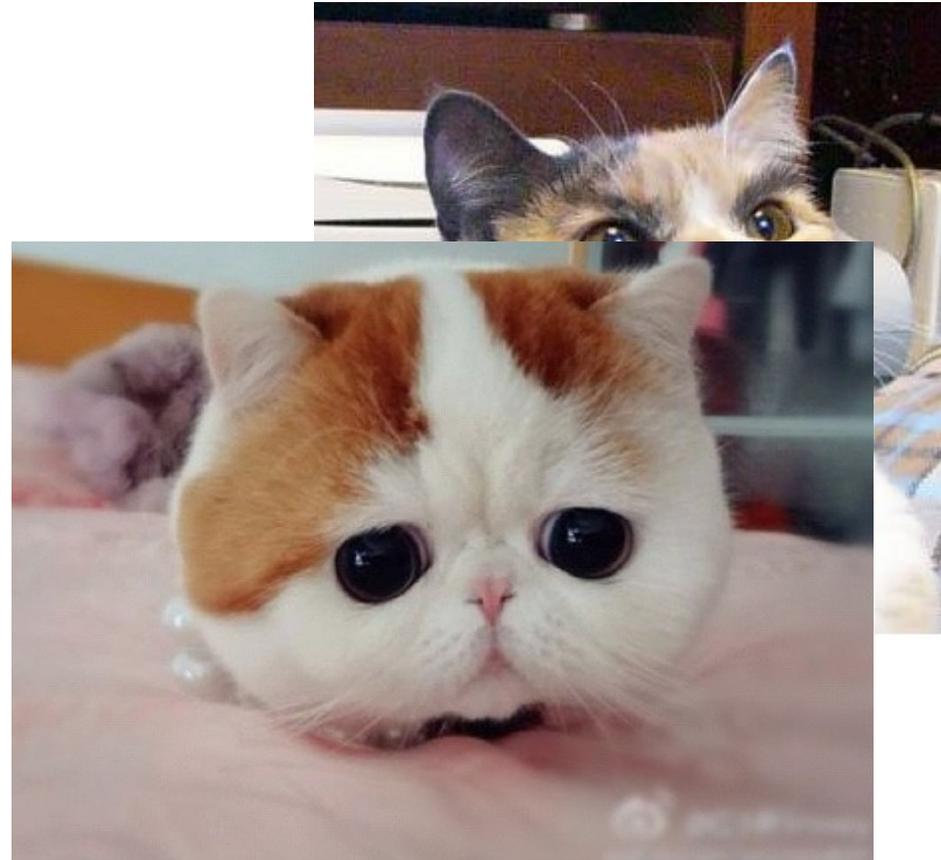


via [Reposti.com/p/bv5](https://reposti.com/p/bv5)

**Gatto:** siamo sicuri di questa spiegazione?

**CERTO!!**

...abbastanza

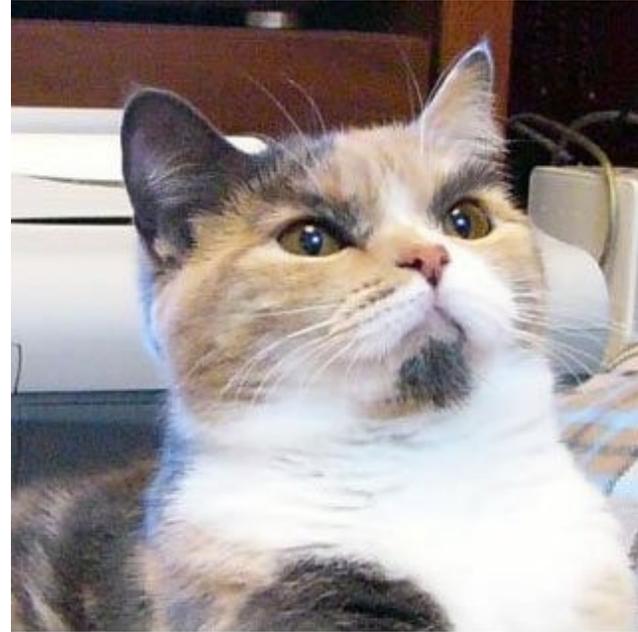


**Gatto:** siamo sicuri di questa spiegazione?

**CERTO!!**

...abbastanza

la meccanica quantistica  
potrebbe essere sbagliata.



via [Reposti.com/p/bv5](https://reposti.com/p/bv5)

**Gatto:** siamo sicuri di questa spiegazione?

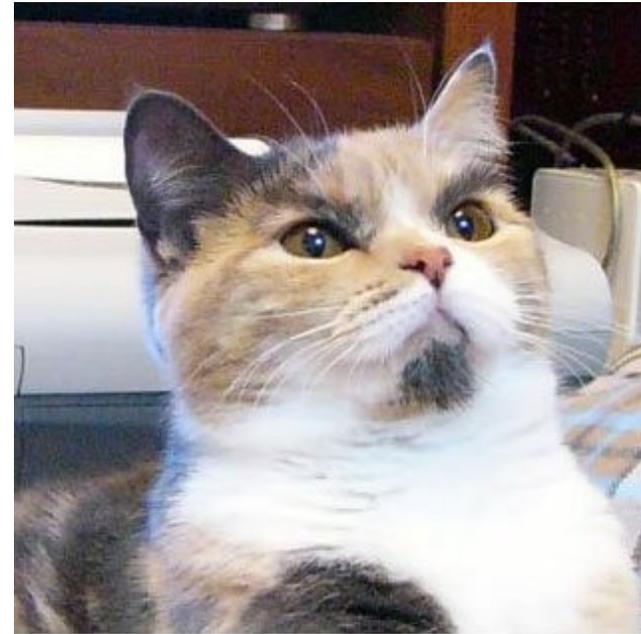
**CERTO!!**

...abbastanza

la meccanica quantistica  
potrebbe essere sbagliata.

la fisica e' una scienza sperimentale e non abbiamo  
ancora fatto l'esperimento del gatto...

**ma ci stiamo lavorando!**



via [Reposti.com/p/bv5](https://reposti.com/p/bv5)

**Gatto:** siamo sicuri di questa spiegazione?

**CERTO!!**

...abbastanza



la meccanica  
potrebbe essere  
la fisica e' una scienza  
ancora fatto l'es



/p/bv5

oiamo

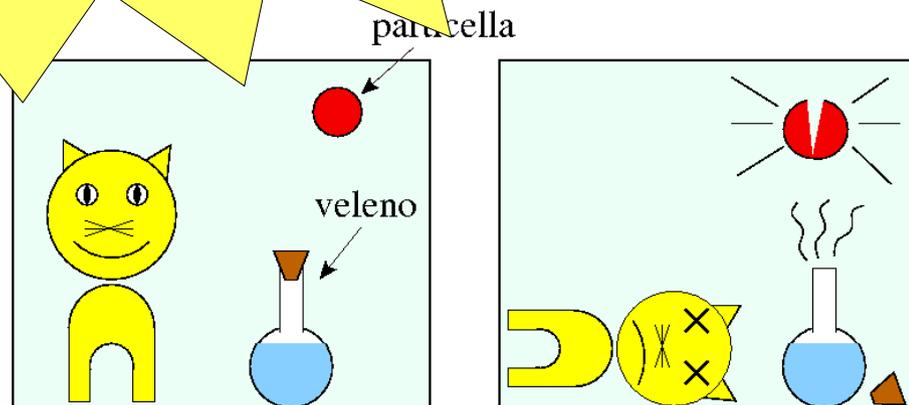
ando!

Alternative?

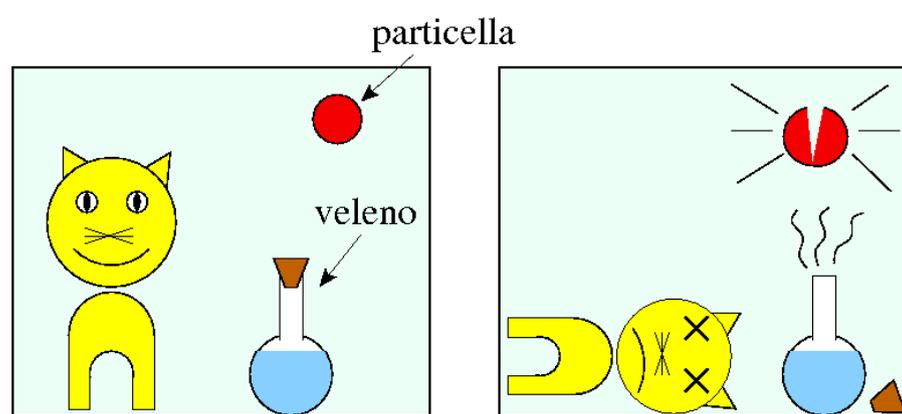
Ghirardi, Rimini, Weber

Ricapitolando:

# IMPORTANTE RIASSUNTO cos'è un gatto di Schroedinger?



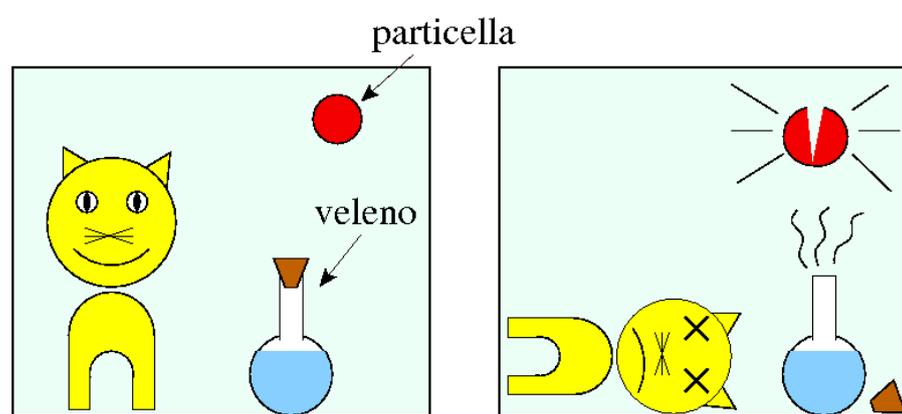
Ricapitolando:



Abbiamo creato un **gatto più**

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto} \\ \text{vivo} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto} \\ \text{morto} \end{array} \right\rangle \right)$$

Ricapitolando:

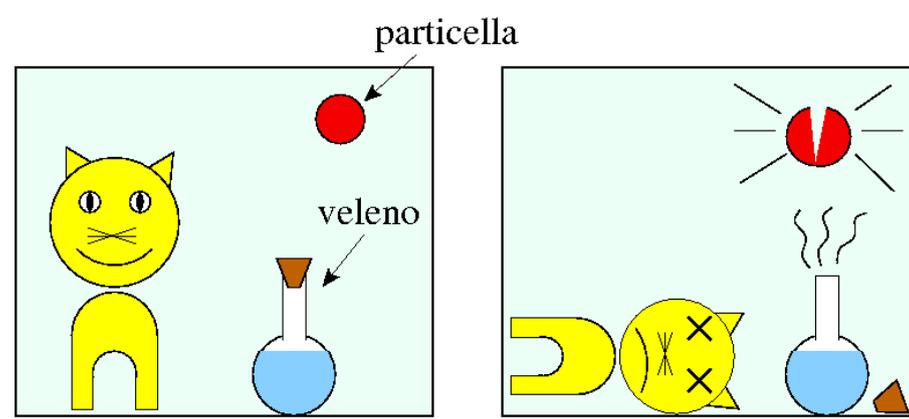


Abbiamo creato un **gatto più**

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto} \\ \text{più} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto} \\ \text{meno} \end{array} \right\rangle \right)$$

più/meno è **complementare** a vivo/morto

Ricapitolando:



Abbiamo creato un **gatto più**

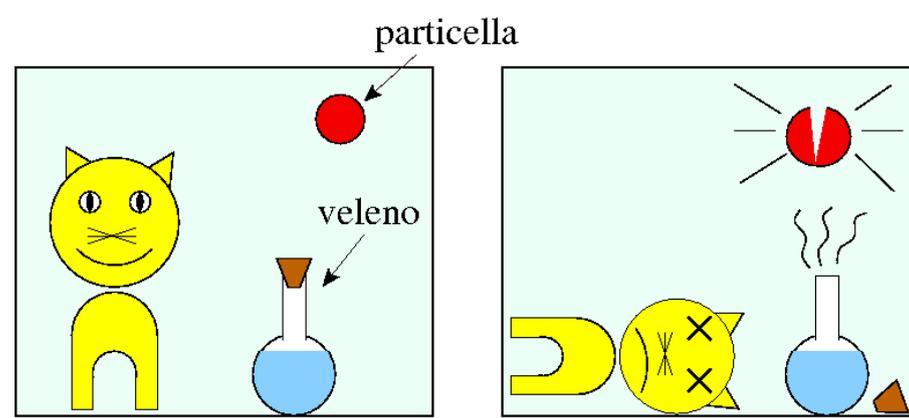
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto vivo} \\ \text{gatto morto} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto morto} \\ \text{gatto vivo} \end{array} \right\rangle \right)$$

più/meno è **complementare** a vivo/morto

**quindi**, il gatto più non è nè vivo nè morto

proprietà complementari non possono essere definite entrambi

Ricapitolando:



Abbiamo creato un **gatto più**

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{gatto vivo} \\ \text{gatto morto} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{gatto morto} \\ \text{gatto vivo} \end{array} \right\rangle \right)$$

più/meno è **complementare** a vivo/morto

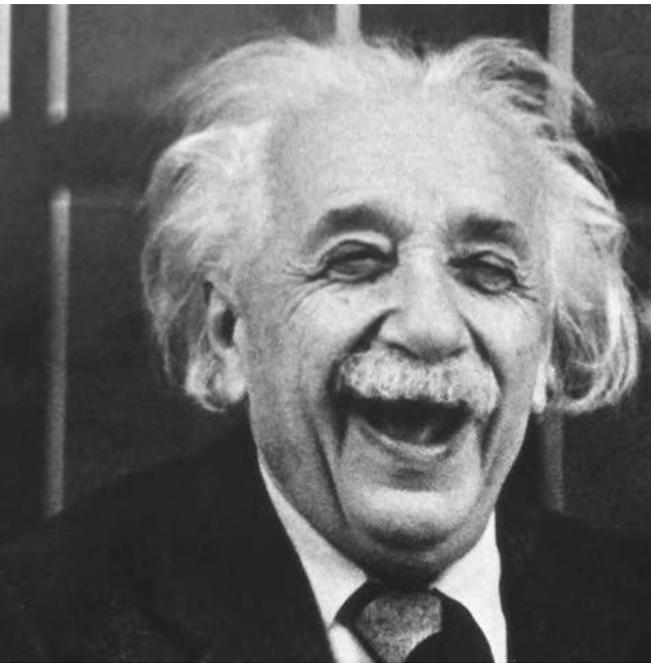
quindi, il gatto più non è nè vivo nè morto

proprietà complementari non possono essere definite entrambi

Possiamo dire (problema semantico) che è

**contemporaneamente vivo e morto**

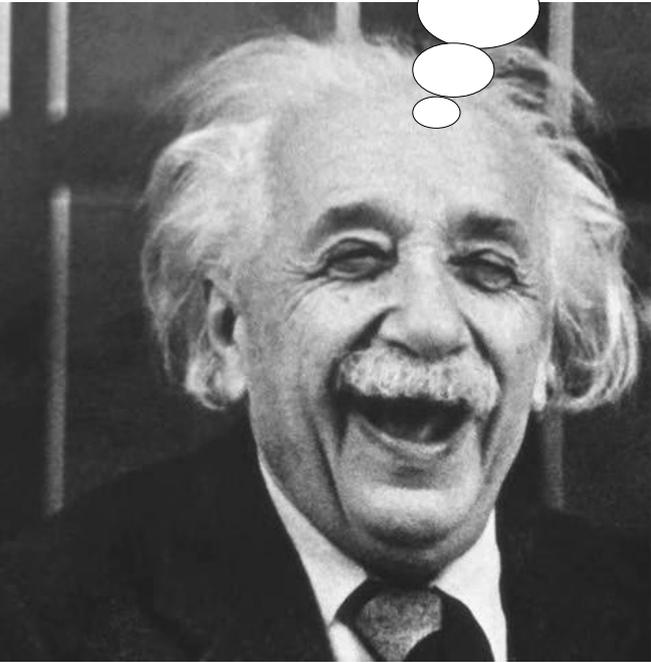
# I protagonisti della storia del gatto:

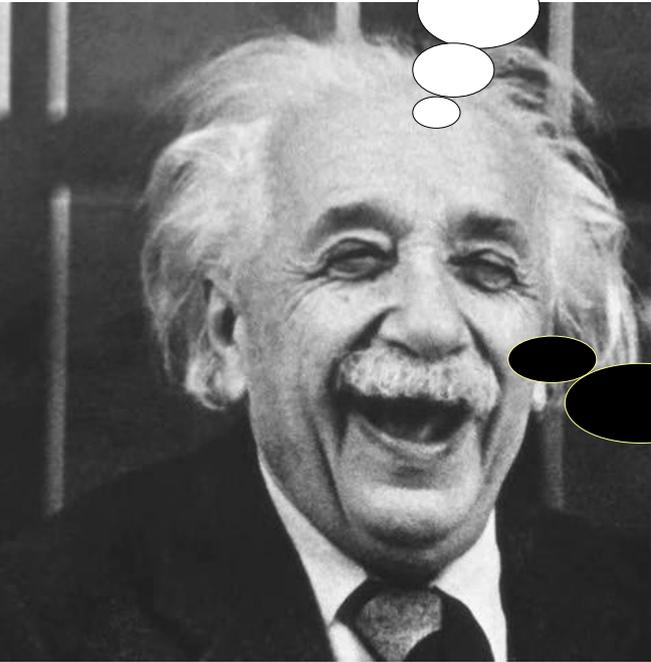


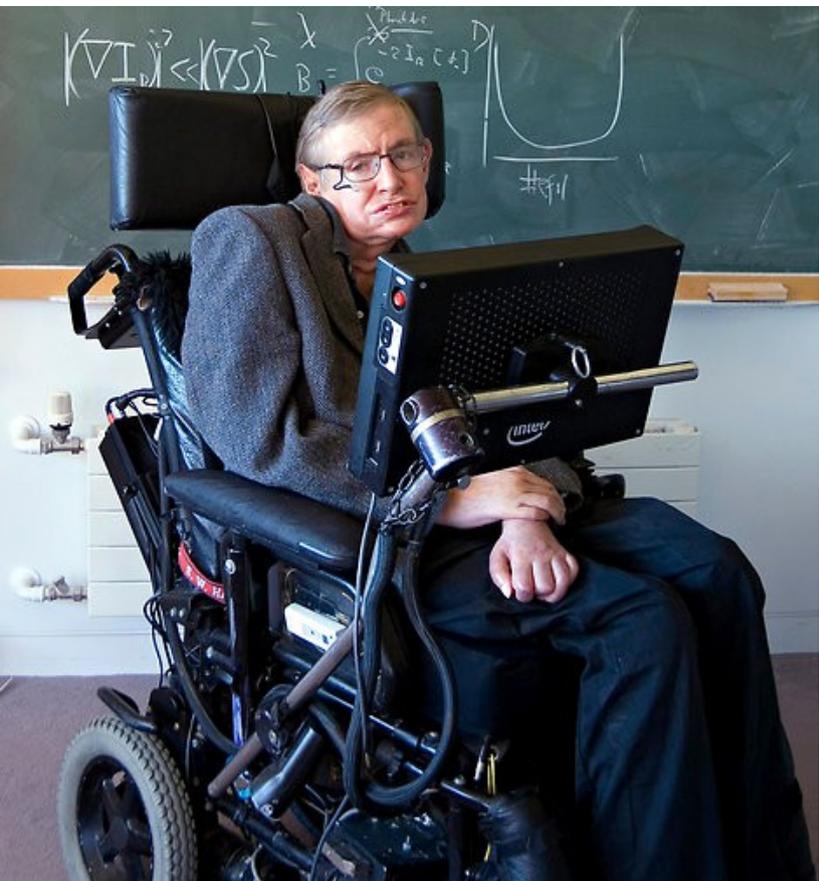
Albert Einstein

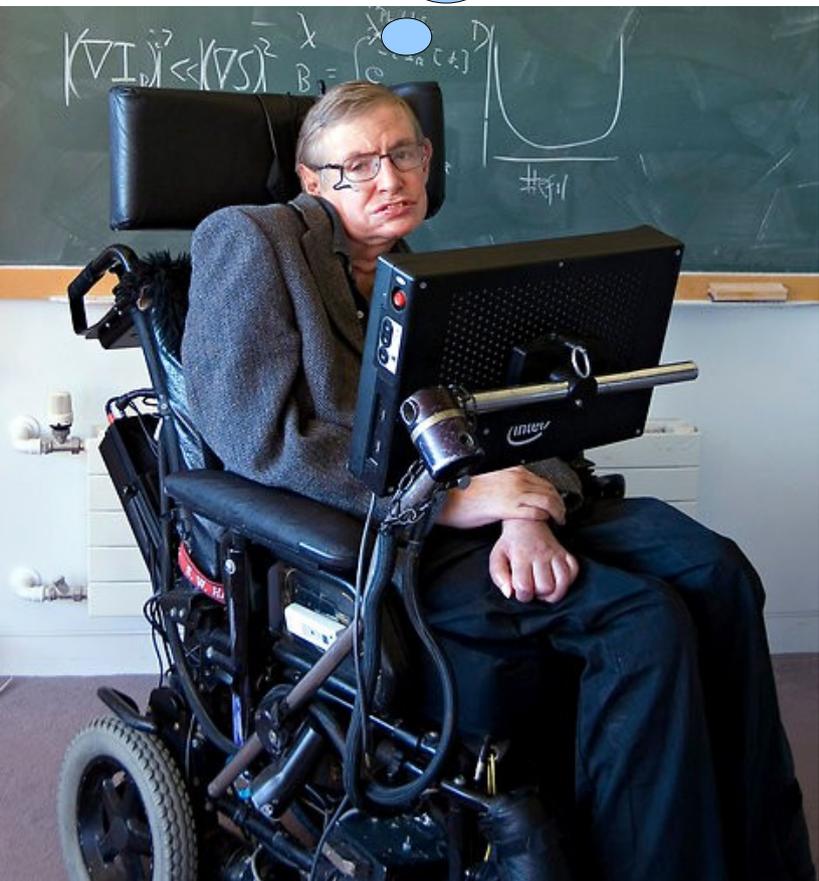


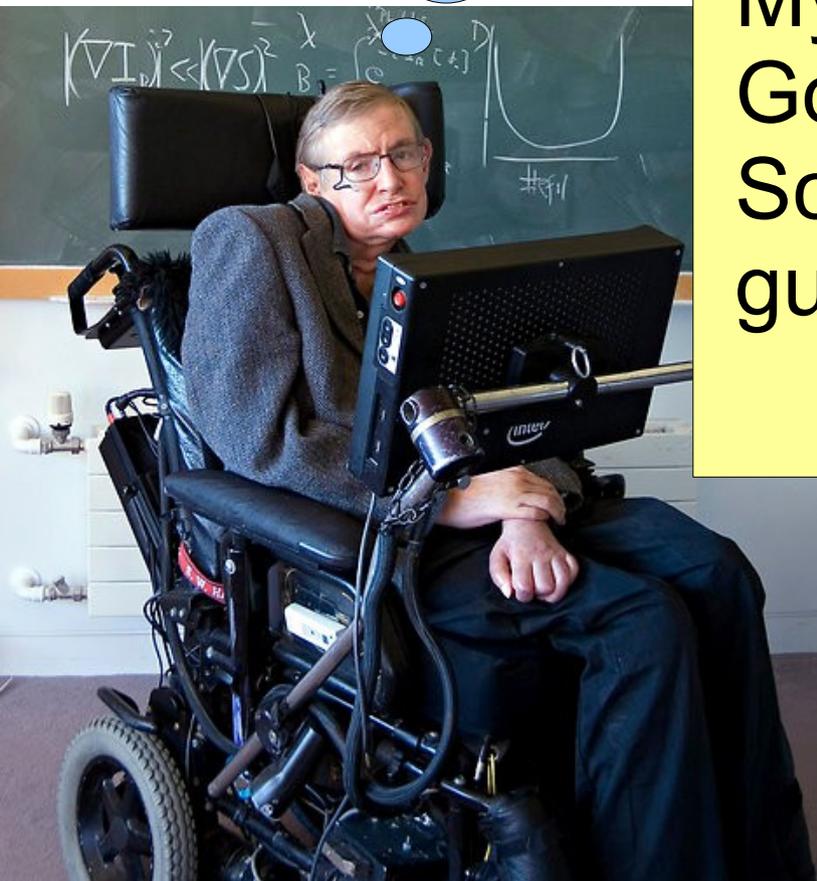
Erwin Schroedinger





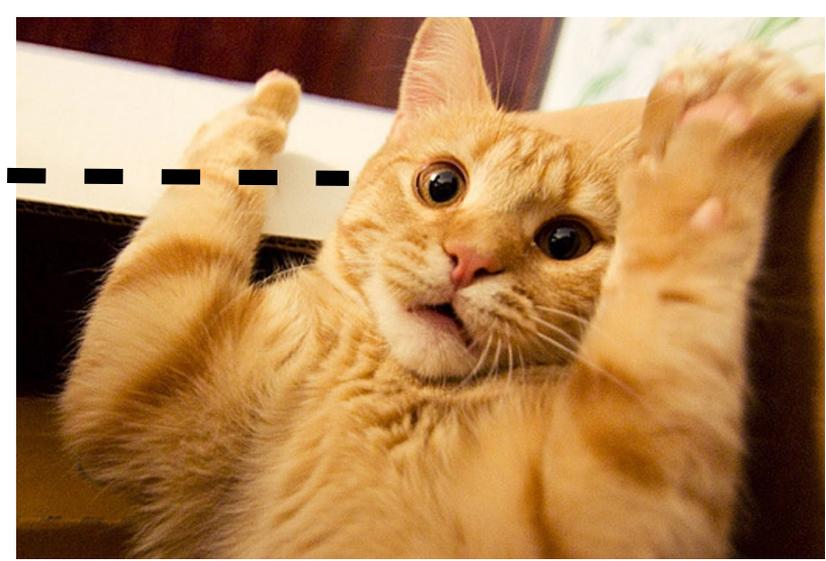






My attitude — I would paraphrase Goering — is that when I hear of Schroedinger's cat, I reach for my gun.

Steven Hawking

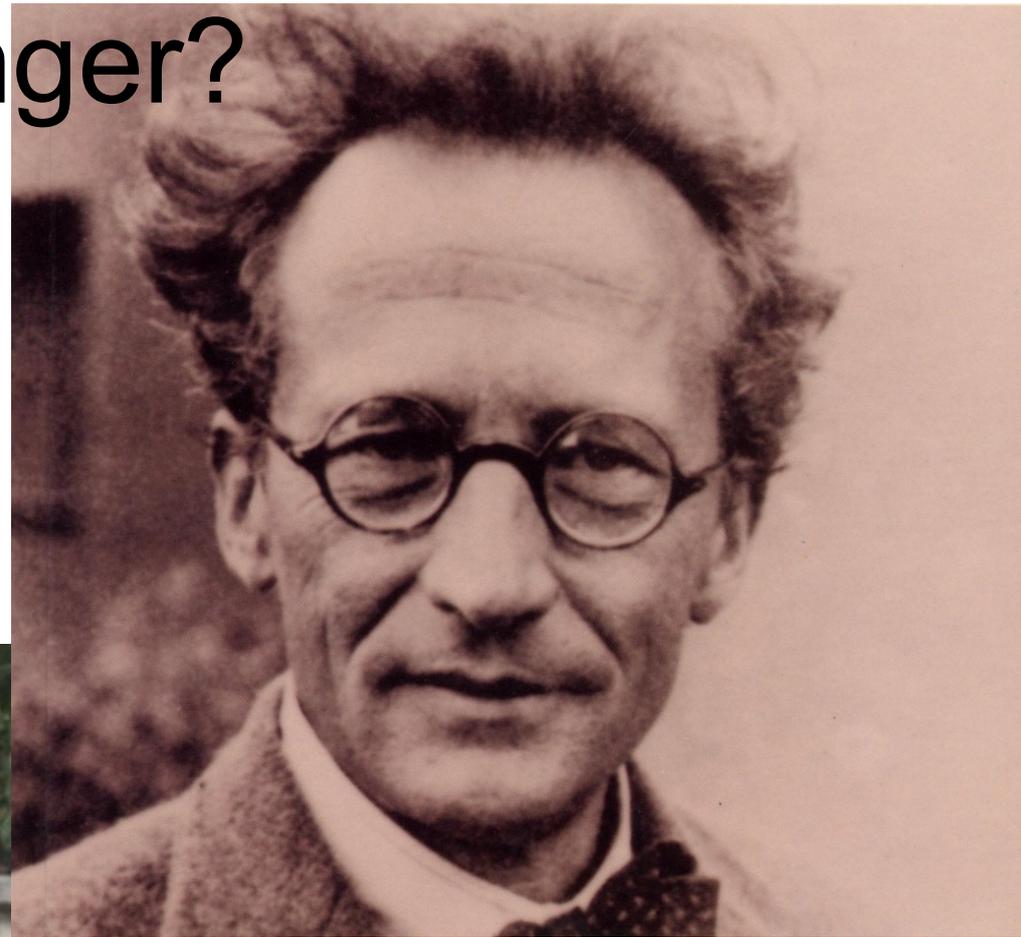


My attitude — I would paraphrase Goering — is that when I hear of Schroedinger's cat, I reach for my gun.

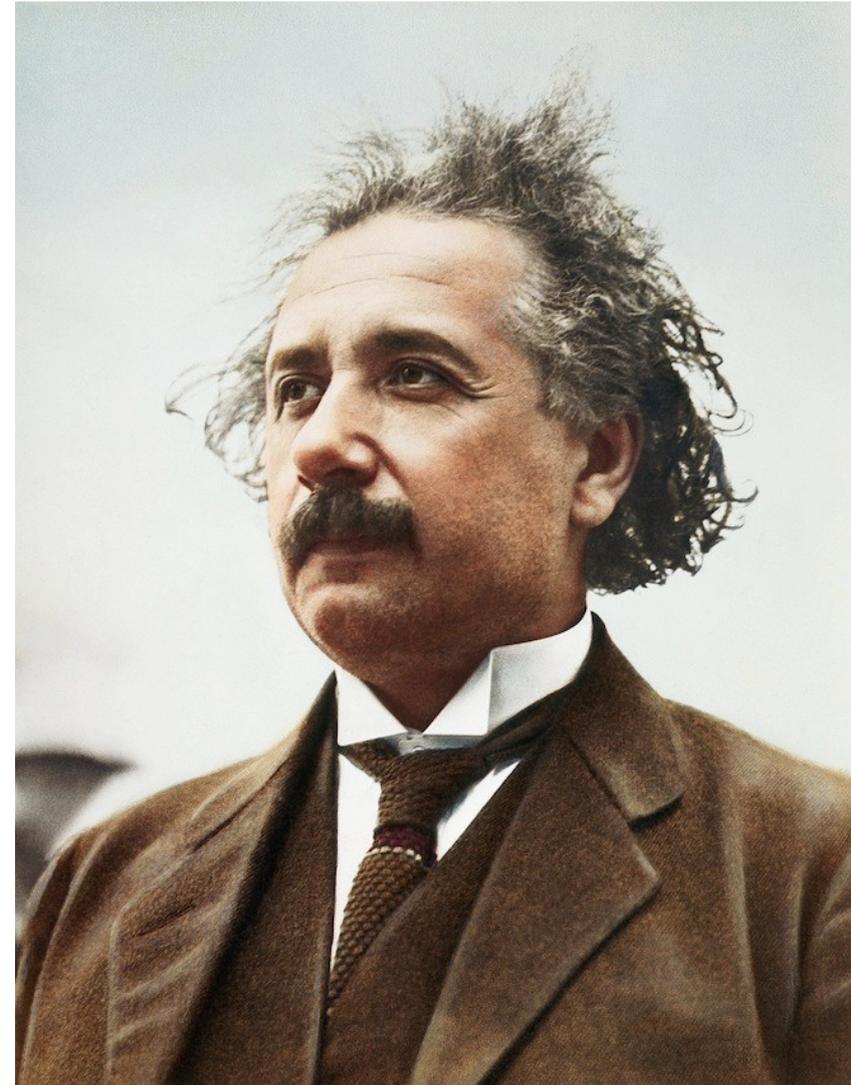
Steven Hawking



# Chi era Schroedinger?



# Einstein e la meccanica quantistica



# Di cosa ho parlato?

vi ho presentato l'argomento del gatto di Schroedinger.

sviluppato negli anni '30 durante una corrispondenza tra Einstein e Schroedinger.

effetto della complementarieta' quantistica



# Dipartimento di Fisica: **chi si occupa di questi temi?**



Chiara Macchiavello, Lorenzo Maccone, Massimiliano Sacchi:  
quantum information, quantum computation, teoria della stima quantistica



Mauro D'Ariano, Paolo Perinotti  
fondamenti della meccanica quantistica



**Qubit**  
quantum information  
theory group  
[www.qubit.it](http://www.qubit.it)

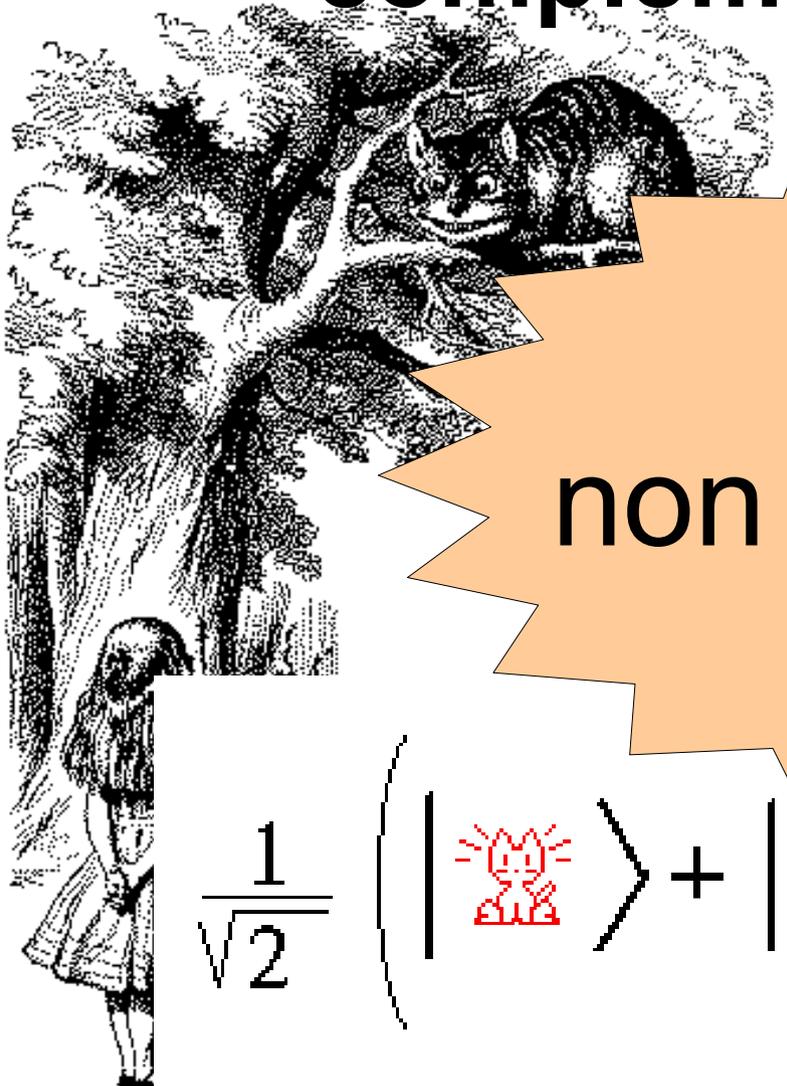
## Take home message

- Esistono proprietà **complementari**
- Gatto di Schroedinger ha proprietà (più) **complementare a vivo/morto**



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{alive} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{dead} \end{array} \right\rangle \right)$$

- Esistono proprietà **complementari**
- Gatto di Schroedinger ha proprietà (più) **complementare a vivo/morto**



Quindi, il gatto  
non è nè vivo, nè morto!

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \text{cat}_{\text{alive}} \right\rangle + \left| \text{cat}_{\text{dead}} \right\rangle \right)$$

- Esistono proprietà **complementari**
- Gatto di Schroedinger ha proprietà (più) **complementare a vivo/morto**



Quindi, il gatto  
non è nè vivo, nè morto!

<http://www.meccanicaquantistica.it/-macca/gatto>

Fisica moderna

## Meccanica quantistica, caos e sistemi complessi

Lorenzo Maccone e Luca Salasnich

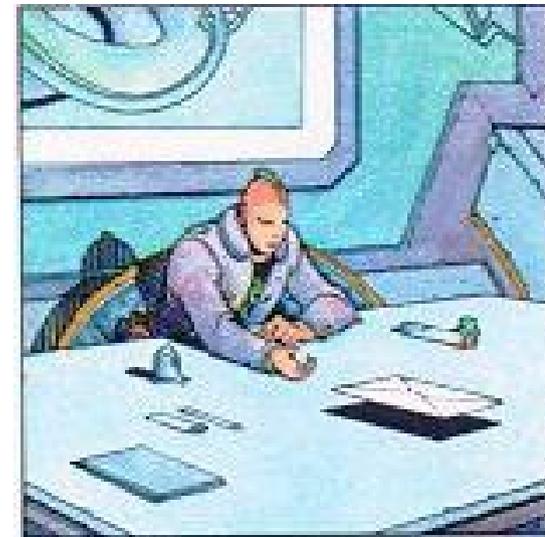
A cura di Gianluca Introzzi



Carocci editore

La meccanica quantistica è la strana teoria che governa l'universo. Questa presentazione permette l'analisi di fenomeni tra i più pittoreschi della fisica come il gatto di Schrodinger, il principio d'indeterminazione, l'"olismo" quantico, la non-località e il teletrasporto.

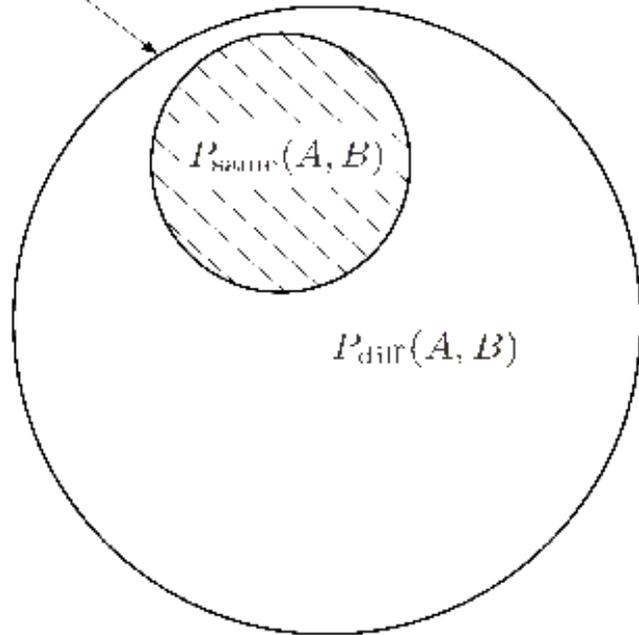
Carocci editore



# Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)

$$P_{\text{same}}(A, B) + P_{\text{diff}}(A, B) = 1$$

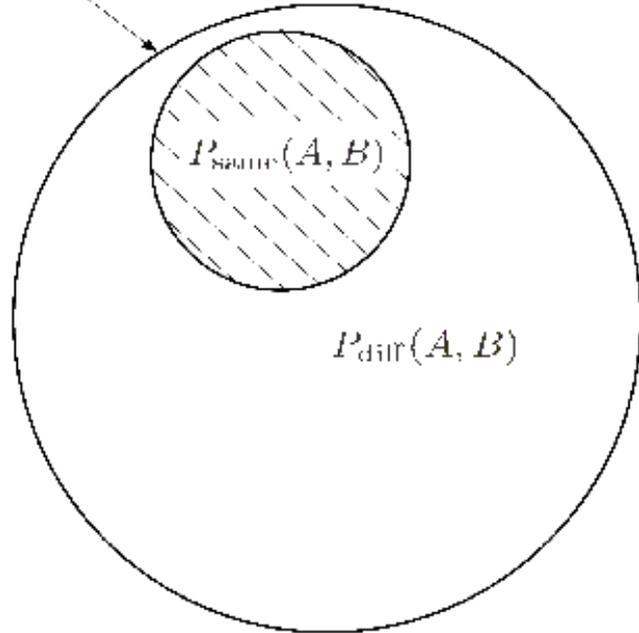


(a)

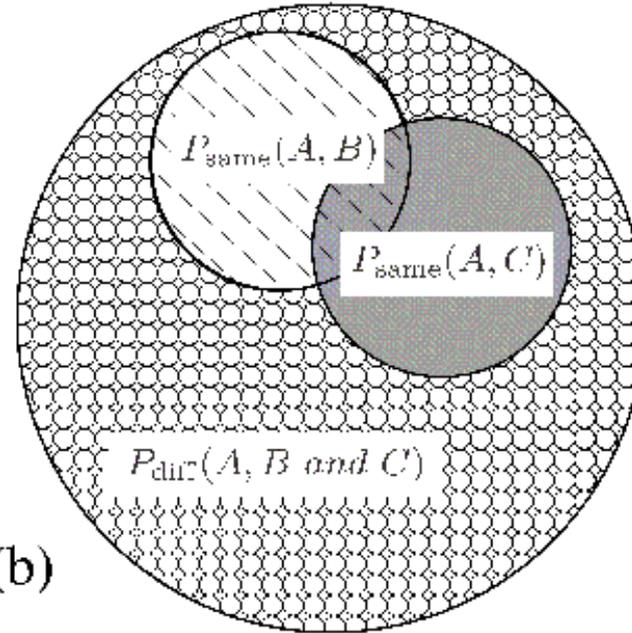
# Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)

$$P_{\text{same}}(A, B) + P_{\text{diff}}(A, B) = 1$$



(a)

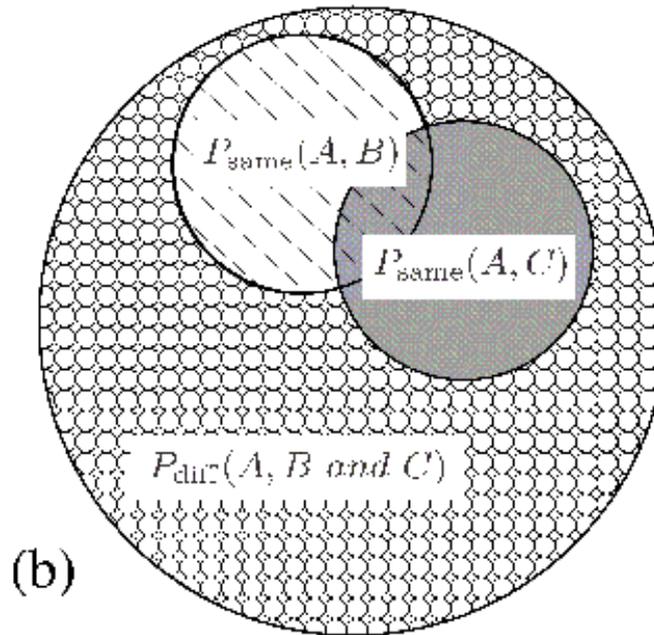
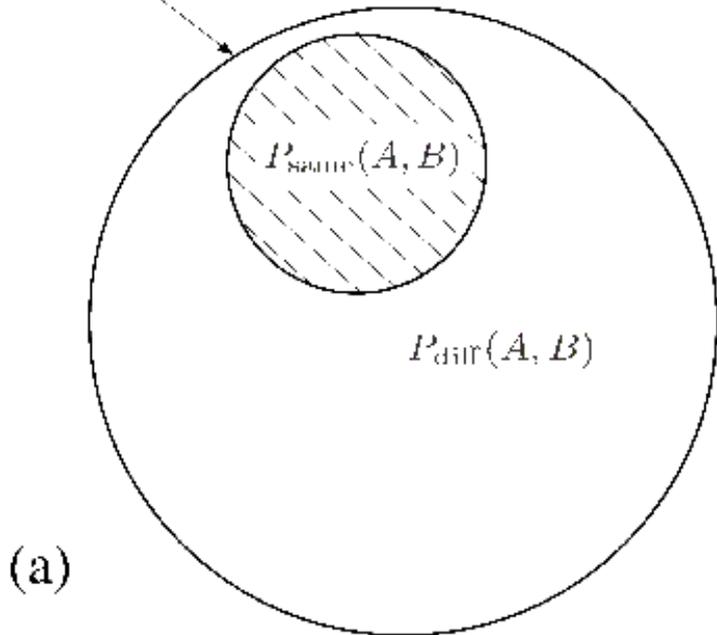


(b)

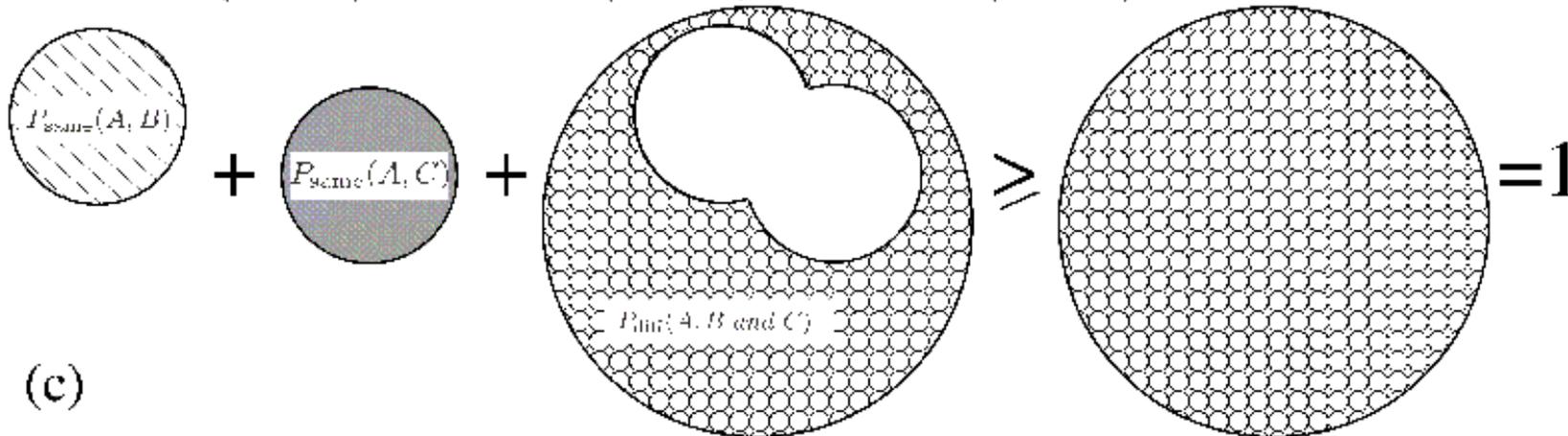
# Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)

$$P_{\text{same}}(A, B) + P_{\text{diff}}(A, B) = 1$$



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



## Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)

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

## Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)

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

ma possiamo introdurre tre proprietà quantistiche  
(non soddisfano counterfactual determinism oppure Einstein locality)  
e preparare i due oggetti in uno **stato entangled**

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

# Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)

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

ma possiamo introdurre tre proprietà quantistiche  
(non soddisfano counterfactual determinism oppure Einstein locality)  
e preparare i due oggetti in uno **stato entangled**

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

per cui:

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

# Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)

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

ma possiamo introdurre tre proprietà quantistiche  
(non soddisfano counterfactual determinism oppure Einstein locality)  
e preparare i due oggetti in uno **stato entangled**

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

per cui:

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

la disuguaglianza è VIOLATA!!!

# Disuguaglianza di Bell, dimostrazione semplice

Due oggetti, tre proprietà dicotomiche A, B, C (prendono valori 0 o 1)