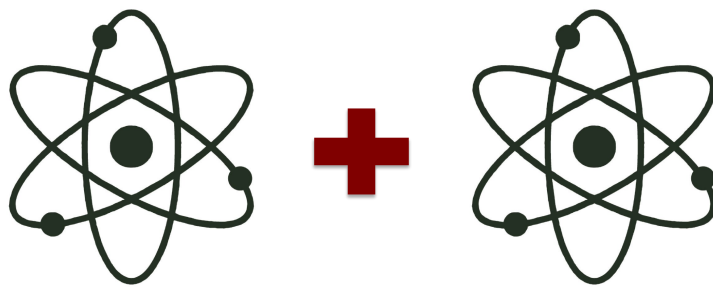


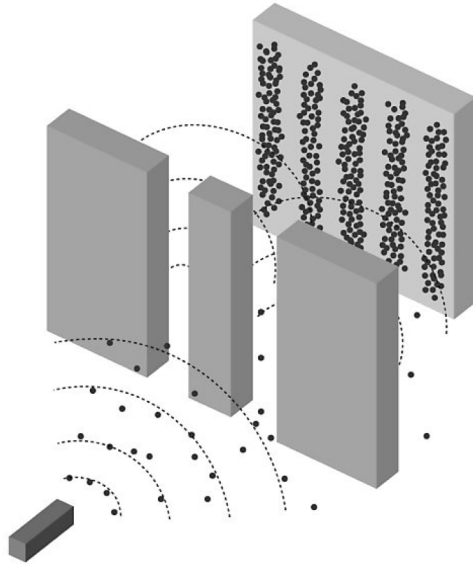
# Bell's Theorem

## Sovrapposizioni quantistiche



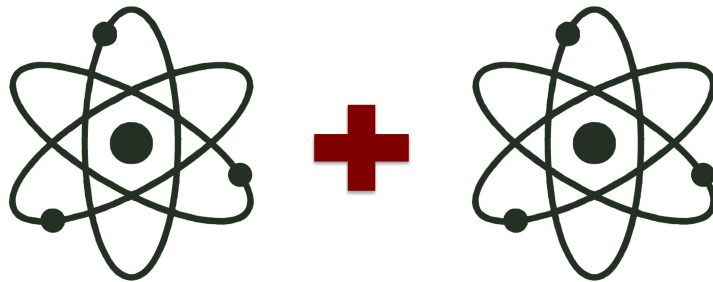
$$\Psi_{\text{atomo}} = \Psi_{\text{qui}} + \Psi_{\text{là}}$$

## Perché?



In questo modo si riesce a dare una "spiegazione" dell'esperimento delle due fenditure

## Cosa significa?

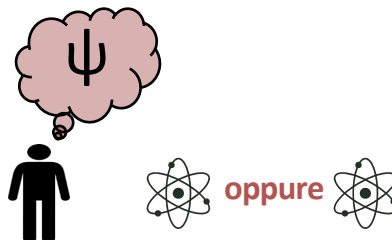


$$\Psi_{\text{atomo}} = \Psi_{\text{qui}} + \Psi_{\text{là}}$$

## Due posizioni: Einstein e Bohr

### Incompletezza:

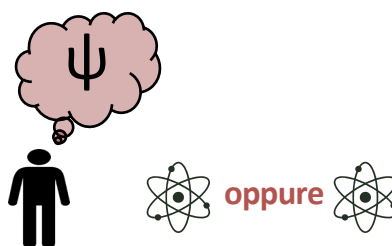
$\psi$  = ignoranza sullo stato del sistema



## Due posizioni: Einstein e Bohr

### Incompletezza:

$\psi$  = ignoranza sullo stato del sistema



### Completezza:

$\psi$  = descrizione completa dello stato sistema

$$\psi = \text{atom} + \text{atom}$$

## La scatola di Einstein

$\psi$  = particella in una scatola



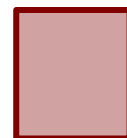
## La scatola di Einstein

$\psi$  = particella in una scatola



Divido la scatola in due parti

$$\psi = \psi_{\text{sinistra}} + \psi_{\text{destra}}$$



## La scatola di Einstein

$\psi$  = particella in una scatola



Divido la scatola in due parti

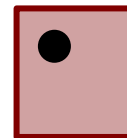
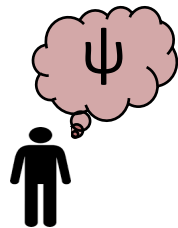
$$\psi = \psi_{\text{sinistra}} + \psi_{\text{destra}}$$



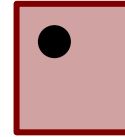
Dov'è la particella?



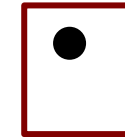
## Incompletezza



## Incompletezza



**Guardo** nella scatola a sinistra e non trovo la particella.  
 Concludo che è nella seconda. La mia conoscenza è cambiata, non lo stato "vero" della particella



## Completezza

$$\Psi = \text{[red square]} + \text{[red square]}$$

## Completezza

$$\Psi = \boxed{\text{shaded}} + \boxed{\text{shaded}}$$

**Guardo** nella scatola a sinistra e non trovo la particella. Concludo che è a destra. Lo stato è cambiato sia a sinistra che a destra

$$\Psi = \boxed{\text{empty}} + \boxed{\text{dot}}$$

## Completezza

$$\Psi = \boxed{\text{shaded}} + \boxed{\text{shaded}}$$

**Guardo** nella scatola a sinistra e non trovo la particella. Concludo che è a destra. Lo stato è cambiato sia a sinistra che a destra

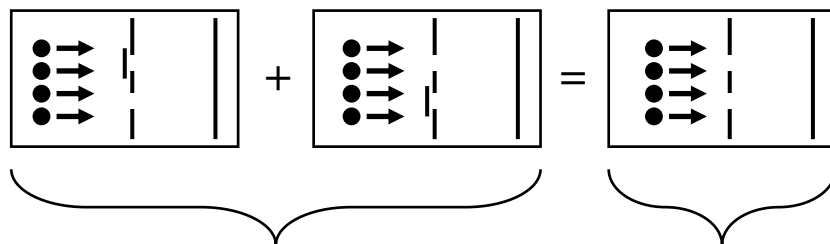
$$\Psi = \boxed{\text{empty}} + \boxed{\text{dot}}$$

**Effetto non-locale** (e per Einstein motivo per rifiutare questa posizione)

## Se è così semplice, allora la posizione più ragionevole è quella epistemica, classica

Questo significa che la meccanica quantistica è una teoria **incompleta**, non mi dice lo stato vero dei sistemi fisici (dove si trova la particella, per esempio)

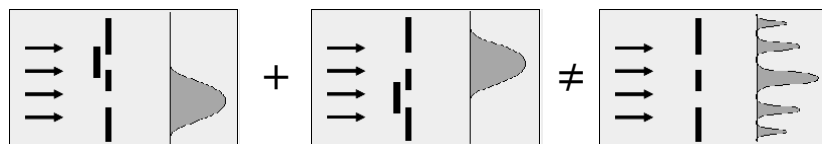
### Se questo fosse vero...



Le particelle sono palline classiche, e in entrambi i casi passano metà attraverso la fenditura superiore e metà attraverso quella inferiore (magari qualcuna va persa perché sbatte contro lo schermo)



## Tuttavia...



I dati sperimentali sembrano contraddire questa possibilità (sembrano...)

Le cose non sono così semplici

## 50 anni di storia in 1 minuto

**1935:** A. Einstein insiste sull'incompletezza della teoria.  
Argomento EPR

## 50 anni di storia in 1 minuto

**1935:** A. Einstein insiste sull'incompletezza della teoria.  
Argomento EPR

**Anni '50:** D. Bohm - teoria di particelle che si muovono  
lungo traiettorie definite. La teoria è non locale...

## 50 anni di storia in 1 minuto

**1935:** A. Einstein insiste sull'incompletezza della teoria.  
Argomento EPR

**Anni '50:** D. Bohm - teoria di particelle che si muovono  
lungo traiettorie definite. La teoria è non locale...

**Anni '60:** J. Bell prova a rendere la teoria di Bohm locale.  
Non ci riesce. **Disuguaglianze di Bell**

## 50 anni di storia in 1 minuto

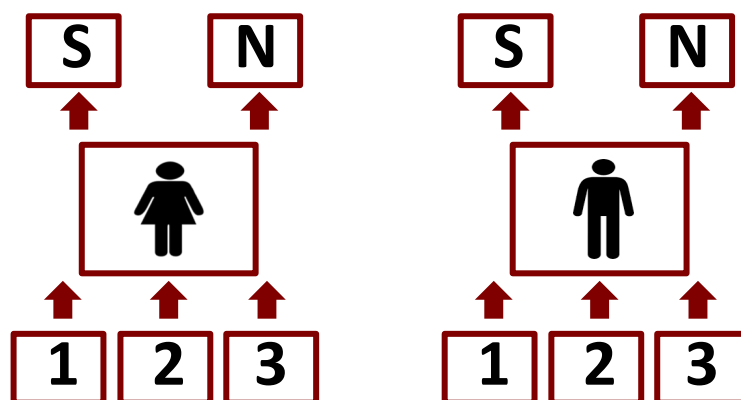
**1935:** A. Einstein insiste sull'incompletezza della teoria.  
Argomento EPR

**Anni '50:** D. Bohm - teoria di particelle che si muovono lungo traiettorie definite. La teoria è non locale...

**Anni '60:** J. Bell prova a rendere la teoria di Bohm locale. Non ci riesce. **Disuguaglianze di Bell**

**Anni '80:** Le disuguaglianze di Bell vengono sottoposte a verifica sperimentale

## Alice e Bob



## Esito del gioco

Round	Carta per A	Carta per B	Risposta A	Risposta B
1	1	3	S	N
2	2	2	S	S
3	2	3	N	N
4	1	2	N	S
5	3	3	N	N
6	1	1	S	S
7	1	2	S	N
8	2	3	N	S

Ogni volta a cui a Alice e Bob viene data una carta con lo stesso numero, danno la stessa risposta. **Sono telepatici!**

## Il solito Einstein...

Si sono messi d'accordo prima


Round	Carta 1	Carta 2	Carta 3
1	S	S	N
2	N	S	N
3	S	N	N
4	N	S	S
5	N	N	N
6	S	N	S
7	S	N	S
8	N	N	S

Alice e Bob hanno preparato in precedenza un librone con la lista di tutte le risposte, per ogni round del gioco

## Il solito Einstein...

Si sono messi d'accordo prima

Round	Carta 1	Carta 2	Carta 3
1	S	S	N
2	N	S	N
3	S	N	N
4	N	S	S
5	N	N	N
6	S	N	S
7	S	N	S
8	N	N	S



Carta per A	Carta per B	Risposta di A	Risposta di B
1	3	S	N
2	2	S	S
2	3	N	N
1	2	N	S
3	3	N	N
1	1	S	S
1	2	S	N
2	3	N	S

## L'idea di fondo

Impossibilità di telepatia, ovvero Alice e Bob non possono comunicare istantaneamente a distanza, ovvero **località**



Le risposte di Alice e Bob erano state stabilite in anticipo, ovvero esistevano prima del gioco, ovvero la nostra conoscenza è **incompleta**

## Ma arriva John Bell...

Guardiamo a tutta la statistica

Round	Carta 1	Carta 2	Carta 3
1	S	S	N
2	N	S	N
3	S	N	N
4	N	S	S
5	N	N	N
6	S	N	S
7	S	N	S
8	N	N	S



Alice Bob	1	2	3
1	A	A	D
2	A	A	D
3	D	D	A

A = Accordo  
B = Disaccordo

## Ma arriva John Bell...

Guardiamo a tutta la statistica

Round	Carta 1	Carta 2	Carta 3
1	S	S	N
2	N	S	N
3	S	N	N
4	N	S	S
5	N	N	N
6	S	N	S
7	S	N	S
8	N	N	S



Alice Bob	1	2	3
1	A	A	D
2	A	A	D
3	D	D	A

A = Accordo  
B = Disaccordo

Gli accordi superano  
i disaccordi

$$A > D$$

**Disuguaglianza di Bell**

## Facciamo i conti

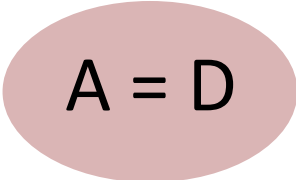
La statistica dice

Round	Carta per A	Carta per B	Risposta di A	Risposta di B
1	1	3	S	N
2	2	2	S	S
3	2	3	N	N
4	1	2	N	S
5	3	3	N	N
6	1	1	S	S
7	1	2	S	N
8	2	3	N	S

## Facciamo i conti

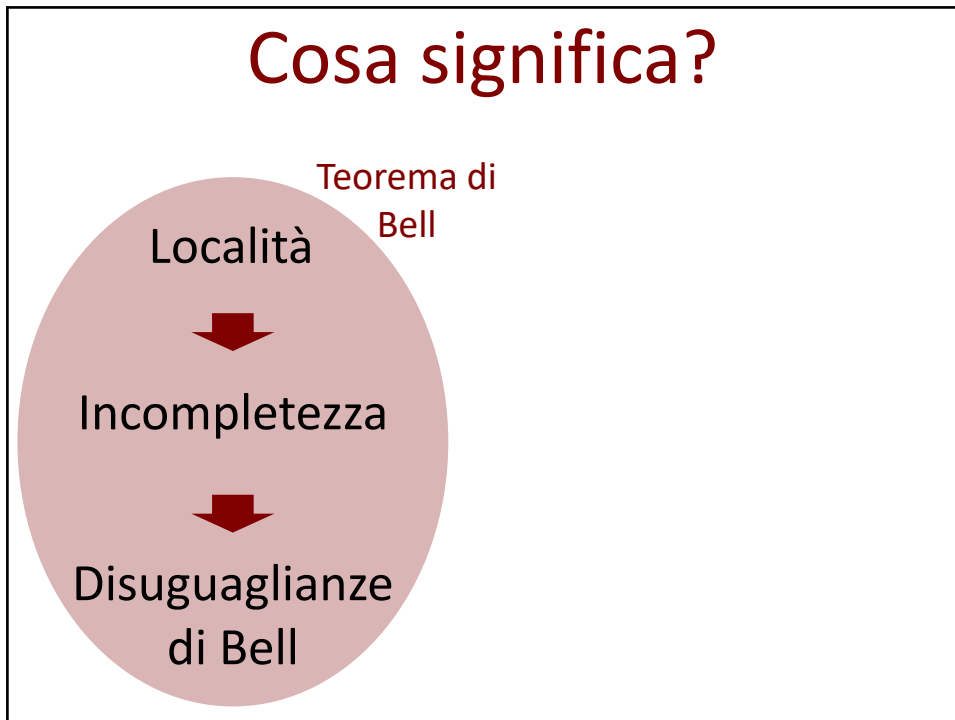
La statistica dice

Round	Carta per A	Carta per B	Risposta di A	Risposta di B	A/D
1	1	3	S	N	D
2	2	2	S	S	A
3	2	3	N	N	A
4	1	2	N	S	D
5	3	3	N	N	A
6	1	1	S	S	A
7	1	2	S	N	D
8	2	3	N	S	D

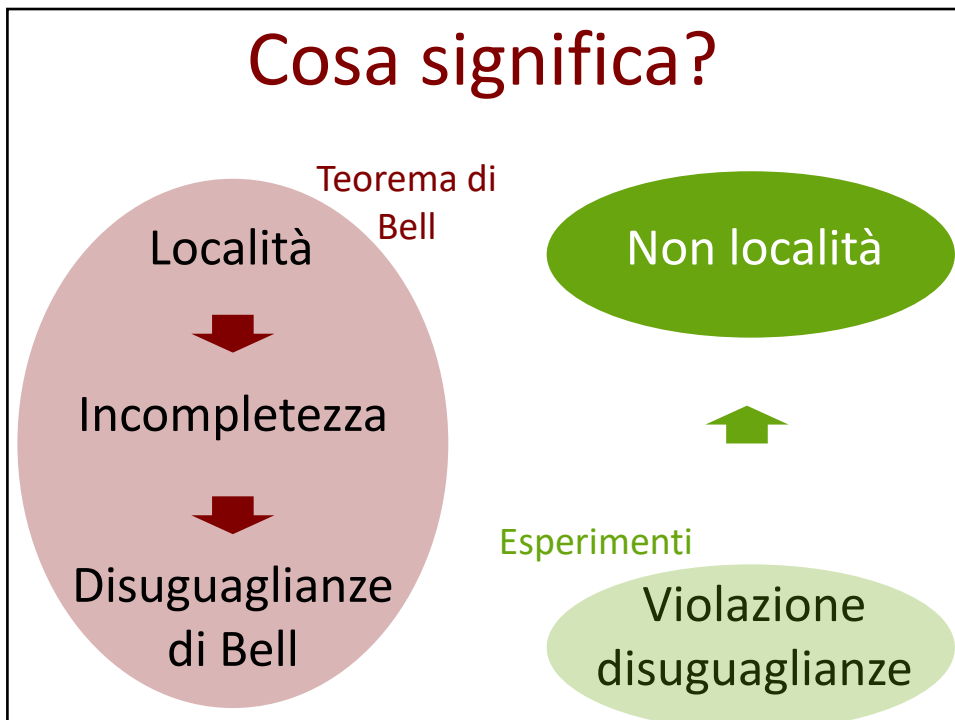


$$A = D$$

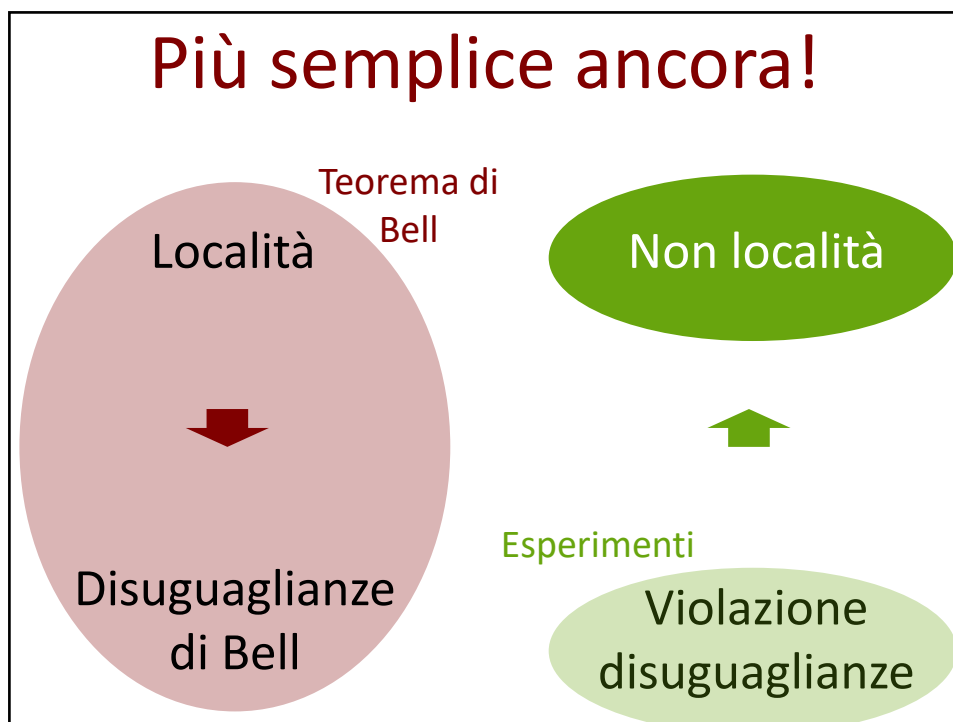
## Cosa significa?



## Cosa significa?







## La Natura è non locale

Questo pone seri problemi in relazione alla relatività ristretta, che si fonda sul principio di località.

Il conflitto non è diretto, però esiste.

Nessuno per ora sa cosa fare.

## E l'incompletezza?

La domanda rimane aperta.

Esistono completamenti della meccanica quantistica (Meccanica Bohmiana) e esistono teorie in cui la funzione d'onda è tutto (Modelli di Collasso Spontaneo)