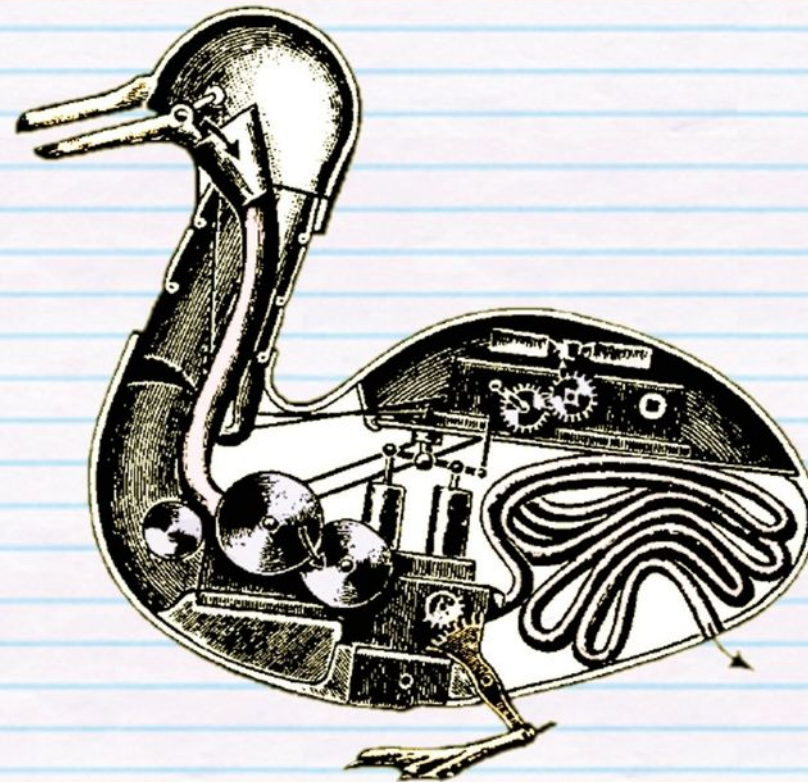


Crisi dei fondamenti nella Fisica del '900

Truly Tricky Graduate Physics Problems with solutions

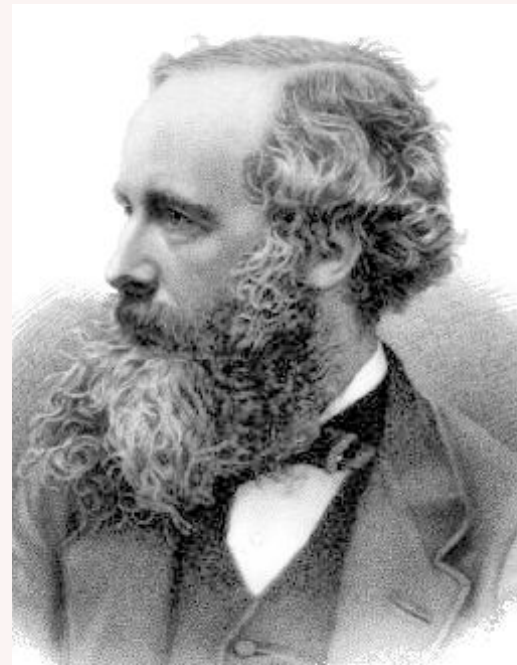


M. Frigeni
Liceo Giulio Cesare
20 aprile 2015

Quali fondamenti?

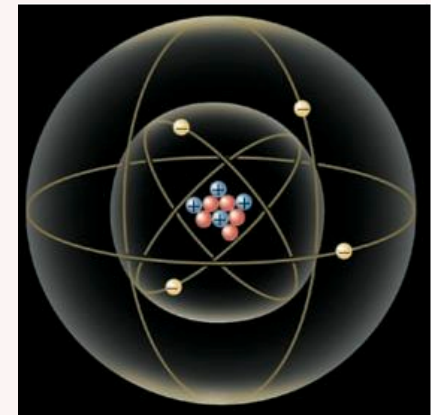
Fisica “classica” (dell’Ottocento):

- meccanica newtoniana e leggi di forza;
- equazioni di Maxwell per il campo elettromagnetico.



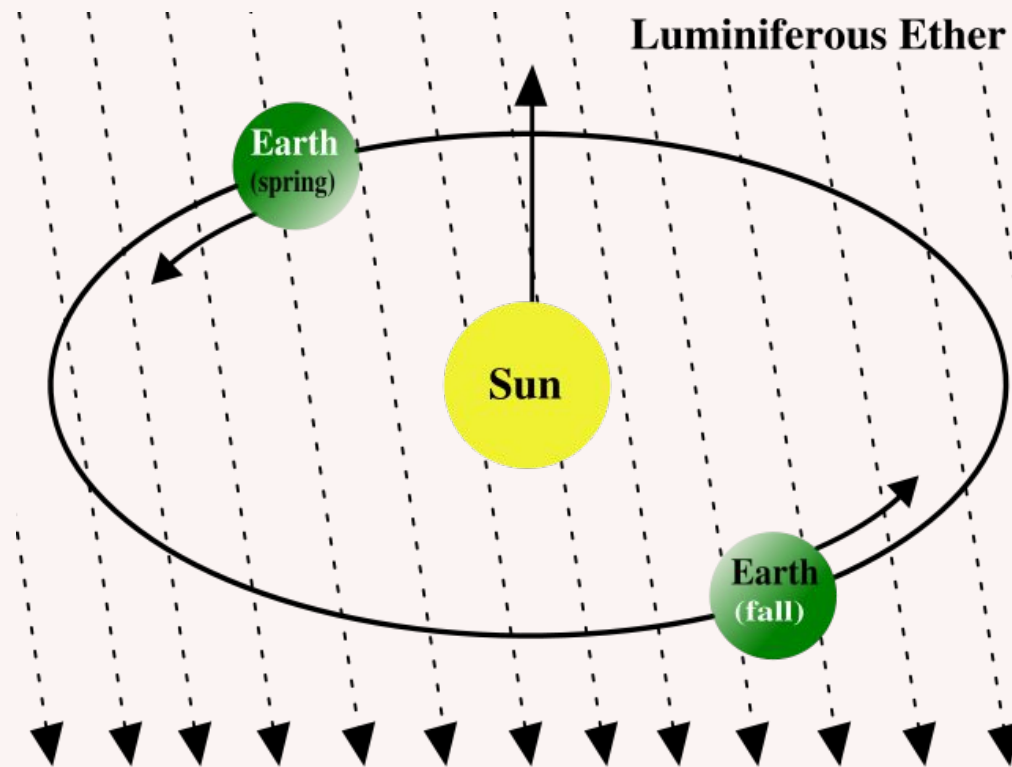
Problemi della fisica “classica”

- Le onde elettromagnetiche hanno una velocità ben precisa (300 000 km/s), ma rispetto a che cosa?
- Perché un corpo molto caldo emette luce di vari colori?
- Se vale il modello atomico di Rutherford, come è possibile che gli atomi siano tutti uguali?



La velocità della luce

La velocità delle onde elettromagnetiche viene riferita ad un ipotetico mezzo chiamato *etere*, ma gli esperimenti non mostrano alcun moto della Terra rispetto all'etere.



Galileo aveva ragione?

Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti: siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente [...]. Fate muovere la nave con quanta si voglia velocità (di moto uniforme e non fluttuante in qua e in là): voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma.

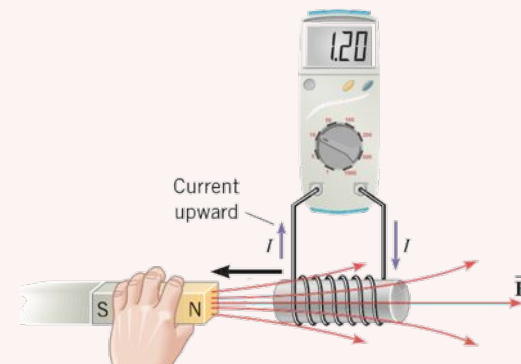
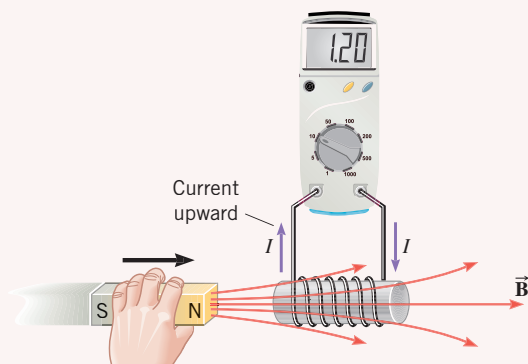
(Dialogo sopra i Massimi Sistemi, 1632)



Le parole di Einstein (1905)

Si pensi per esempio all'interazione tra un magnete e un conduttore. I fenomeni osservabili in questo caso dipendono soltanto dal moto relativo del conduttore e del magnete, mentre secondo l'interpretazione consueta i due casi, a seconda che l'uno o l'altro di questi corpi sia quello in moto, vanno tenuti rigorosamente distinti. [...]

Esempi di tipo analogo, come pure i tentativi andati a vuoto di constatare un moto della terra relativamente al "mezzo luminoso" portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica non corrisponda ad alcuna proprietà dell'esperienza.



L'ipotesi di Einstein

Il principio di relatività di Galileo vale non solo per i fenomeni meccanici, ma per tutta la fisica.

In particolare, la velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali (in moto relativo uniforme l'uno rispetto all'altro).

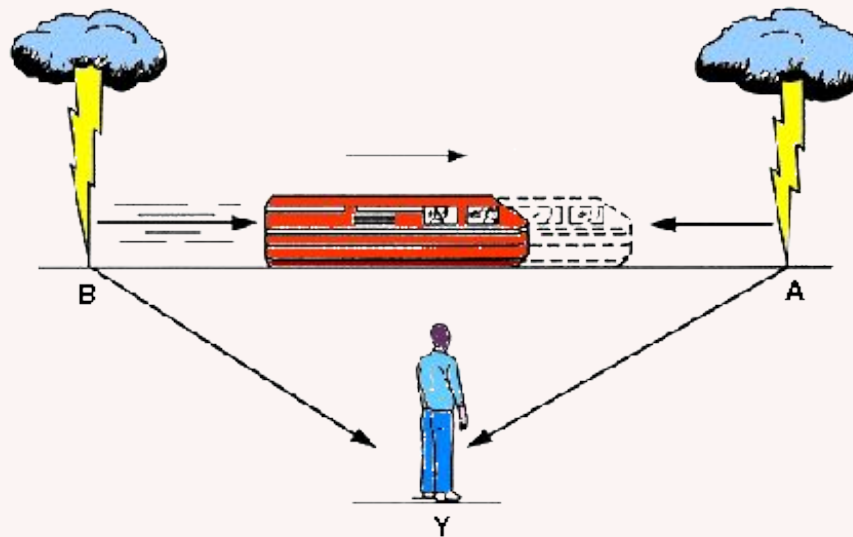


Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik (1905)

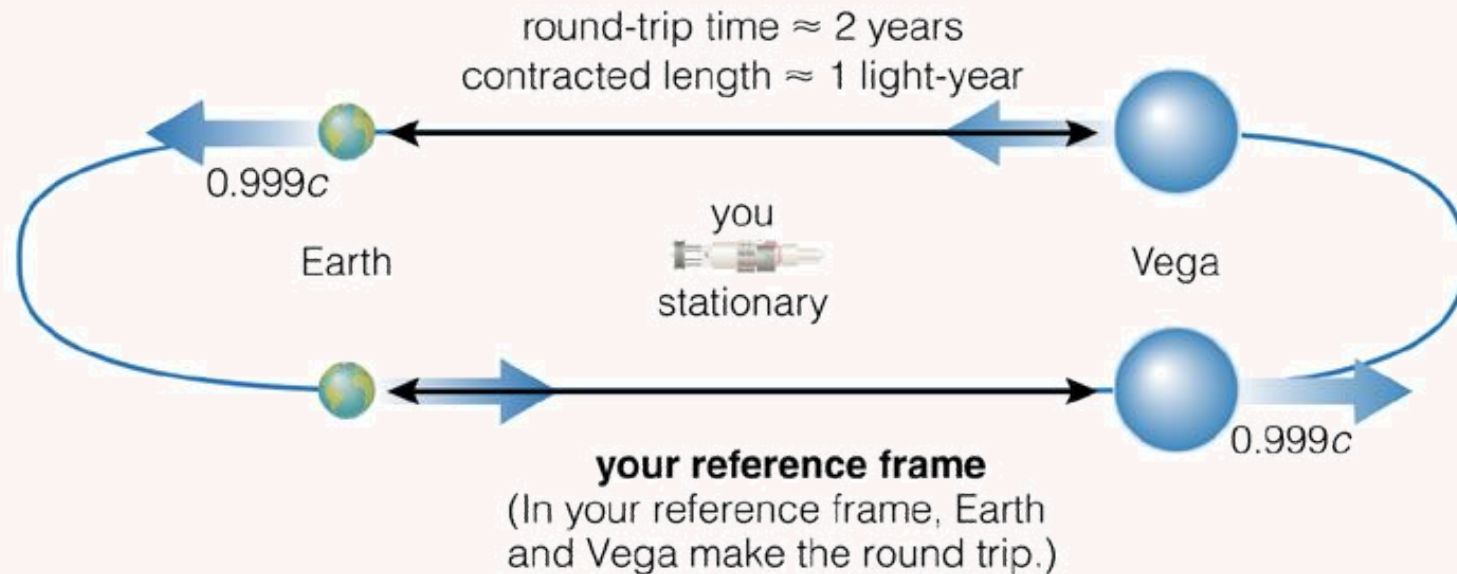
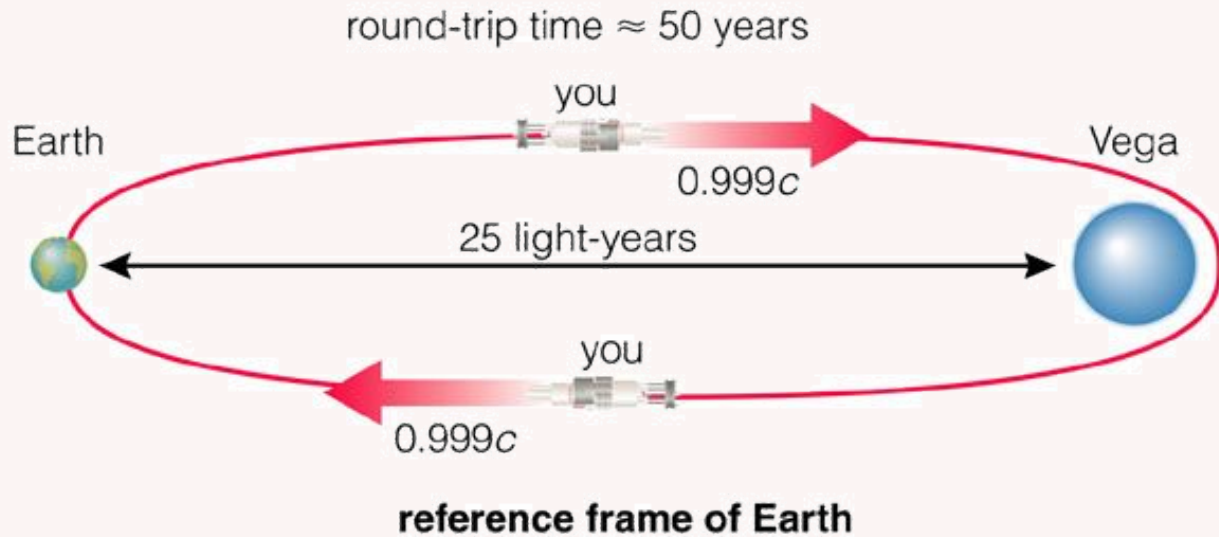
Conseguenze

La distanza temporale fra due eventi è in generale diversa se misurata da osservatori in moto relativo fra loro.

In particolare eventi simultanei per l'uno possono non essere simultanei per l'altro.



Il paradosso dei gemelli



Teoria generale della relatività (1915)

Nei dieci anni successivi Einstein cercò di estendere la sua teoria a tutti gli osservatori in moto, anche non inerziali.

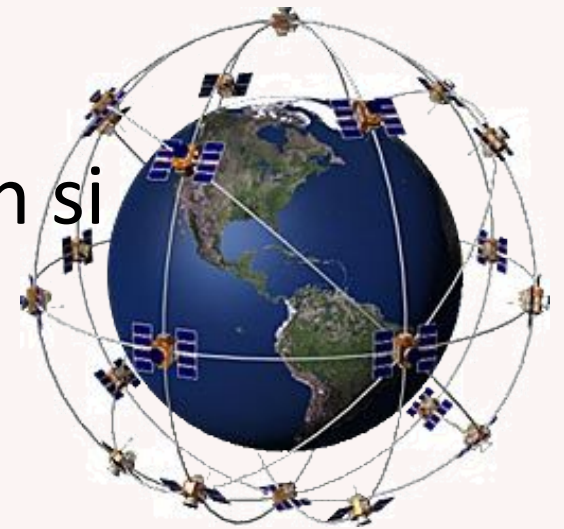
In realtà egli si accorse che in questo modo stava costruendo una teoria relativistica della gravitazione, che sostituiva quella di Newton.



Conseguenze

Le previsioni della RG differiscono leggermente da quelle della teoria di Newton, soprattutto nel caso di campi gravitazionali molto intensi.

Inoltre osservatori situati ad altezze diverse in un campo gravitazionale misurano in generale differenze di tempo diverse fra due eventi. Se non si tenesse conto di questo effetto il sistema GPS (ad esempio) non potrebbe funzionare.



La meccanica quantistica

Dopo importanti intuizioni di Planck, Bohr e Einstein, nel 1926 Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger pubblicano indipendentemente il nucleo fondante di una nuova teoria, che riesce a dar conto di un numero impressionante di fenomeni osservati a livello atomico (sistema periodico, proprietà chimiche, spettri di emissione e assorbimento, ...).

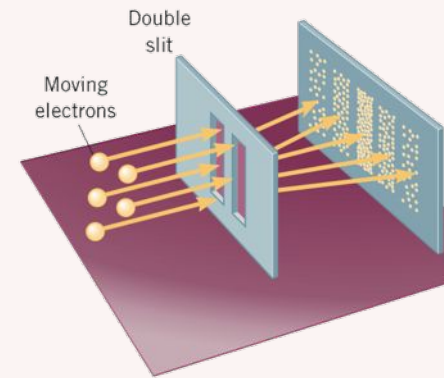


Onde e particelle

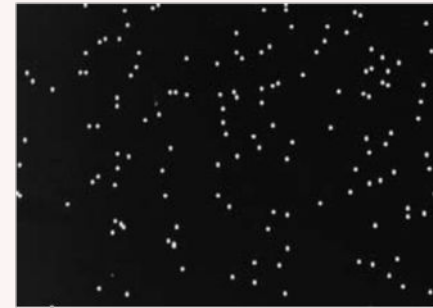
La MQ riesce ad incorporare nel suo formalismo una caratteristica sconcertante di molti fenomeni atomici: la coesistenza di alcune caratteristiche proprie delle onde con altre proprie delle particelle materiali.



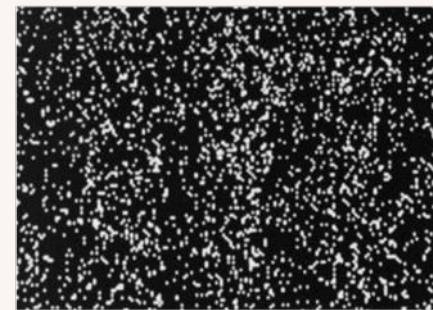
A lato: formazione di frange d'interferenza di onde in acqua e nel passaggio di elettroni attraverso due fenditure.



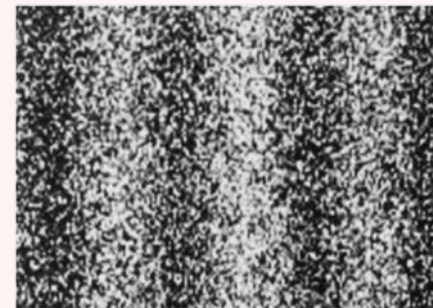
(a)



(b) After 100 electrons

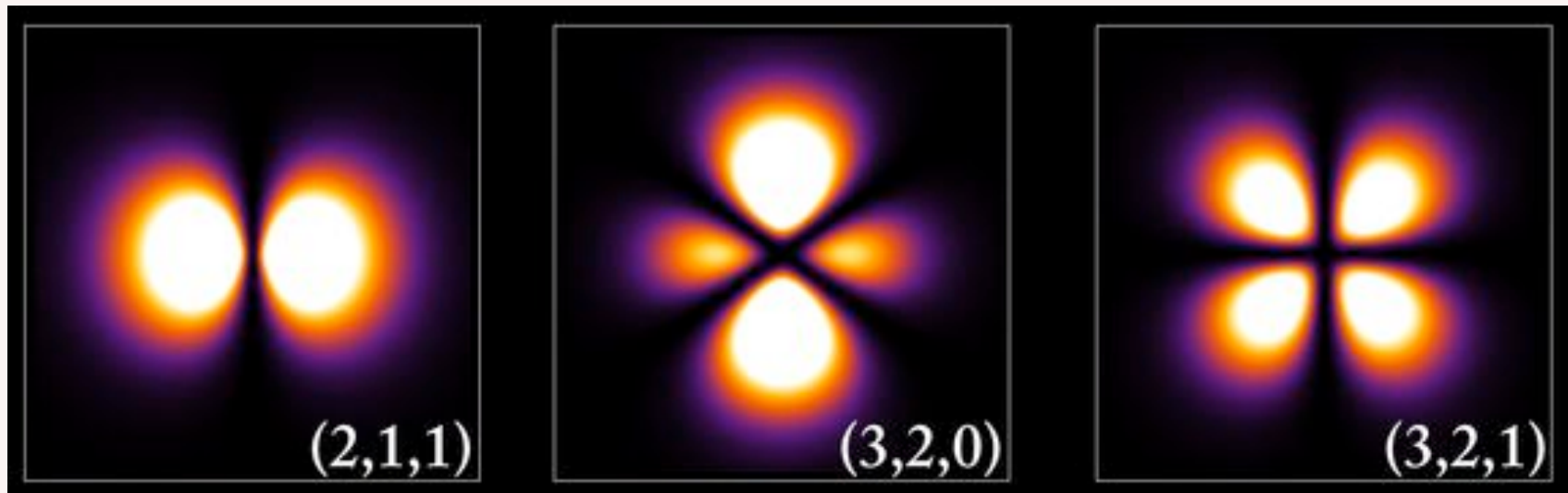


(c) After 3000 electrons

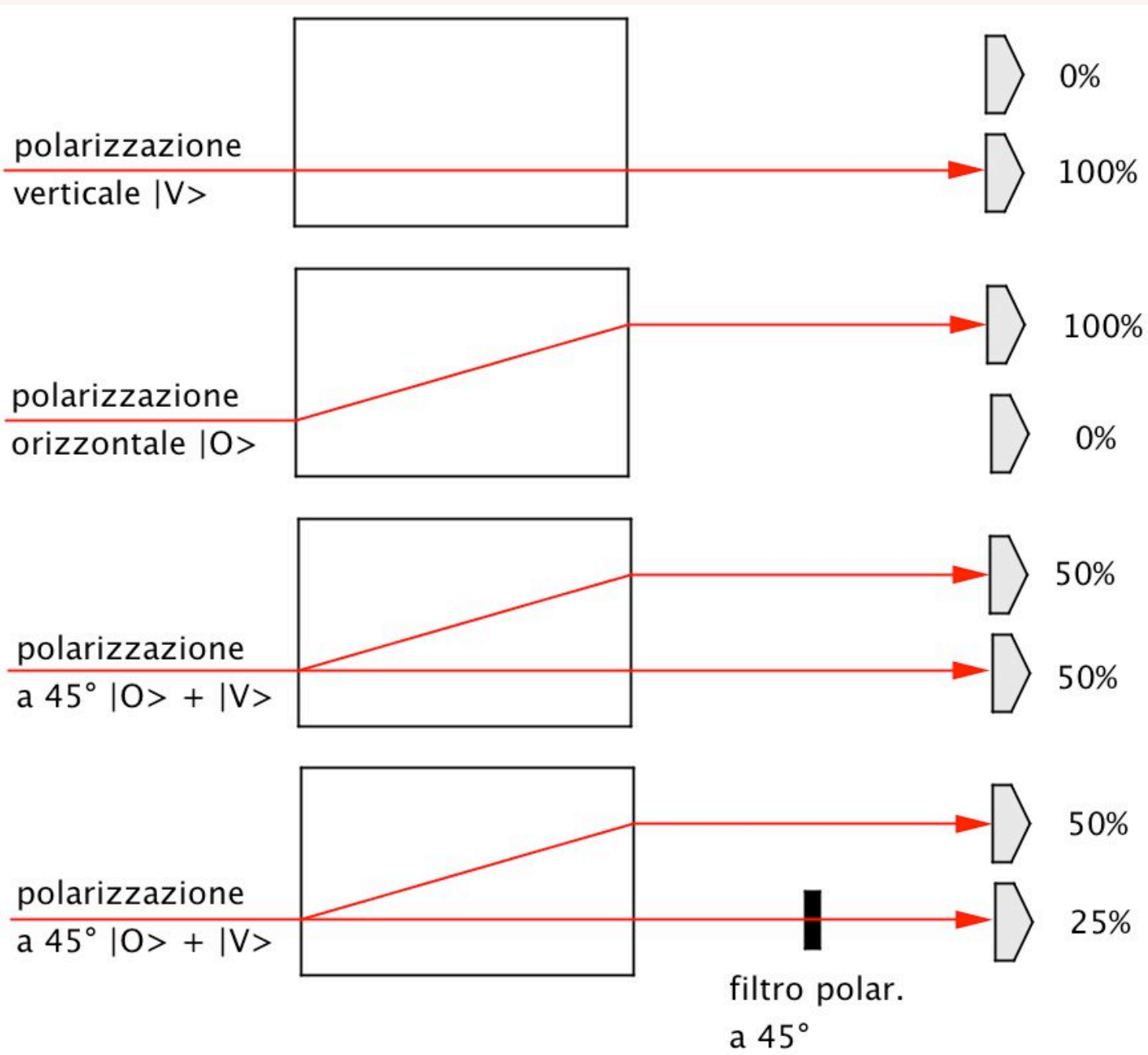


(d) After 70 000 electrons

Secondo la MQ un elettrone è descritto da una **funzione di stato**, che si evolve nel tempo in un modo ben preciso. Tuttavia l'esito di una misura (di posizione, velocità, ecc.) in generale non dà un risultato certo: la teoria permette solo di prevedere la **probabilità** che la misura abbia un certo valore.



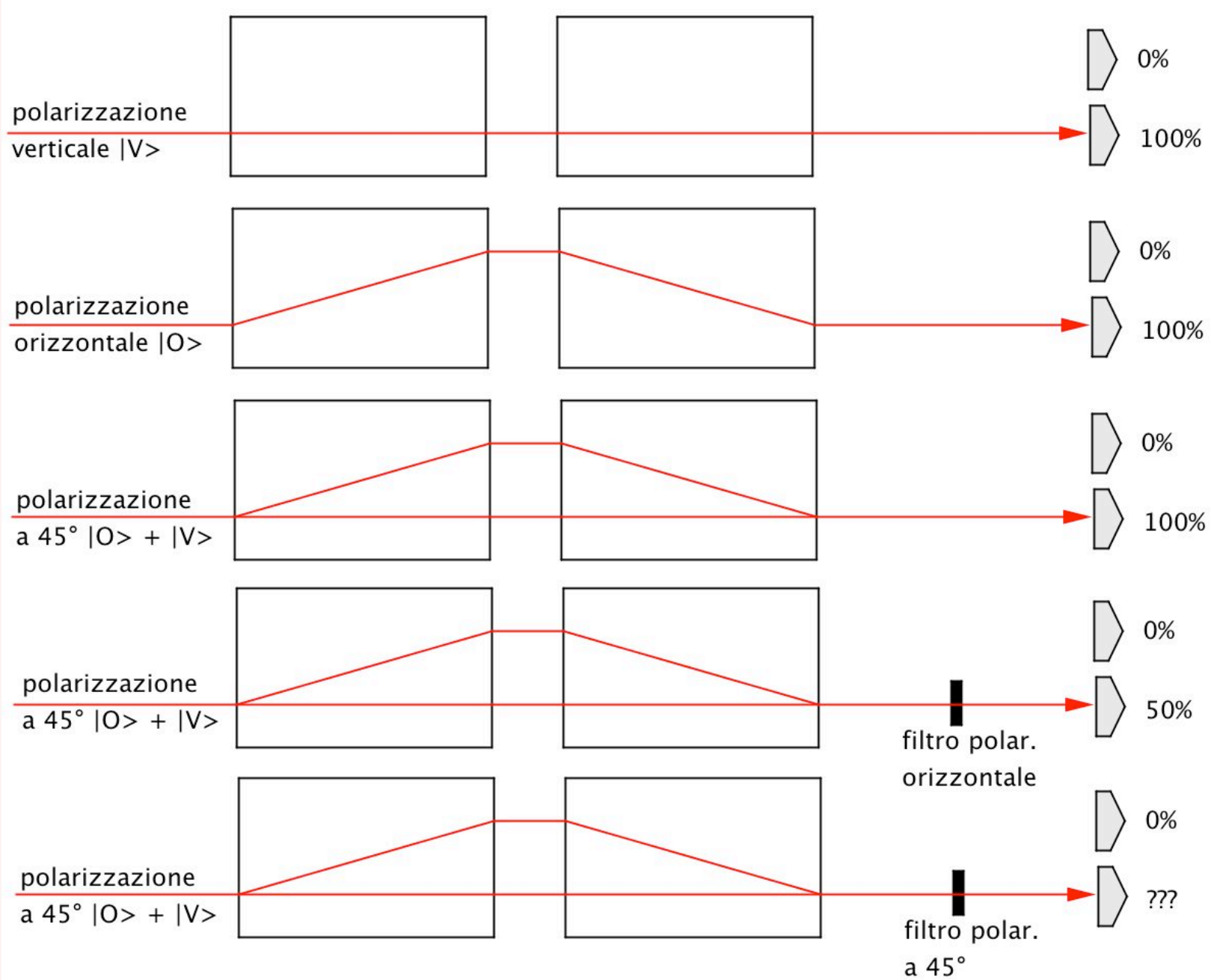
Un esempio con fotoni polarizzati



Il rettangolo è un cristallo birifrangente: i fotoni polarizzati orizzontalmente o verticalmente vengono deflessi in modo diverso al suo interno.

Per la MQ un fotone polarizzato a 45° è una *sovrapposizione* in parti uguali di fotoni con polarizzazione orizzontale e verticale.

Il filtro polarizzatore a 45° lascia passare il 100% dei fotoni polarizzati a 45° ma blocca il 50% dei fotoni polarizzati orizzontalmente o verticalmente

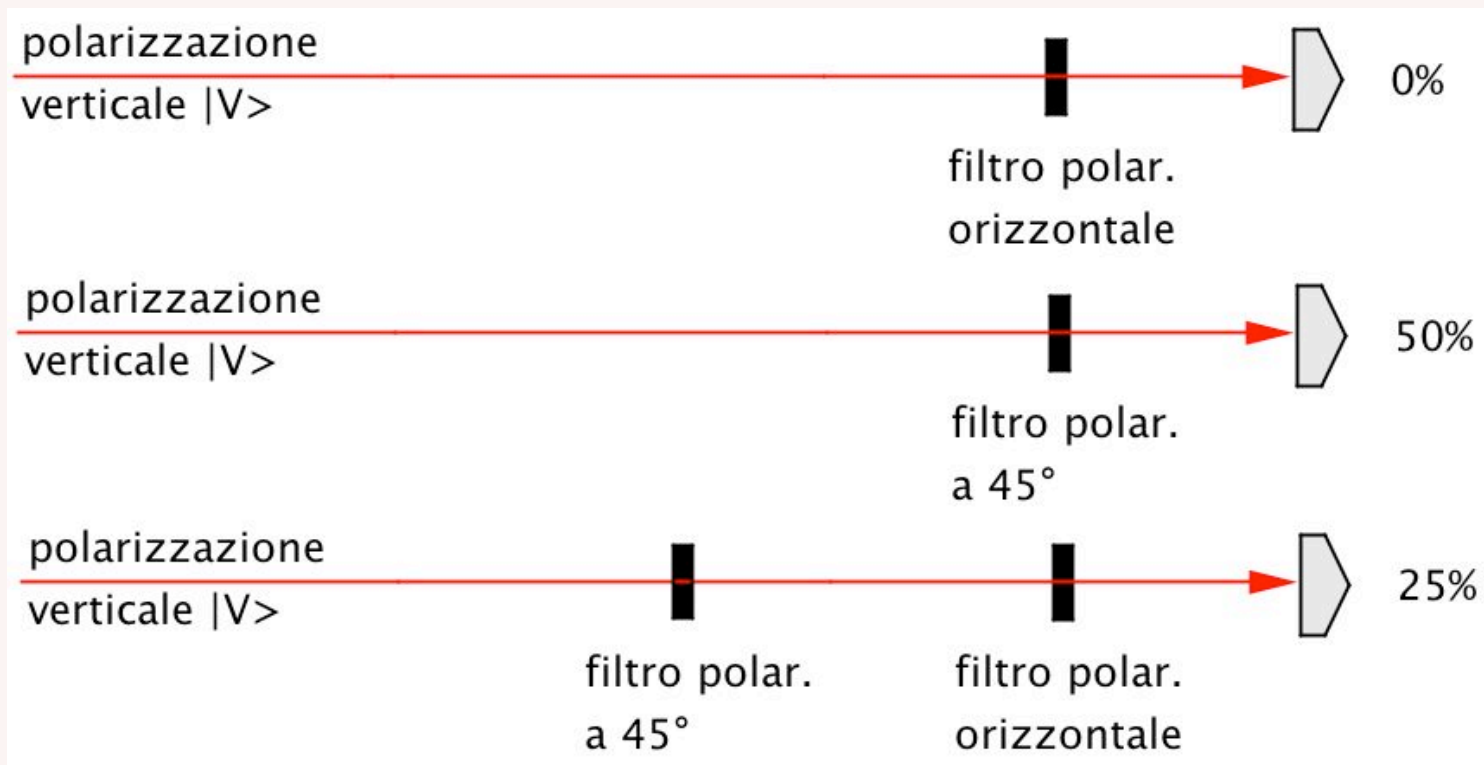


Un secondo
 cristallo
 birifrangente
 rovesciato
 inverte la
 deviazione
 causata dal
 primo cristallo.

Quale percentuale di fotoni raggiunge il rivelatore nell'ultimo caso?

Il “collasso” della funzione di stato

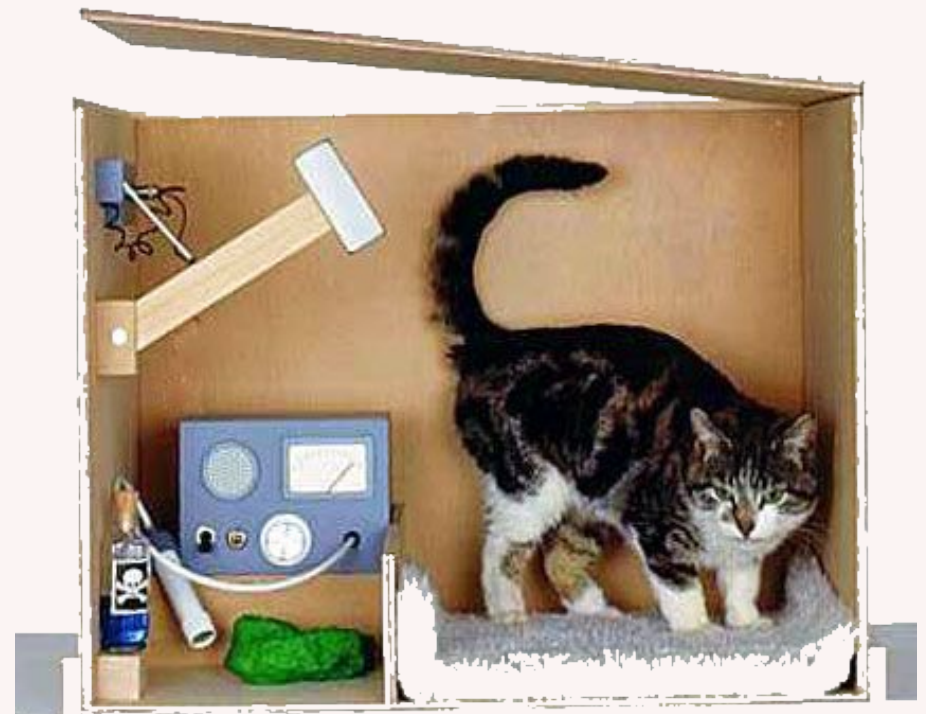
Quando si esegue una misura su un sistema quantistico, se il risultato non è certo al 100% allora la funzione di stato dopo la misura è **diversa** dalla precedente.



Micro vs Macro

Il collasso della funzione di stato avviene quando il sistema quantistico (microscopico) interagisce con uno strumento di misura (macroscopico).

Ma il formalismo non spiega quando e perché un sistema può essere considerato macroscopico: in linea di principio anche un corpo macroscopico dovrebbe obbedire alle leggi della MQ, cosa che invece non si verifica.

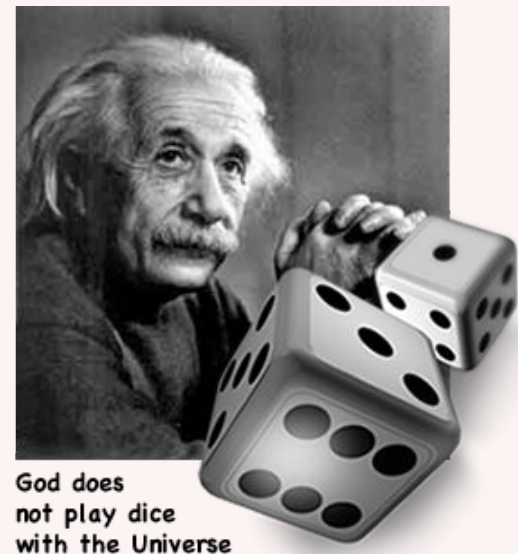


Il gatto di Schrödinger: vivo o morto?

Aleatorietà non epistemica

Se la funzione di stato della MQ descrive in modo **completo** un sistema, allora l'impossibilità prima descritta di ottenere risultati certi da una misura sarebbe una caratteristica intrinseca dei fenomeni naturali e non – come succede nella meccanica classica – la conseguenza di una conoscenza imprecisa delle condizioni del sistema.

Questo aspetto della MQ non piacque mai ad Einstein: viene spesso ricordata in proposito la sua frase “Dio non gioca a dadi con l'Universo”.



L'argomento di Einstein, Podolsky e Rosen (1935)

Coppia di fotoni in uno stato di polarizzazione intrecciato (*entangled*): $|O1\rangle|O2\rangle + |V1\rangle|V2\rangle$. Alice misura la polarizzazione del fotone 1 e la funzione di stato della coppia di fotoni collassa. Quindi Bob per il fotone 2 troverà al 100% **lo stesso risultato di Alice**.



Conclusione di E. P. R.: in qualche modo l'informazione sulla polarizzazione deve essere **preesistente** nella coppia di fotoni, anche se la MQ non può descrivere la situazione in modo completo.

La disuguaglianza di Bell (1964)

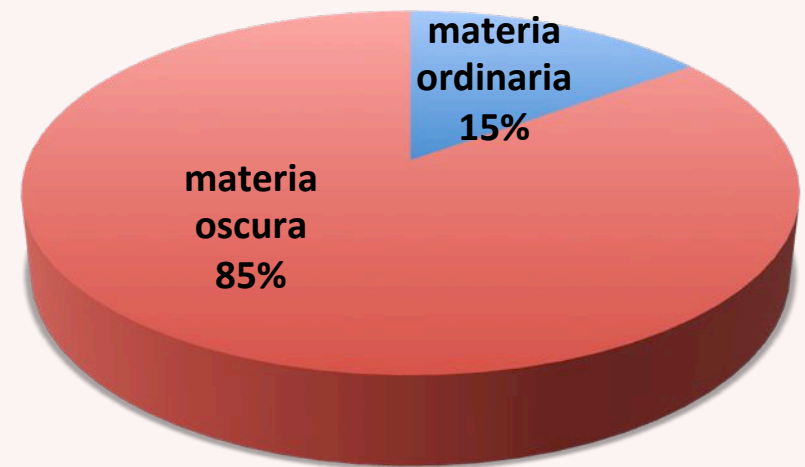
L'analisi compiuta da J.S. Bell ed i successivi esperimenti hanno dimostrato che la conclusione di Einstein era erronea: nessuna teoria **locale** non aleatoria può riprodurre i risultati della MQ.



Nella MQ è proprio il carattere aleatorio delle misure a rendere impossibile la trasmissione di segnali a velocità superiore a quella della luce.

Problemi aperti

- La MQ non spiega il collasso della funzione di stato.
- Manca una teoria quantistica della gravitazione.
- Materia oscura nell'Universo: massa mancante o legge della gravitazione da rivedere?



Bibliografia

- A. Einstein: *Relatività. Esposizione divulgativa*, Bollati Boringhieri, Torino 1967
- G.C. Ghirardi: *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore, Milano 1997
- Il vostro libro di testo di fisica!