



1561 PAVIA
ALMO COLLEGIO
BORROMEO

Dalla filosofia della scienza generalista alla filosofia delle scienze particolari: il caso delle implicazioni filosofiche della fisica quantistica

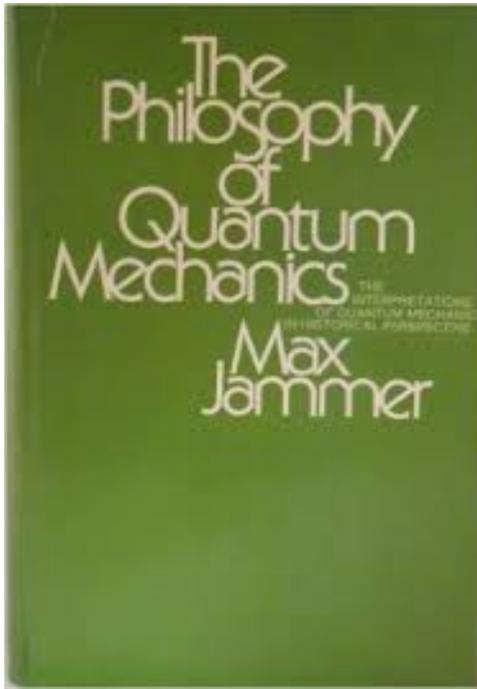
Federico Laudisa

Dipartimento di Lettere e Filosofia

Università di Trento

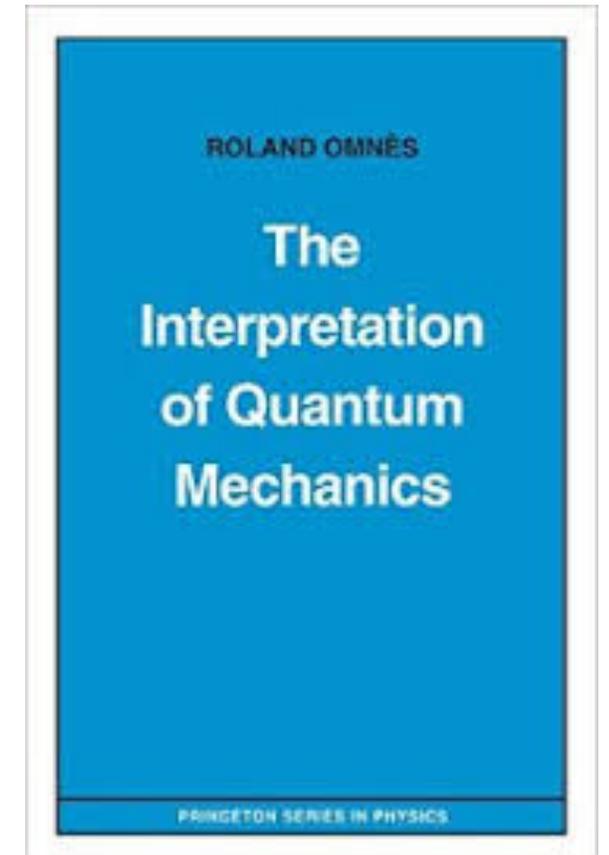


UNIVERSITÀ
DI TRENTO



Con la meccanica quantistica assistiamo a un fenomeno raro, se non unico, nella storia della fisica:

una *forte divergenza* tra l'altissima efficacia sperimentale, predittiva e applicativa della teoria da una parte e l'interpretazione concettuale dall'altra.



Il mondo quantistico e il problema delle sue interpretazioni

Secondo una tradizione storica che ha visto lunghe e accese discussioni, la meccanica quantistica è infatti la teoria fisica che – diversamente da qualsiasi altra (inclusa la relatività) – sembra mettere in crisi non soltanto un'ampia classe di spiegazioni cui la meccanica e l'elettromagnetismo classici ci avevano abituato, ma anche per certi aspetti le **CATEGORIE RAZIONALI STESSE** con cui il pensiero scientifico moderno aveva analizzato il mondo fisico fino alle soglie del XX secolo.

Alcuni fatti fondamentali nella storia della meccanica quantistica

- Fenomeni di scambio tra materia e radiazione (relazione tra temperatura e radiazione emessa) → Ipotesi di Max Planck sulla natura *discreta* e *quantizzata* dell'energia (1900).
- Stabilità del modello atomico, inspiegabile alla luce dell'elettromagnetismo classico: poiché le particelle cariche in moto irradiano energia, esse dovrebbero in brevissimo tempo collassare sul nucleo e la materia non sarebbe stabile → Ipotesi di Niels Bohr sulle orbite *quantizzate* (1913).
- Relazioni di indeterminazione di Heisenberg (1927): emergono limiti di principio alla determinabilità simultanea di posizione e velocità di particelle microfisiche: il concetto classico di *traiettoria* perde significato.



Negli anni che hanno visto lo sviluppo del nucleo fondamentale della teoria – dalle ipotesi di Planck del 1900 fino alla formulazione matematicamente rigorosa di von Neumann del 1932 – numerosi tra i protagonisti della rivoluzione quantistica

hanno contribuito al dibattito sulle implicazioni filosofiche ed epistemologiche della meccanica quantistica, un dibattito ricco di suggestioni e di posizioni diverse.





L'espressione *interpretazione di Copenhagen* (così chiamata in omaggio al luogo di insegnamento e di ricerca di Niels Bohr) – che indica solitamente l'interpretazione standard della teoria consolidatasi dagli anni Trenta in poi – è di fatto l'erede di una collezione (non del tutto coerente!) di idee molto diverse tra loro e non rende

giustizia al pluralismo teorico di quegli anni, intensi sia scientificamente sia filosoficamente.



La ricchezza concettuale di quegli anni si è poi cristallizzata in una rappresentazione della teoria, diffusa tanto tra i divulgatori quanto tra numerosi scienziati, che in sé conserva ben poco di quella ricchezza (una delle vittime privilegiate di questa forma di ortodossia è proprio Albert Einstein!)



- Gli enigmi della meccanica quantistica che emergono quando ci si interroga sulla ‘concezione quantistica del mondo’ dipendono in modo essenziale dal formalismo della teoria.
- Un formalismo elegante e matematicamente potente, elaborato in forma compiuta per la prima volta nel libro di J. von Neumann *Die Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932), che include in sé aspetti che si riveleranno problematici dal punto di vista epistemologico e fondazionale.
- È dunque necessario soffermarsi brevemente su questo aspetto: non occorrerà essere particolarmente sofisticati perché i problemi nascono proprio alla *sorgente* di questo formalismo.

Partiamo dalla descrizione meccanica classica di un generico stato di un sistema S (descrizione iper-semplificata!!):

Esso è caratterizzato da una coppia (x, p) di valori, dove

x = valore di *posizione* (un punto nello spazio 3-D delle posizioni)

p = valore di *velocità* (un punto nello spazio 3-D delle velocità)

Lo *spazio degli stati* \mathbf{C} di S (detto anche *spazio delle fasi*) è l'insieme dei possibili stati come (x, p) tale che:

- le possibili traiettorie di S sono rappresentate da particolari curve nello spazio \mathbf{C} ,
- le quantità fisiche misurabili sul sistema (per esempio l'energia) sono rappresentate come funzioni reali su \mathbf{C} .

Proprio sulla base delle relazioni di indeterminazioni di Heisenberg, tuttavia, scopriamo che in meccanica quantistica *non è possibile* costruire uno spazio delle fasi analogo a quello della meccanica classica!

Infatti, le suddette relazioni stabiliscono che il prodotto delle incertezze Δx e Δp nella misura rispettiva di posizione e velocità soddisfa la disuguaglianza

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2,$$

cioè se si diminuisce l'indeterminazione nella precisione di una delle due variabili, la si aumenta nell'altra:

«Non si può fissare il valore delle x insieme a quello delle p . Si può guardare il mondo con l'occhio x , oppure con l'occhio p , ma se si tenta di aprirli entrambi si ha una visione confusa.» (Wolfgang Pauli)

La struttura formale della meccanica quantistica introduce allora una nuova caratterizzazione dello *spazio degli stati* di un certo sistema fisico S , che indichiamo con H_S

H_S è uno spazio vettoriale, cioè una struttura matematica *lineare* i cui componenti sono *vettori* e possono essere *sommati* : se Ψ_1 e Ψ_2 sono vettori, la loro somma o *combinazione lineare*

$$\mathbf{a}\Psi_1 + \mathbf{b}\Psi_2$$

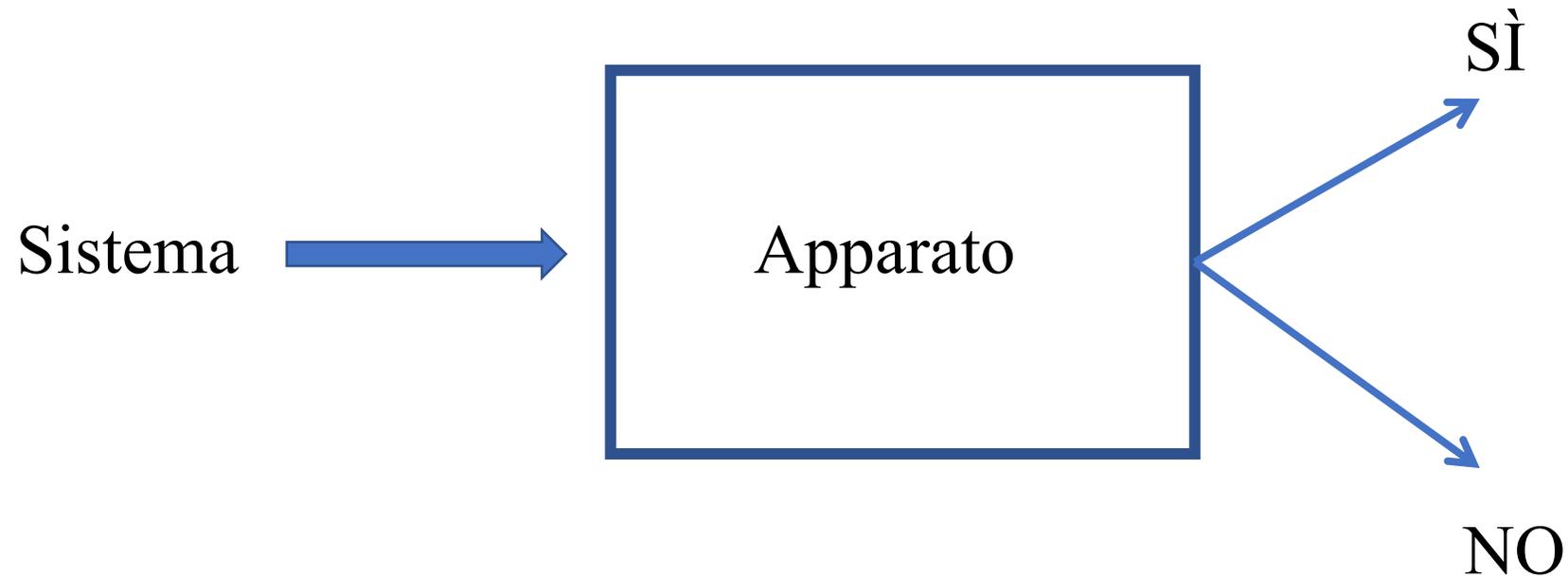
è ancora un vettore appartenente allo spazio degli stati H_S (dove \mathbf{a} e \mathbf{b} sono numeri complessi).

- Quando i vettori Ψ_1 e Ψ_2 rappresentano due possibili stati del sistema quantistico S , la combinazione lineare $\mathbf{a}\Psi_1 + \mathbf{b}\Psi_2$ rappresenta dunque ancora uno stato, definito *stato di sovrapposizione* degli stati Ψ_1 e Ψ_2 ;
- Le quantità $|\mathbf{a}|^2$ e $|\mathbf{b}|^2$ soddisfano la relazione $|\mathbf{a}|^2 + |\mathbf{b}|^2 = 1$ e rappresentano la *probabilità* di ottenere il risultato associato allo stato Ψ_1 e Ψ_2 rispettivamente.
- **I più rilevanti problemi interpretativi della teoria dipendono:**
 - 1) **dalla natura fortemente non-classica dello stato Ψ**
 - 2) **dalla linearità della teoria**

Natura fortemente non-classica dello stato Ψ

- In fisica classica, lo stato di un sistema può essere concepito come il ‘catalogo’ delle proprietà del sistema stesso: tali proprietà sono, almeno in parte, pre-esistenti a un’eventuale misura sul sistema e sono indipendenti da tale misura.
- In meccanica quantistica **non è possibile dire lo stesso**: lo stato di un sistema **non può** essere concepito come un catalogo di proprietà, né pre-esistenti alla misura né indipendenti da essa, ma piuttosto come un catalogo delle probabilità di ‘far emergere’ una certa proprietà *qualora si decida di effettuare la relativa misura*.

Stati di sovrapposizione ed esperimenti SÌ-NO



Stato del sistema *prima* della misura

$$1/\sqrt{2} \Psi(\text{SÌ}) + 1/\sqrt{2} \Psi(\text{NO})$$

La meccanica quantistica assume che questa descrizione dello stato del sistema S sia *completa*.

Le probabilità $|\frac{1}{\sqrt{2}}|^2 = 1/2$ non possono essere interpretate come misure di ‘ignoranza’ ma di effettiva ‘indeterminatezza’ !

Queste quantità denotano cioè **non** la probabilità che il sistema avesse una certa proprietà SÌ-NO (informazione che noi, semplicemente, non eravamo in grado di determinare per motivi contingenti), ma piuttosto la probabilità di trovare un certo risultato *qualora si esegua la relativa misura.*

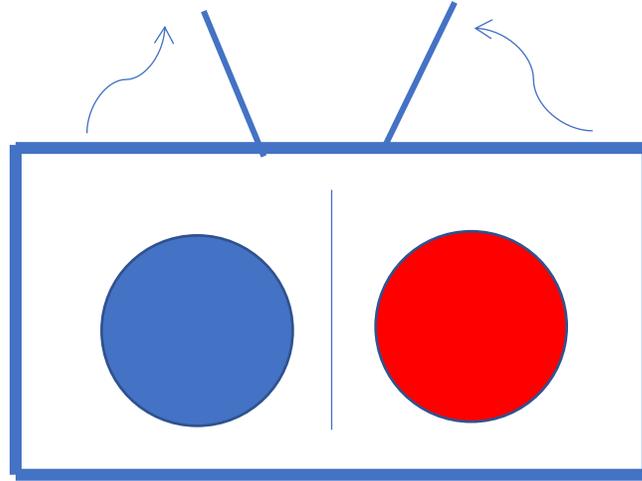


Interpretazione *statistica* dello stato quantistico:
Max Born, *Zeitschrift für Physik* 1926, 1927
(lavori per i quali Born ha ricevuto il Premio Nobel
nel 1954)

«Dal punto di vista della nostra meccanica quantistica *non esiste alcuna quantità che in ogni caso individuale fissa la conseguenza della collisione; ma anche sperimentalmente non abbiamo finora alcuna ragione per credere che esistano proprietà interne dell'atomo che condizionano un risultato definito per la collisione.* Dovremmo forse sperare di scoprire in futuro simili proprietà [...] e determinarle in casi individuali? O dovremmo credere che l'accordo tra teoria ed esperimento – quanto all'impossibilità di prescrivere condizioni per un'evoluzione causale – è un'armonia prestabilita fondata sulla non esistenza di tali condizioni? Personalmente tendo a rinunciare al determinismo nel mondo degli atomi. **Ma si tratta di una questione filosofica per la quale gli argomenti fisici da soli non sono decisivi.**»

Max Born, 1927

Differenza fondamentale rispetto a una situazione ‘classica’: p. es. una scatola internamente divisa in due sezioni, ciascuna contenente una pallina di diverso colore



Supponiamo di estrarre una palla da una delle due sezioni senza guardarne il colore: lo stato della palla *prima di guardare* può essere descritto da un'espressione del tipo

$$1/2 \text{ VERDE} + 1/2 \text{ ROSSA}$$

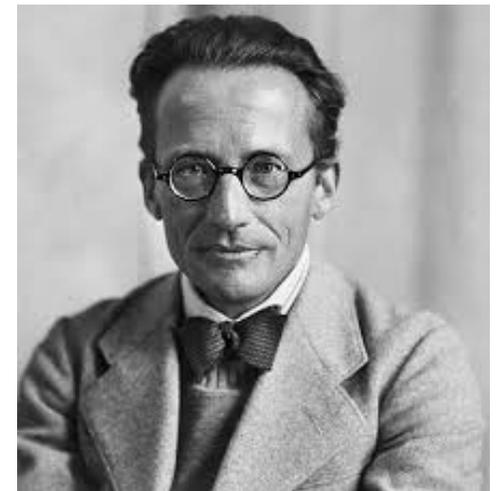
In questo caso questa descrizione è invece considerata *incompleta*: lo stato della palla è **comunque definito** e la probabilità riflette la nostra ignoranza!

La faccenda si complica ulteriormente nel caso di sistemi *composti*.

Consideriamo infatti due sistemi S e T e prendiamo in esame il sistema costituito dalla loro ‘composizione’ $S \otimes T$ (una coppia di elettroni o di fotoni, un elettrone e un protone, ecc.).

Quando consideriamo l’insieme dei possibili stati del nostro sistema $S \otimes T$, la meccanica quantistica prevede l’esistenza di stati particolari, detti *entangled* (‘aggrovigliati’, l’espressione originale *Verschränkung* proviene da Schrödinger), che non hanno alcun corrispettivo in teorie ‘classiche’ (**anche in questo caso, la linearità della teoria è fondamentale**).

In questi stati, i sistemi composti sembrano mantenere una connessione reciproca *anche quando – terminata l’interazione – si trovano ormai distanti tra loro!*



E se uno dei due sistemi ‘aggrovigliati’ è un sistema *macroscopico*?

È la situazione nota come *gatto di Schrödinger*



Stato del sistema *prima* della misura

$$1/\sqrt{2} \Psi_S (\text{SÌ}) + 1/\sqrt{2} \Psi_S (\text{NO})$$

Si assume che l'apparato sia collegato a una scatola nella quale è rinchiuso un gatto;

se la risposta è SÌ, l'apparato attiva un meccanismo che rompe una fiala di cianuro determinando la morte del gatto;

se la risposta è NO, l'apparato non attiva alcun meccanismo e il gatto sopravvive.

Il problema è generale: prendiamo infatti uno stato di un sistema S del tipo

$$1/\sqrt{2} \Psi_S (SÌ) + 1/\sqrt{2} \Psi_S (NO)$$

e supponiamo di sottoporre il sistema a una misura (SÌ-NO).

Supponiamo anche di trattare l'apparato stesso A come un sistema quantistico e indichiamo dunque con $\Psi_A(0)$ lo stato dell'apparato *prima* della misura (l'apparato 'a riposo').

Quando facciamo interagire il sistema S sottoposto a misura con l'apparato, la teoria prescrive che il sistema composto $S + A$ evolva in uno stato entangled

$$1/\sqrt{2} [\Psi_S (SÌ) \otimes \Psi_A(SÌ)] + 1/\sqrt{2} [\Psi_S (NO) \otimes \Psi_A(NO)] \quad (*)$$

dove

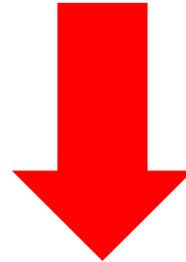
$\Psi_A (SÌ)$ = stato di A corrispondente alla lettura del risultato SÌ

$\Psi_A(NO)$ = stato di A corrispondente alla lettura del risultato NO

Ma lo stato

$$1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{SÌ}) \otimes \Psi_A(\text{SÌ})] + 1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{NO}) \otimes \Psi_A(\text{NO})] \quad (*)$$

appare come una sovrapposizione di stati macroscopici dell'apparato:
impossibile!!



PROBLEMA DELLA MISURA IN MQ

Come risolvere il problema?

Con il cosiddetto *collasso* (o *riduzione*) dello stato: in un tempo non meglio specificato tra il tempo in cui vale ancora lo stato

$$1/\sqrt{2} [\Psi_S (SÌ) \otimes \Psi_A(SÌ)] + 1/\sqrt{2} [\Psi_S (NO) \otimes \Psi_A(NO)] \quad (*)$$

e il momento in cui guardiamo il risultato dell'esperimento, il collasso sopprime uno dei due termini della sovrapposizione (*) con probabilità 1/2:

MAGIA !!!



Problemi del collasso:

- Il collasso è un processo di evoluzione dinamica non unitaria (cioè è un tipo di evoluzione *diversa* da quella che la teoria prescrive *in assenza di misure*);
- la teoria non ha una ricetta precisa per distinguere i casi in cui certe interazioni sono *davvero delle misure* (si applica la dinamica del collasso) e i casi in cui non lo sono (**non** si applica la dinamica del collasso) → paradossi come quello dell'*amico di Wigner*;
- il collasso non è relativisticamente invariante (due osservatori in sistemi di riferimento mutuamente inerziali possono non concordare sul fatto che il collasso sia avvenuto oppure no)

Non a caso, alcune delle principali interpretazioni globali della MQ si dividono proprio sullo statuto del collasso:

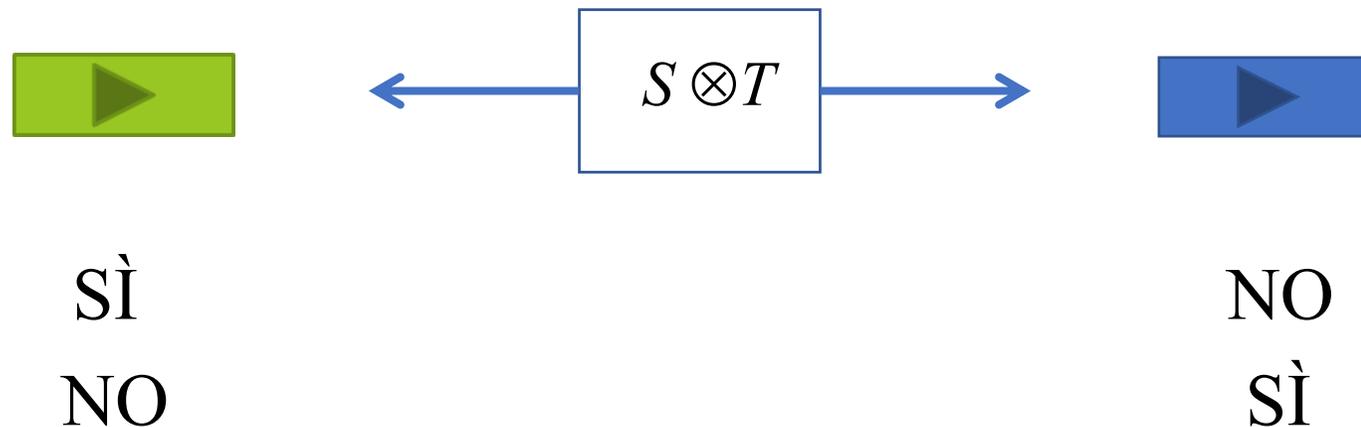
Everett & Bohm  Il collasso **non** è un processo fisico reale

GRW  Il collasso reale è un processo fisico reale

Il fenomeno dell'entanglement porta a sua volta a riconoscere il fenomeno noto come non-località.

Consideriamo per esempio un sistema *composto* $S \otimes T$: ipotizziamo di eseguire un esperimento SI-NO su ciascuno dei due sottosistemi S e T separatamente, in modo tale che lo stato di $S \otimes T$ prima dell'esperimento sia rappresentato da uno *entangled* come il seguente:

$$1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{SÌ}) \otimes \Psi_T(\text{NO})] + 1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{NO}) \otimes \Psi_T(\text{SÌ})]$$



Nello stato

$$1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{SÌ}) \otimes \Psi_T(\text{NO})] + 1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{NO}) \otimes \Psi_T(\text{SÌ})]$$

il sistema composto $S \otimes T$ possiede proprietà bizzarre:

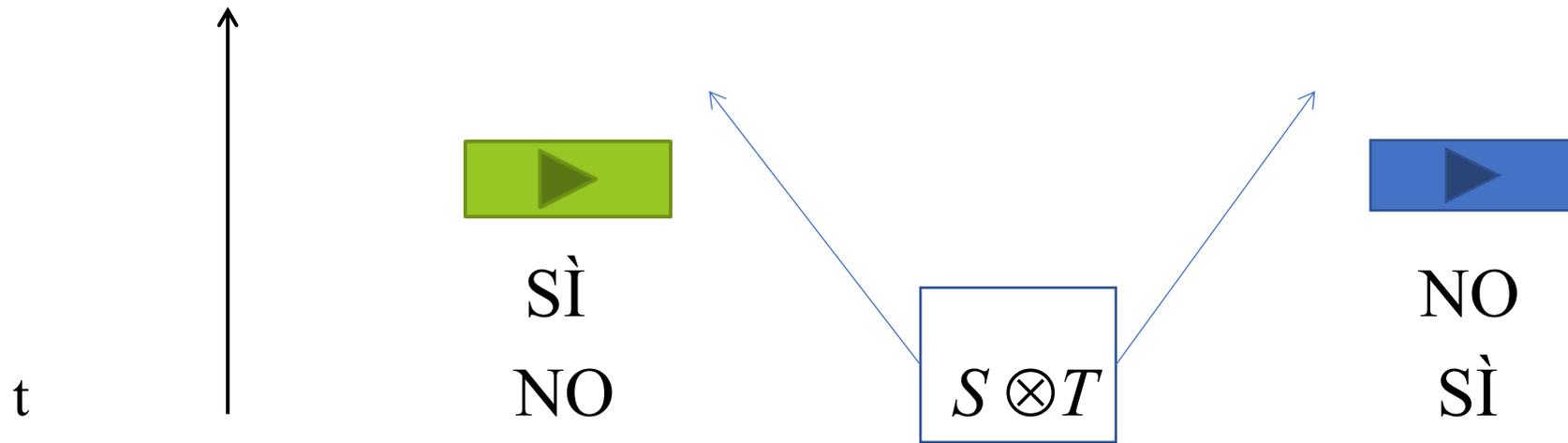
1) se si effettua un esperimento SÌ-NO su ciascuno dei sistemi S e T quando $S \otimes T$ è in uno stato del genere, i due sistemi risultano *anti-correlati* :

se S ha la proprietà-SÌ, allora T ha la proprietà-NO,
se S ha la proprietà-NO, allora T ha la proprietà-SÌ.

2) tuttavia, in uno stato del genere, *prima* dell'esperimento i singoli sottosistemi non hanno *singolarmente* proprietà-SÌ o proprietà-NO, bensì

probabilità che S abbia la proprietà-SÌ o la proprietà-NO = 1/2

probabilità che T abbia la proprietà-SÌ o la proprietà-NO = 1/2



Il problema si fa ancora più serio quando:

- supponiamo di **separare** progressivamente S e T fino a rendere i due sistemi **isolati l'uno rispetto all'altro**,
- eseguiamo *in un tempo successivo* un esperimento SÌ-NO su S e T rispettivamente:

Come spiegare la proprietà di anticorrelazione?
 È il problema di Einstein-Podolski-Rosen (EPR)



DESCRIPTION OF PHYSICAL REALITY 777

MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*
 (Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function is not complete.

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1. **ANY** serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by a *priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity*. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

Ricapitoliamo!

Finora sappiamo che:

Il sistema $S \otimes T$ al tempo t è nello stato

$$1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{SÌ}) \otimes \Psi_T(\text{NO})] + 1/\sqrt{2} [\Psi_S(\text{NO}) \otimes \Psi_T(\text{SÌ})]$$

In questo stato le probabilità per la proprietà-SÌ e la proprietà-NO sono 1/2,

ma

in un esperimento di misura le proprietà sono anti-correlate.

A questo punto le opzioni sono soltanto due:

1. NON-LOCALITÀ

Le procedure di misura su uno dei due sottosistemi hanno ‘creato’ la proprietà anti-correlata sull’altro sottosistema.

2. LOCALITÀ

Le procedure di misura su uno dei due sottosistemi NON hanno ‘creato’ la proprietà anti-correlata sull’altro sottosistema: le proprietà erano possedute da S e T alla sorgente, *prima* della misura.

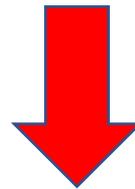
EPR scelgono chiaramente l’opzione 2!

Ma se vale la **LOCALITÀ**, allora si crea una tensione nella descrizione quantistica della situazione EPR:

infatti la meccanica quantistica proibisce di fatto che le proprietà anti-correlate siano già definite alla sorgente, dal momento che lo stato entangled

$$1/\sqrt{2} [\Psi_S (S\dot{I}) \otimes \Psi_T(\text{NO})] + 1/\sqrt{2} [\Psi_S (\text{NO}) \otimes \Psi_T(S\dot{I})]$$

è assunto come completo e assegna a quelle proprietà soltanto probabilità 1/2.



Conclusione:

se manteniamo la condizione di **LOCALITÀ**, *la MQ è incompleta!*

In sintesi: EPR stabiliscono l'alternativa

La meccanica quantistica è non locale oppure è incompleta

e rifiutano l'alternativa

La meccanica quantistica è non locale



La conclusione del loro argomento è dunque

La meccanica quantistica è incompleta

«Mentre abbiamo in tal modo dimostrato che la funzione d'onda non fornisce una descrizione completa della realtà fisica, abbiamo lasciato aperto il problema se una descrizione siffatta esista oppure no. Noi comunque crediamo che una teoria di questo tipo sia possibile.» (EPR 1935)

Se dunque, sotto l'ipotesi di località, EPR derivano che la MQ è incompleta, si potrebbe ipotizzare un suo 'completamento': vale a dire, ipotizzare l'esistenza di una teoria più generale (di cui la MQ è un frammento) capace di soddisfare *sia* la completezza *sia* la località.

Nel 1964 il fisico irlandese John S. Bell dimostra che questa ipotesi non può funzionare: qualsiasi 'completamento' della MQ sarà *comunque* non locale.

Ripartendo esattamente da dove EPR si erano fermati, Bell conclude dunque proprio nel modo che «Einstein would have liked least», cioè con la dimostrazione che il mondo quantistico è un mondo non-locale.

Osservazioni conclusive (ancora intorno alle 'leggende'):

1) L'argomento di EPR **non assume** la realtà delle proprietà ma la **deriva** a partire dalla località (e fa una bella differenza!): infatti,

se la teoria è locale

allora le proprietà di tipo SÌ-NO sono già definite alla sorgente (cioè la loro definitezza NON è un postulato).

2) Contrariamente a quanto si è a lungo sostenuto, Einstein dimostra di avere ben chiare le implicazioni della novità rappresentata dall'*entanglement*.

Infatti Einstein

- non solo egli manifesta le sue preoccupazioni a riguardo da molti anni prima di EPR (D. Howard, « ‘Nicht sein kann was nicht sein darf’: sulla preistoria di EPR, 1909-1935. Le prime preoccupazioni di Einstein sulla meccanica quantistica dei sistemi composti», in D. Howard, *Anche Einstein gioca a dadi. La lunga lotta con la meccanica quantistica*, Carocci 2015),
- ma addirittura dimostra in un lavoro [**che poi ritirò**] una sorta di teorema di Bell *ante litteram!* (D.W. Belousek, «Einstein’s 1927 Unpublished Hidden-Variable Theory: Its Background, Context and Significance», *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **27** (1996), pp. 437-461).

3) John S. Bell **non dimostra** che le variabili nascoste non esistono né che *non possono esistere* ma **dimostra** invece che qualsiasi ‘completamento’ della meccanica quantistica (con variabili nascoste o no) deve essere non locale.

La tesi contraria è fondata su un fraintendimento *sia* dell’argomento di EPR *sia* del teorema di Bell.

(Cfr. F.L. “Non-Local Realistic Theories and the Scope of the Bell Theorem”, *Foundations of Physics*, 38, 2008, pp. 1110-1132.

F.L. “The uninvited guest: ‘local realism’ and the Bell theorem” in H. De Regt, S. Hartmann, S. Okasha (eds.), *EPSA Philosophy of Science: Amsterdam 2009*, Springer 2012, pp. 137-149.

F.L. “Against the ‘no-go’ philosophy of quantum mechanics”, *European Journal for Philosophy of Science* 4 (2014), pp. 1-17)



Grazie per l'attenzione!