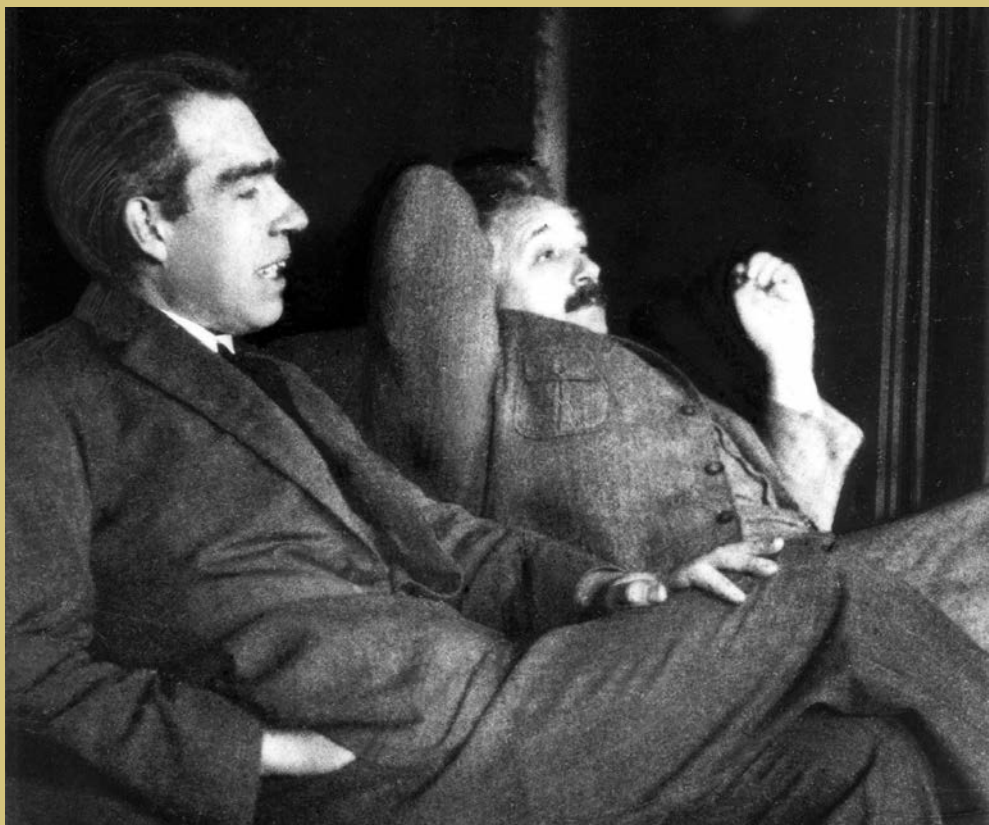


# Grovigli quantistici

## La meccanica quantistica alla prova

di Fabio Sciarrino

La meccanica quantistica è forse la più grande rivoluzione scientifica del secolo scorso, la cui nascita ha dato luogo a un intenso dibattito nella comunità scientifica dell'epoca e degli anni seguenti. I suoi fondamenti risalgono agli anni venti del secolo scorso, quando la teoria dei quanti si affermò come la teoria maggiormente accreditata per lo studio degli atomi. Elemento fondamentale di questa teoria è la funzione d'onda: essa contiene al suo interno tutte le informazioni dinamiche di un sistema fisico. Sulla natura della funzione d'onda si è a lungo dibattuto. In particolare nella metà degli anni venti ci si chiedeva se la meccanica quantistica fosse una teoria ontologica, ovvero se la funzione d'onda rappresentasse la realtà del mondo, o se rendesse possibile solo una lettura epistemologica, in grado di descrivere bene i risultati sperimentali e il funzionamento della natura. Infatti, il fisico danese Niels Bohr, probabilmente il massimo rappresentante di quest'ultima interpretazione, detta per questo *di Copenaghen*, affermava che "lo scopo della descrizione della natura non è cercare l'essenza reale dei fenomeni ma soltanto l'indagare, con la massima profondità possibile, le relazioni fra i molteplici aspetti della nostra esperienza". Tale approccio, di natura estremamente pragmatica, fu identificato con l'acronimo Fapp ovvero *For all practical purposes* (per tutti i fini pratici). L'approccio Fapp fu inizialmente molto dibattuto e iniziò a consolidarsi all'interno della comunità scientifica al quinto convegno di Solvay svoltosi nel 1927 a Bruxelles. L'accesa discussione sollevata dall'affermarsi dell'interpretazione di Copenaghen sulla natura della meccanica quantistica aveva tra i suoi protagonisti Albert Einstein, il quale riteneva che la meccanica quantistica, sebbene corretta, non fosse una teoria completa, dal momento che, seguendo i suoi precetti, si andava incontro a diversi paradossi. Einstein



a.  
Niels Bohr e Albert Einstein,  
fotografati a Leiden nella casa di  
Paul Ehrenfest nel dicembre 1925.

non accettava il carattere intrinsecamente probabilistico della meccanica quantistica, come ben evidenziato dalla sua celebre frase "Dio non gioca a dadi". Nel 1935, Einstein, assieme a Boris Podolsky e Nathan Rosen, nel lavoro *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* (*Può la descrizione quanto-meccanica della realtà essere considerata completa?*) cercò di confutare la teoria della meccanica quantistica. Basandosi sui principi di *realtà* (ovvero se, senza disturbare il sistema in esame, possiamo predire con certezza il valore di una certa quantità fisica, allora esiste un elemento

b.  
L'articolo a firma di Einstein, Podolsky e Rosen, apparso sul numero 47 del Physical Review Letters il 15 maggio del 1935.

**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 in

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

di realtà fisica corrispondente ad essa), *completezza della teoria* (ogni elemento di realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica) e *località* (ogni azione su un sistema non può cambiare la realtà fisica su un altro sistema separato spaziotemporalmente dal primo), Einstein, Podolsky e Rosen (denominati poi brevemente Epr) misero in luce un paradosso, arrivando così alla conclusione che la meccanica quantistica fosse una teoria incompleta. L'elemento chiave adottato dai tre fisici per sostenere l'incompletezza della teoria quantistica era un concetto assente in fisica classica, ma in grado di descrivere perfettamente alcune correlazioni quantistiche: l'*entanglement*. Il termine entanglement fu

introdotto per la prima volta da Erwin Schrödinger proprio nel 1935 in un articolo in cui apparve anche il famoso paradosso del gatto (vd. Asimmetrie n. 12 p. 14, ndr). L'entanglement (in italiano, aggrovigliamento) consiste in una correlazione non locale tra sottoinsiemi dello stesso sistema fisico, che non ha alcun analogo classico, e che contraddice i principi di realtà e località assunti da Einstein, Podolsky e Rosen e caratterizzanti la teoria classica. Al fine di completare la meccanica quantistica e quindi di ripristinare il principio di realtà, che sembrava venir meno, fu ipotizzato che il risultato delle misure effettuate su tali sistemi quantistici (in seguito detti *entangled*) fosse

determinato *a priori* da variabili nascoste locali: le cosiddette *local hidden variables*. Secondo tale modello, la massima conoscenza dello stato del sistema si avrebbe attraverso il valore di una serie di variabili in grado di determinare con certezza l'esito di una misura. Le nostre possibilità sperimentali non consentono però di conoscere il valore assunto da queste variabili, che pertanto vengono definite "nascoste", ma di determinarne solo una distribuzione di probabilità. Il dibattito fra i sostenitori della meccanica quantistica e i "seguaci" di Epr si sviluppò nei decenni seguenti, mantenendo la sua natura puramente astratta e l'introduzione della teoria a variabili nascoste venne considerata una speculazione filosofica piuttosto che una teoria fisica alternativa. È solamente nell'*annus mirabilis* 1964 che John Bell, ricercatore teorico in fisica delle particelle presso il Cern, sviluppò un metodo formale per verificare se ci fosse compatibilità

o meno fra le previsioni della meccanica quantistica e le teorie a variabili nascoste. Al fine di confutare il paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen, Bell dimostrò che una teoria a variabili nascoste non era in grado di riprodurre alcune previsioni della meccanica quantistica associate agli stati entangled. In particolare, Bell introdusse una disuguaglianza soddisfatta dalle correlazioni di due sottosistemi per qualunque teoria fisica a variabili nascoste locali e propose un metodo sperimentale, per verificare se il mondo è effettivamente realistico e locale nel senso di Epr oppure, se sfruttando l'entanglement, è possibile confutare l'esistenza delle teorie a variabili nascoste. L'esperimento proposto si basa sulla generazione di coppie di particelle entangled, che vengono inviate a due diversi siti, chiamati per convenzione Alice e Bob (vd. approfondimento). I risultati delle misure che Alice e Bob effettuano ciascuno sulla propria particella vengono poi messi in relazione e, al

[as] approfondimento

## Disuguaglianza alla prova



Coppie di fotoni entangled possono essere generate eccitando un cristallo particolare, detto *non lineare*, con un fascio di fotoni, tipicamente ultravioletti, molto intenso. All'interno del cristallo, alcuni fotoni del fascio possono dividersi in coppie di fotoni, che si trovano in stati di polarizzazione correlati tra loro e risultano quindi entangled. I due fotoni vengono quindi inviati rispettivamente ad Alice e Bob. Alice osserva la polarizzazione del fotone ricevuto in due possibili misurazioni, denominate  $A_1$  o  $A_2$ . La scelta di

quale misurazione effettuare è casuale e dunque non può essere influenzata da Bob, essendo i due sperimentatori lontani spazio-temporalmente. La misurazione effettuata da Alice è *dicotomica*, ovvero con due possibili risultati (raffigurati con verde o rosso). La misurazione  $A_1$  ha come possibili esiti una polarizzazione orizzontale (ad esempio, verde) o una polarizzazione verticale (rosso). La misurazione  $A_2$  ha invece come possibili esiti una polarizzazione a  $+45^\circ$  (verde) oppure a  $-45^\circ$  (rosso). Allo stesso modo Bob

osserva la polarizzazione del suo fotone con due possibili misurazioni  $B_1$  e  $B_2$ , con direzioni intermedie rispetto a quelle delle misurazioni adoperate da Alice. Successivamente, Alice e Bob confrontano i risultati ottenuti, in modo da verificare se sono correlati o scorrelati. Dai dati sperimentali si misura il grado di correlazione, che per una teoria a variabili nascoste dovrebbe essere minore di una quantità fissata dalla disuguaglianza di Bell, mentre risulta maggiore di questa quantità per gli stati entangled.



c. Alain Aspect che, assieme a Grangier e Rogers, diede la verifica sperimentale definitiva della disuguaglianza di Bell nel 1982 nei laboratori di Orsay.

fine di confermare la validità della teoria realistica e locale classica, devono rispettare la disuguaglianza matematica introdotta da Bell.

La formulazione di tale disuguaglianza matematica ha rappresentato la chiave di volta rispetto alle discussioni sulla completezza della teoria quantistica, e la dimostrazione sperimentale della violazione della disuguaglianza di Bell ha confermato ulteriormente la validità della meccanica quantistica. I primi esperimenti su particelle entangled risalgono ai primi anni '80 e sono stati effettuati nei laboratori di Orsay (nei

pressi di Parigi) dai fisici Alain Aspect, Philippe Grangier e Gérard Rogers. In questi esperimenti gli stati quantistici entangled venivano generati attraverso i metodi dell'ottica non lineare e della fisica atomica, come fasci laser e nubi di atomi intrappolati. La violazione delle disuguaglianze di Bell venne dunque verificata, con l'assunzione di alcune ipotesi di natura pragmatica, derivanti dalle inevitabili imperfezioni sperimentali, dimostrando così che i modelli a variabili nascoste locali non sono compatibili con le osservazioni sperimentali. Sotto tali ipotesi le predizioni della meccanica

quantistica si sono rivelate corrette e hanno dato luogo allo sviluppo di una nuova branca della ricerca fisica chiamata *informazione quantistica* (vd. *Asimmetrie* n. 12 p. 10, ndr). Bisogna notare, comunque, che a causa delle limitazioni presenti in tutti gli esperimenti condotti sino ad oggi sono necessarie una o più assunzioni, estremamente plausibili ma supplementari, nella violazione delle disuguaglianze di Bell. Oggi, in diversi laboratori di tutto il mondo si cerca dunque di ottenere un esperimento del tutto conclusivo (il cosiddetto *loophole free Bell test*).

#### Biografia

**Fabio Sciarrino** è ricercatore universitario presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza, Università di Roma. La sua attività di ricerca si incentra sull'informazione quantistica e i fondamenti della meccanica quantistica. Dal 2012 è *principal investigator* di un progetto europeo Erc su 3D-Quantum Integrated Optical Simulation ([www.3dquest.tu](http://www.3dquest.tu)). Ha ricevuto diversi riconoscimenti, fra cui la "Medaglia della Presidenza della Repubblica" associata al premio "Le Scienze per la Fisica".

#### Link sul web

<http://www.youtube.com/user/thequbitlab>

[http://prola.aps.org/abstract/PR/v47/i10/p777\\_1](http://prola.aps.org/abstract/PR/v47/i10/p777_1)