

**F. de STEFANO**  
*I.T.I.S. A. Malignani*  
*Udine*

**CULTURA**

## Sui quanti e la realtà

*(Pervenuta versione finale il 25.1.'90)*

### ABSTRACT

This "galilean dialogue" briefly considered the debate regarding the conceptual foundations of quantum mechanics, especially referred to the Einstein/Bohr discussions about the interpretation of quantum formalism. In this presentation, Simplicio represents Einstein's position, while Salviati defends Bohr. In the article, the problems arising from the so called "quantum non separability" are discussed and a recent model proposed to solve the problems of the quantum theory of measurement is mentioned.

Dialogo galileiano tra Filippo Salviati, Giovan Francesco Sagredo e Simplicio.

Tempo e luogo: settembre del 1989, in una villa veneta.

### Giornata Prima.

#### *Sagredo*

Ci ritroviamo qui per discutere ancora di quanto disputammo nel 1970 sul Lago Lemano (1). Mi pare che dopo tanti anni sia forse il caso di fare il punto sulla situazione.

#### *Simplicio*

Sono proprio curioso di vedere se le nostre convinzioni epistemologiche siano mutate! In fondo alcuni passi in avanti a chiarimento del dibattito sui fondamenti concettuali della meccanica quantistica (MQ) sono pur stati fatti.

#### *Salviati*

Penso che il sig. Simplicio si riferisca agli esperimenti di Aspect, di cui parleremo tra un po'.

#### *Sagredo*

Ehi, ehi, un momento! Fate capire anche a me! In fondo sono quasi vent'anni che non mi occupo più di queste cose e temo di non ricordare neppure... l'equazione di Schrödinger!

#### *Salviati*

Il sig. Sagredo ha ragione. Del resto non possiamo pretendere che chi leggerà questo dialogo sia un esperto di epistemologia della MQ. Bisognerà per lo meno riassumere, in questa prima giornata, quello che ci era sembrato il cuore del problema.

#### *Simplicio*

Forse il sig. Salviati si riferisce alla non-separabilità quantistica?

#### *Salviati*

Proprio così! Il fenomeno che sta alla base dell'analisi di Einstein, Podolsky e Rosen (2) e del paradosso del gatto di Schrödinger (3). Ed in fondo la cosa è, seppur drammaticamente (per il gatto, almeno!), banale.

Le ricordo, sig. Sagredo, che in MQ lo stato fisico

di ogni sistema è descritto da una funzione complessa  $\psi$ , detta funzione d'onda, che evolve nel tempo secondo la fondamentale equazione di Schrödinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \psi = i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

(dove  $\nabla^2$  è il laplaciano,  $V$  è il potenziale del campo in cui si muove la particella di massa  $m$  ed  $\hbar$  è la costante di Planck ridotta).

Si tratta di un'equazione rigorosamente deterministica, nel senso che se la  $\psi$  è nota in un certo istante, risolvendo l'equazione se ne otterrà il valore in tutti i tempi successivi.

#### *Sagredo*

Ma questo non è anche il comportamento delle equazioni newtoniane del moto?

#### *Salviati*

Certo, ma a differenza di quelle, in cui le incognite sono grandezze fisiche ben precise (velocità, accelerazioni, etc.), la funzione  $\psi$  non corrisponde ad alcunché di fisico finché non ne calcolo il modulo al quadrato. Solo allora ottengo una funzione reale (quando mai si è vista una grandezza fisica complessa?) che rappresenta, come disse Max Born, la densità di probabilità di trovare la particella nello spazio. Quindi la MQ è una teoria deterministica delle distribuzioni di probabilità!

#### *Sagredo*

Sembra un controsenso, mescolare così determinismo e probabilità: potrebbe spiegarsi meglio, signor Salviati?

#### *Salviati*

Certamente! L'idea chiave è costituita da quello che è chiamato il principio di indeterminazione di Heisenberg che impedisce di misurare simultaneamente tutte le grandezze relative ad un sistema (cosa questa in linea di principio legittima in fisica classica) e quindi è ovvio che, conoscendo esattamente alcune di esse, si ignori il valore di quelle ad esse in qualche modo "apparentate" (si dicono in-

fatti variabili coniugate). Di queste ultime perciò potrò al massimo conoscere una distribuzione di probabilità.

*Sagredo*

Quindi a questo livello non ci sono grossi problemi, mi pare. In fondo la probabilità quantistica deriva solo da una restrizione alla pretesa classica di misurare "tutto e subito".

*Simplicio*

Sì. I guai cominciano invece quando si scopre che l'equazione di Schrödinger è un'equazione differenziale lineare.

*Sagredo*

Perché? Mi pare che la linearità delle equazioni sia sempre stata un pregio delle leggi fisiche!

*Salviati*

Non in questo caso, eminentissimi signori! La linearità implica infatti che se  $\psi_1$  e  $\psi_2$  sono due soluzioni dell'equazione anche  $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$  lo sarà. Ma allora, seguendo Schrödinger nel suo celebre paradosso del gatto, se io ho un contenitore con dentro una fiala di gas venefico collegata ad un martello azionato dal decadimento di un atomo radioattivo e metto un gatto dentro la scatola, isolando il sistema, cosa accadrà nel tempo? Se l'atomo decade, il martello rompe la fiala il cui veleno ucciderà il gatto, altrimenti esso resterà in vita. Ma come viene descritto il sistema dalla MQ? Lo stato dell'atomo verrà rappresentato da una funzione d'onda proprio del tipo visto prima, dove  $\psi_1$  e  $\psi_2$  corrispondono rispettivamente alla situazione in cui l'atomo è decaduto oppure no e  $|c_1|^2$  e  $|c_2|^2$  sono le rispettive probabilità. Se indico con  $\psi_V$  e  $\psi_M$  le funzioni d'onda che descrivono il gatto vivo o quello morto, a causa della linearità dell'equazione di Schrödinger la sovrapposizione degli stati si manterrà nel tempo e quindi, in un generico istante, la funzione d'onda del sistema sarà  $\psi = c_1\psi_1\psi_V + c_2\psi_2\psi_M$  in cui il gatto è in una sovrapposizione di stati di "gatto vivo" e "gatto morto". Solo quando apro la scatola, con l'atto quindi della misura, io dirimo la questione. Questa è la non-separabilità quantistica.

*Simplicio*

Ma sig. Salviati non meni il can per l'aia! È chiaro che anche prima di aprire la scatola il gatto era vivo o morto e c'era una certa probabilità  $|c_1|^2$  di trovarlo vivo e  $|c_2|^2$  di trovarlo morto. La misura non ha fatto altro che scoprire le carte... al poker della vita (del gatto)!

*Salviati*

Mi dispiace contraddirla sig. Simplicio ma ciò non è in accordo coi teoremi fondamentali della MQ. Dire infatti che il sistema è una sovrapposizione di funzioni d'onda che tale resta fino alla misura non equivale affatto ad asserire che esso è descritto o da  $\psi_1\psi_V$  o da  $\psi_2\psi_M$  anche prima della misura, la

quale permette di svelare il mistero! È proprio questo il cuore del paradosso EPR che a 50 anni dalla sua formulazione fa ancora discutere e ci ha fatti riunire nuovamente qui. Le due situazioni infatti conducono a previsioni fisiche diverse che sono state anche sottoposte a tests empirici (4).

*Sagredo*

E cosa ne è venuto fuori? Sono molto curioso di saperlo.

*Simplicio*

Purtroppo confermano la prima situazione, quella della "schizofrenica" sovrapposizione di stati in cui il gatto non è vivo né morto finché non si guarda nella scatola (cioè non si misura). Ciò conferma la linearità dell'equazione di Schrödinger e l'interpretazione di Copenaghen della MQ.

*Salviati*

Mi compiaccio che lei prenda atto che gli esperimenti mi danno ragione, ma allora mi stupisco delle sue parole di poco fa. Mi pare che ormai non vi siano più seri dubbi sulla conferma sperimentale della non-separabilità quantistica (4).

*Simplicio*

Certamente i dati empirici finora mi danno torto, anche se nella storia della scienza non sarebbe la prima volta che un esperimento, sottoposto ad analisi più severe, si dimostri meno conclusivo di quanto sembrasse. Naturalmente i risultati degli esperimenti di Aspect, miranti a discriminare tra le previsioni quantistiche standard e quelle ricavabili dalla disuguaglianza di Bell (5), mi preoccupano un po', ma vi è qualche ricercatore che ritiene di aver individuato delle condizioni teoriche che ci costringerebbero alla cautela nell'interpretazione di tali dati empirici. In ogni caso la MQ standard non riesce a spiegare come si passi dalla sovrapposizione  $\psi = c_1\psi_1\psi_V + c_2\psi_2\psi_M$  allo stato  $\psi_1\psi_V$  o  $\psi_2\psi_M$  se non introducendo "ad hoc" il postulato di riduzione del pacchetto d'onda.

*Sagredo*

Calma, calma! Mi ricordi il contenuto di questo postulato!

*Simplicio*

Il postulato semplicemente afferma che, se si effettua una misura di una grandezza fisica relativa ad un sistema quantistico, subito dopo la misura (potremmo dire "per effetto della misura") lo stato fisico del sistema è descritto da una funzione d'onda che non sarà mai una sovrapposizione di stati del tipo visto prima. Ma allora questo "collasso istantaneo" va spiegato, perché è un problema teorico non banale di consistenza interna del formalismo. Insomma, è ancora aperto uno iato tra la dinamica evolutiva quantistica descritta dall'equazione di Schrödinger e la teoria della misura (6). Inoltre io sono un inguaribile realista in campo filosofico, sostenitore del realismo locale "alla Ein-

stein" e credo quindi che fondamentalmente l'equazione di Schrödinger sia insufficiente e richieda di essere in qualche modo "completata" in modo non-lineare.

#### Salviati

Mi sembra che a questo proposito si apra per lei uno spiraglio. Recentemente infatti è stato elaborato un modello che modifica l'equazione evolutiva di un microsistema quando è in interazione con un macro-oggetto (come certamente sono il gatto ed il resto dell'apparato sperimentale) e che conduce ad una eliminazione delle sovrapposizioni di funzioni d'onda interessanti i macro-oggetti (7). È vero che tale modello fornisce previsioni che sono in disaccordo con quelle quantistiche standard, ma la discrepanza tra le previsioni ottenibili dall'evoluzione "alla Ghirardi, Rimini, Weber" e quelle deducibili da quella "alla Schrödinger" si evidenzerebbe dopo tempi dell'ordine dell'età dell'universo!

#### Sagredo

Se questo è vero, allora finalmente il problema è risolto!

#### Simplicio

Mah, lo spero. Certo è che il grande John Bell, uno dei massimi esperti mondiali della questione, è un entusiasta sostenitore del modello. In ogni caso è certo che qualsiasi futuro riesame serio di tali problemi, sia sul piano formale che epistemologico, non potrà fare a meno di confrontarsi anche con questi risultati.

#### Sagredo

Beh, per oggi si è fatto tardi. Che ne direste, illustri colleghi, di ritirarci? Avremo tempo sufficiente domani per ritornare su quanto detto oggi.

#### Referenze e note

- (1) J.M. Jauch, *Sulla realtà dei quanti*, Adelphi (1980).
- (2) Una presentazione del cosiddetto "paradosso EPR" si può reperire in P. Davies, *Superforza*, Mondadori. Il lavoro originale di Einstein, Podolsky e Rosen è stato recentemente tradotto in A. Einstein, *Opere scelte*, Boringhieri, a cura di E. Bellone.
- (3) Una presentazione del paradosso del gatto di Schrödinger si ritrova in P. Davies, *Universi possibili*, Mondadori. Il lavoro originale di Schrödinger è ancora inedito in italiano E. Schrödinger, *Naturwissenschaften*, 807 (1935).
- (4) Per una esauriente descrizione degli esperimenti si veda A. Shimony, *La realtà del mondo dei quanti*, in *Le Scienze*, marzo 1988.
- (5) Nel 1964, il fisico teorico John Bell ha mostrato che, se si vuole formulare una teoria perfettamente deterministica che non incorpori la non-separabilità quantistica, esistono alcune previsioni sperimentali che differiscono da quelle quantistiche "standard". L'entità della discrepanza è fissata dalla cosiddetta disuguaglianza di Bell. Per una descrizione del significato degli esperimenti di Aspect, si veda A. Shimony, op. cit. in ref. 4. Per una dimostrazione della disuguaglianza di Bell, si veda B. d'Espagnat, *La teoria dei quanti e la realtà*, in *Le Scienze*, gennaio 1980. Gli esperimenti originali di Aspect sono in A. Aspect, P. Grangier and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, 47 460 (1981), idem 49, 91 (1982); A. Aspect, J. Dalibard and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, 49, 1804 (1982).
- (6) B. d'Espagnat, *I fondamentali concettuali della meccanica quantistica*, Bibliopolis (1980). È certamente tra le opere più serie ed approfondite scritte sui problemi epistemologici della MQ. Per il formalismo utilizzato è un lavoro leggibile solo da chi possiede una conoscenza approfondita della MQ.
- (7) Il lavoro originale è reperibile in G.C. Ghirardi, A. Rimini and T. Weber, *Phys. Rev. D*, 34, 470 (1986). In tale articolo viene introdotta una modificazione della dinamica di evoluzione dei sistemi quantistici (cioè dell'equazione di Schrödinger) la quale non conduce a scostamenti apprezzabili dalle previsioni quantistiche standard se il microsistema evolve liberamente, mentre è in grado di eliminare le sovrapposizioni di stato (e quindi di giustificare la riduzione del pacchetto d'onda) quando il microsistema si trovi in interazione con un macro-oggetto, quale ad es. un apparecchio di misura. Il modello proposto pertanto si presenta come una possibile soluzione del problema della teoria quantistica della misura, come recentemente ribadito alla Scuola Internazionale di Storia della Fisica di Erice (agosto 1989).

## CORSI DI PERFEZIONAMENTO A DISTANZA

Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Scienze dell'Educazione - Via del Castro Pretorio, 20 - 00185 Roma - Tel. 06/4957805

*Corsi fondamentali attivati per l'A.A. 1990/91*

- 1 - Metodi della valutazione scolastica
- 2 - Didattica
- 3 - Fondamenti di didattica

*Tra i Corsi complementari attivati per l'A.A. 1990/91*

- 1 - Complementi di didattica della matematica
- 6 - Complementi di didattica sperimentale
- 7 - Complementi di didattica dei mezzi della comunicazione

Le iscrizioni sono aperte fino al 18.1.'91.