Zeitschrift: Bollettino della Società ticinese di scienze naturali
Herausgeber: Società ticinese di scienze naturali
Band: 64 (1974)

Artikel: Fisica dei paradossi
Autor: Janner, Aloysio
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1003506

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ALOYSIO JANNER
(Istituto di fisica teorica, Università cattolica, Nimega [NL])

Fisica dei paradossi

1. INTRODUZIONE

Paradosso deriva dal greco : *para* significa contrario e *doxa* opinione : è quindi un'affermazione contraria all'opinione comune. O meglio, è una affermazione che sulla base di quest'opinione comune giunge a conclusioni contrarie alla stessa. Perciò paradossale vien considerato un ragionamento che sembra o che porta all'assurdo.

Così per esempio, ognuno s'attende che ruotando una moneta attorno a un'altra d'una mezza circonferenza la si capovolga. Il che è contrario all'esperienza.

Contrari ai risultati dell'esperienza sono pure i primi paradossi che mi vennero raccontati. Quelli famosi di Zenone di Elea sull'inesistenza del moto. Ancora risuona in me la voce incisiva del compianto professor Boffa, quando in Magistrale ci spiegava il paradosso di Achille e la tartaruga : Achille in gara di corsa con la tartaruga, cosciente della sua superiorità, le accorda un vantaggio di 10 m e benchè Achille corra dieci volte più veloce che non la tartaruga mai riesce a raggiungerla, perchè mentre lui percorre questi 10 m, la tartaruga ne percorre uno ; mentre Achille percorre questo metro, la tartaruga avanza di 1 dm e così via dicendo. Sempre la tartaruga precederà Achille.

Oppure il paradosso della freccia scoccata, ma che non si muove perchè solo esiste l'istante presente e in quest'istante la freccia non può occupare che un posto fisso.

Molti progressi della fisica sono legati a paradossi come questi e che vorrei chiamare storici : basti pensare all'« eppur si muove » galileano o al paradosso del calore, una quantità che non è sostanza, ma solo moto.

A proposito di calore: in termodinamica un concetto ausiliario (e non direttamente misurabile) l'*entropia* sta alla base d'un gran numero di paradossi. Citerò quelli di Clausius, di Loschmidt, di Zermelo. Ricorderò il demone di Maxwell, l'essere intelligente di Szilard e il paradosso di Gibbs [1]. Nel 1903 parlando di entropia Heaviside affermava : « Diese subtile Grösse hat entschieden etwas Geisterhaftes an sich und ist zu wandelbar, um als physikalischer Zustand zu gelten ». 70 anni dopo direi che tutti questi paradossi hanno quasi raggiunto lo stadio storico. Si capiscono abbastanza bene, eppure ispirano sempre ancora ricerche fisiche fonda-

mentali quali lo studio dell'irreversibilità nella meccanica statistica, o delle proprietà che caratterizzano un sistema termodinamico.

Non sorprenderà il fatto che la teoria della relatività di Einstein e quella della meccanica quantistica abbiano portato a un'altra fioritura di paradossi.

Tutti i fisici sono d'accordo nel riconoscere che relatività e meccanica quantistica sono teorie verificate con una precisione impressionante, un numero di volte impressionante, su una scala di fenomeni dal microscopico al cosmico impressionante. Eppure un consenso generale sui paradossi relativistici e quantistici non c'è, nemmeno fra i fisici più famosi [2, 3, 4, 5]. C'è chi pensa che la teoria non è consistente, o almeno non è completa, e chi invece è convinto che il paradosso nasce solo da un'applicazione o da un'interpretazione errata della teoria.

Come vedete nella fisica dei paradossi l'accento è posto sulla teoria. L'esperienza è relegata al ruolo d'ancella che non risolve che la parte, diciamo così, sperimentale del paradosso. Inoltre non di rado i paradossi della fisica comportano elementi che vanno al di là di questa : come quelli di realtà, esistenza, di intelligenza, di coscienza o di conoscenza, di vita o di morte e così via dicendo. Aspetti questi che mi limiterò a menzionare senza discuterli. Qui tratterò solo della fisica di quesi paradossi.

2. IL PARADOSSO DEI GEMELLI (o paradosso dell'orologio)

La formulazione del paradosso dei gemelli è semplice. Due gemelli all'età di ventun anno si separano. Uno resta sulla terra, l'altro parte come astronauta. Di ritorno sulla terra l'astronauta è più giovane del fratello gemello. Questo è almeno quanto afferma la teoria della relatività ristretta [6].

Così per esempio, se l'asronauta viaggia alla velocità di 288.000 km/sec durante 14 anni (7 per l'andata e 7 per il ritorno trascurando il tempo necessario per invertire la rotta) ritornerà all'età di 35 anni e troverà il fratello che ha ormai 71 anni.

A livello d'opinione comune il paradosso è chiaro, il passar del tempo essendo considerato qualcosa d'oggettivo, uguale per tutti, esseri animati e inanimati.

A livello di relatività ristretta il paradosso sta nel fatto che i periodi di accelerazione vengono trascurati da un lato, e dall'altro considerati essenziali per distinguere fra il gemello astronauta e il suo fratello. Infatti, prescindendo dai periodi in cui l'astronauta è accelerato, la situazione è simmetrica : l'astronauta come il terrestre possono considerare l'altro gemello in moto e non se stessi [1].

Non mancano libri che spiegano come il paradosso sia solo apparente e l'effetto reale, osservabile ed osservato. Ero convinto che per me il solo problema sarebbe stato quello di introdurvi nel mondo della relatività. Mi trovai invece di fronte a tutto un libro unicamente su questo paradosso [7] ed a una montagna d'articoli. Una bibliografia selezionata ne

comprende più di 300. Per leggere seriamente tutto ciò avrei avuto bisogno d'un paio d'anni di tempo almeno. Forse questo esempio vi farà capire perchè un fisico non completamente incosciente si senta condannato alla superficialità e provi lavorando un senso di disperata impotenza (fig. 1).

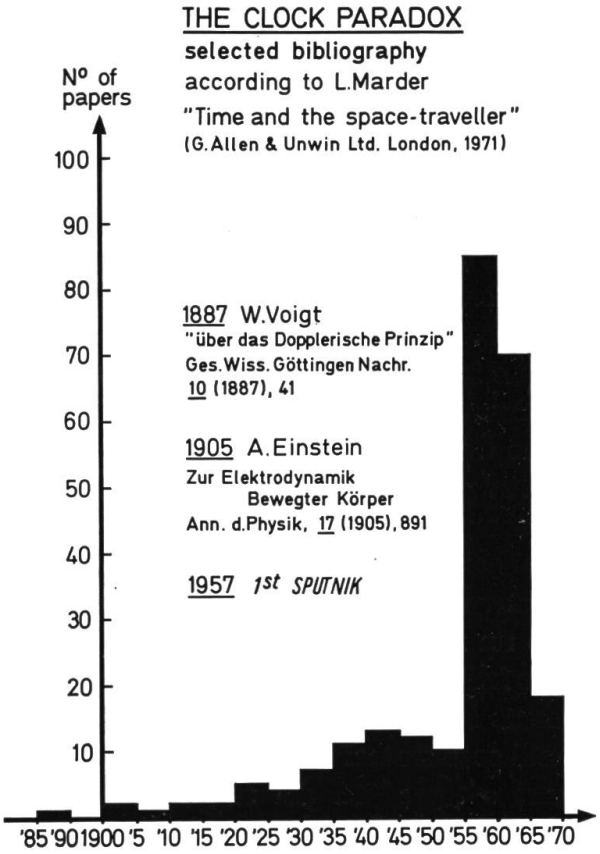

Fig. 1 Rappresentazione grafica del numero di articoli apparsi entro il 1970 sul paradosso dei gemelli (detto anche dell'orologio) secondo una scelta bibliografica pubblicata e commentata da L. Marder nel suo libro « Time and the space-traveller ».

Alla base del paradosso dei gemelli sta il concetto di *tempo proprio*. Secondo Einstein spazio e tempo sono legati fra loro come lo sono le tre dimensioni dello spazio euclideo in cui viviamo. Dobbiamo perciò considerare i fenomeni fisici nello spazio - tempo quadridimensionale detto di Minkowski.

Fondamentale per la relatività è il fatto sperimentale che la velocità della luce non dipende dal moto (supposto uniforme cioè a velocità costante) di chi la misura. La distanza può perciò esseree misurata in unità di tempo (pensate agli anni-luce) e il tempo in unità di lunghezza. Il metro-luce, per esempio, è il tempo che la luce impiega a percorrere 1 m.

Facciamo il confronto fra le proprietà d'uno spazio euclideo a due dimensioni (un piano) e uno spazio di Minkowski pure a due dimensioni (una spaziale in metri e l'altra temporale in metri-luce) [8].

Scegliamo nel piano euclideo un sistema di coordinate con un asse nella direzione *nord* e l'altro in quella *est* (così come di solito nelle carte geografiche). La differenza nelle coordinate nord fra due punti sulla carta è relativa, non assoluta, perchè dipende dalla direzione nord scelta dal cartografo : la stella polare o il polo magnetico. Lo stesso può dirsi delle coordinate est.

Analogamente nello spazio di Minkowski, la differenza nelle coordinate *tempo* che intercorre per esempio fra emissione e assorbimento d'un raggio di luce è relativa, non assoluta perchè dipende dal moto dell'osservatore. Lo stesso può dirsi dell'intervallo spaziale fra i due punti considerati. Per rendercene conto consideriamo l'esperienza seguente :

Su un razzo un raggio di luce è emesso in A, riflesso in R da uno specchio posto a 1 m di distanza e riassorbito in B dove ebbe luogo l'emissione. L'intervallo di tempo fra A e B è di 2 metri-luce ; l'intervallo di spazio fra A e B è zero.

Per un osservatore in laboratorio il punto A non coincide nello spazio con il punto B : l'intervallo spaziale non è per lui zero ed è quindi una grandezza relativa che dipende dall'osservatore. Inoltre la luce per lui percorre un tratto più lungo dei 2 m visti dal razzo. La velocità della luce essendo la stessa, il tempo che intercorre fra emissione e assorbimento è quindi maggiore dei 2 metri-luce misurati dall'astronauta. Anche l'intervallo di tempo è relativo. Nel caso considerato si parla di *dilatazione del tempo*, nel senso che un fenomeno che avviene sul razzo dura più a lungo se misurato dal laboratorio.

Microscopicamente la dilatazione del tempo è fenomeno osservato correntemente nei grandi acceleratori di particelle e nei raggi cosmici. Classico è il caso dei mesoni π^+ prodotti dai raggi cosmici nell'alta atmosfera. Queste particelle sono instabili e a riposo si disintegrano in media dopo $2 \cdot 10^{-8}$ sec cioè dopo 600 metri-luce. Siccome la loro velocità è sempre inferiore a quella della luce (pur avvicinandola) questi mesoni dovrebbero percorrere al massimo circa 600 m prima di disintegrarsi invece della decina di chilometri osservati.

Ora per noi che misuriamo la distanza fra produzione e disintegrazione in decina di chilometri, la durata di vita del mesone in moto è dilatata ai centomillesimi di secondo che gli permettono di percorrerla.

Per il mesone, la sua vita media è sempre quella propria di $2 \cdot 10^{-8}$ sec o 600 metri-luce, ma per esso lo spessore dell'atmosfera attraversata è contratto, perchè in movimento rispetto al mesone, appunto a circa 600 m.

Analogamente all'invecchiamento di 14 anni dell'astronauta corrisponde sulla terra un lasso di tempo di 50 anni. Spiegarvi come mai i conti tornino anche se gli anni del gemello terrestre sono misurati dall'astronauta, mi richiederebbe una discussione del come avvenga una sincronizzazione degli orologi fra terra e razzo e mi porterebbe troppo lontano. Mi basti dire che secondo la teoria, l'astronauta constata che durante i suoi 7 anni d'allontanamento suo fratello è invecchiato di circa 2 anni. Lo stesso dicasi per il tempo di ritorno. I 46 anni che « mancano » affinchè

il conto torni sono legati al cambiamento di sincronizzazione connesso con il cambiamento di rotta (e cioè di velocità). Preferisco fare un passo innanzi nella ricerca di proprietà indipendenti dall'osservatore.

Riprendiamo il caso euclideo. L' intervallo nord (ed est) fra i due punti A e B dipende, come abbiamo visto, dall'orientamento scelto. Ma la *distanza* fra A e B no. Questa è data dalla radice quadrata della somma dei quadrati dei due intervalli ed è sempre la stessa.

Nel caso del razzo e del laboratorio troviamo invece che la radice quadrata della differenza fra il quadrato dell'intervallo di tempo meno il quadrato dell'intervallo spaziale non cambia. Questa radice quadrata è uguale al *tempo proprio,* cioè al tempo osservato dall'astronauta.

Nel caso euclideo la distanza si può misurare anche lungo un percorso curvo, dividendolo in segmenti sempre più brevi e passando al limite.

Così nel caso di Minkowski il tempo proprio si può misurare anche per un moto accelerato, dividendo il percorso in tratti a moto uniforme con velocità uguale a quella media corrispondente, e passando al limite.

La differenza è che nel caso euclideo la distanza è *minima* per un percorso in linea retta. Nel caso di Minkowski il tempo proprio è *massimo* per un moto a velocità costante.

Così come i chilometri di distanza percorsi andando da Lugano a Locarno dipendono dalla strada seguita, altrettanto naturale è il fatto che i secondi propri trascorsi dipendano dalla traiettoria seguita nello spazio-tempo. Supponiamo, come nel caso dei gemelli, che un viaggiatore vada da A a B senza cambiare direzione, un altro cambiandola. Anche se è possibile cambiare direzione (girando sul posto) senza aumentare la distanza, chi la cambia avrà sempre un percorso più lungo. Così anche se cambiare velocità (cioè accelerando) non implica consumare tempo proprio, dei due gemelli quello che la cambia avrà sempre un tempo proprio più corto.

Ma se tutto è così chiaro, perchè tanti articoli ? [9] Le obiezioni essenziali sono due : osserviamo prima di tutto che nessuno mette in dubbio la dilatazione del tempo, ma il caso dei gemelli implica, come detto, accelerazione. Secondariamente microscopico e macroscopico non seguono necessariamente le stesse leggi. Si pensi all'elettrone di Bohr che non irradia. Per questo nell'ottobre del 1971 Hafele e Keating fecero l'esperienza diretta facendo volare su aviogetti di linea attorno al globo orologi atomici al cesio, confrontandoli con quelli rimasti a terra [10]. Siccome quelli a terra non si trovavano al polo (ed avevano perciò una certa velocità rispetto al centro della terra rappresentante il sistema inerziale di referenza) volando verso ovest gli orologi trasportati avevano una velocità relativa inferiore, volando verso est una velocità superiore a quella degli orologi terrestri. Nel primo caso era previsto un anticipo, nel secondo un ritardo degli orologi volanti rispetto a quelli terrestri. Il che è esattamente quanto s'osserva.

Giunto a questo punto ero personalmente convinto d'aver compreso e risolto il paradosso dei gemelli. Per caso lessi di un altro paradosso relativistico: quello di Ehrenfest della ruota che gira, paradosso formulato niente po' po' di meno che nel lontano 1909.

In laboratorio, della ruota si misura il raggio r e la circonferenza $2\pi r$. L'osservatore sulla ruota che gira misura anche lui per il raggio la stessa lunghezza r, perchè il raggio è perpendicolare alla velocità istantanea e perpendicolarmente al moto non c'è contrazione. Ma se egli misura la circonferenza che è tangenziale alla velocità deve osservare una contrazione. Quindi per lui la circonferenza non è più $2\pi r$.

Non ho contato gli articoli che discutono questo paradosso. Sembra non siano meno di quelli dei gemelli. Nei libri di testo si spiega come l'uomo sulla giostra sia in grado di misurare distanze solo localmente e non tutta la circonferenza [12] e che per lui (non trovandosi globalmente in un referenziale inerziale) la geometria euclidea più non descrive correttamente quanto misura [13]. Vi farò grazia dei dettagli.

Meditando su tutto ciò mi sono detto : e l'esperimento dell'aviogetto con gli orologi non comporta forse una situazione analoga a quella dell'uomo sulla giostra ? Non si deve quindi tener debito conto degli effetti dovuti alla deviazione dalla geometria euclidea ? E come si fa a calcolare la velocità dell'aviogetto (necessaria per calcolare il tempo proprio) se non si è in grado di misurare con precisione la distanza percorsa ? Ora nell'articolo in cui si riporta l'esperienza [10] questo aspetto non è considerato. D'accordo con l'esperimento, ma come la mettiamo con il calcolo che l'interpreta ?

Giunto a questo punto decisi di abbandonare i paradossi relativistici: avevo perso ormai la speranza di riuscire a capirli nelle poche settimane che ancora mi separavano dall'incontro di oggi. Il tempo che mi resta voglio dedicarlo al paradosso quantistico della riduzione della funzione d'onda.

3. IL PARADOSSO DELLA RIDUZIONE (o del collasso) DELLA FUNZIONE D'ONDA

Per spiegare questo paradosso mi limiterò a discutere un caso concreto. Supponiamo che voglia misurare la velocità di un elettrone. L'elettrone ha una carica elettrica e vien quindi deviato da un campo magnetico per via della forza di Lorentz. Questa forza è proporzionale alla velocità dell'elettrone e perpendicolare ad essa.

Dal punto di vista della meccanica classica, questo moto è descritto dalla legge di Newton : $F = m \cdot a$. Ne risulta una traiettoria curva il cui raggio di curvatura è proporzionale alla velocità, supposta perpendicolare al campo magnetico. L'osservazione della traiettoria permette attraverso la misura di questo raggio e conoscendo l'intensità del campo magnetico e la massa dell'elettrone di calcolarne la velocità. Ci sono vari mezzi per osservare questa traiettoria : una emulsione fotografica, una camera Wilson, dei contatori Geiger, non importa.

L'essenziale è che dal punto di vista classico l'influenza dell'osservazione può esser talmente ridotta che (almeno idealmente) il risultato diventa indipendente dall'osservazione. Così la traiettoria osservata può esser considerata proprietà intrinseca dell'elettrone in moto, perchè non dipende

da chi l'osserva : l'elettrone si muove su una sola orbita ben precisa, che sia osservato o no.

Dal punto di vista della meccanica quantistica la situazione è fondamentalmente diversa. Elettroni danno luogo a fenomeni di interferenza, così come s'osservano con la luce. Per descriverli si deve ricorrere a onde. Un'onda piana sinusoidale descrive, secondo de Broglie, una particella libera che si muove con una velocità costante data. Questa velocità è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda. Quindi a lunghezze d'onda diverse, corrispondono velocità diverse.

In generale un elettrone è descritto da un cosiddetto *pacchetto d'onde* ottenuto dalla superposizione d'onde piane diverse. L'elettrone non può trovarsi là dove la funzione d'onda è zero. A un pacchetto d'onde corrisponde quindi una imprecisione di posizione $\triangle x$ e di impulso $\triangle p = m \triangle v$ (e quindi di velocità) secondo la relazione di Heisenberg :

$$\triangle x \,.\, \triangle p \cong h.$$

Consideriamo ora nuovamente un elettrone in moto in un campo magnetico. Lo strumento, campo magnetico, è sensibile alla velocità e scompone per così dire il pacchetto d'onde nelle onde parziali corrispondenti alle varie onde piane iniziali: possiamo dire che il campo magnetico seleziona le varie velocità presenti nel pacchetto d'onde.

La funzione d'onda totale e le funzioni d'onda parziali in cui è scomposta, evolvono nel tempo secondo l'equazione di Schrödinger, che sostituisce la legge classica di Newton. L'evoluzione d'una singola onda parziale descrive una traiettoria uguale alla corrispondente orbita classica. Si può fare in modo che le onde parziali descrivano orbite che s'allontanano sempre più una dall'altra. Come è possibile allora che un elettrone segua contemporaneamente orbite così diverse ? Due sono i fatti sperimentali alla base dei vari paradossi che si riconducono a quello annunciato.

1° Le diverse onde parziali, se riportate in contatto con campi elettromagnetici adatti, danno luogo a fenomeni d'interferenza, anche nel caso d'un solo elettrone.

2° L'osservazione rivela sempre una e una sola orbita per un dato elettrone.

Si può dire che l'osservazione *riduce* la superposizione di onde parziali ad una sola, quella osservata. Le altre onde parziali scompaiono all'istante dell'osservazione, anche se arbitrariamente distanti dal punto in cui si osserva l'orbita. Si dice che l'osservazione provoca il *collasso* o la *riduzione* della funzione d'onda a una sua componente (fig. 2).

Devo precisare che questo collasso avviene solo osservando e secondo leggi probabilistiche che non ubbidiscono all'equazione di Schrödinger. Schrödinger stesso diede nel 1935 una forma paradossale a questo collasso [14].

Un gatto è chiuso in un locale con del materiale radioattivo, un contatore Geiger, un martelletto e una fialetta di cianuro. Se una radiazione

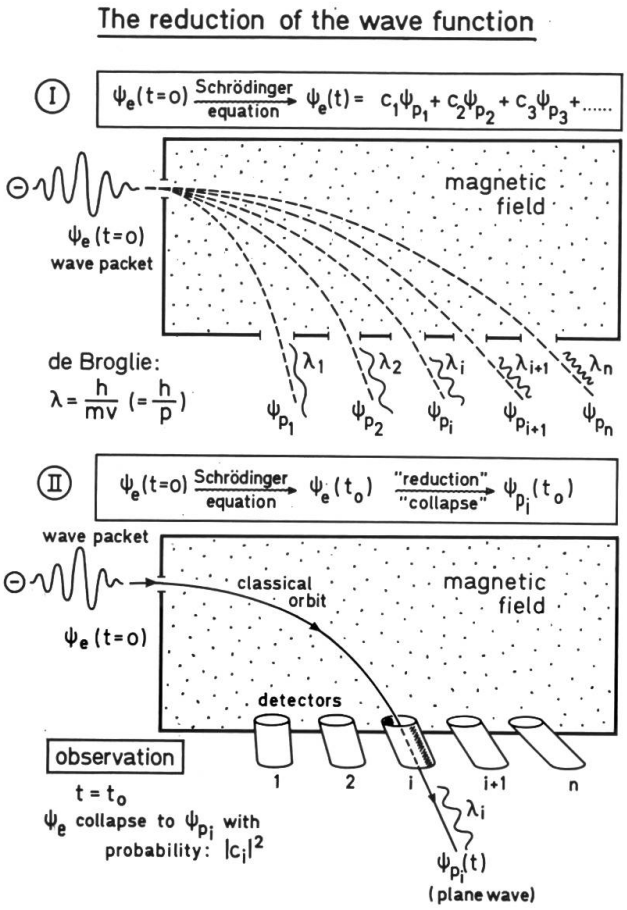

Fig. 2 La riduzione della funzione d'onda

viene emessa, il contatore la registra facendo battere il martello contro la fialetta in modo che il vetro si rompa provocando così la morte del gatto. Il dosaggio del materiale radioattivo è tale che la probabilità che una radiazione venga emessa entro un'ora dall'inizio dell'esperimento è del 50 %. Secondo la meccanica quantistica alla fine dell'ora la funzione d'onda del sistema consiste in una superposizione (in parti uguali) di due funzioni d'onda parziali : una che descrive lo stato del gatto morto, l'altra quello del gatto vivo.

L'osservazione (che può avvenire per esempio gettando uno sguardo all'interno del locale attraverso un foro nella parete) provoca il collasso della funzione d'onda totale in una delle sue componenti. Il che è paradossale giacchè ognuno di noi è convinto che il gatto è vivo o morto indipendentemente dall'osservazione. Quale realtà fisica si può perciò riconoscere alle funzioni d'onda parziali, o in generale alla funzione d'onda ?

L'idea che ci facciamo della realtà mi porta al paradosso seguente : quello di Einstein, Podolsky e Rosen, pure formulato nel 1935 [15]. Einstein è infatti convinto che esiste una realtà fisica indipendente dall'osservatore : compito della teoria è appunto quello di descrivere questa realtà. Se ora la funzione d'onda descrive qualcosa di reale, Einstein non può

ammettere che le proprietà d'un'onda (sia pure parziale) sufficientemente separata da un'altra onda possano dipendere dalla misura di quest'ultima. Perciò il collasso conduce a una situazione paradossale, a meno d'ammettere che solo il tutto è reale, non le parti : la realtà diventa indivisibile. Non è questa l'opinione di Einstein : secondo lui il paradosso prova che la meccanica quantistica non fornisce una descrizione completa della realtà.

Secondo Bohr invece, l'unica realtà accessibile è quella delle osservazioni, per cui non ha senso d'assegnare proprietà fisiche al sistema senza considerare le conseguenze della misura relativa.

Wigner ha ancora un'altra idea : secondo lui la riduzione della funzione d'onda è la conseguenza d'una *presa di coscienza :* questa presa di coscienza sfugge alle leggi della meccanica quantistica. Solo così si può evitare un altro paradosso simile a quello di Achille e la tartaruga. Il paradosso dell'infinità di apparecchi di misura necessari per comprendere tramite l'equazione di Schrödinger quello che succede in un apparecchio durante la misura.

La visione di Wigner rappresenta un limite al tentativo di ridurre lo spirito a un processo puramente fisico legato a reazioni chimiche dei processi biologici del nostro cervello.

Avendo introdotto il *cosciente* nella teoria della misura in meccanica quantistica, Wigner segue la tradizione di Maxwell con il suo demone e quella di Szilard con il motore termico monomolecolare regolato da uno spirito intelligente.

Wigner infatti considera un apparecchio di misura dotato di coscienza: l'amico suo come lo chiama. Un amico sorgente, come si può facilmente immaginare, d'un altro paradosso [16, 17] (fig. 3). Immaginate quest'apparecchio nel caso dell'esperienza descritta sopra per spiegare il collasso. Una volta terminata la misura dell'orbita Wigner chiede al suo amico : « Ma prima che il contatore reagisse, dove si trovava l'elettrone ? ». La risposta (paradossale se si pensa alla funzione d'onda) dell'amico è : « Ma te l'ho già detto, lungo l'orbita che ho misurato [18] ».

Vi parlerò per terminare d'un tentativo recente di risolvere il paradosso del collasso della funzione d'onda. Quello di Everett [19] del 1957 che mi ricorda il pirandelliano « Uno, nessuno e centomila ».

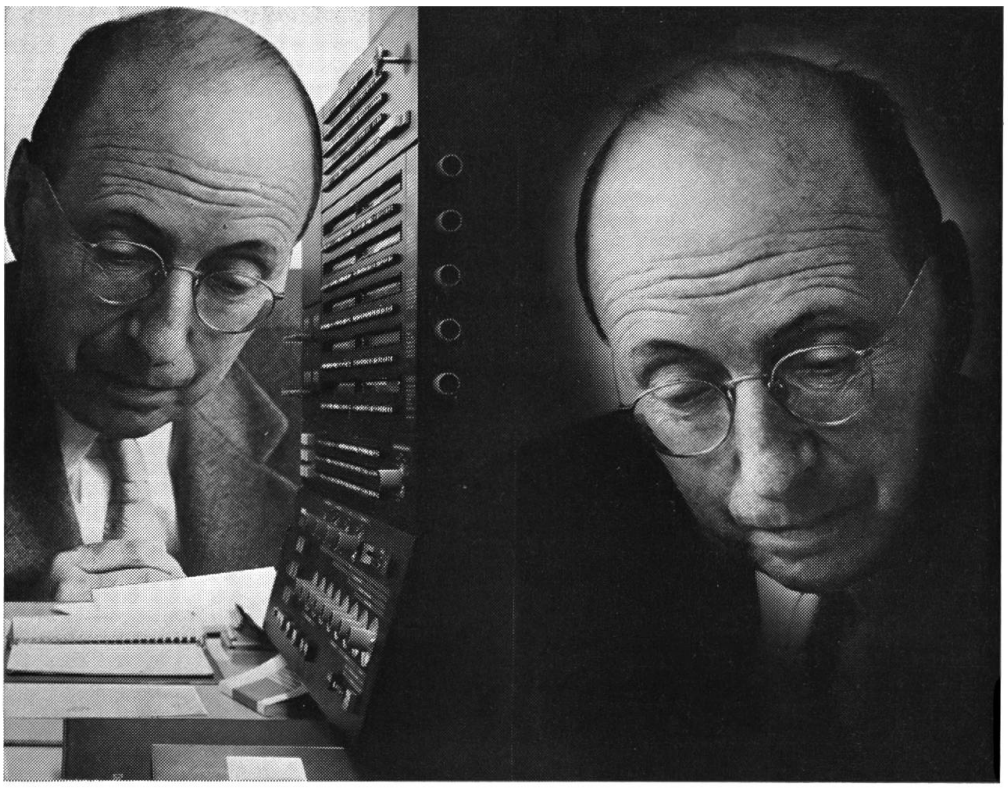

Fig. 3 L'amico di Wigner, un apparecchio di misura dotato di coscienza, è qui simboleggiato da un calcolatore elettronico in cui aleggia lo spirito stesso di Wigner mentre questi interpella l'amico nella speranza (delusa) di riuscire ad afferrare la realtà rappresentata dalla funzione d'onda nell'istante che precede la misura.

Secondo Everett, la funzione d'onda descrive la realtà fisica in modo completo. La decomposizione della funzione d'onda come risultato dell'interazione sistema/apparecchio è reale e non dà luogo a nessun collasso bensì a universi simultanei diversi, uno per ogni possibilità, senza però che alcuna comunicazione sia possibile tra questi universi che s'ignorano reciprocamente. Il risultato della nostra osservazione dipende semplicemente da in che universo noi per caso ci troviamo. Ad ogni istante, come conseguenza delle miriadi di interazioni che avvengono nell'universo degli universi, questo si divide e si ricombina in miriadi di universi diversi [20].

In una recente interprteazione di Bell [21], fisico al Cern, la visione di Everett implica la non esistenza d'una associazione particolare fra presente, passato e futuro. Quello che esiste è unicamente il *presente*, come presente è la memoria del passato, come presente è la previsione del futuro.

Così dopo venticinque secoli di fisica dei paradossi, eccoci di nuovo alla freccia di Zenone.

4. CONCLUSIONE

Alice nel paese delle meraviglie afferma convinta : « Per fortuna non mi piace la conserva, perchè altrimenti la mangerei e veramente non la posso sopportare ». [22]

E' un paradosso questo di Lewis Carroll, vissuto ad Oxford verso la metà del secolo scorso. Qui ne vorrei aggiungere uno simile : il paradosso del professore di fisica, il mio paradosso, se volete.

« Per fortuna non conosco la fisica, perchè altrimenti non avrei il coraggio di spiegarla, e insegnare la fisica mi piace tanto ».

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il collega H. van Dam, nonchè i collaboratori T. Janssen e N. Giovannini per suggerimenti e discussioni che mi furono utilissimi. Sono riconoscente ai colleghi P. Wyder e P. Scheurer per avermi gentilmente messo a disposizione il libro di L. Marder e quello di P. Chambadal.

BIBLIOGRAFIA

1. Chambadal, P.: Les paradoxes en physique. Ed. Science de poche n° 37. Dunod, Paris 1971.
2. D'Espagnat, B.: Conceptions de la physique contemporaine. Hermann, Paris 1965.
3. De Broglie, L.: Tentative d'interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire. Gauthier-Villars, Paris 1956.
4. Arzeliès, H.: Relativistic kinematics. Pergamon, Oxford 1966.
5. Hoffmann, B.: Phys. Today 25 (1972) agosto, p. 61.
6. Taylor, E.T. / Wheeler, J.A.: Space-time physics. Freeman, London 1963.
7. Marder, L.: Time and the space traveller. Allen & Unwin, London 1971.
8. L'idea di questa presentazione è tolta dal libro di Taylor e Wheeler citato sopra.
9. Sachs, M.: Phys. Today 24 (1971) settembre, p. 23. Vedi anche Phys. Today 25 (1972) gennaio, p. 11, e giugno, p. 11.
10. Hafele, J.C. / Keating, R.E.: Science 177 (1972) 166 e 168; Phys. Today 26 (1973) marzo, p. 11.
11. Ehrenfest, P.: Collected scientific papers, p. 154. North-Holland, Amsterdam.
12. Robertson, H. / Noonan, T.: Relatiivty and cosmology, p. 58. Saunders, Philadelphia 1968.
13. Arzeliès, H.: La cinématique relativiste, Ch. IX e in particolare le note storiche p. 191. Gauthier-Villars, Paris 1955.
14. Schrödinger, E.: Naturwissenschaft 48 (1935) 52.
15. Einstein, A. / Podolsky, B. / Rosen, N.: Phys. Rev. 47 (1935) 777.
16. Wigner, E.P.: The scientist speculates, p. 284. I.J. Good ed. Heinemann, London 1962.
17. Wigner, E.P.: American Journ. Phys. 31 (1963) 6.
18. Per una discussione di questi paradossi vedi p. es. J.M. Jauch: Foundations of quantum mechanics, u. 185, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1968, e J.M. Jauch : Are quanta real ? Indiana University Press, Bloomington 1973, così come l'articolo di C. George / I. Prigogine / L. Rosenfeld: Nature 240 (1972) 25.
19. Everett, H.: Revs. Mod. Phys. 29 (1957) 454.
20. de Witt, B.S.: Phiys. Today 23 (1970) settembre, p. 30; Phys. Today 24 (1971) aprile, p. 36, e ottobre, p. 11.
21. Bell, J.S.: On the hypothesis that the Schrödinger equation is exact. Preprint Ref. TH. 1424-Cern, 27 ottobre 1971.
22. Bartley, W.W.: Lewis Carroll's lost book on logic. Scientific American, luglio 1972, p. 39.