

Olivier Costa de Beauregard

LE CORRELAZIONI DI EINSTEIN (1927)
O DI EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN (1935)

1. INTRODUZIONE: EINSTEIN AL 5° CONGRESSO SOLVAY (1927)

Al 5° Congresso Solvay del 1927 Einstein¹, di fronte alla nascita della "nuova meccanica quantistica" e in presenza di tutti i "padri fondatori", individuava un "segno di contraddizione" — che non ha mai cessato di essere imbarazzante — e che ancor oggi costituisce l'oggetto di discussioni molto accese, dato che già delinea chiaramente uno dei nodi del "paradosso": un conflitto apparente fra un fenomeno quantico di correlazione a distanza e la sua teoria della relatività del 1905.

Einstein sosteneva quanto segue: sia data (fig. 1) un'onda piana monocromatica che incide normalmente su di uno schermo piano provvisto di una piccola apertura circolare C e che viene poi rivelata su di una lastra fotografica emisferica avente come centro C . Si tratta di una "onda quantizzata", portatrice (per semplificare) di un solo corpuscolo (ad esempio fotone o elettrone) che si suppone attraversi l'apertura. Questo corpuscolo produrrà l'annerimento di uno dei granuli, L , della lastra; a questo punto, si domanda Einstein, quale ragione impedisce che un altro granulo, come ad esempio N , subisca il medesimo annerimento? Renninger tornerà in seguito sul problema chiedendosi perché, quando un granulo N non

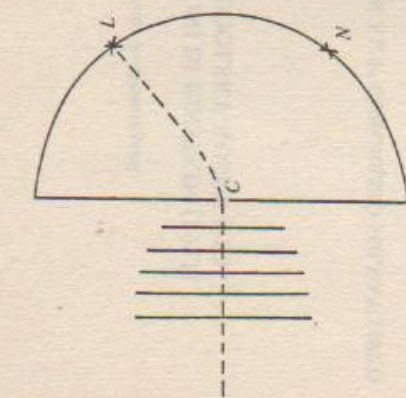


Fig. 1

un tipo ben noto di calcolo delle probabilità. Ma appunto, secondo il nuovo "calcolo ondulatorio delle probabilità" definito l'anno precedente (1926) da Born (e d'altra parte già delineato da Einstein stesso nel 1909), non è in C , bensì in L o in N che viene giocato il "lancio dei dadi". A questo punto, si chiede Einstein, in quale maniera la correlazione di probabilità viene "telegrafata" tra L e N ? Il canale LN risulta fisicamente vuoto; per di più è del "genere spazio". Si tratterebbe pertanto di una sorta di "telegrafia" superluminale, in contraddizione con un postulato relativistico fondamentale.

Quanto Einstein si rifiutava di pensare — dato che tale possibilità avrebbe prodotto uno sconvolgimento concettuale senza precedenti — è che fra L e N esista una connessione fisica che è anche la connessione matematica nel calcolo delle probabilità: il percorso a zigzag LCN costituito da due vettori di tipo tempo, connessi nel passato in C . Pertanto, se, secondo la diretta tradizione delle argomentazioni sulla reversibilità di Loschmidt (1876) e di Zermelo (1896), si postula che a livello elementare (ed in questo caso siamo sicuramente ad un livello elementare) la causalità non è temporalmente unidirezionale, vale a dire *non* caratterizzata dalla "freccia del tempo", il problema è risolto e viene così a cadere il "conflitto

relatività-quantum". Questo è ciò che ho spiegato in una Nota ai "Comptes Rendus" del 1953². Per concludere possiamo affermare che il "paradosso" di Einstein (cfr. nota 1) o EPR³ nasce dall'unione di due paradossi precedenti: quello della reversibilità temporale o di Loschmidt-Zermelo e quello del calcolo ondulatorio delle probabilità di Born. Sarà questo l'oggetto delle riflessioni che seguono.

2. ESPERIENZA-TIPO DI CORRELAZIONE DEL 1972-1982: CASCATE ATOMICHE

A partire dal 1972 la prova più decisiva delle correlazioni di Einstein è costituita dall'esperienza delle cascate atomiche, che si basa sulle polarizzazioni lineari di una coppia di fotoni.

Il principio su cui si fonda l'esperienza è il seguente (fig. 2). Una sorgente in C contiene degli atomi suscettibili di emettere "in cascata" due fotoni "correlati" in uno stato di momento angolare totale nullo. Fra queste coppie vengono selezionate quelle che, in laboratorio, percorrono in senso opposto uno stesso asse $X'X$ e che giungono in L e N su due polarizzatori lineari aventi un angolo relativo regolabile α . Le distanze CL e CN sono regolabili, possono essere disuguali⁴ e raggiungere i 6 m, come nelle recenti esperienze di Aspect⁵.

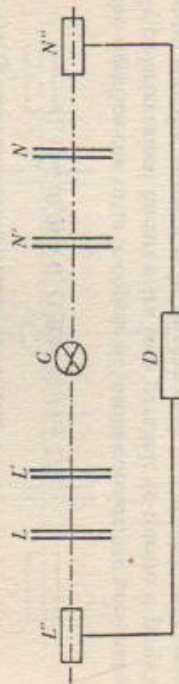


Fig. 2

Se un fotone arriva su di un polarizzatore lineare, si verifica una delle due seguenti possibilità: passa, ed in tal caso acquisisce una polarizzazione parallela al polarizzatore, oppure non passa, ed in

questo caso assume una polarizzazione perpendicolare al polarizzatore. Utilizzando poi come polarizzatori dei cristalli birifrangenti, o un loro equivalente, risulta effettivamente possibile individuare le 4 combinazioni possibili per ogni coppia di fotoni.

I polarizzatori L e N sono seguiti da due fotomoltiplicatori L'' e N'' che funzionano in coincidenza (o in coincidenza differita⁶ se le distanze CL e CN sono disuguali), in quanto è essenziale applicare la statistica ai fotoni di una stessa coppia.

Indichiamo con $\langle 1,1 \rangle$, $\langle 0,0 \rangle$, $\langle 1,0 \rangle$, $\langle 0,1 \rangle$ le probabilità delle quattro risposte possibili per ciascuna coppia di fotoni. La meccanica quantistica stabilisce, e l'esperienza conferma pienamente, che esistono due (e soltanto due) tipi possibili di cascate. Per il primo tipo

$$\langle 1,1 \rangle = \langle 0,0 \rangle = \frac{1}{2} \cos^2 \alpha, \quad \langle 1,0 \rangle = \langle 0,1 \rangle = \frac{1}{2} \sin^2 \alpha,$$

e, per il secondo tipo,

$$\langle 1,1 \rangle = \langle 0,0 \rangle = \frac{1}{2} \sin^2 \alpha, \quad \langle 1,0 \rangle = \langle 0,1 \rangle = \frac{1}{2} \cos^2 \alpha.$$

Queste formule sono matematicamente molto semplici e potrebbero inoltre essere derivate da argomentazioni di plausibilità matematica, ma costituiscono un vero e proprio insulto al buon senso.

Consideriamo, ad esempio, le cascate del primo tipo. Ponendo $\alpha = \pi/2$ (polarizzatori incrociati) si ottiene

$$\langle 1,1 \rangle = \langle 0,0 \rangle = 0, \quad \langle 1,0 \rangle = \langle 0,1 \rangle = 1/2,$$

il che significa che tutte le coppie di fotoni considerate presentano delle polarizzazioni lineari e fra loro parallele (e questo è proprio quanto avrebbe sostenuto in questo caso la "vecchia meccanica quantistica"), ma per di più parallele sia all'uno che all'altro dei due polarizzatori incrociati la cui orientazione d'insieme è arbitraria e potrebbe essere decisa dopo che i fotoni si sono allontanati dalla sorgente. Quest'ultimo punto è stato confermato nel corso della più recente esperienza di Aspect (cfr. nota 5).

Quanto sopra esposto non può significare altro che, nel momen-

to in cui lasciano la sorgente, i due fotoni non posseggono alcuna polarizzazione, ma ne acquisiscono una interagendo con i polarizzatori (si tratta di un *leit motiv* della "nuova meccanica quantistica"). Tuttavia queste polarizzazioni sono correlate. *E qui sta il paradosso*⁷.

In definitiva si tratta di un "quasi-gioco ai dadi di Alice nel Paese delle Meraviglie" in cui accade questo: data la forma stessa del formalismo matematico, è certo che l'evento stocastico non si verifica quando i due dadi vengono agitati nel bussolotto, bensì quando hanno finito di rotolare sul tavolo. *E tuttavia essi sono correlati*.

E' la dimostrazione di quella che viene tecnicamente definita la *non-separabilità di due misure risultanti da una preparazione comune*. Ma esiste anche il processo reciproco; risponde alle stesse formule e potrebbe essere perfettamente controllato producendo una "anti-cascata" o "transazione di livello" per assorbimento di due fotoni linearmente polarizzati emessi da due laser convergenti (fig. 3). Il numero di transizioni ottenute per unità di tempo sarebbe facilmente valutabile mediante un flussometro che misuri l'intensità della radiazione riemessa su di un'altra via. Ciò evidenzerebbe il fenomeno della *non-separabilità di due preparazioni convergenti su di una misura comune*, reciproco rispetto al precedente⁸.

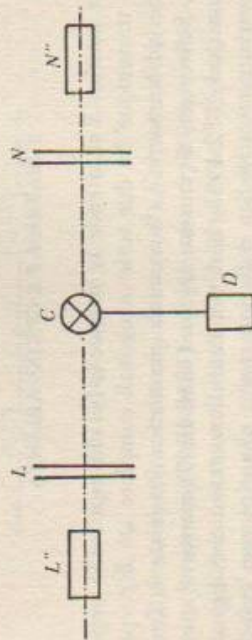


Fig. 3

Considerando che in L e N vi sono due parametri arbitrariamente variabili mentre in C non ve ne è nessuno, se il termine *causa* ha

un senso — diciamo, più precisamente, “causa macroscopicamente variabile” nel senso inteso da Bacone — l'insieme di questa fenomenologia dimostra in modo inconfutabile che il *legame causale non è temporalmente unidirezionale a livello quantistico*.

La freccia passato-futuro della causalità macroscopica rappresenterebbe pertanto una emergenza statistica analoga (e strettamente legata) a quella della irreversibilità stocastica, il che si verifica in particolar modo nella *non-reversibilità macroscopica* dei dispositivi sperimentali schematizzati nelle figg. 2 e 3.

Prima di concludere sarebbe utile fare due osservazioni. Nell'esperienza diretta appare come “paradossale” che la correlazione non si attenui con la distanza e che l'orientazione dei polarizzatori possa essere decisa “all'ultimo momento”. Al contrario, nell'esperienza inversa, il fatto che esista una insensibilità alla distanza e il fatto che quello che conta è l'orientazione dei polarizzatori mentre i fotoni li attraversano, sono entrambi considerati ovvi: appare quindi “evidente” che i fotoni “conservino” la polarizzazione che è stata ad essi conferita.

Questo significa che *la causalità ritardata è considerata ovvia e la causalità anticipata è considerata paradossale*. Ma la fenomenologia dimostra che *la microcausalità non è temporalmente unidirezionale*.

3. MATRICE S E CPT-INVARIANZA

Per matrice S si intende la matrice $\langle \varphi | \psi \rangle$ che esprime le ampiezze di transizione fra due serie ortogonali complete $|\varphi\rangle$ di preparazioni e $|\psi\rangle$ di misure. La meccanica quantistica relativista di Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson (1946-1949) mantiene questo schema. Nel 1952-1955, Lüders e Pauli dimostrano che il gruppo di invarianza relativistica della meccanica quantica non coincide con quello della meccanica macroscopica.

Nel 1905 Einstein aveva definito l'invarianza relativistica macroscopica come l'invarianza rispetto al gruppo di Lorentz-Poincaré ortocrono, escludendo le inversioni dell'asse del tempo. L'irreversibilità macroscopica nelle sue diverse forme (termodinamica, stati-

stica, ondulatoria, causale) era proprio relativisticamente invariante in quel senso. Lüders e Pauli nel 1955 hanno dimostrato che il formalismo della meccanica quantistica relativistica è invariante rispetto al gruppo prodotto dal precedente mediante le “simmetrie discrete” $\Pi \Theta = CPT$, dove $\Pi = P$ indica la “simmetria destra-sinistra”, ottenuta scambiando 1 o 3, assi spaziali, $\Theta = CT$ l'inversione dell'asse di tempo, C lo scambio particella-antiparticella e T l'inversione del movimento alla Wigner; PT è “l'inversione covariante del movimento”. Tutto quanto sopra esposto viene illustrato nella fig. 4 mediante l'esempio di una annichilazione (o creazione) di coppia $e^+ e^-$ in due fotoni (o a partire da due fotoni)⁹.

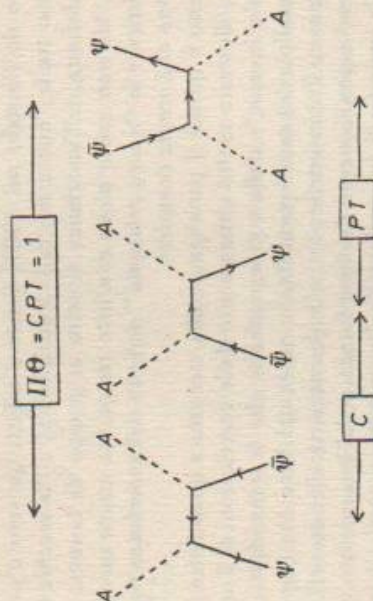


Fig. 4

Ora, come ho dimostrato in dettaglio¹⁰, dal formalismo della matrice S segue direttamente una espressione perfetta delle correlazioni di Einstein tanto dirette che inverse. Due “correlazioni reciproche” come quelle prese in esame nel precedente capitolo, sono infatti CPT -associate¹¹.

Nella fig. 5 è schematizzato il caso generale con (secondo la convenzione di Feynman) delle particelle $\rightarrow$ e delle antiparticelle $\leftarrow$ sia entranti che uscenti. La CPT -invarianza del “principio del bilancio dettagliato” consiste nella reversibilità della transizione

$$\bar{A} + B + \dots \rightleftharpoons \bar{C} + D + \dots$$

dove una lettera barrata indica una particella a sinistra e una anti-particella a destra e *viceversa* nel caso di una lettera non barrata. Tale notazione è conforme al principio della superquantizzazione secondo il quale l'emissione di una particella e l'assorbimento di una antiparticella sono identici dal punto di vista matematico e vengono indicati da $\bar{\psi}$ e *viceversa*. E' questa l'origine profonda dell'equivalenza $C = PT$ tra lo scambio particella-antiparticella (al momento dell'emissione o dell'assorbimento) e l'inversione covariante del movimento. Ritorniamo sull'argomento con la fig. 4.

In tal modo viene eliminato il "conflitto relatività-quantum" individuato da Einstein nel 1927. Esisteva infatti un vero e proprio conflitto tra la "nuova meccanica quantistica" e "la vecchia relatività" definita dall'invarianza rispetto al gruppo di Lorentz ortocrono. Ma non esiste alcun conflitto tra questa nuova meccanica quantistica e la "nuova relatività" definita dall'invarianza rispetto al gruppo di Lorentz completo.

Questo è quindi il paradigma della meccanica quantistica relativistica, illustrato molto chiaramente dalle correlazioni di Einstein, dirette o inverse, e dalla non-separabilità che vi si manifesta. Questa (paradosale) non-separabilità consiste nel fatto che (fig. 5) le preparazioni distanti delle particelle (o antiparticelle) uscenti, sono correlate rispettivamente dal loro futuro o dal loro passato comune nella regione di interazione C . Per quanto riguarda il legame fisico (e matematico) di queste connessioni, si tratta chiaramente dello "zigzag di Feynman", come ad esempio $L_1 CN_1$ o $L_2 CN_2$.

Risulta anche chiaro che in questo formalismo quello che conta sono le definizioni dei dispositivi di preparazione e di misura nel momento in cui le particelle (o antiparticelle) li attraversano, come è evidente che le distanze spaziali o temporali non incidono sul risultato. L'ampiezza di transizione è invariante per spostamenti arbitrari dei procedimenti di preparazione o di misura lungo i loro rispettivi fasci. Questo è stato verificato sperimentalmente mediante quella che si può definire una "esplorazione geografica" dello zigzag di Feynman.

Il "paradosso" in tutti i suoi aspetti — tali e quali li conferma

l'esperienza — è quindi perfettamente formalizzato.

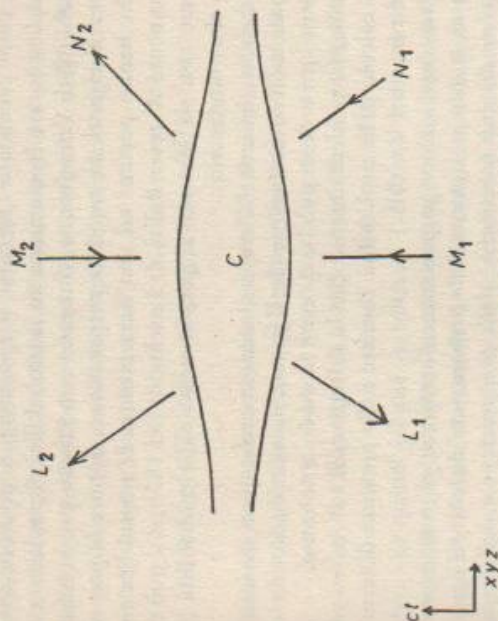


Fig. 5

Ma il "paradigma" che risolve un "paradosso" non è soltanto una formula; è anche il discorso esplicito isomorfo alla formula. La CPT-invarianza (e, naturalmente, l'invarianza di Lorentz) del concetto di causalità a livello elementare: ecco l'implicazione inevitabile del caso presente. Incidentalmente, le correlazioni di Einstein non giustificano la costruzione di un "telegrafo superluminale" per l'ovvia ragione che ad una risposta osservata in L (diciamo 1) corrispondono due risposte possibili in N (1 e 0) e che

$$\langle 1, 1 \rangle + \langle 1, 0 \rangle = 1.$$

Si tratta del principio (macroscopico) della "predizione statistica cieca" che oppone in questo caso il suo veto. Ma secondo una terminologia giuridica questo principio è *de facto* ma non *de jure* cioè "di fatto e non di diritto". Viene così posto un problema fondamentale, di cui però non tratteremo in questa sede.

Ci limiteremo quindi a notare che l'ampiezza di transizione

$\langle \varphi | \psi \rangle = \langle \psi | \varphi \rangle^*$ e la probabilità di transizione $|\langle \varphi | \psi \rangle|^2$ vengono intese sia come predizione che come retrodizione. E' possibile oggettivare in una forma frequentista sia la probabilità di predizione sia la probabilità di retrodizione, riunendo rispettivamente le misure su sistemi derivanti da una data preparazione, oppure le preparazioni che hanno portato ad una data misura. E' questa l'essenza dell'argomento di reversibilità di Loschmidt del 1876, e si può notare come essa sia inerente al calcolo stesso delle probabilità (sia classico che ondulatorio).

Per quanto riguarda "l'irreversibilità macroscopica di fatto", essa si basa sulla constatazione che il primo, ma non il secondo, dei due processi precedenti può funzionare in modo autonomo.

Ricordiamo incidentalmente che la differenza fra il nuovo ed il vecchio calcolo delle probabilità consiste nella presenza di termini di interferenza nel $|\langle \varphi | \psi \rangle|^2$.

Un'altra osservazione importante: *l'ampiezza di transizione è definita se, e solo se, ognuna delle preparazioni distanti ed ognuna delle misure distanti (costitutive della preparazione e della misura globali) vengono effettivamente realizzate o trovate (rispettivamente) così come sono specificate nella formula.* Dal punto di vista operativo viene ad essere così precisata l'affermazione di Bohr secondo la quale la definizione dei procedimenti di preparazione e di misura rappresenta un elemento costitutivo del fenomeno. In termini formali ciò equivale ad affermare che *tutto il calcolo (ondulatorio) delle probabilità della meccanica quantistica è un calcolo di probabilità condizionale.*

4. CALCOLO ESPPLICITO DELLA CORRELAZIONE DI POLARIZZAZIONE

Pur senza introdurre il formalismo generale, è possibile presentare una visione semplice ma autentica dell'argomento in questione.

In C esistono due (e soltanto due) preparazioni (o misure) possibili di una coppia di fotoni aventi spin totale 0: lo scalare $|\varphi\rangle$, lo pseudoscalare $|\varphi \epsilon_{ijk}\rangle$; $i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$ denotano le 4 dimensioni spazio-temporali; ϵ vale 0 se almeno due degli indici sono

uguali, +1 o -1 a seconda che gli indici — essendo tutti diversi — formino una permutazione pari o dispari.

Le misure di polarizzazione effettuate in L e N sono, in termini relativistici, quelle di due campi elettromagnetici $|H_a^j\rangle$ e $|H_b^j\rangle$. Le due ampiezze di transizione da considerare sono quindi (ad eccezione di alcuni fattori) le scalari¹²

$$\langle \varphi | H_a^j \rangle |H_b^j\rangle \text{ o } \langle \varphi \epsilon_{ijk} | H_a^j \rangle |H_b^k\rangle$$

o ancora, con una notazione prerelativistica, in unità di Gauss omettendo, per semplificare, i simboli "bra" e "ket",

$$\varphi^*(\mathbf{E}_a \cdot \mathbf{E}_b - \mathbf{H}_a \cdot \mathbf{H}_b) \text{ o } \varphi^*(\mathbf{E}_a \cdot \mathbf{E}_b + \mathbf{H}_a \cdot \mathbf{H}_b).$$

Definiamo quindi gli assi prendendo 1 e 4, o x e ct nel piano dei tre impulsi-energie. I due fotoni si propagano in direzioni opposte, i campi E e H sono trasversali e — indicando con α l'angolo relativo dei polarizzatori, le espressioni precedenti si riducono rispettivamente a

$$(1/\sqrt{2}) \cos \alpha \text{ o } (1/\sqrt{2}) \sin \alpha.$$

Si tratta delle ampiezze di transizione che corrispondono alle probabilità di transizione precedentemente indicate e che risultano invarianti in una trasformazione di Lorentz relativa a x e ct .

Tutto questo formalismo è Lorentz e CPT -invariante, simmetrico in a e b , indipendente dai valori delle distanze e dall'ordine temporale delle misure.

E' necessario far sì che il discorso interpretativo si avvalga esattamente delle stesse invarianti. Poiché questo non si verifica in tutti gli autori ne conseguono dei paradossi insensibili che impongono di cogliere il nodo filosofico centrale del problema.

Mi riferisco ai numerosi "discorsi" secondo i quali la "prima in ordine di tempo" delle due misure distanti "collapsa istantaneamente a distanza" l'altro stato.

Questo discorso non è né simmetrico per le due misure, né relativisticamente invariante, mentre la formula dell'ampiezza di tran-

sizione soddisfa entrambe le condizioni. Per di più si rivela auto-contraddittorio nel senso che le due misure sono, rispetto ad un certo (sistema di) riferimento, perfettamente simultanee (il che è accettabile se non vi è alcuna misura dell'energia¹³ e reciprocamente incompatibili, come ad esempio due misure di polarizzazioni lineari di angolo relativo $0 \neq \alpha \neq \pi/2$). Il problema si pone allora in questi termini: quale delle due misure collassa l'altro stato?

In questo discorso la carenza concettuale è che ad *ognuna* delle due misure è legata la condizione *se*.

L'origine tecnica dell'errore deriva generalmente dall'uso del concetto "di stato $|\varphi\rangle$ che evolve casualmente dalla sua preparazione" in luogo del concetto di *ampiezza di transizione*.

Tale "stato" $|\varphi(t)\rangle$, o $|\varphi(\sigma)\rangle$ non è osservabile nello schema di Tomonaga-Schwinger, in quanto questo tipo di osservazione implicherebbe un cambiamento della definizione dell'esperienza. *Solo la preparazione $|\varphi\rangle$ e la misura $|\psi\rangle$ sono osservabili*. Il sistema transita tra le due...

5. CONCLUSIONE

Il fenomeno "paradosale" della non-separabilità di Einstein, formalizzato in modo perfetto nello schema della "matrice S" di Schwinger-Feynman, mette in evidenza una forma *sui generis* di connessione a grandi distanze spaziali e temporali che risulta del tutto estranea alla fisica classica. A partire dal 1972 una serie di esperienze rilevanti, che ha avuto come culmine quelle di Aspect del 1981 e del 1982, ha dimostrato incontestabilmente la realtà del fenomeno le cui implicazioni per la filosofia naturale sono attualmente oggetto di un acceso dibattito. Possiamo affermare che il "telegrafo spazio-temporale" — che è la meccanica quantistica relativistica — rivela in questo caso uno dei suoi aspetti specifici e del tutto diverso da quelli dei telegrafi macroscopici che sono a noi familiari.

I due elementi formali inerenti a questa *non-separabilità* sono il *calcolo ondulatorio delle probabilità* secondo Born (1926) e la *CPT-invarianza* che potremmo definire l'erede relativistica della

T-simmetria classica di Loschmidt (1876) e di Zermelo (1896). Poiché la concettualizzazione di un nuovo paradigma deve essere isomorfa alla sua formalizzazione, anche la stessa definizione della causalità deve presentare, a livello elementare, i caratteri precedenti. In particolare modo la *CPT*-invarianza esige che essa non sia unidirezionale rispetto al tempo; *la freccia passato-futuro della causalità macroscopica deve emergere come e insieme alla irreversibilità termodinamica*.

Il concetto della *meccanica quantistica relativistica* è di per se stesso un *paradosso*: come è concepibile una tale unione tra acqua e fuoco — tra l'acqua del "tutto è scritto" alla Minkowski e il fuoco di un calcolo delle probabilità?

Trattandosi di procedure macroscopiche, la preparazione, indicata con $|\varphi\rangle$, e la misura, indicata con $|\psi\rangle$, di una transizione quantistica avente ampiezza $\langle\varphi|\psi\rangle = \langle\psi|\varphi\rangle^*$ e quindi probabilità $|\langle\varphi|\psi\rangle|^2$ sono ancorate nello spazio-tempo, anch'esso un concetto macroscopico e statistico. Ma il "micro-sistema quantico" che evolve da $|\varphi\rangle$ a $|\psi\rangle$ non si trova né "nello" stato ritardato preparato come $|\varphi\rangle$ né, d'altra parte, "nello" stato avanzato misurato come $|\psi\rangle$. Per essere esatti, si può affermare che *sta transitando* tra $|\varphi\rangle$ e $|\psi\rangle$: da questo punto di vista è quindi *al di fuori dello spazio-tempo*¹⁴, subendo simmetricamente l'influenza ritardata della preparazione e l'influenza anticipata della misura. E' proprio così che le formule sono scritte ed è possibile scorgervi come un richiamo analogico al carattere degli algoritmi variazionali classici di Fermat e di Maupertuis - Hamilton.

Pertanto la cosiddetta "oggettività perfetta" dello spazio-tempo e del suo contenuto di eventi macroscopici è, molto verosimilmente, un'illusione, così come l'oggettività che si tende ad attribuire al concetto di probabilità nel suo aspetto frequentistico. A dire il vero, *né lo spazio-tempo né la probabilità sono completamente oggettivi (né, d'altra parte, completamente soggettivi) in quanto sono indissolubilmente entrambe le cose*. Da un punto di vista classico, quando si perde traccia dell'elemento di estensione in fase, alla Liouville, e quando ne deriva una *irreversibilità di fatto*, oppure quando, da un punto di vista quantistico, la coerenza delle fasi e, con essa, la *non-separabilità* si perdono nella irreversibilità di una

misura, si tratta in entrambi i casi di una *perdita di informazione*, di una opacità conseguente ad una mancanza di approfondimento. In tal modo cade il velo della "maya" degli Indù....

Ma la microfisica quantistica analizza le cose con un ingrandimento tale da rivelare la trasparenza del velo. Diversi autori hanno assimilato il processo di *preparazione* e di *misura* ad una forma "ondulatoria" di quello che viene definito in informatica *codificazione* e *decodificazione* di un messaggio. E' a questo livello che l'informazione-organizzazione deve entrare, per così dire, nel cosmo e l'informazione-conoscenza deve uscirne. Pertanto è ancora a questo livello che bisognerebbe porre il confine tra la "potenza" e "l'atto" in senso aristotelico.

Per concludere, lascerò che il lettore mediti su quanto ho esposto. Come oggetto di tale meditazione porrei (fig. 6) questo schema umoristico del "cono di luce" di Poincaré-Minkowski in cui viene mantenuto il divieto di *telegrafare direttamente nell'ultraviolette*, ma in cui il divieto di "telegrafare nel passato" rientra nel campo della giurisprudenza piuttosto che del diritto in senso stretto.

Aggiungo a questo punto un'ultima annotazione. Le costanti universali della fisica del XX secolo — la c di Einstein, la h di Planck, la k di Boltzmann (che funge da coefficiente di equivalenza nella formula neghentropia = $k \ln 2$ informazione) sono o estremamente grandi o estremamente piccole quando vengono espresse in unità "pratiche".

Il che equivale a dire che i fenomeni esaminati da questa fisica sono del tutto estranei all'esperienza quotidiana. In altre parole,

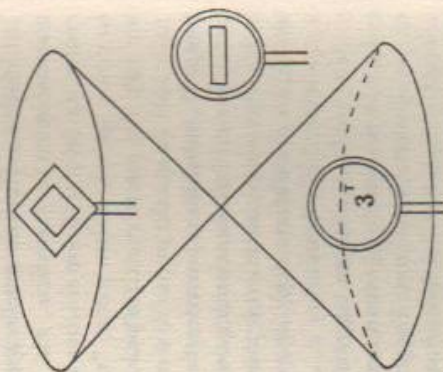


Fig. 6

come un tempo le caravelle ed oggi le "capsule" degli astronauti, i progetti di questa fisica sono lanciati alla conquista di Nuovi Mondi....

Institut Henri Poincaré
Paris

NOTE

1. A. Einstein, *Rapports et discussions du 5° Conseil Solway*, Gauthier Villars, Paris, 1928, pp. 253-256.
2. O. Costa de Beauregard, *C.R. Acad. Sci.* 236 (1953), 1632.
3. A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Phys. Rev.* 47 (1935), 777. In questo articolo il problema viene formalizzato in termini di meccanica quantistica non relativistica. Questo punto è stato verificato in sede di esperienze con polarizzazioni di coppie di fotoni γ prodotti dalla disintegrazione del positronio.
4. A. Aspect et al., *Phys. Rev. Lett.* 47 (1981), 460; 49 (1982), 91; 49 (1982), 1804.
5. A. Aspect et al., *Phys. Rev. Lett.* 47 (1981), 460; 49 (1982), 91; 49 (1982), 1804.
6. In realtà i due fotoni non vengono prodotti simultaneamente dalla cascata, a causa della durata di vita del livello virtuale intermedio.
7. Una "ipotesi ad hoc" dovuta a F. Selleri (*Letture Epistemologiche de l'Association Ferdinand Gonseth* 25 (1980), 39) è la seguente: i due fotoni che lasciano la sorgente "posseggono" in comune una "direzione nascosta" nel piano d'onda; quando uno dei fotoni incontra un polarizzatore del tipo cristallo birifrangente, esso "prende" quella delle due polarizzazioni incrociate che forma l'angolo minore con la "direzione nascosta". Questa "teoria a variabili nascoste" sostituisce le sinusoidi quantistiche $1 \pm \cos 2\alpha$ con una serie di segmenti rettilinei che le intersecano per $\alpha = 0, \pi/2, \pi, \dots$
8. Questa teoria, pertanto, non è equivalente alla meccanica quantistica, conformemente al teorema generale di Bell sulle variabili nascoste (1965). Esiste un'esperienza che dimostra questo fenomeno; è di tipo diverso e riguarda la non-separabilità dei numeri di occupazione all'emissione di due laser che interferiscono: R.L. Pfleeger e L. Mandel, *Phys. Rev.* 159 (1967), 1084; *Journ. Opt. Soc. Amer.* 58 (1968), 946.
9. E. Recami e W.A. Rodrigues, *Found. Phys.* 12 (1982), 709 e O. Costa de Beauregard, *Found. Phys.* 12 (1982), 861 hanno discusso indipendentemente l'uguaglianza $\Pi \Theta = CPT = 1$ usando termini differenti, ma equivalenti.
10. O. Costa de Beauregard, *Nuovo Cim.* 42B (1977), 41 e 51B (1979), 267; *Physica* 22 (1980), 211. Vedi anche *La pensée physique contemporaine*, S. Diner, D. Fargue e G. Lochak (eds.), Ed. Augustin Fresnel, Hiersac, p. 212.
11. Nel caso elettromagnetico esse sono anche, più semplicemente, T -associate in quanto vi sono separatamente invarianze C, P e T .

12. Si tratta di scalari nel caso elettromagnetico in cui vi sono separatamente le invarianze G , P e T . Nel caso delle interazioni deboli di Lee e Yang, in cui vi è la violazione C e P , l'ampiezza di transizione è costituita dalla somma di uno scalare e di uno pseudoscalare.
13. I fotorecettori utilizzati in queste esperienze non *misurano*, propriamente parlando, le energie.
14. B. d'Espagnat, *Rev. Métaph. Mor.* 86 (1981), 379 (vedi p. 382) giunge anch'egli alla conclusione che il micro-fenomeno quantico deve situarsi al di fuori dello spazio-tempo, sebbene la sua concettualizzazione risulti meno specifica della mia.