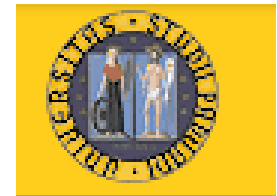


La realtà fisica in Meccanica Quantistica

Pieralberto Marchetti
Universita' di Padova



*Galilei a Padova, 1592-1610 - "Li diciotto anni
migliori di tutta la mia età".*



Premessa

- Cercherò di illustrare la visione della realtà fortemente controintuitiva (e controversa) che emerge dalla teoria fisica che ha incontrato un enorme successo nella descrizione dei fenomeni fisici, anzi che a tutt'oggi non è contraddetta da alcun esperimento: la fisica quantistica.
- Per porla in prospettiva farò preliminarmente un breve accenno alla visione della realtà suggerita invece dalla fisica classica (e relativistica)
- L'esposizione si concentrerà su due aspetti "filosofici": l'identità delle particelle e la controfattualità della realtà fisica

La realtà fisica classica: determinismo

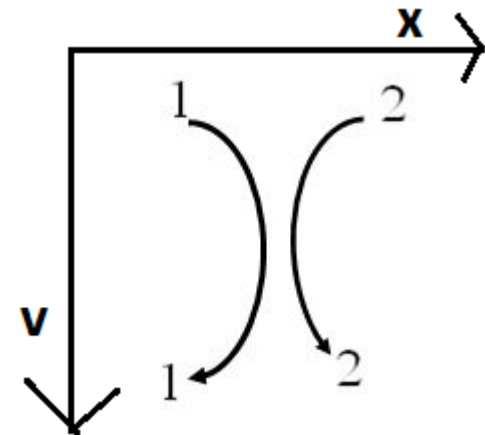
- Se a un istante di tempo conosco le posizioni e le velocità dei punti di un sistema fisico e inoltre conosco le masse e le forze agenti (eventualmente al variare del tempo) sul sistema, allora conosco il moto del sistema (cioè le posizioni e le velocità, ma anche tutte le altre grandezze fisiche) sia nel futuro che nel passato [determinismo newtoniano]
- Matematicamente questo è conseguenza dell'unicità della soluzione delle equazioni del moto a fissate condizioni iniziali.

Commenti “filosofici”-Identità

- La realtà fisica classica è compatibile con il principio di identità degli indiscernibili di Leibnitz: Non si trovano mai in natura due entità esattamente simili ma distinte relativamente alle quali non si possa trovare una differenza (cioè sono discernibili=distinguibili).
- Infatti consideriamo due particelle classiche che definiremo identiche se hanno le stesse proprietà intrinseche, ad es. massa, carica, ecc, che le caratterizzano univocamente come enti.
- Supponiamo di avere due particelle identiche che differiscono per proprietà estrinseche, come la loro posizione e velocità a un istante di tempo

Identità degli indiscernibili classici

- All'istante dato quindi le particelle sono distinguibili, ma risulta possibile ancorare la loro individualità in istanti successivi alle loro caratteristiche estrinseche (posizione, velocità)?
- Classicamente sì, come conseguenza dell'unicità della soluzione delle equazioni del moto a fissate condizioni iniziali: se le condizioni iniziali sono distinte esse non avranno mai entrambe allo stesso istante le stesse posizioni e velocità.



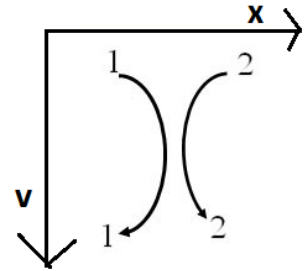
Particelle quantistiche

Sono “particelle” la cui probabilita' di essere trovate in una certa posizione x [o con un certo impulso p o ...] e' determinata dall'intensita' di un'onda $\psi(x)$ [$\phi(p)$ o...] .

La situazione e' dunque completamente diversa dal caso classico: la Meccanica Quantistica non assegna alle particelle di un sistema fisico una definita posizione e impulso che esse posseggono, ma solo una probabilita' (indeterminismo) di essere trovate in una posizione con una misura.

Identità degli indiscernibili in MQ?

- In MC possiamo sempre distinguere due particelle identiche seguendo l'evoluzione della loro posizione e velocità sulla traiettoria, ma in MQ non esistono traiettorie, ma solo funzioni d'onda
- Supponiamo che all'istante iniziale le funzioni d'onda di due particelle identiche 1 e 2 siano disgiunte



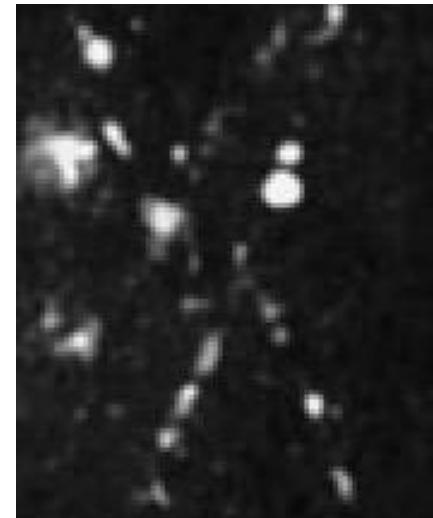
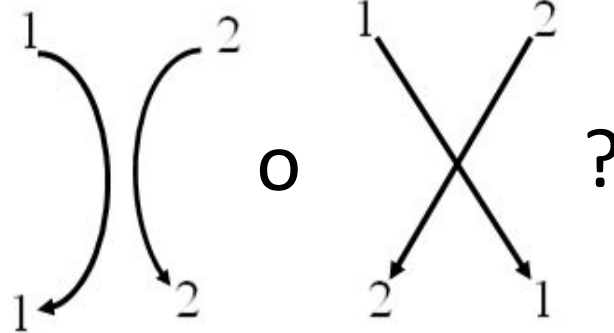
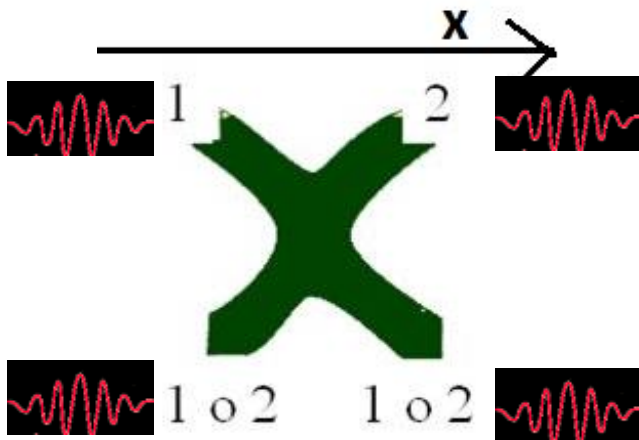
1



2

Commenti “filosofici”-Identità

- Nell’evoluzione a tempi successivi però nulla garantisce che rimangano disgiunte e se a un certo istante si sovrappongono poi non c’è più modo di sapere quale è 1 e quale è 2



Identità in MQ???

- In MQ non esiste in linea di principio possibilità di seguire nel loro moto due particelle identiche e distinguerle: Le particelle quantistiche identiche (come enti) perdono la loro individualità e la loro identità porta all'indistinguibilità
- Ha senso solo porsi domande che non dipendono dall'individualità delle particelle identiche, ad esempio la probabilità di trovare un elettrone in un volume fissato, ma non di trovare un fissato elettrone in quel volume
- Non c'è modo di dire "quale" elettrone sta nella mia mano o nel tavolo...

Conseguenze fisiche dell'indistinguibilità

- Poiché sono i quadrati delle funzioni d'onda che danno le probabilità, due funzioni d'onda che differiscono per un segno saranno fisicamente equivalenti.
- Poiché due particelle quantistiche identiche sono indistinguibili un loro scambio non può dare effetti fisici, ma allora se $\Psi(x_1, x_2)$ è la loro funzione d'onda
 - o $\Psi(x_1, x_2) = \Psi(x_2, x_1)$ bosoni (fotoni-luce, laser)
 - o $\Psi(x_1, x_2) = -\Psi(x_2, x_1)$ fermioni (elettroni-principio di Pauli, chimica...)

Commenti “filosofici”-Controfattualità

- Una interpretazione realista della fisica classica è compatibile con la proprietà di controfattualità: se P è una proposizione su un sistema fisico e se una misura che non disturba il sistema ha dimostrato P vera, allora P sarebbe stata vera anche se la misura non fosse stata eseguita (“la luna avrebbe la stessa posizione anche se non fosse osservata”)

Commenti “filosofici”- Controfattualita’

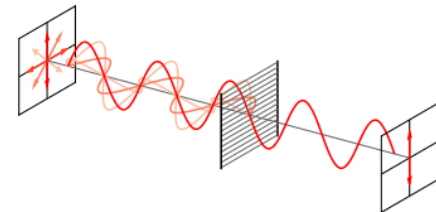
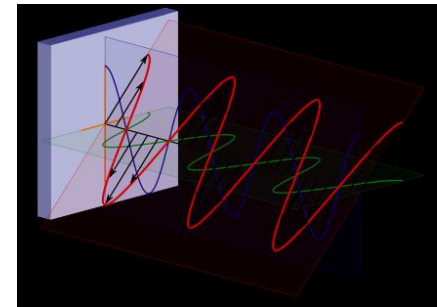
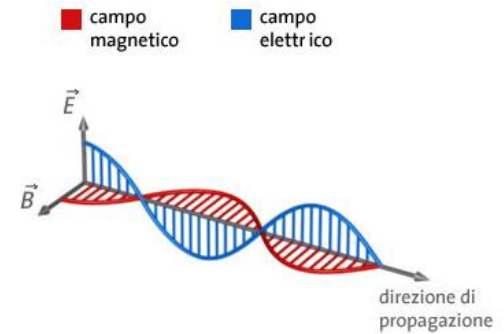
- Nonostante l’aspetto controintuitivo per una interpretazione realista (ovviamente non c’è problema per una visione strumentalista), le proprietà delle particelle quantistiche discusse finora ancora non mettono in crisi un principio cardine del realismo come la controfattualita’ perché è vero che il comportamento delle particelle quantistiche è diverso a seconda se vengano osservate o meno, ma il processo di misura discusso comporta un disturbo che blocca eventuali contraddizioni che comporterebbe l’applicazione della controfattualita’ (se P è una proposizione su un sistema fisico e se una misura che **non disturba il sistema** ha dimostrato P vera, allora P sarebbe stata vera anche se la misura non fosse stata eseguita).
- Ma...adesso discuteremo, sfruttando misure di polarizzazione, esperimenti dove la misura su un sistema composto è eseguita senza “disturbare” un sottosistema...

La polarizzazione della luce classica

La luce può essere polarizzata
(cioè il campo elettromagnetico può oscillare)
in una qualsiasi

direzione nel piano perpendicolare al suo cammino, ma solo due
direzioni sono indipendenti, tutte le altre direzioni si possono
ottenere sommando con pesi i campi
elettromagnetici corrispondenti a quelle due.

Se un raggio di luce polarizzato in una certa direzione
incontra un polarizzatore orientato nella stessa
direzione, lo attraversa. Se il polarizzatore è orientato
perpendicolarmente il raggio viene fermato. Se
l'angolo è intermedio, passa solo una frazione della
luce. A quel punto, la luce passata è polarizzata lungo
la direzione del polarizzatore, come si può verificare
facendola passare per un altro polarizzatore.



La polarizzazione della luce quantistica

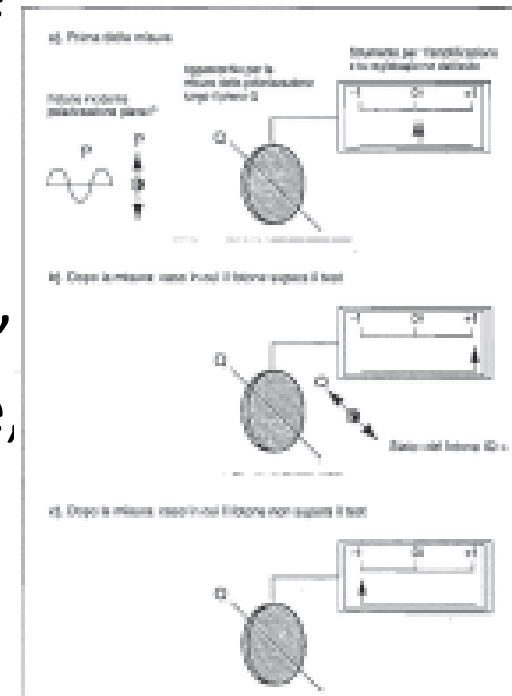
Secondo la meccanica quantistica, il raggio classico e' composto di molti fotoni. Anche un singolo fotone ha una polarizzazione e ci sono due direzioni indipendenti, quelle ortogonali, ad esempio orizzontale O e verticale V , al contrario delle infinite posizioni x. Tutte le altre polarizzazioni si possono ottenere per sovrapposizione. La “funzione d'onda della polarizzazione” Ψ e' quindi data da due numeri, chiamiamoli ψ_V , ψ_O , i cui moduli quadri danno la probabilita' di trovare il fotone in polarizzazione O o V, rispettivamente.

- In particolare se la funzione d'onda (o stato) di polarizzazione è
 $\Psi_\alpha = (\psi_O = \cos \alpha, \psi_V = \sin \alpha) = |\alpha\rangle$
 la probabilità di trovare il fotone polarizzato ad un angolo α è 1, potremmo quindi dire che esso “ha” polarizzazione α e allora passa con certezza da un polarizzatore con la stessa orientazione, non passa da uno perpendicolare, passa in modo indeterministico con probabilità $\cos^2\theta$ da un polarizzatore inclinato di un angolo θ rispetto ad α .

La polarizzazione della luce quantistica

Nel caso del raggio classico $\cos^2\alpha$ dava la frazione di raggio che passava, qui ogni fotone deve “decidere” se passare o non passare; se passa, passa interamente, ma lo fa con probabilita' $\cos^2\alpha$. Per un grande numero di fotoni questo riproduce il comportamento classico del raggio.

Se il fotone passa, assume la polarizzazione del polarizzatore, quindi la polarizzazione precedente e' indeducibile. Nello stesso senso della misura di posizione (nella interpretazione ortodossa della MQ) la “funzione d'onda” determina la probabilita' del risultato di una misura di polarizzazione, non determina la probabilita' che il fotone “avesse” quella polarizzazione prima della misura.



Polarizzazione di due fotoni

- Consideriamo un sistema di due fotoni, A e B; le cui funzioni d'onda di polarizzazione denotiamo con l'apice A e B rispettivamente.
- Una funzione d'onda del sistema allora si può ottenere facendo il prodotto $\Psi_{\alpha}^A \Psi_{\beta}^B$ e descrive la situazione in cui il fotone A “ha” polarizzazione α e quello B “ha” polarizzazione β
- Ma poiché le funzioni d'onda si possono sommare possiamo considerare anche somme del tipo
- $\Psi_{\alpha}^A \Psi_{\alpha}^B + \Psi_{\beta}^A \Psi_{\beta}^B$. Funzioni d'onda di sistemi composti come questa, che non possono essere scritte come prodotto delle funzioni d'onda dei sistemi componenti sono dette “entangled” e non hanno alcun analogo classico

Il principio di realta'

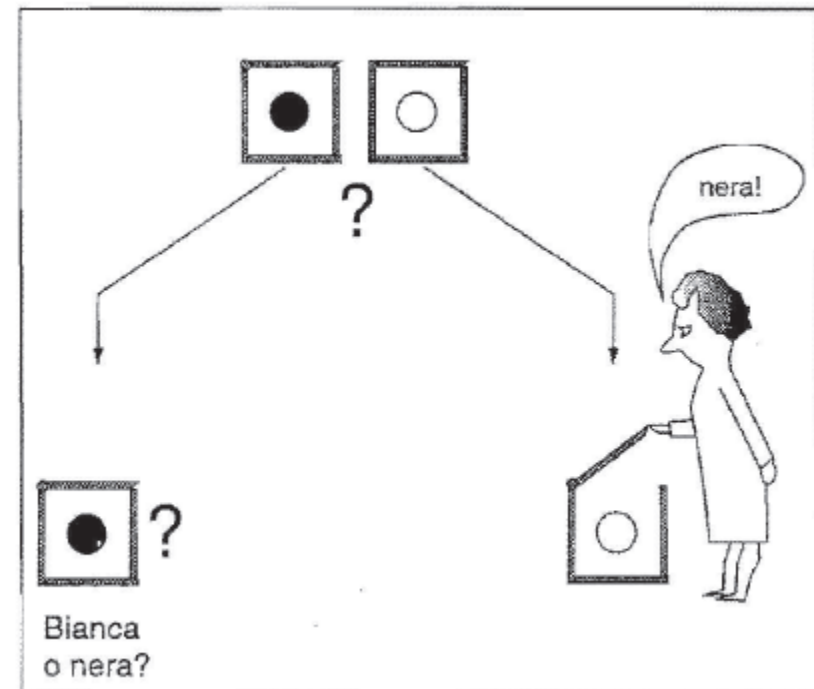
- Vogliamo ora discutere la compatibilita' di due principi base di una visione realista della fisica, principio di realta' e principio di localita', prima applicandoli alla fisica classica, poi a quella quantistica.
- Principio di realta' (R) : se senza intervenire su un sistema fisico e' possibile prevedere con certezza il valore di una sua grandezza fisica (se venisse misurata), allora tale valore e' una proprieta' oggettiva del sistema indipendente da osservatori esterni.
- (Possiamo considerare questo principio come un esempio di versione "fisica" di controfattualita')

Il principio di localita'

- Abbiamo visto che la Relativita' (con la sua verifica sperimentale) assicura che nessun segnale viaggia a segnali maggiori di c . E' naturale quindi in un approccio realista alla fisica formulare
- Principio di Localita' Einsteiniana (L): se durante un intervallo di tempo due sistemi sono a distanze maggiori di quelle percorribili dalla luce in tale intervallo (distanze di tipo spazio), allora durante tale intervallo l'evoluzione delle proprieta' fisiche di uno di essi non possono essere influenzate da operazioni eseguite sull'altro

Realta' e localita' in fisica classica

- Consideriamo un insieme di coppie di palle (classiche) che si muovono una verso destra (A) e l'altra verso sinistra (B), di cui sappiamo solo che una e' bianca e una nera, ma non sappiamo quale, e la distribuzione dei due colori e' casuale. Quando A e' a distanza di tipo spazio da B osserviamo il colore di A. Per induzione allora sappiamo il colore di B con certezza anche senza osservarlo.



R+L, Compatibilita' classica

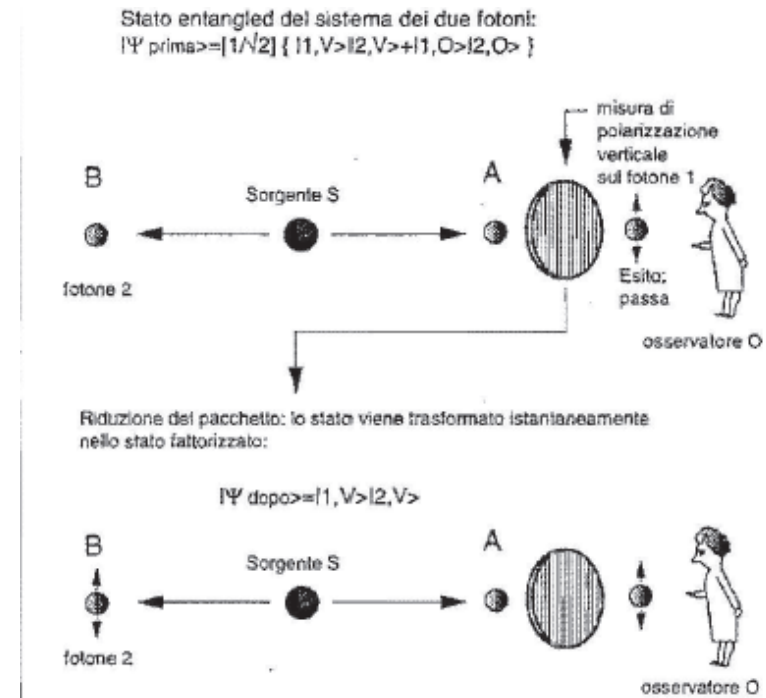
- Per il principio di realta' il colore delle palle B e' una proprieta' oggettiva, e per il principio di localita' questa proprieta' preesisteva alla misura almeno finche' la distanza tra le palle A e B era di tipo spazio. L'insieme di B e' costituito circa di meta' di palle bianche e di meta' di nere, l'unica differenza tra prima e dopo la osservazione di A e' che prima non sapevamo quali delle coppie avevano la nera (o la bianca) a destra e dopo la misura si'. La nostra informazione si e' dunque accresciuta con la osservazione, ma compatibilmente a una "realta' preesistente". Non emerge dunque nessuna contraddizione: realta' e localita' sono compatibili con la fisica classica

Realta' e localita' in fisica quantistica:EPR

- Il cosiddetto paradosso EPR (Einstein-Podolski-Rosen 1935) e' basato su un analogo quantistico dell'esperienza classica discussa precedentemente, con una funzione d'onda entangled per la polarizzazione (analogo del colore) di due fotoni (analogo delle palle)
- Una sorgente emette coppie di fotoni con polarizzazioni entangled ($\Psi_{\alpha}^A \Psi_{\alpha}^B + \Psi_{\beta}^A \Psi_{\beta}^B$, $\beta \perp \alpha$) con A che si muove verso sinistra e B verso destra.
- Quando i fotoni A e B sono a distanze di tipo spazio i fotoni A passano attraverso un polarizzatore lungo α .

Misure di polarizzazione

- Circa la meta' passa e dopo la misura come sappiamo la funzione d'onda dei due fotoni diventa $\Psi_{\alpha}^A \Psi_{\alpha}^B$ e quindi siamo certi che i corrispondenti fotoni B hanno polarizzazione α (se misurata) e circa la meta' non passa e quindi siamo certi che i corrispondenti fotoni B hanno polarizzazione β (se misurata). La polarizzazione dei fotoni B e' per il principio di realta' una proprieta' oggettiva e per il principio di localita' preesisteva alla misura almeno finche' A e B erano a distanze di tipo spazio.



R+L, Incompatibilit  quantistica

- Ma la funzione d'onda di tutte le coppie prima della misura era $\Psi_{\alpha}^A \Psi_{\alpha}^B + \Psi_{\beta}^A \Psi_{\beta}^B$ e non per meta' delle coppie $\Psi_{\alpha}^A \Psi_{\alpha}^B$ e per meta' $\Psi_{\beta}^A \Psi_{\beta}^B$, le due descrizioni danno luogo a effetti fisici diversi e sono quindi diverse.
- Emerge dunque una contraddizione: se la funzione d'onda e' la descrizione massimale (completezza C) dei sistemi quantistici (interpretazione ortodossa della MQ) allora realta' e localita' sono incompatibili con la fisica quantistica.

Le 3 alternative : no R

- Per risolvere il paradosso EPR ci sono dunque a priori 3 strade:
- 1) rinunciamo al principio di realta' (posizione ortodossa) dichiarando che anche se so con certezza il valore di un grandezza fisica senza disturbare il sistema, a questo non posso attribuire un carattere oggettivo indipendente dalla misura, non posso in particolare estrapolare l'informazione all'indietro nel tempo prima della misura che ha consentito di ottenere il valore anche se conosco la dinamica del sistema osservato (conoscendo posizione e velocita' della Terra e della Luna (classici) e la loro dinamica estrapolando indietro nel tempo posso sapere le loro proprieta' milioni di anni fa, ad esempio la lunghezza del giorno e verificarla sperimentalmente, di due fotoni (quantistici) la cui polarizzazione e' entangled neppure per un istante prima della misura della polarizzazione di uno, anche conoscendo la dinamica, posso dedurre la polarizzazione precedente.)

- **Abbandono del principio di realta'** : Significa in sostanza sostenere che la funzione d'onda non e' una proprieta' del sistema fisico indipendente dall'osservatore, ma e' un oggetto matematico che sintetizza un insieme massimale di informazioni che l'osservatore ha su di esso. La MQ e' un paradigma che consente di conoscere l'evoluzione temporale dell'informazione. Il principio di localita' (riduzionismo) e' salvato in EPR dal fatto che le osservazioni modificano le nostre conoscenze sui sistemi, non le loro proprieta' oggettive.

No L

- 2) rinunciamo al principio di localita' per la funzione d'onda: una misura modifica istantaneamente la funzione d'onda (oggettiva, assumendo il principio di realta', applicabile perche' ripetendo più volte misure su uno stato incognito prodotto più volte si riesce a prevederlo - tomografia quantistica) a distanze arbitrariamente grandi. Non si puo' dunque prolungare all'indietro nel tempo l'informazione neppure se i sistemi sono a distanze di tipo spazio, perche' eventuali modifiche della funzione d'onda avvengono istantaneamente.

No L

- Fortunatamente si puo' dimostrare che usando tali modifiche non si possono trasmettere comunque informazioni a velocita' maggiore di c , quindi (in visione strumentalista) la relativita' non e' violata.
- In questo caso il sistema di due fotoni entangled e' considerato come un tutto indivisibile. Il realismo e' mantenuto a prezzo della rinuncia al riduzionismo (che sostiene che un sistema e' la somma dei suoi costituenti).
- Un micro-oggettivismo dei sistemi e' insostenibile. Rimane la speranza di un macro-oggettivismo almeno per la materia nel suo stato normale (se e' superfluida ci sono gia' esperimenti che lo mettono in dubbio...)

No C

- 3) rinunciamo alla “completezza” (o massimalita’) della descrizione fornita dalla MQ. Il fatto che dopo la misura di polarizzazione dei fotoni A I fotoni B “hanno” individualmente alcuni polarizzazione α altri β , senza che siano stati disturbati, puo’ far supporre che tale proprieta’ l’avessero anche prima della misura (un po’ come le palle classiche), solo che la funzione d’onda entangled, che e’ la stessa per tutte le coppie di fotoni prima della misura, non aveva questa informazione. La descrizione in termini di funzioni d’onda non ha quindi in genere la informazione massimale, ma da’ solo informazioni probabilistiche come media di “variabili nascoste” che sarebbero le vere “proprieta’ reali” (un po’ come in meccanica statistica l’energia media delle particelle “reali” riproduce la Temperatura termodinamica)

No C? Il teorema di Bell

- Il principio di realta' e di localita' sembrano cosi' naturali che la prima tentazione (almeno per un realista) e' quella di prendere l'opzione 3) e rinunciare alla "completezza".
- Questa scelta pero' e' messa in crisi dal teorema di Bell (1964) che dimostra che se volessimo vedere la MQ come una media su variabili nascoste locali, allora le correlazioni tra le polarizzazioni di due fotoni entangled in varie direzioni definite tramite la media di variabili nascoste, soddisfano una diseguaglianza che e' violata dalle predizioni della MQ.

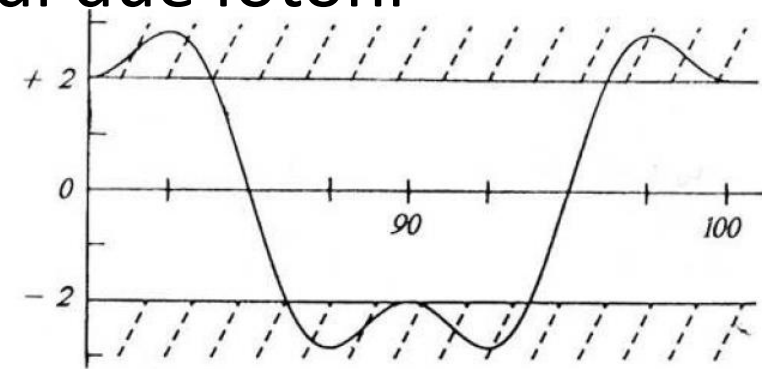


Fig. 5. $S(\theta)$ come previsto dalla meccanica quantistica per coppie nello stato (1). Il conflitto nasce nella zona tratteggiata.

No C solo se no L

- Gli esperimenti hanno poi verificato con grande precisione le predizioni della MQ, eliminando la possibilità di un completamento realistico locale della MQ e lasciando solo le opzioni 1) no R e 2) no L come soluzione del paradosso EPR.
- Si dimostra che in un completamento non locale deterministico della MQ necessariamente le “variabili nascoste” devono rimanere sconosciute anche in linea di principio altrimenti sarebbe possibile mandare segnali a velocità maggiore di c , violando la relatività (inaccettabilmente) anche in senso strumentalista.

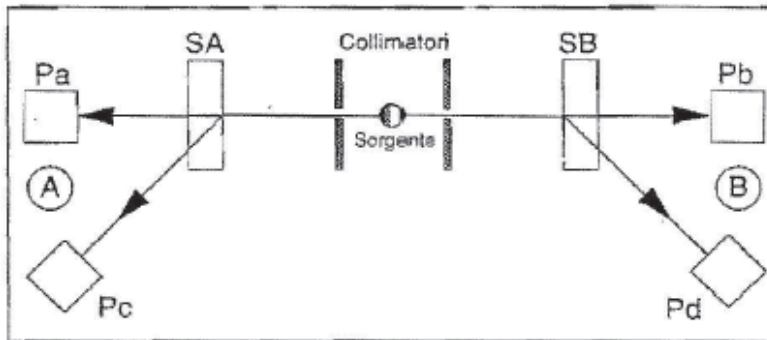
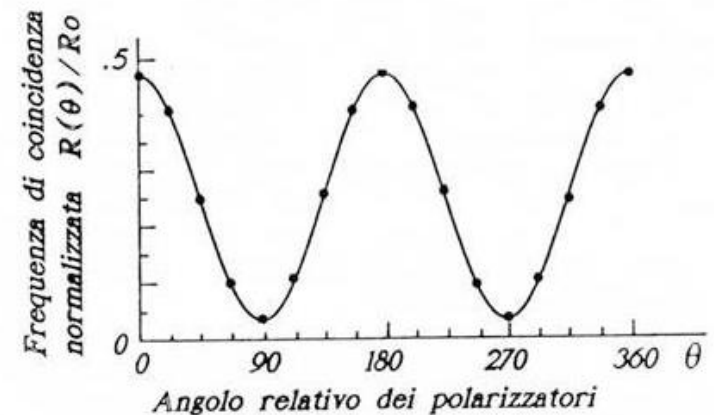


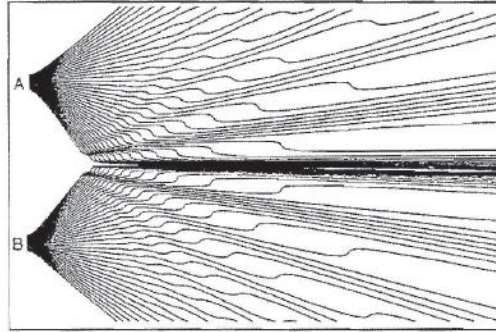
Fig. 10.3. L'esperimento di Aspect e collaboratori che rappresenta la più convincente prova sperimentale della nonlocalità quantistica.



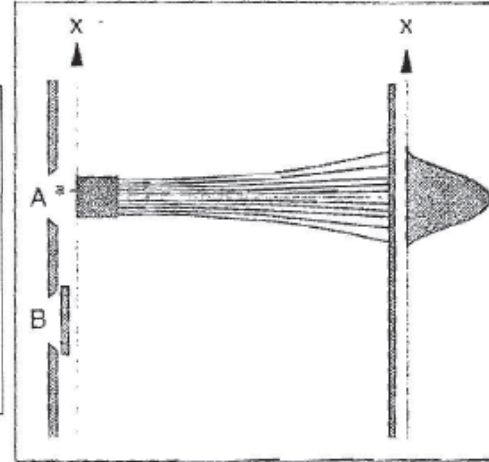
No L: Bohm

- Un esempio di “completamento” realista, deterministico non locale della MQ e' fornito dal formalismo di Bohm (equivalente a MQ, ma solo non relativistica).
- In tale formalismo le variabili nascoste sono le posizioni della particella x nella funzione d'onda $\psi(x)$. Per avere una descrizione “deterministica” delle traiettorie occorre definire anche la velocità, che è ottenuta da una equazione della forma $v(t)=F(\psi(x,t))$
- E' non-locale nelle x : una modifica dell'apparato di misura si riflette istantaneamente sulle traiettorie

B aperta

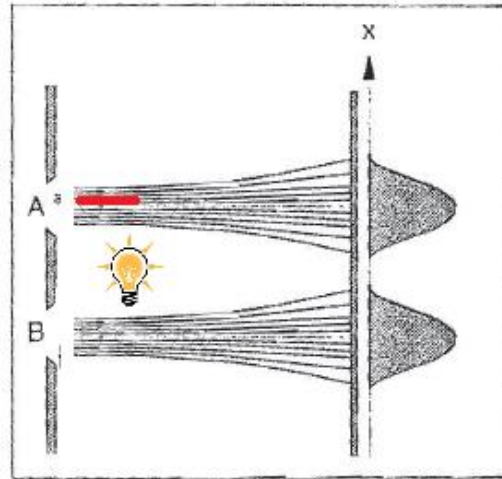
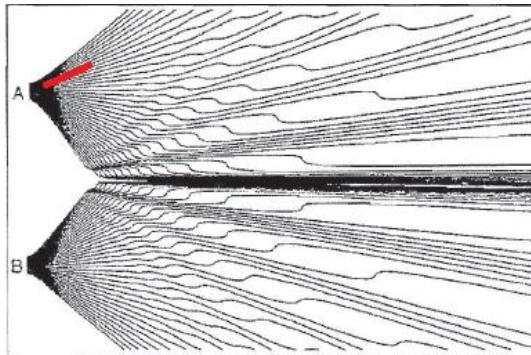


B chiusa



- Ma, peggio, per altre variabili come la velocità v , è contestuale, cioè il valore di v dipende dall'intera disposizione sperimentale, anche incontrata nel futuro.

v



Il prezzo per un realismo deterministico è la contestualità...

Proprieta' della "realta' quantistica"

- La MQ ci obbliga a rivedere alcune nozioni sulla "realta' fisica" che la nostra esperienza, formalizzata dalla fisica classica, ci aveva abituato a pensare come "naturali". Le nuove proprieta':
- **Indeterminismo** . Anche una conoscenza massimale del sistema ad un istante non ci consente la previsione certa dei risultati di misure: la "realta' quantistica" in ambito predittivo e' intrinsecamente indeterministica .
- Nella interpretazione "realista" di Bohm, che tuttavia non ha a tutt'oggi estensione relativistica , questo indeterminismo e' epistemico ma non superabile neppure in linea di principio e in genere contestuale.

Proprieta' di MQ: nuova probabilita'

- **Struttura probabilistica non classica** La probabilita' di ottenere un risultato in una misura e' determinata dal modulo quadro della funzione d'onda del sistema. La struttura probabilistica in caso di alternative non osservate, mutuamente esclusive se fossero osservate, non e' determinata (come nel caso classico epistemico) dalla somma delle probabilita' (somma dei moduli quadri delle funzioni d'onda) ma dalla probabilita' associata alla somma delle funzioni d'onda e presenta il fenomeno di interferenza delle probabilita' (incomprensibile anche in contesto statistico classico) .

- **Osservazione=disturbo** Il sistema osservato si comporta in modo diverso da come si comporta se non e' osservato. La struttura probabilistica in presenza di osservazione di alternative mutuamente esclusive diventa quella della probabilita' classica di natura epistemica (somma dei moduli quadri delle funzioni d'onda) .
- **Indeterminazione** Non posso conoscere simultaneamente con precisione arbitraria tutte le grandezze fisiche (in particolare x e p : Principio di indeterminazione di Heisenberg). La massima informazione (accessibile) sul sistema e' data dalla funzione d'onda.

Conclusioni

- Ricordiamo che tutte le proprietà sconvolgenti del mondo dei fenomeni quantistici, la “**realta' quantistica**” di cui abbiamo parlato, e' conseguenza della sola **costante di Planck**, se essa svanisse essi svanirebbero, i corpi sarebbero attraversabili e cosa piu' importante... non funzionerebbero i cellulari...