



- L'esperimento della doppia fenditura (video)
- Ampiezza di probabilità funzione d'onda. Evoluzione della funzione d'onda
- Collasso della funzione d'onda
- Interferometro Mach-Zender
- Interferenza Co60 Zeilinger, Constance
- Interferenza a due particelle, interferometro di Franson (Scarani 6.2)
- Esperimenti di Aspect e Gisin a Ginevra
- Tentativo di interpretazione 1: Collasso e problemi relativi con relatività e località (Scarani e Penrose – La mente nuova dell'imperatore cap. 6)
- Tentativo di interpretazione 2: Everett many worlds e variante many minds c. sopra e B. Green: La trama del cosmo cap 4)
- Tentativo di interpretazione 3: Onde pilota
- Tentativo di interpretazione 4: 't Hooft e una spiegazione deterministica, libero arbitrio
- L'esperimento before-before di Scarani e Suarez
 (<http://www.informationphilosopher.com/solutions/scientists/suarez>http://www.informationphilosopher.com/solutions/scientists/penrose/#Andromeda_Paradoxz/ ,
<http://quantalk.org/107> , http://sdsu-physics.org/physics180/physics180B/chapstuff/quantum_freewill.html

1. Doppia fenditura.

Per familiarizzarci con l'argomento guardiamo il video:
<http://www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc>

In sintesi una particella come l'elettrone passa "contemporaneamente" attraverso le due fenditure. Sullo schermo si crea un sistema alternato di zone "illuminate" e zone buie. Le zone illuminate sono quelle dove le onde che passano attraverso le due fenditure seguono cammini uguali o che differiscono di una o più lunghezze d'onda (la distanza tra due picchi o due valli dell'onda) si dice in questo caso che le due onde sono in fase. Le zone buie sono quelle dove le due onde si incontrano in opposizione di fase con i cammini che differiscono di multipli di mezza lunghezza d'onda.

L'esperimento descritto era fino ad epoca recente un *gedanken experiment* anche se nessuno dubitava che descrivesse la realtà. L'esperimento della doppia fenditura fu eseguito per la prima volta utilizzando elettroni da Claus Jönsson dell'Università di Tubinga nel 1961. Fu quindi ripetuto nel 1974 a Bologna da Pier Giorgio Merli, Gianfranco Missiroli e Giulio Pozzi, che però inviarono un elettrone alla volta sulla lastra fotografica. L'idea di Merli e dei suoi collaboratori fu quella di utilizzare un microscopio elettronico sia come interferometro che come sorgente di elettroni, facendo passare gli stessi attraverso un biprisma elettronico, come originariamente concepito da Gottfried Möllenstedt. I risultati dell'esperimento del 1974, nonostante fossero stati pubblicati e nonostante fosse anche stato realizzato un documentario in proposito (<http://www.youtube.com/watch?v=7z-fZfgubWg>), andarono pressoché ignorati, tant'è che, quando nel 1989 Akira Tonomura e collaboratori ripeterono l'esperimento, lo si considerò erroneamente il primo ad aver verificato questo risultato previsto dalla meccanica quantistica (<http://rdg.ext.hitachi.co.jp/rd/moviee/doubleslite-n.wmhttp://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.htmlv>),). L'esperimento è stato fatto anche con molecole come fluorofullereni con 60 atomi di carbonio e 48 di fluoro (http://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento_della_doppia_fenditura). Al dip.to di fisica di Perugia c'è un apparato didattico per l'interferenza da fotone singolo.

Ricordiamo che la differenza principale tra un'onda ed una particella è che l'onda è delocalizzata, pensate ad es. alle onde sull'acqua. Ricordiamo che per l'interpretazione dell'effetto Compton è necessario attribuire alla luce un aspetto corpuscolare con quanti di luce (detti fotoni) di energia $E=h\nu$ dove h è una grandezza fondamentale detta costante di Planck al giorno d'oggi conosciuta con una precisione di sette cifre decimali [$6.62606957(29) \times 10^{-34}$ J.s] che interviene nei processi microscopici, mentre gli esperimenti che mostrano la natura ondulatoria di elettroni sono in accordo con l'ipotesi di De Broglie di una frequenza associata alla particella data dalla stessa relazione. L'impulso della particella è dato dalla relazione della relatività ristretta $cp = \beta E$

2. Ampiezza di probabilità., funzione d'onda

Il comportamento ondulatorio degli elettroni ci dice che un elettrone non è mai perfettamente localizzato in un punto dello spazio tra la sorgente e lo schermo proprio come un'onda. La meccanica quantistica introduce una funzione d'onda indicata quasi universalmente con la lettera ψ e la $\psi(x)$ dove la x indica le coordinate spaziali della particella ci fornisce una ampiezza di probabilità nel senso che il modulo quadro della funzione d'onda che, per rappresentare correttamente i fenomeni di interferenza deve essere un numero complesso, ci fornisce la probabilità di presenza dell'elettrone in x . I numeri complessi si usano perché un numero complesso incorpora sia l'ampiezza dell'onda che la sua fase. Nel caso della doppia fenditura possiamo avere che la funzione d'onda per l'elettrone è la somma di una funzione d'onda in cui l'elettrone passa per la fenditura di destra e di una funzione d'onda in cui passa in quella di sinistra: $\psi = \psi_D + \psi_S$. Per chi conosce i numeri complessi si ha

$|\psi|^2 = (\psi_D^* + \psi_S^*) \cdot (\psi_D + \psi_S) = |\psi_D|^2 + |\psi_S|^2 + (\psi_D^* \psi_S + \psi_S^* \psi_D)$, dove l'ultimo termine rappresenta l'interferenza.

Effettuando una analisi in termini di frequenze (o di impulsi, v. relazioni precedenti) detta analisi di Fourier, si vede che esiste una correlazione tra la probabilità di presenza ed il contenuto in termini di frequenze. Se si ha una onda localizzata in una determinata regione dello spazio di dimensioni Δx il corrispondente intervallo di impulsi è Δp ed è valida la relazione $\Delta x \cdot \Delta p = h/(2\pi)$ che esprime il cosiddetto principio di incertezza di Heisenberg. Questa relazione implica che non si possono conoscere contemporaneamente con assoluta precisione le due variabili posizione ed impulso per una particella. Poiché l'impulso dipende dalla massa questa relazione è rilevante per oggetti microscopici, per un oggetto macroscopico come un'auto che viaggia a 100km/h l'indeterminazione sulla posizione è del tutto irrilevante a qualunque fine. Una relazione simile esiste per il tempo e l'energia $\Delta t \cdot \Delta E = h/(2\pi)$, con una importante differenza di principio. Nel formalismo della MQ il risultato di una misura è legato alla presenza di un "operatore" che è una entità matematica. Mentre esiste un operatore posizione il tempo compare nel formalismo della MQ solamente come un parametro. Una manifestazione di questo principio di indeterminazione è evidente in acustica. Per accordare uno strumento che emette note di bassa frequenza occorre tenere la nota per un tempo sufficientemente lungo per aver un suono di frequenza sufficientemente definita come si nota quando si sentono sinfonica accordare gli strumenti di una grande orchestra sinfonica. Una precisa definizione di questi intervalli richiede un po' di analisi matematica, ma chiaramente le probabilità di presenza vanno lentamente a zero al di fuori di questi intervalli. Quando gli elettroni arrivano sullo schermo avviene qualcosa di nuovo la probabilità di presenza si concentra in un punto. Lo stesso avviene se si cerca di individuare da quale delle due fenditure "è passato" l'elettrone operazione che come detto distrugge la figura di interferenza. Nel 1926 Erwin Schrodinger aveva proposto un'equazione per l'evoluzione della funzione d'onda che è tuttora valida e permette, con le sue versioni relativistiche dovute a Paul Dirac e i fisici Klein e Gordon di calcolare molte proprietà dei sistemi di una particella. L'equazione è il corrispettivo delle equazioni della dinamica e delle equazioni di Maxwell per la funzione d'onda. La storia è curiosa (<http://bressanini-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it/2007/12/22/la-birra-quantistica/>, <http://www.ildiogene.it/EncyPages/Ency=Schrodinger.html>)

Il matematico Hermann Weyl, caro amico di Schrödinger, disse che questa equazione era il risultato di un "tardivo scoppio erotico". Aveva 38 anni quando la scoprì e a quanto pare per il buon Erwin, che aveva molte amanti, il sesso non era meno importante della fisica. Nel 1925, qualche giorno prima di natale, Schrödinger partì per una vacanza sulle alpi svizzere, ad Arosa. Lasciò sua moglie a Zurigo, ma con se portò la tesi di [Louis de Broglie](#), altro futuro Nobel, e una delle sue amanti (rimasta sconosciuta). A quanto pare si chiuse nel rifugio alpino alternandosi tra letto e scrivania. Scenderà dalle alpi il 9 gennaio 1926, con l'equazione che rivoluzionerà la fisica.

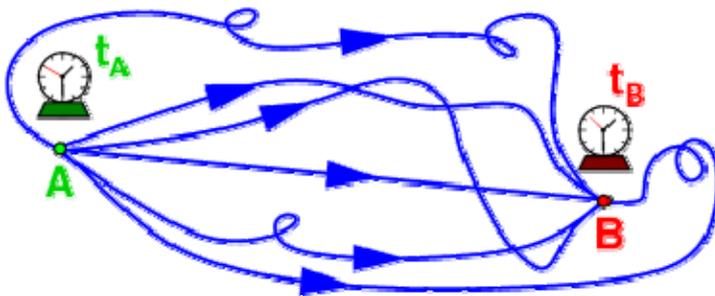
La situazione dell'evoluzione di un sistema microscopico era già stata chiarita da John von Neumann negli anni trenta nel testo "Matematiche Grundlagen der Quantenmechanik (I fondamenti matematici della meccanica quantistica – il Poligrafo 1998).

- a) Quando non si effettuano misurazioni, gli stati di tutti i sistemi fisici evolvono, senza eccezione alcuna in conformità delle equazioni dinamiche del moto (ad es. eq. Schroedinger)
- b) Quando vengono effettuate misurazioni gli stati dei sistemi oggetto di misurazione evolvono in conformità del postulato del collasso (l'elettrone arriva in un punto preciso dello schermo nell'esperimento delle due fenditure)

Usando una terminologia introdotta da Roger Penrose chiamiamo U il primo processo ed R il secondo. U è un processo puramente deterministico non diversamente dalle equazioni della dinamica, mentre R e solo R introduce incertezze e probabilità nella MQ.

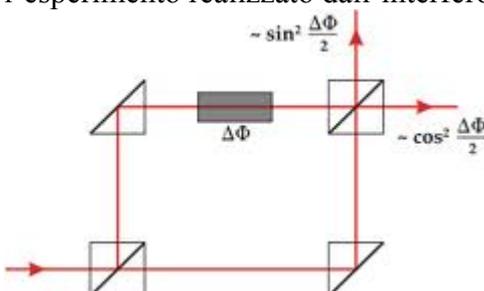
In questa formulazione R è legato alla misura cioè ad una interazione con un sistema macroscopico e, secondo alcuni anche con l'esistenza della coscienza dello sperimentatore (Wigner 1961). Come si vede il processo R pone non pochi problemi interpretativi (Per un esame dettagliato che è necessariamente troppo sottile per essere esposto in un seminario si può vedere ad es. David Z. Albert: Meccanica quantistica e senso comune, Adelphi 2000) D'altro canto anche l'interpretazione realistica del processo di collasso appare discutibile da un punto di vista fisico e decisamente contraria al senso comune. Come detto, in assenza di misura un elettrone che ha la probabilità massima di trovarsi in un dato punto ha una probabilità non nulla di trovarsi ad es. su Andromeda. Se diamo una interpretazione realistica come sembra suggerito dall'esperienze delle due fenditure cioè affermiamo che in assenza di misura l'elettrone si trova contemporaneamente qui e su Andromeda, come può essere che una misura qui ed ora influenzi una posizione chiaramente casualmente disconnessa in maniera istantanea? Come vedremo esistono altri risultati per il caso di una singola particella e ancor più nel caso di particelle accoppiate o come si dice entangled che sfidano la nostra comprensione. Torneremo sulle interpretazioni del collasso della funzione d'onda dopo aver esaminato altri casi. Ma restiamo per un attimo al problema del collasso della funzione d'onda per casi di particella singola in relazione anche alla dimensione temporale. La nostra idea del tempo è fortemente legata ad una continuità deterministica. Pensiamo ad un passato ben preciso dalla cui evoluzione nasce il presente ma il collasso della funzione d'onda mette in questione questa visione. Se sappiamo che un elettrone è qui ed ora non abbiamo idea di dove fosse nel passato! Dopotutto, un elettrone si sarà trovato come risultato di qualche interazione in qualche posizione nel passato ad esempio nel filamento di una sorgente di elettroni, come si propaga nel tempo e nello spazio per dare luogo alla funzione d'onda che lo descrive in un tempo posteriore ed in una diversa posizione? Una interpretazione della meccanica quantistica che si rivela compatibile con le nozioni abituali è quella di R. Feynman della somma su molti cammini (sum over histories).

The probability of a particle going from A to B is found by adding the up the waves associated with every possible path that passes through A and B. (Hawking quote)

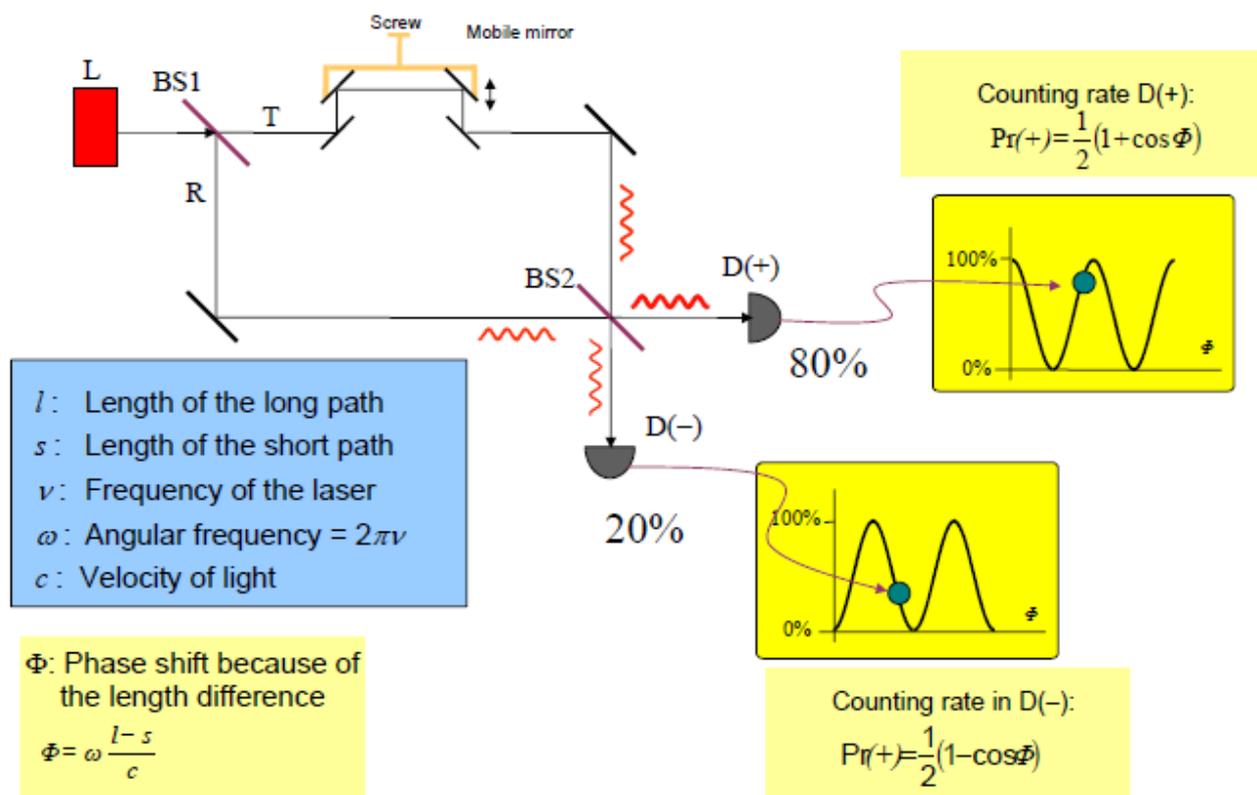


Vedi R.P: Feynman QED: La strana teoria della luce e della materia ed anche http://www.aip.org/cip/pdf/vol_12/iss_2/190_1.pdf, <http://www.eftaylor.com/index.html>

Prima di chiudere l'argomento del comportamento di una singola particella consideriamo ancor l'esperimento realizzato dall'interferometro di Mach-Zender



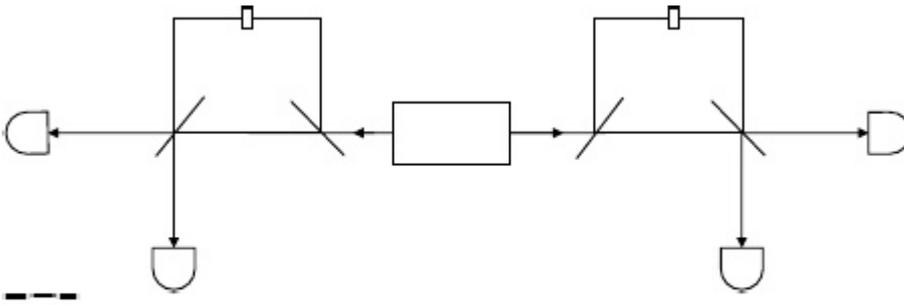
Quantum memory without material carrier



Se non c'è differenza di fase tra i due cammini possibili tutti i fotoni escono a destra. I due percorsi indistinguibili danno luogo a interferenza costruttiva. Se si modifica solo un braccio introducendo una differenza di fase questa influenza i due fasci! Questo è un risultato analogo a quello dell'esperimento della doppia fenditura. In questo caso la differenza dei percorsi è temporale mentre nel caso della doppia fenditura è spaziale. La differenza di fase è introdotta da una diversa lunghezza dei bracci e si ha interferenza fino a differenze di cammino pari alla lunghezza di coerenza che è data dalla estensione spaziale dei pacchetti d'onda. L'interferenza si ha indipendentemente dalla lunghezza dei cammini dei fasci e quindi della distanza tra i cammini del fotone!!! Una analisi dettagliata deve tener conto delle differenze di fase introdotte nelle riflessioni. E' da notare che il rivelatore di onde gravitazionali Virgo è basato sulla misura della interferenza tra due bracci che riflessioni multiple portano a circa 120km. Il rivelatore non è destinato a rivelare l'interferenza di fotoni singoli ma a rivelare la variazione di lunghezza di uno dei due bracci causata da onde gravitazionali previste dalla teoria della relatività generale di Einstein.

3. Sistemi di due particelle entangled (intrecciate)

Nei sistemi subatomici si possono creare stati di due particelle totalmente correlati. Un esempio potrebbe essere il decadimento da fermo di una particella chiamata pione neutro (esistono anche pioni carichi) in due fotoni o l'annichilazione di un sistema legato elettrone positrone. In questi casi per la conservazione dell'impulso i due fotoni devono avere la stessa velocità in direzioni opposte. Consideriamo l'interferometro in figura (proposto da Franson nel 1989)



Interferometro di Franson.

I fotoni possono percorrere un cammino lungo L o corto S . In questo caso secondo la MQ se un rivelatore rivela un fotone L si ha il collasso della funzione d'onda che forza il secondo fotone ad essere anche esso L e lo stesso avviene per i fotoni S . L'intreccio quantistico forza di due fotoni allo stesso comportamento anche in zone distinte spazialmente.

Le particelle rivelate possono aver seguito un cammino breve o lungo. Si danno perciò quattro casi: LL , LS , SL , SS

Si misurano i tempi di arrivo sui rivelatori. Se non si conosce il tempo di emissione i due casi LS e SL sarebbero comunque distinguibili dai tempi di rivelazione. Nei casi LL e SS si ha indistinguibilità. Con i bracci di uguale lunghezza le due particelle sono entrambe rivelate o dai rivelatori in basso o da quelli a sinistra e destra. Variando il percorso di uno dei due rami si ha una variazione simile a quella considerata nel caso dell'interferometro di Mach-Zender.

Nell'esperimento condotto da Wolfgang Tittel, Jürgen Blondel, Nicolas Gisin a Ginevra la sorgente di fotoni correlati è stata ottenuta irradiando mediante un laser un cristallo che casualmente assorbe un fotone emettendo due fotoni con conservazione di energia ed impulso. L'istante di conversione è casuale all'interno del tempo di coerenza del laser, condizione essenziale per indistinguibilità degli eventi LL e SS .

Il fatto stupefacente è che nell'esperimento i fotoni siano stati fatti viaggiare nelle fibre ottiche della rete telefonica svizzera per 20Km.

Ma per capire come il risultato sia in accordo con la meccanica quantistica occorre fare un passo indietro e parlare del paradosso EPR (dalle iniziali di Einstein, Podolski, Rosenfeld)

Abbiamo visto che la dualità onda-particella implica il principio di indeterminazione per cui non è possibile conoscere contemporaneamente posizione e velocità di una particella. Allo stesso modo il principio di indeterminazione stabilisce che altre coppie di grandezze come il tempo di un evento e l'energia. Vedremo in seguito un'altra coppia di grandezze legate in modo simile.

Nel caso in cui ci sia uno stato entangled di due particelle come nel caso dell'esperimento di Ginevra questo implica determinate correlazioni tra quanto registrato dai due interferometri. È più facile visualizzare l'argomento di EPR pensando alla coppia di variabili velocità (legata all'impulso) e posizione. Pensiamo allora a due particelle legate come nell'esperimento di Ginevra che si muovano rispettivamente verso sinistra e verso destra. Se misuriamo la posizione ad un certo istante della posizione della particella che va verso destra, sappiamo per le leggi di conservazione che in quell'istante la posizione della particella che verso destra deve essere la stessa, anche senza averla misurata e naturalmente viceversa. Lo stesso vale se misurassimo le velocità. Pertanto se possiamo misurare velocità della particella che va verso destra, e la posizione di quella che va verso la sinistra, ad es., anche se queste sono legate dal principio di indeterminazione avremmo un

indirettamente misurato posizione e velocità per le due particella. La posizione e la velocità della particella che va verso sinistra devono essere pertanto caratteristiche “reali” della particella anche se la meccanica quantistica non è in grado di predirle. Ne consegue, secondo EPR, che la meccanica quantistica fornisce una descrizione incompleta della realtà e che esistono altre variabili (dette variabili nascoste) in grado di risolvere questa incompletezza in analogia con quanto avviene nei processi probabilistici classici come ad esempio nel lancio di una moneta. In questo caso ci sono variabili nascoste nella visione comune che se note permetterebbero di predire con esattezza da quale parte cade la moneta.

Il fisico John Bell nel 1964 si accorse che le correlazioni previste dalla meccanica quantistica differivano comunque da quelle previste dalle teorie deterministiche. Nell'esperimento citato una correlazione costruita con le misure effettuate dai due rami è limitata al valore $S = 2$ per la fisica classica da una variante del teorema di Bell mentre il valore previsto dalla MQ è $S = 2\sqrt{2}$.

La disuguaglianza di Bell era stata inizialmente stabilita per un tipo di stati entangled diverso da quello dell'esperimento di Gisin. La proposta di considerare disuguaglianze simili a quella originaria di Bell per stati time-energy entangled è dovuta a J.D Franson (Bell Inequality for Position and time PRL 62,19 8 may 1989)

I risultati sono ovviamente in accordo con l'idea del collasso della funzione d'onda. La misura di uno dei due fotoni provoca il collasso della funzione d'onda del sistema di due particelle forzando per così dire la seconda particelle in uno stato ben definito.

Questo dimostra che la meccanica quantistica è una teoria non locale.

E' tutto questo in contraddizione con la teoria della relatività ristretta? La risposta è no, poiché non c'è trasferimento di informazione tra una particella e l'altra. Il confronto dei risultati delle due misure deve essere effettuato con un metodo convenzionale che si propaga con velocità inferiore a quello della luce come nei “canali classici” della figura dell'apparato sperimentale.

4. Stati di spin, disuguaglianza di Bell, esperimenti di Aspect

Le correlazioni previste nell'esperimento citato sono legate all'intreccio spazio-temporale ed al principio di indeterminazione nelle due forme citate. Originariamente EPR avevano pensato ad un esperimento in cui c'è uno stato di fotoni o elettroni intrecciato per quanto riguarda la polarizzazione dei fotoni o lo spin degli elettroni. Come è noto la luce può essere polarizzata (la direzione di vibrazione del campo elettrico perpendicolare alla direzione di moto). E' possibile misurare la polarizzazione di un fotone singolo mediante polarizzatori che sfruttano lo stesso principio dei polaroid. Per la meccanica quantistica esiste un principio di indeterminazione che lega la misura della polarizzazione in una direzione con la misura della polarizzazione in una diversa direzione. Se si misura la polarizzazione in una direzione la misura della polarizzazione in una diversa direzione è indeterminata. Gli elettroni si comportano come momenti di dipolo magnetici (come un ago magnetizzato), cosa che da un punto di vista classico può essere vista come la conseguenza della rotazione (spin) attorno ad un asse. E' possibile misurare la direzione dello spin di un elettrone anche se in maniera più complessa della polarizzazione di un fotone. Anche per lo spin dell'elettrone vale un principio di indeterminazione che lega la misura dello spin in due direzioni diverse. Sostanzialmente per la conservazione del momento angolare è possibile creare coppie di elettroni che debbono avere direzioni dello spin anti-allineate in direzioni variabili (per comodità di visualizzazione penseremo di seguito al caso di spin allineati il che non cambia la sostanza dei ragionamenti) o coppie di fotoni con direzione di polarizzazione anti-allineate. La misura con i fotoni appare più facile e gli esperimenti di Aspect erano fatti per studiare la correlazione tra fotoni. La proposta iniziale di EPR era quella di studiare la correlazione tra gli spin degli elettroni.

L'idea di EPR era che la correlazione dovesse avere una spiegazione nell'ambito del determinismo classico e quindi che la correlazione fosse stabilita in partenza e non al momento della rivelazione, mentre per la visione “standard” della MQ la correlazione si spiega come un effetto a distanza o una non località della teoria. Nel 1964 il fisico Bell dimostrò una disuguaglianza, del genere di quella

vista in precedenza nel caso dell'interferometro di Hanson. che deve essere vera in ogni teoria locale e che viene violata nel caso di una teoria non locale. Se si accetta il principio di indeterminazione (cosa che EPR erano poi costretti ad accettare) non si possono misurare CONTEMPORANEAMENTE le caratteristiche delle due particelle poiché la misura di una delle due forza in un determinato stato ma occorre studiare sequenze di eventi. Una versione semplificata (N. David Mermin Physics Today April 1985) della disuguaglianza può essere data pensando, nel caso dello spin, a tre rivelatori 1,2,3 diversamente orientati (v. anche B. Green la trama del cosmo pagg. 127-130) per misurare separatamente le due particelle (ad esempio sinistra e destra) e a misure fatte in maniera casuale e indipendente sui tre rivelatori, cioè scegliendo a caso i rivelatori.. Pensiamo al risultato come a due possibili colori blu e rosso (i due possibili rispetto all'orientamento) . Supponiamo che il meccanismo delle variabili nascoste forzi ENTRAMBI i lati a fornire lo stesso colore per i rivelatori 1 e 2 a sinistra e destra. In una determinata misura da un punto di vista classico caso ci sono 9 possibilità di scelta (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3) per i rivelatori a sinistra e destra.. Supponiamo che cinque combinazioni danno luogo allo stesso colore (1,1), (2,2), (3,3), (1,2), (2,1). Le prime 3 per le correlazioni e le altre ad esempio perché possiamo pensare che la dinamica porti a questo risultato (cioè lo stesso risultato per i rivelatori 1 e 2), cioè esiste un meccanismo deterministico che porta questo risultato di avere ad es blu, blu, rosso per ognuno dei tre rivelatori (distintamente e separatamente per ogni rivelatore). Nel caso classico ogni elettrone deve dare una risposta precisa (blu o rosso) per ognuno dei rivelatori ed il caso che abbiamo considerato è quello blu, blu, rosso. Se il meccanismo è diverso come ad es. blu, rosso, rosso le cose non cambiano statisticamente. Se poi il meccanismo porta a tre colori identici si hanno 9 combinazioni su 9 con lo stesso colore. E tutto ciò è valido anche se il meccanismo cambia per ogni evento. Se gli spin dei due elettroni che vanno nei due rivelatori sono identici in un meccanismo deterministico (qualunque esso sia) devono fornire gli stessi risultati.

In totale quindi l'accordo deve essere $\geq 5/9$. Questa è la disuguaglianza di Bell che viene violata negli esperimenti di Aspect. Infatti il calcolo fatto usando le regole della MQ fornisce la probabilità $\frac{1}{2}$ per l'accordo. La differenza consiste nel fatto che la probabilità di una misura a sinistra è influenzata dalla misura a destra

5. Il problema della misura (Green pagg 242-255)

Come abbiamo visto l'idea del collasso della funzione d'onda pone non pochi problemi tra i quali quello della località (stesso tempo diverse posizioni spaziali). Nel paragrafo successivo vedremo che sussiste anche un problema legato alla evoluzione temporale e quindi anche alla causalità. Ricordo l'osservazione che la posizione di un oggetto è data da una misura mentre il tempo compare solo come parametro nella teoria. Quest'ultimo problema appare poco discusso nella letteratura non specialistica per cui mi limito ad osservazioni legate al primo tipo di problematica. Dobbiamo preoccuparci di quanto ci suggerisce la MQ sulla realtà? Una prima risposta storicamente è stata data cosiddetta interpretazione di Copenhagen della MQ. Secondo questa visione la MQ ci dà il modo di capire il mondo microscopico e di calcolare quanto avviene. Potremmo quindi contentarci di questo pensando che la fisica deve descrivere come le cose avvengono e non perché le cose avvengono in un certo modo. Tuttavia il problema della realtà è certamente di pertinenza della filosofia e questa non può prescindere dai risultati sperimentali della fisica.. Inoltre le varie teorie che possono essere alla base di una nostra visione della realtà possono dar luogo, eventualmente in un futuro remoto, a previsioni sperimentali verificabili o falsificabili. Una idea certamente affascinante è quella, proposta da Hugh Everett secondo la quale non si ha affatto collasso della funzione d'onda. Nelle situazioni in cui tale collasso sembra verificarsi si ha in realtà una biforcazione della storia dell'intero universo (interpretazione a molti mondi). A prescindere da difficoltà logiche e tecniche non è chiaro se esistano implicazioni sperimentali di una tale teoria. A parer mio la teoria ha il merito di collegarsi col principio antropico che vuole rispondere alla domanda perché siamo qui e perché il mondo intorno a noi è fatto come è fatto. E'

possibile che esistano infinità di infinità di mondi paralleli in cui le cose non stanno come stanno nel mondo in cui viviamo, certo questo è l'unico mondo che ci è dato conoscere. Esiste anche la possibilità che il risultato di una misura sia in qualche modo legato alla coscienza dello sperimentatore. Questa idea che a tutta prima sembra bizzarra può anche essere sottoposta ad una analisi che ne rivela la difficile confutazione.

Roger Penrose ritiene che il collasso della funzione d'onda sia legato ad effetti gravitazionali che possano verificarsi in determinate circostanze e lega questo problema al funzionamento della mente ed alla coscienza

(http://www.informationphilosopher.com/solutions/scientists/penrose/#Andromeda_Paradox).

Ricordiamo ancora la teoria di Schrodinger-Bohm secondo la quale la funzione d'onda è una realtà come le particelle (non c'è dualismo) e la funzione d'onda guida in qualche modo le particelle. Nell'esperimento delle doppia fenditura ad esempio la funzione d'onda attraversa le due fenditure mentre le particelle ne attraversano una, ma la probabilità di trovare la particella è alta laddove è alta la densità di probabilità data dalla funzione d'onda. La teoria di Bohm è una teoria che incorpora la non località.

Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber hanno proposto una teoria (GRW) in cui grazie ad una leggera modifica della equazione di Schrodinger si ha il collasso spontaneo della funzione d'onda anche per una particella isolata in modo estremamente raro per una particella isolata mentre in un corpo grande l'entanglement delle funzioni d'onda dovrebbe innescare un meccanismo tipo domino che porta rapidamente al collasso.

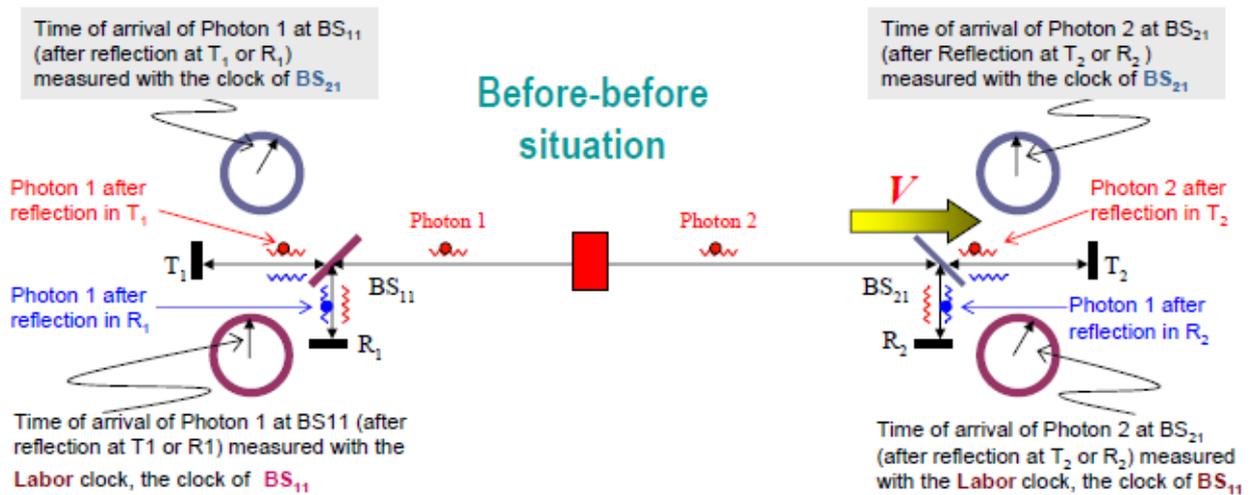
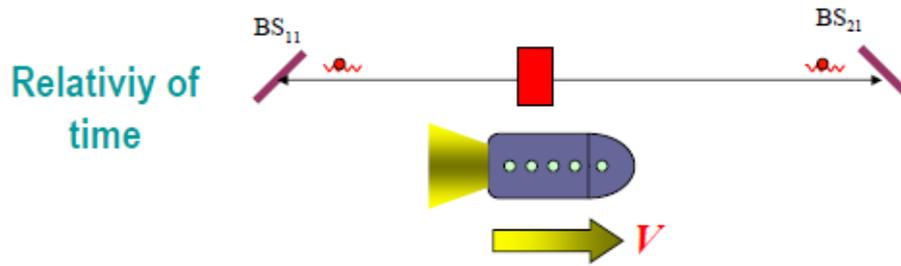
Una delle teorie più convenzionali ed anche accettate è quella della decorrenza. Negli esempi precedenti abbiamo visto il caso di sovrapposizioni lineari coerenti delle funzioni d'onda dei sistemi microscopici. Questa che è la caratteristica fondamentale delle onde (principio di sovrapposizione) è quella che permette il manifestarsi dei fenomeni di interferenza. Al contrario nei sistemi macroscopici si ha il fenomeno della somma di probabilità legate al modulo della funzione d'onda complessa, si sommano perciò le probabilità e non le ampiezze di probabilità. La transizione dal primo caso al secondo può essere spiegata dal fatto che l'interazione degli stati microscopici con l'ambiente cancella le interferenze. Anche questa teoria, a prescindere dalle difficoltà di calcolo connesse con esempi non banali, non è esente da critiche. Ad esempio: apparato macroscopico di misura e stato microscopico si evolvono comunque secondo l'equazione di Schrodinger, non è matematicamente possibile che la superposizione coerente dello stato complessivo si evolva in una somma probabilistica di stati incoerenti.

Questi sono solo cenni ad una problematica che non cessa di essere dibattuta.

6. Un ultimo soprassalto, l'esperimento before-before (A. Stefanov, H. Zbinden, N. Gisin, A. Suarez 2001 ed il delayed-choice_quantum-eraser)

Utilizzando degli separatori di fascio (beam splitter) in moto è possibile "separare" nel tempo gli eventi raccolti dagli interferometri che analizzano i due fotoni entangled. Nella relatività ristretta la simultaneità non è assoluta. Se in un sistema di riferimento un evento avviene ad un tempo t_2 successivo a t_1 l'ordine temporale può essere invertito in un sistema di riferimento in moto rispetto al primo. Questo fatto viene utilizzato nell'esperimento before-before il cui principio è illustrato nella figura.

The principle of multisimultaneity

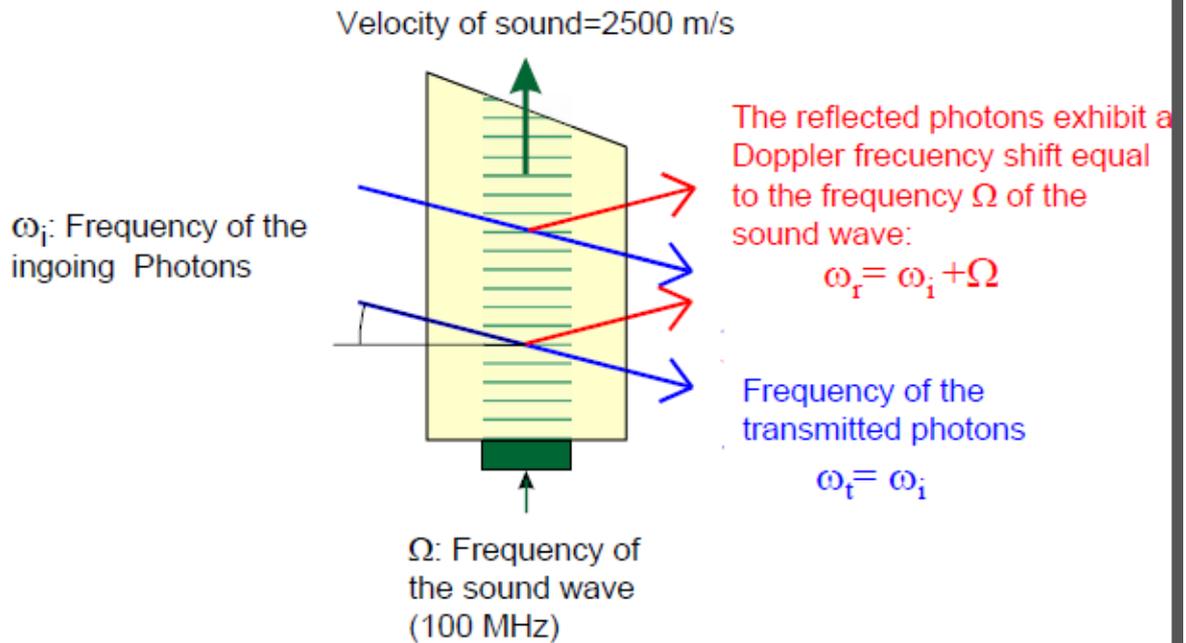


L'osservatore su BS_1 osserverà il fotone A che arriva su BS_1 prima che il fotone B arrivi su BS_2 e viceversa.

Il separatore è costituito da un modulatore elettroacustico.

Sound wave acting as beam-splitter

Acusto-optic Modulator (AOM)



Come negli altri esempi ci sono due rami in ogni interferometro s(hort) e l(ong)

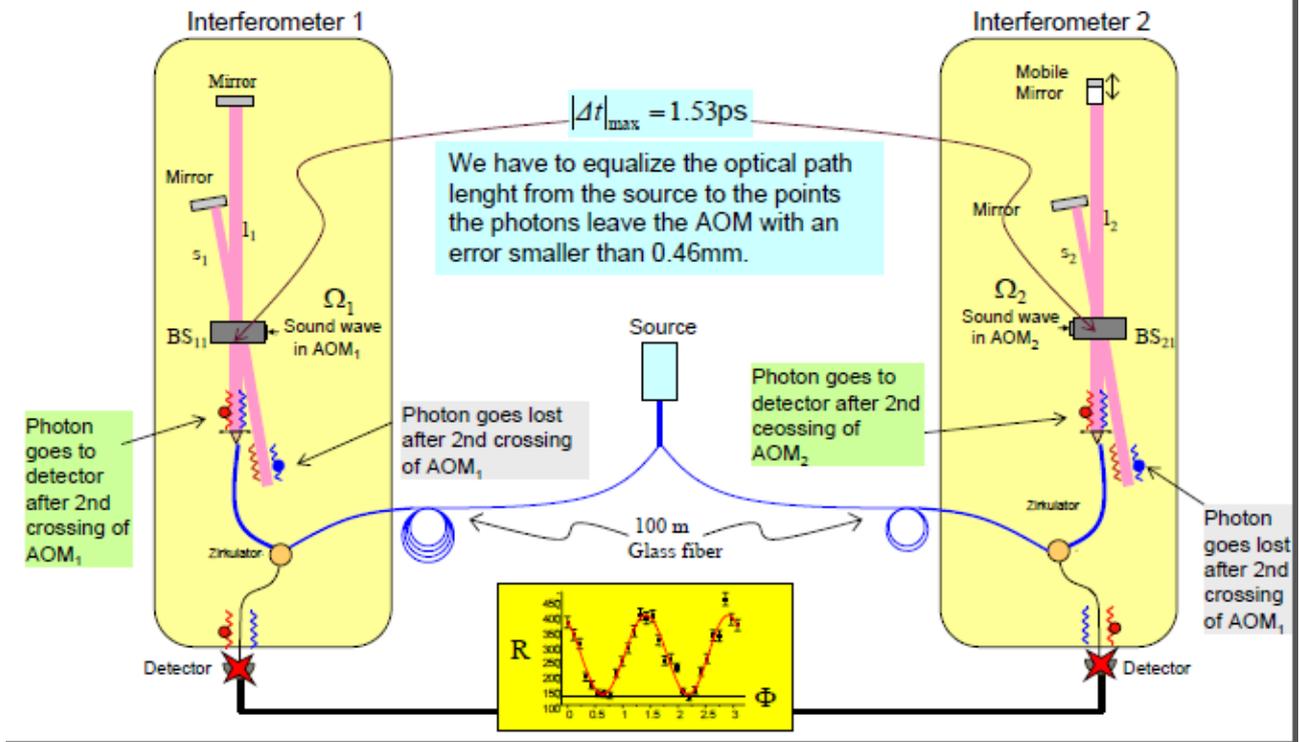
The Before-Before Experiment

$$\Delta\nu \approx 10\text{MHz}$$

$$\Delta\nu_{ph} \approx 2 \cdot 10^3\text{GHz}$$

$$R = \frac{1}{2}(1 + \cos \Phi)$$

$$\Phi = (\Omega_1 - \Omega_2)t + \omega_1 \frac{l_1 - s_1}{c} + \omega_2 \frac{l_2 - s_2}{c}$$



L'esperimento prova che le correlazioni quantistiche sono indipendenti dal tempo o, per dirlo con gli autori, che non c'è un tempo reale nel mondo quantistico!

Questi risultati hanno anche conseguenze che riguardano le teorie che tentano di spiegare i risultati della MQ come prettamente deterministici. Una simile teoria è, ad esempio quella di Gerard 't Hooft (premio Nobel per la fisica nel 1999 assieme a M. Veltman per i lavori sulle teorie di Yang e Mills che sono alla base della nostra presente concezione delle interazioni fondamentali. Il contributo di 't Hooft è stato fondamentale nel provare che, analogamente alla elettrodinamica quantistica le teorie di Yang Mills possono essere formulate in modo da riassorbire le divergenze che appaiono in altre teorie dei campi quantizzati).

The theory underlying Copenhagen quantum mechanics, called *deterministic quantum mechanics* by 't Hooft, must first and foremost be deterministic (as opposed to probabilistic), and it must also exhibit information loss. It is a quantum theory because it describes the microscopic world, but it is deterministic because it obeys some classical equation of motion. States in the deterministic theory are arranged, by a dissipative process of information loss, into equivalence classes that the Copenhagen interpretation calls quantum states. To revert to our thermodynamical analogy, pressure can be understood as arising from the collisions of gas molecules against the container walls. Many different motions of the molecules will give rise to the same overall momentum transfer to the wall and, therefore, to the same value of the pressure. Yet, a knowledge of the pressure is far less detailed than a knowledge of the precise molecules, and the precise paths they follow as they hit the wall. So one quantum state in the Copenhagen interpretation (pressure) is the result of arranging very many different deterministic states (configurations of molecules) into one equivalence class.

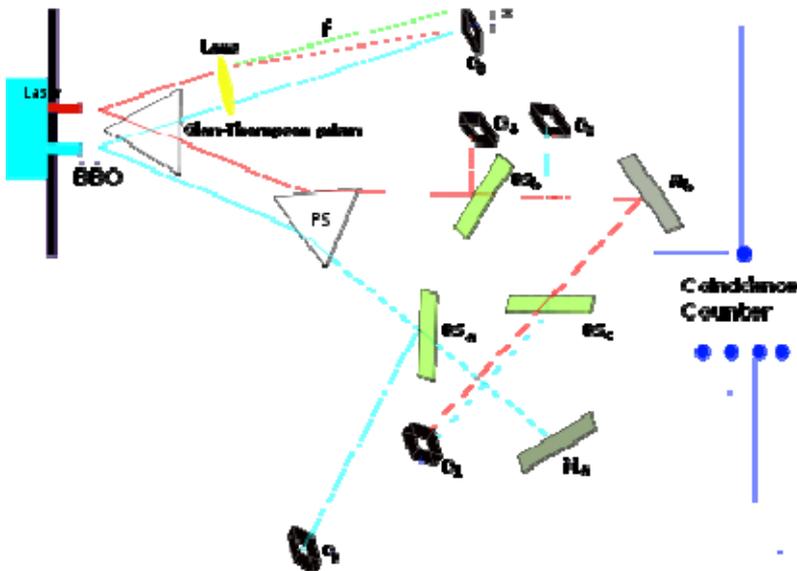
Specifically, 't Hooft proves the following existence theorem: *For any quantum system there exists at least one deterministic model that reproduces all its dynamics.*

Se si ritiene che il mondo macroscopico emerga senza discontinuità dal mondo microscopico c'è una ulteriore conseguenza filosofica.

In un mondo puramente deterministico non esiste quello che viene chiamato libero arbitrio, cioè la possibilità per gli essere umani di esercitare delle scelte puramente libere mentre tale possibilità può sussistere in una realtà non puramente deterministica

Un ulteriore esperimento che fa riflettere sulla struttura temporale dei fenomeni intreccio quantistico è quello cosiddetto del cancellino quantistico a scelta ritardata (delayed choice quantum eraser) L'esperimento, che è una variante dell'esperimento della doppia fenditura, è un po' lungo da descrivere (vedi http://en.wikipedia.org/wiki/Delayed_choice_quantum_eraser e il video http://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=sfeoE1arFOI e

vedi anche B. Green La trama del cosmo pagg 233-239) sinteticamente se si lascia formare la figura di interferenza per le due fenditure ma si registra, anche in un tempo SUCCESSIVO il "percorso" seguito dal fotone l'interferenza svanisce per fotoni che possiamo etichettare come provenienti da una delle due fenditure



La conclusione generale è che le correlazione quantistiche sfidano la distanza spaziale e la distanza temporale. Spazio e tempo sono qualcosa di molto diverso da quello che vi viene suggerito dalla nostra esperienza sensibile,