

La meccanica quantistica ha grande rilevanza dal punto di vista epistemologico, perché introduce, per quanto riguarda i fenomeni che sono oggetto del suo studio, il principio di *indeterminazione* (Heisenberg). Dal punto di vista quantistico l'indeterminazione è *ontologica*, non *metodologica* (o *epistemica*).

Ad esempio nella teoria cinetica dei gas (o nelle previsioni meteorologiche) si fa un ampio ricorso a strumenti *statistici* di previsione per la difficoltà di conoscere tutte le informazioni necessarie relative agli stati iniziali dei sistemi fisici studiati. In casi di questo genere si parla di "caos *deterministico*", ossia di difficoltà puramente metodologiche e strumentali nell'effettuare previsioni che non siano basate sul calcolo della *probabilità*.

I tentativi di interpretare in questo modo anche i fenomeni quantistici (come cercava di fare Einstein), introducendo la cosiddette *variabili nascoste*, per "raddrizzare" in senso ipoteticamente deterministico tali fenomeni sono, tuttavia, falliti. Esiste, anzi, una precisa dimostrazione, quella dovuta a Bell (la famosa "diseguaglianza di Bell"), del fatto che nessuna teoria a variabili nascoste è compatibile con i risultati della meccanica quantistica. In altre parole ogni tentativo di spiegare gli effetti previsti dalla meccanica quantistica in termini deterministici è destinato a fallire.

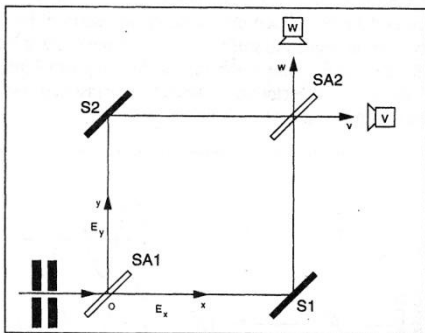


Fig. 4.8. Interferometro di Mach-Zehnder. Un campo elettrico incide su uno specchio semi-argento e viene separato in due fasci di uguale intensità, ma sfasati di un quarto di lunghezza d'onda, che si propagano lungo le due direzioni ortogonali x e y, rispettivamente. Sui due fasci sono poi posti due specchi perfettamente riflettenti (in nero nella figura) che ruotano i fasci medesimi, riportandoli ad incontrarsi ove è posto un altro specchio semi-argento. Le proprietà dei campi per riflessione su specchi semiargenti garantiscono allora che i due campi interferiscano costruttivamente lungo la direzione v in uscita dal secondo specchio e distruttivamente lungo la direzione w. La corretta lettura in chiave corpuscolare ci porta a concludere che, qualora si faccia incidere un solo fotone sul primo specchio, esso certamente verrà registrato dal contatore V e non potrà mai attivare il contatore W.

Il paradosso può essere chiarito utilizzando l'esempio dell'interferometro di Mach-Zehnder (figura a fianco).

L'interpretazione ondulatoria "salva il fenomeno", perché spiega la ragione per la quale il contatore W non registra alcuna radiazione luminosa a differenza del contatore V. Le onde elettromagnetiche dell'ultimo tratto compreso tra l'ultimo specchio e il contatore sono in sovrapposizione di fase e si autodistruggono.

Il problema è che questo modello è incompatibile con la natura corpuscolare della luce. Se supponiamo che venga emesso, ad esempio, un fotone al nanosecondo, statisticamente dovremmo registrare circa il 50% dei fotoni con il contatore V e un altro 50% con il contatore W. Ma ciò non accade.

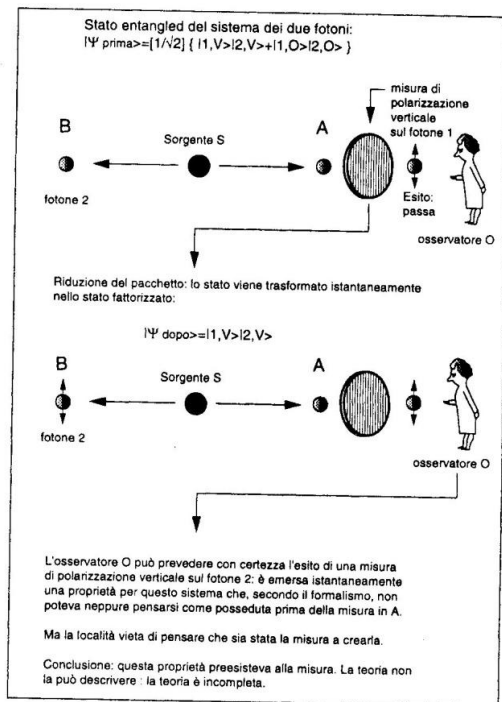
L'unica spiegazione compatibile con questo fenomeno sembra la seguente. Prima della rifrazione/riflessione finale in SA2, ad ogni emissione di fotoni, il sistema si trova in una "sovrapposizione di stati", per cui è vero *sia* che c'è un fotone nel tratto SA1-S2-SA2, *sia* che c'è un fotone nel tratto SA1-S1-SA2. L'interferenza distruttiva finale (tra le onde associate ai fotoni) fa collapsare la funzione d'onda (o "ridurre il pacchetto d'onde", espressione equivalente) e *determina* la rilevazione finale (tutta la radiazione luminosa in V, "eliminando" la serie di stati fisici che avrebbero comportato fotoni nel tratto che conduce al rivelatore W).

Un *paradosso* che sembra andare nella stessa direzione è quello introdotto da *Einstein, Podolsky e Rosen* (EPR), che Einstein riteneva, invece, che dimostrasse l'incompletezza della meccanica quantistica (ossia, appunto, la necessità di introdurre ipotesi supplementari per "raddrizzarla" in senso deterministico).

Immaginiamo che una particella (Silvia) dia origine a due fotoni (Anna e Bice) che assumano obbligatoriamente la stessa polarizzazione (orizzontale o verticale) e si allontanino l'uno dall'altro alla velocità della luce. In base alla meccanica quantistica le due particelle di luce devono avere la stessa polarizzazione, ma sono in una sovrapposizione di stati tale per cui è simultaneamente vero *sia* che Anna e Bice hanno entrambe polarizzazione orizzontale, *sia* che entrambe hanno polarizzazione verticale (e c'è il 50% delle probabilità di trovarle in ciascuno dei due stati, mentre non possono essere in stati reciprocamente opposti). Lo stato complessivo, detto *entangled*, si esprime così: $|\Psi\rangle = [1/\sqrt{2}]\{|1,V\rangle, |2,V\rangle + |1,O\rangle, |2,O\rangle\}$, che si legge: lo stato Ψ è dato dalla sovrapposizione (+) equiprobabile ($1/\sqrt{2}$) degli stati "prima particella (1) polarizzata verticalmente (V) & seconda particella (2) polarizzata verticalmente (V)" e "prima particella (1) polarizzata orizzontalmente (O) & seconda particella (2) polarizzata orizzontalmente (O)".

Pertanto, se un osservatore O effettua una misura di Anna e rileva che questa ha polarizzazione verticale, egli "saprà" che anche Bice ha polarizzazione verticale (senza bisogno che un amico effettui una misurazione su Bice).

Qualcuno, tuttavia, alla luce delle rilevazioni effettuate su Anna, potrebbe pensare che la polarizzazione di Bice sia determinata (contro il principio di indeterminazione) "prima" che queste rilevazioni sulla particella sorella siano fatte e, comunque, *indipendentemente* da queste. Infatti, per il "principio di località", è impensabile che un'azione condotta su Anna "si riverberi" su Bice che non può essere raggiunta da nessun "segnale" proveniente da Anna che viaggi a velocità inferiore o pari a quella della luce. Dunque esisterebbero proprietà "oggettive" di Bice, indipendenti da ogni misurazione successiva (per di più effettuata su Anna), e l'ipotesi della "sovrapposizione di stato" sarebbe da abbandonare. Einstein era convinto che questo esperimento immaginario dimostrasse l'incompletezza della meccanica quantistica e la necessità di introdurre "variabili nascoste" per ricondurla a una forma di meccanicismo deterministico classico. In realtà è possibile dimostrare che Einstein si sbagliava.



presentazione schematica dell'argomento di incompletezza di EPR

polarizzazione verticale, sia abbiano polarizzazione orizzontale. Ora, però, se un altro osservatore si dota dello stesso filtro a 45° e misura la polarizzazione delle particelle di tipo Bice (supponendo che ciascuna coppia di A e B derivino da una stessa particella S originaria), si riscontra che *ogni volta* che una A passa una prova di polarizzazione a 45° anche la sua "sorella" B passa la corrispondente prova e *ogni volta* che una A non la passa, neppure la sua corrispondente B la passa!

Ciò si spiega solo supponendo che il "legame" (*entanglement*) tra le coppie di particelle *non può derivare* dal fatto che esse *fin dall'inizio* (quando "erano" S) fossero polarizzate orizzontalmente o verticalmente. In questo caso, infatti, se consideriamo la probabilità che una particella polarizzata verticalmente od orizzontalmente passi attraverso un filtro obliquo (che è sempre del 50%), registreremmo, rispettivamente: nel 25% dei casi che entrambe le particelle sorelle passano, in un altro 25% dei casi che non passano, in un altro 25% dei casi che passa A ma non B e, infine, in ultimo 25% dei casi che passa B ma non A. Ma l'esperienza dimostra, invece, che il legame tra le particelle sorelle non è qualcosa che possa dipendere da proprietà *oggettive* possedute dalle particelle *prima* della misura, ma è qualcosa che si "rinnova", per così dire, "magicamente" a ogni misurazione.

Questo paradosso può essere diversamente spiegato. Se non si vogliono ammettere fenomeni "superluminali" (ossia segnali tra particelle che viaggino a velocità superiore a quella della luce), va "fatto saltare" il principio di "località": si può ammettere che esista uno "spaziotempo" specifico al sistema Anna-Bice in cui le due particelle non sarebbero ancora separate, ma costituirebbero in qualche modo ancora la particella originaria Silvia. Agendo su Anna l'osservatore agirebbe quindi anche su Bice determinando la coppia di proprietà simmetriche (p.e. l'angolo di polarizzazione), oggetto della sua osservazione¹.

La meccanica quantistica è una teoria di grandissima importanza per la filosofia della scienza. Oltre a incrinare il paradigma della meccanica classica e perfino di quella relativistica, mostrando ancora una volta la natura *ipotetica* e non *assoluta* del sapere scientifico, la meccanica quantistica mette in discussione anche il dogma del *determinismo* fisico, dopo che termodinamica e teoria dell'evoluzione avevano messo in crisi il caposaldo della *reversibilità* dei fenomeni e che varie obiezioni filosofiche ed epistemologiche avevano contestato la pretesa fisicalista di una (almeno ideale) *riducibilità* di ogni altra scienza alla fisica (e di questa alla geometria minkovskiana).

¹ Le immagini come anche alcuni concetti qui esposti sono tratti da Gian Carlo Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio. Gli interrogativi che la scienza pone all'uomo*, Milano, Net, 2003. Cfr. anche M.L. Dalla Chiara, G. Toraldo di Francia, *Introduzione alla filosofia della scienza*, Roma-Bari, Laterza, 1999.