Dall'Istituto di Cristallografia dell'Università di Marburg/Lahn

Misure senza perturbazione dell'oggetto della misura[1][2]

M. Renninger

(ricevuto il 25 febbraio 1959)

Per mezzo di un esperimento concettuale si dimostra che, contro l'opinione corrente, esistono ben dei processi di misura che non esercitano nessuna azione sull'oggetto della misura. Queste misure "negative" consistono nella determinazione sperimentale dell'assenza di accadimenti che ci si attendeva con una determinata probabilità, determinazioni che - contrassegno di una misura "vera" - danno nuove predizioni sull'oggetto della misura, quindi causano "riduzione della funzione d'onda" esattamente come le osservazioni normali, "positive", che perturbano l'oggetto della misura. Da ciò segue necessariamente che il fondamento assai consueto e intuitivo della relazione di indeterminazione nella pretesa azione inevitabile di ogni processo di misura sull'oggetto della misura è inammissibile. Essa ha invece il suo vero fondamento nell'interazione che tutta la materia dell'intorno vicino e lontano di una particella esercita ininterrottamente su di questa, indipendentemente dal fatto che essa faccia parte o meno di un apparato di misura.

La relazione di indeterminazione di Heisenberg risulta in generale come espressione del fatto - o quanto meno in relazione con il fatto - che l'azione del processo di misura sull'oggetto della misura non può essere resa in linea di principio arbitrariamente piccola[3][4][5]. Poiché questa tesi è stata più volte ripetuta di recente, per esempio da Heisenberg[6] (1958)[7], da Brillouin[8], appare all'autore importante indicare una categoria di processi di misura, nei quali non si ha alcuna influenza sull'oggetto, ovvero, per utilizzare l'espressione adottata da Heisenberg, non si ha alcun "intervento sull'evento, che si possa completamente distinguere dall'evento". Essi consistono nella determinazione sperimentale dell'assenza di accadimenti possibili e saranno designati nel seguito come osservazioni "negative". Che cosa si intenda con ciò lo può chiarire il seguente esperimento concettuale:

Da un punto P ad un istante $t = 0$ noto entro limiti stretti venga emesso un fotone[9][10]. Il punto P è circondato da uno schermo sferico S_1 di raggio R_1, che visto da P lascia libero un angolo solido Ω, ossia esso si estende su un angolo solido

[1]Messungen ohne Störung des Meßobjekts, Zeitschrift für Physik **158**, 417-421 (1960).

[2]Il manoscritto ha raggiunto la Redazione già nel febbraio 1959 e in base alle discussioni intervenute nel frattempo ha subìto soltanto delle modifiche inessenziali nella formulazione (la Redazione).

[3]vedasi per esempio Bohr (1931), p. 35 oppure Jordan (1936), p. 307: "Risulta inevitabile che ogni misura sia *per legge naturale legata* ad un *intervento* non trascurabile sull'oggetto".

[4]Bohr, N.: Atomtheorie und Naturbeschreibung. Berlin 1931.

[5]Jordan, P.: Anschauliche Quantentheorie. Berlin 1936.

[6]Heisenberg, W.: Naturwiss. **45**, 227 (1958).

[7]Per l'idea di Heisenberg in proposito vedasi tuttavia la postfazione del presente lavoro.

[8]Brillouin, L.: Nature, Lond. **183**, 501 (1959).

[9]Una possibilità in linea di principio per realizzare ciò è già stata offerta dall'autore (Renninger 1953).

[10]Renninger, M.: Z. Physik **136**, 251 (1953).

$4\pi - \Omega$. A distanza maggiore R_2 si trova un altro schermo S_2 sull'intero angolo solido 4π, cioè una sfera completa.

La funzione d'onda del fotone ha ora sotto le condizioni iniziali e al contorno così definite la sua forma esattamente determinabile. Nello spazio all'interno di S_1 essa è un'onda sferica, fuori è più complicata, deve contenere tra l'altro i fenomeni di diffrazione che originano dal bordo di S_1. Tuttavia anche senza conoscere la sua forma esatta la predizione data da essa sulle probabilità W_1 e W_2 di urto del fotone contro S_1 ed S_2 è immediatamente evidente, ossia:

$$W_1 = \frac{4\pi - \Omega}{4\pi}, \; W_2 = \frac{\Omega}{4\pi}.$$

La predizione si può naturalmente verificare, purché si costruiscano gli schermi S_1 ed S_2 come schermi a scintillazione che operino quantitativamente, e si esegua l'esperimento con un numero grande di fotoni. Allora le scintillazioni registrate su S_1 stanno a quelle su S_2 come W_1 sta a W_2. Tutto ciò è triviale.

Ma l'istante della possibile registrazione di un singolo fotone in S_1 precede temporalmente quello per S_2. Se si osserva in S_1 (al tempo $t_1 = R_1/c$) un lampo, ha luogo quello che la meccanica quantistica designa come "riduzione della funzione d'onda": la probabilità dell'arrivo del fotone al tempo successivo R_2/c - che fino all'osservazione del lampo in S_1 era $\Omega/4\pi$ - si annullerà istantaneamente, assieme alla funzione d'onda in tutto lo spazio tra S_1 ed S_2. Questo è il caso discusso di solito, per il quale giustamente si parla di un intervento sull'evento: il fotone è assorbito o quanto meno diffuso inelasticamente dallo schermo S_1, quindi non è più affatto nello stesso stato di prima dell'osservazione.

Però - e questo è il punto essenziale, sul quale vorrei richiamare l'attenzione - "riduzione della funzione d'onda" non ha luogo soltanto quando il fotone in S_1 viene *osservato*, ma anche quando esso *non* viene osservato. O meglio, detto in positivo, quando viene osservato che esso *non* ha urtato S_1 al tempo critico $t = R_1/c$. Infatti anche allora la probabilità per l'urto successivo contro S_2 varia con un salto, ma in questo caso va al valore 1 invece che a zero! Poiché il fotone non si è mostrato su S_1, esso dovrà pervenire su S_2 *con certezza*. Si ha a che fare qui con una nuova predizione sull'oggetto sulla base di un'*osservazione che non è intervenuta sull'evento*, di una osservazione "negativa"[11].

Poiché una siffatta osservazione senza perturbazione esiste è dimostrato che la pretesa "necessità secondo le leggi di natura" dell'intervento di ogni misura sull'oggetto non sussiste, e che quindi non è ammesso chiamarla in causa per una comprensione più profonda o anche solo per una maggiore intuibilità della relazione di indeterminazione. Questa risulta invece immediatamente dal formalismo della teoria dei quanti e vale allo stesso modo sia per misure nelle quali non si intervenga

[11] Evidentemente l'esempio discusso costituisce solo *una* delle molte diverse possibilità di suddivisione di un certo fascio di radiazione in fasci parziali coerenti. Mediante separazione per riflessione parziale, per doppia rifrazione o via dicendo le circostanze di principio sono esattamente le stesse che qui con la separazione trasversale. Il tratto essenziale dell'esperimento qui descritto e dell'argomentazione ad esso collegata non è in primo luogo la creazione di fasci parziali distinti (già discussa molte volte) ma il fatto che il cammino di uno dei fasci parziali è *ostruito* da un ostacolo che può al tempo stesso servire da strumento di osservazione. Che nel nostro esempio questo ostacolo coincida con la separazione (uno dei fasci parziali è quello intercettato da S_1) è del tutto inessenziale.

sull'evento che per quelle nelle quali lo si faccia[12][13][14]. Ciò è immediatamente evidente anche nel nostro esempio, se lo specializziamo in modo che Ω sia assai piccolo, cioè che S_1 diventi una sfera intera con un foro piccolo: per un fotone che passi attraverso questa apertura il fatto del suo passaggio equivale ad una misura di posizione, e una quantità corrispondente, per l'incertezza sull'impulso trasversale regolata dalla relazione di indeterminazione, cioè la direzione di propagazione oltre lo schermo, ha di conseguenza un'incertezza che si manifesta in una distribuzione di probabilità (figura di diffrazione) per il punto d'incidenza su S_2, tanto più estesa quanto più piccolo è il foro in S_1. Quindi anche l'eventuale osservazione "negativa" in S_1, ossia che al tempo R_1/c un fotone dev'essere sfuggito da questo foro, non ci permette nessuna predizione riguardo al *luogo* d'incidenza su S_2 che vada al di sotto della relazione di indeterminazione.

In discussioni epistolari è stato obbiettato più volte all'autore che la sola *esistenza* dell'ostacolo S_1, cioè la *possibilità* di un'osservazione significa un'influenza sull'oggetto della misura, anche per le particelle che superano S_1. Ciò non sarà da me affatto negato. È proprio quest'influenza che produce la figura di diffrazione su S_2. Affermo tuttavia che ciò *non* avviene *a causa del processo di misura*, ma, come ricordato all'inizio, dev'essere già contenuto nella funzione d'onda primaria. Essa non produce affatto nuova informazione, questo lo fa soltanto l'osservazione realmente avvenuta. Riassumendo si può quindi affermare:

1. Un processo di misura, indifferentemente "positivo" o "negativo", significa *una* netta "riduzione della funzione d'onda"; ogni osservazione vera, ogni acquisizione di informazione riduce la funzione d'onda. E viceversa: ogni riduzione della funzione d'onda dà luogo ad un'acquisizione di informazione.

2. *Possibilità* di osservazione e osservazione *di fatto* sono cose distinte. *Possibilità* di osservazione offre in fondo ogni processo di propagazione che sia qualcosa di più del moto imperturbato di una particella singola nel vuoto (onda sferica imperturbata), quindi sistemi intrecciati, o il moto di una particella in mezzi assorbenti, diffondenti o rifrangenti, ed essa non è altro che una conseguenza del fatto che la particella considerata non è sola nell'universo. Soltanto l'osservazione di fatto significa riduzione dello stato.

Ringrazio sentitamente il Prof. Süssmann, Hamburg, per una presa di posizione epistolare chiarificatrice.

Postfazione

In uno scambio epistolare diretto il signor Prof. Heisenberg ha avuto la gentilezza di farmi sapere, circa il manoscritto a lui trasmesso delle presenti considerazioni, la sua opinione, che posso riassumere con il suo cortese consenso come segue:

È un errore credere che l'interpretazione di Copenhagen della teoria dei quanti, quando asserisce l'inevitabilità in linea di principio della perturbazione dell'oggetto

[12]Assai riposta e non facilmente accessibile, la stessa affermazione si trova nella dissertazione fondamentale "Über den Meßvorgang" di G. Süssmann (1958, p. 30). Il signor Süssmann è stato così gentile da comunicarmelo personalmente. Non fu possibile chiarire bene con una discussione epistolare in che misura la stessa cosa sia intesa con la formulazione di Finkelburg (1956, pp. 176/77).

[13]Süssmann, G.: Über den Meßvorgang. Bayer. Akad. Ber., München H. 88, 1958.

[14]Finkelburg, W.: Einführung in die Atomphysik. Berlin 1956.

misurato a causa della misura, si riferisca ad un "processo" di misura vero e proprio, la cui presa di conoscenza eventualmente successiva riduca "retroattivamente" la funzione d'onda. Un "processo di misura" inteso in questo senso non si può oggettivare in tutti i casi immaginabili. Oggettivabile è soltanto la presa di conoscenza del risultato della misura, che riduce lo stato, e che può quindi essere ricondotta al "taglio" tra oggetto della misura e apparato di misura. Ma ciò che si intende con l'inevitabile intervento della misura sull'evento è già la possibilità della misura, cioè l'esistenza dell'apparato di misura. Infatti è questa che produce quell'interazione parzialmente indeterminata tra l'apparato di misura e l'oggetto da misurare, che con l'esecuzione dell'esperimento porta alla relazione di indeterminazione. Invece l'atto della registrazione, che porta alla riduzione dello stato, non è veramente un processo fisico, ma per così dire un processo matematico. Naturalmente con la variazione discontinua della nostra conoscenza varia con discontinuità anche la rappresentazione matematica della nostra conoscenza.

Se quest'idea così delineata dal signor Heisenberg fosse in generale tenuta per buona, le mie considerazioni sarebbero di fatto vanificate, poiché esse vanno fondamentalmente a finire nella stessa cosa, come si riconosce dai tre ultimi paragrafi. Però mi pare che in generale si affermi un processo di misura vero e proprio, al quale l'acquisizione di conoscenza che riduce lo stato si riferisce (come un - presente o assente - segno d'un impulso su un grafico di registrazione da sviluppare in seguito), e il cui istante temporale può essere inoltre determinato più o meno esattamente con la misura. Che quest'idea sia in generale tenuta per buona mi pare poco credibile, se si tien conto della formulazione ovunque predominante in letteratura. Si parla quasi senza eccezione espressamente dell'inevitabile perturbazione prodotta dall'*atto* dell'osservazione, dal *processo* di misura, o anche più nettamente, dell'impossibilità di "considerare" l'atto dell'osservazione "come un puro prender conoscenza di uno stato di fatto *comunque presente*" (Jordan, op. cit., p. 308). E proprio questo, il *prender conoscenza di uno stato di fatto comunque presente*, si realizza nell'esperimento concettuale ora discusso, sicché la comunicazione di quest'ultimo potrebbe essere in ogni caso di qualche utilità chiarificatrice. Le conclusioni finali in essa mostrate possono essere mantenute integralmente e possono valere come indicazione aggiuntiva che ogni affermazione del tipo ora citato che travalichi il limite su esposto dal signor Heisenberg è inammissibile, che quindi non si può parlare di perturbazione in linea di principio inevitabile dovuta al *processo* di misura.