Su un'idea di metafora e di complementarità.

Renzo Beltrame

Accame mi ha mandato il suo lavoro sulla metafora e la complementarità con un pressante invito ad intervenire sul tema. Mi ha anche simpaticamente inviato il suo contributo in MSWord, nello spirito di facilitarmi eventuali commenti su punti specifici del testo. Il testo è molto compatto e coerente, e l'unico contributo che riesco ad offrire è un modo di vedere la complementarità che si può aggiungere a quello indicato nello scritto e a cui sono molto legato. Inserisco anche alcune considerazioni sulla metafora, ma con una premessa: per la metafora ho bisogno di un quadro di riferimento un poco più articolato, altrimenti il filo dei pensieri, e quindi del discorso, mi si arruffa in maniera inaccettabile.

Metafora.

L'interesse e le riflessioni teoriche sulla metafora mi sembrano innescate dal fatto che insieme al significato e/o uso metaforico di una parola si affaccia la questione del suo significato e/o uso proprio. Ci si trova così subito ad affrontare la questione dei criteri da usare per definire ciò che intendiamo assumere come cosa designata da una parola di una lingua. La locuzione "cosa designata" è abbastanza generale nel designato di "cosa" da risultare soddisfacente. Accade però che "cosa" sia preso con una certa frequenza nell'accezione arricchita di cosa fisica. Per questo userò sistematicamente la locuzione "designato di" riferita sia ad una parola che a una frase, attribuendogli carattere tecnico.

L'uso di una parola isolata è tuttavia assai poco frequente nell'impiego delle nostre lingue. Lo possiamo trovare nella segnaletica o in contesti di studio e trattazione della lingua come sistema linguistico, tipicamente contesti lessicali.

La scelta dei criteri con i quali definire ciò che si intende assumere come il designato di una parola di una lingua, si intreccia quindi immediatamente con i criteri da usare per definire ciò che si intende assumere come il designato di una frase della lingua, e così di seguito per altre, più ampie, unità linguistiche.

Si possono adottare strategie diverse per dare queste definizioni. Tuttavia se è praticabile, sia pure con alcune difficoltà, definire per elenco le cose designate dalle parole di una lingua, è invece praticamente impossibile definire per elenco le cose designate dalle frasi, dato il numero proibitivamente alto delle frasi possibili. I due ordini di problemi risultano quindi inscindibili in questo contesto, perché le definizioni dei designati delle singole parole di una lingua sono strettamente funzionali alla teoria della costruzione dei designati di più ampie unità linguistiche. Appare quindi poco produttivo affrontarli separatamente.

La strategia più semplice da esporre è una in cui ci si vincoli a definire le cose designate dalle frasi di una lingua soltanto aggiungendo elementi a quelli usati per definire le cose designate dalle parole che compongono la frase. Sottolineo, più semplice da esporre, perché la difficoltà di stabilire che cosa va aggiunto e in dipendenza da quali elementi, è proprio ciò che ha frenato la "traduzione meccanica" e frena tuttora un impiego sofisticato del calcolatore sul materiale linguistico.

In questo approccio si è portati a ridurre al massimo gli elementi che definiscono la cosa designata da una parola della lingua, così che non si debba togliere nulla quando la parola compare nei vari contesti. Con riferimento ad una lingua viva, l'italiano, le preposizioni, così

come molti verbi, possono dare un'idea del punto di arrivo di questo approccio. Diventa allora aggiunta dipendente dal contesto tutto ciò che consegue da un atteggiamento, da un punto di vista, e più in generale da un modo di considerare; lo diventano, in particolare, la designazione di una cosa come cosa fisica, come fatto psichico, o come cosa mentale. In alternativa si può pensare ad una strategia in cui la definizione del designato di una parola è data come articolazione di elementi che possono entrare selettivamente a costituire il designato delle diverse frasi in cui entra la parola. Va da sé che le informazioni che occorre mettere in gioco per ottenere il designato di unità linguistiche più ampie della parola sono, in un medesimo caso, sempre le stesse. Le due strategie differiscono nel modo di raccogliere e organizzare in un sistema teorico gli elementi necessari per costruire questi designati. Una frase come "cane di pezza" sembra tuttavia meglio gestibile con un approccio in cui si possano scartare elementi che sono stati posti nella definizione del designato di "cane". Ma penso anche a situazioni come quelle legate ad un uso dell'articolo determinativo, in cui, se il contesto è compatibile, in passaggi quali "la tasca" e "la mano" l'articolo porta a pensare ad un indumento e una persona con determinazioni e rapporti di cui si è detto in precedenza, e il contesto corrente decide quali.

A maggior ragione sono costretto ad ammettere la seconda strategia quando debbo costruire il designato di unità linguistiche partendo da quello di unità linguistiche più ampie della parola, ad esempio il designato di un paragrafo a partire da quello delle frasi e/o dei periodi che lo compongono. Qui debbo ammettere la possibilità di utilizzare solo parte degli elementi costitutivi il designato di precedenti unità linguistiche per costruire il designato di ulteriori unità.

A questo punto, ritengo più utile ammettere la possibilità di impiegare questa strategia anche per la parola.

Tornando alla metafora, questa breve discussione mostra la necessità di caratterizzare la metafora in modo che il suo impiego non si confonda con la costruzione del designato di unità linguistiche in cui la parola risulti in contesto se si ammette una strategia che preveda la possibilità di non impiegare per questo designato elementi che sono stati posti nella definizione del designato della parola singola.

A mio avviso per avere un uso metaforico di un elemento linguistico, nelle nostre lingue di solito una parola, è sufficiente che nell'attività costitutiva del designato dell'unità linguistica più ampia in cui esso interviene vi sia lo scarto di elementi che si considerano costitutivi del suo designato. E, conseguentemente, si ha l'uso proprio di un elemento linguistico quando si consideri di aver usato tutti gli elementi che si considerano costitutivi del suo designato.

Se si adottano queste definizioni, la metafora, l'uso metaforico, e l'uso proprio, sono modi di considerare. Sussistono quindi per chi fa le operazioni proposte, con tutte le combinazioni possibili: le esegue solo chi scrive, solo chi legge, entrambi, oppure nessuno dei due. La categorizzazione, poi, ha il vantaggio di rendere immediatamente palese che la metafora, così come la metonimia, mettono in gioco in modo esplicito la convenzione linguistica.

Nella frase "gambe del tavolo", impiegata come esempio da Accame, avrò così un uso metaforico di "gambe" se considero di aver scartato un elemento che considero costitutivo, ad esempio l'essere una parte del corpo umano o di quello di un animale. Non avrò l'uso metaforico se, ad esempio, ho utilizzato, del designato di "gamba", l'essere un oggetto sottile che contribuisce a reggere, sollevata da terra, una cosa più grande; e l'imprecisione di questa descrizione riflette bene le attuali difficoltà nel descrivere già il designato di una breve frase. D'altra parte, se decido di non mettere in gioco le categorizzazioni, ho uso metaforico di una parola ogniqualevolta nel designato di una frase non intervengano tutti gli elementi che assumo come costitutivi del designato della parola, e l'uso proprio diventa una sorta di

paradigma nella costruzione del designato di una frase. Il traslato, poi, ricorrerebbe sistematicamente anche in frasi come "cane di pezza" o "quella sera bevvero tutti parecchio vino, lui ne bevve una bottiglia intera", da cui si vede che "bottiglia" può, alternativamente, designare una misura di capacità, come litro.

Infine, se uso proprio e metafora derivano da una categorizzazione, relativamente articolata, applicata a ciò che si è fatto nel costruire il designato dell'unità linguistica in cui ricorrono, quest'ultimo risulta indipendente da tale categorizzazione. Ne consegue che la sua oscurità, indeterminatezza, o contraddittorietà diventano indipendenti dall'uso proprio o metaforico degli elementi linguistici messi in gioco, come del resto ci si poteva attendere. A maggior ragione ritengo inaccettabile trasferire sulle modalità con cui ho costruito un designato una mia decisione, per quanto motivata, di non usarlo ulteriormente.

Quando poi alla metafora venga aggiunta la qualificazione "irriducibile" condivido la posizione di Vaccarino: ritengo si debba invece parlare di una situazione in cui il designato rivela, ad un successivo uso, elementi non determinati o fra loro contraddittori. E, sottolineo, questo accade ad un successivo impiego.

Complementarità.

Sulla complementarità vorrei indicare un punto di vista in cui, anche per formazione scolastica, mi riconosco. La complementarità vista come repertorio del potenziale, dell'ipotetico: una complementarità, quindi, non dell'alternativa e del dualismo, ma delle alternative.

Calvino, nella lezione dedicata alla "Visibilità" delle sue Lezioni americane¹, espone questo approccio con riferimento all'immaginazione e al modo in cui ritiene di impiegarla nella sua attività di scrittore. Lo contrappone a due storiche correnti di pensiero che vedono "l'immaginazione come strumento di conoscenza o come identificazione con l'anima del mondo". E si riconosce in una immaginazione come repertorio appunto "del potenziale, dell'ipotetico", spinto sino a "ciò che non è né è stato né forse sarà ma che avrebbe potuto essere"; sottolineando di ritrovarvi analogie con il momento ideativo nel pensiero scientifico a lui contemporaneo.

Il mio interesse per questo approccio è legato al fatto che l'immaginazione, e per estensione il pensiero, vi mantengono in pieno il carattere di attività costitutiva di ciò che riprendiamo come risultato. In particolare, nel caso in cui l'immaginazione sia esercitata sul mondo fisico, è possibile porre una netta separazione di principio tra ciò che il soggetto attribuisce a sé come situazione fisica immaginata o pensata, e ciò che attribuisce alle cose fisiche come loro interazioni. Questo, anche se una parte dell'attività mentale costitutiva, quella ad esempio che potrebbe dare origine alla descrizione della situazione fisica, può essere addirittura identica nei due casi.

Il legame lo posso porre a posteriori, sia perché posso ripercorrere il cammino che ha portato dall'idea di partenza al risultato scientifico ragionevolmente accertato, sia perché il pensiero scientifico considera insufficiente, o almeno non ottimale, fermarsi all'enunciazione di alternative ipotetiche. Considera invece ottimale aver verificato che le alternative pensate sussistano nel mondo fisico o nel mondo psichico, e aver associato a ciascuna differenti condizioni di occorrenza.

L'immaginazione pensata "come strumento di conoscenza o come identificazione con l'anima del mondo" mi riporta a posizioni tipiche del conoscitivismo, dal momento che esse fissano a

priori, e in maniera più o meno forte ipostatizzano, quale deve essere il risultato dell'attività cognitiva. Metterei in questo stesso alveo anche il principio di complementarità di Bohr nella misura in cui lo si pensi come qualcosa che chiude il mondo fisico entro un dualismo: in questa misura è anch'esso un modo di fissare a priori quale deve essere il risultato di un'attività cognitiva.

Per illustrare l'altro tipo di complementarità, quella delle molteplici alternative, attingerò gli esempi dal territorio delle scienze, evitando però estrapolazioni fantascientifiche. Mi limiterò quindi alle alternative che sono state praticate, ma con l'intento di indicare i mutamenti profondi che da queste sono scaturiti nell'assetto delle teorie scientifiche.

Uno degli esperimenti più nitidi a sostegno della teoria che chiamiamo relatività ristretta (poiché in esso le accelerazioni possono essere piccole) utilizza la contemporanea azione di un campo elettrico e di un campo magnetico costanti ed uniformi su corpi di piccole dimensioni portatori di una carica elettrica, tipicamente elettroni o ioni². L'esperimento consente di determinare sia la loro velocità all'impatto su uno schermo assorbente, sia il rapporto tra la loro carica e la loro massa. Si trova che a velocità elevate il rapporto tra carica e massa varia sensibilmente al variare della velocità. Se si decide di mantenere la carica costante, e la si considera quindi indipendente dalla velocità, l'altro elemento, che interviene nei calcoli come una massa meccanica, all'aumentare della velocità aumenta di valore secondo le previsioni della relatività ristretta; e a basse velocità, come previsto da questa teoria, varia di una quantità così piccola da non essere praticamente apprezzabile.

Per il nostro discorso importa sottolineare che la scelta indicata non è vincolata dall'esperimento, per cui altre scelte sono ugualmente lecite. Le alternative sono molte, perché si può decidere di mantenere costante la massa e far variare la carica con la velocità, oppure di far variare entrambe avendo a disposizione una gamma continua di scelte in cui carica e massa variano in proporzioni diverse. Ognuna di queste scelte, tuttavia, porta a riscrivere in modo diverso larghe sezioni della fisica, per cui, se sul piano concettuale una scelta vale l'altra, non è così sul piano pratico. Troviamo qui un fatto assai generale: le conseguenze delle possibili alternative sono diverse, per cui le alternative sono tutt'altro che indifferenti o equivalenti.

Una delle proprietà tipiche del campo magnetico offre un secondo esempio³, poiché può essere fatta discendere dal modo di misurare le grandezze fisiche che vi sono coinvolte. La proprietà in questione afferma che il flusso magnetico è lo stesso per tutte le superfici aperte che hanno una stessa linea chiusa come bordo. La misura del flusso magnetico nei gas e nei liquidi si può ottenere, a parte una serie di avvertenze che rendono la misura ragionevolmente precisa, facendo espandere rapidamente la spira di un conduttore ai cui capi sia connesso un voltmetro balistico. L'impulso di tensione indicato dal voltmetro balistico è usato come misura del flusso magnetico che attraversa la superficie della spira.

Concettualmente, e matematicamente, si può però calcolare un flusso attraverso qualsiasi superficie. Per come si è condotta la misura lo stesso flusso viene attribuito a qualunque superficie aperta abbia la proprietà geometrica di avere la spira, cioè una stessa linea chiusa, come suo bordo.

Il riferimento al legame tra caratteri della teoria e modi di misurare le grandezze che vi intervengono non è estraneo alla riflessione epistemologica di Bridgman, ma l'esempio lascia

anche intravedere quale lavoro di riformulazione di una teoria possa derivare dalla scelta di alternative diverse.

Un altro significativo esempio si appoggia ad una riflessione di Feynman⁴. Nell'interazione tra sistemi fisici distanti si usa frequentemente uno schema che è ben esemplificato dal caso della luce. L'interazione è descritta correlando tra loro due processi che accadono in tempi diversi nei due sistemi interagenti. Il primo processo in ordine di tempo è caratterizzato da una diminuzione di energia del sistema in cui avviene, ed è chiamato emissione. L'altro, successivo nel tempo, è caratterizzato da un aumento di energia del sistema in cui avviene, ed è chiamato assorbimento. Se si decide che si vogliono scrivere equazioni di bilancio dell'energia per qualunque istante di tempo tra l'emissione e l'assorbimento e per qualunque volume entro lo spazio che racchiude i due sistemi fisici interagenti, bisogna assumere che la quantità di energia trasferita si muova da un sistema all'altro. Le alternative concettualmente possibili sono molte, qui menzioneremo soltanto alcune di quelle impiegate. Lo schema è infatti molto usato, anche se conviene ricordare che si applica in maniera non del tutto soddisfacente all'interazione gravitazionale.

Nel caso dell'interazione elettromagnetica, in cui ricade il caso della luce, l'alternativa più semplice è stata assumere che l'energia trasferita si muova lungo il segmento di retta che congiunge i due sistemi, e con velocità costante pari alla lunghezza di tale segmento divisa per il ritardo osservato tra il processo di emissione e quello di assorbimento. L'esperimento di Fizeau per misurare quella che continuiamo a chiamare velocità della luce rispetta per intero questa alternativa.

Il ritardo osservato tra il processo di emissione e quello di assorbimento è risultato indipendente dal moto solidale dell'emettitore e dell'assorbitore in esperimenti in cui tale moto era costituito da combinazioni del moto di rotazione e di rivoluzione della Terra (Michelson). Tutto questo (relatività ristretta) è compatibile con l'alternativa in questione perché tale indipendenza può essere considerata descrivere una caratteristica dell'interazione elettromagnetica.

Una ulteriore alternativa dello schema (relatività generale) è consistita nel lasciar cadere il vincolo a pensare il movimento soltanto lungo un segmento di retta che congiunge i due sistemi. Gli si sostituisce la possibilità di traiettorie diverse, e l'intensità del campo gravitazionale presente nello spazio tra emettitore e assorbitore concorre a determinarne i caratteri geometrici. Il segmento di retta diventa allora una delle geometrie possibili, ben approssimata in particolari condizioni.

Tornando allo schema generale, tra le alternative con cui è stato impiegato vanno ricordate teorizzazioni in cui si decide di applicarlo con granularità spaziale e temporale: imponendo cioè vincoli ai volumi e agli intervalli di tempo per i quali si decide di scrivere equazioni di bilancio dell'energia.

A mio avviso questo schema, nella misura in cui viene impiegato con il carattere di uno schema categoriale usato come paradigma, ha una conseguenza che vale la pena indicare. Ciò che viene assunto come paradigma è considerato non richiedere spiegazione: infatti per spiegarlo bisognerebbe servirsi di un diverso paradigma e considerarlo fenomeno. Nel caso della relatività generale richiamato in precedenza, si potrebbe essere spinti a non considerare cosa da spiegare che l'interazione gravitazionale e quella elettromagnetica abbiano

interdipendenza. Questo perché gli aspetti fenomenologici noti di entrambe le interazioni sono tradotti in caratteri del sistema di riferimento usato per descrivere i fenomeni: cioè in caratteri del paradigma. Il sistema di riferimento, infatti, è preso geometricamente analogo a una superficie curva, anziché a un volume cubico.

Si tratta di difficoltà di ordine pratico che vengono superate dagli sviluppi della ricerca, ma che rendono più faticoso l'avvicinamento alla frontiera del sapere, soprattutto a chi inizia.

L'ultimo esempio che vorrei toccare riguarda la meccanica quantistica. Qui troviamo una contrapposizione secca tra discreto e continuo, caratteristica delle origini della teoria, che ha lasciato il posto ad uno schema in cui si utilizza concettualmente solo il continuo e si interpreta come cambiamento rapido ciò che era proposto come discreto. La complementarità basata sul dualismo di due schemi incompatibili è così sostituita da uno schema unico in cui i vari fenomeni vengono interpretati come possibili alternative.

In matematica, l'incompatibilità tra lo schema del discreto e quello del continuo può venir rintracciata in un assioma secondo cui un insieme infinito o è isomorfo all'insieme dei numeri interi, o a quello dei numeri reali. Si è infatti dimostrato (Cohen⁵) che questo assioma è indipendente dal gruppo di assiomi (Zermelo-Fraenkel) più frequentemente usati per la teoria degli insiemi. Non può quindi venir dedotto, e ciò significa, a mio modo di vedere, che non possediamo uno schema di cui discreto e continuo siano particolarizzazioni.

Per la meccanica quantistica classica, un'impostazione matematica legata allo schema del discreto è rintracciabile con chiarezza in diversi lavori. Qui mi riferirò ad un testo relativamente tardo di Heisenberg, perché mi risulta utile ripensare questa trattazione, che rappresenta già un punto di sintesi, con un'impostazione successiva legata invece al contesto dell'elettrodinamica quantistica e utilizzata nella teoria quantistica del campo. Qualche tecnicismo mi sarà inevitabile, soprattutto per motivare alcune affermazioni senza lunghe digressioni esplicative; me ne scuso e cercherò di limitarli al massimo.

Il punto di partenza in questa impostazione di Heisenberg⁶ è l'idea di applicare agli atomi lo schema matematico usato per i sistemi meccanici molteplici e periodici: caratterizzabili quindi da un certo numero di periodi detti fondamentali, o dalle relative frequenze, e dalle ampiezze delle loro possibili armoniche (i multipli interi delle frequenze fondamentali).

L'accordo con i risultati sperimentali (esperimenti di Franck e Hertz) è ottenuto descrivendo le frequenze fondamentali e le relative ampiezze tramite funzioni di una coppia di numeri interi opportunamente scelti. Queste funzioni, inoltre, sono scelte in modo che lo schema descriva un comportamento che approssima quello della meccanica classica per valori di questi numeri molto grandi rispetto alla loro differenza.

Gli stati stazionari di un sistema così descritto costituiscono quindi uno spettro discreto: nel senso che i parametri che li individuano non variano con continuità. Ma Heisenberg osserva in una nota che gli atomi mostrano anche uno spettro continuo che deve essere trattato separatamente.

Un aspetto abbastanza rilevante della meccanica quantistica è il suo carattere probabilistico. Le previsioni teoriche, sia nell'impostazione classica che in quelle più recenti, forniscono la probabilità che si verifichi un determinato evento, e questo si estende anche alla previsione del risultato di una misura.

Ritengo questo carattere una conseguenza del requisito di ripetibilità proprio della prassi scientifica, per cui i fatti studiati e le procedure impiegate per studiarli debbono essere ripetibili senza restrizioni di principio o di metodo. Se le condizioni più stringenti che si riescono a realizzare nel definire la ripetizione di una misura o di un esperimento non portano ad avere sistematicamente lo stesso risultato, si ha una situazione ritenuta non ottimale, e una soluzione per impiegare i risultati è utilizzare lo schema probabilistico. Questo schema, infatti, prevede ripetizione della prova con risultati diversi. Poi si interpretano le frequenze relative dei diversi risultati, etc.

Le condizioni che definiscono la ripetizione di una misura o di un esperimento sono ovviamente appoggiate a variabili macroscopiche: quelle che si percepiscono e si misurano direttamente con gli strumenti. Poiché esse definiscono le condizioni per considerare un evento ripetizione di un altro, tutto ciò che riguarda l'evento è considerato ripetuto (con l'eccezione del momento di occorrenza). Ne discende che anche la distribuzione di probabilità delle variabili microscopiche è considerata la stessa in ogni ripetizione, e la cosa consegue dal principio di non contraddizione, benché non sempre venga evidenziato.

L'approccio probabilistico da come risultato una distribuzione di probabilità: assegna cioè una probabilità ad ognuno degli eventi possibili; nel caso della misura di una grandezza, ad ognuno dei valori possibili. Se si decide di caratterizzare il risultato della misura con un unico valore, mimando così un approccio deterministico, occorre decidere come lo si vuole dedurre dalla distribuzione di probabilità. È criterio abitualmente usato impiegare il valor medio e caratterizzare maggiormente la distribuzione di probabilità fornendo anche la varianza della distribuzione.

Il principio di indeterminazione, che in questo contesto diventa un vincolo da imporre al prodotto delle varianze delle distribuzioni, può essere visto in due modi. Se lo si considera dedotto dall'analisi dei procedimenti di misura delle osservabili che intervengono nella teoria, diventa un vincolo da rispettare nella formulazione della teoria. Se si parte invece dalla teoria costruita, diventa una proprietà delle distribuzioni di probabilità che sono predette dalla teoria.

Tra le impostazioni relativamente recenti della quantistica scelgo quella che va sotto il nome di "path integrals"⁷. Essa ha il vantaggio di una estrema semplicità concettuale e di una notevole generalità; anche se la soluzione dei casi concreti è spesso decisamente laboriosa. È inoltre un'impostazione particolarmente pertinente al tipo di complementarità che sto illustrando; mi limiterò tuttavia, e di necessità, a pochi aspetti strettamente legati alla nostra tematica.

L'impostazione "path integrals" stabilisce un modo assai generale di predire la probabilità che un sistema fisico passi da una configurazione ad un'altra. Applicandola ripetutamente a diverse coppie di configurazioni, è possibile predire distribuzioni di probabilità, come richiesto da un approccio probabilistico. L'idea base è quella di associare un vettore ad ogni processo che faccia passare un sistema fisico da una configurazione ad un'altra. La probabilità di transizione da una configurazione all'altra è calcolata in due fasi.

Si sommano dapprima i vettori associati a tutti i processi che in linea teorica possono far passare il sistema dalla configurazione iniziale alla configurazione finale prescelte, e si associa il vettore risultante alla transizione dallo stato iniziale allo stato finale in questione. Si assume poi come probabilità della transizione un valore legato al modulo del vettore

associato alla transizione.

Ricordiamo che il modulo di un vettore ne misura l'intensità e corrisponde, in una certa scala, alla lunghezza del segmento con cui di solito lo si rappresenta graficamente. La somma vettoriale di due vettori ha come risultato un vettore il cui modulo può variare tra la somma dei moduli dei vettori componenti e la loro differenza.

Quest'ultima proprietà permette di inglobare nello schema il fenomeno dell'interferenza caratteristico dello schema ondulatorio e assai presente nella fenomenologia che ha portato storicamente alla formulazione della meccanica quantistica. E sul piano concettuale evita il dualismo tra onde e corpuscoli.

Si supponga infatti che due vettori abbiano lo stesso modulo. La loro somma vettoriale dà un vettore il cui modulo può variare tra la somma dei moduli e zero. Queste due condizioni estreme si hanno quando i due vettori hanno la stessa direzione e verso rispettivamente coincidente o opposto. I valori intermedi sono a loro volta legati all'angolo tra i due vettori. Si ha quindi uno schema per descrivere l'intensificazione e l'elisione che si incontrano nei fenomeni di interferenza. Per realizzare questa proprietà è sufficiente utilizzare vettori in un piano, e tecnicamente si rappresentano con dei numeri complessi, che sono impiegati a questo scopo anche in altri capitoli della Fisica. A seguito della scelta di questa rappresentazione, la probabilità di transizione è assunta uguale al quadrato del modulo del numero complesso associato alla transizione, perché questo è il prodotto del numero complesso per il suo coniugato.

Se si considera la transizione del sistema fisico da una configurazione ad un'altra come costituita da una transizione dalla configurazione iniziale a una intermedia e da questa alla configurazione finale, il vettore che caratterizza l'intera transizione è posto uguale al prodotto dei vettori che caratterizzano le due transizioni componenti. Questa è un'altra delle decisioni che definiscono l'impostazione "path integrals", e può essere vista sia come un modo di calcolo, sia come un vincolo a cui debbono sottostare calcoli eseguiti con strategie diverse. Tale decisione, per quanto riguarda i moduli dei vettori, è in accordo con la definizione di probabilità di un evento la cui occorrenza è definita attraverso l'occorrenza di più eventi; ha invece effetti specifici quando il vettore prodotto venga sommato con altri vettori.

Se più scomposizioni sono possibili, perché sono possibili diverse configurazioni intermedie, la somma dei vettori prodotto di ciascuna di queste scomposizioni è il vettore da associare alla transizione globale. E questo è in accordo con la prima delle decisioni che abbiamo esposto.

Infine, sono introdotti modi di calcolare il vettore da associare a ciascuno dei processi che descrivono il passaggio del sistema fisico da una configurazione ad un'altra. Si tratta di una regola indispensabile, altrimenti avremmo un regresso all'infinito, perché la scomposizione di una transizione in più transizioni intermedie è utilizzabile solo quando si sappia già quale vettore associare a queste ultime. E questa è la fase in cui intervengono le caratteristiche del sistema fisico e delle sue interazioni con altri sistemi; ed è anche la fase in cui vengono messe in gioco tutte le conoscenze accumulate attraverso gli esperimenti e le teorizzazioni specifiche. Non è ovviamente possibile soffermarci su quest'argomento, bellissimo ma estremamente ramificato; un testo di Feynman⁸, scritto quasi per scommessa, ne è una splendida introduzione.

Vi sono poi caratteristiche del sistema fisico e dell'interazione che portano ad associare un vettore di modulo elevato ad una sola delle successioni di configurazioni tra l'iniziale e la

finale prescelte, associando alle altre vettori che nella somma danno un contributo trascurabile al vettore risultante. Al limite, quindi, una sola di queste successioni può realizzarsi, mentre le altre hanno probabilità che tende a zero. Se si assume che queste ultime abbiano probabilità nulla, il sistema fisico ha il comportamento previsto dalla meccanica classica.

Questo è un modo in cui l'approccio "path integrals" può integrare in un unico schema i risultati della meccanica classica e della meccanica quantistica, con il vantaggio che è possibile collocarvi anche una gamma di situazioni intermedie o miste. Si evita così un altro dualismo, che aveva portato Bohr ad introdurre un "principio" di complementarità.

Mi sono proposto di illustrare un'idea di complementarità come ventaglio di alternative senza entrare nella fantascienza, quindi ho forzato in questo esempio gli aspetti già unificati. Ne ho lasciato da parte altri e, come ci si può aspettare, vi sono problemi aperti suggeriti dalla fenomenologia nota o da stime teoriche degli ordini di grandezza.

Vorrei chiudere segnalando come, nella strategia di calcolo che abbiamo delineato, sia una scelta a priori anche ogni successione di configurazioni che si prende in esame tra quella iniziale e quella finale prescelte. Se, sulla base delle nostre conoscenze, si arriva a calcolare il vettore da associargli, abbiamo un processo possibile che entrerà nel calcolo della probabilità di transizione, altrimenti si scarta la successione. Questa strategia mette in luce un aspetto intrinseco allo schema probabilistico: si decide di descrivere le differenze che si incontrano e si rinuncia a spiegarle, ma si rinuncia anche a spiegare perché sono quelle e non altre. D'altra parte, quando ci si propone di fornire spiegazioni, occorre cambiare schema.

Ritroviamo qui una caratteristica che abbiamo già incontrato e che ricorre abbastanza frequentemente nel pensiero scientifico contemporaneo: la tendenza ad ampliare il paradigma, scegliendo insieme uno schema povero, quindi con una grandissima latitudine di applicazione, e una gamma di specificazioni legate spesso a differenze di tipo quantitativo. Non è questo il tipo di complementarità a cui sono affezionato. Lo vedo invece come un atteggiamento in cui il momento descrittivo non è seguito da un sufficiente sforzo di sintesi, e mi aspetto una netta correzione di rotta nei prossimi anni; anche se mi rendo conto che la sfida è decisamente impegnativa.

Note bibliografiche.

1. I. Calvino, *Lezioni americane*, Einaudi, Torino, 1978.
2. Si tratta di esperimenti molto noti che possono venir trovati su testi scolastici di fisica.
3. Questo esempio risale ad un corso complementare, tenuto da E. Bottani, dei miei studi universitari.
4. R.B. Leighton, R.P. Feynman, M. Sands, *The Feynman lectures on Physics*, Addison-Wesley, California, 1963.
5. P.J. Cohen, *Set theory and continuum hypothesis*, Benjamin, Reading, 1966.
6. Il riferimento è all'Appendice "The Mathematical Apparatus of the Quantum Theory"

dell'edizione inglese di W. Heisenberg, *The physical principles of the quantum theory*, Chicago, 1930.

7. Mi sono avvalso del Cap. 8 di M. Kaku, *Quantum field theory. A modern introduction*, Oxford, 1993

8. R.P. Feynman, QED. La strana teoria della luce e della materia, trad. F. Nicodemi, Adelphi, Milano, 1989.

Pisa, maggio 2004