

Franco Selleri. The courage of ideas

Francesco Guerra – Università di Roma “La Sapienza” – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Roma – francesco.guerra@roma1.infn.it

Caro Augusto,

mi compiacio altamente per la vostra iniziativa di dedicare una *topical session* al tema *Franco Selleri (1936-2013). His research and legacy on the foundations of Quantum mechanics and relativity*, nell’ambito del XXXVII Congresso nazionale della Società italiana degli storici della Fisica e dell’Astronomia.

Avevo aderito prontamente al vostro cortese e graditissimo invito, con l’intento di svolgere una relazione dal titolo *Franco Selleri. The courage of ideas*.

Sfortunatamente la tempistica dei programmi rende impossibile la mia partecipazione.

Tuttavia vorrei essere presente all’importante evento di Bari non solo *in spiritu*, ma anche con una testimonianza diretta. Vorrei pregarti quindi di leggere questa lettera ai partecipanti, dove ho sintetizzato i passi più rilevanti del mio intervento.

Ho conosciuto personalmente Franco Selleri a Bari nel 1973, dove mi aveva invitato per un seminario sulla meccanica stocastica di Edward Nelson, applicata alla teoria quantistica dei campi. Un argomento che per le sue motivazioni s’inquadrava bene con i recenti interessi di Selleri sui fondamenti della Meccanica quantistica.

Ero da poco tornato da Princeton, dove avevo mostrato la grande utilità della formulazione euclidea della teoria dei campi, a lungo propugnata da Kurt Symanzik e da Edward Nelson. In collaborazione poi con Lon Rosen e Barry Simon, avevamo ottenuto una serie importante di risultati nell’ambito della teoria costruttiva, che portarono in particolare alla dimostrazione dell’esistenza di campi quantistici interagenti, che soddisfano gli assiomi di Wightman, almeno in uno spazio-tempo bidimensionale, o anche tridimensionale.

Dopo il ritorno da Princeton, mi ero dedicato allo studio e approfondimento di un’altra grande idea di Nelson: la formulazione della Meccanica quantistica in un ambito probabilistico, che forniva, nelle parole di Nelson, una «Derivation of the Schrödinger equation from Newtonian mechanics». Si tratta della celebre meccanica stocastica di Nelson, sulla quale si è svolta un’intensa attività di ricerca sull’arco degli ultimi cinquant’anni. L’impostazione originaria di Nelson, come testimonia anche il titolo del suo primo lavoro, lo fa includere tra gli “eretici”, nel senso precisato in seguito.

Insieme con Patrizia Ruggiero, allora coinvolta nella preparazione della tesi di laurea, avevamo fatto vedere che la teoria euclidea dei campi coincide con un’estensione della meccanica stocastica di Nelson al caso di campi relativistici.

Nel corso della mia visita a Bari la discussione si allargò in modo naturale, dalla meccanica stocastica di Nelson alle strutture generali della Meccanica quantistica e ai

paradossi dell'interpretazione di Copenaghen. Fui impressionato dalla personalità complessiva di Franco Selleri in cui una solida formazione fisica, si accoppiava con una forte spinta culturale verso il realismo, in un ambito di grande coraggio intellettuale e di assoluta onestà scientifica. La sua pacatezza nell'affrontare le questioni, anche quelle più scottanti dove non c'era accordo, e il suo argomentare sempre rivolto verso gli aspetti concettuali oggettivi e le possibili verifiche empiriche, destavano grande ammirazione. Queste caratteristiche peculiari sono state pienamente confermate in tutti i nostri frequenti incontri successivi, nel corso di quasi quarant'anni.

Franco Selleri è innanzitutto un fisico teorico di grande classe, capace di dare contributi d'altissimo livello nei settori più avanzati della fisica teorica delle particelle elementari, fin dagli anni giovanili. Il suo modello "periferico", che interpreta una parte rilevante dell'interazione protone-protone come dovuta allo scambio di un singolo mesone, trovò immediatamente molteplici applicazioni, in particolare sulla produzione di mesoni nell'urto e sulla diffusione diffrattiva, in una serie di lavori svolti in prestigiose collaborazioni, con Ugo Amaldi, Francesco Bonsignori, Ezio Ferrari.

Non è solo una curiosità ricordare che anche Giuseppe Da Prato, il famoso matematico di Pisa, lavorò in epoca giovanile su questi problemi.

Verso la fine degli anni Sessanta si matura una profonda conversione degli interessi scientifici di Selleri verso i fondamenti della Meccanica quantistica.

Si profila un Selleri "eretico". Cercherò di dimostrare che non si tratta di "eresia", ma della coraggiosa esplorazione di territori scientifici e concettuali, comunemente ritenuti ben sistemati, in realtà ben lungi dall'aver ottenuto la sistemazione definitiva. Un sottoprodotto dell'interesse verso i fondamenti della Meccanica quantistica è stata l'analisi critica della Relatività ristretta, che ha portato addirittura alla formulazione di nuove proposte per la teoria relativistica.

Il primo segno di "eresia" in Selleri, nella seconda metà degli anni Sessanta, fu la sua proposta di non conservazione del momento angolare, che avrebbe portato ad una migliore comprensione di alcuni aspetti peculiari della fisica di un insieme di particelle elementari, dette convenzionalmente "strane". La proposta fu inizialmente accolta con grande interesse. Ricordo che a Napoli ne discutemmo a fondo. Addirittura persi uno studente brillantissimo che mi aveva chiesto una tesina sulla teoria quantistica dei campi, e che poi optò per il nuovo scottante argomento della non conservazione del momento angolare.

La proposta di Selleri era fisicamente ben fondata. Il momento angolare mancante sarebbe stato assorbito da una nuova forma di eccitazione del vuoto, detta spurione, privo di energia e momento, ma dotato di momento angolare. Lo spurione aveva una origine nobile, proposto addirittura da Werner Heisenberg. Purtroppo la natura aveva deciso di non utilizzare questa possibilità. La non conservazione del momento angolare si rivelò contraria all'evidenza sperimentale e la proposta cadde.

L'"eresia" prosegue con la marcata conversione dalla fisica delle particelle elementari ai fondamenti della meccanica quantistica, verso la fine degli anni Sessanta. L'impostazione culturale di Selleri è improntata ad un sano realismo di origine non semplicemente filosofica, ma spiccatamente fisica, frutto della sua esperienza nella fenomenologia delle particelle elementari. Alcuni degli aspetti più sconcertanti dell'inter-

pretazione della Meccanica quantistica fornita dalla scuola di Copenaghen, e formalizzati in modo matematicamente rigoroso nell'opera di John von Neumann, sembrano manifestamente contrari ad ogni forma di realismo, anche blanda. Il partito degli "eretici" è numeroso e scientificamente ben qualificato, comprendendo nomi del calibro di Maurice de Broglie, Erwin Schrödinger, Albert Einstein, David Bohm, Jean-Pierre Vigièr e così via. Il problema c'è e non può essere eluso.

Selleri si avvicina agli "eretici", e nel corso di una paziente e frenetica attività durata alcuni decenni, fino alla morte, aiutato da un pugno di coraggiosi collaboratori, sottopone a critica serrata tutti gli assunti dell'interpretazione ortodossa, dalla sovrapposizione delle funzioni d'onda, alla riduzione del pacchetto d'onda, alle distribuzioni probabilistiche previste per le osservabili, alla natura convenzionale della funzione d'onda, all'evoluzione non locale e non causale della funzione d'onda.

La critica è condotta sempre con stretto rigore metodologico, coerente con la solida esperienza precedente nel campo della fisica delle particelle elementari, e con la costante guida del valore ultimo dell'esperimento come garanzia della validità di ogni teoria fisica. Un'impostazione generale di schietto stampo galileiano.

Di particolare rilievo l'analisi critica dei risultati sperimentali che si andavano accumulando nel tempo sulla effettiva violazione delle diseguglianze di Bell per le distribuzioni quantistiche e le innovative proposte di nuovi esperimenti per chiarire definitivamente la questione.

L'opera complessiva di Franco Selleri si trova dispersa in numerosi articoli su rivista, rassegne, interviste. Sarebbe auspicabile una dettagliata presentazione critica, che mostrasse la dinamica interna dello svolgersi delle sue ricerche, i risultati ottenuti, le speranze non realizzate.

Allo scopo di precisare la mia valutazione della "legacy" di Franco Selleri sui fondamenti della Meccanica quantistica, ritengo opportuno richiamare alcuni punti importanti sulla storia della moderna Meccanica quantistica.

Occorre distinguere nettamente tra "Göttingen" e "Copenaghen".

La moderna Meccanica quantistica è stata "creata" da Werner Heisenberg nel 1925, dopo il famoso soggiorno sull'isola di Helgoland per curarsi da un violento attacco di febbre da fieno. Infatti la motivazione per il premio Nobel per la Fisica del 1932 (annunciato nel 1933), a lui conferito, recita testualmente: «for the creation of Quantum mechanics, the application of which has, *inter alia*, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen».

La struttura introdotta da Heisenberg è estremamente semplice, e motivata dall'esigenza di introdurre solo grandezze osservabili, in contrasto con la vecchia Meccanica quantistica di Niels Bohr e Arnold Sommerfeld, che invece introduceva orbite quantizzate, intrinsecamente non osservabili. La procedura è basata su una geniale *Umdeutung* (reinterpretazione) delle osservabili della meccanica classica, tipicamente posizioni e impulsi di particelle. Le osservabili della Meccanica quantistica sono le stesse della meccanica classica e soddisfano le stesse equazioni del moto. Solo che vengono reinterpretate in senso quantomeccanico. Mentre le osservabili classiche sono contraddistinte dai loro valori numerici che evolvono nel tempo, le osservabili quantistiche in-

vece sono operatori, con appropriate regole di commutazione, che evolvono nel tempo seguendo le stesse equazioni classiche.

L'originaria teoria di Heisenberg (meccanica delle matrici) acquisì in pochi mesi piena completezza fisica con l'apporto di ulteriori importanti contributi da parte di Max Born, di Pascual Jordan e dello stesso Heisenberg, culminati nel famoso *Lavoro dei tre uomini* (*Dreie Männer Arbeit*) del 1926. Arriviamo così alla formulazione della Meccanica quantistica moderna, secondo la scuola di Göttingen (Heisenberg-Born-Jordan).

La caratteristica più importante della formulazione di Göttingen è di fare uso solo di grandezze osservabili. Non esiste il concetto di stato quantistico, che non è un osservabile. In un certo senso tutti gli stati vengono trattati contemporaneamente sullo stesso piano. Lo schema teorico permette di determinare tutte le grandezze osservabili oggetto di misura, in particolare gli autovalori degli stati discreti e la matrice S che fornisce i valori delle sezioni d'urto di tutti i processi di diffusione.

Applicare praticamente questo schema non è facile. Wolfgang Pauli riesce a calcolare lo spettro dell'atomo di idrogeno, in un ambito puramente operatoriale, solo tramite una serie di ardite acrobazie matematiche.

Nella sua essenza strutturale, questo schema costituisce un'estensione della meccanica classica in un senso ben preciso. L'evoluzione quantistica delle osservabili è l'analogo del flusso classico sullo spazio delle fasi, e ad esso si riduce nel limite in cui la costante di Planck diviene trascurabile. Esiste una differenza di fondo tra lo schema quantistico e quello classico. Nel caso della meccanica classica il flusso sullo spazio delle fasi può essere fattorizzato traiettoria per traiettoria. L'evoluzione dinamica delle singole traiettorie, al variare delle condizioni iniziali, riproduce l'intero flusso sullo spazio delle fasi. In Meccanica quantistica una procedura di questo tipo, anche se fortemente auspicata su basi fisiche intuitive, non è possibile, almeno restando nell'ambito delle sole grandezze osservabili.

Quasi contemporaneamente giunge a maturazione, a partire dal 1926, e prevalentemente ad opera di Erwin Schrödinger, un approccio alla Meccanica quantistica completamente differente, anche se fisicamente equivalente negli aspetti osservabili. Questo schema parte dalle profonde intuizioni di Louis de Broglie, premio Nobel 1929 «for his discovery of the wave nature of electrons», che aveva sviluppato le sue idee sulla natura ondulatoria degli elettroni nel senso dell'introduzione di una "onda pilota" che avrebbe guidato il comportamento dinamico dell'elettrone. Erwin Schrödinger, in una serie di fondamentali lavori a partire dall'inizio del 1926, perviene alla corretta formulazione dell'equazione d'onda quantistica che ora porta il suo nome.

Nella formulazione di De Broglie e Schrödinger è molto chiara l'idea che la funzione d'onda abbia una esistenza fisica oggettiva nello spazio-tempo. In particolare, Schrödinger tenta disperatamente di limitarsi a considerare funzioni d'onda reali, e solo alla fine è costretto ad arrendersi all'evidenza che la sua equazione richiede funzioni d'onda complesse nel caso generale. Inoltre, egli difenderà a lungo l'interpretazione della funzione d'onda secondo cui $|\psi|^2$ rappresenta la densità locale di carica dell'elettrone.

La formulazione di Schrödinger ha una grandissima forza intrinseca. Anche se la funzione d'onda non è una osservabile, il suo uso è di grande utilità in tutte le questioni

di tipo applicativo. Per esempio, il calcolo dello spettro dell'atomo di idrogeno si riduce a semplici considerazioni su equazioni differenziali della fisica matematica, in confronto con l'imponente meccanismo operatoriale presente nel trattamento di Pauli.

Per queste ragioni, tra l'altro, l'insegnamento universitario della Meccanica quantistica ha sempre privilegiato la linea di sviluppo Bohr-De Broglie-Schrödinger, di fronte all'impostazione di Göttingen, considerata più astratta e più difficile.

Da un punto di vista storico, dopo l'apparizione dei lavori di Schrödinger, di fatto si stabilisce una sorta di compromesso. Pur non essendo osservabile, la funzione d'onda viene assorbita nell'ambito della Meccanica quantistica generale, come rappresentativa dello stato quantistico. La scuola di Göttingen, e in particolare Heisenberg, partecipa al compromesso, che coinvolge in pieno Niels Bohr. Si perviene così alla cosiddetta interpretazione di Copenaghen della Meccanica quantistica, in cui la funzione d'onda diventa centrale.

Naturalmente ci sono pesanti prezzi da pagare. Innanzitutto, emerge una visione probabilistica della funzione d'onda, secondo la profonda proposta di Born (uno dei tre uomini di Göttingen). Ora la $|\psi|^2$ rappresenta solo la densità di probabilità di trovare l'elettrone in un punto nell'istante considerato. Dio gioca ai dadi!

L'intero catalogo degli aspetti strani, apparentemente inaccettabili, della natura e del comportamento della funzione d'onda emerge in piena evidenza. Gli stati quantistici hanno tra di loro delle sovrapposizioni. Il sistema può essere in uno stato ben definito, ma se sottoposto ad una misura volta ad accertare se è in un determinato diverso altro stato, il risultato può essere positivo. Gli stati hanno "entanglement". Gli stati di un sistema costituito da due sottosistemi non sono in genere il prodotto di stati dei due sottosistemi.

La funzione d'onda subisce una drastica istantanea modifica nel corso di una misura: riduzione del pacchetto d'onda. L'evoluzione della funzione d'onda è apparentemente non locale e non causale.

Vi è un profondo dilemma nella teoria quantistica. Da un lato, è possibile non introdurre affatto il concetto di stato quantistico, come nell'originario approccio di Göttingen, limitandosi alla considerazione delle sole grandezze osservabili. D'altra parte, se l'esigenza di una visione chiara e intuitiva della natura fisica dei fenomeni quantistici fa valere le sue ragioni, l'introduzione del concetto di stato quantistico, in piena analogia con la centralità dello stato in meccanica classica, diventa imperativa. Ma allora la scelta della funzione d'onda, come rappresentativa dello stato quantistico, non osservabile, porta ai noti paradossi. Da Göttingen a Copenaghen. Da Scilla a Cariddi.

Gli "eretici", fortemente critici dell'interpretazione di Copenaghen, hanno esaminato in dettaglio tutte queste caratteristiche "strane" della funzione d'onda, arrivando in alcuni casi addirittura ad un deciso rifiuto della Meccanica quantistica.

Tra gli "eretici" Franco Selleri occupa una posizione speciale per molteplici ragioni. Per il rigore metodologico con cui le analisi sono condotte, per il continuo riferimento alla necessità di validare le teorie in sede sperimentale, per l'audacia nella formulazione di nuove ipotesi, per il coraggio nell'affrontare incomprensioni e ostilità, per la profonda onestà intellettuale, che mira all'accertamento della verità piuttosto che alla valorizzazione personale dei proponenti di nuove teorie.

Quindi una parte notevole della sua “legacy” consiste certamente nell’analisi profonda ed esaustiva degli aspetti paradossali dell’interpretazione di Copenaghen della Meccanica quantistica, che potrebbe costituire un patrimonio comune nella formazione dei giovani ricercatori ed essere utilizzato anche dai ricercatori maturi.

Ma c’è anche un aspetto più profondo, che potrebbe rivelarsi di grande importanza strategica. Le spallate date a Copenaghen potrebbero stimolare le ricerche verso un completamento di Göttingen secondo basi fisicamente realistiche. È questa una grande sfida per il futuro. Capire allora gli obiettivi ultimi attesi e sperati nel corso della quarantennale ricerca di Franco Selleri potrebbe essere di grande aiuto.

Tanti cari saluti a tutti e auguri di buon lavoro.

Francesco