

## La candela

Mentre avevo cominciato a preparare la terza parte di questa piccola serie dedicata a commentare l'articolo di Stefania Consigliere (v. puntata 76, apparsa nel n. 3 del 2012, e 78, nel n. 1 del 2013) Terreni mi ha anticipato una replica intitolata *L'immagine della fisica*, che uscirà insieme a questa puntata, e nella quale tra l'altro Consigliere m'invita a

*... spostarsi dal suo campo argomentativo (nel quale, come già detto sopra, ha tutte le ragioni di bacchettarmi), al mio. E vorrei chiedergli, in quanto fisico, se quest'immagine della fisica come disciplina mobile, in grado di affrontare rivoluzioni successive e di toccare questioni ontologiche è falsa, o se è solo semplificata.*

Per più ragioni non posso far cadere l'invito; tra l'altro accettarlo mi riesce assai stimolante, anche se tutt'altro che facile. Però chiedo tempo: dovrò rifletterci alquanto, e la stesura di questa puntata è già in ritardo per i piani della Redazione. D'altra parte il mio commento non era finito: mancava — come sapete — nientemeno che la meccanica quantistica, e a questa vorrei dedicare la presente puntata, che non sarà neppure sufficiente. Per l'allargamento di prospettiva, prego voi tutti, e *in primis* Consigliere, di attendere la conclusione.

Riprendiamo dunque l'analisi e il commento all'articolo di Stefania Consigliere. Ci eravamo lasciati davanti a questa frase:

*La fisica quantistica è la prima teoria scientifica a superare risolutamente questa aspirazione a una conoscenza divina.*

Nel seguito cercherò di dare una rapida esposizione di come la m.q. si è sviluppata, e di come viene intesa dalla pratica totalità di coloro che la usano. Ma prima voglio mettere l'accento su ciò che in modo quasi totalitario viene recepito di questo grande capitolo della fisica del '900, da chi non la conosce da un punto di vista professionale, ma solo attraverso la mediazione dei divulgatori (o di molti filosofi della scienza, purtroppo).

\* \* \*

Ci sono due parole chiave in quella che posso chiamare *l'immagine esterna* della m.q.: *indeterminismo* e *complementarità*. Anticipando la mia valutazione, dico subito che se la prima ha un suo fondamento e interviene in parte nell'uso quotidiano della teoria, la seconda è quasi priva di qualsiasi utilità scientifica. Alle due parole chiave si possono associare due nomi: Heisenberg per la prima, Bohr per la seconda. Oltre ad aver enunciato per primi i concetti che in quelle parole si riassumono, entrambi hanno contribuito, attraverso vari scritti di carattere anche filosofico, a divulgare quell'immagine che sopra ricordavo.

Ma conviene cominciare, se non proprio dal principio, almeno da un secolo fa esatto, quando compare l'articolo che avrebbe dato a Bohr la sua fama: quello dove fu proposto per la prima volta un modello atomico in cui gli elettroni occupano solo stati discreti, con energie *quantizzate*. Per inciso, è curioso — ma anche indicativo del peso che oggi si dà a quella scoperta — che questo centenario non abbia avuto quasi nessuna risonanza: si confronti con quanto spazio ha ricevuto, non solo in ambito scientifico, il centenario nel 2005 dei primi lavori di Einstein sulla relatività.

C'è una ragione per questo, e non è estranea al nostro tema. Per ora la descrivo così: mentre il lavoro di Einstein è stato il fondamento, in sé completo, di una teoria che avrebbe costituito in seguito (e costituisce tutt'oggi) un pilastro della fisica moderna, quello di Bohr era solo un mezzo passo, che coglieva una verità sottostante ma in modo del tutto primitivo e che non avrebbe avuto sviluppi.

Detta in poche parole, l'idea di Bohr è questa. Consideriamo l'atomo d'idrogeno, il più semplice. Secondo il modello "planetario," suggerito dagli esperimenti di Rutherford e coll., allora recentissimi, esso si riduce a un elettrone che ruota in orbita attorno a un protone. Per semplicità, e visto il rapporto delle masse, possiamo addirittura assumere che il protone sia fermo, e solo l'elettrone si muova. Come ulteriore semplificazione, consideriamo solo le orbite circolari (la generalizzazione alle orbite ellittiche sarebbe stata fatta con successo da Sommerfeld, pochi anni dopo). Secondo la meccanica classica, anche con queste semplificazioni l'elettrone può avere qualsiasi energia, perché esiste un'infinità continua di orbite circolari, di raggio qualsiasi.

Ed ecco l'idea di Bohr: supponiamo che siano ammesse solo quelle orbite in cui l'elettrone ha un momento angolare che è un multiplo intero di  $h/(2\pi)$ . Queste sono solo una successione discreta, con raggi che crescono come i quadrati degli interi, mentre le corrispondenti energie  $E_n$  sono negative e inversamente proporzionali agli stessi quadrati (mi comprenderete se ometto la dimostrazione, per quanto elementare).

Bohr assume poi che l'atomo possa assorbire o emettere energia solo passando dall'una all'altra di queste orbite. Aggiungiamo la regola che a questa transizione venga associato l'assorbimento o emissione di un singolo quanto di radiazione e.m., la cui frequenza (come già si sapeva da Planck e Einstein) è legata all'energia dalla relazione

$$h\nu_{nn'} = E_n - E_{n'} ;$$

troviamo allora una formula, che non scrivo, per tutte le frequenze (e quindi le lunghezze d'onda) delle righe spettrali dell'idrogeno.

A quel tempo le misure spettroscopiche avevano già fornito le lunghezze d'onda in questione, ed era anche stata data (da Rydberg, 1888) una semplice espressione matematica che rappresentava assai bene i dati sperimentali; appunto

nota come “formula di Rydberg.” Questa formula conteneva una sola costante empirica, la *costante di Rydberg*  $R$ , il cui valore era noto con grande precisione (forse sei cifre).

Il successo della proposta di Bohr sta in primo luogo nel fatto che ritrova per via teorica la formula di Rydberg; ma per di più fornisce un’esatta espressione per la costante:

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{c h^3}$$

che contiene solo costanti fondamentali note. Il perfetto accordo col valore determinato sperimentalmente non può essere casuale: significa che il modello di Bohr ha colto qualcosa di profondamente vero riguardo alla struttura dell’atomo e alle leggi che la regolano.

D’altra parte, quel modello si basava su ipotesi incompatibili con tutto ciò che allora si sapeva in materia di meccanica ed elettromagnetismo: la misteriosa condizione di quantizzazione del momento angolare, ma soprattutto l’idea che un elettrone in orbita attorno al protone non dovesse irraggiare in modo continuo, come previsto dalle equazioni di Maxwell, ma in solo in modo discreto e forse istantaneo, nel corso del passaggio a un’altra orbita.

Era quindi già chiaro a quel tempo che il modello di Bohr forniva solo un *indizio* per qualcosa di nuovo, per una nuova meccanica (e un nuovo elettromagnetismo?) ancora da nascere. Di fatto non si sarebbe dovuto aspettare molto: poco più di dieci anni. De Broglie (1924), Heisenberg (1925), Schrödinger (1926) avrebbero fatto i passi fondamentali per la nascita della nuova *meccanica quantistica*. Per contrapposizione, quella di Bohr–Sommerfeld sarebbe stata chiamata “vecchia meccanica quantistica,” ed è oggi quasi dimenticata: non credo che nei corsi universitari vi si faccia più che un fuggevole accenno.

\* \* \*

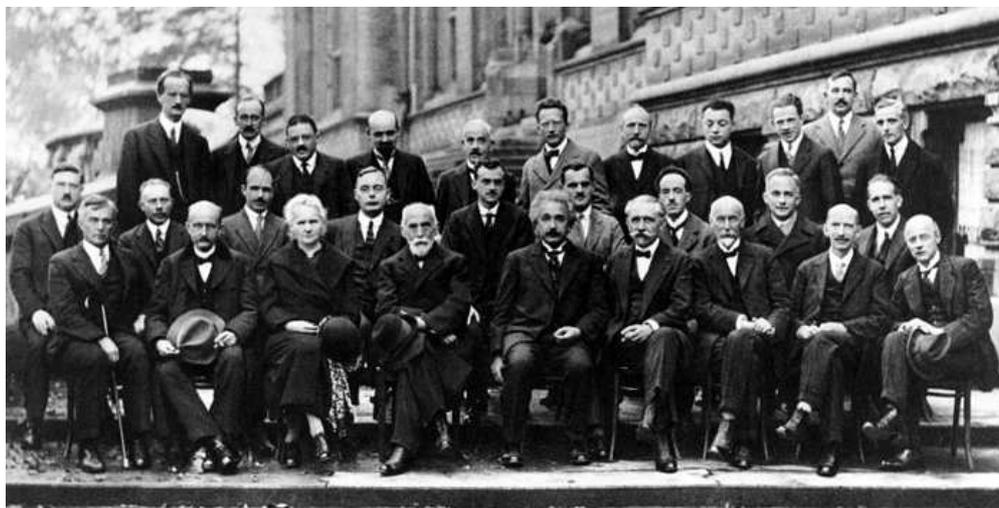
Se il suo modello atomico resta il principale contributo dato da Bohr alla fisica, egli è anche giustamente noto per la parte che ebbe nelle discussioni attorno al significato da attribuire alla *nuova* meccanica quantistica, di cui divenne subito un convinto sostenitore. Restano memorabili i suoi “duelli” con Einstein, che viceversa non accettava la m.q. se non come un passo provvisorio verso una “vera” teoria dei fenomeni microscopici. Sappiamo che a questo lavorò (senza risultati) fino alla fine della sua vita, e che con la sua azione critica diede un contributo essenziale a una miglior comprensione della m.q.

Il riferimento è soprattutto al famoso “paradosso EPR” (Einstein, Podolsky, Rosen, 1935) che ancora 50 anni dopo la sua pubblicazione avrebbe stimolato ricerche teoriche e sperimentali. Si può ormai dire che quelle ricerche abbiano dimostrato che “Einstein aveva torto”; ma questa storia, alla quale ho solo oscuramente accennato, dimostra anche come la ricerca fisica proceda sempre attraverso esperimenti, ipotesi, congetture, proposte teoriche, critiche, confutazioni,

altri esperimenti, conferme o smentite. . . Un processo estremamente complesso, che purtroppo può essere colto appieno solo da chi padroneggi a sufficienza tutto l'apparato di concetti, di fatti, di strumenti matematici, che costituiscono l'ossatura della costruzione che si va realizzando.

Ma torniamo a Bohr e Einstein. Lo scambio d'idee o meglio il confronto (sempre assai garbato, anzi amichevole) si protrae per diversi anni. Il culmine è raggiunto in occasione della Conferenza Solvay del 1927, alla quale parteciparono i maggiori fisici del tempo, per discutere appunto sulla "nuova fisica." È rimasta famosa la battaglia tra i due grandi: Einstein ogni giorno si presentava con un diverso esperimento ideale che a suo parere avrebbe confutato una delle idee base di Heisenberg, ossia il suo *principio d'indeterminazione*; poco dopo Bohr dimostrava la fallacia dell'argomento di Einstein.<sup>(1)</sup> Si può dire che dal confronto Bohr uscì vincitore, anche se non riuscì a convincere Einstein.

Mi piace illustrare questo racconto semistorico con due fotografie dell'epoca, entrambe scattate a quella conferenza. Nella prima potete vedere tutti i partecipanti; senza elencarli tutti, indico alcuni che mi è capitato o mi capiterà di nominare, e che sono comunque largamente conosciuti, almeno di nome. Nella prima fila, il secondo da sinistra è Planck, il quarto Lorentz, poi Einstein. In seconda fila: quinto da destra Dirac, terzo de Broglie, secondo Born, primo Bohr. In terza fila: sesto da destra Schrödinger, quarto Pauli, terzo Heisenberg. Come si vede, c'è una sola donna, e non debbo certo dirne il nome. Ricordo invece che in un gruppo di cui almeno la metà sono premi Nobel, lei è l'unica che ne abbia ottenuti due.



---

<sup>(1)</sup> Si veda per es. il racconto che ne fa Bohr nel volume in occasione dei 70 anni di Einstein: "Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica" in *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, a cura di P. A. Schilpp; Einaudi 1958, p. 147 e segg.

Per inciso, se ho evitato di fare l'elenco completo, che del resto potete trovare in internet, non è certo che perché i non nominati fossero di secondo piano: ci sono (in ordine alfabetico) Bragg, Brillouin, Compton, Debye, Ehrenfest, Fowler, Knudsen, Kramers, Langevin, Langmuir, Wilson e altri. E non posso fare a meno di confidarvi un pensiero, su cui vi lascio riflettere: sarebbe oggi possibile riunire in una foto altrettanti fisici che hanno lasciato un segno importante, nomi che ancora troviamo ricordati nei libri a oltre 80 anni di distanza? Se (come credo) la risposta è negativa, da che dipende?

La seconda foto è altrettanto famosa, perché rappresenta in immagini quello che ho appena raccontato. Si vedono infatti Einstein e Bohr che passeggiano insieme, e possiamo quasi indovinare il soggetto della loro conversazione. . .

\* \* \*

È nel corso di questo lavoro, al confine tra fisica e filosofia, che Bohr sviluppa l'idea di *complementarità*, che in origine è questione strettamente fisica. Un'interpretazione del principio di Heisenberg (vedremo poi perché ho scritto "un'interpretazione") suona così: *non è possibile misurare insieme, con precisione arbitraria, posizione e quantità di moto di uno stesso corpo*. Bohr e anche Heisenberg<sup>(2)</sup> esaminano numerosi esempi di esperimenti volti a compiere la detta misura, e mostrano come ci siano sempre delle limitazioni *intrinseche* che portano appunto alla restrizione sulla precisione raggiungibile nelle misure simultanee. (So che sarebbe necessario spiegare meglio, ma purtroppo in questa sede non mi è consentito.)



In realtà la limitazione non vale solo per posizione e  $q$ . di moto, ma per qualsiasi coppia di *variabili coniugate*: un termine tecnico della meccanica analitica classica, che qui non è possibile spiegare. Bohr osserva che l'impossibilità deriva dal fatto che la misura di una delle due variabili, e quella della variabile coniugata, sono in realtà *due diversi esperimenti*, tra loro *complementari*, nel senso che entrambi sono possibili ma *l'uno esclude l'altro*. Da qui nasce il suo *principio di complementarità*, che Bohr estende molto al di là dell'ambito fisico dove lo si può enunciare e applicare in modo chiaro e distinto (e dove però è anche superfluo, nel senso che non aggiunge niente a quanto è già implicito nella formulazione della teoria).

---

<sup>(2)</sup> Per es. in un classico libro del 1930: trad. ital. *I principi fisici della teoria dei quanti*, Einaudi 1948.

Per Bohr il principio di complementarità ha una portata gnoseologica molto più generale: si applica a qualsiasi campo della conoscenza. Cita esplicitamente la psicologia e la biologia e anche altre applicazioni. Ed è qui che a mio giudizio Bohr si perde: abbandonando il solido terreno della fisica, la sua complementarità si riduce a poco più che un generico consiglio sul modo di procedere nella ricerca dalla conoscenza.

In un qualche senso la complementarità di cui parla è vera: certamente in molti casi esistono diversi punti di vista sotto cui è possibile studiare un oggetto, un campo di fenomeni (anche fuori della realtà materiale). È anche vero che i diversi punti di osservazione arricchiscono la comprensione, che una descrizione unilaterale può essere inadeguata. Ma Bohr dice di più: asserisce che questa è una condizione ineludibile del nostro modo di conoscere, che la si ritrova ovunque, che deve essere tenuta presente e considerata come un limite necessario alle nostre conoscenze, che possono aspirare a una qualche completezza solo in questa forma dualistica.

Non stupisce che una simile posizione abbia riscosso interesse fuori dell'ambito scientifico, là dove può aver incontrato delle "risonanze." Ecco per es. Consigliere:

*Le scienze hanno superato la crisi compiendo tutte uno stesso movimento: indebolendo il rigore della logica classica in favore della capacità di ricomprendere all'interno del sistema fenomeni altrimenti incomprensibili; tenendo quindi in equilibrio la ragione logicizzante e le sfumature di significato, leggi e processi. Aprendosi all'indeterminato e al molteplice, senza, per questo, rinunciare al rigore argomentativo, alla responsabilità sperimentale, alla ragione.*

Non avrei niente da obiettare a ciò, se non fosse troppo comune il richiamo alle conquiste della fisica del '900 come modo per dar forza ad argomentazioni che con la fisica non hanno niente a che fare. Come ho già detto, in ambito strettamente fisico il principio di complementarità è inutile, salvo al più come generico criterio euristico: la realtà delle limitazioni legate al principio d'indeterminazione va indagata caso per caso, basandosi sull'esatto formalismo della m.q., e richiamare una generica complementarità non aiuta in alcun modo.

Invece la posizione di Bohr, come appare dall'articolo citato in <sup>(1)</sup> (pag. 157–158), è ben diversa:

*Come sottolineai nel mio rapporto, uno strumento adatto a consentire una descrizione di tipo complementare è fornito precisamente dal formalismo meccanico-quantistico, schema puramente simbolico che, in accordo col principio di corrispondenza, consente solo previsioni sui risultati che si possono ottenere per mezzo dei concetti classici, in condizioni ben specificate. Occorre qui ricordare che perfino nella relazione d'indeterminazione ci si trova di fronte a una conseguenza, implicita nel formalismo, che non si può esprimere in modo non ambiguo con le stesse parole che servono a descrivere immagini fisiche classiche. Così,*

*l'affermazione che “non si può conoscere nello stesso tempo l'impulso e la posizione di un oggetto atomico” pone immediatamente il problema della realtà fisica di questi due attributi dell'oggetto, problema a cui si può rispondere solo riferendosi, da una parte, alle condizioni in cui i concetti spazio-temporali possono essere usati non ambigualmente, e, dall'altra, alle leggi dinamiche della conservazione. Mentre la combinazione di questi concetti in una singola immagine di concatenazioni causali di eventi costituisce l'essenza della meccanica classica, al di là di tale rappresentazione sussiste ancora dello spazio per altre regolarità, in considerazione del fatto che lo studio dei fenomeni complementari richiede dispositivi sperimentali che si escludono a vicenda.*

Rileggendo questa pagina dopo molti anni, sono stato colpito soprattutto da un fatto: appare evidente che Bohr (il quale, nato nel 1885, apparteneva a una generazione precedente a quella di Heisenberg, n. 1901) non riesce ancora a considerare la m.q. come una “normale” teoria fisica. Ho evidenziato un paio di frasi sintomatiche: per lui la m.q. è uno “schema puramente simbolico,” qualcosa di radicalmente diverso dalla meccanica classica, che (presumo) descriverebbe invece direttamente e concretamente la realtà. Per la stessa ragione, il modo come formula il principio d'indeterminazione, e che ho già preannunciato di dover discutere, lo porta a porsi un problema ontologico, che a suo parere non si pone allo stesso modo se si resta nella fisica classica.

Col passare del tempo tale contrapposizione si è fortemente modificata; in particolare, nessuno oggi sosterrebbe una visione così ingenua del modo come la fisica classica rappresenta la realtà. Di certo il rapporto con la m.q. dei fisici di generazioni successive, anche a quella di Heisenberg, si è progressivamente “pacificato”: senza dubbio la m.q. è “strana,” lontana dall'intuizione (Feynman in *QED* arriva a dire paradossalmente che nessuno capisce la m.q.); ma al tempo stesso la sua grandissima capacità esplicativa — di cui mi riprometto di parlare più avanti — ci obbliga ad accettarla come una rappresentazione del tutto adeguata della realtà. Ancora Feynman, di soli 17 anni più giovane di Heisenberg, ama dire: “this is the way things are.” Tradotto liberamente: così è fatto il mondo...

Perciò chi voglia oggi capire qualcosa della m.q. farebbe bene a non basarsi su autori della generazione di Bohr, e in realtà neppure di Heisenberg. Il primo, come ho già detto, era troppo attaccato al paradigma della fisica classica (uso di proposito l'idea kuhniiana di “paradigma,” che è qui strettamente pertinente) per poterlo superare senza un complicato sforzo che coinvolgeva (impropriamente a mio parere) categorie filosofiche; ma anche il secondo, sebbene fosse proprio lui uno dei fondatori del nuovo paradigma, non poteva liberarsi del vecchio, non foss'altro perché era obbligato a discutere con autorevoli fisici della generazione precedente, che non si lasciavano convincere facilmente (qualcuno, come Einstein, non arrivò a convincersi mai).

Il suo libro <sup>(2)</sup> lo mostra in modo evidente: a una parte dove la nuova teoria della m.q. è esposta nei suoi tratti fondamentali, usando tutto il necessario apparato matematico, è premessa un'ampia discussione di alcuni esperimenti classici (che nella prefazione Heisenberg definisce "il vero e proprio testo") il cui scopo è di mostrare come le proprietà quantistiche di recente scoperta obblighino a tener conto dell'interazione tra il sistema osservato e l'apparato di misura.

A dire il vero, Heisenberg si esprime in modo diverso: <sup>(3)</sup>

*... nella fisica atomica si può trar giovamento dalle discussioni, fondamentali per tutta la teoria della conoscenza, sulle difficoltà che sono collegate con la separazione del mondo in soggetto ed oggetto. Talune astrazioni che sono caratteristiche della moderna fisica atomica, si trovano già enunciate nella filosofia del secolo passato. Mentre queste astrazioni potrebbero essere evitate come giochi del pensiero dallo scienziato che bada solo alla realtà, oggi la raffinata arte sperimentale della fisica moderna ci costringe invece a discuterle minutamente.*

In questa citazione sono notevoli due cose: la separazione soggetto/oggetto (su cui ho già detto la mia opinione nella puntata precedente) e il richiamo alla "filosofia del secolo passato," dove mi pare che Heisenberg alluda soprattutto all'idealismo tedesco. Qui si vede un'evidente (e secondo me arbitraria) impronta filosofica, che anche Heisenberg ritiene di dover dare alla discussione sui fondamenti della m.q. Ho già accennato che gli sviluppi successivi non sono andati in questa direzione (a parte alcune eccezioni); ma mi riprometto di riprendere l'argomento più avanti.

\* \* \*

La discussione della complementarità potrebbe facilmente essere estesa, ma ritengo meglio limitarmi. Però sulla m.q. in generale c'è ancora molto da dire, e quindi — tanto per cambiare — vi do appuntamento a una prossima puntata.

---

<sup>(3)</sup> *loc. cit.*, p. 81