

## L'unità della scienza.

### Considerazioni sulla cultura contemporanea basate sul pensiero dei fisici: Il determinismo e il suo opposto.

*Carlo Bernardini*

#### 1 – Piccola premessa.

La cultura contemporanea è assai poco imbevuta di rappresentazioni mentali generate dalla scienza. Il caso della fisica, poi, tra le scienze, è addirittura marginale; perché la reputazione “dura” di questa modalità di pensiero è addirittura disarmante. In effetti, il problema è che con il linguaggio comune si fa poca strada e i linguaggi formali necessari per avere idee non troppo “aristoteliche” (la cosiddetta “fisica ingenua”) richiedono una specializzazione eccessiva per i più. Perciò, la fisica appare estranea ai problemi che più sembrano coinvolgere e suggestionare la gente; problemi che, pure, non è esattamente comprensibile se hanno lo stesso contenuto interrogativo per tutti; e tuttavia sembrano comprensibili senza ulteriori sforzi. Il che non implica che abbiano risposte. Che cosa è “la coscienza di sé”? Che cosa è “l’etica laica”? Addirittura: “che cosa è la vita”? Il linguaggio della fisica, nel suo ambito naturale, formula continui interrogativi epistemologici. A me sembra che esso dia anche risposte epistemologicamente accettabili e comprensibili. Vale perciò la pena di affrontarne le difficoltà, visto che ha raggiunto una “unità disciplinare” che può essere esemplare per ciò che lascia, come residuo di scarto, alle suggestioni e al gratuito del linguaggio comune. Il problema ha affascinato molti fisici, tra i quali voglio citare Max Planck<sup>1</sup>, Karl von Weizsäcker<sup>2</sup>, Werner Heisenberg<sup>3</sup> e Edoardo Amaldi<sup>4</sup>. Voglio solo annotare che, nonostante questi potenti esempi di curiosità avvolte in qualche mistero, la grande maggioranza dei fisici attivi è piuttosto recalcitrante in materia, per una avversione spontanea a ciò che “puzza di metafisico”; a partire dalla domanda: “perché la natura ha le sue leggi?”. Può ben essere, per me, che noi umani esageriamo con questi interrogativi: credo, comunque, che ci sia del vero in Heisenberg (cit. nota<sup>3</sup>) quando dice: <<oggetto della ricerca non è quindi più la natura in sé, ma la natura subordinata al modo umano di porre il problema>>.

#### 2 – Evoluzione epistemologica.

Il determinismo è un concetto antico, introdotto forse da Democrito. E’ anche una aspirazione ingenua delle scienze “esatte”, che per fortuna non si chiamano più così: forse, è per la banale implicazione della predittività, che è fonte di certezza; e per il controllo dell’insicurezza figlia dell’incerto. A mio parere, è anche un equivoco fiorito sul fatto che il linguaggio dei fenomeni è formalizzato dalla matematica astratta con cui si è dato corpo alla meccanica tanto cara ai “fisici matematici” (pensate alla “meccanica razionale”, oggi un po’ al tramonto nelle sue vecchie forme di appena qualche decennio fa). L’analisi matematica di Leibniz- Newton non nasconde l’intenzione deterministica nella

---

<sup>1</sup> M. Planck, *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*, vol. 3, Vieweg, Braunschweig, 1958, alle pagine 6 e 179

<sup>2</sup> C. F. von Weizsäcker, cf. la rassegna presentata da F.J. Zucker, in Boston *Studies in the Philosophy of Science*, n° 5, 1969, pg 474

<sup>3</sup> W. Heisenberg, *Natura e fisica moderna*, Garzanti, 1985

<sup>4</sup> E. Amaldi, *The Unity of Physics*, Physics Today, sept. 1973

formulazione delle leggi e si sposa molto ambiguamente con la malcelata possibilità che la descrizione della realtà naturale sia deduttiva. In qualche modo, il modello di formulazione che sembra usato per accreditare con un puntello classicamente robusto le affermazioni relative ai principi è quello della geometria di Euclide.

In sostanza, è la pretesa di corrispondenza biunivoca tra cause ed effetti a spingere al determinismo e, nella pratica quotidiana, non si trova granché a smentire questa credenza; i soli eventi considerati banalmente imprevedibili sono quelli determinati dalla volontà degli individui diversi da noi. La nozione di casualità e quella di probabilità nascono semmai dall'impossibilità di predire effetti simultanei di diverse concause, quindi dalla "complicazione" del sistema fisico di cui si sta studiando il comportamento evolutivo. L'idea di una intrinseca autonomia del non-deterministico è perciò considerata ripugnante, alla stregua di banale ignoranza o incompletezza dei dati: certo, fa a pugni con l'atavica aspirazione alle manifestazioni di un "decisore assoluto e onnipotente" che, conoscendo tutte le condizioni iniziali, potrebbe predire esattamente il destino (determinismo Laplaciano, in onore di Pierre Simon de Laplace che aveva fatto riflettere su questa caratteristica della concezione meccanica del mondo; è anche con questo determinismo che fa i conti, oggi, il problema del caos deterministico e della sensibilità alle condizioni iniziali, ma qui non ne parlerò).

### **3 – Dal classicismo al modernismo (categorie prese in prestito dagli umanisti).**

Tra la metà dell'800 e il 1925 un nubifragio concettuale mise a soqquadro la fisica. Le equazioni del campo elettromagnetico di Maxwell, la relatività speciale e generale di Einstein e la meccanica quantistica di Heisenberg e Schrödinger. Questi tre ingredienti hanno fatto cambiare integralmente la rappresentazione mentale dei fisici; è giocoforza che l'epistemologia cambi i suoi linguaggi. Ma la situazione è notevolmente difficile da sbrogliare: le onde elettromagnetiche partono come onde dell'etere per rendersi meccaniche a costo di accettare un mezzo materiale meccanicamente assai poco plausibile, la relatività sembra fare a pugni con il senso comune riguardante lo spazio e il tempo, la quantizzazione à la Bohr-Sommerfeld procede cautamente vincolando la meccanica analitica classica con regole di discretizzazione degli "invarianti adiabatici". E proprio la meccanica analitica classica si attrezza per "conservare" un po' di determinismo di base con l'aiuto delle simmetrie e dei relativi principi di conservazione. Emmy Noether e Albert Einstein difenderanno il realismo classico con strumenti di straordinaria eleganza.

Ma, intanto, che cosa è esattamente che fa da supporto al determinismo classico? Sono le variabili considerate "osservabili" e le equazioni che ne governano il moto. L'ingrediente principe di tutta la fisica che trionfa attraverso la "meccanica analitica" è il *punto materiale*, considerato una astrazione più che naturale e, per giunta, utilissima. Tutta l'immaginazione richiesta per usarlo consiste nel dare un supporto di dimensioni infinitesime a una certa quantità di materia e ad altri possibili attributi localizzabili. Il punto materiale ha almeno una massa; ma poi può avere una carica elettrica, un momento angolare intrinseco (spin), un momento magnetico. Questi attributi puntiformi possono imbarazzare con il concetto di densità ad essi associata, a cui verrà in soccorso l'idea delle "funzioni generalizzate" di P.A.M. Dirac (la celebre funzione delta) che i matematici si affretteranno ad addomesticare nel loro zoo con la teoria delle

distribuzioni di L. Schwarz. Nei primi anni '20 del '900, il grande olandese Hendrik Antoon Lorentz ottiene ancora risultati di prim'ordine con punti materiali elettromagneticamente attivi e rotanti meccanicamente. Lo stesso Einstein non ha bisogno di uscire dalla nicchia epistemologica della meccanica analitica (il realismo "classico") per relativizzarla. Lo spazio naturale per il pensiero meccanico analitico è il cosiddetto spazio delle fasi che avrà come coordinate cartesiane posizioni e momenti di punti materiali: 6 coordinate per un solo punto,  $6N$  per  $N$  punti. Il numero 6 riflette sia le tre dimensioni dello spazio percepito che il numero di condizioni iniziali necessarie per ricostruire il moto di ciascun grado di libertà integrando equazioni differenziali del secondo ordine.

#### **4 – I potenti simulacri dei sistemi fisici.**

Un sistema fisico è a sua volta "riprodotto simbolicamente" da una funzione di queste  $6N$  variabili dinamiche, la Hamiltoniana  $H$  o, pressoché equivalentemente, la Lagrangiana  $L$ , che ne dovrebbero essere fedeli simulacri. Tutte le proprietà del sistema sono descritte già da  $H$  o da  $L$ . Ogni moto è una traiettoria nello spazio delle fasi, un continuo che fa anche da spazio per tutti i possibili "stati" del sistema e quindi per tutte le possibili condizioni iniziali: stati e condizioni iniziali altro non sono che punti di questo spazio. Le traiettorie sono descrivibili con equazioni parametriche per le coordinate dello spazio delle fasi: il tempo si palesa con il suo ruolo naturale di parametro universale.

E' in questo schema, in questa rappresentazione mentale fondata su un determinismo di principio, quello della causalità, che si inserisce decisamente la meccanica statistica di Ludwig Boltzmann con i suoi risultati ma anche con i suoi interrogativi. E' la statistica a affrontare lo studio del comportamento di insieme di un enorme numero di punti materiali, gli atomi. Lo spazio delle fasi di un gas si ricoprirà di possibili distribuzioni e il problema sarà quello di identificare la più probabile di esse e di studiarne le possibili fluttuazioni. Il gas nel suo insieme sarà comunque rappresentato, istante per istante, da un sol punto dello spazio a  $6N$  dimensioni che si sposta impercettibilmente e rapidamente. Pur di conservare il determinismo del continuo, i fluidi, ci sarà fior di grandi pensatori che si ostineranno a rifiutare gli atomi, sinché Jean Perrin smonterà il pregiudizio. Senza uscire dal determinismo della meccanica analitica; un conto è la statistica applicata a grandi numeri di oggetti, un conto è l'incertezza della sorte individuale di quegli oggetti. Le grandezze osservabili dei punti materiali restano sempre quelle adoperate da Newton in poi: posizione, velocità, accelerazione, forza, massa, energia, momento, momento angolare, carica elettrica, eccetera.

#### **5 – Il campo c'è ma non si vede (come campo).**

Più o meno nello stesso periodo – fine '800, inizio '900 – l'elettromagnetismo fa grandi passi. L'introduzione della "corrente di spostamento" realizza la "compatibilità", nelle equazioni di campo, di una legge di conservazione senza la quale la teoria avrebbe incontrato difficoltà interpretative enormi: è la conservazione della carica elettrica, della quale non c'è in verità, all'epoca, una prova sperimentale robusta. Ma la carica, intesa come un fluido e sospettata di avere un supporto materiale almeno a livello atomico, "è meglio che soddisfi a una equazione di continuità": questo è l'auspicio; ma la conseguenza immediata è che le equazioni di Maxwell hanno ora soluzioni che rappresentano onde. Lo spazio-tempo si riempie di colpo del "campo di radiazione" prodotto dalle cariche in movimento. Heinrich Hertz è l'artefice di

questa novità sconvolgente. Ma ora le onde elettromagnetiche devono adattarsi a convivere con la materia: nello spazio, viaggiano insieme onde e corpuscoli carichi (punti materiali portatori di carica elettrica) e non possono non interagire. Le più celebri onde elettromagnetiche sono quelle luminose. Ma tutte le lunghezze d'onda sono possibili. C'è già la spettroscopia e c'è un problema concettualmente molto raffinato. Il problema del corpo nero. [Detto fra noi, moltissima gente ancora non sa cavarsela alla domanda: “che vuol dire, *nero* ?” Nero non è un colore, è una proprietà.] Ed ecco che dal corpo nero salta fuori prodigiosamente che il contenuto energetico di un siffatto corpo sarebbe divergente, a meno che... A meno che la radiazione che esso produce (ma come? Se è nero! Qui sta il bello...) non abbia una struttura corpuscolare anziché ondulatoria.

### 6 – L'anno mirabile

Nel 1905 (*annus mirabilis*, nelle recenti celebrazioni centenarie), Einstein propone i “fotoni”, corpuscoli elettromagnetici che hanno energie proporzionali alla frequenza dell'onda che li descrive classicamente à la Maxwell. L'effetto fotoelettrico si interpreta così in un battibaleno; ma anche lo spettro del corpo nero, e la legge di spostamento di Wien che permette di definire la “temperatura di colore”, e la legge di Stefan che mostra che i corpi caldi perdono potenza radiante con la quarta potenza della temperatura assoluta. La densità di energia nel campo così come la densità di momento sono state chiaramente identificate in alcune forme quadratiche costruite con le ampiezze dei campi. Questo appare assai naturale se le ampiezze di oscillazione dei campi d'onda sono quelle di un mezzo materiale come il fantomatico etere, di cui l'elettromagnetismo descrive i “terremoti”. Il modello delle oscillazioni dell'etere aveva avuto buon gioco dei “corpuscoli luminosi” a cui avevano fatto ricorso le più antiche teorie della visione, chiedendosi al più se uscissero dal corpo osservato o dagli occhi dell'osservatore. E però, per quanto intensi siano i campi, se la loro frequenza non è sufficientemente grande (“sopra-soglia”) l'effetto fotoelettrico non si produce. E già questo è uno shock. Ma il bello è che la stessa nuova costante universale che permette di ricavare la lunghezza d'onda delle righe spettrali, la costante della legge di Stefan, la temperatura di colore e la costante del rapporto energia/frequenza dei fotoni è sempre la “costante di Planck”, quella che Max Planck aveva introdotto con lo “spettro del corpo nero” in una azzardata ipotesi di granularità per la termodinamica statistica della radiazione. Una coincidenza prodigiosa! Ma allora, le forme quadratiche per le densità di energia e momento del campo di radiazione, sono forse “sbagliate”, un abbaglio formale? No, vanno rilette. La densità di energia radiante nello spazio altro non è che la densità numerica dei fotoni moltiplicata per l'energia di un singolo fotone ( $n(x,y,z)h\nu$ , con simboli evidenti per la consuetudine). Questa relazione si può definire come una forma di “quantizzazione ingenua” del campo elettromagnetico: effettivamente, se si usa la versione delle equazioni di Maxwell ottenuta per le trasformate di Fourier dei campi, questa relazione permette di ottenere espressioni ragionevoli e utili per la radiazione di frenamento e il suo spettro divergente (“catastrofe infrarossa”).

Siamo già a un salto enorme: questi fotoni sono gli “oggetti” più relativistici che ci siano, viaggiano alla velocità della luce trasportando energia, momento e momento angolare (spin) pari a una unità  $\hbar = h/2\pi$  orientato nel verso del moto o in quello opposto (il che corrisponde a una polarizzazione circolare

destrorsa o sinistrorsa come già indicato nelle equazioni di Maxwell. In più, la relazione di dispersione che lega frequenza  $\nu$  e lunghezza d'onda  $\lambda$  (meglio: numero d'onda  $k = 2\pi/\lambda$ ) fa sì che l'invariante quadratico del 4-vettore energia-impulso di un fotone sia zero: i fotoni hanno massa a riposo nulla! Ricapitolando: le onde di Maxwell sono diventate corpuscoli; strani corpuscoli, la cui dinamica è descritta da equazioni di campo che non li prevedono, li tollerano soltanto. L'effetto fotoelettrico induce a crederci, ma la rassicurazione di essere nel giusto verrà più avanti quando Arthur H. Compton, nel 1923, misurerà lo scattering di raggi X su elettroni, ottenendo la conferma del fatto che una "cinematica relativistica di urti fotone-elettrone" rende conto dello spostamento di lunghezza d'onda corrispondente alla variazione di energia in un urto elastico tra corpuscoli. Qui, le equazioni di Maxwell inducevano a credere che il campo associato ai raggi X mettesse in oscillazione l'elettrone investito che, perciò, avrebbe irraggiato, come un'antenna microscopica, radiazione della stessa frequenza di quella che lo aveva investito (come nei calcoli di Thomson, che si era già occupato del processo).

### 7 – Ma chi è corpuscolo e chi onda?

Il fantasioso Louis De Broglie, in contatto con Paul Langevin che lo raccomanda ad Einstein, studiando da laureando la meccanica di Bohr e Sommerfeld che sembrava essere la naturale evoluzione della adorata meccanica analitica, incomincia a sospettare che tra i livelli quantizzati degli atomi e i modi normali delle cavità elettromagnetiche ci sia qualche analogia. Si può fare la prova: un elettrone che ruota attorno a un nucleo per effetto dell'attrazione elettrica, in realtà "percorre" (?) un'onda stazionaria di lunghezza d'onda pari alla circonferenza dell'orbita divisa per un intero. Se si suppone che il momento  $p$  dell'elettrone sia proprio uguale alla costante di Planck divisa per la lunghezza d'onda dell'onda percorsa (detta relazione di De Broglie, di lì in poi,  $p = h/\lambda$ ), si ottengono le famose righe di Balmer dell'idrogeno. Bel colpo. Ma di che diavolo di onde si tratta? Nel 1925 Werner Heisenberg quantizza la meccanica a modo suo, trasformando le osservabili in operatori non commutativi. Bisogna conoscere bene matematiche molto astratte per cavarci le gambe. Ma, più o meno contemporaneamente, Erwin Schrödinger fa un passo avanti nell'idea di De Broglie: scrive una equazione delle onde per una particella in un potenziale. L'onda di Schrödinger è uno degli oggetti più misteriosi della storia della fisica: è giocoforza pensare che non rappresenti una grandezza osservabile ma solo un escamotage per generare autovalori discreti di una vera grandezza osservabile (per esempio, l'energia). Schrödinger ha successo: la matematica che adopera non è quella degli operatori (matrici) di Born e Heisenberg ma quella delle equazioni alle derivate parziali in cui la scuola italiana si muove molto a suo agio (sia i matematici che i fisici). Ma ora di meccaniche nuove di zecca ce ne sono due: quella di Heisenberg e quella di Schrödinger. Intanto, nuovi attori entrano in campo: sempre vigili Niels Bohr, Albert Einstein e Arnold Sommerfeld; ma spuntano soprattutto Wolfgang Pauli, Max Born, Paul Dirac e Pascual Jordan. Pauli darà la spiegazione degli spettri e della struttura degli atomi a molti elettroni con il suo principio di esclusione, valido per particelle di spin "semintero", rispetto a una unità  $\hbar = h/2\pi$ . Max Born e Pascual Jordan capiscono che le osservabili con cui Heisenberg sta trafficando sono "matrici" non commutative; e capiscono che la meccanica ondulatoria di Schrödinger e la meccanica delle

matrici di Heisenberg sono due versioni della stessa meccanica, con risultati traducibili tra loro con un “vocabolario” che stabilisce corrispondenze uno-a-uno. Ne nasce un problema veramente grosso: gli oggetti microscopici appariranno come corpuscoli se si fa un esperimento che fa vedere proprietà corpuscolari (tracce in camere a nebbia), appariranno come onde se si fa un esperimento che fa vedere proprietà di onde (diffrazione). Le tracce in camera di Wilson sembrano traiettorie di punti materiali carichi che ionizzano e rendono visibili le gocce, le distribuzioni di elettroni diffusi su cristalli da Davisson e Germer sembrano figure di diffrazione. Intanto, è nato il dualismo onda-corpuscolo, che già era latente nel dualismo fotone-onde elettromagnetiche ma allora non aveva dato tensioni epistemologiche forse perché la rimozione dell’etere teneva occupati gli animi dei conservatori assai più di questa doppia natura del campo. Questa sorta di schizofrenia semantica lascia sbalorditi: l’unico a rendersene veramente conto sembra essere Einstein, che si arrabatta a cercare “prove di inconsistenza”: con gli amici Rosen e Podolski creerà il paradosso EPR (dalle iniziali dei tre nomi) che ancora oggi arrovella gli studiosi di fondamenti. Nel paradosso EPR si vede limpidamente il conflitto tra il determinismo delle leggi di conservazione e l’indeterminismo delle sovrapposizioni tra stati. Ci sarà chi penserà all’esistenza di variabili nascoste, la cui ignoranza genera tutto ciò che appare statisticamente incompleto nella predittività deterministica. Ma John Bell verrà elegantemente a capo del problema con gli strumenti semantici della stessa meccanica quantistica, cioè senza allargare il bacino linguistico necessario<sup>5</sup>. Questo bacino intanto si è già ampliato da sé nella direzione della “efficienza simbolica” con l’introduzione delle notazioni di Dirac dei “mezzi prodotti scalari” (bra e ket) che indicano gli stati dei sistemi senza riferimento esplicito alle vecchie coordinate nello spazio delle fasi. In un certo senso, il linguaggio naturale della quantizzazione si fa più “colloquiale”, più immediatamente descrittivo, senza rinunciare a regole di calcolo

### 8 – Un dialogo famoso

Il grande Einstein sembra il più turbato di tutti: è e resterà sino alla fine un “realista classico”; cioè uno che pensa che la realtà sia comprensibile solo con il linguaggio dell’esperienza individuale diretta, che è poi quella di Galilei-Newton. Nel giugno del 1926, Max Born propone, con un geniale lampo di intuizione, che il modulo quadrato della “funzione d’onda” di Schrödinger sia interpretato come una “densità di probabilità”. Non c’è un abisso tra quest’idea e la densità numerica dei fotoni misurata dal modulo quadrato dell’ampiezza del campo classico di Maxwell; ma, insomma, la breve ma fondamentale memoria di Born colpisce in pieno il problema del determinismo. Ecco come Born stesso<sup>6</sup> parla dell’interpretazione delle collisioni atomiche:

*<< Non si ottiene una risposta alla domanda: qual è lo stato dopo la collisione? Ma solo alla domanda: Quanto è probabile un dato effetto della collisione? [...] Dal punto di vista della nostra meccanica quantistica, non c’è alcuna grandezza che specifichi causalmente in un evento individuale l’effetto di una collisione. Si deve sperare di scoprire in futuro siffatte proprietà [...] e di determinarne [gli effetti] in eventi individuali? [...] Per parte mia, sono propenso a rinunciare al*

<sup>5</sup> Vedi avanti alla nota <sup>11</sup>, a proposito dei metalinguaggi necessari a parlare di uno specifico linguaggio comune.

<sup>6</sup> M. Born, Zeitsch. F. Physik, 37, 863 (1926)

*determinismo nel mondo atomico, ma questo è un problema di carattere filosofico, per il quale le argomentazioni di tipo fisico, da sole, non forniscono riferimenti certi.>>* Poco dopo scrisse ad Einstein<sup>7</sup>:

*<< La mia idea di considerare il campo d'onda di Schrödinger come un "campo fantasma" nel senso che tu attribuisce al termine si dimostra sempre più utile [...] L'onda di probabilità si propaga, naturalmente, non nello spazio ordinario ma nello spazio delle fasi(o spazio delle configurazioni).>>*

### **9 – Non tutto procede sulla via maestra.**

Il fatto che la comunità scientifica fosse relativamente pronta a selezionare e assorbire le buone idee non deve ingannare: i fisici sono fortemente conservatori e prima di mollare una rappresentazione che sembra efficace oppongono resistenza. Dell'ostinazione di Einstein ho appena detto. Vale la pena di citare un famoso libro di uno storico che proprio su queste resistenze costruisce un istruttivo racconto<sup>8</sup>. C'è la resistenza all'idea degli atomi di Wilhelm Ostwald e Ernst Mach, che dura fino alla misura del numero di Avogadro fatta da Jean Perrin nel 1906<sup>9</sup>. C'è l'idea quasi incredibile degli "elettroni nucleari" a cui crede anche Heisenberg sino a che Fermi e Pauli non introducono il neutrino in modo soddisfacente, utilizzando l'invenzione di Jordan degli operatori di creazione e distruzione: ma il pensiero che un elettrone potesse essere creato all'atto di un decadimento beta senza pre-esistere aveva indotto molti a invenzioni azzardate, come la conservazione dell'energia valida in senso solo statistico di Bohr, Kramers e Slater (che seguivano una proposta di Franz Exner, poi ripresa anche da Schrödinger in tarda età per processi molecolari). Il neutrone come particella nucleare autonoma era un'idea semplice, ma la quasi identità della massa con quella del protone aveva indotto Rutherford e altri a credere che fosse un precario stato legato elettrone+protone. La possibilità di creare masse, pur riconoscendo la celebre formula  $E=Mc^2$ , ripugnava a molti. (Il luogo comune: "nulla si crea e nulla si distrugge" faceva sempre un bell'effetto di "verità"; ma poi, perché non crederci se una delle più grandi e potenti idee della fisica era stata l'invenzione dei "sistemi isolati", impermeabili agli apporti esterni – sia di "dare" che di "avere", ma sarà difficile escludere la possibilità che perdano la loro energia per irraggiamento). La causalità stessa veniva formalizzata nel 1926 da Kramers e Krönig con le celebri relazioni di dispersione che, molti anni dopo (nei '60 del '900) produrranno l'ingrediente di base di un filone di costruzione semiassiomatologica della cosiddetta matrice S di Heisenberg: niente di sbagliato, ma solo di eccessivo o forse elegantemente gratuito nelle aspettative fondate sull'analiticità di funzioni importanti come le ampiezze di scattering e sul significato dei loro poli.

Oggi dobbiamo stare attenti più che mai: chissà se nel turbinare di materia oscura, bosoni di Higgs, particelle supersimmetriche, stringhe e superstringhe non ci siano "più parole che idee". La relatività generale non è stata quantizzata, i

---

<sup>7</sup> lettera dell'11 novembre 1926

<sup>8</sup> R. McCormach, *Night Thoughts of a Classical Physicist*, Avon Books, New York, 1982; uscito in italiano come *Pensieri notturni di un fisico classico*, Editori Riuniti, Roma, 1990

<sup>9</sup> J. Perrin, *Les Atomes*, Presses Universitaires de France, 1948 (1° ed. 1912), ed. italiana, Editori Riuniti, 1981

parametri del modello standard sono troppi, le onde gravitazionali non si sono viste. Che cosa sopravvivrà di tutto ciò?

### 10 – La fisica invade altri settori.

Intanto, zitto zitto, il determinismo è riaffiorato. Non scopertamente e preannunciato da proclami, ma nella pratica. Quando si è capito che il terzo principio della dinamica di Newton, detto “di azione e reazione”, non stava in piedi perché implicava segnali infinitamente veloci tra i corpi; e che tuttavia la conservazione della quantità di moto, nella sua forma relativistica era una legge sacrosanta molto deterministica nella sua sostanza, l’invenzione di “mediatori delle forze”, particelle virtuali di vita breve per la loro massa sballata rispetto alla realtà misurabile e tuttavia compatibili con il principio di indeterminazione, consentiva di ridisegnare diagrammi con punti materiali nello spazio tempo che simulavano traiettorie non reali ma imitate puntualmente da quelle (i diagrammi di Feynman): è vero, si tratta solo della rappresentazione grafica dello sviluppo in serie di potenze di un parametro dimensionale (l’intensità normalizzata della forza; la celebre costante  $\alpha$  ( $\approx 1/137$ ) di struttura fina per l’elettrodinamica) del generatore dell’onda diffusa (“propagatore”: il linguaggio può aiutare, sembra più intuitivo che non “funzione di Green”); ma, insomma, ha un aspetto convincente di “fisica mediante palline” e aiuta non poco. C’è un piccolo vangelo di questo ripescaggio di determinismo linguistico (che sta nell’effetto chiarificatore delle “simmetrie” dello spazio-tempo sulle proprietà del sistema); Eugene P. Wigner sa quel che fa quando lo scrive con due suoi allievi<sup>10</sup>. E’ l’unica pubblicazione in cui si trovi una formulazione generale della fisica classica compatibile con tutti i principi d’invarianza conosciuti.

A questo punto, riformato un linguaggio accessibile e lasciando da parte le domande su ciò che c’è al di sotto delle ultime strutture elementari esplorate (la spesa per nuovi acceleratori è stata ingente e la partita è ancora aperta), ci si può chiedere: che cosa possiamo fare di utile per la biologia? E per l’economia? E per la geologia? E per la climatologia? E per il problema energetico? E per l’archeologia? E per la conservazione delle opere d’arte e dei monumenti? E per l’informatica? E per le reti neurali? E così via.

Io dubito che queste espansioni del campo di interesse cambieranno i fondamenti. Ma non escludo che aiutino a capire i vecchi interrogativi epistemologici accantonati: il metodo si è rivelato eccellente almeno in un settore, quello originario. Vediamo se si può esportare, senza paura di egemonizzare altre culture. La difficoltà è sempre la stessa: la fisica non sta nel linguaggio comune<sup>11</sup>. Perché i non addetti dovrebbero studiarla?

---

<sup>10</sup> R.M.F. Houtappel, H.van Dam. E.P. Wigner, *The conceptual basis and use of geometric invariance principles*, Review of Modern Physics, 37, 595 (1965)

<sup>11</sup> Un interessante contributo al ruolo dei linguaggi è stato appena pubblicato da Tullio De Mauro: *Il linguaggio tra natura e storia*, Mondadori/Sapienza, 2008