

## Progressi e problemi nella comprensione unitaria della realtà fisica\*

*Elio Fabri*

Istituto di Astronomia dell'Università di Pisa

————— o —————

*Chi abbia ascoltato la mia relazione al Congresso di Viareggio la riconoscerà nelle pagine che seguono, ma troverà delle differenze. A parte il lavoro di ripulitura necessario nel passare da un discorso parlato al testo scritto, ho ritenuto necessario sviluppare meglio alcuni argomenti che per ragioni di tempo erano stati un po' compressi, a scapito della chiarezza. Ho anche tenuto conto di alcuni degli interventi seguiti alla relazione.*

### 1. Premessa

Il tema che mi accingo a trattare potrà sembrare un po' troppo ambizioso, e suscita senz'altro interrogativi del tipo: che cosa s'intende per "comprensione"? che cosa per "realtà fisica"? Quando l'ho scelto ero consapevole di tali difficoltà; però nel titolo — forse poco felice, ma non ne ho saputo trovare uno migliore — c'è una parola chiave, che nella mia intenzione lo delimita e lo precisa: la parola "unitaria."

Spero che il suo significato alla fine del discorso apparirà più chiaro di quanto non sia adesso; e così pure credo che tutto questo problema delle definizioni, di che cosa vuol dire "comprensione," che cosa "realtà fisica," verrà meglio risolto dal contesto.

Vorrei ancora dire che la mia scelta ha una motivazione personale e una più generale: di quest'ultima parlerò in fondo. La motivazione personale è che spesso mi sono trovato a pensare a queste cose occasionalmente, di sfuggita, senza avere mai il tempo per riflettere sulle mie idee, su quello che mi sembrava di aver capito. Ho perciò approfittato volentieri dell'occasione che l'AIF mi ha offerto.

L'argomento è così vago perché deliberatamente non ho voluto circoscriverlo, in quanto secondo me è importante vederlo con una certa ampiezza. Nel nostro processo di comprensione unitaria della realtà fisica ci sono ovviamente tanti aspetti, tanti gradi, che vanno anche al di là della fisica; io vorrei parlare un po'

---

\*Relazione su invito tenuta al Congresso AIF di Viareggio il 28 ottobre 1981. Il presente testo riproduce inalterato quello pubblicato su *La Fisica nella Scuola* **16**, 49 (1983).

di tutti, con molta presunzione, e con la speranza di riuscire nello stesso tempo abbastanza sintetico e abbastanza comprensibile. Ad ogni modo il nostro punto di partenza sarà la fisica.

Farò prima di tutto una breve panoramica storica, con lo scopo di dare qualche indicazione su quello che intendo per “comprensione unitaria della realtà fisica.” Sceglierò esempi storici ben noti, senza la minima pretesa di essere esauriente, equilibrato, obiettivo: cercherò semplicemente di focalizzare certi personaggi e certi risultati della storia della fisica nei quali, a mio giudizio, si colgono meglio gli aspetti che m’interessa mettere in evidenza.

## 2. Unificazioni nella storia della fisica

### 2.1: *Galileo e Newton*

Sebbene non si possa parlare di grandi unificazioni a proposito di Galileo, a lui va attribuito un grande merito, su cui torneremo: quello di aver rivendicato con chiarezza l’unitarietà della fisica del mondo terrestre e del mondo celeste. La materia e le sue leggi sono le stesse in cielo e in terra, la Luna è fatta della stessa sostanza di cui è fatta la Terra. Abbiamo qui un contributo fondamentale di Galileo al processo di unificazione della nostra comprensione della realtà fisica; ma non c’è dubbio che questo processo diventa molto più organico e molto più completo in Newton.

Newton è il fondatore di una teoria fisica, che include la meccanica e la teoria della gravitazione; per la sua teoria inoltre Newton costruisce anche la matematica necessaria. Newton dà una spiegazione *unitaria*, cioè con pochissime ipotesi di partenza e nell’ambito di un’unica teoria, di una quantità enorme di fatti. Come ben sapete, i risultati di Newton non riguardano soltanto le leggi di Keplero e il moto dei pianeti, ma c’è molto di più: la precessione degli equinozi, la forma della Terra, le maree, il moto delle comete: tutte cose note magari da secoli, ma delle quali nessuno aveva visto prima di lui il legame organico. Per di più in Newton c’è l’anticipazione di cose che sarebbero venute dopo: per esempio la teoria delle perturbazioni come tecnica per studiare il moto di corpi celesti soggetti non alla sola attrazione gravitazionale di un primario, ma anche ad attrazioni reciproche. La teoria delle perturbazioni avrebbe avuto il suo grande trionfo 150 anni dopo, con la scoperta di Nettuno, cioè di un corpo celeste fino allora sconosciuto, e la cui presenza fu inferita — attraverso lo sviluppo della teoria — partendo dai dati di osservazione su un altro pianeta. Questo fatto è fondamentale, perché costituisce un esempio canonico di ciò che s’intende per “potere predittivo” di una teoria.

### 2.2: *Da Maxwell ad Einstein*

Saltando grosso modo un secolo e mezzo arriviamo a Maxwell. Qui vediamo un’altra grande unificazione: quella tra fenomeni elettrici e magnetici, sotto l’unica realtà del campo elettromagnetico descritto appunto dalle equazioni di

Maxwell. Abbiamo poi la previsione delle onde e.m. — che come sapete non erano conosciute prima — e la scoperta che la luce è un fenomeno elettromagnetico. Non credo ci sia bisogno di ricordarvi quanto tutto ciò abbia significato per la fisica; dirò solo che a giudizio di uno studioso come Popper questa è la sola vera unificazione completamente realizzata in fisica. Non è ora il caso di discutere se un tale giudizio si debba o no condividere: la citazione aveva solo lo scopo d'indicarvi che l'unificazione maxwelliana è sicuramente riconosciuta come una delle fondamentali nella storia della scienza.

Pressoché contemporanea alla teoria elettromagnetica, e tra gli altri ancora col contributo di Maxwell, nasce un'altra grande unificazione: quella che va sotto le denominazioni duali di termodinamica e meccanica statistica. La fondazione della termodinamica, verso la metà del secolo scorso, dà luogo prima di tutto alla nascita del più importante concetto unificante della fisica: il concetto di energia. Inoltre la costruzione dei concetti termodinamici è unificante in quanto porta a guardare da un punto di vista comune fenomeni i più svariati, diversissimi tra loro: tanto per fare un esempio, la compressione di un gas e la magnetizzazione di un pezzo di ferro sono trasformazioni termodinamiche che rispondono alle stesse leggi. Il punto di vista termodinamico e il concetto di energia informano da allora la nostra visione dei fenomeni fisici.

La meccanica statistica è il tentativo di ricondurre la teoria del calore alla meccanica. Deliberatamente ho detto il tentativo, perché è forse lecito ritenere non ancora concluso questo lavoro di riduzione; su ciò torneremo più avanti. Tuttavia esso ha ottenuto risultati grandiosi: basta ricordare la scoperta delle leggi del moto browniano e la loro verifica con gli esperimenti di Perrin; risultati con i quali si chiuse la grande polemica sull'esistenza degli atomi.

Un altro nome che certamente vi aspettate è quello di Einstein. Sarebbe lunghissimo l'elenco dei motivi per cui Einstein potrebbe essere citato in questo contesto, ma io lo ricorderò soltanto per due cose. Primo, perché la relatività ristretta ha permesso una visione più completa e più organica dell'unità dei fenomeni elettrici e magnetici. Con la relatività il campo elettrico e il campo magnetico non si riconducono soltanto a un unico sistema di equazioni, come aveva fatto Maxwell, ma diventano un'unica realtà, dove la differenza sta essenzialmente nel punto di vista da cui si guarda: un cambiamento di sistema di riferimento trasforma un campo elettrico in un campo magnetico, e ciò permette di spiegare alcuni aspetti ancora un po' paradossali nella teoria di Maxwell. Non a caso il primo lavoro di Einstein sulla relatività è intitolato "Sull'elettrodinamica dei corpi in moto."

Ma la ragione principale per cui Einstein entra in questo discorso è la teoria relativistica della gravitazione, altrimenti detta "relatività generale." La relatività generale ha reso possibile per la prima volta nella storia una cosmologia scientifica, ci ha messi in grado di affrontare in modo scientifico i problemi della struttura dell'universo e della sua evoluzione. Questo grazie a un'idea veramente

rivoluzionaria: che la struttura dello spazio-tempo non sia un dato immutabile, un “a priori” rispetto ai fenomeni fisici, ma sia invece determinata dalla distribuzione della materia, e sia perciò soggetta a cambiamento in conseguenza del moto di quella. È appena il caso di ricordare che in questo contesto “materia” è tutto ciò che esiste: le onde e.m. non meno degli atomi o delle particelle che li costituiscono.

Posso solo accennare di sfuggita alla grande quantità di conferme che la visione di Einstein ha ricevuto: alcune fin dai primi tempi, la maggior parte negli ultimi vent’anni.

### 2.3: *L’elettrodinamica quantistica*

L’elettrodinamica quantistica è in genere meno familiare degli argomenti di cui abbiamo parlato finora: ciò fa sì che non sia altrettanto considerata la sua importanza per l’unificazione dei concetti base della fisica e l’influenza che ha avuto su tutta la storia successiva. Per questi motivi vorrei trattarla con qualche maggiore dettaglio.

L’e.q. nasce quasi simultaneamente alla meccanica quantistica: mentre infatti quest’ultima risale agli anni ’25–’26 l’e.q. è stata costruita grosso modo tra il ’27 e il ’30, più o meno ad opera delle stesse persone: posso quindi risparmiarvi l’elenco dei fondatori.

L’e.q. si propone di risolvere un ben preciso problema: dare una descrizione, coerente con i principi della m.q., dei fenomeni d’interazione fra cariche e campo e.m. Naturalmente all’epoca si conosceva già da tempo la natura duale del campo e.m., cioè di campo appunto e nello stesso tempo di particelle, sotto forma di fotoni. Erano anche noti una quantità di fenomeni d’interazione: assorbimento, emissione e scattering di radiazione, effetto Compton. ecc. Di tutti esisteva una descrizione detta “semiclassica,” che era per così dire un innesto dei principi della m.q. sulla descrizione classica di Maxwell–Lorentz, ma non si può dire che prima dell’e.q. esistesse una teoria veramente coerente di questa parte della fisica.

L’e.q. introduce poche semplici idee e da queste ricava una serie di conseguenze. La prima idea è che il campo e.m. debba essere trattato come un sistema meccanico generalizzato, e perciò assoggettato agli stessi principi che la m.q. aveva ritenuto validi per gli atomi e per qualsiasi sistema meccanico. Di qui segue che il campo e.m. può trovarsi in diversi stati: a partire da uno stato fondamentale che è il “vuoto,” cioè l’assenza di qualsiasi tipo di radiazione, fino a stati “eccitati,” che significano presenza di uno o più fotoni; quindi i fotoni appaiono come “quantì” di eccitazione del campo e.m.

La seconda idea concerne le particelle cariche. Preciso subito che quando parlo di particelle mi restringo esclusivamente agli elettroni: all’epoca le particelle cariche note erano soltanto elettroni e protoni, ma il ruolo dei protoni era poco chiaro, per cui erano rimasti un po’ da parte; l’e.q. è principalmente una teoria degli elettroni e dei fotoni. L’idea è che gli elettroni debbano essere trattati esattamente come i fotoni, cioè come quanti di un campo: c’è però una

differenza fondamentale. Mentre nel caso dei fotoni il campo era noto dalla fisica classica e precedeva i fotoni, nel caso degli elettroni questo campo era una novità. Si tratta infatti di un campo che non può avere un limite classico, e quindi non può essere osservato in esperimenti macroscopici: è il “campo di Dirac,” cioè il campo descritto dall’equazione di Dirac.

Anche la quantizzazione di questo campo dà luogo di nuovo a uno stato fondamentale (il vuoto) e a stati eccitati, in cui sono presenti dei quanti: questi quanti sono gli elettroni. Così il nuovo formalismo sotto l’idea che le particelle sono quanti, cioè stati di eccitazione di un campo, unifica le due specie fondamentali di particelle allora note: i fotoni e gli elettroni. Per di più la teoria implica che nel caso del campo di Dirac accanto alle particelle — gli elettroni — con carica negativa, debbano esistere delle “antiparticelle”; prevede cioè la necessaria esistenza di particelle coniugate agli elettroni: i positroni, che come sapete vennero scoperti poco dopo, nel ’32.

La teoria assume poi un principio d’interazione fra il campo degli elettroni e quello dei fotoni, ripreso pari pari dalla legge d’interazione fra cariche e campo caratteristica della teoria classica di Maxwell-Lorentz. Tale principio porta alla conseguenza che i processi elementari d’interazione sono soltanto quattro: può accadere che una carica emetta un fotone, o che lo assorba; oppure possono accadere ancora due cose, che un fotone crei una coppia di particelle (elettrone-positrone) o infine che una coppia si annichili in un fotone. Anche se non posso assolutamente entrare in maggiori dettagli sull’argomento, mi preme rilevare che la teoria su queste basi è capace di spiegare, anche negli aspetti quantitativi, tutti i fenomeni allora noti dell’elettromagnetismo; per di più prevede fenomeni che allora non erano ancora stati osservati, come la creazione di coppie. Siamo dunque di fronte a un chiaro processo di unificazione, analogo a quello newtoniano.

Un punto su cui dovremo tornare è che nell’e.q. compaiono due soli parametri liberi: la carica e la massa dell’elettrone. Questi due parametri sono naturalmente assunti nella teoria in base ai valori sperimentali osservati, e una volta fissati quei due valori nella teoria non c’è più niente di arbitrario: tutto il resto è perfettamente calcolabile, cioè ricondotto a un problema di matematica; per ogni fenomeno si ottengono così previsioni univoche e controllabili con l’esperimento. Risulta che la teoria è in eccellente accordo con l’esperienza: non c’è nessun fenomeno e.m. noto, né allora né adesso, in cui le previsioni teoriche non siano state esattamente confermate. Anzi c’è di più: negli anni ’40-’50 è stata verificata l’esistenza di fenomeni nuovi, sottili, che la teoria aveva previsto: mi riferisco in primo luogo al cosiddetto “Lamb shift,” che non è altro che un piccolo spostamento dei livelli dell’atomo d’idrogeno; e — ancora più interessante — alla “anomalia” del momento magnetico dell’elettrone, cioè al fatto che il momento magnetico dell’elettrone non è esattamente quello previsto dalla primitiva teoria di Dirac — un magnetone di Bohr — ma è leggermente maggiore, circa l’uno per mille.

Le misure più recenti del momento magnetico dell'elettrone hanno una precisione dell'ordine di  $10^{-10}$ , e dentro gli errori sperimentali concordano perfettamente con le previsioni dell'e.q. In altre parole, sebbene ci si aspetti anche per l'e.q., come per qualsiasi teoria fisica, di trovarne dei limiti di validità, tuttavia questi limiti non sono ancora stati raggiunti: per vedere un eventuale disaccordo con la teoria occorrerebbe una precisione sperimentale migliore di  $10^{-10}$ . Abbiamo quindi una teoria unitaria, semplice, che contiene due soli parametri liberi che si aggiustano in base a dati sperimentali, è che è capace di fare previsioni confermate con precisione migliore di  $10^{-10}$ .

Ho voluto dilungarmi un po' su questa parte della storia perché qui abbiamo in certo modo il prototipo di una comprensione unitaria della realtà, almeno nell'ambito della fisica; e più avanti mi servirà di tornarci, per fare il confronto con quello che è successo dopo.

#### 2.4: *L'astrofisica e il programma di Galileo*

Anche in un panorama così sommario non è possibile trascurare del tutto l'astrofisica. Non citerò i risultati per ragioni di tempo, ma voglio farvi notare che qui non si tratta tanto di unificazione prodotta da nuove teorie; l'importante è invece che in qualunque problema astrofisico finisce sempre per entrare praticamente tutta la fisica. Dalla fisica delle particelle elementari alla magnetoidrodinamica, dalla termodinamica all'elettrodinamica quantistica, dalla fisica nucleare alla relatività: è difficile trovare un capitolo della fisica che non debba entrare nel calderone quando si vogliono spiegare i fenomeni astrofisici.

Ma questo significa semplicemente che noi abbiamo convalidato ed esteso di molti ordini di grandezza il programma di Galileo: egli aveva sostenuto che la Luna e la Terra, il mondo celeste e il mondo terrestre, erano fatti della stessa materia ed erano retti dalle stesse leggi fisiche; noi oggi in astrofisica lavoriamo sotto il presupposto fondamentale che la materia e le sue leggi sono le stesse sempre e dovunque. Ogni successo dell'astrofisica di oggi è dunque una vittoria del programma galileiano.

#### 2.5: *L'unificazione è un programma della fisica?*

Il titolo di questo paragrafo si riferisce a una discussione che è stata abbastanza viva in questi anni, e che certamente non vi è sconosciuta. La discussione era centrata intorno alla tesi seguente: che la ricerca di una visione unitaria di tutto il mondo fisico fosse una concezione ottocentesca, che la fisica di questo secolo ha sostanzialmente abbandonato. Da qui in poi le interpretazioni divergono. C'è chi dice che la concezione è stata abbandonata perché l'esperienza di costruzione delle teorie scientifiche ha mostrato che non si riusciva a realizzare una teoria unitaria: si è perciò ripiegato su teorie settoriali, su frammenti d'interpretazione staccati l'uno dall'altro. C'è chi sostiene invece che questa sia stata una scelta deliberata, nel senso che fattori esterni alla scienza hanno indotto a

non proporsi più un programma unitario, ma a cercare invece risultati capaci di applicazioni dirette, anche se parziali.

Le tesi che ho ricordato colgono certamente degli elementi reali. Non c'è dubbio che rispetto alla visione tipica del fisico ottocentesco quella del fisico di questo secolo è diversa: certamente il meccanicismo dell'Ottocento, cioè l'idea che tutto si possa spiegare a livello microscopico con un opportuno modello meccanico, è considerato oggi una concezione ingenua; la visione odierna di una teoria unitaria della fisica è molto diversa. Dire però che non esiste un programma unitario, che nessuno se lo propone, è un po' eccessivo. Tutti siamo coscienti dell'enorme difficoltà di questo programma, e del fatto che l'unificazione può essere solo il risultato di tutta una serie di passi intermedi che in molti casi non sono ancora stati fatti (e tra un po' cercherò di parlarvene), tuttavia a me sembra che la spinta all'unificazione, la ricerca di una descrizione comune di un ambito di fenomeni il più ampio possibile, non sia venuta meno.

Detto questo, non voglio negare che nella pratica del procedimento scientifico è oggi abbastanza corrente un atteggiamento del ricercatore individuale, o di piccoli gruppi, volto a ottenere dei risultati "hic et nunc," che servano a qualcosa immediatamente, anche a pubblicare, anche a farsi conoscere in giro. Spesso si considera più produttivo e più significativo riuscire a spiegare campi ristretti di fenomeni con teorie che hanno una validità circoscritta, locale, che non perseguire ricerche di grande generalità: è chiaro che in questi casi siamo di fronte a un programma scientifico molto diverso da quello delle teorie unificanti che abbiamo visto prima. Ma per quanto questa visione pragmatica possa essere diffusa, essa non ha ucciso l'esigenza di sintesi più ampie. Anche senza insistere ora su questo punto, avremo occasione di vederne esempi più oltre.

### **3. I problemi aperti**

#### *3.1: Meccanica quantistica e meccanica statistica*

Nel titolo di questo discorso si parla di "problemi" di una descrizione unitaria della realtà fisica, e in effetti i problemi sono molti: ne ho scelti alcuni che a mio giudizio sono particolarmente significativi.

In primo luogo, ci sono ancora problemi riguardo ai fondamenti della meccanica quantistica, e in particolare nella teoria quantistica della misura. Si tratta proprio di capire che cosa significa, secondo la m.q., un'operazione di misura di una grandezza fisica: quello che è stato espresso da Heisenberg col suo famoso principio della "riduzione" del pacchetto d'onda. Nonostante che sia stato fatto molto lavoro, e molte cose siano state capite, non mi sembra di poter dire che si tratta di una questione sistemata e accantonata definitivamente. Di più, sappiamo che esistono rispettabili fisici che hanno ancora seri dubbi sulla validità della m.q. in quanto tale; anche se bisogna subito ricordare che non esistono teorie alternative capaci di spiegare i fatti, e quindi la m.q. a tutt'oggi è certamente una teoria vincente. Tuttavia la ricerca d'interpretazioni diverse continua: quin-

di non credo che si possa, per obiettività, considerare del tutto chiuso il capitolo m.q.

Problemi di natura diversa, ma per certi versi anche affine, ci sono pure nell'ambito della meccanica statistica, cioè del rapporto tra macroscopico e microscopico. Il problema centrale della m.s., come sapete, è di spiegare in termini microscopici la tendenza dall'ordine al disordine, ossia il secondo principio della termodinamica. Quando si tenta un'interpretazione microscopica ingenua sorgono dei paradossi, sui quali è stato fatto molto lavoro. Di tanto in tanto il problema viene dato per definitivamente risolto, quando si dimostra che la cosa funziona sotto certe ipotesi: però una visione veramente completa, una riduzione della termodinamica alla meccanica microscopica non direi che sia stata acquisita; certamente vi sono ancora molti che lavorano sul problema e ciò dimostra che la questione non è chiusa.

### 3.2: *Le interazioni fondamentali: le simmetrie unitarie*

Ma il campo dove ci sono i problemi più grossi e più sentiti è quello delle interazioni fra particelle "elementari" e della loro descrizione unitaria: quelli che potremmo definire gli sviluppi dell'e.q. Su di essi è il caso di spendere qualche parola in più, anche senza fare tutta la storia e senza entrare in dettagli che non sarebbe possibile affrontare in maniera elementare.

La storia delle attuali idee unitarie sulle interazioni fondamentali inizia da un'antica idea di Heisenberg: quella di considerare il protone e il neutrone come due stati di un unico oggetto, il nucleone. Questa è anche nota come l'idea dello "spin isotopico." Le due particelle erano fino allora considerate distinte, per quanto certe simmetrie, certe regolarità nelle proprietà dei nuclei mostrassero che esse dovevano avere qualche cosa in comune. Tuttavia da qui a considerarle due stati del nucleone, il salto è grande.

La fecondità dell'idea di Heisenberg sta in questo: se le due particelle sono in realtà stati diversi di una stessa particella, allora esistono delle trasformazioni che cambiano una particella nell'altra, e più in generale esiste un gruppo di trasformazioni che "rimescolano" questi stati. Se protone e neutrone si comportano nello stesso modo nei confronti delle forze nucleari, questo gruppo di trasformazioni deve lasciare invariante la teoria: siamo così arrivati al concetto di "gruppo di simmetria" di una teoria fisica. Si dimostra che a ogni gruppo di simmetria sono associate un certo numero di costanti del moto, di principi di conservazione: nel nostro caso si tratta della conservazione dello spin isotopico.

Questo è stato il punto di partenza di tutta una famiglia di cosiddette "simmetrie unitarie" che continua fino ad oggi (tra parentesi, il termine "simmetria unitaria" è esclusivamente tecnico, e si riferisce al fatto che le matrici di queste trasformazioni sono unitarie, cioè tali che il loro prodotto con la coniugata hermitiana è la matrice unità; quindi il significato che ha qui il termine "unitario" non ha niente a che fare con quello del titolo). Dallo spin isotopico si

è passati prima alla simmetria  $SU(3)$ , che ha portato, come primo passo, all'unificazione in due sole famiglie dei vari tipi di mesoni da una parte e dei vari tipi di barioni dall'altra. Dalla simmetria  $SU(3)$  è nata l'idea dei quarks come ipotetici costituenti di mesoni e barioni. In seguito vi sono stati altri sviluppi (teoria "elettrodebole," QCD) che hanno ampliato il quadro delle simmetrie e quello delle unificazioni; i tentativi più recenti mirano all'unificazione di quarks e leptoni (neutrini, elettroni, muoni,  $\tau$ ).

### 3.3: *Le interazioni fondamentali: la teoria dei campi*

Per capire in che senso l'attuale fisica delle interazioni fondamentali è uno sviluppo dell'e.q., occorre richiamare un'altra idea base, dovuta a Yukawa. Nell'elettrodinamica classica l'interazione fra cariche elettriche è mediata dal campo e.m., e l'e.q. tratta i fotoni come quanti di questo campo. Analogamente Yukawa postula nel 1935 un campo responsabile delle interazioni fra nucleoni (le forze nucleari, progenitrici delle odierne "interazioni forti") e prevede che la quantizzazione di questo campo si manifesti con l'esistenza di particelle allora sconosciute, che chiama "mesoni." Tutti sanno che i mesoni di Yukawa esistono realmente, e sono oggi noti come mesoni  $\pi$ , o "pioni."

Il successo dell'idea di Yukawa fa nascere la "teoria quantistica dei campi," intesa come la generalizzazione dell'e.q. a tutte le altre interazioni esistenti in natura. Si può dunque dire che la fisica delle interazioni fondamentali come oggi la conosciamo è figlia — o nipote — dell'idea dello spin isotopico e di quella del campo mesonico.

Vorrei ora spiegare in che senso questo procedimento di unificazione, portato avanti con la teoria dei campi e con le simmetrie unitarie, lascia aperti dei problemi e non può ancora essere messo sullo stesso piano dell'unificazione compiuta dall'e.q. Come abbiamo già visto, l'e.q. è una teoria con un certo numero di presupposti semplici, ha due soli parametri liberi, e su queste basi fa tutte le sue previsioni; fornisce un procedimento di calcolo ben preciso, i cui risultati sono confermati con grande esattezza.

Questo è forse il punto giusto per ricordare che in realtà nell'e.q. uno dei due parametri è un mistero: mi riferisco alla carica dell'elettrone. Infatti con la carica dell'elettrone e con due costanti universali, cioè la costante di Planck e la velocità della luce, si costruisce un famoso numero puro, la costante di struttura fina  $e^2/\hbar c$ , che vale circa  $1/137$ . Poiché si tratta di un numero puro, ci si aspetta che la costante di struttura fina non sia legata a nessuna proprietà fisica indipendente: di solito, in tutte le teorie fisiche, quando vengono fuori numeri di questo genere, essi hanno valori dell'ordine dell'unità e generalmente semplici, come  $\pi$ ,  $3/2$  o simili. Per intendersi meglio, immaginiamo che la formula del periodo del pendolo invece di essere  $2\pi\sqrt{l/g}$  fosse  $\frac{1}{137}\sqrt{l/g}$ : la trovereste strana, vi chiedereste perché c'è quel 137. Invece non vi chiedete perché c'è il  $2\pi$ : esso ha a che fare con la misura di un angolo giro in radianti, cioè ha un'origine semplice. Il fatto è che il significato di quel 137, la sua origine, era

del tutto sconosciuto quando l'e.q. è stata fondata, e soltanto oggi si comincia a intravederne una spiegazione. A parte ciò, la struttura della teoria è ben chiara, e i rapporti con l'esperienza sono estremamente soddisfacenti.

### 3.4: *Le interazioni fondamentali: rotture spontanee e libertà asintotica*

La situazione delle teorie unitarie è molto diversa, a cominciare dalla prima, quella di Heisenberg. Ho detto poco fa che protone e neutrone sono stati diversi di una stessa particella e che si comportano nello stesso modo nei confronti delle forze nucleari. Però questa simmetria non è proprio precisa, come si vede già dal fatto che protone e neutrone non hanno la stessa massa (il neutrone ha massa un po' maggiore, come sapete): di qui sorge l'idea di una simmetria approssimata. Ebbene, le simmetrie che sono state escogitate dopo hanno tutte questo difetto: da un lato unificano particelle che hanno certo qualcosa di comune — e infatti queste simmetrie spiegano una quantità di regolarità, e in certi casi hanno mostrato anche un buon potere predittivo; dall'altro lasciano aperta una serie di problemi.

Per esempio: perché i pioni hanno massa tanto diversa dai K, dal momento che appartengono alla stessa famiglia di mesoni? Non ci si può accontentare della risposta che la simmetria SU(3) è approssimata: perché è soltanto approssimata? E allora qual è il suo significato fondamentale? Lo stesso può dirsi in tutti gli altri casi, ad es. per neutrini, elettroni e muoni nelle simmetrie più recenti.

A dire il vero esiste un principio guida, ritenuto valido dai teorici che lavorano su questi problemi, che potrebbe fornire la risposta a queste domande: mi riferisco all'idea di "rottura spontanea" di una simmetria. Spiegare di che si tratta porterebbe via troppo tempo, e posso solo asserire che se l'idea sembra andare nella direzione giusta, non siamo però al punto di poter calcolare la massa delle varie particelle, come una vera unificazione dovrebbe fare.

Le possibilità di calcolo sono abbastanza limitate anche in altri casi, perché i procedimenti di approssimazione spesso non vanno oltre un primo stadio che in genere è assai grossolano. La ragione è che la teoria dei campi sconta un "peccato d'origine" che esisteva già nell'e.q.: l'impossibilità di ottenere risultati definiti al di là di un primo ordine di approssimazione, a causa delle cosiddette "divergenze." Mentre però per l'e.q. questa difficoltà è stata in seguito risolta con la tecnica nota come "rinormalizzazione," la stessa soluzione non è immediatamente praticabile per le teorie più generali.

Un altro principio oggi accettato è che queste simmetrie debbano essere viste in senso "asintotico." Con ciò s'intende che esse diventano tanto più esatte quanto più si lavora ad alte energie: quando le energie diventano sufficientemente grandi, allora tutte le differenze, per es. quelle dipendenti dalle diverse masse, svaniscono; la vera unificazione si ha solo al limite di energia infinita. In favore di questo principio vi sono argomenti sia teorici sia sperimentali.

Pur con i limiti della mia esposizione, spero di avervi dato l'impressione che ci troviamo di fronte a un quadro in grande movimento, nel quale compaiono diversi punti di luce, che però sono ancora ben lontani dal rischiararlo tutto.

#### **4. Al di là della fisica: il riduzionismo**

##### *4.1: Il problema del riduzionismo*

Fino a questo punto lo svolgimento del tema è rimasto nell'ambito della fisica; adesso vorrei discutere come si presenta il problema della comprensione unitaria della realtà fisica quando si esce dalla fisica. Mi riallaccio così a quello che secondo la terminologia filosofica si chiama problema del riduzionismo, e che possiamo enunciare come segue. Oggi è normalmente accettata dalla maggior parte degli scienziati l'idea che il sostrato materiale di tutta la realtà visibile, tangibile e sperimentabile, cioè di tutto ciò che è oggetto di qualunque scienza, è unico; cioè che la materia è la stessa, e fatta dovunque degli stessi costituenti elementari e quindi ha dovunque le stesse proprietà, è soggetta alle stesse leggi. Di qui nasce subito una domanda: per questo stesso fatto non dovrebbero tutte le scienze ridursi alla fisica, dal momento che la fisica è per definizione la scienza che studia le proprietà dei costituenti elementari della materia? E poiché vediamo che attualmente una tale riduzione non è realizzata, che cosa dobbiamo concluderne: che siamo a uno stadio incompleto dello sviluppo delle scienze, oppure che la riduzione non è possibile? E nel secondo caso dobbiamo pensare che c'è qualcos'altro al di là dei costituenti elementari della materia, qualcosa che giustifica l'esistenza di leggi proprie di altre scienze, di ambiti di fenomeni che non sono riducibili alla fisica? Ma con una tale ipotesi non si finisce per reintrodurre delle entità inafferrabili, come le entelechie o gli spiriti vitali dei tempi andati?

È appunto questo il dilemma che adesso vorrei esaminare: una volta che ci si sia persuasi che tutta la realtà è riducibile alla materia che conosce la fisica, ciò implica necessariamente che tutte le scienze devono scomparire e devono essere ridotte alla fisica? E se questo non accade, ne segue un verdetto di condanna per il materialismo conseguente?

Voi capite bene che un tale problema potrebbe e dovrebbe essere esaminato da tanti punti di vista; inoltre per avere un quadro completo bisognerebbe vedere come si presenta la questione nelle varie scienze. Dato che questo non mi è possibile, ho scelto di prendere il toro per le corna, cioè di cominciare dal lato estremo, dal punto più lontano dalla fisica: partiremo perciò dalle ricerche volte alla spiegazione dei fenomeni del pensiero, quelli che si svolgono ogni momento dentro di noi: dentro di me che vi sto parlando e dentro di voi che mi ascoltate. In che modo si presenta il problema della riduzione quando lo si guarda da questo punto di vista?

## 4.2: *La neurofisiologia*

Dobbiamo intanto stabilire di quale scienza stiamo parlando: a me viene naturale pensare in primo luogo alla neurofisiologia. Mi rendo benissimo conto che con ciò faccio già una scelta di notevole peso; perché se affermo che la scienza competente a spiegare i problemi del pensiero è la neurofisiologia, con questo ho già detto che il pensiero si riduce alla materia pensante, e che questa a sua volta è l'oggetto di studio della neurofisiologia; che non c'è niente al di sopra o al di fuori. Questa tesi non è condivisa da tutti, come sappiamo; ma cerchiamo ugualmente di vedere dove essa ci porta.

C'è un motivo particolare per cui mi è sembrato il caso di toccare oggi questo tasto: ed è che, come avrete probabilmente saputo, i premi Nobel 1981 per la fisiologia e la medicina sono stati dati a tre scienziati — Roger Sperry, Torsten Wiesel e David Hubel — che sono per l'appunto dei neurofisiologi, e che hanno dato dei contributi fondamentali proprio al nostro problema. Il lavoro di Sperry ha riguardato gli esperimenti col “cervello diviso”: esperimenti in cui i due emisferi cerebrali sono stati separati tagliando il fascio di fibre che li unisce in un cervello sano, il cosiddetto “corpo calloso.” Queste operazioni sono state fatte anche su uomini (ovviamente per necessità terapeutiche, non per scopo di esperimento) e sono state un'occasione ideale per studiare quello che succede a un uomo che ha il cervello diviso in due, con le due metà che agiscono indipendentemente e non comunicano più.

Chiaramente io non ho la competenza per approfondire l'argomento; ma vedo senza difficoltà che chi affronta questo studio non può evitare di porsi certe domande. Supponiamo ad es. che uno voglia pensare che la sede del pensiero sia in qualcosa che è al di fuori del cervello e che in qualche modo si collega ad esso, non sappiamo come. Allora si dovrà chiedere: in quelle condizioni la sede del pensiero resta collegata all'emisfero di destra o all'emisfero di sinistra? Oppure si divide in due, così che uno potrebbe trovarsi ad avere due coscienze, due personalità? La risposta è che non succede niente del genere: a quanto si è visto i soggetti col cervello diviso — almeno a un esame superficiale — appaiono del tutto normali. Bisogna fare delle indagini speciali, creare situazioni che non s'incontrano nella vita di tutti i giorni, per accorgersi che hanno qualche cosa di strano. Va però detto che la discussione sull'interpretazione di questi esperimenti è ancora aperta.

Hubel e Wiesel sono invece importanti per il contributo che hanno dato alla neurofisiologia della visione. Il problema che hanno affrontato è come dal mosaico delle impressioni dei singoli recettori retinici si costruiscono le immagini che noi vediamo, le forme: sia forme elementari come linee, triangoli, ecc., sia forme più complesse, come ad es. le facce delle persone. In altre parole: qual è il procedimento con cui noi per esempio da questo insieme d'informazioni ottiche elementari riusciamo a riconoscere una persona? Questi ricercatori hanno affrontato il problema con atteggiamento evidentemente riduzionista nel

senso che dicevamo sopra, cioè con l'ipotesi che esso sia di competenza della neurofisiologia.

Il lavoro di Hubel e Wiesel ha portato in primo luogo a scoprire, nella zona visiva della corteccia cerebrale dei gatti, cellule specializzate a riconoscere determinate forme, come ad es. linee variamente orientate. Essi hanno trovato che un certo neurone viene eccitato quando nel campo visivo c'è una linea verticale, un altro viene eccitato quando c'è una linea un pochino obliqua, e così via; questi neuroni sono tutti disposti in colonna e sono connessi da fasci di fibre nervose. Hanno poi visto che vi sono neuroni capaci di riconoscere la direzione del movimento; infine studi più recenti hanno identificato altri neuroni che rispondono a rettangoli, dovunque situati nel campo visivo, ma non a cerchi, ecc.

Appare dunque chiaro che nel cervello c'è una specializzazione dei neuroni a un livello di notevole astrazione: ci sono infatti corrispondenti morfologici ben precisi a quelli che noi consideriamo normalmente dei concetti (come appunto quello di rettangolo) ossia delle astrazioni. In altre parole, è dimostrato che almeno alcune delle nostre astrazioni hanno un corrispettivo materiale nel funzionamento del sistema nervoso centrale, a livello di neuroni corticali.

#### 4.3: *Dalla neurofisiologia alla chimica*

Poiché alla fine vorrei ricollegarmi alla fisica ora andremo in certo modo all'indietro. La ricerca in neurofisiologia si appoggia naturalmente su tutta una serie di conoscenze di base, per esempio riguardo alla struttura del neurone. I neuroni hanno, come sapete, una struttura caratteristica: oltre al corpo cellulare possiedono un asse, cioè la fibra nervosa, che presenta delle terminazioni — le sinapsi — che vanno a collegarsi ad altre cellule; e questa è appunto la via attraverso la quale i neuroni comunicano tra loro. Oggi il funzionamento delle cellule nervose è ben noto: sappiamo che la propagazione di un segnale in una fibra nervosa è un fenomeno elettrochimico, una questione di bilancio di ioni sodio e potassio che attraversano la membrana della cellula; sappiamo che la scarica di una cellula nervosa è provocata dall'emissione attraverso le sinapsi di sostanze specifiche. Di questi “neurotrasmettitori” se ne conoscono oggi un certo numero: acetilcolina, serotonina, dopamina, norepinefrina, e altri. S'incominciano oggi a scoprire delle affinità tra l'azione dei neurotrasmettitori e quella degli oppiacei, come morfina ed eroina: è superfluo sottolineare l'interesse di tali risultati.

Dunque il dettaglio del funzionamento delle cellule nervose è ben conosciuto, nel senso che è stato ridotto a un problema di biochimica. La biochimica è una scienza a sé, che ha avuto grandissimi progressi in questi ultimi ventitrent'anni. Il risultato più famoso che possiamo far rientrare nell'ambito della biochimica è la decifrazione del codice genetico, cioè la comprensione da un lato della costituzione del DNA, dall'altro della costituzione delle proteine, e del modo come dal DNA si formano le proteine. (Ad essere precisi, qui dovrei parlare di biologia molecolare, piuttosto che di biochimica: chiedo scusa ai biologi per

la confusione fatta solo per semplificare la “scala” delle riduzioni da una scienza all'altra.)

La biochimica moderna ha prodotto anche altri risultati: per esempio è stato spiegato il meccanismo fisico-chimico della respirazione, è stato capito come le cellule utilizzano l'energia a cominciare dalla radiazione solare nelle piante (la funzione clorofilliana). Il fatto che molte cose sono state capite non vuol dire naturalmente che non ci siano ancora problemi: per esempio noi sappiamo come è fatto il DNA, ma nessuno sa perché proprio quel particolare insieme di molecole si siano combinate in quella catena che costituisce la base genetica di tutti gli organismi viventi. Così pure, anche se conosciamo molto del funzionamento e della struttura di una fibra muscolare, non sapremmo costruirne una funzionante, mettendo in una provetta gli adatti materiali. Da un lato ci sono ancora molte cose da capire; dall'altro però il programma di riduzione ha avuto una quantità di successi.

#### 4.4: *La riduzione della chimica alla fisica*

Dalla biochimica possiamo fare un altro passo indietro: la biochimica è parente stretta della chimica, e attraverso la chimica ci si riconnette alla fisica, col che ci ritroviamo su un terreno più familiare per tutti. Così possiamo porci il problema se la chimica sia riducibile alla fisica e anche qui la risposta è: sì e no. In linea di principio sì, perché noi siamo convinti che dalla struttura degli atomi si possano dedurre le proprietà chimiche. In altre parole, dato un certo atomo, fatto con un certo nucleo di data carica e con un certo numero di elettroni; e poi un altro atomo, pure con una data carica nucleare e un dato numero di elettroni, dovrebbe essere possibile prevedere rigorosamente che cosa succederà se si mettono quei due atomi in interazione: se essi reagiranno, quanta energia verrà liberata, che composto si formerà, con quale struttura molecolare, ecc. Di fatto però questa previsione è possibile solo in alcuni casi; possibile intendo nel senso di una riduzione completa.

Naturalmente i chimici svolgono ogni giorno tutto un lavoro di previsione e d'interpretazione il quale però si fonda su di un misto di conoscenze tratte dai fatti chimici già noti e di principi generali, e perciò non realizza l'obiettivo di una vera e propria riduzione. Così ad es. i chimici hanno classificato i vari tipi di legami chimici e ne hanno studiato le proprietà: dopo di ciò possono spiegare la costituzione di molti composti dalle proprietà degli elementi e dei legami che essi formano. Ciò naturalmente ha un grande valore, sia pratico sia concettuale, ma non realizza la riduzione alla fisica finché le proprietà dei legami chimici e il comportamento di tutti gli elementi non vengono ricondotti a principi fisici fondamentali. Ora non c'è il minimo dubbio che questo non lo sappiamo ancora fare in tutti i casi.

Ma a questo punto nasce la questione: si tratta di una pura difficoltà di calcolo, i calcoli sono così complicati, con tante equazioni e tante incognite, che anche con i grossi calcolatori di oggi non si riesce a portarli in fondo; o c'è qualco-

sa di più fondamentale, che rende per principio irrealizzabile un tale programma? Oppure esiste qualche altra via d'uscita? È di nuovo il problema fondamentale del riduzionismo che ritorna, a tutti i livelli.

#### 4.5: *Valore del programma riduzionista*

Prima di affrontare il nocciolo del problema vorrei però osservare che quanto ho detto finora aveva uno scopo principale: mostrare che nei fatti il programma riduzionista ha dato risultati positivi. Tutte le volte che gli scienziati si sono posti l'obiettivo d'interpretare dei fenomeni riducendoli a fenomeni più elementari, riconducendoli a leggi — per così dire — di un livello inferiore, questo ha fatto avanzare le nostre conoscenze. Al contrario, un atteggiamento del tipo “la riduzione è impossibile, nella biologia (ad es.) intervengono delle leggi che trascendono la fisica” generalmente finisce per bloccare l'indagine scientifica. Infatti partendo da tali premesse è naturale fermarsi di fronte a qualunque problema perché si pensa che non c'è più niente da capire, che si è di fronte alla manifestazione di nuove leggi fondamentali, sulle quali non c'è più niente da chiedersi. O peggio, si finisce per non vedere più neppure i problemi.

Per questo motivo il riduzionismo in quanto programma scientifico è da sostenere; ma è anche vero che nella realtà concreta, caso per caso, esso incontra grosse difficoltà. Si può quindi capire che queste difficoltà inducano poi molti, particolarmente tra i filosofi, a credere che il riduzionismo sia un programma sbagliato. Tuttavia la storia della scienza c'insegna come difficoltà che sembravano insormontabili sono poi superate: perciò al di là delle difficoltà contingenti sembra probabile che per il rifiuto del programma riduzionista vi siano motivazioni più profonde. Poiché personalmente non ho mai trovato convincenti le motivazioni che generalmente vengono addotte, mi sono andato formando un'ipotesi: che il rifiuto del riduzionismo si appoggi su un errore filosofico di fondo. Per spiegare quello che ho in mente vorrei fare un esempio a cui sono particolarmente affezionato, e che tra l'altro mi permetterà di toccare un tema di notevole importanza nella scienza di oggi.

### 5. L'esempio dei calcolatori

Prima di andare avanti, voglio dissipare un possibile equivoco. Dato che finora ho parlato di neurofisiologia, di meccanismi del pensiero, ecc. si potrebbe facilmente pensare che io abbia in mente di riferirmi ai calcolatori come modelli per il funzionamento del pensiero, cioè che voglia parlarvi di quegli studi che oggi vanno sotto il titolo di “intelligenza artificiale.” Sebbene si tratti di argomenti affascinanti, non è in questa direzione che voglio portarvi.

Partiamo da un'osservazione ovvia: i calcolatori sono strutture artificiali, fatte da noi. Per di più sono un'invenzione recente: fino al 1949 calcolatori strutturati come quelli di oggi non esistevano, tutto è avvenuto in appena trent'anni. In secondo luogo i calcolatori sono stati costruiti partendo da conoscenze elementari: i primi usavano le vecchie “valvole,” oggetti di cui conoscevamo benissimo

il funzionamento: il catodo riscaldato che emetteva elettroni, e poi la griglia, la placca, ecc. Dopo sono venuti i transistor, dei quali non solo sappiamo bene come funzionano, perché li sappiamo ridurre alla fisica dei solidi, che è un campo della fisica largamente esplorato; ma sono anzi stati inventati proprio sulla base di una teoria fisica. Non è neppure il caso di parlare degli altri componenti, come resistenze o condensatori, che dal punto di vista fisico sono ancora più banali. Dunque tutti i costituenti elementari dei calcolatori sono oggetti che ci sono perfettamente familiari, e sicuramente riducibili alla fisica.

Dopo i transistor sono stati inventati i circuiti integrati, i quali però sono dei complessi di entità elementari miniaturizzate, costruite con tecniche diverse, ma sempre riducibili a transistor, resistenze, condensatori: quindi non sono concettualmente niente di nuovo. Anche i progressi più recenti, come i circuiti integrati a larga scala — microprocessori, memorie, ecc. — per quanto siano alla base della “rivoluzione informatica” non hanno introdotto dal nostro punto di vista alcuna novità.

Tutto questo ci porta a una sola conclusione: è del tutto impossibile pensare che per spiegare il funzionamento, per quanto complesso, di un calcolatore si debba ricorrere a leggi speciali, magari a noi sconosciute.

Nel frattempo però è accaduto qualcosa di molto importante su un altro piano: mentre la tecnica progrediva, si sono cominciati a introdurre dei concetti nuovi per parlare dei calcolatori, per ragionare su di essi: in primo luogo concetti come “flip-flop” o “rete logica,” poi altri come “registro,” “memoria,” “addizionatore”; cioè concetti generali che si riferiscono alle proprietà funzionali dell’oggetto e non alla sua costituzione fisica. Un registro è per definizione un qualcosa che si comporta in un certo modo ben precisato, e a questo punto non ha più nessuna importanza chiedersi come è fatto dentro; per capire a che cosa serve un registro in un calcolatore non c’è bisogno di sapere se è composto di valvole, di transistor, o di circuiti integrati: basta conoscerne il comportamento.

Un altro passo decisivo è stata l’invenzione dei “linguaggi di programmazione,” inizialmente semplici e vicini al funzionamento del calcolatore, poi sempre più evoluti e sofisticati, e sempre più astratti. Oggi io posso usare un calcolatore mediante un linguaggio di programmazione di alto livello, come il BASIC o il FORTRAN o altri anche più evoluti — APL, LISP, PASCAL . . . — senza avere la più pallida idea di come il calcolatore che esegue il mio programma sia fatto; o addirittura senza vederlo, perché io sto seduto a un terminale video con la sua tastiera, e il calcolatore può stare nella stanza accanto o anche a centinaia di chilometri di distanza, collegato per cavo telefonico. Tuttavia io “adopero” il calcolatore in un senso molto concreto: interagisco con esso, gli comunico istruzioni e dati, gli faccio fare operazioni, ottengo risposte, e così via.

Volendo possiamo distinguere ancora un altro livello: per mezzo di programmi sufficientemente sofisticati si possono ottenere da un calcolatore dei comportamenti altrettanto sofisticati. Un calcolatore, come ben sapete, non

è un oggetto che fa soltanto dei calcoli, nel senso di risolvere equazioni o fare integrali; può fare molte altre cose: per es. — un esempio ormai scontato — un calcolatore può giocare a scacchi. Per inciso, un calcolatore può giocare a scacchi sicuramente molto meglio di me; e la cosa curiosa è che può giocare meglio di me anche un calcolatore programmato da me: io sono più bravo come programmatore di un calcolatore che come giocatore di scacchi.

Ora quando un calcolatore gioca a scacchi, a me viene spontaneo interagire col calcolatore dimenticando che cosa c'è dall'altra parte; sono portato a descrivere il comportamento del calcolatore con lo stesso linguaggio che userei se avessi davanti un avversario umano: “ah, guarda, adesso *lui* ha capito che mi preparavo a sviluppare questo certo attacco e mi contrasta in questa tale maniera.” E questo non capita solo a me: per quanto ne so, succede a chiunque.

Un altro esempio: voi potete impiegare un calcolatore come unità di comando di un “robot,” cioè di una di quelle macchine che vengono usate attualmente nelle fabbriche più moderne per certe operazioni e lavorazioni, anche complicate. Un robot è, ad es., capace di misurare un pezzo, accettarlo o scartarlo a seconda che rientri o no nelle tolleranze; può portare un utensile a contatto del pezzo, fare un determinato foro, controllare se il foro è venuto bene. Un robot può anche montare un congegno complesso a partire dalle parti staccate, stringere le viti, ecc.

Di nuovo, quando studiate il comportamento di un robot voi non pensate più al programma che c'è dentro, non pensate ai registri, e tanto meno ai circuiti integrati o ai transistor: voi avete davanti un oggetto il cui comportamento, se volete capirlo, richiede di essere descritto a un livello molto elevato, cioè in termini di movimenti degli “arti” del robot, di risposte dei suoi sensori, e così via.

## 6. Il problema del riduzionismo: ipotesi di soluzione

E ora finalmente posso spiegare il perché di questa digressione sui calcolatori. A parte la constatazione che strumenti a un tale grado di sofisticazione esistono e dobbiamo comunque tenerne conto, per cui le idee che ho sommariamente richiamato sono oggi elementi necessari della nostra cultura, quello che importa per la nostra discussione è che i calcolatori sono sicuramente riducibili a componenti la cui fisica conosciamo perfettamente. Ma ciò non toglie che se noi pretendessimo di capire un calcolatore che gioca a scacchi riportandoci ogni volta a tutto quello che sta succedendo in ogni singola giunzione di ogni transistor, al moto di tutti gli elettroni e a tutte le correnti che ne risultano, non arriveremmo a niente, diventeremmo semplicemente pazzi.

Di qui si vede che è una necessità nostra — del nostro modo di pensare, di come noi siamo capaci di affrontare la comprensione della realtà — il fatto di dover *astrarre*, cioè di abbandonare un certo livello di descrizione e portarci su un altro livello (più astratto) in cui certi dettagli si dimenticano, s'ignorano,

e tutte le proprietà del livello inferiore si riassumono in comportamenti generali che diventano le leggi del livello superiore. Noi descriviamo un calcolatore in cui stiamo facendo girare un programma in termini del linguaggio di programmazione: d'istruzioni, di variabili, di procedure, ecc.; e non in termini di transistor, di resistenze, di correnti. Ma questo lo facciamo noi: il calcolatore è sempre lui, non cambia assolutamente di una virgola se io invece di essere un ingegnere elettronico che lo sta provando, sono un matematico che lo sta usando per un calcolo; cambia soltanto il livello di descrizione. Se il calcolatore, a causa di un errore nel programma, non si comporta come dovrebbe, sarebbe stupido tentare di "ripararlo" cambiando qualche integrato, e viceversa: anche un errato funzionamento va visto a diversi livelli.

Ora l'ipotesi che io volevo proporvi è che in generale il problema della riduzione delle scienze sia dello stesso tipo: passando da una scienza all'altra non cambia la natura dell'oggetto che si studia, né interviene qualche entità metafisica. Accade però che di fronte a sistemi abbastanza complessi abbiamo noi la necessità di astrarre da tanti dettagli e complicazioni, d'introdurre leggi generali che ci permettono d'ignorare quei dettagli e quelle complicazioni, e di vedere le cose in modo più sintetico a un altro livello. E da questo livello può poi essere necessaria un'ulteriore astrazione, che ci porta a un livello più alto, ecc. In questo senso a mio giudizio si spiega l'esistenza e l'importanza delle diverse scienze. Non solo le scienze sono storicamente diverse, hanno avuto ciascuna la propria evoluzione, costruito propri linguaggi e proprie tecniche sperimentali, esse sono anche necessarie perché corrispondono a diversi livelli di approccio allo studio di una realtà che è estremamente complessa. Tuttavia non si tratta di differenze di principio, che comportino irriducibilità: tanto è vero che tutte le scienze sfumano l'una nell'altra, i loro ambiti specifici si modificano; talora due scienze si fondono in una, più spesso nascono nuove scienze nelle zone di confine.

È dunque chiaro che questo punto di vista non nega la riducibilità, e mostra che il nostro atteggiamento verso il problema deve essere duplice: da un lato riconoscere che la realtà è sempre riducibile da un livello a quello inferiore, ma dall'altro accettare che il nostro modo di comprendere scientificamente la realtà richiede la descrizione a diversi livelli, e che i vari livelli non possono essere tenuti presenti simultaneamente. Siamo noi che non ne siamo capaci: il nostro cervello non ci riesce.

L'errore filosofico cui accennavo prima è di vedere quella che è una nostra necessità mentale come una struttura obiettiva della realtà: e cioè un errore d'ipostatizzazione, uno dei molti che sono stati commessi nella storia della filosofia.

## 7. Conclusioni

È ora il momento di spiegare la motivazione più importante che mi ha spinto ad affrontare questo tema. Tutti sapete che gli argomenti che ho trattato — la possibilità di una comprensione unitaria della realtà, la riducibilità

delle scienze tra loro — sono vivi nella problematica filosofica odierna, ma generalmente vengono visti in una luce abbastanza diversa da quella in cui io ho cercato di presentarveli. Credo che ciò dipenda in buona misura dal fatto che c'è poco contribuito degli scienziati propriamente detti a queste discussioni. Non voglio adesso riaprire la vecchia polemica sui rapporti fra scienza e filosofia, fra scienziati e filosofi; ma il problema esiste. Infatti dovrebbe ormai risultare chiaro che se non si ha una conoscenza abbastanza approfondita, anche in senso tecnico, della realtà del lavoro scientifico, ci si possono fare delle idee che non corrispondono all'effettivo modo di costruirsi della scienza e al modo di pensare degli scienziati.

Venendo più da vicino all'occasione di questo congresso, vediamo che indicazioni se ne ricavano per gli insegnanti. A me pare necessario che una visione dei problemi che ho trattato, e un contributo alla loro discussione, sia presente anche nell'insegnamento della fisica. Dico questo tra l'altro perché essi danno all'insegnamento della fisica una motivazione molto diversa e complementare alle altre motivazioni possibili, e non credo che si tratti di una motivazione meno sentita e meno facilmente accolta dai giovani di quelle strettamente tecnologiche, applicative.

Con ciò non sto proponendo di trasformare un insegnamento scientifico — in particolare quello della fisica — in un insegnamento di filosofia della scienza; anzi, sono abbastanza diffidente verso tendenze di questo tipo, e già in altre occasioni ho criticato una certa moda d'introdurre la storia e la filosofia nell'insegnamento della fisica fino al punto di snaturarlo. Però non bisogna neppure cadere nell'errore opposto: l'insegnamento della fisica non può essere un puro e semplice tecnicismo; non si può credere che il compito di chi insegna si riduca a fornire certe formule, certi procedimenti, a illustrare certi fenomeni, a eseguire certi esperimenti.

Il contributo di Newton o di Maxwell alla scienza; la possibilità di ridurre la chimica o altre scienze alla fisica: argomenti come questi nelle scuole dovrebbero essere affrontati. È problema nostro trovare in quali forme, in quali modi; ma non si tratta di problema che possa essere trascurato.

La fisica è certamente la scienza che meglio si presta, per almeno due ragioni. In primo luogo perché la fisica di per sé affronta un ambito di fenomeni vastissimo, dal microscopico all'universo: quindi il problema della comprensione unitaria della realtà si pone da sé. In secondo luogo, dato che almeno in linea di principio ci si dovrebbe aspettare che le altre scienze siano riducibili alla fisica, è logico che parlando di fisica sorgano domande come: la materia vivente è descrivibile con le leggi fisiche oppure no?

Inoltre discutendo il processo di unificazione all'interno della fisica noi troviamo anche molti esempi delle difficoltà di questo processo. Ciò permette di far capire che l'unificazione è un obiettivo che non va perso di vista, ma che è difficile raggiungere; che bisogna guardarsi dalle fughe in avanti, dal dare per

risolto quello che risolto non è; che molte volte ci si può anche accontentare di risultati parziali.

Se questi sono obiettivi che ci si dovrebbe porre nell'insegnamento, probabilmente sono anche tra i più alti, quindi tra i più difficili. È un degno compito per un'associazione come la nostra di affrontarli: per quanto mi riguarda, spero di avere portato un contributo.