

1. *Considerazioni generali sul metodo della scienza*

Spesso si è detto, e certamente non senza una giustificazione, che l'uomo di scienza è un filosofo mediocre. Non sarebbe allora meglio che i fisici lasciassero ai filosofi il filosofare? Questa invero potrebbe essere la cosa migliore in un'epoca in cui il fisico credesse di avere a propria disposizione un solido sistema di concetti e leggi basilari così ben fondate da essere inaccessibili al dubbio; ma non può essere la cosa migliore in un'epoca, in cui, come in quella attuale, gli stessi fondamenti della fisica sono diventati problematici. In un'epoca come la presente, in cui l'esperienza ci obbliga a cercare un nuovo e più solido fondamento, il fisico non può semplicemente lasciare al filosofo la considerazione critica dei fondamenti teorici; è lui infatti che sa meglio e sente più nettamente dov'è che la scarpa fa male. Nel cercare un nuovo fondamento, egli deve sforzarsi di chiarire a sé stesso fino a che punto i concetti che egli usa sono fondati e costituiscono qualcosa di insostituibile.

Tutta la scienza non è altro che un raffinamento del pensiero comune. È per questa ragione che il pensiero critico del fisico non può verosimilmente venir ristretto all'esame dei concetti del suo campo specifico. Egli non può procedere senza considerare criticamente un problema molto più difficile: quello di analizzare la natura del pensiero comune.

Al livello del nostro inconscio sfilano in variopinta successione esperienze sensoriali, loro impressioni mnemoniche, rappresentazioni e sentimenti. Contrariamente alla psicologia, la

fisica si interessa direttamente soltanto delle esperienze sensoriali e della «comprensione» delle loro connessioni. Ma anche il concetto di «realtà esterna» del pensiero comune si fonda unicamente sulle impressioni sensoriali.

Ora, dobbiamo innanzitutto notare come non sia possibile una differenziazione fra le impressioni sensoriali e le rappresentazioni, o quanto meno, non sia possibile con certezza assoluta. Noi non ci occuperemo della discussione di questo problema, che riguarda anche la nozione di realtà, e daremo per scontata l'esistenza delle esperienze sensoriali, intese come esperienze psichiche di tipo particolare.

Io credo che il primo passo verso una descrizione sistematica di un «mondo reale esterno» sia la formazione dei concetti di oggetto corporeo e di oggetti corporei di varia conformazione. Dalla massa delle nostre esperienze sensoriali noi preleviamo certi complessi di impressioni ricorrenti (in parte in connessione con impressioni sensoriali che vengono interpretate come segni delle esperienze sensoriali altrui), e attribuiamo loro un significato, il significato di oggetto corporeo. Considerato da un punto di vista logico, questo concetto non si identifica con la totalità delle impressioni sensoriali cui si riferisce, ma rappresenta una creazione arbitraria della mente umana (o animale). D'altra parte, questo concetto trae il proprio significato e la propria giustificazione esclusivamente dalla totalità delle impressioni sensoriali che noi gli associamo.

Il secondo passo consiste nel fatto che nella nostra concezione teorica (che è quella che determina le nostre previsioni) noi attribuiamo a questo concetto di oggetto materiale un significato in gran parte indipendente dalle impressioni sensoriali che hanno presieduto al suo sorgere. Questo è ciò che intendiamo quando attribuiamo all'oggetto corporeo «un'esistenza reale». La giustificazione di una tale costruzione riposa esclusivamente sul fatto che, mediante tali concetti e le associazioni tra essi, noi siamo in grado di orientarci nel labirinto delle impressioni sensoriali. Queste nozioni e relazioni, per quanto siano libere convenzioni della nostra attività intellettuale, ci appaiono più solide e inalterabili della stessa esperienza sensoriale individuale, di cui non è mai completamente garantito che non sia il prodotto

di un'illusione o di un'allucinazione. D'altra parte, questi concetti e relazioni, anzi la costruzione degli oggetti reali e in generale l'esistenza del «mondo reale», posseggono una giustificazione solo in quanto sono collegati con le impressioni sensoriali tra le quali essi stabiliscono una connessione mentale.

Il fatto stesso che la totalità delle nostre esperienze sensoriali si possa ordinare col pensiero (operazioni con concetti astratti, creazione e uso di relazioni funzionali ben definite fra di essi, e coordinazione delle esperienze sensoriali con tali concetti) ci lascia stupefatti, ed è un qualcosa che non riusciremo mai a spiegarci. Si potrebbe dire che «l'eterno mistero del mondo è la sua comprensibilità». Una delle grandi scoperte di Immanuel Kant fu il riconoscimento che la costruzione di un mondo esterno reale sarebbe priva di senso senza la sua comprensibilità.

Nel parlare qui di «comprensibilità», l'espressione viene usata nel suo significato più ristretto. Essa, in generale, implica la produzione di un qualche tipo di ordine fra le impressioni sensoriali, tale ordine essendo prodotto dalla creazione di concetti generali, dalle relazioni fra questi concetti, e dalle relazioni fra i concetti e l'esperienza sensoriale, relazioni determinate in ogni maniera possibile. È in questo senso che il mondo delle nostre esperienze sensoriali è comprensibile. Il fatto che sia comprensibile è davvero un miracolo.

Secondo me non si può dire nulla riguardo al modo in cui i concetti devono essere costruiti e collegati, come pure riguardo al modo in cui noi dobbiamo coordinarli con le esperienze. Il successo dei risultati rappresenta il fattore determinante che ci guida nella creazione di un tale ordine fra le esperienze sensoriali. Tutto ciò che è necessario è l'enunciazione di un gruppo di regole, poiché senza tali regole l'acquisizione della conoscenza nel senso desiderato sarebbe impossibile. Si può paragonare tale situazione a quella di un gioco: le regole possono anche essere arbitrarie, ma solo il loro rigore e la loro inflessibile applicazione rendono possibile il gioco. La loro scelta, tuttavia, non sarà mai definitiva: essa varrà solo per un particolare campo di applicazione (in altre parole, non esistono categorie definitive nel senso di Kant).

La connessione dei concetti elementari del pensiero comune con i complessi delle esperienze sensoriali può venir intesa solo

intuitivamente e non è suscettibile di una determinazione scientificamente logica. La totalità di queste connessioni (nessuna delle quali è esprimibile in termini concettuali) è l'unica cosa che differenzia il grande edificio della scienza da uno schema, logico ma vuoto, di concetti. Mediante queste connessioni i teoremi puramente concettuali della scienza divengono proposizioni riguardanti i complessi delle esperienze sensoriali.

Chiameremo tali concetti «concetti primari», in quanto direttamente e intuitivamente connessi con complessi tipici di esperienze sensoriali. Tutte le altre nozioni sono, dal punto di vista fisico, dotate di significato solo in quanto connesse, mediante teoremi, alle nozioni primarie. Questi teoremi sono in parte definizioni dei concetti (e delle proposizioni logicamente dedotte da essi) e in parte teoremi non deducibili dalle definizioni, i quali esprimono relazioni quanto meno indirette fra i «concetti primari», e di conseguenza fra le esperienze sensoriali. I teoremi di questo secondo tipo rappresentano delle «affermazioni circa la realtà» o leggi di natura: essi debbono mostrare la loro utilità quando vengano applicati a esperienze sensoriali abbracciate dai concetti primari. La questione, quali teoremi debbano essere considerati come definizioni e quali come leggi naturali, dipenderà largamente dalla rappresentazione scelta. Diventa davvero necessario stabilire questa differenziazione solo quando si esamina il grado in cui il sistema di concetti considerato non è vuoto dal punto di vista fisico.

Il fine della scienza è, da una parte, la comprensione più *completa* possibile della connessione fra le esperienze sensoriali nella loro totalità e, dall'altra, il raggiungimento di questo fine *mediante l'uso di un numero minimo di concetti e di relazioni primarie* (mirando, per quanto è possibile, all'unità logica della rappresentazione del mondo, cioè a tener ristretto il numero di elementi logici).

La scienza si occupa della totalità dei concetti primari, vale a dire dei concetti direttamente collegati alle esperienze sensoriali, e dei teoremi che li connettono. Nella sua prima fase di sviluppo, la scienza non contiene nient'altro. Il nostro pensiero quotidiano è interamente soddisfatto a questo livello. Un tale

stato di cose, tuttavia, non può soddisfare una mente davvero scientifica, poiché la totalità dei concetti e delle relazioni ottenuta in questa maniera decisamente difetta di unità logica. Al fine di sopperire a questa deficienza, si inventa un sistema più povero di concetti e di relazioni, un sistema che conserva i concetti e le relazioni primarie del « primo livello » come concetti e relazioni derivate per via logica. Questo nuovo « sistema del secondo ordine » paga la sua più profonda unità logica con il conservare come concetti elementari (concetti del secondo livello) soltanto concetti non più connessi direttamente con i complessi di esperienze sensoriali. Un ulteriore sforzo verso l'unità logica ci conduce a un sistema del terzo ordine, ancor più povero di concetti e di relazioni, per la deduzione dei concetti e delle relazioni del secondo livello (e, quindi, indirettamente del primo). Così la catena procede finché arriviamo al sistema dotato della più alta unità concepibile e insieme del numero minimo possibile di concetti logici fondamentali (sempre compatibili con le osservazioni fatte mediante i nostri sensi). Noi non sappiamo se questa spinta si creterà mai in un sistema concluso oppure no. Di fronte a una questione del genere si è inclini a rispondere negativamente. E tuttavia, lottando in continuazione con i problemi che si presentano, non si vorrà mai rinunciare alla speranza che questo supremo fine possa essere raggiunto con un'approssimazione altissima.

Un sostenitore della teoria dell'astrazione o dell'induzione potrebbe denominare « gradi di astrazione » i nostri livelli; ma io non ritengo giustificabile mettere in ombra l'indipendenza logica del concetto dalle esperienze sensoriali. Tale relazione è analoga non tanto a quella del brodo rispetto al bue, quanto, piuttosto, a quella dello scontrino del guardaroba rispetto al cappotto.

Inoltre, i livelli non sono nettamente separati. Non è neppure assolutamente chiaro quali concetti appartengano al livello primario. Di fatto, abbiamo a che fare con concetti liberamente formati, i quali sono intuitivamente connessi in maniera tale (con una certezza sufficiente nell'uso pratico) con i complessi delle esperienze sensoriali, che in ogni dato caso sperimentale non sussiste alcuna incertezza circa l'applicabilità o meno di una certa affermazione. Il punto essenziale è il fine: rappre-

sentare la moltitudine dei concetti e degli enunciati più prossimi all'esperienza, come teoremi deducibili per via logica a partire da una base, la più ristretta possibile, di concetti e di relazioni fondamentali che possono venir scelti liberamente (assiomi). La libertà di scelta, tuttavia, è di un tipo particolare: non è affatto simile alla libertà di uno scrittore di romanzi. Essa è piuttosto simile a quella di chi è impegnato nella risoluzione di un ben congegnato cruciverba. Egli può, è vero, proporre ogni volta qualsiasi parola come soluzione; ma ogni volta è *una sola* parola che dà la chiave per risolvere il cruciverba in tutte le sue parti. L'idea che la natura, quale risulta percepibile dai nostri cinque sensi, abbia il carattere di un cruciverba ben congegnato è frutto di un atto di fede; ad essa, peraltro, i successi ottenuti finora dalla scienza danno un certo credito.

La pluralità di livelli esaminata in precedenza corrisponde ai vari stadi di progresso che sono stati raggiunti nella lotta per l'unità, nel corso dello sviluppo. Per quanto riguarda il fine ultimo, i livelli intermedi sono solo di natura temporanea, e in quanto non essenziali, destinati a scomparire. Noi abbiamo a che fare, tuttavia, con la scienza attuale, in cui questi livelli rappresentano successi parziali, successi problematici che si sostengono l'un l'altro, ma anche si minacciano per via di incongruenze di fondo (le incontreremo più avanti) presenti negli attuali sistemi di concetti.

Nelle pagine seguenti cercheremo di mostrare quali strade ha seguito la mente umana per giungere a una fondazione della fisica che fosse la più uniforme possibile da un punto di vista logico.

2. La meccanica e i tentativi di basare su di essa tutta la fisica

Una proprietà importante delle nostre esperienze sensoriali e, più generalmente, di tutte le nostre esperienze è l'ordinamento temporale. Questo tipo di regolarità ingenera la concezione di un tempo soggettivo quale schema ordinatore della nostra esperienza. Di qui si giunge poi, attraverso i concetti di oggetto corporeo e di spazio, al concetto di tempo oggettivo, come vedremo più avanti.

Alla base della nozione di tempo oggettivo si trova, tuttavia, il concetto di spazio, che a sua volta si fonda sul concetto di oggetto corporeo. Quest'ultimo è direttamente collegato con i complessi delle esperienze sensoriali. È stato osservato che una proprietà caratteristica della nozione di «oggetto corporeo» è quella che ci permette di collegare ad esso un'esistenza indipendente sia dal tempo (soggettivo), sia dal fatto di essere percepito dai nostri sensi. E questo nonostante percepiamo in esso alterazioni temporali. Poincaré ha giustamente sottolineato il fatto che noi distinguiamo due tipi di alterazioni dell'oggetto corporeo: «variazioni di stato» e «variazioni di posizione». Queste ultime, egli notò, sono alterazioni che possiamo invertire mediante moti arbitrari dei nostri corpi.

Il fatto che vi siano oggetti corporei ai quali, entro una certa sfera di percezione, noi non attribuiamo alcuna alterazione di stato, ma solo alterazioni di posizione, ha un'importanza fondamentale per la formazione del concetto di spazio (e in certa misura anche per la giustificazione della nozione stessa di oggetto corporeo). Diciamo «praticamente rigido» un tale oggetto.

Se, come oggetto della nostra percezione, noi consideriamo simultaneamente (cioè, come una singola unità) due corpi praticamente rigidi, allora per tale insieme esistono alterazioni che probabilmente *non* possono essere considerate come variazioni della posizione dell'insieme, nonostante esse si verifichino per ciascuno dei due costituenti. Ciò conduce alla nozione di «variazione di posizione relativa» dei due oggetti e, per questa via, anche alla nozione di «posizione relativa» dei due oggetti. Si trova, inoltre, che fra le posizioni relative ne esiste una di tipo speciale che noi designiamo come «contatto». ¹ Contatto permanente di due corpi in tre o più «punti» significa che essi sono uniti in modo da formare un corpo composto quasi rigido. Si può affermare che il secondo corpo forma in tal caso una estensione (quasi rigida) del primo e può, a sua volta, essere esteso in modo quasi rigido. La possibilità della estensione quasi rigida di un corpo è

¹ È nella natura delle cose il fatto che noi possiamo parlare di questi oggetti solo mediante concetti creati da noi stessi, e che di per sé non sono soggetti a definizione. È essenziale, tuttavia, fare uso solo di concetti sulla cui coordinazione con la nostra esperienza non abbiamo alcun dubbio.

illimitata. L'essenza reale della estensione quasi rigida di un corpo C_0 è lo «spazio» infinito da esso determinato.

Secondo me, il fatto che ogni oggetto corporeo situato in una posizione completamente arbitraria possa venir posto in contatto con la estensione quasi rigida di un dato corpo prefissato C_0 (corpo di riferimento), costituisce la base empirica della nostra concezione dello spazio. Nel pensiero prescientifico la solida crosta della Terra ha la funzione di C_0 e della sua estensione. Lo stesso nome di geometria indica che il concetto di spazio è psicologicamente collegato alla Terra come corpo di riferimento. La chiara nozione di «spazio» che precedette tutta la scienza geometrica trasformò la nostra rappresentazione mentale delle relazioni di posizione degli oggetti corporei nella nozione della posizione di questi oggetti corporei nello «spazio». Ciò rappresenta, di per sé, una grande semplificazione formale. Attraverso questo concetto di spazio si giunge, inoltre, a un atteggiamento per cui ogni descrizione di posizione è implicitamente una descrizione di contatto; l'affermazione secondo cui un punto di un oggetto corporeo è localizzato nel punto P dello spazio significa che l'oggetto tocca il punto P del corpo di riferimento C_0 (supposto opportunamente esteso) nel punto considerato.

Nella geometria greca lo spazio ha un significato esclusivamente qualitativo: la posizione dei corpi in relazione allo spazio è considerata come data, ma non è descritta per mezzo di numeri. Descartes fu il primo a introdurre questo metodo. Nel suo linguaggio l'intero contenuto della geometria euclidea può assiomaticamente venir fondato sulle seguenti affermazioni: 1) due punti qualsiasi di un corpo rigido determinano una distanza; 2) possiamo associare terne di numeri X_1, X_2, X_3 a punti dello spazio in maniera tale che, per ogni distanza $P'P''$ considerata, le coordinate dei cui estremi siano X'_1, X'_2, X'_3 e X''_1, X''_2, X''_3 , l'espressione

$$S^2 = (X'_1 - X''_1)^2 + (X'_2 - X''_2)^2 + (X'_3 - X''_3)^2$$

sia indipendente dalla posizione del corpo considerato e dalle posizioni di qualsiasi altro corpo.

Il numero (positivo) S rappresenta la lunghezza del segmento $P'P''$ come pure la distanza fra i due punti P' e P'' dello spazio (coincidenti con gli estremi P' e P'' del segmento).

Questa formulazione è scelta a bella posta al fine di rendere manifesto il contenuto, non soltanto logico e assiomatico, ma anche empirico della geometria euclidea. La rappresentazione puramente logica (assiomatica) della geometria euclidea offre, è vero, il vantaggio di una maggiore semplicità e chiarezza, a prezzo però della rinuncia a rappresentare la connessione esistente fra la costruzione concettuale e l'esperienza sensoriale, connessione sulla quale è esclusivamente fondata l'importanza della geometria per la fisica. L'errore fatale di vedere alla base della geometria euclidea, e della concezione dello spazio che le è propria, solo necessità logiche, antecedenti ogni esperienza, questo fatale errore sorse dal fatto che il presupposto empirico, su cui si fonda la costruzione assiomatica di quella geometria, era caduto nell'oblio.

Fintantoché si parla dell'esistenza in natura di corpi rigidi, la geometria euclidea è scienza fisica, la cui utilità deve venire dimostrata nell'applicazione alle esperienze sensoriali. Essa si interessa della totalità delle leggi che debbono valere per le posizioni relative dei corpi rigidi indipendentemente dal tempo. Come si può vedere, anche la nozione fisica di spazio, come fu originariamente usata in fisica, è legata all'esistenza dei corpi rigidi.

Dal punto di vista del fisico l'importanza della geometria euclidea si fonda sul fatto che le sue leggi sono indipendenti dalla particolare natura dei corpi di cui discute le posizioni relative. La sua semplicità formale è caratterizzata dalle proprietà di omogeneità e di isotropia (e dall'esistenza di enti simili).

Il concetto di spazio è certamente utile ma non indispensabile alla geometria propriamente detta, vale a dire alla formulazione di regole riguardanti le posizioni relative dei corpi rigidi. Al contrario, il concetto di tempo oggettivo, senza il quale la formulazione dei fondamenti della meccanica classica è impossibile, è legato al concetto di continuo spaziale.

L'introduzione del tempo oggettivo implica due affermazioni tra loro indipendenti: 1) l'introduzione del tempo oggettivo locale,

mediante la connessione della sequenza temporale delle esperienze con le indicazioni di un «orologio», cioè di un sistema chiuso con un ritmo periodico; 2) l'introduzione della nozione di tempo oggettivo per gli eventi in tutto lo spazio, nozione per mezzo della quale l'idea di tempo locale viene generalizzata nell'idea di tempo fisico.

Osservazione concernente il punto (1). A mio avviso, porre il concetto di ritmo periodico prima del concetto di tempo non implica una *petitio principii*, se ci si preoccupa di chiarire l'origine e il contenuto empirico del concetto di tempo. Una tale concezione corrisponde esattamente alla priorità del concetto di corpo rigido (o quasi rigido) nell'interpretazione del concetto di spazio.

Precisazione del punto (2). L'illusione che regnava prima dell'enunciazione della teoria della relatività — che cioè dal punto di vista dell'esperienza il significato di simultaneità, in relazione agli eventi distanti nello spazio, e di conseguenza il significato del tempo in fisica fossero chiari a priori — aveva le sue origini nel fatto che nella nostra esperienza quotidiana noi possiamo trascurare il tempo di propagazione della luce. Noi siamo abituati, perciò, a non vedere la differenza tra «simultaneamente visto» e «simultaneamente accaduto»; di conseguenza svanisce la differenza fra tempo e tempo locale.

La mancanza di chiarezza, che, ove se ne considerino le conseguenze empiriche, appare implicita nella nozione di tempo propria della meccanica classica, fu mascherata dalla rappresentazione assiomatica dello spazio e del tempo come di entità che ci sono date indipendentemente dai nostri sensi. Un uso siffatto dei concetti, indipendentemente dalla base empirica cui debbono la loro esistenza, non danneggia necessariamente la scienza. Si può, tuttavia, facilmente cadere nell'errore di credere che questi concetti, la cui origine viene dimenticata, siano dei complementi necessari e intoccabili del nostro pensiero, e questo errore può costituire un serio danno per il progresso della scienza.

Fu una fortuna per lo sviluppo della meccanica, e quindi anche della fisica in generale, che la mancanza di precisione del concetto di tempo oggettivo rimanesse celata ai primi filosofi, per ciò che riguarda la sua interpretazione empirica. Pieni di fiducia

nel significato reale della costruzione spazio-temporale, essi svilupparono i fondamenti della meccanica che noi caratterizzeremo schematicamente come segue:

a) Concetto di punto materiale: oggetto corporeo che, per quanto riguarda la posizione e lo stato di moto, può venir descritto con sufficiente esattezza come un punto di coordinate X_1 , X_2 e X_3 . Il suo stato di moto (in relazione allo «spazio» C_0) viene descritto dando X_1 , X_2 e X_3 in funzione del tempo.

b) Legge d'inerzia: l'annullarsi delle componenti dell'accelerazione di un punto materiale che si trovi sufficientemente lontano da tutti gli altri punti materiali.

c) Legge del moto (per il punto materiale): forza = massa \times accelerazione.

d) Legge della forza (azioni e reazioni fra punti materiali).

In questo schema il punto (b) non è altro che un importante caso particolare del punto (c). Una vera teoria sussiste comunque solo quando vengano date le leggi delle forze, e in primo la legge dell'uguaglianza fra azione e reazione (questo perché un sistema di punti costantemente connessi l'uno con l'altro possa comportarsi come un *unico* punto materiale).

Queste leggi fondamentali, insieme alla legge di Newton per la forza gravitazionale, sono alla base della meccanica dei corpi celesti. In questa meccanica newtoniana, e in contrasto con le concezioni dello spazio dedotte dai corpi rigidi, di cui abbiamo parlato sopra, lo spazio C_0 entra in una forma che contiene una nuova idea: non per ogni C_0 viene richiesta (per una data legge della forza) la validità di (b) e (c), ma solo per un C_0 in opportune condizioni di moto (sistema inerziale). A causa di ciò, lo spazio delle coordinate acquistò una proprietà fisica indipendente che non è contenuta nella nozione puramente geometrica di spazio, circostanza questa che offrì a Newton considerevole materia di meditazione (esperimento del secchio).²

² Questo difetto della teoria potrebbe venir eliminato soltanto mediante una formulazione della meccanica tale da esigere validità per tutti i C_0 . Questo è uno dei passi che conducono alla teoria della relatività generale. Un secondo difetto,

La meccanica classica è soltanto uno schema generale; essa diventa una teoria solo grazie all'indicazione esplicita della legge della forza (d), come quella che fu data, con grande successo, da Newton per la meccanica celeste. Dal punto di vista dell'obiettivo della massima semplicità logica dei fondamenti, questo metodo teorico è manchevole nella misura in cui le leggi delle forze non possono venir enucleate mediante considerazioni logiche e formali, cosicché la loro scelta risulta fortemente arbitraria. Anche la legge della gravitazione di Newton viene preferita ad altre possibili leggi della forza, esclusivamente in base al suo *successo*.

Anche se oggi noi sappiamo con certezza che la meccanica classica fallisce in quanto fondamento generale di tutta la fisica, essa continua a costituire il centro di tutto il nostro modo di considerare la fisica. La ragione sta nel fatto che, a prescindere dai grandi progressi ottenuti fin dal tempo di Newton, noi non siamo ancora pervenuti a stabilire un nuovo fondamento di questa scienza da cui possa dedursi, con certezza, l'intero complesso dei fenomeni studiati e dei sistemi teorici parziali che hanno avuto successo. Nelle pagine che seguono cercherò di descrivere brevemente lo stato delle cose a questo riguardo.

In primo luogo cerchiamo di chiarirci fino a che punto il sistema della meccanica classica si sia dimostrato adeguato a servire come base per tutta la fisica. Dato che qui trattiamo solo dei fondamenti della fisica e del suo sviluppo, non dobbiamo preoccuparci dei progressi puramente *formali* della meccanica (equazioni di Lagrange, equazioni canoniche ecc.). Tuttavia, *almeno una* osservazione appare indispensabile. La nozione di «punto materiale» è fondamentale per la meccanica. Se cerchiamo ora di formulare la meccanica degli oggetti materiali che per loro natura *non* possono essere trattati come punti materiali (e, strettamente parlando, ogni oggetto «percepibile dai nostri sensi» appartiene a questa categoria) allora nasce la questione: in quale maniera

anch'esso eliminato solo con l'introduzione della teoria della relatività generale, sta nel fatto che la meccanica non dà modo di spiegare l'uguaglianza fra massa inerziale e massa gravitazionale del punto materiale.

immagineremo che l'oggetto possa essere costituito da punti materiali, e quali forze dovremo presupporre che agiscano fra essi? La formulazione di tale questione è indispensabile, se si pretende che la meccanica descriva l'oggetto *completamente*.

È proprio dell'impostazione della meccanica supporre che questi punti materiali e la legge delle forze agenti fra essi siano invariabili, dato che alterazioni temporali sarebbero al di fuori dei fini esplicativi della meccanica stessa. Da ciò possiamo vedere che la meccanica classica deve condurci a una costituzione atomistica della materia. Comprendiamo ora con particolare chiarezza come si trovino in errore quei teorici che credono che la teoria provenga induttivamente dall'esperienza. Neppure il grande Newton riuscì a liberarsi da questo errore («*hypotheses non fingo*» [non formulo ipotesi]).

Per salvarsi dal pericolo di perdersi senza speranza lungo questa linea di pensiero (atomistica), la scienza procedette innanzitutto nel modo seguente. La meccanica di un sistema è determinata se viene assegnata la sua energia potenziale in funzione della sua configurazione. Ora, se le forze agenti sono di tipo tale da garantire la conservazione di certe qualità strutturali della configurazione del sistema, allora la configurazione stessa può venir descritta con sufficiente precisione da valori relativamente piccoli delle variabili di configurazione q . L'energia potenziale viene presa in considerazione solo in quanto dipende da *queste* variabili (per esempio, la descrizione della configurazione di un corpo praticamente rigido viene effettuata mediante sei variabili).

Un secondo metodo di applicazione della meccanica, che evita la questione di una suddivisione della materia in punti materiali «reali», è fornito dalla meccanica dei cosiddetti mezzi continui. Questo tipo di meccanica è caratterizzato dalla convenzione secondo cui la densità e la velocità della materia sono funzioni continue delle coordinate e del tempo, e che la parte di interazione non esplicitamente data può essere assimilata a forze di superficie (pressioni) che sono anch'esse funzioni continue della posizione. È questo il caso della teoria dell'idrodinamica e

della teoria dell'elasticità dei corpi solidi. Queste teorie evitano l'introduzione esplicita dei punti materiali mediante convenzioni che, alla luce dei fondamenti della meccanica classica, possono avere un significato soltanto approssimato.

Oltre alla loro grande portata *pratica*, queste categorie della scienza hanno creato, allargando il mondo matematico delle idee, quegli strumenti formali ausiliari (equazioni differenziali alle derivate parziali) che si sono resi necessari nei tentativi successivi di formulare lo schema generale della fisica in una maniera nuova rispetto a quella di Newton.

Questi due metodi di applicazione della meccanica appartengono alla fisica cosiddetta *fenomenologica*. È caratteristico di tale tipo di fisica l'uso più esteso possibile di concetti che siano vicini all'esperienza ma che, per questa ragione, devono rinunciare in grande misura all'unità dei fondamenti. Il calore, l'elettricità e la luce sono descritti da particolari variabili di stato e da costanti di struttura diverse da quelle meccaniche. Determinare tutte queste variabili nella loro mutua dipendenza fu un lavoro essenzialmente sperimentale. Molti contemporanei di Maxwell videro in tale rappresentazione il fine ultimo della fisica, che essi pensavano potesse venir raggiunto in modo puramente induttivo a partire dall'esperienza, in base alla relativa concordanza dei concetti usati con l'esperienza stessa. Dal punto di vista delle teorie della conoscenza Stuart Mill ed Ernst Mach si situarono approssimativamente su questa linea di pensiero.

È mia convinzione che il più grande successo della meccanica di Newton stia nel fatto che le sue coerenti applicazioni hanno portato al di là di tale rappresentazione fenomenologica, particolarmente nel campo dei fenomeni termici, come si verificò nella teoria cinetica dei gas e, in generale, nella meccanica statistica. La prima mette in relazione l'equazione di stato dei gas perfetti, e la viscosità, la diffusione e la conducibilità termica dei gas, con i fenomeni radiometrici dei gas, e fornisce la connessione logica di fatti che, dal punto di vista dell'esperienza diretta, non hanno nulla a che fare l'uno con l'altro. La seconda fornisce un'interpretazione meccanica delle idee e delle leggi termodinamiche e permette di

scoprire il limite di applicabilità delle nozioni e delle leggi della teoria classica del calore. La teoria cinetica, che supera di gran lunga la fisica fenomenologica per ciò che riguarda l'unità logica dei fondamenti, permise inoltre di calcolare valori definiti delle dimensioni reali degli atomi e delle molecole, gli stessi cui conducevano svariati metodi indipendenti e che furono perciò ritenuti ragionevolmente sicuri. A questi progressi decisivi si giunse grazie alla supposta corrispondenza tra entità atomiche e punti materiali; per cui il carattere di costruzione speculativa di quelle entità è ovvio. Nessuno potrebbe mai sperare di «percepire direttamente» un atomo. Le leggi riguardanti le variabili collegate più direttamente con i fatti sperimentali (per esempio: la temperatura, la pressione, la velocità) vennero dedotte dalle idee fondamentali mediante complicati calcoli. In questa maniera la fisica (o almeno una sua parte), costruita in origine per una via più fenomenologica, venne ricondotta, basandosi sulla meccanica di Newton applicata alle molecole e agli atomi, a un fondamento ancora più lontano dall'esperimento diretto, ma di carattere più uniforme.

3. *Il concetto di campo*

Nella spiegazione dei fenomeni ottici ed elettrici la meccanica di Newton ebbe di gran lunga minor successo di quanto ne ebbe nei campi di cui abbiamo parlato. È vero che Newton tentò di ricondurre la luce al movimento di punti materiali, nella sua teoria corpuscolare della luce. Più tardi, tuttavia, quando i fenomeni della polarizzazione, della diffrazione e dell'interferenza della luce costrinsero la sua teoria a modifiche sempre più innaturali, prevalse la teoria ondulatoria di Huyghens. Probabilmente questa teoria deve le sue origini essenzialmente ai fenomeni dell'ottica dei cristalli e all'acustica, che a quel tempo erano in certa misura già sviluppate. Bisogna riconoscere che anche la teoria di Huyghens era basata in prima istanza sulla meccanica classica; tuttavia, era necessario ammettere un etere onnipresente quale veicolo delle onde, e la struttura dell'etere, formato da

punti materiali, non poteva essere spiegata da alcun fenomeno conosciuto. Non era assolutamente possibile avere un'idea chiara delle forze interne governanti l'etere, né delle forze agenti tra l'etere e la materia «ponderabile». I fondamenti di questa teoria si trovavano, perciò, in una oscurità perpetua. Il fondamento reale consisteva in un'equazione alle derivate parziali, la cui riduzione a elementi meccanici restava sempre problematica.

Nella concezione teorica dei fenomeni elettromagnetici si introdussero, ancora una volta, delle masse di tipo particolare, e fra queste masse si ammise l'esistenza di forze agenti a distanza, simili alle forze gravitazionali di Newton. Questo tipo particolare di materia, tuttavia, era evidentemente privo della proprietà fondamentale dell'inerzia; e le forze agenti fra queste masse e la materia ponderabile restavano oscure. A queste difficoltà bisognava aggiungere il carattere polare di questo tipo di materia che non si adattava allo schema della meccanica classica. I fondamenti della teoria apparvero ancora più insoddisfacenti quando l'attenzione si spostò sui fenomeni elettrodinamici, nonostante questi ultimi fornissero al fisico la spiegazione dei fenomeni magnetici e in tale maniera rendessero superflua l'ipotesi delle masse magnetiche. A questo progresso, invero, corrispose una crescente complessità delle forze di interazione che si dovettero sopporre esistenti fra le masse elettriche in moto.

Il superamento di questa situazione reso possibile dalla teoria del campo elettrico di Faraday e Maxwell rappresenta probabilmente la più profonda trasformazione subita dai fondamenti della fisica dopo Newton. Ancora una volta si è trattato di un passo in avanti nella direzione della costruzione speculativa, che ha aumentato la distanza tra i fondamenti della teoria e ciò che si può sperimentare tramite i nostri cinque sensi. L'esistenza del campo si manifesta, invero, soltanto quando corpi elettricamente carichi vengono introdotti in esso. Le equazioni differenziali di Maxwell collegano le derivate spaziali e temporali dei campi elettrico e magnetico. Le masse elettriche non sono altro che punti in cui il campo elettrico possiede una divergenza non eliminabile. Le onde luminose appaiono come pro-