

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.