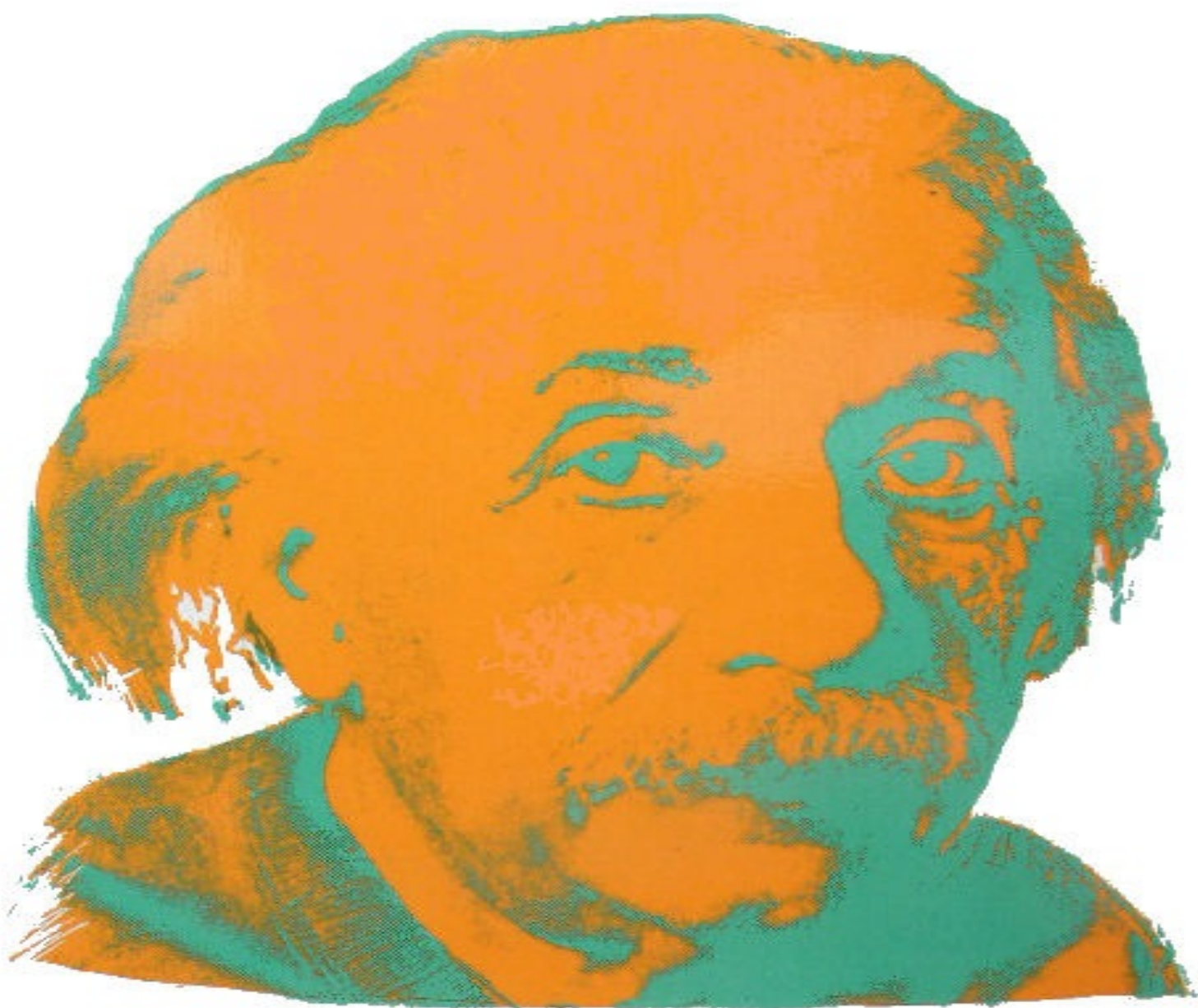


Einstein

come io vedo il mondo



UNIVERSALE TASCABILE NEWTON

Presentazione

Un uomo che ha attribuito nuove leggi fisiche all'universo, si interroga qui, non solo sulle premesse scientifiche d'un nuovo modo di concepire lo spazio e il tempo, ma anche sulle estreme conseguenze, sull'alternativa finale tra progresso e autodistruzione che oggi si pone ai popoli della terra.

Non vi è legge dell'universo che non possa essere modificata dall'esercizio della ragione, non vi è legge dei potenti che non possa essere sovvertita dal giusto desiderio dei popoli di vivere in pace e libertà.

© Giachini editore, Bologna
© 1975 Newton Compton editori, s.r.l.
Traduzione di R. Valori
Prima edizione: giugno 1979
© 1979 Newton editrice, s.r.l.
Roma, Casella postale 6214

Universale tascabile Newton
Pubblicazione quindicinale: 30 giugno 1979
Direttore responsabile G.A. Cibotto
Registrazione presso il Tribunale di Roma in corso di esecuzione
Stampato per conto della Newton editrice s.r.l. presso
la Tipografia Grafica, Perugia

Albert Einstein

come io vedo il mondo

Universale tascabile Newton

Albert Einstein nacque a Ulm (Württemberg) il 14 marzo 1879. Fece i primi studi a Monaco di Baviera nel ginnasio di Liutpold ed ebbe la prima educazione matematica da uno zio ingegnere.

Nel 1894, in seguito a un rovescio di fortuna, la famiglia Einstein lasciò la Germania e si trasferì in Italia dove il padre lavorò come elettrotecnico a Milano, a Pavia, a Isola della Scala e in altre località del Veneto. Il giovane Albert peregrinò fino a Genova dove emigrò in Svizzera e, fra non lievi difficoltà economiche, si iscrisse alla scuola cantonale di Aarau, dove conseguì il certificato di ammissione alla celebre scuola politecnica di Zurigo. Qui nel 1910 conseguì la laurea e l'abilitazione all'insegnamento della matematica e fisica. Nel 1911 ottenne la cittadinanza svizzera e si occupò come perito tecnico dell'ufficio federale dei brevetti di Berna.

Gli anni dal 1902 al 1909 rappresentano il periodo della sua più intensa produzione scientifica. La scoperta dei fondamenti della teoria speciale della relatività (relatività in senso stretto o dei moti multiformi e rettilinei) gli valse nel 1912 la nomina a professore ordinario di matematiche superiori nel Politecnico di Zurigo. Nel novembre 1913 ebbe una cattedra di fisica nell'accademia prussiana delle scienze in Berlino e nella primavera del 1914, succedendo a Enrico Van't Hoff, fu chiamato a dirigere il Kaiser-Weilhelm-Institut per la fisica.

Nel 1933 le persecuzioni politiche e razziali del nazismo indussero Einstein a lasciare l'Europa. Emigrò negli Stati Uniti d'America ed entrò a far parte dell'Institute for Advanced Studies di Princeton. A Princeton è morto nel 1955.

Albert Einstein ha dato alla fisica moderna il contributo di una creazione geniale che rimarrà nei secoli futuri una delle pietre miliari nella storia del pensiero umano. Nel 1905, con la memoria *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, gettò le basi della teoria speciale della relatività, fondata sulla costanza della velocità della luce nel vuoto quale limite superiore dell'osservabilità di qualsiasi fenomeno.

Uno dei risultati che Einstein aveva dedotto da questa teoria, e cioè che massa ed energia sono equivalenti, doveva avere quarant'anni dopo una terrificante conferma, con una forza di distruzione mai conosciuta: lo scoppio della prima bomba atomica. Pochi sanno che in questo avvenimento Einstein ebbe una parte fondamentale. Si deve al suo diretto intervento se il Presidente Roosevelt mise a disposizione i colossali capitali necessari per quelle ricerche che dovevano portare alla bomba di Hiroshima. Nel 1939 i fisici Fermi e Szilard erano pervenuti a importanti risultati nel campo della fisica atomica, in particolare nella disintegrazione dell'uranio, e avevano intuite le tremende possibilità derivanti dall'impiego della energia atomica per scopi bellici. Tuttavia essi sapevano che non sarebbero stati ascoltati a meno che la questione non venisse direttamente

presentata da un'alta personalità mondiale; Fermi e Szilard conferirono con Einstein. Einstein non desiderava immischiarsi in questioni militari, né tantomeno desiderava incoraggiare la costruzione dell'arma più terribile che fosse mai stata costruita dall'uomo. Tuttavia egli sapeva bene che se la Germania fosse giunta per prima in possesso dell'energia atomica, non avrebbe esitato ad usarla come strumento di dominazione del mondo. Pochi giorni dopo Einstein scriveva al Presidente Roosevelt: «Alcuni recenti lavori di E. Fermi e di L. Szilard, che mi furono presentati manoscritti, mi convincono che l'elemento uranio possa essere usato come nuova ed importante fonte di energia nel prossimo avvenire... Una sola bomba di questo tipo... che esplodesse in un porto... potrebbe assai facilmente distruggere l'intero porto insieme al territorio circostante».

Tralasciando i lavori, del resto notevoli, che egli ha compiuto sulla teoria dei moti browniani, sulla teoria statica dei campi gravitazionali, e il poderoso contributo apportato alla teoria dei quanti (si deve ad Einstein l'ipotesi del «fotone») ¹, non si può trascurare, per la sua immensa portata, l'ormai classica memoria apparsa nel 1916: *Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie*. Essa comprende una nuova teoria della gravitazione con le sue più brillanti conseguenze e previsioni: spiegazione dell'accelerazione secolare nei perielii dei pianeti; deflessione dei raggi luminosi in un campo gravitazionale; spostamento delle righe dello spettro verso il rosso ecc. Questa teoria doveva avere nel 1919 una clamorosa conferma dai fatti. Ed ecco come.

Nella sua teoria Einstein aveva predetto lo spostamento delle immagini stellari durante una eclissi totale di sole (deflessione dei raggi luminosi in un campo gravitazionale). Il 29 marzo 1919 si sarebbe verificata una eclissi totale di sole che poteva offrire favorevoli condizioni per la verifica della teoria di Einstein. La Royal Society e la Royal Astronomic Society di Londra incaricarono un comitato presieduto dall'illustre fisico Sir Arthur Eddington di fare i preparativi per una spedizione nella zona in cui il sole sarebbe apparso totalmente oscurato. Furono inviate due spedizioni in due punti molto lontani fra loro entro la zona di eclissi totale: una nel Sobral, nord del Brasile, l'altra nelle isole Principe, golfo di Guinea. Il 6 novembre 1919 la Royal Society e la Royal Astronomic Society annunciarono che i raggi di luce sono effettivamente deviati nel campo gravitazionale del sole e proprio nella quantità predetta dalla nuova teoria di Einstein. A. N. Whitehead, presente a quella seduta, racconta fra l'altro: «Fu per me una fortuna essere presente alla seduta della Royal Society a Londra quando l'Astronomer Royal annunciò che le lastre fotografiche della famosa eclissi, misurate dai suoi colleghi nell'osservatorio di Greenwich, avevano confermato la predizione di Einstein secondo la quale i raggi deviano passando vicino al sole. Vi era un'atmosfera di dramma greco. Noi eravamo il coro che commentava i decreti del destino, rivelati dallo svolgersi di avvenimenti eccezionali... sullo sfondo il ritratto di Newton a ricordarci che la più grande generalizzazione scientifica stava ora, dopo più di due secoli, per ricevere la prima modificazione... Una grande avventura del pensiero era giunta salva alla riva...»

In quel tempo era presidente della Royal Society Sir J. Thomson, il famoso fisico. Nell'aprire la seduta egli definì la teoria di Einstein «uno dei più grandi successi della storia del pensiero umano». E aggiunse: «Non è la scoperta di un'isola fuori mano, ma di un intero continente di nuove idee scientifiche».

Negli ultimi anni della sua vita Einstein lavorava a una «teoria generalizzata della gravitazione», tendente a legare in un'unica relazione le due teorie della relatività e dei quanti. Einstein avvertiva tuttavia: «A causa di difficoltà matematiche non ho ancora trovato il modo pratico di controllare i risultati della mia teoria con una dimostrazione sperimentale».

A conclusione di queste brevi considerazioni, vogliamo riportare il giudizio sull'opera di Einstein di un grande fisico francese, Louis de Broglie, cui si devono, fra l'altro, le idee nuove che stanno alla base della meccanica ondulatoria: «Per tutti gli uomini colti, siano essi o meno votati a qualche ramo della Scienza, il nome di Albert Einstein evoca lo sforzo intellettuale geniale, che capovolgendo i dati più tradizionali della fisica è riuscito a stabilire la relatività delle nozioni di spazio e di tempo, la inerzia dell'energia e l'interpretazione in qualche modo puramente geometrica delle forze di gravitazione. È infatti questa un'opera ammirevole, paragonabile alle più grandi opere che s'incontrano nella storia delle scienze, ad esempio quella di Newton; di per se stessa, basterebbe ad assicurare al suo autore una gloria imperitura».²

R. V.

COME IO VEDO IL MONDO

Se consideriamo la nostra esistenza e i nostri sforzi, rileviamo subito che tutte le nostre azioni e i nostri desideri sono legati all'esistenza degli altri uomini e che, per la nostra stessa natura, siamo simili agli animali che vivono in comunità. Ci nutriamo di alimenti prodotti da altri uomini, portiamo abiti fatti da altri, abitiamo case costruite dal lavoro altrui. La maggior parte di quanto sappiamo e crediamo ci è stata insegnata da altri per mezzo di una lingua che altri hanno creato. Senza la lingua la nostra facoltà di pensare sarebbe assai meschina e paragonabile a quella degli animali superiori; perciò la nostra priorità sugli animali consiste prima di tutto — bisogna confessarlo — nel nostro modo di vivere in società. L'individuo lasciato solo fin dalla nascita resterebbe, nei suoi pensieri e sentimenti, simile agli animali in misura assai difficile ad immaginare. Ciò che è e ciò che rappresenta l'individuo non lo è in quanto individuo, ma in quanto membro di una grande società umana che guida il suo essere materiale e morale dalla nascita fino alla morte.

Il valore di un uomo, per la comunità in cui vive, dipende anzitutto dalla misura in cui i suoi sentimenti, i suoi pensieri e le sue azioni contribuiscono allo sviluppo dell'esistenza degli altri individui.

Infatti abbiamo l'abitudine di giudicare un uomo cattivo o buono secondo questo punto di vista. Le qualità sociali di un uomo appaiono al primo incontro, le sole vevoli a determinare il nostro giudizio su di lui.

Eppure anche questa teoria non è rigorosamente esatta. Non è difficile comprendere che tutti i beni materiali, intellettuali e morali ricevuti dalla società sono giunti a noi nel corso di innumerevoli generazioni di individualità creatrici. Quello di oggi è un *individuo* che ha scoperto in un sol colpo l'uso del fuoco, un *individuo* che ha scoperto la coltura delle piante nutritive, un *individuo* che ha scoperto la macchina a vapore.

Libertà spirituale degli individui e unità sociale.

E tuttavia solo l'individuo libero può meditare e conseguentemente creare nuovi valori sociali e stabilire nuovi valori etici attraverso i quali la società si perfeziona. Senza personalità creatrici capaci di pensare e giudicare liberamente, lo sviluppo della società in senso progressivo è altrettanto poco immaginabile quanto lo sviluppo della personalità individuale senza l'ausilio vivificatore della società.

Una comunità sana è perciò legata tanto alla libertà degli individui quanto alla loro unione sociale. È stato detto con molta ragione che la civiltà greco - europeo - americana, e in particolare il rifiorire della cultura del Rinascimento italiano subentrato alla stasi del

Medio Evo in Europa, trovò soprattutto il suo fondamento nella libertà e nell'isolamento relativo dell'individuo.

Consideriamo ora la nostra epoca. In quali condizioni sono oggi la società e le personalità? In rapporto al passato la popolazione dei paesi civilizzati è estremamente densa; l'Europa ospita all'incirca una popolazione tre volte maggiore di quella di cento anni fa. Ma il numero di uomini dotati di temperamento geniale è diminuito senza proporzione. Solo un esiguo numero di uomini, per le loro facoltà creatrici, sono conosciuti dalle masse come personalità. In una certa misura l'organizzazione ha sostituito le qualità del genio nel campo della tecnica, ma anche, e in misura notevolissima, nel campo scientifico.

La penuria di personalità si fa sentire in modo particolare nel campo artistico. La pittura e la musica sono oggi nettamente degenerare e suscitano nel popolo echi assai meno intensi. La politica non manca solo di capi: l'indipendenza intellettuale e il sentimento del diritto si sono profondamente abbassati nella borghesia e l'organizzazione democratica e parlamentare che poggia su quella indipendenza è stata sconvolta in molti paesi; sono nate dittature e sono state sopportate perché il sentimento della dignità e del diritto non è più sufficientemente vivo.

Decadimento della dignità umana.

I giornali di un Paese possono, in due settimane, portare la folla cieca e ignorante a un tale stato di esasperazione e di eccitazione da indurre gli uomini ad indossare l'abito militare per uccidere e farsi uccidere allo scopo di permettere a ignoti affaristi di realizzare i loro ignobili piani. Il servizio militare obbligatorio mi sembra il sintomo più vergognoso della mancanza di dignità personale di cui soffre oggi la nostra umanità civilizzata. In relazione a questo stato di cose non mancano profeti che prevedono prossimo il crollo della nostra civiltà. Io non sono nel numero di questi pessimisti: io credo in un avvenire migliore.

Il sistema economico ostacola la libera evoluzione.

A mio avviso l'attuale decadenza sociale dipende dal fatto che lo sviluppo dell'economia e della tecnica ha gravemente esacerbato la lotta per l'esistenza e quindi la libera evoluzione degli individui ha subito durissimi colpi. Ma per soddisfare i bisogni della comunità, il progresso della tecnica esige oggi dagli individui un'attività assai minore. La divisione razionale del lavoro diverrà una necessità sempre più imperiosa e porterà alla sicurezza materiale degli uomini. E questa sicurezza unita al tempo e all'energia che resterà disponibile, può essere un elemento favorevole allo sviluppo della personalità. In questo modo la società può ancora guarire e noi vogliamo sperare che gli

storici futuri presenteranno le manifestazioni patologiche del nostro tempo come le malattie infantili di una umanità dalle possenti aspirazioni, provocate dalla corsa troppo rapida della civiltà.

Valore sociale della ricchezza.

Sono fermamente convinto che tutte le ricchezze del mondo non potrebbero spingere l'umanità più avanti anche se esse si trovassero nelle mani di un uomo totalmente consacrato all'evoluzione del genere umano. Solo l'esempio di personalità grandi e pure può condurre a nobili pensieri e ad elette azioni. Il denaro suscita soltanto egoismo e spinge sempre, irresistibilmente, a farne cattivo uso.

Si possono immaginare Mosè, Gesù o Gandhi armati della borsa di Carnegie?

Perché viviamo.

Ben singolare è la situazione di noi altri mortali. Ognuno di noi è su questa terra per una breve visita; egli non sa il perché, ma assai spesso crede di averlo capito. Non si riflette profondamente e ci si limita a considerare un aspetto della vita quotidiana; siamo qui per gli altri uomini: anzitutto per coloro dal cui sorriso e dal cui benessere dipende la nostra felicità, ma anche per quella moltitudine di sconosciuti alla cui sorte ci incatena un vincolo di simpatia. Ecco il mio costante pensiero di ogni giorno: la vita esteriore ed interiore dipende dal lavoro dei contemporanei e da quello dei predecessori; io devo sforzarmi di dar loro, in eguale misura, ciò che ho ritenuto e ciò che ancora ricevo. Sento il bisogno di condurre una vita semplice e ho spesso la penosa consapevolezza di chiedere all'attività dei miei simili più di quanto non sia necessario. Mi rendo conto che le differenze di classe sociale non sono giustificate e che, in fin dei conti, trovano il loro fondamento nella violenza; ma credo anche che una vita modesta sia adatta a chiunque, per il corpo e per lo spirito.

Limiti della nostra libertà.

Non credo affatto alla libertà dell'uomo nel senso filosofico della parola. Ciascuno agisce non soltanto sotto l'impulso di un imperativo esteriore, ma anche secondo una necessità interiore. L'aforisma di Schopenhauer: «È certo che un uomo può fare ciò che vuole, ma non può volere che ciò che vuole» mi ha vivamente impressionato fin dalla giovinezza; nel turbine di avvenimenti e di prove imposte dalla durezza della vita, quelle parole sono sempre state per me un conforto e una sorgente inesauribile di tolleranza. Aver coscienza di ciò contribuisce ad addolcire il senso di responsabilità che facilmente ci

mortifica e ci evita di prendere troppo sul serio noi come gli altri; si è condotti così a una concezione della vita che lascia un posto singolare all'*humour*.

Il benessere e la felicità.

Da un punto di vista obiettivo, preoccuparsi del senso o del fine della nostra esistenza e di quella delle altre creature mi è sempre parso assolutamente vuoto di significato.

Ciononostante ogni uomo è legato ad alcuni ideali che gli servono di guida nell'azione e nel pensiero. In questo senso il benessere e la felicità non mi sono mai apparsi come la meta assoluta (questa base della morale la definisco l'ideale dei porci). Gli ideali che hanno illuminato la mia strada e mi hanno dato costantemente un coraggio gagliardo sono stati il bene, la bellezza e la verità. Senza la coscienza di essere in armonia con coloro che condividono le mie convinzioni, senza la affannosa ricerca del giusto, eternamente inafferrabile, del dominio dell'arte e della ricerca scientifica, la vita mi sarebbe parsa assolutamente vuota. Fin dai miei anni giovanili ho sempre considerato spregevoli le mete volgari alle quali l'umanità indirizza i suoi sforzi: il possesso di beni, il successo apparente e il lusso.

Un cavallo che tira da solo.

In singolare contrasto col mio senso ardente di giustizia e di dovere sociale, non ho mai sentito la necessità di avvicinarmi agli uomini e alla società in generale. Sono proprio un cavallo che vuol tirare da solo; mai mi sono dato pienamente né allo stato, né alla terra natale, né agli amici e neppure ai congiunti più prossimi; anzi ho sempre avuto di fronte a questi legami la sensazione netta di essere un estraneo e ho sempre sentito il bisogno di solitudine; e questa sensazione non fa che aumentare con gli anni.

Sento fortemente, ma senza rimpianto, di toccare il limite dell'intesa e dell'armonia con il prossimo. Certo, un uomo di questo carattere perde così una parte del suo candore e della sua serenità, ma ci guadagna una larga indipendenza rispetto alle opinioni, abitudini e giudizi dei suoi simili; né sarà tentato di stabilire il suo equilibrio su basi così malferme.

Ciascuno deve essere rispettato.

Il mio ideale politico è l'ideale democratico. Ciascuno deve essere rispettato nella sua personalità e nessuno deve essere idolatrato. Per me l'elemento prezioso nell'ingranaggio dell'umanità non è lo Stato, ma è l'individuo creatore e sensibile, è insomma la personalità; è questa sola che crea il nobile e il sublime, mentre la massa è stolidità nel pensiero e limitata nei suoi sentimenti.

La guerra.

Questo argomento mi induce a parlare della peggiore fra le creazioni, quella delle masse armate, del regime militare voglio dire, che odio con tutto il cuore. Disprezzo profondamente chi è felice di marciare nei ranghi e nelle formazioni al seguito di una musica: costui solo per errore ha ricevuto un cervello; un midollo spinale gli sarebbe più che sufficiente. Bisogna sopprimere questa vergogna della civiltà il più rapidamente possibile. L'eroismo comandato, gli stupidi corpo a corpo, il nefasto spirito nazionalista, come odio tutto questo! E quanto la guerra mi appare ignobile e spregevole! Sarei piuttosto disposto a farmi tagliare a pezzi che partecipare a una azione così miserabile. *Eppure, nonostante tutto, io stimo tanto l'umanità da essere persuaso che questo fantasma malefico sarebbe da lungo tempo scomparso se il buonsenso dei popoli non fosse sistematicamente corrotto, per mezzo della scuola e della stampa, dagli speculatori del mondo politico e del mondo degli affari.*

Significato della vita.

Qual è il senso della nostra esistenza, qual è il significato dell'esistenza di tutti gli esseri viventi in generale? Il saper rispondere a una siffatta domanda significa avere sentimenti religiosi. Voi direte: ma ha dunque un senso porre questa domanda. Io vi rispondo: chiunque crede che la sua propria vita e quella dei suoi simili sia priva di significato è non soltanto infelice, ma appena capace di vivere.

Religiosità cosmica.

La più bella sensazione è il lato misterioso della vita. È il sentimento profondo che si trova sempre nella culla dell'arte e della scienza pura. Chi non è più in grado di provare né stupore né sorpresa è per così dire morto; i suoi occhi sono spenti. L'impressione del misterioso, sia pure misto a timore, ha suscitato, tra l'altro, la religione. Sapere che esiste qualcosa di impenetrabile, conoscere le manifestazioni dell'intelletto più profondo e della bellezza più luminosa, che sono accessibili alla nostra ragione solo nelle forme più primitive, questa conoscenza e questo sentimento, ecco la vera devozione: in questo senso, e soltanto in questo senso, io sono fra gli uomini più profondamente religiosi. Non posso immaginarmi un Dio che ricompensa e che punisce l'oggetto della sua creazione, un Dio che soprattutto esercita la sua volontà nello stesso modo con cui l'esercitiamo su noi stessi. Non voglio e non posso figurarmi un individuo che sopravviva alla sua morte corporale: quante anime deboli, per paura e per egoismo ridicolo, si nutrono di simili idee! Mi basta sentire il mistero dell'eternità della vita, avere la coscienza e l'intuizione di ciò che è, lottare attivamente per afferrare una particella, anche piccolissima, dell'intelligenza che si manifesta nella natura.

Difficilmente troverete uno spirito profondo nell'indagine scientifica senza una sua caratteristica religiosità. Ma questa religiosità si distingue da quella dell'uomo semplice: per quest'ultimo Dio è un essere da cui spera protezione e di cui teme il castigo, un essere col quale corrono, in una certa misura, relazioni personali per quanto rispettose esse siano: è un sentimento elevato della stessa natura dei rapporti fra figlio e padre.

Le basi umane della morale.

Al contrario, il sapiente è compenetrato dal senso della causalità per tutto ciò che avviene. Per lui l'avvenire non comporta una minore decisione e un minore impegno del passato; la morale non ha nulla di divino, è una questione puramente umana. La sua religiosità consiste nell'ammirazione estasiata delle leggi della natura; gli si rivela una mente così superiore che tutta l'intelligenza messa dagli uomini nei loro pensieri non è al cospetto di essa che un riflesso assolutamente nullo. Questo sentimento è il *leit-motiv* della vita e degli sforzi dello scienziato nella misura in cui può affrancarsi dalla tirannia dei suoi egoistici desideri. Indubbiamente questo sentimento è parente assai prossimo di quello che hanno provato le menti creatrici religiose di tutti i tempi.

Tutto ciò che è fatto e immaginato dagli uomini serve a soddisfare i loro bisogni e a placare i loro dolori. Bisogna sempre tener presente allo spirito questa verità se si vogliono comprendere i movimenti intellettuali e il loro sviluppo perché i sentimenti e le aspirazioni sono i motori di ogni sforzo e di ogni creazione umana, per quanto sublime possa apparire questa creazione. Quali sono dunque i bisogni e i sentimenti che hanno portato l'uomo all'idea e alla fede, nel significato più esteso di queste parole? Se riflettiamo a questa domanda vediamo subito che all'origine del pensiero e della vita religiosa si trovano i sentimenti più diversi. Nell'uomo primitivo è in primo luogo la paura che suscita l'idea religiosa; paura della fame, delle bestie feroci, delle malattie, della morte. Siccome, in questo stato inferiore, le idee sulle relazioni causali sono di regola assai limitate, lo spirito umano immagina esseri più o meno analoghi a noi dalla cui volontà e dalla cui azione dipendono gli eventi avversi e temibili e crede di poter disporre favorevolmente di questi esseri con azioni e offerte, le quali, secondo la fede tramandata di tempo in tempo, devono placarli e renderli benigni. *E in questo senso io chiamo questa religione la religione del terrore; la quale, se non creata, è stata almeno rafforzata e resa stabile dal formarsi di una casta sacerdotale particolare che si dice intermediaria fra questi esseri temuti e il popolo e fonda su questo privilegio la sua posizione dominante.* Spesso il re o il capo dello stato, che trae la sua autorità da altri fattori, o anche da una classe privilegiata, unisce alla sua sovranità le funzioni sacerdotali per dare maggior fermezza al regime esistente; oppure si determina una comunanza d'interessi fra la casta che detiene il potere politico e la casta sacerdotale.

C'è un'altra origine dell'organizzazione religiosa: i sentimenti sociali. Il padre e la madre capi delle grandi comunità umane, sono mortali e fallibili. L'aspirazione ardente all'amore, al sostegno, alla guida, genera l'idea divina sociale e morale. E il Dio-Providenza che protegge, fa agire, ricompensa e punisce. E quel Dio che, secondo l'orizzonte dell'uomo, ama e incoraggia la vita della tribù, l'umanità e la vita stessa; quel Dio consolatore nelle sciagure e nelle speranze deluse, protettore delle anime dei trapassati. Tale è l'idea di Dio considerata sotto l'aspetto morale e sociale.

Nelle Sacre Scritture del popolo ebreo si può seguire bene l'evoluzione della religione del terrore in religione morale che poi continua nel Nuovo Testamento. Le religioni di tutti i popoli civili, e in particolare anche dei popoli orientali, sono essenzialmente religioni morali. Il passaggio dalla religione-terrore alla religione morale costituisce un progresso importante nella vita dei popoli. *Bisogna guardarsi dal pregiudizio che consiste nel credere che le religioni delle razze primitive sono unicamente religioni-*

terrore e quelle dei popoli civili unicamente religioni morali. Ogni religione è in fondo un miscuglio dell'una e dell'altra con una percentuale maggiore tuttavia di religione morale nei gradi più elevati della vita sociale.

Iddii di forma umana.

Tutte queste religioni hanno comunque un punto comune, ed è il carattere antropomorfo dell'idea di Dio: oltre questo livello non si trovano che individualità particolarmente nobili. *Ma in ogni caso vi è ancora un terzo grado della vita religiosa, sebbene assai raro nella sua espressione pura ed è quello della religiosità cosmica. Essa non può essere pienamente compresa da chi non la sente poiché non vi corrisponde nessuna idea di un Dio antropomorfo.*

L'individuo è cosciente della vanità delle aspirazioni e degli obiettivi umani e, per contro, riconosce l'impronta sublime e l'ordine ammirabile che si manifestano tanto nella natura quanto nel mondo del pensiero. L'esistenza individuale gli dà l'impressione di una prigione e vuol vivere nella piena conoscenza di tutto ciò che è, nella sua unità universale e nel suo senso profondo. Già nei primi gradi dell'evoluzione della religione (per esempio in parecchi salmi di David e in qualche Profeta), si trovano i primi indizi della religione cosmica; ma gli elementi di questa religione sono più forti nel buddismo, come abbiamo imparato in particolare dagli scritti ammirabili di Schopenhauer.

La religiosità cosmica non conosce dogmi.

I geni religiosi di tutti i tempi risentono di questa religiosità cosmica che non conosce né dogmi né Dei concepiti secondo l'immagine dell'uomo. Non vi è perciò alcuna Chiesa che basi il suo insegnamento fondamentale sulla religione cosmica. Accade di conseguenza che è precisamente fra gli eretici di tutti i tempi che troviamo uomini penetrati di questa religiosità superiore e che furono considerati dai loro contemporanei più spesso come atei, ma sovente anche come santi.

Democrito, Francesco d'Assisi e Spinoza stanno vicini.

Sotto questo aspetto uomini come Democrito, Francesco d'Assisi e Spinoza possono stare l'uno vicino all'altro.

Come può la religiosità cosmica comunicarsi da uomo a uomo, se non conduce ad alcuna idea formale di Dio né ad alcuna teoria? Mi pare che sia precisamente la funzione capitale dell'arte e della scienza di risvegliare e mantenere vivo questo sentimento fra coloro che hanno la facoltà di raccoglierlo.

Antagonismo tra religione del terrore e scienza.

Giungiamo così a una concezione dei rapporti fra scienza e religione assai differente dalla concezione abituale. Secondo considerazioni storiche, si è propensi a ritenere scienza e religione antagonisti inconciliabili, e questo si comprende facilmente. L'uomo che crede nelle leggi causali, arbitro di tutti gli avvenimenti, se prende sul serio l'ipotesi della causalità, non può concepire l'idea di un Essere che interviene nelle vicende umane, e perciò la religione-terrore, come la religione sociale o morale, non ha presso di lui alcun credito; un Dio che ricompensa e che punisce è per lui inconcepibile perché l'uomo agisce secondo leggi esteriori ineluttabili e per conseguenza non potrebbe essere responsabile verso Dio, allo stesso modo che un oggetto inanimato non è responsabile dei suoi movimenti. A torto si è rimproverato alla scienza di insidiare la morale. La condotta etica dell'uomo deve basarsi effettivamente sulla compassione, la educazione e i legami sociali, senza ricorrere ad alcun principio religioso. Gli uomini sarebbero da compiangere se dovessero essere frenati dal timore di un castigo o dalla speranza di una ricompensa dopo la morte. Si capisce quindi perché la Chiesa abbia in ogni tempo combattuto la scienza e perseguitato i suoi adepti.

Mirabile accordo tra religione cosmica e scienza.

D'altra parte io sostengo che la religione cosmica è l'impulso più potente e più nobile alla ricerca scientifica. Solo colui che può valutare gli sforzi e soprattutto i sacrifici immani per arrivare a quelle scoperte scientifiche che schiudono nuove vie, è in grado di rendersi conto della forza del sentimento che solo può suscitare un'opera tale, libera da ogni vincolo con la via pratica immediata. Quale gioia profonda a cospetto dell'edificio del mondo e quale ardente desiderio di conoscere - sia pure limitato a qualche debole raggio dello splendore rivelato dall'ordine mirabile dell'universo - dovevano possedere Kepler e Newton per aver potuto, in un solitario lavoro di lunghi anni svelare il meccanismo celeste! Colui che non conosce la ricerca scientifica che attraverso i suoi effetti pratici, non può assolutamente formarsi un'opinione adeguata sullo stato d'animo di questi uomini i quali, circondati da contemporanei scettici, aprirono la via a quanti compresi delle loro idee, si sparsero poi di secolo in secolo attraverso tutti i paesi del mondo. Soltanto colui che ha consacrato la propria vita a propositi analoghi può formarsi una immagine viva di ciò che ha animato questi uomini e di ciò che ha dato loro la forza di restare fedeli al loro obiettivo nonostante gli insuccessi innumerevoli. È la religiosità cosmica che prodiga simili forze. Non è senza ragione che un autore contemporaneo ha detto che nella nostra epoca, votata in generale al materialismo, gli scienziati sono i soli uomini profondamente religiosi.

Elevare gli uomini.

È giusto, in linea di principio, dare solenne testimonianza d'affetto a coloro che hanno contribuito maggiormente a nobilitare gli uomini, l'esistenza umana. Ma se si vuole anche indagare sulla natura di essi, allora si incontrano notevoli difficoltà. Per quanto riguarda i capi politici, e anche religiosi, è spesso molto difficile stabilire se costoro hanno fatto più bene che male. Di conseguenza credo sinceramente che indirizzare gli uomini alla cultura di nobili discipline e poi indirettamente elevarli, sia il servizio migliore che si possa rendere all'umanità. Questo metodo trova conferma, in primo luogo, nei cultori delle lettere, della filosofia e delle arti, ma anche, dopo di essi, negli scienziati. Non sono, è vero, i *risultati* delle loro ricerche che elevano e arricchiscono moralmente gli uomini, ma è il loro sforzo per capire, è il loro lavoro intellettuale fecondo e capace.

Il *vero valore di un uomo* si determina esaminando in quale misura e in che senso egli è giunto a liberarsi dall'io.

Pace.

Gli uomini veramente superiori delle generazioni passate hanno riconosciuto l'importanza degli sforzi per assicurare la pace internazionale. Ma ai nostri tempi lo sviluppo della tecnica ha fatto di questo postulato etico una questione di esistenza per l'umanità civilizzata di oggi - e la partecipazione attiva alla soluzione del problema della pace è considerata una questione di coscienza che nessun uomo coscienzioso può ignorare.

Bisogna rendersi conto che i potenti gruppi industriali interessati alla fabbricazione delle armi sono, in tutti i paesi, contrari al regolamento pacifico delle controversie internazionali e che i governanti non potranno realizzare questo scopo importante senza l'appoggio energico della maggioranza della popolazione. In quest'epoca di regimi democratici, la sorte dei popoli dipende dai popoli stessi; questo fatto deve essere presente allo spirito di ciascuno in ogni momento.

L'Internazionale della scienza.

Allorquando durante la guerra l'accecamento nazionalista e politico raggiunse il suo apice, Emilio Fischer, il famoso chimico, nel corso di una seduta all'accademia, pronunciò con energia le parole seguenti: "Voi non potete far nulla, signori, la scienza è e rimane internazionale...". E questo i grandi fra gli uomini della scienza lo hanno sempre saputo e sentito appassionatamente, anche se nei periodi di complicazioni politiche restavano isolati in mezzo ai loro colleghi di piccolo ingegno. La folla che dispone del diritto di voto ha, durante la guerra e in tutti i campi, tradito il bene inviolabile che le era stato affidato.

L'associazione internazionale delle Accademie è stata sciolta. I congressi sono stati e sono ancora organizzati con l'esclusione di colleghi di Paesi ex nemici. Talune considerazioni politiche, prospettate con molta importanza, impediscono l'affermarsi di punti di vista puramente obiettivi, il che è tuttavia indispensabile per conseguire risultati elevati.

Che possono fare gli uomini di buona volontà, coloro che non si abbandonano alle tentazioni passionali del momento, per riconquistare ciò che è andato perduto? I congressi veramente internazionali e di grande portata non possono ancora, a cagione dell'attuale turbamento, accogliere la maggior parte dei lavoratori intellettuali e le resistenze di ordine psicologico che si oppongono al ristabilimento delle associazioni scientifiche internazionali sono ancora troppo potenti per poter essere vinte da quella minoranza animata da punti di vista e da sentimenti superiori a queste contingenze. Coloro che fanno parte di questa minoranza possono contribuire al ristabilimento delle comunità internazionali mantenendo strette relazioni con gli scienziati degli altri paesi che pensano come loro e intervenendo con tenacia nel loro proprio cerchio d'azione in favore degli interessi internazionali. Il successo in grande si farà attendere ma verrà sicuramente. Non voglio lasciarmi sfuggire questa occasione senza mettere in rilievo, con grande piacere, l'azione singolare di un numero notevole di colleghi inglesi che hanno manifestato attivamente, durante questi anni dolorosi, aspirazioni per il mantenimento della comunità intellettuale.

Dovunque le dichiarazioni ufficiali sono peggiori dell'opinione dell'individuo. Questi benpensanti non devono dimenticarlo, né devono lasciarsi irritare o indurre in errore: «*Senatores boni viri, senatus autem bestia*».

Se sono pieno di speranza e di fiducia per quanto riguarda l'organizzazione internazionale generale, questa speranza, più che sul giudizio e sulla nobiltà nel sentimento, si basa sulla pressione imperiosa dello sviluppo economico. E poiché questo deriva largamente dal lavoro intellettuale, compreso quello degli scienziati dalle idee reazionarie, questi ultimi contribuiranno, anche loro malgrado, a creare l'organizzazione internazionale.

Il nostro continente potrà raggiungere una nuova prosperità soltanto se la lotta latente fra le forme tradizionali di Stato viene a cessare. La organizzazione politica dell'Europa deve essere decisamente orientata verso l'eliminazione delle scomode barriere doganali. Questo scopo superiore non potrebbe essere raggiunto esclusivamente attraverso convenzioni fra Stati. La preliminare preparazione degli spiriti è, prima di tutto, indispensabile. Noi dobbiamo sforzarci di svegliare gradualmente fra gli uomini un sentimento di solidarietà che non s'arresti, come è accaduto fino ad oggi, alle frontiere degli Stati. È una missione difficile: perché bisogna confessare, con mio grande rammarico, che, almeno nei Paesi che mi sono più noti, gli scienziati e gli artisti si lasciano condurre più volentieri dalle meschine tendenze nazionali che gli uomini di azione.

Verità scientifica e no.

1. Non è facile definire chiaramente il termine "verità scientifica": del pari, il senso della parola "verità" è diverso a seconda che si riferisca a fatti psicologici, a una proporzione matematica o a una teoria di scienza naturale. Ma non posso proprio farmi un'idea chiara di ciò che s'intende per "verità religiosa".
2. La ricerca scientifica può diminuire la superstizione incoraggiando il ragionamento e l'esplorazione causale. È certo che alla base di ogni lavoro scientifico un po' delicato si trova la convinzione, analoga al sentimento religioso, che il mondo è fondato sulla ragione e può essere compreso.
3. Questa convinzione legata al sentimento profondo della esistenza di una mente superiore che si manifesta nel mondo della esperienza, costituisce per me l'idea di Dio; in linguaggio corrente si può chiamarla «panteismo» (Spinoza).
4. Non posso considerare le tradizioni confessionali che da un punto di vista storico e psicologico: non ho altri rapporti con esse.

I fondamenti della ricerca.

Quale varietà di stili nel tempio della scienza! E come diversi sono gli uomini che lo frequentano e diverse le forze morali che ve li hanno condotti! Più di uno si dedica alla scienza con la gioia di rendersi conto delle proprie superiori facoltà intellettuali: per lui la scienza è lo sport preferito che gli permette di vivere un vita intensa e di appagare le sue ambizioni. Ve ne sono anche molti i quali, unicamente allo scopo utilitario, vogliono portare la loro offerta alla effervescenza del cervello. Basterebbe che un angelo divino cacciasse dal tempio gli uomini di queste due categorie e l'edificio rimarrebbe vuoto in modo inquietante, se non vi restassero ancora alcuni uomini del passato e del presente: di questo numero fa parte il nostro Planck ed è questa la ragione per cui lo amiamo.

Io so bene che in tal modo avremmo, a cuor leggero, cacciato dal tempio alcuni uomini che ne hanno costruito una grande parte, forse la più grande: per molti la decisione presa sarebbe probabilmente apparsa amara allo stesso angelo del cielo. Ma una sola cosa mi pare certa: se non vi fossero stati che uomini di quella categoria il tempio non avrebbe potuto elevarsi, allo stesso modo che alcune piante rampicanti non potrebbero, da sole, dar vita a una foresta. In verità per questi uomini è sufficiente un posto qualsiasi nell'attività umana: saranno le circostanze esterne a decidere se saranno ingegneri,

ufficiali, commercianti o scienziati. Ma volgiamo ora il nostro sguardo a coloro che hanno trovato grazia dall'angelo: qui vediamo individui per la più parte singolari, chiusi, isolati, i quali, nonostante questi caratteri in comune, si rassomigliano in fondo fra loro assai meno di quelli che sono estromessi. Quale impulso li ha condotti al tempio? La risposta non è facile e non può certo valere ugualmente per tutti. Io credo con Schopenhauer che l'impulso più potente che li spinge verso l'arte e la scienza è il desiderio di evadere dalla vita d'ogni giorno con la sua dolorosa crudezza e il suo vuoto senza speranza di sfuggire alle catene dei desideri individuali più sensibili fuori del loro io individuale, verso il mondo della contemplazione e del giudizio obiettivo. Questo impulso è paragonabile al desiderio ardente che attira irresistibilmente i cittadini fuori dal loro ambiente bruciante e confuso verso le placide regioni d'alta montagna, dove lo sguardo si perde dolcemente lontano attraverso la calma e la purezza dell'atmosfera e accarezza contorni riposanti che sembrano creati per l'eternità. Ma a questo movente se ne aggiunge un altro positivo. L'uomo cerca, in maniera adeguata alle sue esigenze, di formarsi un'immagine del mondo, chiara e semplice, e di trionfare così sul mondo della esistenza sforzandosi di rimpiazzarlo, in una certa misura, con questa immagine. È così che agiscono, ciascuno a suo modo, il pittore, il poeta, il filosofo speculativo, il naturalista. Di questa immagine e della sua conformazione, egli fa il centro di gravità della sua vita sentimentale allo scopo di cercarsi la calma e la solidità che gli sfuggono nel cerchio troppo stretto della sua esistenza personale e vorticoso.

Fra tutte queste possibili immagini del mondo qual è la posizione occupata da quella che crea il fisico teorico? Questa immagine comporta le esigenze più severe in merito al rigore e all'esattezza di rappresentazione dei rapporti reciproci, come soltanto si può avere utilizzando il linguaggio matematico. Ma, per contro, il fisico deve rassegnarsi a questo, tanto più categoricamente quanto più deve accontentarsi di rappresentare i fenomeni più semplici, quelli che si possono rendere percepibili dai nostri sensi, mentre tutti i fenomeni più complessi non possono essere ricostruiti dallo spirito umano con quella precisione e quello spirito di coerenza sottile invocato dal fisico teorico. L'estrema nitidezza, chiarezza, certezza, non si ottengono che a spese dell'incertezza. Ma quale attrattiva può dunque avere il fatto di afferrare esattamente una parte così piccola della natura, lasciando da parte, con timidezza e senza coraggio, tutto ciò che è più complicato e più delicato? Il risultato di uno sforzo così rassegnato merita questo nome di fierezza, la "Immagine del mondo"?

Si! Io credo che questo nome è meritato perché se le leggi generali, che servono di base alle costruzioni del pensiero del fisico teorico, hanno la pretesa di essere valide per tutti gli avvenimenti di deduzioni rigorosamente logiche, si dovrebbe giungere a dare un'immagine rigorosamente esatta, vale a dire una teoria, dei fenomeni naturali, ivi compresi quelli della vita, se questo processo di deduzione non superasse di gran lunga la capacità del cervello umano. Non si rinuncia dunque interamente e per principio all'interessa dell'immagine fisica del mondo.

La missione più alta del fisico è dunque la ricerca di queste leggi elementari, le più generali, dalle quali si parte per raggiungere, attraverso semplici deduzioni, la immagine del mondo. Nessun cammino logico conduce a queste leggi elementari: l'intuizione sola,

fondata sull'esperienza, ci può condurre ad esse. Questa incertezza nel metodo da seguire potrebbe far credere che sarebbe possibile stabilire a volontà un gran numero di sistemi di fisica teorica di valore equivalente: anche *come principio* questa opinione è certamente fondata. Ma lo sviluppo della questione ha mostrato che, di tutte le costruzioni immaginabili, una sola per il momento si è manifestata come assolutamente superiore a tutte le altre. Nessuno di coloro che hanno approfondito realmente il problema saprebbe negare che il mondo delle osservazioni determina praticamente, senza ambiguità, il sistema teorico e che, ciò nondimeno, ogni via della logica apporta dati di osservazione ai principi della teoria: è ciò che Leibniz ha così felicemente chiamato l'armonia «prestabilita». È precisamente per non aver tenuto sufficiente conto di questa circostanza che i fisici hanno fatto un duro rimprovero a molti teorici della conoscenza. Ed è anche in questo che mi pare di individuare le origini della polemica di qualche anno fa fra Mach e Planck.

Il desiderio ardente di una visione di questa armonia prestabilita è la fonte della perseveranza e della pazienza inesauribile con la quale vediamo Planck dedicarsi ai problemi più generali della nostra scienza senza lasciarsi distogliere da mete più facilmente raggiungibili e più utilitarie. Ho sovente inteso dire che alcuni colleghi attribuivano questo modo di agire a una energia, a una disciplina straordinarie! Credo che abbiano del tutto torto. Lo stato sentimentale che rende idoneo a simili azioni rassomiglia a quello dei religiosi o degli amanti: lo sforzo giornaliero non deriva da un calcolo o da un programma, ma da un bisogno immediato. Vedo a questo punto il nostro caro Planck che ride fra sé per l'uso infantile che faccio della lanterna di Diogene. La nostra simpatia per lui non ha bisogno di appoggiarsi a fragili argomenti. Possa l'amore per la scienza abbellire la sua vita anche in avvenire e condurlo alla soluzione di quel problema importantissimo della fisica che egli stesso ha posto e potentemente sviluppato: possa egli riuscire a unire la teoria dei quanti all'elettrodinamica e alla meccanica, in un sistema costituente logicamente un tutto.

Planck ha dimostrato che per stabilire una legge sull'irradiazione termico concordante con l'esperienza, bisogna utilizzare un metodo di calcolo la cui incompatibilità con i principi della meccanica classica diventa sempre più evidente. Grazie a questo metodo, Planck ha introdotto nella fisica l'ipotesi dei quanti che, in seguito, è stata oggetto di verifiche brillanti. Con questa ipotesi dei quanti, egli ha capovolto la meccanica classica, nel caso in cui masse sufficientemente piccole si spostano con velocità che toccano valori assai piccoli e accelerazioni sufficientemente grandi. Di modo che oggi non possiamo più considerare valide le leggi del movimento di Galileo e di Newton se non come leggi-limite. Tuttavia, nonostante gli sforzi più tenaci dei teorici, non si è potuto fino ad oggi pervenire a sostituire i principi della meccanica con altri che corrispondano alla legge dell'irradiazione termico di Planck, o all'ipotesi dei quanti. Benché non esista più alcun dubbio che abbiamo ricondotto il calore a un movimento molecolare, nondimeno dobbiamo confessare che noi ci troviamo oggi da vanti alle leggi fondamentali di questo movimento nella stessa situazione degli astronomi prima di Newton davanti ai movimenti dei pianeti.

Ho fatto allusione a un insieme di fatti nello studio teorico dei quali i principi vengono meno. Si può egualmente presentare il caso in cui principi nettamente formulati conducano a conseguenze che escono totalmente o quasi totalmente dai limiti del dominio dei fatti attualmente accessibili alla nostra esperienza. Può darsi, in questo caso, che un lavoro di ricerche empiriche di lunghi anni sia necessario per sapere se i principi corrispondono alla teoria della realtà. La teoria della relatività ce ne offre un esempio.

L'analisi delle idee fondamentali di tempo e di spazio ci ha mostrato che il teorema della costanza della velocità della luce nel vuoto, che si deduce dall'ottica dei corpi in movimento, non ci costringe affatto ad accettare la teoria generale che tiene conto della circostanza che, nelle esperienze eseguite sulla terra, non notiamo mai nulla del movimento di traslazione terrestre. Si fa uso, in questo caso, del principio di relatività che dice: le leggi naturali non cambiano di forma, quando si passa dal sistema iniziale di coordinate (riconosciuto corretto) a un nuovo sistema concepito come animato da un movimento di traslazione uniforme in rapporto a se stesso. Questa teoria ha già ricevuto dall'esperienza verifiche notevoli e ha condotto, in unione con il complesso dei fatti raccolti, a una semplificazione della rappresentazione teorica.

Ma, d'altra parte, dal punto di vista teorico, questa teoria non dà intera soddisfazione, perché il principio della relatività sopra enunciato dà la preferenza al movimento *uniforme*. Se è vero che partendo dal punto di vista fisico non si può attribuire un senso assoluto al movimento uniforme, la questione di sapere se questa affermazione deve estendersi egualmente ai movimenti non uniformi, sorge spontanea. È stato provato che

se si prende come base il principio di relatività esteso in questo senso, si ottiene una estensione molto caratterizzata della teoria di relatività e si è condotti così a una teoria generale della gravitazione, comprendente la dinamica.

Abbiamo stabilito che la fisica induttiva pone delle questioni alla fisica deduttiva e viceversa e che la risposta a queste questioni esige la tensione di tutti gli sforzi.

Se volete imparare qualche cosa dai fisici teorici sui metodi che essi impiegano, vi consiglio di osservare questo principio: non ascoltate i loro discorsi, ma attenetevi alle loro azioni. Perché a colui che crea, i prodotti della propria immaginazione sembrano così necessari e naturali che non considera, e non vorrebbe che fossero considerati, come invenzioni del pensiero, ma come realtà concrete.

Queste parole sembrano fatte apposta per indurvi ad abbandonare quest'argomento; voi direte infatti: ecco uno scienziato che è lui stesso un fisico sperimentale; egli dovrebbe quindi lasciare ogni riflessione sulla struttura della scienza teorica ai teorici della conoscenza.

Obiettivamente, per giustificare la mia fatica, io dico che può essere interessante sapere ciò che pensa della sua scienza un uomo che la sua vita intera ha dedicato a chiarire e perfezionare i principi. Il modo con cui egli vede il passato e il presente del campo a cui si dedica può dipendere fortemente da ciò che egli si ripromette dall'avvenire e da ciò che spera di ottenere dal presente. Avviene a lui ciò che avviene allo storico che unisce il divenire effettivo (benché forse inconsciamente) agli ideali che in precedenza si è formato sulla società umana.

Noi vogliamo qui dare un rapido colpo d'occhio all'evoluzione del sistema teorico e, a questo proposito, portare più specialmente la nostra prima attenzione sul rapporto fra il fondo teorico e l'insieme dei fatti sperimentali.

Si tratta dell'eterna opposizione fra due elementi inseparabili della nostra conoscenza, l'empirismo e il ragionamento.

Noi onoriamo l'antica Grecia come la culla della scienza occidentale. Là, per la prima volta, è stato creato un sistema logico, meraviglia del pensiero, i cui enunciati si deducono così chiaramente gli uni dagli altri che ciascuna delle proposizioni dimostrate non solleva il minimo dubbio: si tratta della geometria di Euclide.

Quest'opera ammirevole della ragione ha dato al cervello umano la più grande fiducia nei suoi sforzi ulteriori. Colui che nella sua prima giovinezza non ha provato entusiasmo davanti a quest'opera non è nato per fare lo scienziato teorico.

Ma perché il pensiero logico fosse maturo per una scienza che abbraccia la realtà, occorre una seconda conoscenza fondamentale che fino a Kepler e Galileo non era bene comune dei filosofi. Il pensiero logico, da solo, non ci può fornire conoscenze sul mondo dell'esperienza e termina in essa. Le proposizioni puramente logiche sono vuote davanti alla realtà. È grazie a questa conoscenza e soprattutto per averla fatta penetrare a colpi di martello nel mondo della scienza, che Galileo è diventato il padre della fisica moderna e soprattutto delle scienze naturali moderne.

Ma allora, se l'esperienza è l'alfa e l'omega di tutto il nostro sapere intorno alla realtà,

qual è il posto che la ragione occupa nella scienza?

Un sistema completo di fisica teorica si compone di idee, di leggi fondamentali che devono essere applicabili a queste idee, e di proposizioni conseguenti che ne derivano per deduzione logica. Sono queste proposizioni che devono corrispondere alle nostre esperienze individuali; la loro deduzione occupa necessariamente, in un'opera di teoria, quasi tutte le pagine.

È, in fondo, esattamente lo stesso nella geometria d'Euclide, salvo che in questa i principi fondamentali si chiamano assiomi e non viene posta la questione che le proposizioni conseguenti debbano corrispondere a esperienze qualsiasi. Ma se si concepisce la geometria euclidea come la dottrina delle possibilità della posizione reciproca dei corpi praticamente rigidi e se, per conseguenza, si interpreta come una scienza fisica senza fare astrazione dal suo fondo empirico iniziale, la identità logica della geometria e della fisica teorica è completa.

Abbiamo dunque assegnato alla ragione e all'esperienza il loro posto nel sistema di una fisica teorica. La ragione dà la struttura del sistema: il contenuto delle esperienze e le loro relazioni reciproche devono, grazie alle proposizioni conseguenti della teoria, trovare la loro rappresentazione. Nella possibilità di una tale rappresentazione sta unicamente il valore e la giustificazione di tutto il sistema e, in particolare, i concetti e i principi che ne costituiscono la base. D'altronde questi concetti e principi sono creazioni libere dello spirito umano, che non si possono giustificare a priori né con la natura dello spirito umano né in altro modo qualsiasi.

Le idee e i principi fondamentali, che non si possono logicamente rendere più elementari, sostituiscono la inevitabile parte, razionalmente inafferrabile, della teoria. Lo scopo capitale di ogni teoria è di rendere questi irriducibili elementi fondamentali più semplici e più numerosi possibile, senza essere obbligati a rinunciare alla rappresentazione adeguata di un qualunque tema sperimentale.

La concezione che ho abbozzato sul carattere puramente fittizio dei principi della teoria, non era affatto in auge nel XVIII e nel XIX secolo. Ma essa guadagna terreno di giorno in giorno, di modo che la distanza fra le leggi fondamentali e i concetti da una parte e le conseguenze da mettere in relazione con le nostre esperienze dall'altra parte, aumenta sempre più a mano a mano che la costruzione logica maggiormente si unifica, vale a dire che si può poggiare tutto l'edificio su un numero minore di elementi concettuali logicamente indipendenti gli uni dagli altri. Newton, il primo creatore di un sistema esteso e possente di fisica teorica, credeva ancora, a questo proposito, che le idee e le leggi fondamentali del suo sistema derivassero dall'esperienza. È probabile che il suo «*hypotheses non fingo*» vada interpretato in questo senso.

Infatti, a quest'epoca, nelle idee di spazio e di tempo non appariva nulla di problematico. I concetti di massa, d'inerzia, di forza e le loro relazioni interdipendenti sembravano improntate direttamente all'esperienza. Una volta ammessa questa base, l'espressione della forza di gravitazione deriva, in effetti, dalla esperienza e lo stesso si può dire per le altre forze.

Osserviamo nondimeno che l'idea di spazio assoluto, che implica quella di riposo assoluto, era per Newton fonte di inquietudini; egli era, infatti, convinto che nulla

nell'esperienza sembrava corrispondere a quest'ultimo concetto. Egli era anche preoccupato della introduzione delle azioni a distanza. Ma il prodigioso successo pratico della sua dottrina può aver impedito, a lui e ai fisici del XVIII e del XIX secolo, di rendersi conto del carattere fittizio dei principi del suo sistema.

Al contrario, la maggior parte degli scienziati di quest'epoca studiosi della natura era compenetrata dall'idea che i concetti e le leggi fondamentali della fisica non sono, dal punto di vista della logica, creazioni dello spirito umano, ma che si era potuto dedurli dall'esperienza per «astrazione», vale a dire per via logica. A dire il vero, è soltanto la teoria della relatività generalizzata che ha permesso di riconoscere nettamente la falsità di questa concezione: in effetti questa teoria ha dimostrato che si poteva, con fondamenti molto lontani da quelli di Newton, essere d'accordo, in modo più soddisfacente e più completo di quanto non lo permettevano i principi newtoniani, con tutti i fatti correlativi nel campo dell'esperienza. Ma, lasciando da parte la questione della superiorità, il carattere fittizio dei principi divenne del tutto evidente, di modo che si potevano presentare due principi essenzialmente differenti che concordano in larga misura con la esperienza; questo prova comunque che ogni tentativo di dedurre logicamente dalle esperienze elementari le idee e le leggi fondamentali della meccanica è destinato a fallire.

Ma se è vero che il fondamento assiomatico della fisica teorica non discende dall'esperienza e deve al contrario essere creato liberamente, sussiste la speranza di trovare la strada giusta? O, a più forte ragione, questa giusta strada esiste soltanto nella nostra immaginazione? E soprattutto possiamo sperare di trovare nella esperienza una guida sicura, se vi sono teorie (come la meccanica classica) che danno largamente ragione all'esperienza, senza afferrare il fondo della questione? A questo rispondo con sicurezza che, a mio avviso, la via giusta esiste e che possiamo trovarla. Secondo la nostra esperienza fino a oggi, abbiamo il diritto di essere convinti che la natura è la realizzazione di tutto ciò che si può immaginare di più matematicamente semplice. Sono persuaso che la costruzione puramente matematica ci permette di scoprire questi concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano fra loro. I concetti matematici utilizzabili possono essere suggeriti dall'esperienza, ma mai esserne dedotti in nessun caso. L'esperienza resta naturalmente l'unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica; ma è nella matematica che si trova il principio veramente creatore. Da un certo punto di vista, riconosco che il pensiero puro è capace di afferrare la realtà, come gli antichi pensavano. Per giustificare questa fiducia sono costretto a servirmi di concetti matematici. Il mondo fisico è rappresentato da un continuo a quattro dimensioni. Se prendo in esso una metrica di Riemann e ricerco le leggi più semplici alle quali tale metrica obbedisce, arrivo alla teoria relativistica di gravitazione dello spazio vuoto. Se in questo spazio prendo un campo di vettori o il campo antisimmetrico che ne deriva e cerco le leggi più semplici alle quali questo campo può soddisfare, pervengo alle equazioni dello spazio vuoto di Maxwell. Giunti a questo punto ci manca ancora una teoria relativa alle zone di spazio nelle quali la densità elettrica non scompare. De Broglie ha avuto l'intuizione dell'esistenza di un campo di onde che è servito a spiegare certe proprietà quantistiche della materia. Dirac ha trovato, con i suoi «spineurs», alcuni nuovi valori del campo, dai quali è possibile dedurre in larga misura le

proprietà degli elettroni. Ora io ho trovato, con il mio collaboratore, che questi «spineurs» costituiscono un caso particolare d'una specie di campo di tipo nuovo, matematicamente legato al sistema a quattro dimensioni, che abbiamo chiamato «semivettori». Le equazioni più semplici alle quali questi semivettori possono essere soggetti permettono di comprendere la esistenza di due particelle elementari di masse ponderabili diverse e di peso uguale, ma di segni contrari. Dopo i vettori conosciuti, questi semivettori sono gli elementi matematici del campo i più semplici possibili in un continuo metrico a quattro dimensioni e sembra che possano caratterizzare, in modo naturale, le proprietà caratteristiche delle particelle elettriche elementari.

Per affrontare la questione è essenziale che tutte queste strutture e la loro connessione con le leggi fondamentali possano ottenersi secondo il principio di ricerca dei concetti matematici più semplici e del loro collegamento. È sulla delimitazione delle specie semplici di campo matematicamente esistenti, e delle equazioni semplici che è possibile stabilire fra di esse, che il teorico fonda la speranza di afferrare il reale in tutta la sua profondità.

Il punto più difficile di una teoria dei campi di questa natura risiede per il momento nella comprensione della struttura atomica della materia e dell'energia. La teoria nei suoi principi non è, in verità, atomica fintantoché essa opera con funzioni continue di spazio, contrariamente a quanto avviene nella meccanica classica il cui elemento più importante, il punto materiale, dà già ragione alla struttura atomica della materia.

La teoria moderna dei quanti, nella sua forma caratterizzata dai nomi di De Broglie, Schrödinger, Dirac, quella che opera con funzioni continue, ha trionfato di questa difficoltà grazie a una interpretazione audace che Max Born, per primo, ha espresso chiaramente; le funzioni di spazio che intervengono nelle equazioni atomiche non hanno la pretesa di essere un modello matematico delle formazioni atomiche; esse devono soltanto determinare col calcolo le probabilità che ci sono di trovare formazioni di questo genere nel caso di una misura su un'area data o in un determinato stato di movimento. Logicamente questa concezione è irrecusabile e ha avuto risultati importanti. Disgraziatamente essa obbliga a utilizzare un continuo il cui numero di dimensioni non è quello dello spazio come l'ha considerato il fisico fino ad oggi (cioè quattro), ma cresce in modo illimitato col numero di molecole costituente il sistema considerato. Non posso fare a meno di confessare che io non accordo a questa interpretazione che un significato provvisorio. Credo ancora alla possibilità di un modello della realtà, vale a dire di una teoria che presenti le cose stesse e non soltanto la probabilità della loro apparizione.

D'altra parte mi par certo che noi dobbiamo, in un modello teorico, abbandonare l'idea di una localizzazione completa delle molecole. Ciò, se non erro, è quanto resta del risultato della relazione d'indeterminazione di Heisenberg. Si può benissimo concepire una teoria atomica in senso proprio (e non secondo una semplice interpretazione), senza localizzazione di molecole in un modello matematico. Per esempio, per essere d'accordo col carattere atomico dell'elettricità, basta che le equazioni del campo conducano a questa conseguenza: una porzione di spazio (a tre dimensioni), al limite della quale la densità elettrica scompare ovunque, contiene sempre una carica totale elettrica di valore intero. In una teoria del continuo, il carattere atomico delle espressioni d'integrali potrebbe, di

conseguenza, esprimersi in modo soddisfacente senza localizzazione di formazioni costituenti la struttura atomica.

Soltanto se fossimo riusciti a stabilire una simile rappresentazione della struttura atomica considererei come risolto il problema dei quanti.

Copernico aveva attirato l'attenzione delle menti più elette sul fatto che si poteva avere la nozione chiara del movimento apparente dei pianeti considerando questi moti come rivoluzioni intorno al sole supposto immobile. Se il moto di un pianeta era un moto circolare uniforme intorno al sole come centro, sarebbe stato relativamente facile stabilire quale doveva essere l'aspetto di quei movimenti visti dalla terra. Ma siccome esso si manifestava con fenomeni molto più complessi, il lavoro era assai più difficile. Bisognava determinare questi movimenti dapprima empiricamente secondo le osservazioni di Tycho-Brahe sui pianeti. Soltanto in seguito si poteva pensare a trovare le leggi generali alle quali questi movimenti ubbidiscono.

Per capire quanto fosse difficile il compito di determinare il movimento reale di rotazione bisogna comprendere quel che segue. Non si vede mai dove si trova realmente un pianeta in un determinato momento; si vede soltanto in quale direzione esso è visto dalla Terra la quale descrive, essa stessa, una curva di natura sconosciuta intorno al Sole. Le difficoltà parevano dunque insormontabili.

Kepler trovò un mezzo per mettere ordine in questo caos. Prima di tutto egli riconobbe la necessità di determinare il movimento della Terra. Ciò sarebbe stato semplicemente impossibile se non ci fossero stati che il Sole, la Terra e le Stelle fisse senza alcun altro pianeta. Non si poteva in questo caso determinare null'altro che la variazione nel corso dell'anno della linea retta Terra-Sole (movimento apparente del Sole in rapporto alle Stelle fisse). Si poteva così conoscere che tutte queste direzioni si trovavano in rapporto alle Stelle fisse, almeno per quanto lo consentivano le imprecise osservazioni dell'epoca fatte senza telescopio. Bisognava anche determinare, allo stesso modo, come la linea Terra-Sole ruota intorno al Sole e si constatava che la velocità angolare di questo movimento si modifica regolarmente nel corso dell'anno. Ma questo non poteva ancora essere di molto aiuto poiché non si conosceva la variazione annuale della distanza Terra-Sole. Soltanto quando fossero conosciute le modifiche annuali di questa distanza sarebbe stato possibile tracciare la giusta traiettoria della Terra e determinare la legge.

Kepler trovò un mezzo ammirevole per uscire da questo dilemma. Anzitutto risultava dalle osservazioni solari che la velocità del percorso apparente del Sole sullo sfondo delle Stelle fisse era diversa nelle varie epoche dell'anno, ma che la velocità angolare di questo moto era sempre uguale nella stessa epoca dell'anno astronomico e di conseguenza la velocità di rotazione della linea Terra-Sole esaminata in rapporto alla medesima regione delle Stelle fisse, aveva sempre lo stesso valore. Si poteva dunque ammettere che l'orbita della Terra si *richiudeva su se stessa* e che la Terra la percorreva ogni anno nello stesso modo. Fatto per nulla evidente a priori. I seguaci di Copernico erano dunque certi che questo procedimento poteva applicarsi anche alle orbite degli altri pianeti.

Questo costituiva già un miglioramento. Ma come determinare la vera forma dell'orbita terrestre? Ammettiamo, in qualche punto del piano di quest'orbita, la presenza di una potente lanterna M: sappiamo che essa è fissa, che costituisce quindi per la determinazione dell'orbita terrestre una specie di punto fisso di triangolazione sul quale gli abitanti della Terra possono puntare in ogni epoca dell'anno. Ammettiamo inoltre che questa lanterna sia a maggior distanza dalla Terra. Ecco come, con l'aiuto di questa lanterna, si può determinare l'orbita terrestre.

Anzitutto c'è ogni anno un momento in cui la terra T si trova esattamente sulla linea che congiunge il Sole S alla lanterna M; se in questo momento si punta dalla Terra sulla lanterna, la direzione così ottenuta è anche la direzione SM (sole-lanterna).

Ammettiamo che questa direzione sia tracciata nel cielo. Prendiamo ora un'altra posizione della Terra in un altro momento. Poiché dalla Terra si può osservare egualmente bene il Sole e la lanterna, l'angolo T del triangolo STM è conosciuto. D'altra parte un'osservazione diretta del Sole dà la direzione ST e in precedenza si è determinato una volta per tutte la direzione SM sullo sfondo delle Stelle fisse. Si conosce anche l'angolo in S. Scegliendo a volontà una base SM, si può dunque tracciare sulla carta il triangolo STM. Si faccia questa costruzione parecchie volte durante l'anno e si otterrà ogni volta sulla carta un punto per la terra T in rapporto alla base SM definita una volta per tutte, corrispondente a una data stabilita. L'orbita terrestre sarebbe così determinata empiricamente, a parte, ben inteso, la sua dimensione assoluta.

Ma, voi direte, dove ha preso Kepler la lanterna M? Il suo genio, aiutato in questo caso dalla natura benigna, gliel'ha fatta trovare. C'era, per esempio, il pianeta Marte, di cui si conosceva la rivoluzione annuale, cioè il tempo che questo pianeta impiega per fare un giro intorno al Sole. Può succedere che il Sole, la Terra e Marte a un dato momento si trovino esattamente in linea retta, e questa posizione di Marte si ripeta ogni volta in capo a uno, due, ecc. anni marziani, perché Marte percorre una traiettoria chiusa. In questo determinato momento, SM presenta sempre la stessa base, mentre la Terra si trova sempre in un punto diverso della sua orbita. Le osservazioni di Marte e del Sole, alle date in questione, forniscono di conseguenza un mezzo per determinare l'orbita terrestre vera, avendo il pianeta Marte, in quei momenti, la parte della lanterna fittizia di poco fa. E in questo momento che Kepler ha trovato la vera forma dell'orbita terrestre e le leggi che la governano: noialtri, venuti più tardi, dobbiamo onorarlo e ammirarlo per questo.

Una volta determinata empiricamente l'orbita terrestre, si conosceva in ogni momento, nella sua vera grandezza e direzione, la linea ST; allora non era più difficile per Kepler, in linea di principio, calcolare, secondo le osservazioni dei pianeti, le orbite e i movimenti di questi: un lavoro immenso, dato lo sviluppo delle matematiche in quell'epoca.

Restava ora la seconda parte, non meno difficile del lavoro che ha riempito la vita di Kepler. Le orbite erano conosciute empiricamente; ma, da questi risultati empirici, bisognava trarre le leggi. Bisognava anzitutto stabilire una ipotesi sulla natura matematica della curva e verificarla per mezzo di enormi calcoli, i cui dati erano già conosciuti; se il risultato non concordava, fare un'altra ipotesi e verificarla di nuovo. Dopo ricerche di cui si intuisce l'immensità, Kepler trovò un risultato concordante: l'orbita è

un'ellisse di cui il Sole occupa uno dei fuochi. Egli trovò anche la legge della variazione della velocità sull'orbita, secondo la quale la linea Pianeta-Sole percorre superfici uguali in tempi uguali. Infine Kepler trovò anche che i quadrati dei tempi di rivoluzione sono proporzionati alle terze potenze dei grandi assi dell'ellisse.

In epoche turbate e angosciate come la nostra, in cui è difficile trovare gioia negli uomini e nel corso degli eventi umani, è particolarmente consolante evocare il ricordo di un uomo così grande, così sereno quale Kepler.

Egli viveva in un'epoca in cui l'esistenza di leggi generali per i fenomeni naturali non era affatto stabilita con certezza. Quanto grande doveva essere la sua fede in queste leggi per dargli la forza di consacrare dozzine d'anni ad un lavoro paziente e difficile, nell'isolamento, senza alcun appoggio, poco compreso dai suoi contemporanei, alla ricerca empirica del movimento dei pianeti e delle leggi matematiche di questo movimento.

All'ammirazione per quest'uomo sublime deve aggiungersi un altro sentimento d'ammirazione e di venerazione che va non più a un essere umano, ma all'armonia misteriosa della natura nella quale siamo nati. Fin dall'antichità gli uomini hanno immaginato le curve rispondenti a leggi per quanto possibile semplici: fra esse, vicino alla retta e al cerchio, l'ellisse e l'iperbole. Ora vediamo queste forme realizzate nelle traiettorie descritte dai corpi celesti, almeno con grande approssimazione.

Sembra che la natura umana sia tenuta a costruire indipendentemente le forme prima di poterne dimostrare l'esistenza nella natura. Risalta meravigliosamente bene dai lavori mirabili ai quali Kepler ha consacrato la sua vita, che la conoscenza non può derivare dall'esperienza sola, ma che occorre il paragone fra ciò che lo spirito umano ha concepito e ciò che ha osservato.

Senza dubbio i grandi materialisti dell'antichità greca avevano stabilito che tutti i fatti concernenti la materia dovessero richiamarsi a una successione di atomi rigorosamente regolata da leggi, senza alcun intervento della volontà dei viventi, in quanto causa indipendente. Descartes aveva ripreso a suo modo questo postulato. Ma essa restava allo stato di desiderio audace, d'ideale problematico di una scuola filosofica. Non esisteva prima di Newton, alcun risultato fondato sui fatti, che avrebbe potuto appoggiarsi sulla fiducia di una causalità fisica perfetta.

Come nessun altro ha mai fatto prima o dopo di lui, Newton ha indicato il cammino al pensiero, allo studio e alla formazione pratica dell'occidente. Egli non è soltanto il creatore geniale di particolari metodi direttivi, egli ha anche dominato in modo singolare gli elementi empirici conosciuti nel suo tempo e il suo spirito è apparso meravigliosamente ingegnoso nell'argomentazione matematica e fisica. Per tutte queste ragioni egli è degno della nostra alta venerazione. Ma questa nobile figura ha un'importanza anche maggiore di quella dovuta alla sua autorità di maestro perché la sorte lo ha collocato a una svolta dello sviluppo dello spirito umano. Per rendercene esattamente conto, non dobbiamo dimenticare che, prima di Newton, non esisteva alcun sistema ben definito di causalità fisica capace di cogliere i tratti più profondi del mondo dell'esperienza.

Lo scopo perseguito da Newton è stato quello di rispondere alla domanda seguente: esiste una regola semplice con la quale si può calcolare integralmente il movimento dei

corpi celesti del nostro sistema planetario, se lo stato di movimento di tutti questi corpi in un dato momento è conosciuto? Ci si trovava in presenza delle leggi empiriche di Kepler sul movimento planetario, tratte dalle osservazioni di Tycho-Brahe, e che esigevano una spiegazione. Certo, queste leggi spiegavano pienamente il moto dei pianeti intorno al Sole (forma ellittica dell'orbita, eguaglianza delle aree descritte in tempi uguali, relazione fra i grandi semiassi e la durata del percorso). Ma queste regole non soddisfano alla condizione necessaria della causalità. Sono tre regole, logicamente indipendenti l'una dall'altra, che permettono di constatare la mancanza di ogni correlazione interna. La terza legge non può applicarsi con immediatezza, numericamente, a qualunque altro corpo centrale che non sia il Sole (non esiste, per esempio, alcuna relazione fra la durata del cammino intorno al Sole e quella di un satellite intorno al pianeta). Ma il punto più importante è questo: queste leggi si riferiscono al moto preso nel suo insieme e non già alla maniera secondo la quale *lo stato del moto di un sistema in un dato momento deriva dallo stato del moto che lo ha immediatamente preceduto*: nel nostro linguaggio moderno diremo che sono leggi integrali e non leggi differenziali.

La legge differenziale è la sola forma che soddisfa pienamente alla condizione necessaria di causalità del fisico moderno. L'aver avuto la concezione netta della legge differenziale è uno dei più grandi meriti del genio di Newton. Per arrivare a questo, non soltanto era necessario l'intervento del pensiero, ma occorreva anche poter disporre di un metodo matematico di formule, che esisteva, è vero, nei rudimenti, ma che doveva ricevere una forma sistematica; Newton ha scoperto del pari questa forma nel calcolo differenziale e nel calcolo integrale. Si può, qui, tralasciare la questione se Leibniz è giunto a questi stessi procedimenti matematici indipendentemente da Newton o no; ma in ogni caso, si può dire che essi erano per Newton una necessità, perché essi soli potevano dare al suo pensiero un mezzo d'espressione.

Galileo aveva già fatto un passo importante sulla via della scoperta della legge del movimento. È lui che ha trovato la legge di inerzia e quella della caduta libera dei corpi nel campo di gravitazione della Terra: una massa (più esattamente un punto materiale), non influenzata da altre masse, si muove in linea retta e in moto uniforme; nel campo della gravità, la velocità verticale di un corpo libero cresce proporzionalmente al tempo. Oggi ci può sembrare che dalle scoperte di Galileo alla legge del moto di Newton si sia progredito ben poco. Bisogna tuttavia mettere in evidenza che le due citate proposizioni riguardano, secondo la loro forma, il moto di un insieme, mentre la legge del moto di Newton dà una risposta alla seguente domanda: come si manifesta lo stato di movimento di un punto materiale, *in un tempo infinitamente piccolo*, sotto l'influenza di una forza esterna? Soltanto passando alla osservazione del fenomeno in un tempo infinitamente piccolo (legge differenziale) Newton è giunto a stabilire formule applicabili a qualsiasi moto. L'idea di forza egli l'attinge alla statica che era già ben sviluppata. Egli non può stabilire il nesso fra forza e accelerazione se non introducendo il nuovo concetto di massa che, lo si può dire, è sostenuto in maniera curiosa da una definizione che non è tale se non in apparenza. Oggi noi siamo talmente abituati alla formazione di idee corrispondenti a quozienti differenziali che non possiamo più valutare quale potente capacità d'astrazione sia stata necessaria per giungere, attraverso una doppia derivazione, alla

legge differenziale generale del moto quando ancora si doveva inventare il concetto di massa.

Ma ciò non era affatto sufficiente per ottenere una legge causale dei fenomeni del moto. Perché l'equazione del moto non determinava il moto che quando la forza era nota. Newton aveva ben avuto l'idea (probabilmente considerando le leggi del movimento dei pianeti) che la forza agente su una massa è determinata dalla posizione di tutte le masse che si trovano a una distanza sufficientemente piccola dalla massa in questione. Soltanto quando questa relazione fu conosciuta si ebbe una concezione causale completa dei fenomeni del moto. Tutti sanno come Newton, partendo dalle leggi del moto planetario di Kepler, ha risolto il problema con la gravitazione e ha così scoperto l'identità fra forze motrici agenti sugli astri e la gravità. È unicamente l'associazione fra la *legge del moto* e la *legge d'attrazione* che costituisce questo mirabile edificio del pensiero, il quale permette di calcolare, partendo dallo stato di un sistema esistente in *un istante dato*, gli stati anteriori e posteriori, fin tanto che i fenomeni hanno luogo unicamente per effetto delle forze di gravitazione. Ciò fa sì che il sistema newtoniano sia logico e armonioso è che tutte le cause d'accelerazione delle masse di un sistema *agiscono soltanto su queste masse stesse*.

Su questa base Newton è giunto a spiegare i moti dei pianeti, dei satelliti, delle comete fin nei particolari più minuti, nonché il flusso e il riflusso, il movimento di precessione della terra: lavoro di deduzione di una grandezza unica. Un effetto mirabile ebbe anche la constatazione che la causa dei movimenti dei corpi celesti è identica alla gravità, questo fenomeno così familiare del quale facciamo esperienza quotidiana.

L'importanza dell'opera di Newton sta non soltanto nel fatto di aver creato una base utilizzabile e logicamente soddisfacente per la meccanica propriamente detta, ma ha rappresentato fino alla fine del XIX secolo il programma di tutti gli scienziati che si sono dedicati alle ricerche di fisica teorica. Tutti i fenomeni d'ordine fisico dovevano essere riferiti alle masse, che obbediscono alla legge del movimento di Newton. La legge delle forze doveva essere però sviluppata e adattata alla natura dei fatti. In questo senso lo stesso Newton condusse le sue ricerche nel campo dell'ottica, quando suppose che la luce fosse composta di corpuscoli inerti.

Anche la teoria dell'ottica ondulatoria si è servita della legge del movimento di Newton, dopo che questa era stata applicata alle masse distribuite in maniera continua. È unicamente sulle equazioni del movimento di Newton che si è appoggiata la teoria cinetica del calore, la quale non solo ha preparato le menti a conoscere la legge della conservazione dell'energia, ma ha altresì fornito una teoria dei gas verificata nei suoi minimi particolari, nonché una concezione approfondita sulla natura del secondo principio della termodinamica. La teoria dell'elettricità e del magnetismo si è ugualmente sviluppata, nei tempi moderni, sotto la guida delle idee fondamentali newtoniane (sostanza elettrica e magnetica, forze che agiscono a distanza). E anche il cambiamento radicale apportato da Faraday e Maxwell all'elettrodinamica e all'ottica — che rappresenta dopo Newton il primo grande progresso dei fondamenti della fisica teorica — si è ancora attuato, totalmente, sotto la guida delle idee di Newton. Maxwell, Boltzmann, lord Kelvin non si sono stancati di far risalire i campi elettromagnetici e le loro azioni dinamiche

reciproche a fenomeni meccanici di masse ipotetiche uniformemente distribuite. Solo dopo la fine del XIX secolo la fisica teorica è uscita dal quadro newtoniano, che durante quasi due secoli aveva servito da guida intellettuale alla scienza e le aveva fornito un considerevole appoggio.

I principi fondamentali di Newton erano tanto soddisfacenti dal punto di vista della logica che furono necessari i fatti sperimentali per dare l'impulso a nuovi slanci. Prima di trattare quest'argomento, devo sottolineare che Newton stesso conosceva i lati deboli della sua costruzione meglio degli scienziati che lo hanno seguito. Questa circostanza mi ha sempre riempito d'ammirazione e di venerazione, ed è proprio per questo che vorrei dilungarmi un po' sulla questione.

1. Benché siano riconosciuti gli sforzi di Newton per presentare il suo sistema come necessariamente condizionato dall'esperienza e per introdurre il minor numero possibile di concetti che non potessero riferirsi ai dati diretti dell'esperienza, tuttavia egli ha formulato il principio di Spazio e Tempo. Gliene s'è fatto spesso, di questi tempi, un rimprovero. Ma proprio su questo punto Newton è particolarmente conseguente con se stesso. Egli aveva riconosciuto che le grandezze geometriche osservabili (distanze di punti materiali fra di loro) e la loro corsa nel tempo non caratterizzano completamente i movimenti dal punto di vista fisico. Egli dimostra questa deduzione con la celebre esperienza del secchio. Esiste di conseguenza, al di fuori delle masse e delle loro distanze variabili nel tempo, ancora qualche cosa che è determinante per gli avvenimenti: questo «qualche cosa» egli lo concepisce in rapporto allo «spazio assoluto». Riconosce anche, se le sue leggi del movimento hanno un senso, che lo spazio deve avere una specie di realtà fisica, una realtà della stessa natura dei punti materiali e delle loro distanze.

Questa precisa conoscenza dimostra ugualmente la saggezza di Newton e l'esistenza di un lato debole della sua teoria; perché l'impostazione logica di essa sarebbe certo più soddisfacente senza questo concetto vago: in questo caso non si troverebbero nella legge che elementi il cui rapporto con le percezioni è del tutto evidente.

2. L'introduzione di forze dirette, che agiscono istantaneamente a distanza, per rappresentare gli effetti della gravitazione, non corrisponde al carattere della maggioranza dei fenomeni che ci sono noti attraverso l'esperienza di ogni giorno. A questa obiezione Newton risponde precisando che la sua legge dell'azione reciproca non vuol essere una spiegazione definitiva, ma una regola indotta dalla esperienza.
3. La teoria di Newton non ha dato alcuna spiegazione del fatto estremamente notevole che peso e inerzia di un corpo sono determinati dalla stessa grandezza (massa). La singolarità di questo fatto non è per nulla sfuggita a Newton.

Nessuno di questi tre punti costituisce una obiezione logica contro la teoria: sono, in certa misura, desideri non soddisfatti dello spirito scientifico in lotta per penetrare totalmente e con un concetto unitario i fatti della natura.

La teoria del moto di Newton, presa come fondamento di tutta la fisica teorica, ha ricevuto il suo primo colpo dalla teoria della elettricità di Maxwell. Si è constatato che le

azioni reciproche esercitate fra i corpi da corpi elettrici e magnetici non sono determinate da forze che agiscono istantaneamente a distanza, ma da fenomeni che li trasferiscono nello spazio a una velocità determinata. Al punto materiale e al suo movimento, secondo la concezione di Faraday, si è aggiunto un elemento fisico, cioè il «campo». Anzitutto si è cercato di formulare questo nuovo concetto, basandosi sulle concezioni meccaniche, come uno stato (di movimento o di repressione) meccanico di un mezzo ipotetico (l'etere) che riempirebbe lo spazio. Ma poiché, nonostante gli sforzi perseveranti, questa interpretazione meccanica non ha raggiunto gli scopi prefissi, ci si è abituati a poco a poco a concepire il «campo elettromagnetico» come l'ultima, irriducibile chiave di volta della realtà fisica. Siamo debitori a H. Hertz di aver con conoscenza di causa liberata l'idea di campo da ogni accessorio tratto dal fondo dei concetti della meccanica, a H.-A. Lorentz di averla liberata del supporto materiale; secondo quest'ultima idea, restava unico supporto del campo lo spazio vuoto della fisica (o etere) il quale, nella meccanica di Newton, non era stato spogliato da ogni funzione fisica. Una volta compiuta questa evoluzione, nessuno credette più alle forze dirette istantanee agenti a distanza, neppure nel settore della gravitazione. Lo sviluppo della teoria del campo elettromagnetico fece sì, dopo l'abbandono delle forze a distanza di Newton, che si cercasse di spiegare con l'elettromagnetismo la legge newtoniana del movimento o di sostituirla con una legge più esatta basata sulla teoria del campo. Ma se questi tentativi non ottennero un successo completo, le idee fondamentali della meccanica cessarono di essere considerate come la pietra fondamentale nella costruzione dell'immagine che ci diamo del mondo fisico.

La teoria di Lorentz-Maxwell conduce necessariamente alla teoria della relatività ristretta, la quale, per eliminare l'idea di simultaneità assoluta, esclude l'esistenza di forze agenti a distanza. Secondo questa teoria, la massa non è una grandezza immutabile, ma dipende dal contenuto di energia (e anch'esso è equivalente). Essa ha dimostrato che la legge del movimento di Newton va concepita come legge limite applicabile alle piccole velocità e l'ha sostituita con una nuova legge del movimento in cui la velocità della luce nel vuoto interviene quale velocità limite.

Infine l'ultimo passo nell'evoluzione della teoria del campo è stato raggiunto dalla teoria della relatività generalizzata. Quantitativamente, essa non modifica che di pochissimo la teoria di Newton, ma qualitativamente vi apporta cambiamenti assai più profondi. Inerzia, gravitazione e comportamento metrico dei corpi e degli orologi sono stati ricondotti a una qualità unitaria del campo. Questo campo è stato dato come dipendente dai corpi (generalizzazione della legge di gravitazione di Newton o della legge del campo ad essa corrispondente, come Poisson l'aveva formulata). Con ciò lo spazio e il tempo venivano svuotati non della loro realtà bensì del loro carattere di assoluto causale (influenzanti l'assoluto, ma non influenzati da esso) che Newton aveva dovuto loro attribuire per poter enunciare le leggi allora conosciute. La legge d'inerzia generalizzata ha la funzione della legge del movimento di Newton. Questa breve spiegazione basta a mettere in evidenza come gli elementi della teoria di Newton sono passati nella teoria della relatività generalizzata, grazie alla quale i tre punti difettosi riportati più sopra sono scomparsi. Sembra che, nel quadro di quest'ultima teoria, la legge del movimento possa essere ricavata dalla legge del campo corrispondente alla legge delle forze di Newton. Una

volta raggiunto questo scopo si potrà parlare di una teoria pura del campo.

La meccanica di Newton ha infine aperto la via alla teoria del campo in senso più formale. L'applicazione della meccanica di Newton alle masse uniformemente distribuite ha condotto di necessità alla scoperta e all'impiego di equazioni con derivate parziali, grazie alle quali la teoria del campo ha potuto trovare una espressione adeguata. Da questo punto di vista formale, la concezione di Newton della legge differenziale è il primo passo decisivo al successivo sviluppo.

L'evoluzione delle nostre idee sui fatti naturali di cui abbiamo trattato fin qui, potrebbe essere concepita come un perfezionamento organico del pensiero di Newton. Mentre la impostazione della teoria del campo raggiungeva la sua pienezza, alcuni fatti di irradiazione termica, di spettri, di radio-attività ecc. svelavano un limite di utilizzazione di tutta la teoria limite che, ancora oggi, ci parrebbe pressoché irraggiungibile nonostante i risultati giganteschi ottenuti nei particolari. Non senza argomenti di peso, molti fisici hanno dichiarato che riguardo a questi fatti è fallita non soltanto la legge differenziale, ma la legge stessa di causalità (fino ad oggi l'ultimo postulato base di tutta la scienza naturale). Si è del pari negata la possibilità di una costruzione di spazio-tempo che possa adattarsi univocamente alle leggi fisiche. Da una teoria del campo, operante per mezzo di equazioni differenziali, non parrebbe a prima vista verosimile dedurre che un sistema meccanico, come l'esperienza conferma, non è permanentemente capace che di valori d'energia o di stato discreti. Senza dubbio il metodo di De Broglie e Schrödinger che, in un certo senso, ha il carattere di una teoria del campo, porta alla deduzione, basandosi sulle equazioni differenziali, dell'esistenza di stati discreti, il che concorda in modo sorprendente con i fatti dell'esperienza; ma questo metodo deve rinunciare a una localizzazione delle particelle materiali e alle leggi rigorosamente causali. Chi oserebbe oggi risolvere il problema di sapere se la legge causale e la legge differenziale, queste ultime primizie della teoria newtoniana, devono essere definitivamente abbandonate?

EVOLUZIONE DEL CONCETTO DI REALTÀ FISICA

La fede in un mondo esterno indipendente dall'individuo che lo esplora è alla base di ogni scienza della natura. Poiché tuttavia le percezioni dei sensi non danno che indizi indiretti su questo mondo esteriore, su questo «reale fisico», quest'ultimo non può essere afferrato da noi che per via speculativa. Ne deriva che le nostre concezioni del reale fisico non possono mai essere definitive. Se vogliamo essere d'accordo, secondo una logica per quanto possibile perfetta, con i fatti percettibili, dobbiamo essere pronti a modificare queste concezioni, altrimenti denominate il fondamento assiomatico della fisica. In realtà, un colpo d'occhio alla evoluzione della fisica ci permette di constatare che questo fondamento ha subito, nel corso dei tempi, cambiamenti profondi.

La modifica più importante del fondamento assiomatico della fisica, della nostra concezione della struttura reale, dopo l'avvento della fisica teorica ad opera di Newton, è stata apportata dalle ricerche di Faraday e di Maxwell sui fenomeni elettromagnetici. Tenteremo ora di esporre questi concetti con più esattezza, esaminando l'evoluzione anteriore e posteriore a queste ricerche.

Secondo il sistema di Newton, il reale fisico è caratterizzato dai concetti di spazio, di tempo, di punto materiale, di forza (equivalente all'azione reciproca fra i punti materiali). I fenomeni fisici devono intendersi, secondo Newton, come movimenti di punti materiali nello spazio, movimenti retti da leggi. Il punto materiale è l'unico rappresentante del reale sebbene quest'ultimo sia variabile. I corpi percettibili hanno dato manifestamente origine all'idea del punto materiale; si è immaginato il punto materiale come l'analogo dei corpi mobili privati dei caratteri di forma, estensione, orientamento nello spazio, di tutte le proprietà intrinseche insomma, all'infuori dell'inerzia e della traslazione e introducendovi l'idea di forza. Questi corpi materiali, che hanno provocato psicologicamente la formazione del concetto «punto materiale» dovevano quindi, a loro volta, essere considerati sistemi di punti materiali. Da notare che questo sistema teorico è, nella sua essenza, un sistema atomico e meccanico. Ogni fatto doveva essere concepito come puramente meccanico, vale a dire semplice movimento di punti materiali soggetti alla legge del moto di Newton.

Il punto meno soddisfacente di questo sistema teorico (a parte la difficoltà, nuovamente discussa in questi ultimi tempi, dello spazio assoluto) si riscontrava soprattutto nella teoria della luce che Newton, conseguente con se stesso, concepiva egualmente costituita di punti materiali. Ma già a questa epoca la seguente domanda bruciava le labbra: che avviene dei punti materiali costituenti la luce quando essa è assorbita? Senza contare che è assai poco agevole per la mente considerare punti materiali di natura così diversa come quelli che si devono ammettere per rappresentare le sostanze ponderabili da una parte e dall'altra. A ciò si sono aggiunti più tardi i corpuscoli

elettrici, come terza specie di punti materiali, con proprietà fondamentalmente diverse. Infine la base presentava ancora un punto debole: bisogna ammettere in via del tutto ipotetica e arbitraria le forze d'azione reciproca determinanti il divenire. Cionondimeno, questa concezione del reale è stata fortemente feconda: come ha potuto accadere che si sia pensato d'abbandonarla?

Per dare una forma matematica al suo sistema, Newton doveva necessariamente ricorrere all'idea delle derivate e stabilire le leggi del movimento sotto forma di equazioni differenziali totali; è questo forse il più gran passo in avanti che mai sia stato consentito di fare ad un uomo nel dominio del pensiero. Le equazioni differenziali parziali non erano necessarie e Newton non ne ha fatto un uso metodico. Ma le equazioni differenziali parziali erano indispensabili per formulare la meccanica dei corpi deformabili; ciò è dovuto al fatto che in questi problemi la concezione di tali corpi come formati di punti materiali non ha avuto all'inizio alcuna funzione.

Ma se l'equazione differenziale parziale si è presentata come una serva nella fisica teorica, essa vi ha preso a poco a poco un posto dominante. Ciò è cominciato nel XIX secolo quando, sotto la pressione di fatti osservati, la teoria ondulatoria della luce lo ha imposto. Si è concepita la luce nello spazio vuoto come un fenomeno di vibrazione dell'etere e necessariamente è parso ozioso considerare quest'ultimo come un conglomerato di punti materiali. Qui, per la prima volta, l'equazione differenziale parziale è stata considerata quale espressione naturale dei fenomeni elementari della fisica. È così che il campo continuo è intervenuto in un settore particolare della fisica teorica, vicino al punto materiale, a rappresentare il reale fisico. Questo dualismo non è ancora scomparso fino ad oggi, per quanto possa sembrare imbarazzante ad ogni mente sistematica.

Ma se l'idea del reale fisico aveva cessato di essere puramente atomica, essa continuò dapprima ad essere puramente meccanica; si cercò sempre d'interpretare ogni fatto come un movimento di masse inerti e non si poteva neppure immaginare un'altra maniera di concepire. Fu allora che avvenne il grande sconvolgimento al quale resteranno per sempre legati i nomi di Faraday, Maxwell e Hertz; ma è Maxwell che in questa rivoluzione ha avuto la parte del leone. Egli ha dimostrato che quanto si conosceva allora intorno alla luce e ai fenomeni elettromagnetici è rappresentato dal suo noto sistema doppio delle equazioni differenziali parziali, nelle quali il campo elettrico e il campo magnetico intervengono come variabili dipendenti. Maxwell a dire il vero ha cercato di dare una base a queste equazioni o di giustificarle per mezzo delle idee della meccanica.

Ma egli si è servito di parecchie costruzioni del genere e non ne ha presa alcuna realmente sul serio, di modo che le due stesse equazioni differenziali sono apparse come l'essenziale e le forze del campo che vi figurano come entità elementari non suscettibili di essere riferite ad altro. Alla fine del secolo, la concezione del campo elettromagnetico come entità irriducibile si era già universalmente imposta e le teorie più serie non davano credito alla giustificazione o alla possibilità di un fondamento meccanico per le equazioni di Maxwell. Per contro ci si sforzò anche di spiegare, con la teoria del campo e con l'aiuto della teoria di Maxwell, i punti materiali e la loro inerzia. Ma questi sforzi non furono, infine, coronati da successo.

Se, trascurando i risultati importanti *particolari* che l'opera di Maxwell ha ottenuto nei

domini principali della fisica, si porta più specialmente l'attenzione sui cambiamenti che essi hanno fatto subire alla concezione della natura del reale fisico, ecco ciò che si può dire: prima di Maxwell si immaginava la realtà fisica (in quanto rappresentante i fenomeni della natura), come punti materiali le cui modifiche consistono soltanto in movimenti, regolati da equazioni differenziali parziali. Dopo Maxwell si è concepita la realtà fisica come rappresentata da campi continui, non meccanicamente spiegabili, regolati da equazioni differenziali parziali. Questo cambiamento nella concezione della realtà è il cambiamento più profondo e più fecondo che la fisica abbia subito dopo Newton; ma bisogna anche confessare che per ora non si è giunti affatto a realizzare definitivamente il programma affrontato. I sistemi fisici stabiliti successivamente, che sono stati coronati da successo, costituiscono piuttosto dei compromessi fra i due programmi e, proprio per il loro carattere di compromesso, portano il marchio del provvisorio e del logicamente imperfetto, benché ciascuno di essi abbia realizzato grandi progressi.

Bisogna prima citare la teoria degli elettroni di Lorentz, nella quale il campo e i corpuscoli elettrici intervengono congiuntamente quali elementi di egual valore nella concezione del reale. È venuta in seguito la teoria della relatività ristretta e della relatività generalizzata che, sebbene fondata interamente su considerazioni della teoria del campo, non ha potuto fino ad oggi evitare l'intervento indipendente di punti materiali e di equazioni differenziali totali.

L'ultima creazione, estremamente feconda, della fisica teorica, la meccanica dei quanti, s'allontana assolutamente, nel suo principio, dai due programmi ai quali per semplificare daremo il nome di programma di Newton e di programma di Maxwell. In effetti, le grandezze che figurano nelle leggi della nuova teoria non pretendono di rappresentare la realtà fisica *essa stessa*, ma soltanto le probabilità di intervento della realtà fisica considerata. Dirac, al quale dobbiamo, secondo me, la presentazione più perfetta, dal punto di vista della logica, di questa teoria, avverte con ragione che non sarebbe facile descrivere, teoricamente, per esempio, un fotone in modo che questa descrizione sia conclusiva e permetta di dire se il fotone passerà o no attraverso un polarizzatore disposto (trasversalmente) sul suo cammino.

Nondimeno sono incline a pensare che i fisici non si appagheranno a lungo di una descrizione indiretta del reale come questa, anche se si dovesse giungere a conciliare in modo soddisfacente la teoria col postulato della relatività generalizzata. In questo caso bisognerà ben tentare di realizzare nuovamente questo programma di Maxwell: la descrizione della realtà fisica per mezzo di campi che soddisfino alle equazioni differenziali parziali esenti da singolarità.

CARATTERI DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ

Nel considerare la natura specifica della teoria della relatività, tengo a mettere in evidenza che questa teoria non è di origine speculativa, ma che la sua scoperta è dovuta completamente e unicamente al desiderio di adattare, quanto meglio è possibile, la teoria fisica ai fatti osservati. Non si tratta di un atto rivoluzionario, ma dell'evoluzione naturale di una linea seguita da secoli. Non è a cuor leggero che si sono abbandonate certe idee, considerate fino ad allora come fondamentali, sullo spazio, il tempo e il movimento; il che è stato imposto unicamente dall'osservazione di alcuni fatti.

La legge della costanza della velocità della luce nello spazio vuoto, rafforzata dagli sviluppi dell'elettrodinamica e dell'ottica, congiunta alla eguaglianza di diritti di tutti i sistemi di inerzia (principio della relatività ristretta), così chiaramente messa in particolare evidenza da Michelson, ha condotto subito all'idea che il concetto di tempo doveva essere relativo perché ogni sistema d'inerzia doveva avere il suo tempo particolare. Il progredire di questa idea ha chiarito poi che prima non si era sufficientemente considerata la relazione reciproca fra le azioni avvenute all'istante da una parte, e le coordinate e il tempo corrispondente dall'altra.

Infatti uno dei caratteri essenziali della teoria della relatività è lo sforzo di elaborare con maggiore esattezza le relazioni fra i concetti generali e i fatti dell'esperienza; essa ha mantenuto il principio che la giustificazione di un concetto fisico si basa esclusivamente sulla sua relazione chiara e univoca con questi fatti. Secondo la teoria della relatività ristretta, le coordinate di spazio e di tempo hanno ancora un carattere assoluto nelle dimensioni in cui sono direttamente misurabili con corpi ed orologi rigidi. Ma sono relative nei limiti in cui dipendono dallo stato di movimento del sistema d'inerzia scelto. Il continuo a quattro dimensioni costituito dalla riunione dello spazio e del tempo comporta, secondo la teoria della relatività ristretta, quello stesso carattere assoluto che avevano, secondo la teoria precedente, lo spazio come il tempo, ciascuno separatamente (Minkowski). Dall'interpretazione delle coordinate e del tempo come risultato di misure, si arriva poi all'influenza del movimento (relativo al sistema di coordinate) sulla forma dei corpi e sull'andamento degli orologi, nonché all'equivalenza della energia e della massa inerte.

La teoria della relatività generalizzata deve la sua creazione, in prima linea, all'eguaglianza numerica, constatata dall'esperienza, della massa inerte e della massa pesante dei corpi, fatto fondamentale al quale la meccanica classica non aveva dato alcuna interpretazione. Si arriva a questa interpretazione estendendo il principio di relatività ai sistemi di coordinate aventi un'accelerazione relativa gli uni rispetto agli altri. La introduzione di sistemi di coordinate con una accelerazione negativa in rapporto ai sistemi di inerzia e del peso dà origine a una teoria del campo di gravitazione.

L'introduzione di sistemi di coordinate animati di un movimento accelerato l'uno rispetto all'altro in qualità di sistemi di coordinate equivalenti, come pare renderli necessari la identità dell'inerzia e del peso, porta, in unione ai risultati della teoria della relatività ristretta, alla conseguenza seguente: le leggi spaziali dei corpi solidi, in presenza di campi di gravitazione, non rispondono alle regole della geometria di Euclide. Si arriva a un risultato analogo per quanto concerne il movimento degli orologi. Da ciò risulta la necessità di una nuova generalizzazione della teoria dello spazio e del tempo, perché ora l'interpretazione diretta di coordinate dello spazio e del tempo con risultati di misure effettuabili per mezzo di metri e di orologi, non regge più. Questa generalizzazione della metrica che, grazie ai lavori di Gauss e di Riemann, esisteva già in un campo puramente matematico, è basata essenzialmente sul fatto che la metrica della teoria della relatività ristretta per i piccoli campi può pretendere di essere ancora valida nel caso generale.

L'evoluzione che abbiamo esposto toglie alle coordinate spazio-tempo ogni realtà indipendente. La realtà metrica non è data ora che dall'unione di queste coordinate con i valori che delimitano il campo di gravitazione.

L'evoluzione nel mondo del pensiero della teoria della relatività generalizzata ha un'altra origine. Come Ernst Mach ha già messo in evidenza, c'è nella teoria di Newton il seguente punto che non soddisfa. Se si considera il movimento non dal punto di vista causale, ma dal punto di vista puramente descrittivo, non c'è altro movimento che quello relativo delle cose le une rispetto alle altre. Ma l'accelerazione che appare nelle equazioni del movimento di Newton non è concepibile partendo dall'idea del movimento relativo; essa ha costretto Newton a immaginare uno spazio fisico in rapporto al quale dovrebbe esistere una accelerazione. Questa idea di uno spazio assoluto introdotta *ad hoc* è, a dire il vero, corretta logicamente, ma non pare soddisfacente. Si è cercato in seguito di modificare le equazioni della meccanica in modo tale che l'inerzia dei corpi sia ricondotta a un movimento relativo non già in rapporto allo spazio assoluto, ma in rapporto alla totalità degli altri corpi ponderabili. Dato lo stato delle conoscenze d'allora, il suo tentativo doveva fallire.

L'aver posto questo problema appare del tutto razionale. Questa evoluzione del pensiero s'impose, di fronte alla teoria della relatività generale, con una intensità potentemente rafforzata, perché, secondo questa teoria, le proprietà fisiche dello spazio sono influenzate dalla materia ponderabile. Sono convinto che la teoria della relatività generale non può risolvere questo problema, che considerando il mondo come uno spazio chiuso. I risultati matematici della teoria conducono obbligatoriamente a questa concezione, se si ammette che la densità media della materia ponderabile nel mondo possiede un valore finito, quantunque piccolo.

COS'È LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ?

In fisica si possono distinguere teorie di natura diversa. La maggior parte sono teorie costruttive: per mezzo di un sistema di formule relativamente semplice situato alla base, esse cercano di costruire un'immagine di fenomeni relativamente complessi. E così che la teoria cinetica dei gas cerca di ricondurre i fenomeni meccanici, tecnici e di diffusione a movimenti di molecole, vale a dire a costruire partendo dall'ipotesi del movimento molecolare. Quando si dice che si è riusciti a comprendere un gruppo di fenomeni naturali, significa sempre che si è trovata una teoria costruttiva che abbraccia i fenomeni in questione.

Ma accanto a questa classe importante di teorie ve n'è una seconda che invece del metodo sintetico impiega il metodo analitico. Qui il punto di partenza e la base non sono costituiti da elementi di costruzione ipotetica, ma da proprietà generali di fenomeni naturali determinate empiricamente dalle quali derivano in seguito criteri matematicamente formulati, ai quali i fenomeni particolari o le loro immagini teoriche devono soddisfare. È così che la termodinamica, partendo dal risultato generale dell'esperienza secondo il quale il moto perpetuo è impossibile, cerca di determinare, per via analitica, le relazioni alle quali i fenomeni particolari devono uniformarsi.

La teoria della relatività appartiene alla seconda categoria. Per comprendere la sua essenza bisogna quindi imparare a conoscere anzitutto i principi sui quali si basa. Ma, prima di esaminarli, devo far notare che la teoria della relatività assomiglia a un edificio a due piani, che sono la teoria della relatività ristretta e quella della relatività generalizzata. La prima, che è fondamento della seconda, concerne tutti i fenomeni fisici ad eccezione della gravitazione; la teoria della relatività generalizzata conduce alla legge della gravitazione e alle relazioni di questa con le altre forze naturali.

Fin dall'antichità greca si sa bene che per descrivere il movimento di un corpo è necessario un altro corpo immobile, al quale si riferisce il movimento del primo. Il movimento di una vettura è riferito al Sole, il movimento di un pianeta alla totalità delle Stelle fisse visibili. In fisica i corpi ai quali si riferiscono, spazialmente, i fenomeni, sono indicati col nome di sistemi di coordinate. Le leggi della meccanica di Galileo e di Newton non possono essere formulate che utilizzando un sistema di coordinate.

Ma affinché le leggi della meccanica siano valide, non si può scegliere a volontà lo stato di moto del sistema di coordinate (deve essere senza rotazione e senza accelerazione). Un sistema di coordinate ammissibile in meccanica si chiama un «sistema d'inerzia». Tuttavia lo stato di movimento di un sistema di inerzia non è, secondo la meccanica, determinato chiaramente dalla natura. Bisogna piuttosto dire: un sistema di coordinate che si sposta in linea retta e con moto uniforme in rapporto a un sistema d'inerzia è ugualmente un sistema d'inerzia. Per «principio di relatività ristretta»

s'intende l'estensione di questa proposizione a qualsiasi fenomeno naturale: ogni legge generale della natura, valida per un sistema di coordinate K , deve essere valida senza cambiamenti per un sistema di coordinate K' animato da un movimento di traslazione uniforme in rapporto a K .

Il secondo principio sul quale si basa la teoria della relatività ristretta è «il principio della costanza della velocità della luce nel vuoto». Questo principio dice: la luce ha sempre, nel vuoto, una velocità di diffusione ben determinata (indipendentemente dallo stato di movimento e dalla sorgente luminosa). Il credito che il fisico accorda a questo principio è dovuto ai successi dell'elettrodinamica di Lorentz e di Maxwell.

I due principi enunciati sono potentemente suffragati dall'esperienza, ma non sembrano, logicamente, compatibili fra loro. La teoria della relatività ristretta è giunta finalmente a realizzare quest'unione logica modificando la cinematica, vale a dire la dottrina delle leggi concernenti lo spazio e il tempo (partendo dal punto di vista fisico). Essa ha dimostrato questo: dire che due avvenimenti sono simultanei non ha un significato che in rapporto a un sistema di coordinate ed è evidente che la forma dei metri e la marcia degli orologi debbano dipendere dal loro stato di moto in rapporto al sistema di coordinate.

Ma la fisica antica, incluse le leggi di Galileo e di Newton, non s'adattava a questa cinematica relativistica di cui abbiamo ora parlato. Da quest'ultima discendevano le condizioni matematiche generali alle quali dovevano corrispondere le leggi naturali se i due principi enunciati erano veri. La fisica doveva adattarsi ad essi. In particolare si è giunti ad una nuova legge del moto per i punti materiali (in rapido spostamento), che è stata verificata con esattezza anche sulle particelle caricate elettricamente. Il risultato più importante della teoria della relatività ristretta riguarda le masse inerti di un sistema di corpi. È stato dimostrato che l'inerzia di un sistema deve dipendere dal suo contenuto in energia e si è pervenuti per così dire alla concezione che le masse inerti non sono altro che energia latente. Il principio della conservazione della massa ha perso la sua autonomia, si è fuso con quello della conservazione della energia.

La teoria della relatività ristretta, che non è altro che il prolungamento sistematico della elettrodinamica di Maxwell e di Lorentz, ha aperto nuove vie superando i suoi stessi limiti. L'indipendenza delle leggi fisiche in rapporto allo stato di movimento dei sistemi di coordinate non doveva forse limitarsi ai movimenti uniformi di traslazione dei sistemi di coordinate gli uni in rapporto agli altri? Che ha dunque a che vedere la natura con i sistemi di coordinate introdotti da noi e col loro stato di moto? Anche se è necessario per descrivere la natura impiegare un sistema di coordinate scelto a nostro piacere, la scelta del suo stato di movimento non doveva, almeno, subire limitazioni di sorta; le leggi dovevano essere assolutamente indipendenti da questa scelta (principio della relatività generalizzata). L'applicazione di questo principio della relatività generalizzata si può agevolmente comprendere attraverso una esperienza conosciuta da tempo, secondo la quale il peso e l'inerzia di un corpo sono retti dalla stessa costante (eguaglianza delle masse pesanti e inerti). Si immagini, per esempio, un sistema di coordinate animato da un movimento di rotazione uniforme relativamente a un sistema di inerzia newtoniano. Le forze centrifughe che intervengono, relative a questo sistema, devono essere concepite,

secondo la teoria di Newton, come effetti dell'inerzia. Ma queste forze centrifughe sono proporzionali alla massa dei corpi, esattamente come le forze di gravità. Non sarebbe possibile, in talune circostanze, concepire il sistema di coordinate come immobile e le forze centrifughe come forze di gravitazione? È agevole concepirlo, ma la meccanica classica vi si oppone. Questa considerazione fatta incidentalmente ci fa presentire che una teoria della relatività generalizzata deve fornirci le leggi di gravitazione, e la continuità logica dell'idea per giustificare questa speranza. Ma il cammino è stato più duro di quanto si poteva prevedere perché esige l'abbandono della geometria di Euclide. Il che significa: le leggi secondo le quali i corpi solidi si dispongono nello spazio non concordano esattamente con le leggi spaziali della geometria euclidea. È ciò che si vuol dire quando si parla della «curvatura dello spazio». I concetti fondamentali, «la retta», «il piano», ecc., perdono così, in fisica, il loro esatto significato.

Nella teoria della relatività generalizzata, la dottrina dello spazio e del tempo, la cinematica, non è più un fondamento indipendente dal resto della fisica.

Il comportamento dei corpi e la marcia degli orologi dipendono piuttosto dai campi di gravitazione, i quali, a loro volta, sono prodotti dalla materia.

La nuova teoria della gravitazione s'allontana notevolmente, per quanto riguarda i principi, dalla teoria di Newton; ma i suoi risultati pratici concordano così da vicino con quelli di questa teoria che è difficile trovare sperimentalmente prove di differenze sensibili.

Ecco quelle trovate fino ad oggi:

1. La rotazione delle ellissi delle orbite planetarie intorno al Sole (constatata su Mercurio);
2. La curvatura dei raggi luminosi attraverso i campi di gravitazione (constatata su fotografie d'eclissi solare);
3. Uno spostamento verso il rosso dei raggi spettrali della luce che ci inviano le stelle di massa importante.

Il merito principale della teoria è che essa costituisce nel suo insieme un tutto logico.

Se una sola delle sue conseguenze apparisse inesatta, bisognerebbe abbandonarla; ogni cambiamento sarebbe impossibile senza scuotere tutto l'edificio.

Ma nessuno deve pensare che la grande creazione di Newton possa realmente essere sostituita da questa teoria o da una consimile. Le sue idee grandi e chiare conserveranno sempre in avvenire la loro importanza eminente, ed è su di esse che fondiamo ogni nostra speculazione moderna sulla natura del mondo.

Il ragionamento scientifico è il perfezionamento del pensiero prescientifico. Siccome, in quest'ultimo, l'idea dello spazio ha già una funzione fondamentale, dobbiamo incominciare con lo studiare quest'idea com'era alle sue origini prima della scienza. Vi sono due modi di considerare le idee; l'uno e l'altro sono indispensabili per capire. Il primo è il metodo analitico logico; esso risponde alla domanda: in che modo le idee e i giudizi dipendono gli uni dagli altri? Rispondendo a questa domanda, ci troviamo su un terreno relativamente sicuro; è la sicurezza che c'ispira tanto rispetto per la matematica. Ma questa sicurezza non si acquista che a prezzo di contenuto profondo. I concetti non acquistano un fondo interiore se non sono legati, sia pure indirettamente, con le esperienze dei sensi. Ma questo vincolo non si può scoprire attraverso la ricerca logica, esso può soltanto essere lo scopo di un'azione vitale; e tuttavia è precisamente questa unione che determina il valore della conoscenza dei sistemi concettuali.

Esempio: un archeologo di una civiltà futura trova un manuale della geometria euclidea senza figure. Egli comprenderà bene in che modo, nei teoremi, sono usate le parole *punto, retta, piano*; si renderà anche conto del processo di deduzione di questi teoremi gli uni dagli altri e potrà anche stabilire nuovi teoremi secondo le regole conosciute. Ma la formazione dei teoremi resterà per lui un vano gioco di parole, fin tanto che *non potrà figurarsi qualche cosa* corrispondente alle parole punto, retta, piano, ecc. Soltanto allora la geometria avrà per lui un fondo reale. La stessa cosa avverrà con la meccanica analitica e in generale con le scienze logico-deduttive.

Cosa intendiamo con l'espressione «*potersi figurare qualche cosa?*» riguardo alle parole «punto», «retta», «intersecazione», ecc.? Significa rappresentarsi il contenuto dell'esperienza al quale corrispondono queste parole. Questo problema al di fuori della logica costituisce il problema dell'esistenza reale, che l'archeologo potrà risolvere attraverso l'intuizione, classificando ed esaminando le proprie esperienze per vedere se può scoprirvi qualche cosa che corrisponda a quelle parole primitive della teoria e agli assiomi per i quali sono state stabilite. Soltanto in questo caso si può porre razionalmente il quesito dell'esistenza di una cosa rappresentata in astratto.

Con i concetti prescientifici del nostro pensiero, ci troviamo, per quanto riguarda la realtà, più o meno nella stessa situazione dell'archeologo. Abbiamo per così dire dimenticato quali sono le fattezze del mondo della esperienza che ci hanno condotto alla formazione di queste idee ed abbiamo notevoli difficoltà a raffigurare il mondo delle percezioni vitali senza gli occhiali dell'interpretazione astratta alla quale siamo avvezzi da lungo tempo. Vi è inoltre la difficoltà che la nostra lingua deve servirsi di parole indissolubilmente legate a queste idee primitive. Tali sono gli ostacoli che ci sbarrano la strada quando vogliamo esporre la realtà dell'idea prescientifica di spazio.

Prima di affrontare il problema dello spazio, facciamo una dichiarazione preliminare sulle idee in generale: le idee si riferiscono alle esperienze dei sensi, ma non possono mai derivarne logicamente. Per questa ragione non ho mai potuto comprendere la questione dell'*a priori* nel senso di Kant. Nelle questioni di realtà, non può mai trattarsi che di una cosa, cioè di ricercare i caratteri del complesso di esperienze dei sensi ai quali si riferiscono le idee.

Per quanto concerne l'idea di spazio, quella dell'oggetto corporeo sembrerebbe doverla precedere. Si è spesso esposto la formazione dei complessi e delle impressioni dei sensi che possono aver dato origine a questa idea. La corrispondenza di certe impressioni del tatto e della vista, la possibilità di successione continua nel tempo e di ripetizione delle sensazioni (tatto, vista) quando si voglia, costituiscono alcune di queste caratteristiche. Si è giunti, con l'aiuto di esperienze così precise, all'idea di oggetto corporeo (la quale idea non suppone affatto la relazione di spazio e di tempo); la necessità di creare col pensiero le relazioni reciproche fra oggetti corporei di questa natura deve inevitabilmente dare origine alle idee corrispondenti alle loro relazioni di spazio. Due corpi possono toccarsi o essere separati: in quest'ultimo caso si può, senza modificarli per nulla, collocare fra essi un terzo corpo; nel primo è impossibile. Queste relazioni di spazio sono manifestamente reali, come i corpi medesimi. Se due corpi sono equivalenti per colmare *un* intervallo di questo genere, sono egualmente equivalenti per riempire un altro intervallo. L'intervallo è dunque indipendente dalla scelta specifica del corpo destinato a riempirlo; e ciò si applica in generale alle relazioni di spazio. È evidente che questa indipendenza, che è una condizione pregiudiziale dell'utilità della formazione di idee puramente geometriche, non è una necessità *a priori*. Mi pare che soprattutto questa idea dell'intervallo, desunta dalla scelta speciale del corpo destinato a riempirlo, costituisca il punto di partenza dell'idea di spazio.

Secondo queste brevi riflessioni, lo sviluppo dell'idea di spazio, considerato dal punto di vista dell'esperienza dei sensi, sembra che si possa rappresentare con lo schema seguente: oggetto corporeo - relazione di posizione degli oggetti corporei - intervalli - spazio. Da questo punto di vista appare qualche cosa di reale come gli oggetti corporei.

È chiaro che nel mondo delle idee, al di fuori della scienza, l'idea di spazio è esistita come concetto di una cosa reale, ma la matematica di Euclide non conosceva questa idea come tale e vi sopperiva servendosi esclusivamente delle idee di cosa, di relazioni fra le cose, solo come idee ausiliarie. Il punto, il piano, la retta, la distanza, sono oggetti corporei idealizzati. Tutte le relazioni di posizione sono riportate a relazioni di contatto (intersezioni di rette, di piani, posizioni di punti su rette ecc.). In questo concetto, lo spazio come continuo non appare. È Descartes che ha introdotto per primo questo concetto descrivendo il punto-spazio per mezzo delle sue coordinate: solo allora vediamo apparire le forme geometriche come porzioni di spazio infinito, concepito come continuo a tre dimensioni.

La grande superiorità della teoria cartesiana non consiste soltanto nel fatto d'aver messo l'analisi al servizio della geometria. Secondo me, il punto capitale è questo, la geometria dei greci dà la preferenza a certe forme (retta, piano); altre, per esempio l'ellisse, non le sono accessibili se non in quanto costruite o definite con l'aiuto di forme

come il punto, la retta e il piano. Invece nella dottrina cartesiana tutte le superfici, ad esempio, sono equivalenti per principio e la preferenza nell'edificio geometrico non è deliberatamente accordata alla forma lineare.

Se si considera la geometria come la dottrina delle leggi della posizione reciproca dei corpi praticamente rigidi, questa scienza deve essere ritenuta il ramo più antico della fisica. Essa ha potuto svilupparsi, come abbiamo già fatto notare, senza l'idea di spazio in quanto spazio, poiché si è accontentata di forme ideali, di corpi, punti, rette, piani, distanze. Per contro, la fisica di Newton aveva necessariamente bisogno dello spazio come insieme nel senso di Descartes. Poiché i concetti di punto materiale, di distanza fra i punti materiali (variabili col tempo) non bastavano alla dinamica. In particolare nelle equazioni del movimento di Newton, il concetto di accelerazione ha una parte fondamentale che non può essere definita unicamente dalle distanze fra i punti variabili col tempo. L'accelerazione di Newton non può essere concepita o definita come accelerazione in rapporto all'assieme spaziale. Alla realtà geometrica del concetto di spazio, viene dunque ad aggiungersi una nuova funzione dello spazio che determina l'inerzia. Quando Newton affermava che lo spazio è assoluto, mirava verosimilmente, a questo significato reale dello spazio, che per lui comportava la necessità di uno stato di movimento ben definito, tuttavia non interamente determinato da fenomeni della meccanica. D'altronde questo spazio era concepito come assoluto da un altro punto di vista: il suo effetto determinante dell'inerzia era considerato come indipendente, cioè non subiva alcuna influenza di circostanze fisiche qualsiasi: esso agiva sulle masse ma, inversamente, nulla agiva su di lui.

E tuttavia, nella coscienza dei fisici, lo spazio, fino a questi ultimi tempi, rimaneva esclusivamente come un recipiente passivo di tutti gli avvenimenti, senza parteciparvi in nessun modo. E stata necessaria la teoria ondulatoria della luce e quella del campo elettromagnetico di Maxwell e Faraday per dare alle idee un nuovo indirizzo. Divenne allora manifesto che, nello spazio privo di corpi materiali, vi sono degli stati propagantisi attraverso ondulazioni e campi localizzati suscettibili di esercitare azioni dinamiche sulle masse elettriche o sui poli magnetici che vi si trovano. Ma poiché ai fisici del XIX secolo sembrava del tutto assurdo attribuire allo spazio stesso funzioni o stati fisici, immaginarono, sul modello della materia ponderabile un mezzo che permeava tutto lo spazio ed era il supporto dei fenomeni luminosi: l'etere. Gli stati di questo mezzo, che dovevano essere i campi elettromagnetici, furono immaginati di natura meccanica, paragonabili alle deformazioni elastiche dei corpi solidi. Ma lo sviluppo di questa teoria meccanica dell'etere non diede interamente buoni risultati, di modo che ci si abituò lentamente a rinunciare a interpretare in maniera più precisa la natura dei campi dell'etere. È così che l'etere divenne un *quid* la cui sola funzione consisteva nel servire da supporto a campi elettrici che non si potevano ulteriormente analizzare.

L'immagine era di conseguenza la seguente: l'etere riempie lo spazio e nell'etere vagano i corpuscoli materiali, vale a dire gli atomi della materia ponderabile. (La struttura atomica della materia era già diventata, all'inizio del secolo, un risultato sicuramente acquisito). Siccome l'azione reciproca dei corpi doveva effettuarsi attraverso i campi, doveva esserci anche nell'etere un campo di gravitazione, ma la legge di questo campo

non aveva ancora preso in quest'epoca una forma definita: si considerava l'etere come la sede di tutte le azioni dinamiche capaci di farsi sentire a distanza attraverso lo spazio. Fin da quando si riconobbe che le masse elettriche in movimento producevano un campo magnetico, di cui l'energia dava un modello per l'inerzia, l'inerzia apparve anche come un'azione di campo localizzata nell'etere. Ma era soprattutto nelle proprietà meccaniche dell'etere che si riscontravano punti oscuri e fu allora che sopravvenne la grande scoperta di H.-A. Lorentz. Tutti i fenomeni di elettromagnetismo conosciuti fino allora erano giustificati da due ipotesi: l'etere è rigidamente legato allo spazio, vale a dire, in sostanza, non si può muovere; l'elettricità è rigidamente legata alle particelle elementari in movimento. Si può oggi enunciare così la scoperta di Lorentz: lo spazio fisico e l'etere non sono che due espressioni diverse di una sola e medesima cosa; i campi sono *stati fisici dello spazio*. In realtà se non si attribuisce all'etere alcuno stato particolare di moto non c'è nessuna ragione di farlo figurare accanto allo spazio come un'entità di natura speciale. Ma questo modo di vedere era ancora lontano al pensiero dei fisici: perché essi consideravano lo spazio come qualche cosa di rigido, d'omogeneo, non suscettibile di cambiamento alcuno. Soltanto il genio di Riemann, isolato e incompreso, pervenne, verso la metà del secolo scorso, alla concezione di una nuova idea di spazio che negava a quest'ultimo la sua rigidità e ne riconosceva come possibile la sua partecipazione agli avvenimenti fisici. Questa creazione del pensiero, dovuta a Riemann, è tanto più degna d'ammirazione in quanto era anteriore alla teoria del campo elettrico di Faraday e di Maxwell. In seguito arrivò la teoria della relatività ristretta che riconosceva l'equivalenza fisica di tutti i sistemi inerti, il che dimostrava, insieme all'elettrodinamica o alla legge della propagazione della luce, l'indissolubilità dello spazio e del tempo. Fino ad allora si era ammesso implicitamente che il continuo a quattro dimensioni, nell'ambito della esperienza, può dividersi obiettivamente in spazio e tempo: vale a dire che la parola «ora» nel mondo dei fatti, ha un significato assoluto. Nel momento in cui la relatività ne aveva riconosciuto la simultaneità, spazio e tempo si erano fusi in un solo continuo indivisibile come prima le tre dimensioni dello spazio si erano fuse in un continuo di questo genere. Lo spazio fisico si è così completato divenendo uno spazio di quattro dimensioni che comprende anche la dimensione del tempo. Lo spazio a quattro dimensioni della teoria della relatività ristretta è altrettanto rigido e assoluto quanto lo spazio di Newton.

La teoria della relatività è un superbo e peculiare esempio dello sviluppo del pensiero scientifico moderno. Il fatto è che le ipotesi non unitarie divengono sempre più astratte, sempre più lontane dall'esperienza. Con la teoria della relatività che si avvicina di più allo scopo scientifico per eccellenza, che è di abbracciare per deduzione logica, a mezzo di un minimo d'ipotesi e di assiomi, un massimo di contenuto sperimentale. In questo modo, il pensiero che, partendo dagli assiomi, penetra il contenuto delle esperienze o verifica le proprie conclusioni, diventa sempre più logico e sottile. Nella ricerca delle teorie, il teorico è forzato a lasciarsi guidare sempre più da formulazioni puramente matematiche perché il fisico sperimentale in quanto tale non può elevarsi fino a questi domini della più alta astrazione. Al posto del metodo prevalentemente induttivo della scienza, che corrisponde alla giovinezza di questa, appare, brancolante la deduzione. Ma un tale edificio teorico deve essere estremamente perfezionato fin nei più piccoli particolari per

poter condurre a risultati paragonabili con quelli della esperienza.

Senza dubbio, anche qui, il fatto sperimentale è la guida onnipossente; ma il suo verdetto non è applicabile che basandosi su un lavoro potente e delicato, che ha in primo luogo stabilito i vincoli fra gli assiomi e gli effetti verificabili. E il teorico deve eseguire questo lavoro gigantesco con la chiara coscienza di essere forse chiamato a giustificare la condanna a morte della sua teoria. Non si deve biasimare, tacciandolo di soverchia fantasia, il teorico che intraprende questo studio: ma bisogna al contrario provare la sua fantasia, perché, tutto ben considerato, non c'è per lui altro cammino per arrivare allo scopo: in ogni caso non è una fantasia senza disegno, ma una ricerca eseguita in vista di possibilità logicamente più semplici e delle loro conseguenze. Questo appello alla benevolenza era necessario per meglio disporre il lettore a seguire con interesse la concatenazione delle idee che seguono, vale a dire il corso delle idee che ha condotto dalla teoria della relatività generalizzata e al di là dell'ultimo gradino di questa teoria, alla teoria del campo unitario. In questa esposizione mi è assolutamente impossibile evitare del tutto l'uso di simboli matematici.

Incominciamo con la relatività ristretta. Anche questa è direttamente basata su una legge empirica, quella della costanza della velocità della luce. Sia P un punto nel vuoto, P' un punto la cui distanza da P , d , è infinitamente piccola. Ammettiamo che una emissione luminosa parta da P nell'istante t e arrivi a P' nel tempo $t + dt$. Si ha allora:

$$d_0^2 = c^2 dt^2$$

Siano:

$$dx_1, dx_2, dx_3,$$

le proiezioni ortogonali di d_0 ; se si introduce la coordinata immaginaria del tempo:

$$ct \sqrt{-1} = x_4,$$

la legge della costanza della propagazione della luce prende la forma:

$$d_0^2 + dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 = 0$$

Poiché questa formula esprime un significato reale si deve attribuire a d_0 un significato reale, sia pure nel caso in cui i punti vicini del continuo a quattro dimensioni siano scelti in modo tale che il corrispondente d_0 non si annulli. Ciò si esprime all'incirca nel modo seguente: lo spazio a quattro dimensioni (con la coordinata immaginaria del tempo) della teoria della relatività ristretta possiede una metrica euclidea.

Ecco come si spiega che questa metrica è euclidea. Introdurre una tale metrica in un continuo a tre dimensioni porta a riferirsi agli assiomi della geometria di Euclide. In questo caso la equazione che esprime la metrica non è altro che il teorema di Pitagora applicato ai differenziali delle coordinate.

Nella teoria della relatività ristretta, si possono far subire alle coordinate (per mezzo di una trasformazione) modifiche di tal natura, che il valore d_0^2 (costante fondamentale) si esprime anche, nei nuovi differenziali di coordinate, con la somma dei quadrati: queste trasformazioni si chiamano trasformazioni di Lorentz.

Il metodo euristico impiegato dalla teoria della relatività ristretta è caratterizzato dalla proposizione seguente: per esprimere leggi naturali non si devono ammettere che equazioni la cui forma non varia quando si modificano le coordinate per mezzo di una trasformazione di Lorentz. (Covarianza delle equazioni, in rapporto alle trasformazioni di Lorentz).

È grazie a questo metodo che si è conosciuto il legame inevitabile fra impulso ed energia, fra le intensità del campo magnetico ed elettrico, fra le forze elettrostatiche ed elettrodinamiche, fra la massa inerte e l'energia: con questo fatto, il numero di nozioni indipendenti e di equazioni fondamentali della fisica è stato diminuito. Questo metodo ha superato i suoi stessi limiti: è vero che le equazioni delle leggi naturali non siano covarianti che in rapporto alle trasformazioni di Lorentz e non rispetto ad altre trasformazioni? Posta in questi termini la domanda non ha, a dire il vero, alcun senso, perché ogni sistema di equazioni si può esprimere con le coordinate generali. Bisogna porla così: le leggi naturali sono siffatte che la scelta di coordinate *particolari* qualsiasi non fa loro subire semplificazioni essenziali?

Sia detto per inciso, il nostro assioma, fondato sull'esperienza, della identità delle masse inerti e pesanti, facilita la risposta affermativa a questa domanda. Se si eleva a principio l'equivalenza di attitudine di tutti i sistemi di coordinate nel permettere di formulare le leggi della natura, si arriva alla teoria della relatività generalizzata, a condizione di mantenere il principio della costanza della velocità della luce o l'ipotesi del significato obiettivo della metrica euclidea, almeno per porzioni infinitamente piccole dello spazio a quattro dimensioni.

Ciò vuol dire che, per porzioni finite di spazio, si suppone l'esistenza (nel senso fisico del termine) di una metrica generale di Riemann conformemente alla formula

$$d_0^2 = \sum g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

nella quale la sommatoria porta su tutte le combinazioni indici da 1,1 a 4,4.

In un solo punto, d'altronde essenziale, la struttura di uno spazio di questo genere differisce dallo spazio euclideo: i coefficienti $g_{\mu\nu}$ sono provvisoriamente funzioni qualsiasi delle coordinate x_1, \dots, x_4 e la struttura dello spazio non è realmente determinata che quando queste funzioni $g_{\mu\nu}$ siano effettivamente conosciute. In se stessa la struttura di un tale spazio è completamente indeterminata, e non diventa determinata che allorquando si indicano le tre funzioni alle quali soddisfa il campo metrico delle $g_{\mu\nu}$. È così che, per ragioni d'ordine fisico, si mantenne il convincimento che il campo metrico fosse al tempo stesso campo di gravitazione.

Poiché il campo di gravitazione è determinato dalla configurazione di masse e varia con esse, la struttura geometrica di questo spazio dipende anche da fattori attinenti alla fisica. Secondo questa teoria lo spazio non è più assoluto (esattamente come Riemann aveva previsto), ma la sua struttura dipende da influenze fisiche. La geometria (fisica) non è più una scienza isolata, chiusa in se stessa come la geometria di Euclide.

Il problema della gravitazione è stato così ridotto a un problema matematico: bisogna cercare le equazioni di condizione più semplici, immutabili riguardo a qualsiasi trasformazione di coordinate. È un problema ben delimitato, la cui soluzione è possibile.

Non dirò nulla qui intorno alla verifica sperimentale di questa teoria, ma voglio dire subito perché la teoria non ha potuto dichiararsi definitivamente soddisfatta del risultato. Senza dubbio la gravitazione è stata riportata alla struttura dello spazio; ma, al di fuori del campo di gravitazione, c'è ancora il campo elettromagnetico; è stato necessario introdurre questo ultimo nella teoria, come una formazione indipendente dalla gravitazione. Nell'equazione di condizione per il campo si sono dovuti introdurre alcuni termini supplementari corrispondenti all'esistenza del campo elettromagnetico. Ma il pensiero teorico non saprebbe sopportare l'idea che ci sono due strutture di spazio indipendenti l'una dall'altra: una di gravitazione metrica, l'altra elettromagnetica. S'impone la convinzione che queste due specie di campo devono corrispondere a una struttura unitaria dello spazio.

Ora la «teoria del campo unitario», che si presenta come un'estensione matematicamente indipendente della teoria della relatività generalizzata, cerca di rispondere a quest'ultimo postulato. Formalmente il problema deve porsi in questi termini: esiste una teoria del continuo nella quale, a fianco della metrica, interviene un nuovo elemento di struttura che forma un tutto unico con la metrica? Se è così, quali sono le leggi più semplici del campo alle quali un continuo di questa natura può essere sottoposto? E, infine, queste leggi del campo possono convenire per rappresentare la proprietà del campo di gravitazione e del campo elettromagnetico? A ciò si aggiunge ancora la questione di sapere se si possono concepire i corpuscoli (elettroni e protoni) come zone di campo particolarmente dense, i cui movimenti sono determinati dalle equazioni del campo. In questa attesa, non c'è che una risposta alle tre prime domande: la struttura di spazio fondamentale si descrive come segue e si applica a uno spazio di numero di dimensioni qualsiasi.

Lo spazio ha una metrica di Riemann: ciò significa che nei dintorni infinitesimali di ogni punto P , la geometria euclidea è applicabile. Esiste di conseguenza nei dintorni di

ogni punto P un sistema locale cartesiano di coordinate in rapporto al quale si calcola la metrica conformemente al teorema di Pitagora. Se supponiamo di portare la lunghezza sugli assi positivi di questo sistema locale, avremo l'« n -edro» locale ortogonale, e ci sarà anche un n' -edro locale di ogni altro punto P dello spazio. Se, partendo dai punti P e P' , si traccia un tratto di linea (PG o $P'G'$), si può, per mezzo di un n -edro locale corrispondente, che parta dalle sue coordinate locali, calcolare, col teorema di Pitagora, il valore di ciascuno di questi tratti di linea. Di conseguenza, parlare di eguaglianza numerica dei tratti PG e $P'G'$ ha un significato ben determinato.

Ora è essenziale osservare che gli n -edri ortogonali locali non sono completamente determinati dalla metrica, in quanto si può scegliere ancora del tutto liberamente l'orientamento degli n -edri locali individuali senza che ciò modifichi il risultato nel calcolo dei valori dei tratti di linea secondo il teorema di Pitagora. Da ciò discende, in uno spazio la cui struttura esiste esclusivamente in una metrica di Riemann, che i due tratti PG e $P'G'$ possono paragonarsi fra loro quanto a grandezza, ma non quanto a direzione: in particolare, dichiarare che due elementi sono paralleli fra loro non ha alcun senso. Da questo punto di vista, lo spazio metrico puro (di Riemann) è più povero in struttura di quello d'Euclide.

Siccome siamo alla ricerca di uno spazio più ricco in struttura di quello di Riemann, è facile arricchire quest'ultimo della struttura della relazione di direzione, o del parallelismo. A ogni direzione passante per P , facciamo di conseguenza corrispondere una direzione determinata passante per P' con una relazione reciproca univoca. Queste due direzioni riferite l'una all'altra le chiamiamo parallele. A questo rapporto di parallelismo facciamo inoltre seguire la condizione di conservazione degli angoli: siano PG o PR due direzioni passanti per P , $P'G'$ e $P'R'$ le direzioni parallele corrispondenti passanti per P' ; allora gli angoli RPG e $R'P'G'$ (misurabili nei sistemi locali secondo la teoria euclidea) sono eguali fra loro.

In questo modo la struttura di spazio presa come base è completamente definita. La sua descrizione matematica più semplice si fa come segue: facciamo passare per il punto P un n -edro locale ortogonale d'orientamento determinato, scelto a piacere. In ogni altro punto P' dello spazio orientiamo l' n -edro locale, in maniera che i suoi assi siano paralleli agli assi corrispondenti al punto P . In tal modo, con la struttura dello spazio data e l'orientamento liberamente scelto dell' n -edro passante per un solo punto P , tutti gli n -edri sono completamente determinati. Immaginiamo ora nello spazio P un qualsiasi sistema di coordinate di Gauss e su questo sistema, in ogni punto, proiettiamo l'asse dell' n -edro in questione, l'insieme di questi n^2 componenti descrive completamente la struttura dello spazio.

Questa struttura di spazio si trova, per così dire, compresa fra la struttura di Riemann e quella di Euclide. Contrariamente a quanto avviene con la prima, ci troviamo in linea retta, vale a dire una linea nella quale tutti i segmenti sono paralleli l'uno all'altro due a due.

La teoria testé descritta si distingue dalla teoria euclidea per la non esistenza del parallelogramma. Se per le estremità P e G di una retta PG , si fanno passare due rette uguali e parallele PP' e GG' , $P'G'$ non è, in generale, né uguale né parallelo a PG .

Il problema matematico già risolto fino ad oggi è ora questo: quali sono le condizioni più semplici alle quali si può sottoporre una struttura di spazio della natura descritta? La questione principale da studiare è ancora questa: in quale misura i campi e le forme elementari fisiche possono rappresentarsi con soluzioni esenti da ogni singolarità delle equazioni che rispondono a questa domanda?

ORIGINE DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ GENERALIZZATA

Qualche informazione storica sul mio lavoro scientifico. Non è che io sopravvaluti indebitamente l'importanza del mio sforzo: ma descrivere la storia del lavoro degli altri suppone una indagine del pensiero altrui, il che è piuttosto compito di personalità esercitate in lavori storici, mentre il dare spiegazioni sui propri pensieri anteriori sembrerebbe incomparabilmente più facile; ci si trova qui in una situazione di gran lunga più favorevole, e non si deve, per modestia, lasciar sfuggire l'occasione.

Quando con la teoria della relatività ristretta si ottenne l'equivalenza di tutti i sistemi d'inerzia per formulare le leggi della natura (1905), si presentò quasi spontaneamente il problema di sapere se c'era una equivalenza più estesa fra i sistemi di coordinate. In altre parole: se non si può attribuire all'idea di velocità che un senso relativo dobbiamo nondimeno ostinarci a considerare l'acceleramento come un concetto assoluto?

Partendo da un punto di vista puramente cinematico, non si poteva certo dubitare della relatività di movimenti qualsiasi ma, fisicamente, un'importanza speciale sembrava doversi attribuire al sistema d'inerzia e questo significato privilegiato faceva apparire artificiale la utilizzazione dei sistemi di coordinate che si muovono in modo diverso.

Senza dubbio conoscevo la concezione di Mach secondo la quale sembrava ragionevole supporre che la resistenza d'inerzia non si opponesse a una accelerazione in sé, ma a una accelerazione riferita alle masse degli altri corpi presenti nel mondo. Questa idea esercitava sulla mia mente non so quale fascino, ma non mi offriva alcun principio utile per una nuova teoria.

Feci la prima volta un passo avanti verso la soluzione del problema quando tentai di considerare la legge di gravitazione nel quadro della relatività ristretta. Come la maggior parte degli autori di quest'epoca, provai a stabilire una *legge del campo* per la gravitazione, non essendo più possibile, dopo la soppressione dell'idea di simultaneità assoluta, introdurre un'azione immediata a distanza, o almeno non lo era più in un qualsiasi modo naturale.

La cosa più semplice era, ben inteso, di mantenere il potenziale scalare di gravitazione di Laplace e di completare l'equazione di Poisson, in maniera facile a concepirsi, con un termine differenziato in rapporto al tempo, in modo tale che fosse data la soddisfazione alla legge della relatività ristretta. Bisognava anche adattare a questa teoria la legge del movimento dal punto materiale nel campo di gravitazione: per questo la via da seguire era meno chiaramente indicata, perché la massa inerte di un corpo poteva dipendere dal potenziale di gravitazione; bisognava pure tenerne conto in omaggio al teorema dell'inerzia dell'energia.

Ma tali ricerche mi condussero a un risultato che mi fece diffidente al massimo grado.

Secondo la meccanica classica, l'accelerazione verticale di un corpo nel campo del peso verticale è indipendente dalla componente orizzontale della velocità. Inoltre l'accelerazione verticale di un sistema meccanico, o del suo centro di gravità in questo campo del peso, si produce indipendentemente dalla sua energia cinetica interna. Ma, secondo la teoria allo studio, non si trattava dell'accelerazione di caduta in rapporto alla velocità orizzontale o all'energia interna di un sistema.

Ciò non concordava con l'antica esperienza, cioè che i corpi in un campo di gravitazione subiscono tutti la stessa accelerazione. Questo assioma, che si può anche formulare come quello dell'eguaglianza delle masse inerti e delle masse pesanti, mi apparve allora nel suo significato profondo. Rimasi estremamente sorpreso della sua esistenza e immaginai che dovesse racchiudere la chiave capace di penetrare più a fondo l'inerzia e la gravitazione. Benché ignorassi i risultati delle belle esperienze di Eötvös (che se ben ricordo non ho conosciuto che più tardi) non dubitai seriamente della forte validità di quest'assioma.

Fu allora che respinsi come inadeguato il tentativo, di cui ho parlato più sopra, di trattare il problema della gravitazione nel quadro della relatività ristretta. Questo quadro non si accordava manifestamente con la proprietà più importante della gravitazione. L'assioma della eguaglianza delle masse inerti e pesanti poteva ora formularsi in maniera molto espressiva, in questo modo: in un campo di gravitazione omogenea tutti i movimenti si producono analogamente a quanto avviene in assenza di un campo di gravitazione uniforme. Se questo principio era valido per un fenomeno qualsiasi (principio d'equivalenza), era una prova che il principio di relatività doveva estendersi a sistemi di coordinate in movimento relativo non uniforme, qualora si volesse giungere a una teoria di gravitazione senza difficoltà notevoli. Queste riflessioni mi occuparono dal 1908 al 1911 e cercai di trarne certe conseguenze speciali, delle quali non parlerò qui. La sola cosa importante anzitutto, era di aver riconosciuto che non si poteva pervenire a una teoria razionale della gravitazione se non estendendo il principio di relatività.

Conveniva di conseguenza stabilire una teoria le cui equazioni conservassero la loro forma anche con trasformazioni non lineari di coordinate. Ora io non sapevo in quel momento se ciò doveva applicarsi a trasformazioni qualsiasi (continue), o soltanto a talune.

Mi resi conto ben presto che ammettendo, in conformità alle esigenze del principio di equivalenza, trasformazioni non lineari, l'interpretazione semplicemente fisica delle coordinate, era destinata a sparire, vale a dire che non si poteva più pretendere che le differenze di coordinate rappresentassero risultati immediati di misure eseguite per mezzo di metri o di orologi ideali. Questa constatazione mi mise in forte imbarazzo, perché non mi era possibile capire, in sostanza, quale significato si doveva allora attribuire alle coordinate della fisica. Non giunsi a risolvere questo dilemma che nel 1912, secondo le considerazioni che seguono.

Bisognava tuttavia trovare una nuova maniera di formulare la legge d'inerzia la quale nel caso in cui mancasse «un campo di gravitazione effettivo nell'impiego di un sistema d'inerzia» si trasformava, come sistema di coordinate, nella definizione galileiana del principio d'inerzia. Quest'ultima dice: un punto materiale sul quale non agisce alcuna

forza, è rappresentato nel sistema a quattro dimensioni da una linea retta, vale a dire, per conseguenza, dalla linea più forte o, più giustamente, da una linea estemale. Questo concetto suppone l'idea di lunghezza di un segmento di linea, vale a dire una metrica. Nella teoria della relatività ristretta, questa metrica era, come Minkowski aveva dimostrato, una metrica quasi euclidea nel senso che il quadrato della lunghezza ds del segmento di linea era una funzione quadratica determinata dai differenziali delle coordinate.

Ora se si introducono, con una trasformazione non lineare, altre coordinate, ds^2 resta una funzione omogenea dei differenziali di coordinate, ma i coefficienti di questa funzione ($g_{\mu\nu}$) non sono più costanti; sono funzioni di coordinate. In linguaggio matematico si dirà: lo spazio fisico (a quattro dimensioni) possiede una metrica di Riemann. Le linee estemali di questa metrica, che hanno una affinità con il tempo, danno la legge del movimento di un punto materiale che non subisce, al di fuori delle forze di gravitazione, l'azione di alcuna forza.

I coefficienti $g_{\mu\nu}$ di questa metrica descrivevano allo stesso tempo in rapporto al sistema di coordinate scelto, il campo di gravitazione. Si era così trovata una enunciazione naturale del principio di equivalenza la cui estensione a campi di gravitazione qualsiasi costituiva una ipotesi assolutamente naturale.

Ecco dunque quale era la soluzione del dilemma sopra enunciato: non sono i differenziali di coordinate, è soltanto la metrica di Riemann, alla quale essi si riferiscono, che comporta un significato fisico. Si possedeva così un principio utilizzabile per la teoria della relatività generalizzata. Ma restavano ancora due problemi da risolvere:

1. Allorquando una legge del campo è espressa secondo la teoria di relatività ristretta, come dobbiamo trasferirla al caso di una metrica di Riemann?
2. Come enunciare le leggi differenziali che determinano la metrica stessa (cioè i $g_{\mu\nu}$) di Riemann?

Ho lavorato a questi problemi dal 1912 al 1914 col mio amico Grossmann. Abbiamo trovato che i procedimenti matematici per risolvere il problema 1. si trovavano enunciati nel calcolo differenziale infinitesimale di Ricci e Levi-Civita.

Per risolvere il problema 2. erano manifestamente necessarie le forme differenziali invariabili di secondo ordine dei $g_{\mu\nu}$. Vedemmo ben presto che queste erano già state stabilite da Riemann. Due anni prima della pubblicazione della teoria della relatività generale avevamo già preso in considerazione le equazioni corrette della gravitazione ma non potevamo affrontare la loro utilizzazione dal punto di vista fisico. Credevo di sapere, al contrario, che esse non potevano essere d'accordo con l'esperienza.

A questo proposito credevo anche di poter dimostrare, basandomi su considerazioni generali, che una legge di gravitazione invariabile, relativa alle trasformazioni di coordinate scelte a volontà, non concorda col principio della causalità. Tali erano gli errori che mi costarono due anni di lavoro durissimo finché, verso la fine del 1915, mi accorsi di questi errori e scoprii il nesso coi fatti della esperienza astronomica dopo che, avvilito e confuso, ero ritornato alla curvatura di Riemann.

Illuminato dalle conoscenze già raccolte, la meta felicemente raggiunta apparve pressoché evidente e ogni studioso intelligente la comprese senza grande sforzo. Ma queste ricerche, piene di presentimenti, perseguite nell'ombra per lunghi anni, quell'ardente desiderio di raggiungere lo scopo, quelle alternanze di fiducia e di stanchezza, quell'improvviso irrompere della verità luminosa, tutto questo insomma non può essere veramente conosciuto che da colui che l'ha vissuto.

TESTAMENTO SPIRITUALE
Messaggio contro la guerra atomica

Pochi mesi dopo la morte di Einstein, e proprio alla vigilia dell'incontro dei «Quattro Grandi» a Ginevra, Bertrand Russell rese pubblico questo «Testamento spirituale» affidatogli dal grande scienziato negli ultimi suoi giorni di vita, e sottoscritto da altri sette studiosi di fama internazionale: Bridgeman (Stati Uniti), «Premio Nobel» per la fisica e professore all'Università di Harvard; L. Infeld (Polonia), professore all'Università, autore di *Evoluzione della fisica* e de *Il problema del movimento*; H. I. Muller, già titolare di cattedre a Mosca e in India e professore all'Università americana di Indiana, «Premio Nobel» per la fisiologia e la medicina; C. S. Powell (Gran Bretagna), professore di fisica all'Università di Londra; lo stesso Bertrand Russell, «Premio Rotolatt»; Hideki Kikawa (Giappone), professore all'Università di Tokio, «Premio Nobel» per la fisica. Tra i firmatari della solenne dichiarazione relativa alle armi nucleari si trova anche Frederic Joliot Curie, che aderiva tuttavia all'ammonimento con due riserve.

In considerazione del fatto che in ogni futura guerra mondiale verrebbero certamente impiegate armi nucleari e che tali armi mettono in pericolo la continuazione stessa dell'esistenza dell'umanità, noi rivolgiamo un pressante appello ai governi di tutto il mondo affinché si rendano conto e riconoscano pubblicamente che i loro obiettivi non possono essere perseguiti mediante una guerra mondiale e li invitiamo, di conseguenza, a cercare mezzi pacifici per la soluzione di tutte le questioni controverse tra loro.

Nella tragica situazione cui l'umanità si trova di fronte noi riteniamo che gli scienziati debbano riunirsi in conferenza per accertare i pericoli determinati dallo sviluppo delle armi di distruzione in massa e per discutere una risoluzione nello spirito del progetto annesso. Parliamo in questa occasione non come membri di questa o quella Nazione, Continente o Fede, ma come esseri umani, membri della razza umana, la continuazione dell'esistenza della quale è ora in pericolo.

Il mondo è pieno di conflitti e, al di sopra di tutti i conflitti minori, c'è la lotta titanica tra il comunismo e l'anticomunismo. Quasi ognuno che abbia una coscienza politica ha preso fermamente posizione in una o più di tali questioni, ma noi vi chiediamo, se potete, di mettere in disparte tali sentimenti e di considerarvi solo come membri di una specie biologica che ha avuto una storia importante e della quale nessuno di noi può desiderare la scomparsa.

Cercheremo di non dire nemmeno una parola che possa fare appello a un gruppo piuttosto che a un altro. Tutti ugualmente sono in pericolo e se questo pericolo è compreso vi è la speranza che possa essere collettivamente scongiurato. Dobbiamo imparare a pensare in una nuova maniera: dobbiamo imparare a chiederci non quali passi possono essere compiuti per dare la vittoria militare al gruppo che preferiamo, perché

non vi sono più tali passi; la domanda che dobbiamo rivolgerci è: «*quali passi possono essere compiuti per impedire una competizione militare il cui esito sarebbe disastroso per tutte le parti?*».

L'opinione pubblica e anche molte persone in posizione autorevole non si sono rese conto di quali sarebbero le conseguenze di una guerra con armi nucleari. L'opinione pubblica ancora pensa in termini di distruzione di città. Si sa che le nuove bombe sono più potenti delle vecchie e che mentre una bomba atomica ha potuto distruggere Hiroshima, una bomba all'idrogeno potrebbe distruggere le città più grandi come Londra, New York e Mosca. È fuori di dubbio che in una guerra con bombe all'idrogeno le grandi città sarebbero distrutte; ma questo è solo uno dei minori disastri cui si andrebbe incontro.

Anche se tutta la popolazione di Londra, New York e Mosca venisse sterminata il mondo potrebbe nel giro di alcuni secoli riprendersi dal colpo; ma noi ora sappiamo, specialmente dopo l'esperimento di Bikini, che le bombe nucleari possono gradatamente diffondere la distruzione su un'area molto più ampia di quanto non si supponesse. È stato dichiarato da fonte molto autorevole che ora è possibile costruire una bomba 2500 volte più potente di quella che distrusse Hiroshima.

Una bomba all'idrogeno che esplode vicino al suolo o sott'acqua invia particelle radioattive negli strati superiori dell'aria. Queste particelle si abbassano gradatamente e raggiungono la superficie della terra sotto forma di una polvere o pioggia mortale.

Nessuno sa quale ampiezza di diffusione possano raggiungere queste letali particelle radioattive, ma le maggiori autorità sono unanimi nel ritenere che una guerra con bombe all'idrogeno potrebbe molto probabilmente porre fine alla razza umana.

Si teme che, qualora venissero impiegate molte bombe all'idrogeno, vi sarebbe una morte universale, immediata solo per una minoranza mentre per la maggioranza sarebbe riservata una lenta tortura di malattie e disintegrazione.

Molti ammonimenti sono stati formulati da personalità eminenti della scienza e da autorità della strategia militare.

Nessuno di essi dirà che i peggiori risultati sono certi: *ciò* che essi dicono è che questi risultati sono possibili e che nessuno può essere sicuro che essi non si verifichino. Non abbiamo ancora constatato che le vedute degli esperti in materia dipendano in qualsiasi modo dalle loro opinioni politiche e dai loro pregiudizi. Esse dipendono solo, per quanto hanno rivelato le nostre ricerche, dall'estensione delle conoscenze particolari del singolo. Abbiamo riscontrato che coloro che più sanno sono i più pessimisti.

Questo dunque è il problema che vi presentiamo, netto, terribile ed inevitabile: dobbiamo porre fine alla razza umana oppure l'umanità dovrà rinunciare alla guerra?

È arduo affrontare questa alternativa poiché è così difficile abolire la guerra. L'abolizione della guerra chiederà spiacevoli limitazioni della sovranità nazionale, ma ciò che forse più che ogni altro elemento ostacola la comprensione della situazione è il fatto che il termine «umanità» appare vago ed astratto, gli uomini stentano a rendersi conto che il pericolo è per loro, per i loro figli e loro nipoti e non solo per una generica e vaga umanità.

È difficile far sì che gli uomini si rendano conto che sono loro individualmente ed i loro cari in pericolo imminente di una tragica fine.

E così sperano che forse si possa consentire che le guerre continuino purché siano vietate le armi moderne. Questa speranza è illusoria.

Per quanto possano essere raggiunti accordi in tempo di pace per non usare le bombe all'idrogeno, questi accordi non saranno più considerati vincolanti in tempo di guerra ed entrambe le parti si dedicheranno a fabbricare bombe all'idrogeno non appena scoppiata una guerra, perché se una delle parti fabbricasse le bombe e l'altra no, la parte che le ha fabbricate risulterebbe inevitabilmente vittoriosa.

Sebbene un accordo per la rinuncia alle armi nucleari nel quadro di una riduzione generale degli armamenti non costituirebbe una soluzione definitiva, essa servirebbe ad alcuni importanti scopi.

In primo luogo ogni accordo fra Est e Ovest è vantaggioso in quanto tende a diminuire la tensione internazionale. In secondo luogo l'abolizione delle armi termonucleari se ognuna delle parti fosse convinta della buona fede dell'altra, diminuirebbe il timore di un attacco improvviso del tipo di Pearl Harbour che attualmente tiene entrambe le parti in uno stato di apprensione nervosa.

Saluteremo perciò con soddisfazione un tale accordo, anche se solo come un primo passo. La maggior parte di noi non è di sentimenti neutrali, ma come essere umani dobbiamo ricordare che perché le questioni tra Est e Ovest siano decise in modo da dare qualche soddisfazione a qualcuno, comunista o anticomunista, asiatico, europeo o americano, bianco o nero, tali questioni non devono essere decise con la guerra.

Desideriamo che ciò sia ben compreso sia in oriente che in occidente. Se vogliamo, possiamo avere davanti a noi un continuo progresso in benessere, conoscenze e saggezza. Vogliamo invece scegliere la morte perché non siamo capaci di dimenticare le nostre controversie?

Noi rivolgiamo un appello come esseri umani ad esseri umani: ricordate la vostra umanità e dimenticate il resto. Se sarete capaci di farlo vi è aperta la via di un nuovo Paradiso, altrimenti è davanti a voi il rischio della morte universale.

INDICE

- Nota del traduttore
- Come io vedo il mondo
 - Società e personalità
 - Religione e scienza
 - La ricerca scientifica
 - I quanti di Planck
 - La questione del metodo
 - Evoluzione della fisica: Kepler e Newton
 - Evoluzione del concetto di realtà fisica
 - Caratteri della teoria della relatività
 - Cos'è la teoria della relatività?
 - Lo spazio, l'etere e il campo
 - Origine della teoria della relatività generalizzata
- Testamento spirituale. Messaggio contro la guerra atomica

) Cfr. A. Einstein, *La teoria dei quanti di luce*, Newton Compton ed.,
Roma 1973. □

Questa nota, compilata dal traduttore nel 1955, è stata modificata e aggiornata dalla Redazione per la presente edizione dell'opera. □