

RIVISTA DI FILOSOFIA NEO-SCOLASTICA

PUBBLICATA A CURA
DELLA FACOLTA DI FILOSOFIA
DELL'UNIVERSITA CATTOLICA
DEL SACRO CUORE

A. CRESCINI
L'ANTINOMIA DELLA FISICA
MODERNA



Estratto dal fasc. GENNAIO-FEBBRAIO 1960 - ANNO LII - FASC. I

REDAZIONE E AMMINISTRAZIONE: PIAZZA S. AMBROGIO N. 9 - MILANO
Pubblicazione bimestrale Spedizione in abbon. postale (Gruppo IV)

ANGELO CRESCINI

L'ANTINOMIA DELLA FISICA MODERNA

I - ESPERIENZA ORDINARIA ED ESPERIENZA SCIENTIFICA.

La scienza è nata nel tentativo di sistemare l'esperienza ordinaria della vita quotidiana allo scopo di prevederla e quindi di controllarla e dominarla. Pertanto si è sempre basata sul presupposto di un certo legame tra i fenomeni, per cui da uno di essi se ne possa anticipare un altro determinato ad esclusione di altri in se stessi possibili. Queste parole « ad esclusione di altri » equivalgono in definitiva all'asserzione del determinismo. Ai giorni nostri si sono accese gravi polemiche ancora persistenti sul determinismo o sull'indeterminismo delle leggi di natura, ma esse riguardano direttamente e immediatamente le leggi che regolano il mondo atomico, mentre noi stiamo parlando per intanto del mondo macroscopico che fu il primo ad essere studiato dalla fisica. Certamente l'indeterminatezza delle leggi atomiche si riversa anche sulle leggi del mondo macroscopico, ma l'indeterminatezza che ne deriva rientra largamente nei margini che lo scienziato antico spontaneamente riservava all'avverarsi del fenomeno previsto, per la scarsità delle esigenze dalle quali era sospinto nelle sue ricerche.

In ogni caso l'esclusione di campi sempre più vasti di fenomeni dalla previsione di ciò che consegue all'attuale posizione di un fenomeno, è un'esigenza inderogabile della scienza e addirittura la ragione del suo essere. Se la determinatezza quindi non potrà essere assoluta, rimane tuttavia che il tendervi è lo scopo principale della scienza, e l'avvicinarvisi indefinitamente, sia nell'intenzione che in effetto, costituisce un determinismo che non può essere misconosciuto neppure dal più acceso indeterminista.

La scienza dunque tende a determinare stati successivi dell'esperienza in base agli stati attuali, mediante la determinazione del legame che sussiste tra loro e che si chiama legge di natura. Questa tendenza e questo compito tuttavia non sono esclusivi della scienza. Anche l'uomo ordinario per orientarsi nella vita ha bisogno di arguire dalla situazione attuale quale sarà la situazione successiva. Questo intento lo raggiunge mediante l'esperienza da lui gradatamente accumulata nel passato, per cui col procedere dell'età riesce sempre meglio

ad orientarsi nei casi della vita che pure diventano sempre più complessi. Ma vi è una differenza sostanziale tra il suo procedimento e quello dello scienziato. L'uomo ordinario ha da fare con situazioni estremamente complesse. Gli oggetti fisici con cui è costretto a venire a contatto, dal momento che anche il suo corpo è un oggetto fisico, interferiscono tra di loro secondo aspetti estremamente vari e continuamente varianti. Per questo motivo egli non può determinare la precisa evoluzione che essi subiranno al passare del tempo, ma è costretto ad accontentarsi dello sviluppo globale e di risultati largamente approssimativi. Per fare un caso estremamente semplice ed ordinario, figuriamoci un individuo che si accinge ad attraversare una strada mentre vede arrivare un'automobile. Con un colpo d'occhio attento egli sa valutare la velocità ed eventualmente l'aumento di velocità, ossia l'accelerazione dell'automobile, e quindi il tempo che impiegherà ad arrivare al suo livello, ma tutto questo egli lo fa soltanto in riferimento alla velocità che deve assumere per passare la strada prima che la macchina sopravvenga. La sua è una valutazione soltanto qualitativa della velocità e dell'accelerazione in rapporto allo spazio ed al tempo, perchè essa è sufficiente per il raggiungimento del suo scopo che è di attraversare la strada senza incidenti. Così in genere succede nella vita ordinaria. Ma la scienza non si accontenta di simile valutazione. Essa punta decisamente sulla determinazione quantitativa. Essa vuol determinare, in base alla velocità e all'accelerazione iniziali, in quanto tempo esatto sarà percorso lo spazio. La previsione allora è dotata di una precisione maggiore. Ma per ottenere questo suo intento la scienza deve semplificare le situazioni ed isolare, desumendoli dalla realtà, quegli elementi che poi interverranno nella legge e nel calcolo. In definitiva la determinazione quantitativa della scienza ottiene il suo vantaggio su quella qualitativa della vita ordinaria a spese di una semplificazione della situazione reale.

Ci si può chiedere a questo punto se sia un vantaggio reale quello ottenuto in questo modo dalla scienza dal momento che la realtà rimane in se stessa nella sua complessità. Il vantaggio è reale prima di tutto perchè l'abitudine della valutazione qualitativa determina meglio quella della valutazione quantitativa e gli elementi isolati dalla scienza e complicati dalla realtà possono essere meglio valutati in concreto se si sa il loro esatto svilupparsi qualora fossero isolati, ma soprattutto perchè in realtà la scienza costruisce effettivamente le situazioni e gli strumenti che adopera, basandoli sugli elementi ottimi previamente controllati per ottenere così la sicurezza nella previsione. La realtà grezza è complicata, ma la realtà costruita dalla scienza è semplice e quindi controllabile. Le ruote degli ingranaggi sono rotonde e le si fa muovere uniformemente, perchè si conoscono con esattezza le misure del cerchio e le leggi del moto circolare uniforme. Anche la macchina più complessa è sempre più semplice di un sistema naturale,

perchè tutti i suoi elementi sono costruiti secondo leggi che già ci sono note ed in modo tale che restino sempre sotto il controllo delle nostre formule.

La scienza quindi presenta due aspetti: cognizione dei fenomeni naturali per prevederli, costruzione di sistemi artificiali controllabili per indagare, controllare e dominare la natura o per ottenere risultati prestabiliti. Nell'astronomia, per esempio, la costruzione dei telescopi appartiene al secondo scopo della scienza. Esso è subordinato al primo che è l'osservazione, lo studio dei corpi e dei fenomeni celesti. Si è pensato nel secolo scorso che il mondo fosse una macchina sia pure molto complessa, ma tale da muoversi secondo leggi rigorose, analogamente alle macchine costruite dall'uomo. Si pensava che la semplificazione operata in queste non comportasse una frattura qualitativa tra la realtà naturale e quella artificiale. In altre parole prevalse il meccanicismo ed il determinismo. L'orientamento scientifico odierno è molto cambiato. Ma non è su questo cambiamento che vogliamo per intanto fissare l'attenzione, quanto piuttosto su di una conclusione importante che già discende da queste prime osservazioni: La scienza adopera le nozioni ordinarie ricavate direttamente dall'esperienza per determinare meglio l'esperienza stessa. Mediante la costruzione di strumenti adatti, perfettamente controllabili appunto perchè costruiti secondo leggi note, la scienza del secolo scorso si era illusa di poter dominare completamente la natura e carpirne definitivamente il segreto. Ma quando il metodo deterministico così adottato ha permesso alla scienza di penetrare nell'intimo della materia per realizzare compiutamente il suo scopo, allora si è accorta del circolo vizioso in cui si avvolgeva e dell'illusione in cui era nata e cresciuta.

II - L'IPOTESI DELLA STRUTTURA CORPUSCOLARE DELLA MATERIA E LE LEGGI STATISTICHE

Che la materia fosse composta fondamentalmente di corpuscoli indivisibili lo si pensava ancora ai tempi di Democrito, ma solo nell'epoca moderna quest'ipotesi fu ammessa come necessario presupposto alla spiegazione dei fatti sperimentali. Si scoprirono infatti allora le leggi fondamentali della chimica, ossia la legge delle proporzioni fisse e quella delle proporzioni multiple. La prima diceva che in un composto chimico sono definiti e costanti i rapporti in peso secondo cui sono combinati gli elementi che lo costituiscono. Per esempio, se si vuol ottenere 18 grammi di acqua, si dovrà far combinare 2 grammi di idrogeno con 16 grammi di ossigeno. Per ottenerne invece la metà, ossia 9 grammi, si dovrà far combinare 1 grammo di idrogeno con 8 grammi di ossigeno. Per avere la quarta parte, ossia 4,5 grammi, occorreranno 0,5 grammi di idrogeno e 4 grammi di ossigeno. I rapporti $16:2=8:1=4:0,5$ sono definiti e costanti (sempre uguali ad 8).

La seconda legge asseriva che le quantità in peso di un elemento che si combinano con la stessa quantità di un altro elemento per formare vari composti, stanno fra loro secondo rapporti che possono essere espressi da numeri interi e generalmente piccoli. Per esempio, nell'acqua, come si è visto, vi sono 8 grammi di ossigeno per ogni grammo di idrogeno. Se invece si combinano con ogni grammo di idrogeno 16 grammi di ossigeno si ottiene l'acqua ossigenata che ha proprietà del tutto diverse.

Si credette di poter dedurre da queste leggi l'esistenza di corpuscoli indivisibili chiamati atomi e considerati come i più piccoli frammenti di materia di quella particolare specie. Evidentemente l'ipotesi superava i dati sperimentali. Il fatto stesso che l'atomo era nell'impossibilità di essere percepito, e solo una data quantità di quell'elemento manifestava le qualità ad esso appartenenti, doveva rendere più guardinghi gli assertori della teoria corpuscolare.

Del resto la nascita e lo sviluppo della termodinamica andava ormai insegnando che vi sono delle leggi che si applicano solo a fenomeni di massa e non sono applicabili ai singoli eventuali corpuscoli che dovrebbero costituire quella massa, e tanto meno ai corpi macroscopici dell'esperienza ordinaria. Il secondo principio della termodinamica riveste un'importanza fondamentale tra queste leggi statistiche. Esso in definitiva asserisce che l'entropia aumenta sempre, ossia che aumenta sempre nel mondo fisico la distribuzione disordinata delle parti costituenti un tutto. Queste leggi non sono deterministiche come le leggi che regolano il comportamento delle singole particelle e che con A. Eddington chiameremo leggi primarie¹. Sono solo leggi probabilistiche, e a poco a poco hanno invaso il campo della fisica.

Il problema che queste leggi sono venute a imporre si può esprimere nel modo seguente: Si possono ricavare matematicamente le leggi statistiche dalle leggi primarie, oppure le leggi primarie sono solo il camuffamento delle leggi statistiche e quindi sono ad esse riducibili? Si può asserire in linea generale che in un primo tempo è prevalso il primo punto di vista, ma a poco a poco il secondo è riuscito a prendere il sopravvento e ad imporsi. Tuttavia, sebbene non si potesse seguire nei fluidi il comportamento delle supposte particelle costituenti, chiamate "molecole", perchè in nessun modo è possibile osservarle direttamente, e quindi fosse necessario in questo caso adottare le leggi statistiche che regolano il comportamento dell'insieme, rimaneva tuttavia al centro delle ricerche il comportamento dei corpi solidi che si supponeva seguissero le rigorose leggi deterministiche della fisica classica. Eppure il sospetto doveva presentarsi ormai alla

¹ *La conoscenza del mondo fisico*, trad. it. di Cortese De Bosis e Lucio Gialanella, Bari, Laterza, 1935, pp. 97 ss.

mente dello scienziato e del filosofo. Poichè tutta la materia, compresi i corpi solidi, è costituita di corpuscoli impercettibili, e poichè in quanto impercettibili, è dubbio se debbono considerarsi veramente come corpuscoli, non può eventualmente darsi che anche i corpi macroscopici conseguano un'indeterminatezza che fatalmente si deve tradurre poi nelle leggi classiche destinate a regolare il loro comportamento? Si tratta di un dubbio di carattere aprioristico che in caso sarebbe dovuto nascere nella mente dei filosofi. Effettivamente il contingitismo francese sfiorò un simile dubbio, ma ad esso sfociò in maniera più clamorosa proprio la scienza fisica, sospintavi dalla sua dialettica interiore.

III - L'ELETTRONE. INAPPLICABILITA' DELLE LEGGI CLASSICHE ALL'ATOMO

Per spiegare un gran numero di fenomeni che nel frattempo si erano scoperti, come l'emissione e l'assorbimento della luce, il passaggio dell'elettricità attraverso i gas, l'effetto fotoelettrico, quello termoionico ed altri ancora, si dovette supporre che l'atomo non fosse un corpuscolo compatto e semplice, ma un vero e proprio meccanismo di cui, soprattutto in base agli esperimenti di Rutherford sul passaggio delle particelle α attraverso la materia, si stabilì il modello. Al centro il nucleo, costituente la parte elettricamente positiva dell'atomo, di dimensioni assai piccole rispetto ad esso ed in cui è concentrata quasi tutta la massa; alla periferia gli elettroni, particelle negative, ruotanti secondo orbite ellittiche.

Il modello era molto suggestivo, ma l'interesse che esso destava era negativamente controbilanciato dalla constatazione che non gli si potevano applicare le leggi classiche della meccanica e dell'elettromagnetismo alle quali si manteneva irriducibilmente in contrasto. Secondo queste leggi, una carica elettrica in movimento, dotata di accelerazione, come nel caso dell'elettrone, irradia continuamente onde elettromagnetiche¹. Ma allora la sua energia dovrebbe diminuire e in conseguenza la particella carica dovrebbe cadere sul nucleo. Secondo il calcolo che se ne può fare, la vita dell'atomo dovrebbe essere dell'ordine di 10^{-8} secondi, una vita dunque istantanea. Inoltre, in conseguenza di questa diminuzione d'energia, l'orbita pure dovrebbe impiccolirsi, e quindi la frequenza del moto, ed in conseguenza anche la frequenza della radiazione emessa, dovrebbe diminuire. Poichè allora un corpo verrebbe ad avere atomi con elettroni in tutte le possibili orbite, lo spettro corrispondente dovrebbe essere continuo. In realtà i gas emettono spettri di righe di frequenza costante.

¹ Secondo la formula dovuta a Larmor, $W = \frac{2}{3} \frac{\mu}{\pi} e^2 a^2$ dove μ è la permeabilità magnetica del mezzo in cui si muove la carica, v la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo considerato, a l'accelerazione del moto della carica e .

Di fronte a simili difficoltà i fisici non vollero rinunciare al modello di Rutherford e preferirono dichiarare che solo le leggi dovevano essere nuove e diverse da quelle classiche. Ma una variazione radicale di leggi non doveva trascinare con sé una variazione dei modelli? E questi d'altronde, per essere necessariamente assunti dal mondo macroscopico in cui valgono le leggi classiche, non avrebbero dovuto addirittura venir meno? Per il momento non si rifletté seriamente a questa grave imposizione dell'esperienza.

Le leggi nuove furono quelle proposte da Bohr nel 1913 e generalizzate poi da Sommerfeld. Il punto interessante di queste leggi è che esse partono dal postulato, in nessun modo giustificato a priori, che il movimento degli elettroni attorno al nucleo possa avvenire solo su determinate orbite i cui raggi costituiscono una serie non più continua ma discreta. Il postulato era esigito dai risultati della spettroscopia che offriva delle serie di righe disposte in varie categorie.

Intanto in altri campi altri fisici avevano urtato contro la necessità, imposta dall'esperienza, di sostituire le leggi classiche con altre leggi non più basate sulla continuità, bensì sull'ipotesi quantistica. In modo particolare Max Planck nel 1900 per dare una spiegazione soddisfacente al fenomeno dell'emissione del corpo nero¹, e Einstein nel 1905 per una teoria della natura della luce basata sul concetto di «quanto di luce»². Mentre il modello corpuscolare della materia si trovava in crisi per l'inapplicabilità delle leggi riguardanti i corpi ed i fenomeni macroscopici, Einstein, nella sua celebre memoria, introduceva, sia pure provvisoriamente a scopo euristico, un modello corpuscolare della radiazione in antitesi all'ipotesi fino allora prevalente.

IV - TEORIA CORPUSCOLARE E TEORIA ONDULATORIA DELLA LUCE

La teoria corpuscolare della luce era stata sostenuta da Newton, ma poi per l'impossibilità di spiegare certi fenomeni come quello dell'interferenza, era stata contrastata e vinta dalla teoria ondulatoria, sostenuta da Huyghens. Ma ora nuovi fenomeni venivano scoperti che la teoria ondulatoria non riusciva a spiegare in maniera soddisfacente. Einstein nella memoria citata si soffermava in modo particolare sull'effetto fotoelettrico e dimostrava che se ne poteva ottenere una spiegazione soddisfacente, se si riprendeva ancora il modello corpuscolare della radiazione, adattandolo alle nuove imposizioni empiriche. Com'è noto, quando una radiazione di alta frequenza cade su di una superficie metallica, da questa escono elettroni la cui energia è dovuta a quella della radiazione incidente.

Se i raggi incidenti sono luminosi o ultravioletti, il fenomeno è

¹ Verh. d. d. Phys. Ges. 2, 237 (1900); Ann. d. Phys. 4, 553 (1901).

² Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Ann. d. Phys. 17, 132 (1905).

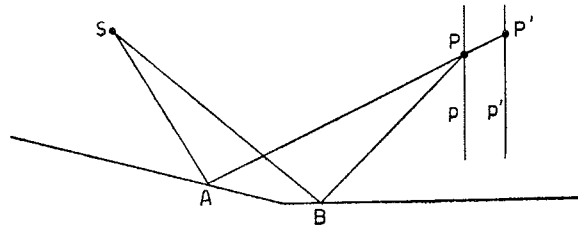
chiamato fotoelettrico. Quello che vi è di strano in questo fenomeno consiste nel fatto che l'energia di un singolo elettrone emesso non dipende dall'intensità della luce, ma dalla sua frequenza¹. Una luce più intensa determinerà un numero maggiore di elettroni emessi, ma non già una maggior energia di ciascuno di essi. Così si dovette abbandonare l'ipotesi che l'oscillazione del campo elettromagnetico della luce impiegata determini l'oscillazione degli elettroni fino ad un'ampiezza tale da essere lanciati fuori². Inoltre si può diminuire talmente l'intensità della luce, che l'energia incidente su di un atomo, durante tutta l'esperienza, nella supposizione che essa cada uniformemente sulla superficie metallica, sia molto minore della forza viva con cui viene espulso l'elettrone. Si deve concludere che dall'atomo deve essere assorbita una quantità di luce superiore a quella che cadrebbe su di lui (qualora si concepisca come un corpuscolo isolato e ben determinato) da una porzione corrispondente e altrettanto determinata di superficie d'onda. Ma allora l'onda non può più essere concepita nel solito modo tradizionale; essa infatti si dovrà pensare frantumata in granuli discreti, i famosi quanti di luce.

Anche l'effetto Compton, su cui non ci soffermeremo, permette di concludere a questo aspetto corpuscolare della radiazione.

E tuttavia la teoria corpuscolare non riesce a spiegare tutti i fenomeni della luce, tra i quali principalissimi quelli dell'interferenza e della diffrazione, che avevano indotto Huyghens a sviluppare la sua teoria ondulatoria.

Per poter seguire concretamente la linea logica del discorso che stiamo svolgendo, soffermiamoci un momento sul primo fenomeno, l'interferenza, quale è rivelata dagli specchi di Fresnel.

Sia S la sorgente luminosa, A e B due specchi, p uno schermo, p' un secondo schermo. P sia un punto sullo schermo p tale che la differenza tra i cammini ottici SAP e SBP sia un multiplo dispari di mezza lunghezza d'onda della luce impiegata.



¹ Com'è noto, si chiama intensità luminosa di una radiazione l'energia che essa trasporta in un secondo attraverso l'unità di superficie disposta ortogonalmente alla sua direzione di propagazione, mentre la frequenza è il numero delle oscillazioni al secondo.

² L'ampiezza delle oscillazioni infatti dipende dall'intensità.

Se in un primo tempo lo specchio B è coperto da uno schermo, in P cadrà la luce che ha descritto il percorso SAP. Ma se in un secondo tempo togliamo lo schermo dallo specchio B, in P vi sarà buio, mentre in altri punti vicino a P vi sarà una più intensa illuminazione. Se partiamo dalla supposizione che la luce sia costituita di corpuscoli luminosi, il fenomeno rimane inspiegabile. Come si può infatti pensare che i corpuscoli del percorso SAP siano impediti o deviati dallo scoprimento dello specchio B? Tanto più che sullo schermo p' il punto P' che è sul prolungamento della retta AP, appare illuminato. Si potrebbe avanzare l'ipotesi che la simultanea presenza in P dei corpuscoli provenienti da SA e di quelli provenienti da SB, li renda inefficaci. Ma perchè allora in altri punti si ha un rinforzo d'illuminazione? Del resto i fenomeni d'interferenza si producono anche quando la luce è talmente debole che ogni quanto entra nell'apparecchio dopo che è uscito il precedente¹.

V - L'IMPOSSIBILITA' DI UNA SUFFICIENTE RIVELAZIONE DELLE PARTICELLE ATOMICHE

Se tuttavia la radiazione sfuggiva a qualsiasi tentativo di rappresentarsela secondo un modello intuitivo, pareva più probabile la possibilità di afferrare intuitivamente l'aspetto e la natura delle particelle atomiche. Ma ben presto anche questa speranza si dimostrò illusoria. Basta riflettere un istante sul modo come queste particelle vengono rivelate dallo strumento scientifico.

Una particella neutra non può mai essere in alcun modo rivelata. Se si vuole, ad esempio, rivelare un atomo, occorre prima elettrizzarlo, ossia ionizzarlo, e dargli un movimento rapido. Ionizzare significa strappare ad un atomo neutro un elettrone e appiccicarlo ad un altro. Il primo atomo diventa allora uno ione positivo, il secondo uno ione negativo. Un elettrone rapido, o in genere una particella elettrizzata, s'incontra con gli atomi neutri del gas in cui eventualmente si muove e strappa ad alcuni di essi degli elettroni periferici, i quali a loro volta vanno ad attaccarsi ad altri. Così il gas si ionizza.

Consideriamo allora gli strumenti fondamentali per la rivelazione di una particella rapida ionizzata. Innanzitutto la camera di Wilson. È una camera contenente gas umido che viene raffreddato mediante una brusca espansione. Se questa espansione viene opportunamente regolata, il gas si condensa in minutissime goccioline attorno agli eventuali ioni che si trovassero nel gas, i quali quindi diverrebbero centri di condensazione. Se allora nell'istante in cui una particella carica passa attraverso la camera a ionizzare sul suo cammino gli atomi del gas, e in

¹ Sono i risultati delle esperienze di G. Taylor, « Proc. Camb. Phil. Soc. », 15, 114 (1909) e di Dempster e Batho, « Phys. Rev. », 30, 664 (1927).

cui per conseguenza si condensano su di essi le goccioline, si illumina la camera, queste goccioline che biffano la traiettoria della particella, formeranno tanti centri luminosi che diffondono la luce. Se in quel momento stesso scatta la fotografia, su di essa si potranno osservare le traiettorie delle particelle rapide ionizzanti segnate da queste goccioline brillanti.

La camera di Wilson subì dopo il 1911, anno della sua prima costruzione, notevoli perfezionamenti che la resero uno strumento fondamentale di analisi del mondo atomico, ma per il senso del nostro discorso bastano le indicazioni succinte ma essenziali che ne abbiamo dato.

Dalla descrizione risulta che la particella ionizzante non è per nulla fotografata in se stessa. Sono fotografate solo le goccioline che biffano l'eventuale traiettoria di un'entità che ci rimane in se stessa sconosciuta. « Eventuale traiettoria » abbiamo detto, perchè se questa entità non fosse un corpuscolo, si potrebbe ancora parlare di traiettoria?

Passiamo alla rivelazione delle particelle atomiche per mezzo delle emulsioni nucleari. L'emulsione fotografica, com'è noto, è costituita di gelatina nella quale sono immersi numerosissimi granuli di bromuro d'argento. Sebbene ognuno di essi abbia le dimensioni dell'ordine di qualche micron soltanto, è tuttavia composto di migliaia di atomi di bromo e d'argento associati. Quando i granuli sono colpiti dalla luce, reagiscono e formano l'immagine latente che diventerà poi palese quando subirà l'azione del rivelatore e del fissatore.

Se passa nell'emulsione una particella ionizzante rapida, essa penetrerà nei granuli di bromuro d'argento, incontrerà gli atomi che li compongono, e mediante la produzione degli ioni, agirà fisico-chimicamente su di essi e quindi sui granuli. Questi allora restano impressionati e forniscono essi pure un'immagine latente. Se allora si sviluppa la lastra, la serie dei granuli impressionati darà, per così dire, la traiettoria della particella.

Ma qui sorgono le difficoltà rilevate a proposito della camera di Wilson. Se la particella non fosse un corpuscolo, ma fosse, per esempio, l'increspatura propagantesi di un qualche etere in cui è immersa la materia sensibile, non si potrebbe più parlare di traiettoria. L'etere tuttavia a sua volta, non potendo essere fisicamente rivelato, rimane sempre qualcosa di fantomatico.

La rivelazione ottenuta per mezzo dei contatori Geiger-Mueller è ancora più indeterminata in riferimento al nostro scopo. I colpi del contatore, relativi alle scariche ottenute per il passaggio delle particelle, non ci possono certo istruire sulla loro natura. Il nome stesso di "particelle" non è per nulla legittimato dalla rivelazione dei contatori Geiger-Mueller, anche se posti "in coincidenza".

Se si volessero poi applicare metodi analoghi per individuare l'elemento fondamentale della luce, che si è rivelato esso pure come un granulo, un quanto, chiamato fotone, ci si troverebbe ancora di fronte alla medesima impossibilità. Quando un fascio di luce attraversa un qualunque mezzo torbido, la luce si rende visibile mediante una striscia luminosa, che può eventualmente essere sottilissima. Ma è chiaro che la striscia luminosa non è continua; è costituita dalle singole particelle materiali che diffondono la luce da cui sono colpite e che appaiono in conseguenza come piccoli punti brillanti. La successione dei punti, resi così visibili, non può rappresentare la traiettoria di un medesimo fotone. Un solo fotone infatti, che entri in azione con una particella materiale da cui è diffuso, darebbe un solo punto brillante e non già una serie di essi in modo da fornirci la rappresentazione di una traiettoria.

VI - L'IMPOSSIBILITA' DI UN MODELLO COERENTE COI DATI EMPIRICI

Riepilogando la situazione, i fisici, intorno all'anno 1925, dovettero constatare che il risultato delle esplorazioni sempre più numerose, profonde e accurate, compiute per costruire un modello soddisfacente della costituzione della materia e della radiazione, era addirittura disastroso. Non solo il modello planetario dell'atomo, come si è visto, rifuggiva dal sottomettersi alle leggi classiche che regolano sistemi del genere, ma le nuove formule, che introducevano arbitrariamente il discontinuo per poter interpretare i dati forniti dalla spettroscopia, e la loro interpretazione meccanica, che dal calcolo delle orbite pretendeva determinare i livelli energetici, si dimostrarono inadeguate ai fatti stessi. Infatti nel caso di atomi diversi da quello dell'idrogeno, o al più diversi dai sistemi idrogenoidi¹, la determinazione matematica dei livelli energetici era in aperto contrasto con quella sperimentale. D'altra parte, come abbiamo esaminato, la determinazione diretta della natura delle particelle atomiche si era rivelata impossibile.

Nè meno stridente rimaneva il contrasto nella determinazione della natura della luce e in generale della radiazione.

Si escogitarono e si proposero altri modelli intuitivi, ma tutti dovettero cadere davanti all'analisi dei dati di fatto forniti dall'esperienza. Eppure questo apparente fallimento segnava l'inizio di un più sensato atteggiamento di fronte ai fatti scientifici, e di una loro più logica interpretazione. Si pensò infatti allora di dover rinunciare per principio ai modelli intuitivi, per attenersi esclusivamente alle leggi matematiche che trovano conferma nell'esperienza. L'atomo, l'elet-

¹ Sono gli atomi degli elementi più leggeri, ionizzati in modo da aver perduto tutti i loro elettroni, eccetto uno. La carica del nucleo è, in queste circostanze, Ze se si indica con Z il numero atomico.

trone, il fotone, il protone erano stati considerati fino allora alla stregua dei corpi macroscopici che si sanno dotati di uno stato e di un movimento ben definito e controllabile, oltre che matematicamente, anche empiricamente. Ma con quale diritto si operava l'estensione alle entità atomiche e subatomiche, dal momento che quel controllo empirico era per esse impossibile? Precisamente parlando, quelle entità non si dovevano neppure chiamare "corpi", nè si doveva attribuire loro un vero e proprio "movimento", quale si riscontra nei corpi dell'esperienza ordinaria. A pari diritto si potrebbe pensare addirittura a qualcosa di mentale.

Per Arthur Eddington, ad esempio, « l'attività della materia è il nostro modo di riconoscere una combinazione delle misure di struttura; l'attività della mente è la nostra percezione del complesso di relazioni, la cui capacità di paragone costituisce la base di queste misure »¹. E per Bertrand Russel « un elettrone è un gruppo di eventi, e..., se l'elettrone è in un cervello umano, alcuni degli eventi che lo compongono sono probabilmente alcuni degli "stati mentali" dell'uomo a cui appartiene il cervello.... Tutto il resto di quanto si può dire è, più o meno, astratto e matematico »².

In realtà nessun punto di vista intuitivo è legittimo se pretende di esaurire la natura e la struttura della realtà atomica. Ogni modello deriva a noi dal mondo macroscopico, e non può quindi fornire una spiegazione al suo fondamento. Solo in quest'ordine di idee si doveva ricercare la soluzione delle antinomie fisiche riscontrate.

VII - IL TENTATIVO DI SOLUZIONE: LA MECCANICA QUANTISTICA

Due furono gli atteggiamenti assunti dai fisici nel momento della crisi, per eliminare il pericolo di incorrere nelle contraddizioni segnalate. Il primo fu scelto e chiarito da W. Heisenberg in una nota del luglio 1925³. In essa l'autore metteva a fuoco la constatazione che certe quantità riferite al modello atomico, come le coordinate di un elettrone in un dato istante, la sua velocità, il tempo impiegato a compiere un'orbita ecc, non erano mai state misurate direttamente.

Poichè anzi la loro determinazione indiretta, come pure le deduzioni che da esse si erano volute svolgere, portavano alle contraddizioni sopra accennate, era necessario presumere che dette grandezze non avessero un autentico significato fisico. Concludeva asserendo che per procedere logicamente e senza pericolo di contraddizione, si dovevano ricercare unicamente le relazioni tra grandezze osservabili, eliminando ogni modello intuitivo.

¹ *La natura del mondo fisico*, cit., p. 302.

² *Analisi della materia*, p. 320, cit. da A. EDDINGTON, *op. cit.*, p. 312.

³ *Zeitschrift f. Phys.*, 33, 879 (1925).

Heisenberg si pose effettivamente su questa strada ed elaborò la sua *algebra delle matrici* che rappresentava una novità nella sua applicazione alla scienza fisica. Il suo sviluppo portò non soltanto a ritrovare i risultati della teoria di Bohr e Sommerfeld, ma a scoprirne altri ancora che non si erano potuti far rientrare nelle precedenti teorie. La logica aveva guadagnato molto in questa maniera, perchè tutti i risultati, che si trovarono in concordanza con l'esperienza, discendevano esattamente da un prestabilito sistema coerente di postulati. Rimaneva tuttavia una grave difficoltà per il fisico, ed era la rinuncia completa ad ogni interpretazione geometrica o meccanica. Questi simboli matematici, se portano effettivamente a dei risultati che concordano con l'esperienza, pur non prestandosi ad un modello intuitivo, devono pure avere un significato, il quale quindi deve essere in qualche relazione, sia pure indiretta, col campo della fisica a cui quei simboli sono destinati in definitiva a servire.

Per questo motivo, il secondo punto di vista, ossia la meccanica ondulatoria, sviluppata in una serie di memorie da E. Schroedinger¹, dopo le prime geniali intuizioni di L. De Broglie², riallacciandosi a campi ed a leggi di fisica già note, si inserisce meglio nel terreno più strettamente positivo e intuitivo.

Lo Schroedinger parte dall'osservazione che le leggi classiche della meccanica del punto si possono esprimere in una forma analoga a quella delle leggi dell'ottica geometrica. Ora è noto che le leggi della ottica geometrica cadono in difetto quando si tratta di applicarle a fenomeni in cui intervengono diaframmi, schermi, fori, di dimensioni molto piccole, confrontabili colla lunghezza d'onda della luce impiegata. In questi casi l'ottica geometrica va sostituita coll'ottica ondulatoria. Analogamente le leggi classiche relative al punto può darsi che si debbano interpretare come approssimazioni di leggi meccaniche più generali. Poichè le prime sono analoghe a quelle dell'ottica geometrica, le seconde dovranno essere analoghe a quelle dell'ottica ondulatoria.

La via era dunque trovata e Schroedinger effettivamente elaborò su questa traccia la sua meccanica ondulatoria. Il vantaggio essenziale di questa teoria, rispetto a quella di Bohr e Sommerfeld, era rappresentato dal fatto che essa non postulava violentemente l'esistenza di orbite e livelli energetici discreti per l'atomo, ma piuttosto essi derivavano automaticamente dal suadente postulato che una funzione fosse finita e continua.

L'impostazione era dunque chiara, ma non fu altrettanto chiaro il risultato a cui essa portò. L'algoritmo matematico, usato da Schroedinger, operava su una certa grandezza ψ di cui si sapeva soltanto che

¹ « Ann. d. Phys. », 79, 361, 489, 734 (1926).

² Tesi presentata all'università di Parigi nel 1924; « Ann. de Phys. », 20, 3, 22 (1925).

soddisfaceva l'equazione caratteristica dei fenomeni ondulatori. Ma che cosa rappresentava essa in concreto? Non doveva trovare riscontro in qualche entità reale del mondo atomico? Schroedinger fu indotto a pensare che essa rappresentasse la densità elettrica, ma solo più tardi se ne diede la vera interpretazione che si collegava armonicamente agli sviluppi che nel frattempo Heisenberg per conto suo aveva dato alla sua teoria.

VIII - L'IMPOSTAZIONE PROBABILISTICA DEI PROBLEMI ATOMICI

Fu il Born che nel 1926 diede per il primo un'interpretazione probabilistica alla meccanica ondulatoria di Schroedinger¹.

Fissiamo dapprima l'attenzione sulla radiazione. I fenomeni ottici confermano in pieno le previsioni della teoria ondulatoria. Questa ultima si riduce in definitiva a stabilire, mediante l'equazione delle onde, quale sarà l'intensità di illuminazione I in ogni punto di uno schermo, il quale può essere anche la retina dell'occhio o una macchina fotografica. Quando si conosce questa distribuzione di intensità si conosce e quindi si può prevedere tutti i fenomeni ottici, la diffrazione, l'interferenza, la formazione delle immagini ecc. L'intensità di illuminazione I divisa per l'energia di un fotone, darà il numero dei fotoni che cadono nell'unità di superficie dello schermo nell'unità di tempo². I casi allora sono due. Se questi fotoni sono numerosi, la verifica consisterà nel riscontrare che effettivamente essi si trovano condensati secondo le proporzioni previste nei vari punti dello schermo. Ma se i fotoni sono pochi o magari uno solo, che significato può avere questa distribuzione prevista? Ecco, essa determina la densità di probabilità che un fotone sia nei vari punti dello spettro. È questa la genuina interpretazione da dare ai risultati dell'equazione delle onde. Da essa deriva anche la possibilità della verifica sperimentale nell'altro caso, ossia nel caso che i fotoni siano numerosi. Allora infatti, per la legge dei grandi numeri, o di Bernoulli, la distribuzione della probabilità è proporzionale alla distribuzione effettiva dei molti fotoni a disposizione.

Tutto questo è in armonia colle osservazioni sperimentali. Tutto il resto, come il movimento dei fotoni considerati alla stregua di corpuscoli che partono da un punto, si spostano descrivendo delle traiettorie e arrivando ad altri punti, non deve avere nessun valore scientifico, perchè sono tutte finzioni che non si possono neppure *in linea di principio* controllare mediante esperimenti fisici almeno concettualmente determinabili. Questa esigenza di una definizione operativa degli enti

¹ Zeits. f. Phys., 38, 803 (1926); e 40, 167 (1927).

² Vedi nota precedente sull'intensità d'illuminazione.

fisici, imposta da Heisenberg, è divenuta un cardine della fisica contemporanea.

In base a questo principio, si può ancora parlare di impulso di un fotone, perchè effettivamente nell'effetto Compton si può misurare l'azione di una radiazione sulle particelle materiali elementari. Con ciò tuttavia non si deve pensare che questo impulso si possa determinare con quell'esattezza che gli si potrebbe consentire qualora esso fosse pensato secondo il modello corpuscolare. Si potrà al più determinare la distribuzione della probabilità dei suoi valori. La posizione stessa di un fotone non ha senso, se la si esige secondo l'ordinaria accezione del termine. Si potrà, per esempio, determinare solamente la regione occupata dal «pacchetto d'onde luminose» entro cui si trova con certezza il fotone, e la distribuzione della probabilità della sua presenza nei vari punti della regione stessa. Heisenberg ha dimostrato che quanto più esattamente si determina la posizione di un fotone, tanto più indeterminato risulta l'impulso e viceversa. Questa indeterminazione rappresenta quindi il limite d'applicazione del concetto corpuscolare relativo al fotone, e sta a dimostrare che tale concetto è un concetto spurio e un'intuizione inadeguata.

Analogamente per le particelle materiali. Parve sbalorditivo nella fisica contemporanea che l'indeterminatezza dimostrata per il fotone valesse anche per queste particelle come l'elettrone, il protone, il neutrone, il nucleo e simili. Ma a questa conclusione si arriva con passaggi puramente matematici, in base al teorema di Fourier applicato ai fenomeni ondulatori. Ecco come può essere espressa: È impossibile anche concettualmente, ossia in linea di principio, determinare la posizione e l'impulso di una particella in un dato istante, oppure anche la energia di una particella con un esperimento che dura un certo tempo Δt , con una precisione superiore ad un certo limite stabilito dalle relazioni d'indeterminatezza di Heisenberg¹.

Se si volesse rendersi conto in qualche modo del significato fisico dell'impossibilità di una precisione assoluta nella determinazione di grandezze che solo se fossero assolute permetterebbero di concludere alla natura corpuscolare delle cosiddette particelle materiali, basterebbe pensare, per scegliere un esempio semplice, che quando si tentasse di determinare la posizione di una particella, si sarebbe inevitabilmente necessitati a comunicarle, per esempio illuminandola, un impulso di cui si conosce l'ordine di grandezza $h/\Delta x$, ma il cui valore preciso non si può conoscere neppure in linea di principio. Quest'ultima asserzione sembra paradossale ma è vera. Sofferamoci sopra un istante. Quando un quanto di luce colpisce la particella, questa che prima aveva l'impulso

¹ Chiamando con x, y, z le coordinate della particella, con Δ il loro incremento finito, con p il suo impulso, e con h la costante di Planck, le relazioni sono così espresse: $\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$, $\Delta y \Delta p_y \geq h/4\pi$, $\Delta z \Delta p_z \geq h/4\pi$; inoltre indicando con w l'energia e con t il tempo, $\Delta w \Delta t \geq h/4\pi$.

da misurare, lo varia perchè con l'urto riceve parte dell'impulso posseduto dal quanto incidente. Se si potesse conoscere l'impulso che rimane al quanto di luce dopo l'urto, si potrebbe determinare con esattezza anche l'impulso posseduto, sempre dopo l'urto, dalla particella. Ma per conoscere l'impulso del quanto di luce dopo l'urto, occorre conoscere l'angolo secondo il quale esso viene deviato o, più correttamente, diffuso, ossia in definitiva occorre conoscere la traiettoria che percorre dopo l'urto. Senonchè, come si è già dimostrato¹, la traiettoria di un fotone non la si può in alcun modo determinare.

IX - GLI ULTERIORI SVILUPPI DELLA QUESTIONE

Negli anni successivi a questa rivoluzionaria impostazione dei problemi fisici, si è precisato ed esteso il concetto di quell'indeterminatezza che entra ormai come una componente ineliminabile nei problemi di fisica atomica e che anzi ha assunto il ruolo di guida per la comprensione dei dati di fatto che strumenti sempre più precisi, minuziosi e grandiosi vanno rivelando con ritmo crescente. In conseguenza anche la duplicità d'aspetto dell'onda-corpuscolo tende sempre più a manifestarsi e a generalizzarsi nello studio dei fenomeni atomici, e nello stesso tempo a svanire per una più intima compenetrazione. Basti pensare all'« energia di scambio » introdotta da Heisenberg per spiegare le forze che tengono così ben compaginato e stabile il nucleo degli atomi. Vi accenneremo trattando brevemente del campo nucleare di Yukawa.

Com'è noto, una carica elettrica agisce, attraendo o respingendo secondo la legge di Coulomb, un'altra carica posta a una certa distanza. Non si può più pensare ai tempi nostri a un'azione a distanza, specialmente se si ammette, in base al principio della relatività, l'impossibilità di un'azione trasmessa istantaneamente, o anche con velocità superiore a quella della luce. Deve quindi esserci qualcosa che trasmette questa azione. Questo qualcosa lo si chiama in fisica « campo elettromagnetico ». In presenza di una particella carica, questo campo si perturba, come l'acqua di un lago colpita da un sasso, e questa perturbazione raggiunge l'altra particella carica che viene così attratta o respinta.

La cosa si complica quando le due particelle, invece che essere ferme, sono in movimento rapido l'una rispetto all'altra. Allora la forza che l'una trasmette all'altra non è relativa alla sua attuale posizione, perchè nel frattempo si è, per esempio, avvicinata. Si ha il fenomeno del « ritardo » di forza. Se si vuol trattare la cosa dal punto di vista della meccanica quantistica, si deve allora ricorrere ai fotoni « presi in prestito ». Una particella carica eserciterà la sua forza sull'altra mediante

¹ Vedi dietro, § V, in fondo.

l'alternativa emissione e assorbimento di questi fotoni, che corrispondono alle perturbazioni del campo elettromagnetico mediante le quali le cariche ferme si attiravano o si respingevano.

Se si vuole trattare allora l'interazione tra un protone e un neutrone che sono, secondo la teoria di Heisenberg oggi generalmente ammessa dai fisici, i costituenti del nucleo dell'atomo, si dovrà ricorrere ancora a un campo di forze, analogo al campo elettromagnetico, ma di nuovo tipo, il campo nucleare. La teoria di questo campo fu svolta, dopo i tentativi del nostro Fermi, dal giapponese Yukawa, e portò alla profetica previsione dei mesoni, specie di fotoni pesanti destinati a scomparire dopo breve vita. Essi equivarrebbero all'emissione di una radiazione e rappresenterebbero, come è stato detto, il cemento del nucleo. Il ragionamento che portò alla previsione della loro massa intermedia (da cui il nome di "mesoni") tra quella dell'elettrone e quella del protone, è semplice. L'energia di uno di questi elementi deve almeno essere, secondo la celebre equazione di Einstein, mc^2 , dove m è l'eventuale sua massa a riposo. L'energia data e presa in prestito dalle particelle in interazione sarà quindi almeno uguale a quella incorporata da questi elementi, ossia mc^2 . Per l'ultima relazione d'indeterminatezza già scritta¹, il processo di tale prestito deve allora avvenire per lo meno in un tempo $h/2\pi mc^2$. Poiché l'azione può essere trasmessa al massimo colla velocità della luce, essa potrà al massimo compiere una distanza uguale a $h/2\pi mc$, che è il tempo prima calcolato, moltiplicato per la velocità della luce c . Perchè questa distanza sia equivalente ad alcune volte 10^{-13} cm, che rappresenta il raggio d'azione delle forze nucleari, la massa deve allora essere alcune centinaia di volte quella dell'elettrone. La scoperta empirica dei mesoni, dotati di queste caratteristiche, confermò l'esattezza dell'intuizione².

Altri fenomeni stanno addirittura a dimostrare, oltre che l'intima coesistenza, anche l'equivalenza fisica e la mutua trasformazione dell'aspetto corpuscolare in quello ondulatorio e viceversa. Si tratta del fenomeno noto col nome improprio di *creazione* di coppie, ciascuna formata di un elettrone negativo e di un elettrone positivo, ottenute mediante fotoni, e viceversa del fenomeno dell'*annichilazione* di coppie elettrone-positrone con la conseguente emissione di fotoni.

L'equazione dell'elettrone di Dirac aveva postulato l'esistenza dell'elettrone positivo prima ancora della sua scoperta effettiva. Ebbene questa stessa equazione, opportunamente modificata, si adattava anche al protone e allora veniva a postulare l'esistenza di un'altra antiparticella, l'antiprotone, che fu poi effettivamente scoperta nel 1955. La creazione di questa particella dall'energia si è ottenuta all'università

¹ Vedi sopra al § VIII, nota.

² I mesoni μ scoperti per la prima volta nei raggi cosmici, non soddisfacevano le esigenze della teoria, ma poi Powell scoperse i mesoni π e l'accordo fra teoria ed esperienza fu così raggiunto.

di California, lanciando protoni accelerati fino a 6,2 Bev, contro un bersaglio di rame. Dopo la collisione del protone lanciato contro il protone del bersaglio, si ottengono i due protoni originari più la nuova coppia protone-antiprotone, a spese dell'energia del protone proiettile.

La fondamentale ambiguità della realtà fisica si dimostra così ineliminabile, e rappresenta lo scotto che è necessario pagare all'indeterminatezza che accompagna inesorabilmente ogni nostra valutazione e misurazione delle entità fisiche. Abbiamo parlato addirittura di "antinomia". Non si tratta di un'antinomia logica, ma di un'antinomia a carattere prettamente fisico. Due intuizioni diverse si incrociano procedendo in due direzioni opposte, con movimento che va da una totalità (aspetto ondulatorio, campo di forze) a un'entità puntiforme (aspetto corpuscolare) e da un'entità puntiforme ad una totalità, nel tentativo di circoscrivere una realtà che non può essere afferrata nella sua vera identità e che vive quindi nella sua impenetrabile sfera d'indeterminatezza. Questo è il punto da tener fermo in quella sua purezza che è tale da superare le caratteristiche del connotato fisico, per assumere addirittura una colorazione metafisica. Dimenticarlo nel tentativo di fissare una definizione esauriente, significa retrocedere a posizioni prequantistiche. Verso di esse ci sembra che perfino Heisenberg si sia mosso in qualche modo, quando ha detto: « Queste particelle, alla luce della teoria dei quanti, non sono più vere nello stesso senso che gli oggetti della vita di ogni giorno, gli alberi, le pietre, ma esse appaiono piuttosto come astrazioni derivate dal materiale d'osservazione, vero quest'ultimo nel senso proprio »¹. E ancora: « La materia nasce quando la sostanza energia assume la forma d'una particella elementare. Per quanto si sa oggi esistono parecchie di tali forme, e si conoscono ora circa 25 specie diverse di particelle elementari: si hanno buone ragioni per ammettere che tutte queste forme sono manifestazioni di certe strutture matematiche fondamentali, dunque conseguenze d'una legge fondamentale esprimibile in linguaggio matematico, di cui le particelle rappresentano la soluzione nello stesso modo che, ad esempio, i differenti stati d'energia dell'atomo d'idrogeno rappresentano le soluzioni dell'equazione differenziale di Schroedinger. Le particelle elementari sono dunque le forme fondamentali che deve assumere la sostanza energia per trasformarsi in materia, e queste forme devono essere determinate da una legge fondamentale esprimibile in termini matematici »². Una determinazione conclusiva questa legge non la potrà dare in alcun modo, perchè essa stessa è costruita d'indeterminazione proprio per il suo carattere matematico che presuppone la quantità, il numero, e quindi l'esteriorità delle cose le une rispetto alle

¹ Conferenza tenuta nel 1958 per le « Rencontres internationales de Genève », pubblicata in *Discussione sulla fisica moderna*, Torino, 1959, p. 14.

² *Ibid.*, p. 17.

altre: tutte nozioni derivate dal mondo macroscopico. Verso quelle stesse posizioni prequantistiche accenna pure lo Schroedinger, quando si sforza a tutto potere di persuadersi che l'aspetto ondulatorio riesce a spiegare tutti i dati forniti dall'esperienza, a differenza dello aspetto corpuscolare che, secondo il suo parere, sarebbe meno valido¹.

In definitiva possiamo quindi concludere che la fisica è costretta da una parte a usare di queste intuizioni complementari per evitare che le teorie matematiche astratte perdano ogni significato e ogni punto di contatto colla realtà il cui mistero intendono proprio di sondare, ma d'altra parte, come queste intuizioni sono ammesse, risulta che esse si escludono a vicenda, mentre nessuna riesce da sola a fornire un quadro soddisfacente e completo della realtà che intendono rappresentare. La ragione noi l'abbiamo già considerata fin dall'inizio di questo lavoro. Ogni intuizione ci viene dal mondo macroscopico in quanto tale, e sarebbe pertanto assurdo adattare queste intuizioni alle realtà su cui questo mondo macroscopico è costruito, colla pretesa di esaurirne così la comprensione. Indubbiamente il mondo macroscopico deve portare un qualche riflesso del volto degli elementi che lo compongono, ma è vero anche il contrario, ossia che noi proiettiamo abusivamente su questi elementi aspetti che sono esclusivi del mondo in quanto è macroscopico. Ma forse questa antinomia, che si è ingannevolmente tentati di deplorare, costituisce proprio la molla di ogni progresso scientifico, l'impulso ad aprire senza posa nuove vie di indagine nel misterioso e meraviglioso dedalo del mondo, per trasformarlo gradualmente in cosmo.

¹ Conferenza tenuta nel 1952 e pubblicata in *Discussione*, cit., pp. 35 ss. Abbiamo detto « si sforza », perchè l'autore stesso ripetutamente riconosce in definitiva la necessità di servirsi di ambedue gli aspetti.