

QUIRINO MAJORANA (\*)

**LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITÀ  
ED IL SUCCESSIVO PROGRESSO SCIENTIFICO (\*\*)**

Ho accettato il cortese invito del Direttore di questo Istituto, per quanto non sia facile, in una sola conferenza, svolgere l'argomento annunziato nel suo titolo. Com'è noto, in questa prima metà del secolo xx, le scienze fisiche hanno compiuto enorme progresso, che, si può dire, si è iniziato con la scoperta della radioattività e di alcune altre, compiutesi precisamente verso la fine del secolo precedente. Voler discor-

(\*) Socio nazionale.

(\*\*) Conferenza tenuta in occasione del cinquantenario della scoperta, nell'Istituto Superiore di Sanità, Roma il 17 ottobre 1946.

Prima dell'inizio della Conferenza il Direttore dell'Istituto, prof. D. Marotta ha pronunciato le seguenti parole:

«L'Istituto Superiore di Sanità riprende con oggi la consuetudine, interrotta per necessità, delle lezioni su argomenti scientifici di attualità, invitando per esse i maggiori rappresentanti della scienza, italiani e stranieri.

«Inaugura quest'anno il ciclo il prof. Quirino Majorana, che io non certo debbo presentare ai nostri studiosi, tanta rinomanza ha già da tempo il suo nome; ma debbo ringraziarlo vivamente per avere voluto Egli accogliere il nostro invito di esporre una rassegna di quel che nel campo degli studi sulla radioattività si è compiuto dalla scoperta di Becquerel ai nostri giorni, nel breve tempo di un cinquantennio.

«Né può recare meraviglia che la rievocazione della scoperta Becquerel e il suo successivo rapido progresso scientifico si tenga in questo Istituto, perché la radioattività ha grande rapporto con la Sanità e perché in questo Istituto si sono compiute installazioni modernissime fra le quali l'impianto ad un milione di volt per l'ottenimento col metodo di Fermi di sostanze radioattive artificiali, il cui impiego consente utili ricerche nel campo della biologia e fa bene sperare per la terapia.

«Il nostro impianto che fu iniziato con la collaborazione di Enrico Fermi, funziona nell'Istituto dal 1939.

«Partroppo la collaborazione del Fermi è mancata per il suo trasferimento in America; ma i nostri fisici Prof. Trabacchi e prof. Bocciarelli, hanno lavorato e lavorano nel nostro Istito-

rere dunque del progresso scientifico avvenuto dopo Becquerel, equivarrebbe a rifare la storia della fisica di quest'ultimo cinquantennio, il che esorbiterebbe dai limiti di una semplice commemorazione. D'altra parte, in un ambiente di studi severi e proficui, come questo di Roma, nel quale valorosi giovani hanno costituito una Scuola che fa onore alla scienza italiana; di questi, qualcuno avrebbe potuto trattare con tutta competenza lo stesso argomento. Ma mi è sembrato che a me, più che ad ogni altro fisico sperimentale, spettasse l'obbligo di parlare dinanzi a Voi. Infatti, per privilegio non invidiabile, credo essere ormai in Italia, forse l'unico fra tali fisici che abbia assistito, controllandone ogni passo, al detto progresso scientifico, sin dal suo inizio.

Svolgere il tema propostomi, in modo completo, non sarà dunque possibile; mi limiterò perciò a darne una pallida idea, chiedendo venia sin d'ora, se non sarò breve. E se le mie scarse qualità oratorie non permetteranno al mio discorso la più adeguata forma, mi auguro che l'interesse delle cose che Vi ricorderò possa farvele ascoltare con benevolenza.

Mi sia ancora lecito osservare che tale mio discorso si svolge in una cornice di notevole decoro, data l'importanza di questo Istituto superiore di Sanità, di cui nessuno di Voi ignora le grandi benemeritenze. Il suo Direttore, prof. Domenico Marotta, con lungimirante iniziativa, che va al di là delle semplici e burocratiche mansioni e finalità, a cui l'Istituto stesso è destinato, lo ha fornito, nei suoi vari laboratori, di quanto meglio oggi, nel campo della Scienza e della Tecnica, è necessario per occasionarne il migliore progresso. Così, per quanto concerne la fisica, alla direzione del relativo laboratorio è preposto il mio valente collega, prof. Giulio Cesare Trabacchi; e tale laboratorio è dotato dei mezzi più idonei, in particolare, per lo studio della radioattività, della disintegrazione atomica e della energia atomica. Per accennare alla grande utilità di simili impianti, che fanno giudicare

---

tuto in perfetta unione con i fisici dell'Università di Roma professori Amaldi, Wick, Agno, Cacciapuoti, portando a termine importanti ricerche.

« Fino ad oggi sono stati eseguiti nel nostro Istituto n. 16 lavori sperimentali di fisica moderna, tutti pubblicati nei « Rendiconti » dell'Istituto e in altri autorevoli Periodici italiani o stranieri.

« Questa attività in comune continua sempre efficiente ed efficace e darà certo ulteriori importanti frutti, mentre il nostro Istituto è sempre lieto di mettere a disposizione di studiosi i propri mezzi di indagine e di fornire loro, senza il concorso di altri enti, i mezzi necessari per il lavoro. Lavoro che in questo campo da anni si esplica nel puro interesse della ricerca scientifica, non per i danni ma per il benessere dell'umanità ».

unico in Italia questo Istituto, basta rilevare i numerosi lavori scientifici che vi si compiono da parte della schiera di studiosi a cui ho prima accennato; e specialmente notare che lo stesso Enrico Fermi aveva pubblicamente dichiarato di aver potuto compiere talune delle sue più importanti ricerche o scoperte, grazie ai mezzi di cui questo Istituto è dotato ed alla collaborazione dei professori Marotta e Trabacchi.

Dopo queste doverose premesse, passo allo svolgimento del tema propostomi.

### Vita ed opera di Enrico Becquerel.

Enrico Becquerel fece parte di una stirpe o dinastia che, di padre in figlio, diede notevole contributo al progresso della Fisica. Il nonno, Antonio Cesare Becquerel (1788-1878), contemporaneo di Ampère e Faraday, lasciò pregevoli lavori di elettricità ed elettrochimica. Egli fu per quarantanove anni professore di fisica nel Museo di Storia Naturale di Parigi. Il padre, Alessandro Edmondo Becquerel (1820-1891), forse altrettanto noto del Nostro, compì importanti ricerche ottiche, principalmente sulla fosforescenza, identificandola, sotto certi riguardi, con la fluorescenza. La sua opera è raccolta in due volumi: *La lumière*. Egli fu dapprima professore al Conservatorio di Arti e Mestieri di Parigi, e poi succedette al padre Antonio, nel Museo di Storia naturale.

Fu terzo di tale dinastia, il Nostro, Enrico Becquerel (1852-1908), che cominciò la sua carriera nello stesso anno della morte del nonno, con la qualifica di aiuto al Museo di Storia Naturale. Enrico Becquerel aveva allora compiuto interessanti ricerche sul potere rotatorio magnetico, e sulla sua dispersione; osservò, persino, tale fenomeno sotto l'azione del debole campo magnetico terrestre, ed, in seguito, anche nella materia tanto espansa, come nei gas. Si debbono a lui, in collaborazione col padre, interessanti ricerche sulla temperatura del sottosuolo; e, poi, sul magnetismo temporaneo del nichel e del cobalto. Seguendo le orme del padre, negli studi della fosforescenza, scoprì che questa, dopo essere stata provocata dalle onde luminose (di solito di breve lunghezza d'onda), viene spenta dalla luce rossa od ultrarossa. Il fenomeno è anche interessante, perché permette lo studio di uno spettro a righe, ultrarosso, con l'illuminare con luce rossa od ultrarossa, uno schermo già reso fosforescente: le righe dello spettro in esame vi vengono segnate in nero su fondo chiaro. Tale applicazione perdette in seguito d'importanza, per l'invenzione del bolometro di

Langley. Successe alla morte del padre, nel 1891, nell'insegnamento nel Museo di Storia Naturale.

Veniamo così al lavoro che ha dato luogo, con la scoperta della radioattività, alla maggior celebrità di tanto Uomo. Era avvenuta, sul finire del 1895, ad opera di W. C. Röntgen, la scoperta dei raggi che portano il suo nome, ossia dei raggi X; e ciò, in modo del tutto inaspettato ed impreveduto. Come si sa, non si seppe comprendere subito, quale fosse la vera natura di tali raggi: lo stesso Röntgen, in linea di pura e da nulla giustificata ipotesi, pensò potere trattarsi di vibrazioni longitudinali dell'etere cosmico, la cui ammissione dominava allora la fisica. E si sa ancora, come ciò fu riconosciuto non vero.

Ricordo ancor oggi, a quale fervore di nuove speculazioni scientifiche, diede luogo la scoperta del fisico tedesco, in tutti i laboratori fisici del mondo. In particolare, avendo Röntgen, mandato al mio Maestro Blaserna, alcune delle fotografie ottenute con i suoi raggi, qui in Roma, fummo tutti interessati al nuovissimo e strano fenomeno, non assimilabile ad altri sin allora conosciuti. Furono così iniziate ricerche svariate, al fine di studiare altre caratteristiche di tali raggi. Così, il compianto e già valoroso fisico Alfonso Sella ed io, in collaborazione, scoprimmo l'azione dei raggi X sulle scintille elettriche. Questo fatto fu messo in relazione dallo stesso Röntgen (venuto in visita dal Blaserna verso l'aprile del 1896) con altra scoperta poco prima da lui compiuta, e cioè della proprietà dei raggi X, di scaricare i corpi elettrizzati.

I fisici si domandavano, tra l'altro, come avvenisse la produzione dei raggi X, nei tubi Crookes, che allora venivano adoperati a tale scopo. Fu così emessa, da H. Poincaré, l'ipotesi che il fenomeno fosse connesso con la fluorescenza, della parete anticatodica di quei tubi; e più propriamente che il vetro, eccitato dall'arrivo del fascio catodico, venisse ad emettere, oltre che luce comune (di fluorescenza), la nuova specie di raggi. Per verificare l'esattezza di una simile ipotesi, fu pensato di sostituire alla sorgente eccitatrice data dai raggi catodici, la luce comune, ed al vetro, una sostanza per essa fosforescente. Un'esperienza fondata su una tale concezione, fu provata da altri fisici, usando del solfuro di zinco o di calcio; ma inutilmente.

H. Becquerel ebbe allora l'idea di verificare se i nuovi raggi si formassero proprio durante l'eccitazione della fluorescenza, mediante la luce comune. Dispose così su di una lastra fotografica, protetta da carta nera, uno strato di polvere di solfato doppio di uranio e potassio; esponeva poi il tutto alla luce del sole, per delle ore o giorni. Consta-

tava così, che la lastra veniva impressionata. Da questa esperienza, Becquerel fu dapprima indotto a ritenere che la luce solare fosse la causa del fenomeno. Oggi, qualcuno potrebbe sorprendersi del Suo equivoco. Ma, ben riflettendo, si comprende la perfetta logicità del Suo giudizio, che, allora, nell'ignoranza delle leggi del nuovo fenomeno, lo spingeva a metodici tentativi. Tanto Egli era-convinto della giustezza di tale giudizio, che, essendosi accorto come l'annerimento della lastra fotografica si manifestasse anche in giorni nuvolosi (26, 27 marzo 1896), ammise che le nuove radiazioni così scoperte, dovessero persistere anche molto tempo dopo che era cessata l'azione della luce; e ciò in modo analogo, ma molto più spiccatamente, di quanto avviene nel caso della comune fosforescenza.

Sarebbe molto istruttivo, ai fini di valorizzare l'acume e la correttezza del metodo sperimentale adottato da Becquerel, seguire passo a passo i resoconti delle Sue scoperte ulteriori. Qui, mi limito a dire che fu soltanto verso la fine del 1896, che Becquerel si convinse della indipendenza del fenomeno da Lui scoperto, dalla luce solare. Il sale di uranio da Lui usato, aveva dunque la proprietà di emettere continuamente radiazioni di nuovo tipo, paragonabili, grosso modo, ai raggi X. Ma mentre in questo caso si ha una causa palese del fenomeno (la scarica elettrica attraverso il tubo Crookes); nella nuova esperienza di Becquerel non poteva dirsi altrettanto. Appariva che quel fenomeno dovesse ascrivere ad una strana, nuova proprietà, caratteristica della materia. La *radioattività*, ossia i *raggi Becquerel* (così, presto chiamati, in di Lui onore), erano stati scoperti.

Le ulteriori ricerche di Becquerel si intrecciano con quelle dei coniugi Curie, che presero subito a studiare l'argomento. Ed anzi, Egli le compì, talvolta, servendosi di materiale radioattivo fornitogli da M.<sup>o</sup> Curie. Tra i nuovi risultati da Lui ottenuti, va citata la proprietà dei corpi radioattivi, di scaricare quelli elettrizzati, analogamente a quanto fanno i raggi X ed, in certo modo, la luce ultravioletta. Qualche tempo dopo (1899), prese a studiare la deviabilità dei raggi in un campo magnetico; nella quale constatazione era stato preceduto però da altri, come Stephan Meyer ed Egon von Schweidler. Si accorse così, che tale deviabilità è diversa per le varie sostanze radioattive, senza però arrivare nettamente a distinguere la molteplicità dei vari componenti, di un determinato fascio di raggi. Comunque, l'esperienza indicava che almeno una parte dei raggi è costituita da particelle elettrizzate, e ciò a differenza dei raggi X, che non sono affatto deviabili dal campo magne-

tico. Oltre a ciò, Becquerel, dopo qualche risultato contraddittorio, finì per stabilire che i nuovi raggi non subiscono né riflessione, né rifrazione, né polarizzazione; ed in ciò sono analoghi ai raggi X.

La complessità dei fenomeni osservati, da Lui o dai coniugi Curie, gli fanno temere che, pur sembrando la radioattività corrispondere ad una proprietà dell'atomo, potesse darsi che, per quanto l'uranio puro manifesta la proprietà radioattiva, ciò potesse venir causato da impurezze del metallo. Oggi, si sa che ciò non è esatto.

Becquerel ebbe parecchi riconoscimenti, del grande valore della Sua opera; principale fra tutti, il premio Nobel (1903), diviso con i coniugi Curie, che tanto proficuamente trassero lo spunto dalla Sua scoperta, per le loro mirabili ricerche.

Becquerel morì improvvisamente nel 1908, lasciando un figliuolo, Jean, che, già allora, cominciava ad esser noto, continuando l'opera dei suoi avi, con l'occuparsi di fisica sperimentale, ed in particolare di ottica.

#### Sviluppi della scoperta di Becquerel.

È bene ora accennare, seguendo la dicitura del tema della Conferenza, agli ulteriori sviluppi dell'importante scoperta della radioattività. Si deve anzitutto a M.<sup>e</sup> Curie, l'esplicito riconoscimento della *qualità atomica* del nuovo fenomeno, nel senso cioè, che esso costituisce una proprietà dell'atomo, non influenzabile, sino allora, da cause esteriori. Oggi sappiamo che, in certo modo, noi possiamo controllare dall'esterno, con bombardamenti atomici, lo sviluppo di fatti radioattivi. Poi, M.<sup>e</sup> Curie e Schmidt, indipendentemente, hanno scoperto che un altro metallo, oltre l'uranio, ha proprietà radioattive, il torio. Più tardi, si è riconosciuto che uranio e torio sono i capistipi di *gruppi o famiglie*, nelle quali, per successive trasformazioni o filiazioni, rientrano quasi tutti i corpi radioattivi che la tecnica ha lasciato scoprire.

Ma ben più profonda doveva essere l'opera dei Curie. Si era arrivati a stabilire quale fosse il grado di attività radioattiva dell'uranio puro, valutando, per esempio, la rapidità con cui un corpo elettrizzato nell'aria, si scarica (*camera di ionizzazione*). E con sorpresa, fu trovato che talvolta minerali di uranio, per esempio la pechblenda, che avrebbe dovuto essere meno radioattiva di quel metallo, in essa contenuto in minima dose, lo erano invece ben quattro volte di più. Se ne dedusse che quel minerale dovesse contenere una sostanza molto più radioat-

tiva dell'uranio stesso. Il fatto sorprendente aprì la via ad un nuovo e proficuo mezzo di ricerca. In particolare, M.<sup>e</sup> Curie, volendo separare dal minerale quella sostanza, si servì non soltanto dei mezzi che la fisica e la chimica mettevano a disposizione del ricercatore, ma inoltre della proprietà stessa dei corpi radioattivi, di scaricare quelli elettrizzati, già scoperta da Becquerel. Si continuava, così, nell'eseguire tali separazioni successive, a lavorare sulle parti che dessero luogo a quella scarica, servendosi della accennata camera di ionizzazione. Con tale metodo, si arrivava a separare, da notevolissime quantità di minerale (come quintali o tonnellate), piccolissime parti (come qualche decigrammo), con potere radioattivo enormemente superiore a quello del minerale. Naturalmente, per eseguire operazioni di tale genere, occorrevano metodi industriali e non da piccolo laboratorio di ricerca.

Con tale metodo, M.<sup>e</sup> Curie scoprì il nuovo corpo radioattivo, che venne chiamato *polonio*, in onore della patria Sua. Successivamente, fu scoperto con metodo analogo, il *radio*. Polonio e radio furono altresì riconosciuti come elementi chimici nuovi, le cui caselle del sistema periodico di Mendelejeff erano sin allora rimaste vuote. La loro radioattività risultò enormemente maggiore di quella dell'uranio puro. Fra gli elementi chimici, il radio è la sostanza più radioattiva che si conosca: essa lo è circa 2.000.000 di volte più dell'uranio.

A precisare le caratteristiche del fenomeno radioattivo, diciamo dapprima che questo fenomeno, se presentato da uranio, torio, radio, ci appare praticamente costante, in considerazione del tempo relativamente breve (quello della nostra vita), nel quale possiamo compiere l'esame del fenomeno. Non così avviene per il polonio, la cui attività, insieme con la sostanza stessa, si esaurisce in alcuni mesi.

Circa la misura di tale progressivo affievolimento, diverso, come si è detto, da sostanza a sostanza, si distingue, anzitutto, la cosiddetta *costante radioattiva*  $\lambda$  (essa è data dalla relazione  $\lambda = -dN/N dt$ , dove  $N$  rappresenta il numero di atomi, presente nella sostanza, in un istante qualunque;  $t$ , il tempo), cioè il rapporto tra gli atomi scomparsi ed il tempo in cui la scomparsa è avvenuta; essendo tale rapporto riportato ad un solo atomo. Si distingue inoltre, il tempo chiamato *vita media dell'atomo*,  $\tau$  (si dimostra che  $\tau \cdot \lambda = 1$ : la costante radioattiva è inversa della vita media); ed infine, il *tempo di dimezzamento* o *periodo della sostanza radioattiva*,  $T$ , che è dato da  $T = 0,693 \tau$ .  $T$  è il tempo dopo il quale la sostanza radioattiva, progressivamente disintegrandosi, si riduce a metà della sua massa.

Come esempio, si ha, per extrapolazione dalle osservazioni sperimentali, che la vita media del torio è dell'ordine di 10 miliardi di anni; quella dell'uranio, di 6 miliardi di anni; quella del radio, di 2200 anni; quella del polonio, di 97 giorni, ecc. Vi sono sostanze con vita media estremamente breve, come il torio C' (una filiazione del torio) che ha vita media soltanto di un miliardesimo di minuto secondo.

Da quanto precede, si può dedurre che, avendo il radio una vita media di solo 2200 anni, quei campioni di tale sostanza che noi siamo riusciti a separare dalle rocce, debbono esistere in esse, da un tempo che ha solo l'ordine di grandezza di quello del periodo storico dell'umanità, e non maggiore. L'uranio, invece, od il torio, che hanno vita media dell'ordine di miliardi di anni, doveva preesistere in epoche geologiche, molto antiche, od esser presente già, all'epoca della formazione del sistema solare.

L'emissione di raggi Becquerel (nella parte deviabile dal campo magnetico) corrisponde a materia, che sfugge dalla sostanza radioattiva. Inoltre, come si è accennato, da questa sfugge continuamente altra materia, corrispondente ai prodotti di trasformazione. Così, per il radio, avviene che esso, oltre a tre qualità di raggi che si chiamano  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , (gli  $\alpha$  sono nuclei di elio; i  $\beta$  sono elettroni negativi; i  $\gamma$  sono raggi simili ai raggi X), emette continuamente un gas chiamato *emanazione*, o più propriamente *radon*, che è l'ultimo elemento (cioè quello a peso atomico maggiore) del gruppo dei *gas nobili* (quelli cioè che non hanno alcuna affinità chimica, e perciò non si combinano con alcun altro elemento). Il radon è un elemento radioattivo, con vita media di qualche giorno. Esso è utilissimo per scopi terapeutici. Inoltre, il radio, nel suo processo di disintegrazione, dà luogo a formazione di radio B, radio C, radio C', ecc., sino al piombo. Tutti questi prodotti sono radioattivi, meno il piombo che rappresenta il limite della disintegrazione. Durante questo processo, si ha anche fuoruscita di energia, che è contenuta nel corpo radioattivo. Essa può presentarsi, sia nella forma cinetica (i raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , che hanno caratteristiche materiali, sono emessi appunto essendo dotati di una certa velocità, differente da caso a caso; a ciò corrisponde una certa quantità di energia cinetica); oppure, secondo alcune teorie, come energia raggianti (data dai raggi  $\gamma$ , simili ai raggi X); o, infine, sotto forma di calore, che rimane localizzato nei prodotti di disintegrazione.

Così, per esempio, per il radio, si è trovato che esso emette, ogni ora, 135 calorie, per ogni suo grammo. Si calcola perciò, che alla completa



disintegrazione di tale grammo (per il che occorrerebbe attendere un tempo teoricamente infinito; mentre che se si attendesse soltanto un tempo uguale al *periodo o tempo di dimezzamento*, il risultato a cui ora accennerò sarebbe ridotto a metà; tale periodo, per quanto si disse, è per il radio di circa 1500 anni), corrisponderebbe la liberazione di  $3,7 \cdot 10^9$  calorie, ossia il calore sviluppato dalla combustione di 5 quintali di carbone.

#### Altre scoperte.

La scoperta dei ricordati fatti avvenne sul finire del secolo scorso; ed essi rappresentano, in sostanza, l'ulteriore sviluppo di quella di Becquerel. Ma, inoltre, il passato secolo, a parte tutto quanto è affermato dalla fisica classica (che nell'attuale secolo è stato soggetto a qualche modifica o revisione), e principalmente partendo da Galvani e Volta, ci lasciò in eredità altre nuove conoscenze e problemi da risolvere.

Elenchiamo anzitutto le dette nuove scoperte, comprendendovi anche quelle di cui ora ci siamo occupati:

1° Il *fenomeno fotoelettrico*. Esso fu osservato, casualmente, per la prima volta, da Hertz, nel 1887, nello studio delle onde elettromagnetiche. Fu ripreso verso la fine del secolo scorso da parecchi fisici come Halwachs, Righi, Elster e Geitel. Esso si schematizza dicendo che la luce che colpisce alcuni metalli e particolarmente quelli alcalini, promuove da essi la fuoruscita di elettroni negativi.

2° I *raggi X*, di cui abbiamo già discorso.

3° Il *fenomeno Zeeman*. Seguendo la teoria elettronica sviluppata da Lorentz, Zeeman scoprì nel 1895 l'azione del campo magnetico sull'emissione di luce, da parte della materia. Il fenomeno, che è perseguibile per ragioni sperimentali, soltanto nel caso di emissione di luce, da parte dei gas o vapori incandescenti (perché soltanto così si hanno delle righe luminose, ossia spettri), ha molta importanza, nell'ulteriore sviluppo delle teorie fisiche; ma esso non interessa le sommarie notizie del nostro discorso.

4° La *radioattività*, scoperta per opera di Becquerel e sviluppata dai coniugi Curie, di cui abbiamo già parlato.

5° *Precisazioni sull'elettrone negativo*. Per quanto l'elettrone (ultima particella elettrizzata) fosse già conosciuto, in qualche modo, da più decenni, per lo studio dei fenomeni di scarica elettrica attraverso i gas; la sua identificazione più precisa avvenne, anch'essa, sul finire

del secolo, con la determinazione del rapporto fra la sua carica elettrica e la sua massa materiale; e successivamente, dei valori di queste grandezze.

6° Sempre verso la fine del secolo scorso, come è noto, una interessante applicazione delle teorie ed esperienze elettromagnetiche, fu fatta da Guglielmo Marconi. Ma l'importanza scientifica di tale applicazione fu meglio riconosciuta in seguito, avendo essa dato luogo sostanzialmente, alla scoperta della *ionosfera*. Questo strato di atmosfera ionizzata, all'altezza di 100 chilometri e più dalla superficie della terra (il quale strato è provocato dalle radiazioni solari), permette le trasmissioni radio a grandi distanze, per successive riflessioni delle onde su di esso.

La conoscenza dei fatti ora elencati esaurì, quasi, la ricerca di fenomeni interessanti cospicui ammassi di materia. Al fisico non restava, si può dire, che lo studio dell'ultima struttura della materia stessa, cioè quello della cosiddetta *fisica atomica* o *corpuscolare*.

### I problemi del nuovo secolo.

Ma l'eredità lasciataci dal secolo XIX conteneva anche, come si è accennato, alcuni difficili problemi da risolvere, che contrastavano gravemente con taluni principii della fisica classica, principii che avevano dominato la scienza e tutto il suo progresso, in tale secolo. Fra essi citerò i cinque principali:

1° Interpretare l'emissione di energia raggianti, e più propriamente quella del cosiddetto *corpo nero*, portato ad una certa temperatura.

2° Dare spiegazione del risultato negativo della famosa esperienza di Michelson, o di altre consimili.

3° Chiarire quale fosse la natura dei raggi X.

4° *Idem*, per la radioattività, e quale fosse l'intimo processo delle trasformazioni radioattive.

5° Quando questi problemi fossero stati risolti, si sarebbe aperta la via alla comprensione della *struttura dell'atomo*, ed al *controllo della sua energia*.

Esaminiamo separatamente questi cinque problemi ed i modi con cui fu cercato di risolverli.

Circa il primo problema, ricorderò che la allora recente teoria di Wien esigeva che il *corpo nero* (si intende con ciò un corpo qualunque,

che sia capace di assorbire tutte le radiazioni che lo colpiscono; esempio: il nero fumo) *eccitato*, cioè portato ad una certa temperatura, dovesse emettere energia raggiante, principalmente localizzata verso le brevissime lunghezze d'onda, cioè verso l'ultravioletto molto spinto. Ora, ciò non corrisponde né alla comune esperienza, che fa vedere come l'energia raggiante dal nerofumo è rossastra per temperature di poco superiori ai 500°, e bianca, ricca di ultravioletto, come negli archi a carbone, per temperature di qualche migliaio di gradi; né con le precise misure di Lummer e Prigsheim. Tutto ciò fa vedere che l'emissione del corpo nero obbedisce ad una legge, detta di Wien (che è altra cosa della teoria di egual nome, più sopra ricordata; secondo la quale quel corpo presenta un massimo di emissione per una certa lunghezza di onda, tanto più corta quanto più alta è la temperatura a cui il corpo stesso è portato, conformemente a quanto l'esperienza dimostra.

Una geniale intuizione di Planck, giusto al principio di questo secolo, gli fece intravedere la nuovissima e rivoluzionaria *teoria dei quanti*, con cui veniva spiegata l'emissione di energia raggiante da parte del *corpo nero*. Secondo essa, questo ente energia, che, anche secondo la fisica classica, può assumere forme svariate, non può scambiarsi che per quantità finite: i *quanti*. La nuova teoria fu gravida di conseguenze numerose ed importanti. Essa, come diceva Chwolson, può considerarsi come un faro luminosissimo, che ha guidato tutto il progresso scientifico del nuovo secolo. Ma quale differenza vi ha tra le concezioni della fisica classica e quella di Planck! Allora, il fisico era abituato a dare caratteristiche locali e temporali, quasi perfettamente definite, ai fatti osservabili; nella moderna teoria nessun concetto intuitivo ci guida ad immaginare quali sieno le vere caratteristiche di questo ente energetico detto *quanto* di cui non si conosce altro che la misura (determinabile con la precisione di un qualche ‰), ed il fatto che esso può esser qualificato, indifferentemente, come una qualunque forma energetica. Forse, può la nostra mente venire appagata in parte, nella sua bramosia di indagare sempre più a fondo i fenomeni naturali, osservando che con la teoria dei quanti si viene a dare una struttura atomistica, oltre che alla materia, all'altro ente ugualmente importante della natura, l'energia. Ma ciò non trova altro appoggio che in considerazioni di carattere matematico. Inoltre, mentre per gli atomi materiali, secondo la interpretazione chimica o di Mendelejeff, la natura non ne produce che 92 (o circa 250, comprendendovi i così detti *isotopi*); oppure se, invece di parlare di atomi, ci si riferisce agli ultimi costituenti della materia, o

*particelle elementari* (di cui diremo), soltanto una mezza dozzina; di *quanti* si possono prenderne in considerazione un'infinità. Infatti, la relazione fondamentale di Planck dice:  $\epsilon = h\nu$ , dove  $\epsilon$  è il quanto energetico,  $h$  la costante universale scoperta da Planck, ed  $\nu$  la frequenza della radiazione che si considera, e che convoglia energia raggiante. Ora, potendo questa frequenza  $\nu$ , assumere qualsiasi valore, si comprende che di *quanti*, con valori differenti l'uno dall'altro, ve ne possano essere, come si è detto, un'infinità.

Una conseguenza della teoria dei quanti si ha subito, pensando alla costituzione di uno *spettro* cosiddetto *continuo*. Esso è dato dai corpi solidi o liquidi, portati all'incandescenza. Ma realmente tale spettro non può essere continuo, altrimenti, dovendo contenere tutte le possibili frequenze tra i suoi limiti estremi, ed essendocene di queste un numero infinito, l'energia complessiva dello spettro sarebbe infinita. Per cui nello spettro, qualunque esso sia, in un istante determinato, non può esser compreso che un numero finito di frequenze, i cui valori cambiano continuamente, con legge statistica o casuale, dando a noi la illusoria sensazione della continuità.

Passando a dire del secondo problema (*interpretazione dell'esperienza di Michelson*) osserviamo anzitutto che la teoria dei quanti non portava senz'altro all'abolizione della teoria eterea, secondo cui l'energia raggiante si propaga da un punto all'altro dello spazio, convogliata dall'ipotetico mezzo *etere cosmico*. Infatti questo avrebbe potuto trasmettere a intervalli opportuni di tempo i singoli *quanti*, perdendo, sia pure, la caratteristica di continuità operatoria. Vedremo ora, che fu proprio il risultato di quella esperienza che indusse i fisici ad abbandonare la concezione dell'etere. Ricordiamo brevemente in che cosa essa consista.

La concezione eterea aveva il difetto di non portare a nessun controllo diretto, dell'esistenza di tale misterioso ente: l'etere cosmico; che per altro, con tanto successo, durante il secolo XIX, aveva permesso lo sviluppo della teoria ondulatoria e di quella elettromagnetica. Vi furono perciò alcuni fisici che intrapresero delicate ricerche sperimentali, al fine di ottenere quel controllo; fra essi, l'americano Michelson, in collaborazione di Morley. L'esperienza di Michelson, come la si chiama semplicemente, è basata sul concetto di cercare qualche modificazione nel propagarsi della luce, quando variano le condizioni di moto, tra l'ambiente in cui si procede all'esperimento ed il mezzo etereo. Secondo questo proposito, Michelson sperimentava con un certo dispo-

sitivo (che per brevità non descrivo), inviando un raggio di luce o parallelamente al moto della Terra lungo l'eclittica, oppure perpendicolarmente. Supponendo, per semplicità, che il sistema solare sia, col Sole, immobile nello spazio, si comprende facilmente che le due esperienze (portando ad una determinazione del tempo impiegato dalla luce a percorrere la stessa distanza, nel dispositivo sperimentale, situato in due diverse posizioni) non dovrebbe dare lo stesso risultato; e ciò, in dipendenza di una presumibile corrente apparente di etere che, fisso col Sole, si dovrebbe manifestare nel caso del moto della luce parallelamente a quello della Terra. Tale esperienza, ripetuta più volte, ebbe esito del tutto negativo.

Questa constatazione non poteva spiegarsi che in due modi: o l'etere esiste veramente, ed allora esso dovrebbe venir trascinato completamente dalla materia che è in moto rispetto ad esso: oppure, rigettando del tutto la teoria classica e negando l'esistenza dell'etere. L'ultima di queste ipotesi è quella a cui sostanzialmente i fisici oggi si attengono, se non vogliono confinare il significativo di questo ente, che tanto consenso aveva ottenuto nel secolo passato, in un puro simbolismo, causa delle più strane contraddizioni spaziali e temporali.

A dar forza all'abbandono dell'ipotesi eterea, ha molto contribuito l'opera di Einstein, con un rilievo che a lui darà forse la maggior gloria. Egli, partendo dalla considerazione del fenomeno fotoelettrico, dedusse precisamente che l'estrazione di un elettrone dalla materia, per opera delle radiazioni, è causata da un *quanto* isolato e preciso di energia; e cioè da ciò che si chiama un *fotone luminoso*. In natura, non vi è dunque che materia e fotoni energetici luminosi, che operano gli scambi energetici, fra la stessa materia. In certo modo, la teoria emissiva di Newton, dopo un paio di secoli, è venuta a risorgere, sia pure con veste mutata, con più nette precisazioni e confortata dall'esperienza.

Il terzo problema da risolvere nel nuovo secolo, si riferiva alla ricerca della natura dei *raggi X*. Si può dire che tali raggi, nel primo decennio del secolo, fecero onore al loro nome. Si era cominciato ad ammettere, conservando ancora la vacillante teoria dell'etere, che essi potessero corrispondere a *onde di esplosione*, propagantisi in tale ipotetico mezzo. Ma non fu che verso il 1912, che si comprese la loro reale natura ondulatoria, caratterizzata cioè da un preciso valore di lunghezza d'onda. I raggi X rientravano così, nel quadro delle onde elettromagnetiche, completandolo, in certo modo, dal lato di quelle cortissime. L'idea informatrice di tale principio si deve a Laue. L'espe-

rienza l'ha confermata, mediante la scoperta della diffrazione dei raggi X, analoga a quella della luce comune, ma osservata mediante reticoli di struttura molto più fina di quelli piani artificiali, e che sono costituiti dai cristalli naturali; questi assumono il nome di *reticoli spaziali*. Si poté così determinare la lunghezza d'onda di tali raggi, fissandola a qualcosa come 10.000 volte più piccola, di quella della luce comune. Naturalmente, anche ai raggi X si applicò il principio quantistico: i loro fotoni risultano così, di frequenza 10.000 volte maggiore della luce, ed altrettanto più energetici.

Il quarto problema che abbiamo elencato, corrispondeva alla più completa interpretazione della *natura dei raggi emessi dai corpi radioattivi*, e del modo con cui tale emissione avviene. Lo stesso Becquerel si era occupato della deviazione in un campo magnetico dei suoi raggi. Tale deviazione indicava, già allora, la presenza in quelle radiazioni di particelle o corpuscoli elettrizzati. Questo fatto differenziava, almeno una parte delle radiazioni in parola, dai raggi X, che, come la luce ordinaria, non sono deviabili. Successive e più accurate ricerche fecero presto riconoscere che la radioattività consiste nell'emissione di tre specie di raggi che, come si è detto, furono chiamati  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Gli  $\alpha$  sono corpuscoli elettrizzati positivamente; i  $\beta$ , ancora corpuscoli, ma elettrizzati negativamente; i  $\gamma$ , sono fotoni, simili ai raggi X, ma di lunghezza d'onda circa 10 volte più piccola, e perciò molto più penetranti. I raggi  $\alpha$  e  $\beta$  hanno cariche elettriche che stanno nel rapporto di 2 a 1, e sono, come si è detto, di segno contrario. La carica dei  $\beta$  è uguale a quella degli elettroni negativi. Conosciute le cariche di tali particelle, dalle loro deviazioni in campi magnetici, si deducono i valori delle loro masse materiali. Si trova così, che gli  $\alpha$  hanno massa 4 volte superiore all'atomo o più propriamente al nucleo di idrogeno; essi risultano perciò essere costituiti da *nuclei di elio* (vedremo poi il significato di ciò). I  $\beta$  hanno invece una massa molto più piccola, e propriamente di 1/1840 del nucleo di idrogeno; essi hanno cioè la stessa massa dei corpuscoli chiamati elettroni negativi, le cui caratteristiche erano già state precedentemente precisate. I raggi  $\beta$  sono perciò elettroni negativi. I raggi  $\gamma$ , che, come si è detto, sono fotoni, non hanno perciò alcuna carica elettrica, il che corrisponde alla loro mancanza di deviazione in campo magnetico. Si può, inoltre, ammettere, in prima indagine, che essi non abbiano massa materiale. O, se pure, seguendo la teoria della relatività, ne hanno una che è ancora più piccola di quella degli elettroni su riportata.

### Struttura dell'atomo; nucleo ed elettroni extranucleari.

Stabilito il principio quantistico, abolito l'etere cosmico, chiarita la natura dei raggi X e della radioattività, si venne ad aprire la via per la risoluzione del quinto problema prima elencato e cioè la comprensione della *struttura della materia*, ossia del suo più minuto costituente: l'*atomo*. Ora, qualcosa di questo problema era stato compreso, per la manifestazione radioattiva di alcuni corpi od elementi a peso atomico più elevato, come l'uranio, il torio, l'attinio, il polonio, il radio, ecc.; in quanto che questi corpi hanno la proprietà di lasciar sfuggire dal loro interno, nuclei di elio, elettroni negativi ed altri corpi di trasformazione (tutto ciò, come si è detto, oltre che energia cinetica, raggi  $\gamma$ , o calore). Questo fatto era chiaro indizio che gli indicati corpuscoli fossero già dei costituenti della materia. La nostra intuizione ci fece sospettare che analoga costituzione, sia pure più semplice, ma per conseguenza più stabile, dovessero avere tutti gli altri elementi chimici. E, del resto, il fenomeno fotoelettrico, che è anzi constatabile in modo più vivace con corpi non radioattivi (quali i metalli alcalini) ci svela che essi possono lasciar sfuggire elettroni negativi, per altra causa (l'arrivo su di essi di luce comune o meglio ultravioletta). Vi è inoltre ancora un modo per far emettere elettroni dalla materia; esso è dato da un altro fenomeno, di cui, per brevità non abbiamo parlato: il *fenomeno termoionico*, o *fenomeno Edison*, scoperto ancora sulla fine del secolo scorso. Basta infatti scaldare un metallo a temperatura piuttosto elevata, per ottenere tale effetto. Come è noto, su questo principio sono basate le valvole termoioniche, che tanta importanza hanno poi acquistato in elettrotecnica.

Da tutti codesti fatti, si può con certezza concludere che l'elettrone è un costituente della materia, o più propriamente dell'atomo. E siccome l'elettrone ha carica elettrica negativa, resta spiegato perché la materia, che ha perso solo degli elettroni, rimanga carica positivamente, come l'esperienza dimostra. Si rifletta ora alla circostanza che la massa materiale dell'elettrone è, come si è detto, piccolissima; da ciò si inferisce che la sfuggita di elettroni non può generare nella materia una notevole o sensibile diminuzione di peso. Ma siccome essa rimane carica positivamente, si arriva alla conclusione che, degli atomi, quasi la totalità della massa, deve essere carica positivamente. Si intravede così

in modo molto intuitivo, che ciascun atomo deve essere costituito da una parte pesante carica positivamente e da un certo numero di elettroni negativi, con carica complessiva uguale, in valore assoluto, a quella di detta parte; con ciò si giustifica perché l'atomo non eccitato appare neutro, ossia non elettrizzato.

Partendo da questa conclusione, Rutherford suppose che l'atomo di un qualsiasi elemento debba essere costituito da un sistema solare in miniatura, nel quale l'astro centrale, elettrizzato positivamente, chiamato *nucleo dell'atomo*, è circondato da elettroni, intorno ad esso orbitanti. Si ha però, oltre a quella delle dimensioni, la fondamentale differenza, fra atomi e sistemi astronomici, per cui nell'atomo le forze attrattive che legano nucleo ed elettroni sono elettriche, mentre nei sistemi astronomici sono newtoniane.

Simili caratteristiche dell'atomo furono fissate da Rutherford non dalla semplice intuizione, ma anche da una precisa esperienza. Egli delimitava da un preparato di radio un sottile fascio di particelle  $\alpha$  che, venendo a battere su di una lastra fotografica, vi occasionavano la formazione di una piccola macchia. Se però egli faceva passare il fascio, prima di colpire la lastra, attraverso una sottilissima lastra metallica, ancora abbastanza trasparente ai raggi  $\alpha$ , la macchia sulla lastra risultava alquanto sfumata. Un simile risultato non poteva interpretarsi in altro modo, che col modello di atomo su descritto. Infatti, se questo fosse costituito da un mezzo uniformemente distribuito nello spazio, ed i singoli atomi fossero l'uno all'altro addossati, il pennello di particelle  $\alpha$  si sarebbe, se mai, affievolito, ma non diffuso. L'esperienza permise inoltre a Rutherford, in base alla misura della diffusione delle particelle  $\alpha$ , di stabilire qual fosse il rapporto tra la dimensione di tutto l'atomo e quella del suo nucleo. Rutherford trovò così che avendo tutto l'atomo una dimensione dell'ordine di un *centomillesimo* di centimetro (ciò si deduce dalla conoscenza del numero di Avogadro), quella del suo nucleo non è che di circa un *bilionesimo* di centimetro, cioè 10.000 volte più piccola.

Per quanto rappresentasse già, il modello dell'atomo di Rutherford, qualcosa di molto soddisfacente, esso apparve presto incompleto. Infatti, in tale concezione, nulla era stabilito circa le dimensioni delle orbite che sono percorse dagli elettroni. Poco dopo (1912), Bohr perfezionò quella concezione, in modo molto comprensivo, applicando precisamente il principio quantistico di Planck. Egli osservò che il fatto per cui un elettrone orbita intorno al nucleo, corrisponde ad una certa



localizzazione di energia, che è negativa, se si riferisce all'elettrone portato a distanza infinita dal nucleo. Infatti, in tale posizione l'elettrone ha energia che possiamo dire nulla. Ma quando esso cade sul nucleo, fermandosi su di una certa orbita, si è perduta (dal sistema nucleo-elettrone) una certa quantità di energia, diversa col variare del diametro dell'orbita; e tanto maggiore quanto l'orbita è più piccola, ossia vicina al nucleo. Da ciò risulta che le varie orbite possibili hanno ciascuna un proprio *livello energetico*. Questi livelli, precisamente in applicazione della teoria di Planck, non possono differire che per *quanti interi*; da ciò risulta che sono possibili soltanto alcune orbite, che vengono denominate da Bohr *orbite privilegiate*. Ciascun elettrone non può percorrere che una di queste orbite privilegiate, e non altre intermedie. I livelli energetici di tali orbite differiscono per un numero intero di *unità quantiche* che l'analisi fa vedere corrispondere ad  $h/2\pi$ , essendo  $h$  la costante universale già trovata da Planck.

Il modello rende conto dell'emissione di energia raggiante da parte dell'atomo, che sia sottratto ad azioni esterne (come quelle che esistono nel caso di materia non sufficientemente espansa: solidi, liquidi od anche gas compressi). Se esso è *eccitato* (per azione meccanica, termica, ecc.) ha assorbito dell'energia, al che corrisponde il passaggio di uno o più dei suoi elettroni da un'orbita interna ad una esterna, o meglio ancora al completo allontanamento di tali elettroni dal nucleo (nel qual caso, si ha il fatto della cosiddetta *ionizzazione*; e l'atomo apparisce carico di elettricità positiva, il che lo costringe a subire l'azione dei campi elettrici esterni e a *migrare*, dal che il nome che esso acquista di *ione*. L'atomo ionizzato ha però la tendenza a ritornare allo stato neutro, il che avviene quando nel suo intorno vi sono elettroni liberi, che vengono attratti dalla carica elettrica del suo nucleo, ed a fermarsi su di un'orbita vuota. In questo processo singolo, l'atomo emette della energia, sotto forma di una riga spettrale. Tutto ciò permette la precisa interpretazione degli *spettri luminosi* o più propriamente delle *serie spettrali*, emessi dagli atomi dei vari elementi.

La più brillante applicazione del modello atomico ora descritto, fu fatta da principio, da Bohr, nel caso dell'atomo più semplice: quello dell'idrogeno. Esso risulta costituito dal nucleo più leggero possibile, che viene chiamato *protone* e da un solo elettrone, che gli orbita intorno. Per l'atomo di idrogeno, Bohr ha fatto vedere che, partendo dalla conoscenza della costante  $h$  di Planck, e della carica elettrica e della massa materiale dell'elettrone, si perviene a determinare le lunghezze d'onda

delle righe spettrali delle sue serie, con una approssimazione molto soddisfacente. Si noti, che le accennate grandezze, che entrano nel calcolo in parola, nulla hanno a che fare, apparentemente, con i fenomeni ottici. Ciò darebbe una prova della piena attendibilità dell'atomo di Bohr, se esso non si fosse, a sua volta, dimostrato imperfetto o difettoso.

Si è cercato di applicare il modello atomico di Bohr a tutti gli elementi conosciuti. Si è così immaginato che gli atomi di tali elementi sieno costituiti da nuclei centrali, di massa progressivamente crescente, nel compiere l'esame del sistema periodico di Mendelejeff. In prima approssimazione, procedendo i *pesi atomici* degli elementi, da 1 a 238, si ammette che i nuclei dei rispettivi atomi contengono altrettanti protoni o nuclei di idrogeno, riuniti insieme: 1 per l'idrogeno, 4 per l'elio, 7 per il litio . . . 238 per l'uranio. Ma oltre al nucleo, ciascun atomo ha, come si è detto, gli elettroni extra-nucleari. E si ammette che, passando da un elemento al successivo, del sistema periodico, l'atomo si accresca di un elettrone. In conseguenza, l'idrogeno ha un solo elettrone, l'elio 2, il litio 3, . . . l'uranio 92. Questi numeri, da 1 a 92, rappresentano perciò anche il numero d'ordine progressivo dei 92 elementi, e si chiamano *numeri atomici*.

Dati questi chiarimenti, tenuto conto che l'elettrone ha una massa di  $1/1840$ , si conferma quanto si era già detto, che cioè quasi tutta la massa dell'atomo è concentrata nel nucleo. Si rileva inoltre, che mentre, passando da un elemento al successivo, il numero atomico (che chiamiamo  $Z$ ), si accresce di una sola unità; il peso atomico (che chiamiamo  $N$ ) cresce più rapidamente e senza seguire una legge semplice. Da questa considerazione, si deduce inoltre che, se la costruzione atomica fosse data solo da quanto abbiamo detto, la carica positiva del nucleo verrebbe a crescere, passando da un elemento al successivo, più rapidamente di quella negativa di tutti gli elettroni extranucleari. Per cui, mentre l'idrogeno non eccitato sarebbe neutro, tutti gli altri elementi chimici presenterebbero un eccesso di carica positiva, il che non è. Si è riparato a tale incompletezza del modello atomico, in un primo tempo, ammettendo che nel nucleo sieno contenuti anche tanti elettroni negativi, da corrispondere alla differenza tra peso atomico e numero atomico, e cioè  $N - Z$ . Con ciò il nucleo avrebbe una carica elettrica positiva data da  $N - (N - Z) = Z$ , cioè esattamente uguale alla complessiva carica degli elettroni extranucleari, e la neutralità di tutti gli atomi non eccitati verrebbe assicurata. Vedremo però in se-

guito, come questa ipotesi degli elettroni supplementari nell'interno del nucleo, sia stata abbandonata, in seguito alla scoperta del *neutrone*.

Si è detto che a ciascun'orbita elettronica corrisponde un certo *livello quantico* che stabilisce quale sia l'energia corrispondente all'elettrone che la percorre. Ora, avendo ammesso che il numero massimo di elettroni che orbitano intorno al nucleo è di 92 (ciò avviene solo per l'uranio), questo numero ci rappresenta il numero massimo di orbite; giacché è da pensare che su di un'orbita non possa circolare più di un solo elettrone. Non è a credere però che tutte queste 92 orbite abbiano livelli quantici molto differenti. In prima approssimazione, si può ammettere che i possibili livelli quantici di tali orbite sieno 7; e cioè precisamente tanti quanti sono i *periodi* del sistema periodico di Mendeleeff. Come è noto, questi periodi si distinguono progressivamente, coi numeri da 1 a 7; e l'ultimo di questi è incompleto, arrestandosi con l'uranio (al di là di questo elemento, la natura non sa produrre elementi stabili). A ciascuno di questi periodi, corrispondono un certo numero di elementi; il numero di questi elementi varia da un periodo all'altro, con una certa legge, su cui non ci fermiamo. Orbene, gli stessi periodi corrispondono ad una denominazione nuova che si è data ai rispettivi livelli quantici, e cioè K, L, M, ... Q. Gli elementi costituenti ciascun periodo appartengono così allo stesso livello quantico o più precisamente a livelli quantici molto poco fra di loro differenti. Il seguente specchio riassume tutto ciò:

Periodi . . . . .	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
Numero di elementi . . . . .	2	8	8	18	18	32	6
Denominazione del livello quantico	K	L	M	N	O	P	Q

Per chiarire la distribuzione delle orbite elettroniche possibili fra i vari livelli quantici o fra i vari periodi, ci riferiamo alla figura 1, nella quale sono segnati alcuni elementi, con le rispettive orbite. Per semplicità grafica, ciascun livello è segnato con una sola orbita. Su questa si sono segnati, ove sia occorso, più di un solo elettrone. Con ciò, si è voluto indicare che tali molteplici elettroni, pur avendo, in prima approssimazione, la stessa energia, circolano su orbite distinte quasi identiche, e, naturalmente, diversamente orientate nello spazio a tre dimensioni. A ciascun livello o periodo, corrisponde il segnato numero massimo di orbite od elementi, che si va completando col procedere dal principio alla fine di ciascun periodo. All'inizio di questo, restano sempre com-

pletati, in ciascun elemento, i livelli precedenti. Le proprietà chimiche ed anche alcune proprietà fisiche (che in certo modo possono riprodursi periodicamente; da ciò deriva il nome di sistema periodico) dipendono dal numero di elettroni contenuti nell'ultimo livello che va man mano saturandosi. Quando il livello viene costituito dal massimo numero di orbite possibili (che è dato da quello degli elementi di ciascun periodo)

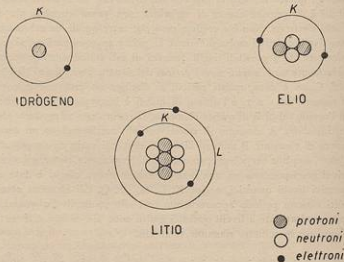


Fig. 1.

si ha a che fare con un elemento che difficilmente può diventare liquido o solido e che non ha alcuna affinità chimica: si tratta dei cosiddetti *gas rari* o *nobili*. Il nucleo del primo di questi elementi (nucleo di elio) ha una grande stabilità, al punto che, come si è detto, esso vien espulso in modo integro nelle disintegrazioni atomiche, corrispondenti al fenomeno radioattivo. Non si può dire che tale stabilità si mantenga per tutto il gruppo dei gas nobili; infatti l'ultimo di questi è costituito dalla *emanazione del radio* o, come si dice meglio, dal *radon*, che è un gas radioattivo, di corta vita media.

E superfluo precisare che gli schemi della figura 1 si riferiscono ad atomi non eccitati, nel quale caso, o mancherebbero degli elettroni in qualcuna delle orbite segnate, oppure a queste si aggiungono delle

altre esterne di livello più prossimo a zero. In tale caso, l'atomo sta per emettere delle righe spettrali.

Si è già detto che le orbite appartenenti allo stesso livello (da K a Q), pur potendosi in prima approssimazione ritenere identiche, non lo sono realmente. La struttura dell'atomo è di fatto più complessa di quanto finora si è voluto spiegare. Di ciò si ha notizia, per l'esame della conformazione dei vari spettri, che quasi sempre non sono costituiti da semplici righe sottili, succedentisi secondo una elementare legge. Questo sarebbe il caso delle serie spettrali dell'idrogeno, che in prima approssimazione, corrispondono ad una certa *formula di Balmer*, conosciuta sin dal 1885, cioè molto prima dell'avvento delle teorie di cui ci stiamo occupando. Ma tanto quelle dell'idrogeno, come quelle di tutti gli altri elementi, oltre ad apparire sotto forma di linee luminose più o meno sottili, lasciano scorgere una *struttura fine od iperfina*, che si sovrappone alla principale; e ciò avviene, oltre ad un fenomeno più complesso, che si verifica per elementi a peso atomico più elevato dell'idrogeno o dell'elio, consistente nella suddivisione delle singole righe spettrali in doppietti o tripletti, ecc., più o meno riavvicinati.

A giustificare queste ed altre divergenze dal quadro di concezioni teoriche, basate sulle più semplici e sommarie constatazioni sperimentali, il fisico è stato, poco alla volta, costretto ad introdurre in quel quadro concetti sussidiari. Di essi, senza trattenerci a darne, sia pur sommaria, spiegazione, ne presentiamo l'elenco: variazione della massa dell'elettrone con la sua velocità (del qual fatto si hanno, in certi casi, prove sperimentali); anche in conseguenza di tale fatto, possono le orbite elettroniche essere *circolari* od *ellittiche*; le varie orbite di un determinato livello possono perciò essere alquanto differenti ed esse non saranno più contraddistinte dallo stesso numero quantico (che ne esprime l'energia); si è ammesso così che ciascun'orbita può avere un *numero quantico totale* ed uno *azimutale*; all'elettrone che circola su di un'orbita viene, per le leggi dell'elettromagnetismo, a corrispondere un *momento magnetico*, in quanto che l'elettrone possiede una carica elettrica; l'elettrone, per se stesso, viene a possedere un certo *momento*, o come si dice *spin*, che può essere *cinetico* o *magnetico*, e questi *spin* corrispondono a rotazione dell'elettrone intorno ad un proprio asse. Tutti questi concetti sussidiari hanno servito a poter attribuire agli elettroni orbitanti intorno al nucleo, supplementi di energia, che così vengono a contraddistinguere, in seconda approssimazione, le caratteristiche delle orbite di uno stesso livello.

Ma per applicare i precedenti concetti, il fisico si è inoltre servito di nuove *meccaniche statistiche*, come quella di Bose-Einstein o l'altra di Fermi-Pauli, applicabili rispettivamente ai fotoni o agli elettroni. Inoltre, nel rendersi conto delle possibilità di trasferimento di un elettrone da un'orbita ad un'altra, si sono stabilite delle regole o principi, detti di *transizione* o di *esclusione* (Pauli).

Valga la sola elencazione degli accennati concetti, per far comprendere il grande e penoso lavoro del fisico, che, in una ventina di anni, ha cercato di perfezionare le sue teorie, inquadrando in queste il maggior numero di fatti sperimentali.

Con ciò non si vuol dire che il risultato di indagini così complesse sia stato del tutto soddisfacente. Malgrado il successivo complicarsi e perfezionarsi di tutte le ammissioni su riportate, la teoria di Bohr si dimostrò ancora difettosa. Il principale motivo di ciò scaturisce da quanto ora dirò. Si era ammesso, come abbiamo accennato, che le radiazioni, non più interpretabili colla propagazione di onde attraverso l'ipotetico etere, potessero considerarsi col duplice aspetto corpuscolare e pur sempre ondulatorio. Infatti al corpuscolo chiamato fotone è connesso sempre un certo periodo o lunghezza d'onda. Ad una simile asserzione non corrisponde intuitiva comprensione, nel senso della fisica classica; ed occorre accettarla senza ulteriormente approfondirla. Questo duplice aspetto o *dilemma corpuscolare-ondulatorio* si è riconosciuto vigere anche per la materia, come infatti, l'esperienza di Davisson e Germer fa vedere. Gli elettroni, pur potendosi considerare quali corpuscoli materiali, quando traversano un reticolo cristallino (come nell'esperienza di Laue, con i raggi X) danno luogo a fenomeni di diffrazione o di interferenza.

Da simile constatazione, è nata la *meccanica ondulatoria*, per opera di L. De Broglie; e successivamente, Schrödinger ha scritto un'equazione che interpreta le caratteristiche dell'atomo, in modo puramente simbolico. Con tali strumenti matematici, delle varie grandezze fisiche che entrano nello studio del fenomeno si ricavano valori che sono soltanto probabili, cioè non esattamente definibili. A rendere più perplesso chi, esaminando i fatti e le moderne concezioni teoriche, vuol formarsene un modello fisico concreto, secondo l'uso della fisica classica, contribuiscono ulteriori concezioni teoriche, che, indipendentemente da quelle a cui già si è accennato, portano agli stessi risultati di queste. Sono le meccaniche quantiche di Heisenberg e di Dirac.

Con le complesse considerazioni ora fatte, si è perfezionata, per quanto è stato possibile, una parte della teoria dell'atomo; quella cioè che riguarda gli elettroni extranucleari. Il fisico si è così reso conto del modo con cui avviene l'emissione di energia raggiante dall'atomo stesso; ha cioè interpretato, nel modo migliore, gli spettri ottici emessi dalla materia. Si è perciò compreso che le orbite esterne di ciascun atomo, sono quelle che, in conseguenza delle loro eventuali perturbazioni, danno luogo alla formazione di tali spettri, purché questi si riferiscano alle radiazioni ultrarosse, visibili ed ultraviolette. Le orbite più profonde, con leggi che sono forse più semplici, danno luogo a spettri di raggi X. Ed infine, l'affinità chimica e la valenza dipendono ancora dalle orbite esterne.

#### Altre particelle elementari.

Mentre il fisico, dopo aver studiato la struttura extranucleare, si avviava a comprendere come più precisamente fosse costituito il nucleo, dopo il 1930 avvenne la scoperta di altre particelle elementari o corpuscoli; con ciò il suo lavoro poté procedere più facilmente.

Come si è già detto, si era ammesso che il nucleo dovesse essere costituito da un insieme di protoni e di elettroni negativi. Si supponeva che il numero di questi ultimi fosse tale da compensare l'eccesso di carica positiva dei primi, in confronto con gli elettroni extranucleari, che sono meno numerosi dei protoni.

In conseguenza di questa ammissione, fin dal 1920, Rutherford affermò che, nell'interno del nucleo, potessero esistere dei doppietti costituiti ciascuno da un protone e da un elettrone negativo. Egli chiamò tali doppietti, *neutroni*. Ma non sembrava che i doppietti di Rutherford avessero una reale esistenza fisica; potendo la loro ammissione corrispondere solo ad un comodo modello interpretativo. Si andò avanti con tale conclusione, fin quando la reale scoperta del neutrone, quale ente a sé, fu fatta, in modo impreveduto. Ciò avvenne in seguito ad una osservazione casuale di Bothe e Becker, nel 1930, di certe radiazioni molto penetranti. Tale scoperta servì subito dopo, a ricerche dei coniugi Curie-Joliot, e poi di Chadwick, il quale si deve considerare il vero scopritore del neutrone, corpuscolo dotato della stessa massa del protone, o nucleo d'idrogeno, ma senza alcuna carica elettrica. Il neutrone, che in qualche modo si libera dalla materia, in conseguenza di fatti

radioattivi, è di solito dotato di una certa velocità più o meno grande, che gli consente di attraversare altra materia, senza essere perturbato da azioni elettriche. E per quest'ultima ragione che esso è dotato di un grande potere di penetrazione. La radiazione osservata da Bothe e Becker era costituita da neutroni, la cui presenza non fu da loro subito sospettata.

Con la scoperta del neutrone, si rende più comprensiva la struttura del nucleo. In esso, infatti, non si trovano elettroni negativi, mescolati ai protoni; ma sibbene, protoni e neutroni. Così, per esempio, l'atomo di uranio viene ad essere costituito da 146 neutroni e 92 protoni; la carica elettrica positiva di questi ultimi equilibra esattamente quella negativa dei 92 elettroni extranucleari.

Il neutrone viene così ad acquistare entità propria, che può mantenere sia dentro il nucleo, sia fuori.

Nella figura 2 sono stati rappresentati alcuni atomi di elementi, i più leggeri; ciò è fatto però in modo puramente schematico, al fine solo di indicare il numero di protoni, neutroni, ed elettroni extranucleari negli atomi stessi contenuti. La rappresentazione stessa non corrisponde esattamente al vero, sia perché i costituenti del nucleo, se numerosi, non saranno mai complanari; e sia ancora (per le ragioni che vedremo) perché molto probabilmente, protoni e neutroni non possono trovarsi realmente a contatto gli uni con gli altri.

Un altro nuovo corpuscolo, l'*elettrone positivo*, fu ancora scoperto casualmente intorno alla stessa epoca (1932) da Anderson, nella *radiazione cosmica*. La stessa particella fu ritrovata da Blackett ed Occhialini, sperimentando con la *camera di Wilson o camera a nebbia*. Sin allora si conosceva, come si è detto, l'elettrone negativo (raggi catodici, raggi  $\beta$  del radio od, infine, corpuscoli extranucleari); e si accettava tacitamente l'ipotesi che la natura non sapesse fabbricare elettroni con carica positiva. Per vero, già Dirac aveva ammesso per necessità teorica, la possibilità di esistenza di un simile corpuscolo; ed egli, nella mancanza di una reale constatazione sperimentale, pensava che tale corpuscolo potesse venir costituito dallo stesso protone, che ha appunto carica positiva. Nella teoria da lui formulata, tale corpuscolo veniva chiamato anche *bucco di Dirac*. Ma la scoperta di Anderson ha messo a posto il giudizio sull'argomento.

Infine, per dire di tutte le particelle nuove trovate, si deve accennare anche al *mesone o yucone*, scoperto da Kunze nel 1933, nello studio dei raggi cosmici. Si tratta di un corpuscolo di massa materiale com-



presa tra l'elettrone ed il protone; più propriamente circa 200 volte l'elettrone, con carica elettrica negativa, a questo proporzionale. La sua esistenza fu più tardi giustificata (1935) teoricamente, dal giapponese Yukawa, per spiegare le *interazioni* fra neutroni e protoni, nell'interno del nucleo.

Tutte le particelle a cui si è accennato, hanno esistenza reale, effettivamente dimostrata dalla diretta esperienza. Per completare il loro

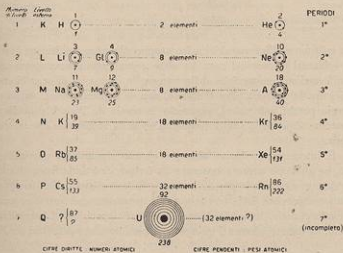


Fig. 2.

elenco si deve accennare al *neutrino* di Fermi, voluto anch'esso da considerazioni teoriche, ma che mai è stato ritrovato con l'esperienza. Esso avrebbe massa dell'ordine di quella degli elettroni, sieno essi positivi o negativi (cioè 1/1840 del nucleo d'idrogeno); ma sarebbe completamente sfornito di carica elettrica.

L'esperienza o la teoria hanno dunque permesso di stabilire l'esistenza di 7 particelle elementari (di cui l'ultima soltanto ipotetica) che appresso elenchiamo.

L'ultima colonna di queste tabella corrisponde all'energia intrinseca di queste particelle supposte in quiete (fuori che per il fotone, che, per sua natura, ha sempre la velocità della luce); ciò è conforme alla teoria della relatività di Einstein. Delle particelle indicate, le prime

NOME	Massa materiale riferita al nucleo di H	Carica elettrica riferita al nucleo di H	Energia (erg)
1. Protone . . . . .	1	+ 1	$1,48 \cdot 10^{-3}$
2. Neutrone . . . . .	1	0	$1,48 \cdot 10^{-3}$
3. Elettrone neg. . . . .	$1/1840$	- 1	$8,1 \cdot 10^{-7}$
4. Elettrone pos. . . . .	$1/1840$	+ 1	$8,1 \cdot 10^{-7}$
5. Mesone . . . . .	$200/1840$	- 200	$1,62 \cdot 10^{-4}$
6. Fotone . . . . .	$h\nu/c^2$	0	$h\nu$
7. Neutrino . . . . .	$1/1840$	0	$8,1 \cdot 10^{-7}$

due esistono nell'interno del nucleo atomico; la terza costituisce i satelliti orbitanti intorno ad esso. Le altre 4 particelle intervengono nelle manifestazioni fenomeniche della natura, in occasione di scambi energetici fra la materia.<sup>5</sup> Per il fotone, non si è precisato né massa né energia perché tali valori, seguendo la teoria di Planck e quella di Einstein, dipendono dalla frequenza  $\nu$ , della radiazione che si considera.

È interessante rilevare che, per quanto riguarda le particelle 1, 3, 6, ne abbiamo avuto conoscenza da tempo, cioè dalla fisica classica. Per quanto riguarda le particelle 2, 4, 5, la loro esistenza fu forse genericamente prevista dalla teoria; ma effettivamente esse furono scoperte in modo casuale, indipendentemente da tali previsioni. L'esperienza, perciò, ha fornito, elementi insospettati, per formulare definitivi giudizi.

### Struttura del nucleo.

Su questi complessi dati di fatto e teorie, si è venuta, man mano, formando la teoria del nucleo atomico o *fisica nucleare*. Essa non ha raggiunto però il grado di completezza della teoria degli elettroni extranucleari, per quanto anche questa non sia del tutto perfetta. La difficoltà di ottenere un simile risultato dipende: dal non aver noi sufficienti *messaggi fenomenici* dall'interno del nucleo; dal non sapere come, in uno spazio relativamente piccolo, sieno distribuiti protoni e neutroni; ed infine, dal non conoscere noi bene, quali sieno le forze nucleari, ossia le *interazioni* fra i suoi costituenti.

Per le sostanze radioattive, si ha tuttavia qualche argomento, che ci permette di trarre delle induzioni sulla conformazione interna del nucleo. Infatti, delle radiazioni  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , da questo emesse, le  $\gamma$  sono

effettivamente di origine nucleare; ed il nucleo, dopo averle emesse, diventa eccitato. A questo fatto, analogamente a quanto avviene per gli elettroni esterni, corrisponde l'esistenza di *livelli di energia nucleari*, differenti da caso a caso; riconoscibili dalla diversa deviabilità in campi magnetici delle particelle  $\alpha$ , che possono dividersi in gruppi *isocinetici*. Non si può dire altrettanto per i raggi  $\beta$ , perché gli elettroni che li costituiscono, sfuggono con velocità non definita. Questi sono i dati di fatto su cui si basa la *prima teoria nucleare di Gamow*.

Le teorie nucleari vanno oltre tali considerazioni, cercando di stabilire, in certi casi, qualche caratteristica delle interazioni fra protoni e neutroni. Dirò ancora brevemente, che in collaborazione con un mio nipote, Ettore Majorana (misteriosamente scomparso dal mondo una decina di anni or sono), Heisenberg fu il primo a sviluppare una teoria su tali forze nucleari. Così, fu stabilito, per render conto dei fatti osservabili, che delle tre azioni possibili tra neutroni e protoni, quella tra neutrone e neutrone sia la meno importante. Una simile teoria rende conto della grande stabilità dei nuclei di elio, denominati particelle  $\alpha$ , che sono direttamente emesse dalle sostanze radioattive.

Da quanto precede, si rileva che la scoperta del neutrone ha aperto la via, in modo brillante, ad una migliore comprensione della struttura nucleare. In modo, grossolanamente sintetico, si può dire che il neutrone rappresenta una sorta di *cemento* che permette ai protoni di stare raccolti, a piccolissima reciproca distanza e forse, tuttavia, senza toccarsi. Si può infatti credere che più protoni, da soli, non possano restare avvicinati e, a maggior ragione, in contatto; ciò in conseguenza delle enormi forze repulsive, che fra di essi debbono manifestarsi.

#### Alcune altre considerazioni sul fenomeno radioattivo.

Abbiamo detto che le sostanze radioattive, oltre ad emettere due delle particelle elementari già elencate (in misura diversa da caso a caso), si vanno trasformando in elio od in atomi meno complessi. Questa proprietà è caratteristica, in genere, degli elementi più pesanti. Essa però non dipende esclusivamente dal valore crescente del peso atomico. Infatti, può darsi che elementi a peso atomico minore, sieno più radioattivi di altri di peso atomico maggiore. Così, per esempio, il radio rispetto all'uranio. Si deve concludere, che la instabilità atomica trae le sue origini tanto dalla complessità costruttiva dell'atomo,

come da particolari motivi (che sfuggono alla nostra indagine) dovuti al modo con cui un determinato numero di protoni possa riunirsi con altro di neutroni.

Ma, a parte tale incertezza o nostra incomprendenza, si può affermare che la natura non sa costruire elementi più pesanti dell'uranio, perché essi sarebbero instabili. Ciò ha avuto una conferma dall'esperienza, per la scoperta di *elementi transuranici*, che si sono potuti ottenere artificialmente, e che hanno vita media brevissima: essi sono il 93 ed il 94.

Oltre a ciò, considerando gli elementi radioattivi, si è potuto stabilire la semplice legge matematica con cui tale disintegrazione avviene; a ciò è stato già accennato. Ricordiamo che tale legge dice: il numero di atomi che in un dato tempo si disgregano (o, come si dice, esplodono) è, per ogni elemento, proporzionale al numero di atomi esistenti nell'ammasso che si considera. Si tratta di un fenomeno statistico; ma veramente nulla sappiamo delle cause intime che in ogni caso particolare lo generano; ciò dicasi, pur ammettendo che nel grandissimo numero di casi in cui quel fenomeno avviene, esso obbedisce alla precisa legge enunciata.

Il detto fenomeno presenta analogie con tanti altri caratterizzati dalla presenza di numerosissime unità reciprocamente agenti. Per esempio, nella popolazione di una data regione, a parità di altre condizioni, il numero dei nati o dei morti in un dato tempo, è costante. Ma mentre nel caso della popolazione, possiamo in certo modo seguire il fatto della nascita, e specialmente della morte, nelle modalità che lo precedono, in quello della radioattività nulla si conosce, circa le cause che lo producono.

Riferendoci al fatto della disintegrazione atomica possiamo fare una interessante considerazione. Se un atomo fosse costituito da protoni e neutroni, insieme raccolti in modo *statico*, in modo cioè che le reciproche distanze e posizioni dei costituenti fossero immutevoli (simile ipotesi non escluderebbe l'esistenza, voluta dalla teoria di Gamow, di diversi livelli energetici, nell'interno del nucleo), nessuna ragione vi sarebbe perché, col tempo esso debba disintegrarsi; in conseguenza la materia non potrebbe mai essere radioattiva. E poiché, come si sa, ciò non è, se ne conclude che quella proprietà deve essere dovuta ad energia cinetica distribuita tra i costituenti del nucleo. Solo così, si può pensare che la imperfetta regolarità del movimento (paragonabile a quella degli astri, quando essi sono più di due, in presenza) possa produrre con legge statistica delle esplosioni. Si comprende perciò, come

una irregolarità del genere possa manifestarsi nelle costruzioni più complesse; e che queste abbiano un certo limite, nel numero dei loro costituenti, imprecisabile dalle nostre teorie, ma che l'esperienza o l'osservazione ci dice esser dato dall'uranio.

Logicamente, per giustificare l'esistenza di corpi radioattivi, costituiti nell'interno dei loro nuclei, da protoni e neutroni reciprocamente in quiete, si potrebbe, inoltre, pensare che gli ultimi corpuscoli costituenti la materia (protoni, neutroni, e forse anche gli elettroni) non rappresentino enti di per sé immutabili. Essi, con processo enormemente più minuto e lungo, tale cioè da sfuggire a qualsiasi nostra constatazione, potrebbero alla loro volta disintegrarsi, od espellere un *quid*, in modo continuo. Un simile dinamismo potrebbe, in modo per noi imprecisabile, dar luogo al fenomeno radioattivo. Ma mentre tale ipotesi coincide in qualche modo con altra da me avanzata parecchi anni or sono, per spiegare l'assorbimento gravitazionale, non si hanno ora elementi per stabilirne l'attendibilità.

#### Disintegrazione e radioattività artificiale.

Quanto si è detto fin qui, circa la radioattività, interpretata al lume della struttura nucleare spiegata, corrisponde alla spontanea disintegrazione della materia. Tale fenomeno, come sinora è stato intravisto, appare indipendente da qualsiasi contingenza fisica o chimica esteriore: la detta disintegrazione del nucleo avviene così, in un certo istante, indicabile solo con legge probabilistica.

Ora, poiché tale disintegrazione dà luogo, in ultima analisi, alla trasformazione di un elemento (sia pure radioattivo) in altri di costituzione più semplice, il fisico si è da tempo domandato, se non sarebbe possibile controllare o provocare artificialmente tale disintegrazione: ottenerla cioè artificialmente, anche partendo da elementi, per loro natura, non radioattivi. Un simile problema, oltre che avere grande importanza dal punto di vista scientifico, avrebbe permesso la realizzazione del sogno dell'alchimista, con metodo però che scaturirebbe dal moderno progresso scientifico. Così, per esempio, la trasmutazione del mercurio in oro, si sarebbe potuta ottenere col togliere qualche particella elementare, dal nucleo del primo. Ma tale risultato, quantunque già annunziato parecchi anni or sono da un fisico giapponese, non pare sia stato mai raggiunto.

Per contro, sin dal 1919, ad opera di Rutherford, ed altri in seguito, furono realizzate sicure trasmutazioni artificiali, in alcuni casi particolari. Fu infatti constatato che nuclei d'azoto, colpiti da particelle  $\alpha$ , emesse dal radio, lasciavano sfuggire nuclei d'idrogeno, ossia protoni, che avevano energia superiore a quella delle stesse particelle  $\alpha$  usate. Ciò corrispondeva, in sostanza, a liberazione di energia posseduta dall'azoto e a creazione (per modo di dire) di un altro elemento. L'esperienza fu poi ripetuta colpendo con raggi  $\alpha$  del polonio, altri elementi leggeri come boro, fluoro, sodio, alluminio. Ciò avvenne ad opera dei coniugi Curie-Joliot, dopo il 1930, in seguito ai lavori di Bothe e Becker, a cui si è accennato. Ma la ricerca di simili effetti fu poi molto facilitata dalla scoperta del neutrone, per opera di Chadwick. Infatti, il neutrone essendo un corpuscolo senza carica elettrica, e che può essere dotato di sufficiente energia cinetica, veniva a prestarsi meglio delle particelle  $\alpha$ , nel provocare la scissione dei nuclei; ciò, perché, in mancanza della repulsione elettrica tra questi ed i neutroni, questi possono andare a colpire più facilmente i nuclei stessi. È merito del nostro Fermi di aver avuto simile idea, di sostituire cioè alle particelle  $\alpha$ , già usate da altri, come si è detto, nel provocare artificialmente la disintegrazione artificiale degli elementi, dei neutroni. Egli inoltre, ha scoperto, insieme con i suoi collaboratori, l'opportunità di moderare in giusta misura la velocità dei neutroni che debbono colpire i nuclei; con ciò l'efficacia degli effetti ottenibili rimane di molto accresciuta. I neutroni vengono rallentati, col farli attraversare ambienti contenenti nuclei di elementi leggeri, come idrogeno o carbonio.

La tecnica che, in seguito a tali premesse è stata realizzata, consiste nel generare dapprima neutroni, in numero considerevole e dotati di opportuna velocità. Per generare i neutroni occorrono anzitutto particelle elettrizzate con velocità notevole. Ciò è possibile appunto solo se le particelle sono elettrizzate, perché così si può agire su di esse mediante opportuni campi elettrici. La tecnica si è molto perfezionata in tale senso, mediante campi che vanno raggiungendo persino una diecina di milioni di volt (qui nell'Istituto di Sanità si ha un impianto per 1 milione di volt); oppure, mediante un ingegnoso artificio immaginato da Lawrence, consistente in un campo elettrico alternato dell'ordine di qualche decina di migliaia di volt, nel quale le particelle elettrizzate sono costrette a percorrere traiettorie circolari o meglio spiraliformi, per la presenza, altresì, di un intenso campo magnetico. Questo dispositivo si chiama *ciclotrone*.

Occorre inoltre dire che le particelle elettrizzate da accelerare, potrebbero essere protoni o meglio *deutoni*. Queste ultime particelle sono costituite da coppie, formate ciascuna da un protone e da un neutrone. Tali coppie o deutoni, combinate con ossigeno, si trovano mescolate nell'acqua comune, formando esse circa l'uno per cento delle sue molecole, e venendone a costituire la parte che viene chiamata *acqua pesante*; questa viene estratta dal resto dell'acqua, mediante un processo elettrolitico.

Si è trovato, che dirigendo su nuclei leggeri, come berillio, dei deutoni accelerati, la produzione di neutroni è molto abbondante. Successivamente si dirigono questi neutroni, moderandone la velocità, sui nuclei da disintegrare, nel modo prima detto.

A parte l'uso dei deutoni, che è stato suggerito successivamente dall'esperienza, la disintegrazione artificiale si è potuta ottenere con l'uso dei neutroni per un gran numero dei 92 elementi conosciuti. Questo notevolissimo risultato, che è stato conseguito da Fermi e suoi collaboratori (mediante l'uso di neutroni), è seguito alle primitive e assai più limitate ricerche dei coniugi Curie-Joliot, con le particelle  $\alpha$ .

Va ancora rilevato un altro importante fatto, che accompagna quello della disintegrazione artificiale di elementi non radioattivi. Esso consiste nella formazione di nuovi elementi, con caratteristiche radioattive, che di solito hanno breve vita. Per vero, si deve aggiungere che non sempre si tratta di semplici disintegrazioni, che corrispondono alla scissione del nucleo colpito, in due o più parti distinte; ma piuttosto dall'arresto dei neutroni-proiettili su di una parte dei prodotti di disintegrazione. Il fatto era già stato constatato dai coniugi Curie-Joliot, e poi confermato in modo più ampio dall'uso dei neutroni, ideato da Fermi.

Son molti e ben noti i risultati ottenuti dalla tecnica, quali applicazioni degli ultimi fatti accennati. Oltre l'utilizzazione della radioattività artificiale ad uso terapeutico, non è spenta l'eco dei formidabili effetti bellici, ottenuti da questa grande conquista dell'umanità, per lo sfruttamento dell'energia atomica, che nella disintegrazione si libera. Mi basti ancora ricordare la forte opera di Fermi che molto ha contribuito al raggiungimento di tali risultati.

### Conclusione.

Le molto sommarie ed incomplete notizie, che ho voluto darvi, si riferiscono al magnifico sviluppo delle nostre conoscenze fisiche di questa prima metà del secolo. Come ho già detto, esso fu reso possibile dalla scoperta, in buona parte casuale, di taluni fatti, mai prima sospettati dalla fisica classica, sul finire del secolo precedente. Dopo quella scoperta, un intenso lavoro occupò i fisici sperimentali e teorici di tutto il mondo, nel cercare di sviluppare i risultati dell'esperienza, di proporre nuove teorie, di trarne conseguenze o spunto per la scoperta di nuovi fatti. Così, in questo cinquantennio, l'opera dello sperimentatore e quella del teorico si sono intrecciate come non mai, ai fini di ottenere sempre maggior progresso della scienza.

Questo connubio, tra esperimento e teoria si rende ogni giorno più necessario. Lo sperimentatore non può ignorare quanto le moderne teorie hanno stabilito: al lume di esse, egli può arrivare a precisazioni, altrimenti irraggiungibili. E, così lavorando, può avere la ventura, per altro assai rara, di scoprire nuovi fatti, in conferma, o che inducano a modificazioni, e persino ad abbandono, di precedenti costrutti teorici.

Una volta, quando si trattava di far progredire la fisica classica, macroscopica, i sensi dell'osservatore o sperimentatore lo aiutavano a stabilire, più o meno facilmente, misura e leggi del fenomeno in esame. Inoltre, non essendosi completato il quadro delle nostre conoscenze in tale campo, per sua natura a noi più accessibile, la probabilità di compiere opera proficua, con lo sperimentare, senza seguire complicati, e talvolta del tutto ipotetici sviluppi teorici, era ben maggiore. Oggi, mentre l'attenzione dei fisici è rivolta, quasi esclusivamente a perfezionare le loro conoscenze di Fisica Atomica o Nucleare; nel cercare cioè, di comprendere un mondo estremamente piccolo, nel quale le leggi del mondo macroscopico possono essere mutate, in modo non del tutto spiegabile; la ricerca sperimentale è divenuta ben più difficile. E superfluo poi accennare che tale difficoltà può anche dipendere dalla mancanza di mezzi idonei, come quelli di cui dispone questo Istituto, che pur sono superati da quelli di laboratori di oltre oceano.

L'opera dello sperimentatore deve dunque svolgersi affiancandosi sempre più a quella del teorico; ed è eccezionale, come avviene nel



caso di uomini di scienza di grandissimo valore, che attitudini sperimentali e teoriche sieno perfettamente fuse insieme.

Ma l'osservazione prima fatta ha carattere di perfetta reciprocità. Non può, infatti, una teoria svolgersi, se non si appoggia direttamente all'esperienza od all'osservazione, i cui risultati costituiscono, con la loro immutabilità, la base vera della nostra conoscenza. Furono i fatti nuovi che decisero i fisici a sacrificare quella mirabile costruzione dell'etere cosmico, che tanti successi ebbe ad opera di Huygens, Young, Fresnel, Faraday, Maxwell, Hertz, Lorentz. Mi ricordo, come 50 anni addietro, un sommo italiano che io ebbi l'onore di conoscere ed avvicinare, Galileo Ferraris, mi diceva: «Siamo alla vigilia di toccare con mano l'etere cosmico». Ed è invece noto come, poco dopo la sua morte, tale costruzione mentale, già per altre ragioni non del tutto soddisfacente, fu sostanzialmente dovuta abbandonare, per l'inattesa scoperta di nuovi fatti. Se ciò non fosse avvenuto, la teoria dell'etere vigerebbe ancora. Per contro, i teorici adattarono con profondo acume, alla portata di quei fatti, nuove teorie.

Ma in tale lento processo (che nel caso attuale ha richiesto circa mezzo secolo di penoso lavoro, che ancor oggi continua), la teoria non si poté mai staccare dall'esperienza. Quanto sarebbe stato più difettoso, incompleto e malsicuro lo sviluppo della scienza, se l'esperienza, eseguita dapprima per la ricerca o l'osservazione di tutt'altra cosa, non ci avesse dimostrato l'esistenza vera e le proprietà del neutrone, dell'elettrone positivo, del mesone, corpuscoli, in parte, precedentemente sospettati in modo vago ed impreciso? E che dire dei grandiosi successi ottenuti oggi, circa lo sfruttamento dell'energia atomica? Le precedenti ricerche sperimentali e teoriche avevano, è vero, permesso di valutare l'ammontare favoloso dell'energia posseduta dal nucleo atomico. Ma la teoria non ci aiuta completamente nell'ottenere un preciso controllo e sfruttamento. Infatti, se così non fosse, non vi sarebbe ragione di segreto: tutti i Paesi sarebbero già al caso di costruire bombe atomiche!

E, a parte gli accennati risultati, di carattere prevalentemente pratico, ciò che interessa di più lo scienziato, è il progresso delle nostre conoscenze dei segreti della natura; progresso che, come ho detto, si appoggia sullo sviluppo dell'esperienza e della teoria. Per lo speculatore, non vi ha, né vi sarà mai, alcun limite, nel perseguire un proposito del genere.

Oggi, la teoria nucleare, che, malgrado il suo sviluppo, non si può dire perfetta, si appoggia su quella quantistica e sulla concezione cor-

pulsolare-ondulatoria della energia e della materia. Ma, sia perché l'insieme di queste teorie (a parte i sorprendenti e precisi controlli sperimentali che esse hanno avuto) non genera nel nostro spirito e nella nostra intuizione, quel consenso a cui eravamo abituati dalla fisica classica; sia ancora perché non si deve dimenticare che le teorie costituiscono solo un nostro modello mentale, che mai può venir in pieno sostituito alla vera essenza dei fenomeni; non è detto che quelle teorie possano sempre esser mantenute.

A conferma di simile dubbio, mi sia lecito rilevare, da modesto sperimentatore, una incompletezza delle teorie moderne, che a rigore potrebbe chiamarsi *difetto logico*. Noi ci accontentiamo di ammettere che l'energia raggiante, emessa dalla materia, corrisponda ad un flusso di particelle, mobili con la nota velocità della luce, attraverso uno spazio, che può essere completamente vuoto di qualsiasi ente. La propagazione o, più propriamente, la trasmissione dell'energia raggiante corrisponde, d'altra parte, al cosiddetto campo elettromagnetico, nel quale restano verificate le equazioni di Maxwell. Queste, però, non costituiscono che una pura e semplice rappresentazione matematica, degli effetti semplici della induzione elettromagnetica. Ed è un eccessivo lirismo quello di Boltzmann, con cui egli asseriva, parlando di tali equazioni: «Esse sono state scritte da un dio». Ma questo dio nulla ci dice in più dell'esperienza.

Oggi, si ammette che quella propagazione costituisce il detto flusso di fotoni, le cui proprietà sono da noi comprese sino ad un certo punto. Se il flusso tace, tace l'emissione di energia raggiante. Ma anche in tali condizioni, dobbiamo ammettere la possibilità della manifestazione statica di campi elettrici e magnetici, isolati o insieme sovrapposti; manifestazione che, in certo modo, è analoga a quella misteriosa del campo gravitazionale o newtoniano. Ora, l'esistenza di questi campi non implica alcun dispendio o trasferimento di energia. Questa rimarrebbe localizzata, allo stato potenziale o cinetico, nella materia in giuoco. Seguendo tale concezione, ci si domanda: Come può la forza, sia essa elettrica, magnetica, o newtoniana, manifestarsi a distanza, attraverso il nulla?

Tale domanda, a cui non si sa rispondere in modo comprensivo, ci induce ad ammettere che, a parte le rilevate difficoltà, il quadro dell'etere cosmico appariva più soddisfacente. Ma è noto che, quando il risultato negativo dell'esperienza di Michelson ci costrinse all'abbandono dell'etere, si cercò di riparare al difetto in cui erano cadute le

equazioni di Maxwell; e ciò con l'introduzione della teoria di Lorentz o di quella della relatività. Si riuscì così a mantenerne l'invarianza, a costo però di sacrificare concetti chiari e semplici della meccanica classica, come immutabilità delle dimensioni dei corpi o della misura dello spazio e del tempo.

Ora, qui si osserva che anche ammettendo l'assoluta correttezza della seconda delle citate teorie (quella della relatività), rimane, come ho detto, la difficoltà di spiegare l'esistenza di campi statici. Al riguardo di ciò non può bastare alla nostra intuizione il dire che tali forze obbediscano alla legge di Coulomb (o, nel caso della gravitazione, a quella di Newton). La nozione dei campi statici è dunque velata per noi, seguendo le moderne teorie, da effettiva ed inconfessata incomprendimento.

Mentre è bene rilevare che simili considerazioni non ci inducono a propugnare un ritorno alla teoria dell'etere (insostenibile per altre ragioni), va anche osservato che è vano ammettere che i fenomeni naturali possano venire interpretati da relazioni simboliche. Queste al più, ne possono stabilire delle leggi quantitative; ma nulla dirci della loro essenza. D'altronde, come diceva H. Poincaré, una relazione matematica può corrispondere ad un'infinità di modelli diversi.

Forse nuovi fatti, per ora difficilmente prevedibili, e che solo ci potranno essere rivelati dall'opera minuta dello sperimentatore (sia pure preceduta dalla formulazione di nuove teorie) permetteranno ai giovani od alle future generazioni, di rimuovere le difficoltà in cui la nuova fisica si dibatte. Quando ciò sarà avvenuto, qualcuna delle concezioni ingegnose e complesse che la fisica teorica moderna offre alla nostra ammirazione, potrà venir modificata od anche abbandonata, al fine di interpretare i nuovi fatti scoperti.

E così, incessantemente, nella futura storia della scienza, l'uomo si affannerà a studiare la natura, indagandone l'infinita complessità, sia nell'immensità degli spazi, sia nell'illimitata minuzia della struttura materiale. Da questa sua opera, la mente umana potrà ricavare sempre più alta soddisfazione, e la tecnica raggiungere, ogni giorno, nuove e sempre più meravigliose applicazioni, che, è da augurarsi, sieno destinate soltanto ad accrescere il generale nostro benessere morale e materiale.

---