

NUOVA SERIE

Anno XI - 1934

# IL NUOVO CIMENTO

PERIODICO FONDATA IN PISA DA C. MATTEUCCI E R. PIRIA

ORGANO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

SI PUBBLICA SOTTO IL PATRONATO  
DEL CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE  
IN 10 NUMERI ANNUALI

DIRETTORI:

O. M. CORBINO - E. FERMI - Q. MAJORANA - A. POCHETTINO - L. PUCCIANTI



BOLOGNA

NICOLA ZANICHELLI - EDITORE

1934-XIII

# RADIOATTIVITÀ PRODotta DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI (1)

Nota di ENRICO FERMI

**Sunto.** - *Vengono descritte esperienze eseguite per ricercare se si possano produrre radioattività artificiali per mezzo del bombardamento con neutroni. Segue un elenco di alcuni elementi per i quali si è potuto riscontrare l'effetto cercato, e alcune considerazioni teoriche sulle particolarità del fenomeno.*

## Introduzione.

§ 1. I fenomeni di disintegrazione artificiale dei nuclei atomici che si producono per effetto del bombardamento con particelle pesanti (particelle  $\alpha$ , protoni, deutoni, neutroni, ecc...) conducono per solito alla formazione di nuove specie atomiche differenti da quella bombardata. Si riteneva generalmente, fino agli ultimi tempi, che gli atomi così formati corrispondessero sempre a comuni isotopi stabili. Si deve a F. JOLIO e I. CURIE (2) l'aver dimostrato per primi che, almeno in alcuni casi, il prodotto della disintegrazione può essere radioattivo e subire una disintegrazione successiva con vita media relativamente lunga. In questi casi dunque il processo si può considerare costituito da due fasi:

a) in una prima fase l'atomo  $A$  colpito dalla particella bombardante subisce in un tempo estremamente breve una trasmutazione in una nuova specie atomica  $B$ ;

b) se l'atomo  $B$  così formato non corrisponde ad alcun isotopo stabile, esso può disintegrarsi ulteriormente con una vita media relativamente lunga, così che questa seconda disintegrazione può seguirsi nel suo svolgimento anche dopo allontanata la sorgente delle particelle bombardanti.

(1) Confronta le note preliminari in « Ricerca Scientifica », 5, vol. I, pagine 283, 330, 452, 533, 650; vol. II, pag. 21, 1934; « Nature », 133, 757, 898, 1934.

(2) I. CURIE e F. JOLIO, « C. R. », 198, 254, 561, 1934.

Nelle loro esperienze i coniugi JOLIOU si sono serviti, per bombardare i diversi elementi, delle particelle  $\alpha$  del polonio. Queste particelle, a causa della repulsione coulombiana, possono, come è ben noto, esercitare un effetto soltanto sopra elementi leggeri. Infatti i JOLIOU e altri <sup>(1)</sup> poterono constatare che alcuni elementi leggeri (*B, N, Mg, Na, Al, P*) divengono radioattivi per azione del bombardamento con particelle  $\alpha$ . In tutti questi casi, ad eccezione del magnesio, di cui si parlerà in seguito, il corpuscolo emesso è un positrone. COCKCROFT, GILBERT, WALTON e altri <sup>(2)</sup> ottennero fenomeni analoghi a quelli osservati dai JOLIOU bombardando il carbonio con protoni accelerati artificialmente; infine CRANE, LAURITSEN e HARPER <sup>(3)</sup> si servirono come proiettili di deutoni.

Mi propongo di riferire nel presente lavoro sopra alcune esperienze da me fatte per ricercare radioattività artificiali prodotte da bombardamento con neutroni. L'uso dei neutroni come corpuscolo bombardante presenta lo svantaggio che il numero dei neutroni di cui si può praticamente disporre è enormemente inferiore al numero delle particelle  $\alpha$  che si possono ottenere da sorgenti radioattive, o al numero di protoni o di deutoni che si possono ricavare nei tubi ad alta tensione; questo inconveniente è per altro compensato in parte dalla maggiore efficacia dei neutroni come agenti per produrre disintegrazioni artificiali. I neutroni presentano anche il vantaggio di poter produrre effetti sopra gli elementi pesanti, per modo che il numero di elementi che è stato possibile attivare per mezzo di essi è molto maggiore del numero di elementi attivi che si sono ottenuti usando altre specie di proiettili.

Nel § 2 è contenuta una descrizione del dispositivo usato in queste ricerche; nel § 3 sono riassunti alcuni dei risultati; nel § 4 i risultati sono discussi dal punto di vista teorico.

### Dispositivo sperimentale.

§ 2. La sorgente dei neutroni era costituita da un tubetto di vetro saldato, avente il diametro esterno di circa 6 mm e lunghezza di circa 15 mm contenente polvere di berillio ed emanazione di radio. Si può ritenere che una tale sorgente emetta all'incirca 1000 neutroni

(1) I. CURIE e F. JOLIOU, l. c.; L. WERTENSTEIN, « Nature », **133**, 564, 1934; O. FRISCH, « Nature », **133**, 721, 1934.

(2) J. D. COCKCROFT, G. W. GILBERT, E. T. S. WALTON, « Nature », **133**, 328, 1934; NEDDERMEYER e C. D. ANDERSON, « Phys. Rev. », **45**, 498, 1934.

(3) LAURITSEN, CRANE e HARPER, « Science », **79**, 234, 1934.

al secondo per ogni millicurie di emanazione; ho usato quantità di emanazione variabili da 50 a 800 millicurie. La distribuzione energetica dei neutroni non è ben conosciuta; si tratta di una distribuzione continua di energie estendentesi da 0 fino a 7 o 8 milioni di volt; è inoltre probabile la presenza di una piccola percentuale di neutroni aventi energie fino a 12 o 15 milioni di volt.

Oltre ai neutroni, una sorgente del tipo che abbiamo descritto emette naturalmente anche una grande quantità di raggi  $\gamma$ . Essi tuttavia non producono alcun disturbo in esperienze di questo genere, essendosi dimostrato che la emanazione da sola (senza il berillio) non produce attivazioni; ciò, ben inteso, quando le pareti del recipiente che la racchiude assorbono completamente le particelle  $\alpha$ . Deve infine tenersi presente che i neutroni del berillio sono anche accompagnati da una radiazione  $\gamma$  assai dura (5 o 6 milioni di volt; circa un quanto  $\gamma$  per ogni neutrone); sembra tuttavia improbabilissimo che i fenomeni che descriveremo siano connessi con la presenza di questa radiazione  $\gamma$ , poichè radiazioni  $\gamma$  enormemente più intense e di durezza non molto inferiore non producono alcun effetto osservabile.

Il dispositivo usato per rivelare eventuali attivazioni delle sostanze bombardate consisteva in un contatore a filo di GEIGER-MÜLLER. Il tubo di questo era costituito da una foglia di alluminio dello spessore di 0,1 o 0,2 mm tale da permettere l'ingresso nel contatore anche ad elettroni di energia non molto grande. Le dimensioni dei contatori erano generalmente circa 5 cm di lunghezza e 1,4 cm di diametro. Il filo di alluminio del diametro di 0,1 o 0,2 mm era connesso nel modo consueto a un sistema amplificatore degli impulsi che faceva agire un numeratore su cui si leggeva di tempo in tempo il numero degli impulsi. L'aria nell'interno dei contatori era alla pressione di 5 a 10 cm di mercurio, in modo da avere tensioni di funzionamento da 1000 a 1500 volt.

Le sostanze da esaminare erano molto spesso disposte in forma di cilindretti di diametro tale da poter venire inflatte sul contatore, in modo che le perdite per fattori geometrici fossero ridotte al minimo possibile. Dapprima i cilindretti venivano posti attorno alla sorgente dei neutroni sicchè la sostanza rimaneva sottoposta per un certo tempo a un intenso bombardamento dei neutroni. Successivamente il cilindretto era rapidamente portato sul contatore, che si trovava in un'altra stanza, e si registravano gli impulsi. Le sostanze pulverulente erano spesso irradiate in recipienti di carta di forma opportuna e dei quali si era preventivamente constatata la inattivabilità. Talvolta sostanze di questo tipo erano irradiate introducendole

in una provetta nella quale era posta la sorgente, in modo da aumentare l'intensità della irradiazione; questo metodo naturalmente è praticabile solo per sostanze di vita non troppo breve, poichè altrimenti manca il tempo necessario a travasare la sostanza in un recipiente adatto a portarla sul contatore. Infine alcune volte, e particolarmente quando la sostanza doveva essere sottoposta ad operazioni chimiche dopo l'irradiazione, essa veniva irradiata in soluzione concentrata.

Con questi metodi ho potuto constatare che numerosi elementi in seguito al bombardamento acquistano la proprietà di emettere elettroni. Nei casi più semplici il numero degli elettroni emessi decresce esponenzialmente col tempo ed ha una vita media caratteristica dell'elemento irradiato; talvolta invece la curva di decremento della attività può analizzarsi in due o più esponenziali con vite medie diverse, ciò che è probabilmente dovuto in molti casi a diversi costituenti isotopi dell'elemento in esame, che danno ciascuno indipendentemente un proprio effetto. In altri casi si possono avere per lo stesso isotopo diversi processi di eccitazione con formazione di altrettanti elementi attivi, avente ciascuno la propria vita media, o infine si possono avere più disintegrazioni in catena.

L'intensità della attivazione è molto diversa nei diversi elementi; talora l'effetto è appena misurabile, e si hanno nel contatore pochi impulsi al minuto. In altri casi si hanno invece delle attivazioni molto intense corrispondenti a alcune migliaia di impulsi per minuto, tanto che ponendo le sostanze troppo vicine ai contatori non si riesce più, coi nostri apparecchi, a risolvere gli impulsi uno dall'altro. Una misura precisa della intensità della attivazione nei diversi elementi richiederebbe un lavoro abbastanza lungo, poichè sarebbe necessario precisare in modo rigoroso le particolarità geometriche sia durante la irradiazione della sostanza che durante la misura al contatore; sarebbe inoltre necessaria una conoscenza precisa della sensibilità del contatore per elettroni delle diverse durezza e infine del coefficiente di assorbimento degli elettroni emessi dalla sostanza in esame. In considerazione di ciò mi sono limitato nella maggior parte dei casi a indicazioni di carattere piuttosto qualitativo; in altri casi ho cercato di esprimere quantitativamente l'intensità, ma anche per questi le misure danno poco più che l'ordine di grandezza. Nei casi in cui l'intensità è espressa con un numero (indicato sempre con la lettera  $i$ ) essa è definita nel modo seguente:

$i$  = numero di disintegrazioni che si producono ogni secondo in un grammo dell'elemento posto a un cm di distanza da una sorgente contenente un millicurie di emanazione in equilibrio coi suoi prodotti e polvere di berillio. La sostanza deve essere inoltre irradiata

a saturazione, per il che è necessario esporla al bombardamento per un tempo abbastanza lungo in confronto della vita media.

Probabilmente l'elemento più incerto nella misura di  $i$  è la sensibilità del contatore. Con i contatori e la disposizione geometrica da me usati, si può calcolare che in media venissero registrate una su venti disintegrazioni (a prescindere dall'assorbimento degli elettroni entro la sostanza attivata, di cui si deve tener conto a parte). Questa sensibilità non molto elevata è giustificabile in parte con fattori geometrici, in parte con l'assorbimento degli elettroni entro le pareti del contatore e in parte con la sensibilità non totale del contatore anche rispetto agli elettroni che arrivano a penetrare nel suo interno. La sensibilità è stata determinata misurando il numero di impulsi che si ottengono avvicinando al contatore quantità misurate di uranio o di potassio.

Conoscendo l'intensità  $i$  della attivazione definita nel modo precedente, si può immediatamente risalire alla sezione d'urto,  $\sigma$ , per il processo di attivazione quando si conosca ancora il numero di neutroni emessi da una sorgente di un millicurie. Indicando questo numero con  $n$ , e chiamando  $M$  il peso atomico dell'elemento si ha infatti, come immediatamente si verifica,

$$\sigma = 2,1 \cdot 10^{-28} \frac{M i}{n}.$$

Se si prende  $n$  approssimativamente eguale a 1000 si ha dunque

$$(1) \quad \sigma = 2 \cdot 10^{-28} M i.$$

Per la discussione della reazione nucleare che dà origine all'elemento attivo è essenziale poter individuare la natura chimica di questo. Lo schema generale secondo cui può condursi questa ricerca è il seguente. È naturale ammettere che, bombardando un elemento chimico, questo possa trasformarsi in un elemento di numero atomico prossimo. Il numero di atomi attivi che si formano è estremamente piccolo (nelle nostre esperienze è probabile che non se ne siano mai formati più di un miliardo) e sarebbe quindi impossibile isolarli con metodi ordinari della chimica analitica. Pertanto la sostanza irradiata viene prima disciolta e alla soluzione si aggiungono piccole quantità degli elementi che si sospetta possano essere isotopi dell'elemento attivo. Con i procedimenti della analisi chimica si separano poi di nuovo questi elementi e quello originario; le varie frazioni vengono separatamente provate sui contatori per cercare con quale di esse si è accompagnata la attività. Le operazioni chimiche sono state eseguite dal Dr. O. D'Agostino che riferirà detta-

gliatamente su di esse in altro luogo. Ci limiteremo qui pertanto a brevi cenni in proposito.

### Risultati delle esperienze.

§ 3. Raccolgo qui i risultati ottenuti per alcuni elementi da me esaminati. Un secondo elenco di elementi sarà pubblicato in un lavoro dello scrivente con AMALDI, RASETTI e SEGRÈ.

9. FLUORO. - Il fluoro è, fra tutte le sostanze esaminate fino ad ora, quella che ha la vita media più breve. Il periodo di dimezzamento è di circa 9 secondi. Il fluoro è stato irradiato come fluoruro di calcio; siccome il calcio non viene attivato dai neutroni, l'effetto è senz'altro da attribuirsi al fluoro. Data la brevissima vita media di questo elemento non si può naturalmente pensare a una separazione chimica del prodotto attivo che si forma per effetto del bombardamento. Siccome d'altra parte è noto che il fluoro bombardato con neutroni si disintegra emettendo particelle  $\alpha$ , può ritenersi probabile che avvenga la reazione nucleare seguente



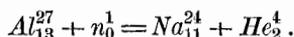
Si formerebbe così un  $N^{16}$  instabile che, disintegrandosi ulteriormente con emissione di una particella  $\beta$  si trasformerebbe in  $O^{16}$ . Il fatto che il prodotto finale che si forma sia l'ossigeno, che, come è ben noto, corrisponde a una configurazione nucleare assai stabile, trova riscontro nel fatto che i raggi  $\beta$  emessi sono assai duri, come risulta dalle misure del loro coefficiente di assorbimento.

La attività del fluoro è molto intensa e corrisponde approssimativamente a  $i = 0,7$ ; l'effetto è reso ancora più appariscente dal fatto che i raggi  $\beta$  emessi sono molto duri, e permettono in conseguenza di utilizzare un forte spessore della sostanza.

13. ALLUMINIO. - L'alluminio bombardato coi neutroni si attiva intensamente emettendo elettroni. La analisi del decadimento della attività che si ottiene sia irradiando alluminio metallico che allumina, dimostra che vi sono due periodi di decremento. Un primo con riduzione a metà in circa 12 minuti ed un secondo in circa 15 ore (questo secondo dato è poco preciso). Al primo periodo corrisponde una intensità  $i \approx 0,8$ ; il secondo è un po' meno intenso; e si ha per esso approssimativamente  $i = 0,5$ .

È stata possibile una separazione chimica del prodotto che dà origine alla attività di periodo lungo. All'alluminio irradiato e portato in soluzione sono state aggiunte piccole quantità di sodio e di magnesio; sono stati poi precipitati gli idrati e i fosfati di alluminio

e di magnesio e si è constatato che essi erano inattivi. Nella soluzione resta il sodio; portando a secco ed avvicinando il residuo al contatore si trova che esso contiene la attività che decade col periodo di 15 ore. Ciò rende probabile che la disintegrazione che dà origine all'elemento attivo con vita di 15 ore avvenga secondo lo schema:



Il  $Na^{24}$  si disintegrerebbe successivamente con emissione di un elettrone trasformandosi nell'isotopo stabile  $Mg^{24}$ .

Non è stata fatta una separazione dell'elemento attivo con la vita di 12 minuti. Si può tuttavia ritenere plausibile che esso sia un  $Mg^{27}$ ; infatti le altre possibilità,  $Al^{28}$  e  $Al^{26}$  sono probabilmente da escludersi, la prima perchè  $Al^{28}$ , come vedremo tra un momento, è un isotopo radioattivo avente periodo di circa 3 minuti, la seconda perchè  $Al^{26}$ , se esiste, dovrebbe verosimilmente disintegrarsi emettendo dei positroni.

14. SILICIO. - Anche il silicio irradiato coi neutroni si attiva con notevole intensità ( $i \approx 0,7$ ). L'effetto è reso particolarmente appariscente dal fatto che gli elettroni emessi sono molto penetranti. Il periodo di dimezzamento della attività, dedotto dalle curve di decadimento sia per il silicio metallico che per il quarzo, risulta di circa 3 minuti; forse leggermente inferiore.

La separazione chimica dell'elemento attivo è stata fatta evaporando la silice irradiata con acidi fluoridrico e solforico, dopo aver aggiunti solfati di alluminio e di magnesio. Il silicio si elimina come fluoruro e nel residuo si precipita l'alluminio che trascina con sé la attività. Resta con ciò assai probabile che la reazione nucleare avvenga secondo lo schema



Si formerebbe così un isotopo radioattivo dell'alluminio,  $Al^{28}$ , che disintegrandosi con emissione di elettroni, si trasforma di nuovo in  $Si^{28}$ . Resta con ciò confermata l'ipotesi dei JOLIJOT e di PREISWERK <sup>(1)</sup> che questo sia lo stesso  $Al^{26}$  che si forma bombardando il  $Mg^{26}$  con particelle  $\alpha$  e che, entro i limiti dell'errore, ha la stessa vita media.

15. FOSFORO. - Anche il fosforo è uno degli elementi che si attivano con maggiore intensità. Esso presenta due vite medie; una di circa 3 ore (intensità  $i \approx 0,6$ ) e una breve di circa 3 minuti, segnalata dai coniugi JOLIJOT; l'intensità di questa è circa 10 volte minore di quella della precedente.

(1) I. CURIE, F. JOLIJOT, P. PREISWERK, « C. R. », 198, 2089, 1934.

Il prodotto attivo corrispondente alla vita di 3 ore è stato separato chimicamente e si comporta come silicio. Lo si può separare facilmente irradiando il fosforo in forma di pentossido in soluzione acquosa concentratissima. Dopo l'irradiazione si riprende con acido solforico diluito, aggiungendo una piccola quantità di silicato di sodio; si tira a secco in modo da rendere la silice insolubile e si filtra dopo aver ripreso con acqua. La silice trascina con sé l'attività.

La reazione nucleare che dà origine al prodotto con la vita di 3 ore è dunque probabilmemente



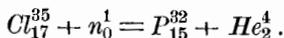
Il  $S_{14}^{31}$  così formato, con emissione di un elettrone, si trasforma di nuovo nell'elemento di partenza  $P^{31}$ .

Non è stata fatta, fino ora, una separazione chimica del prodotto con il periodo di 3 minuti. Sembra tuttavia probabile, data la eguaglianza delle vite medie, che si formi lo stesso  $Al^{28}$  che si ottiene dal silicio.

17. CLORO. - La attività presentata da questo elemento per bombardamento con neutroni è notevole per la sua lunga durata. Il periodo di dimezzamento è infatti di circa 13 giorni. Intensità dell'ordine di 0,1.

Il prodotto attivo che si forma segue le reazioni del fosforo. Esso può separarsi irradiando il cloro in forma di cloruro sodico; dopo la irradiazione il cloruro viene disciolto in acido nitrico diluito; si aggiunge una piccola quantità di fosfato sodico e si precipita quindi il fosfomolibdato ammonico aggiungendo molibdato di ammonio. Il precipitato trascina con sé la attività.

Le reazione nucleare che dà origine alla attivazione del cloro sembra in conseguenza essere

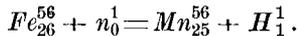


Il  $P^{32}$  formato, con emissione di elettroni, si trasforma nell'isotopo stabile  $S^{32}$ .

26. FERRO. - Il ferro presenta un effetto non molto intenso ( $i \approx 0,05$ ) con periodo di dimezzamento di circa 2,5 ore.

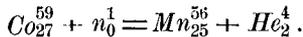
Il prodotto attivo che si forma ha le reazioni del manganese; lo si può separare p. es. sciogliendo il ferro irradiato in acido nitrico; aggiungendo piccole quantità di un sale di manganese e precipitando poi questo elemento come biossido per aggiunta di clorato sodico.

Il biossido di manganese trascina la attività. La reazione corrispondente a questa attivazione sembra di conseguenza essere



L'isotopo instabile  $Mn^{56}$  con emissione di un elettrone ritorna  $Fe^{56}$ .

27. COBALTO. - Questo elemento si attiva debolmente con la stessa vita media del ferro. Anche in questo caso il prodotto attivo si comporta come manganese e può separarsi con lo stesso procedimento descritto per il caso del ferro. L'isotopo instabile che si forma è probabilmente lo stesso  $Mn^{56}$  che si ricava dal ferro. La reazione nucleare sarebbe:



47. ARGENTO. - L'attività provocata nell'argento ha due periodi; uno più breve di circa 20 secondi, ed un altro di circa 2 minuti; l'intensità corrispondente a quest'ultimo periodo è  $i \approx 0,5$ .

53. JODIO. - Il periodo di dimezzamento dello jodio è di 30 minuti; si ottiene lo stesso periodo irradiando jodio elemento oppure joduro di ammonio. L'intensità è notevole ( $i \approx 0,4$ ).

Tentativi di identificare la natura chimica del prodotto attivo con uno dei due elementi precedenti, antimonio e tellurio, hanno dato risultato negativo. La attività segue lo jodio, sia precipitandolo come joduro di argento, sia ricavando lo jodio elemento da joduro di ammonio irradiato per azione dell'acido nitrico, in presenza di antimonio e tellurio. Sembra con ciò assai probabile che lo  $I^{127}$  si trasformi in un suo isotopo radioattivo  $I^{128}$  oppure  $I^{126}$  a seconda che il neutrone viene assorbito oppure produce l'emissione di un neutrone nucleare.

### Considerazioni teoriche.

§ 4. Vogliamo qui esporre alcuni punti di vista teorici sopra i vari processi che possono aver luogo per effetto del bombardamento con neutroni. Allo stato attuale della teoria del nucleo tali considerazioni sono necessariamente assai vaghe e malsicure; può tuttavia essere opportuno tenerle presenti nella valutazione dei risultati. Terremo conto in queste considerazioni, oltre che dei risultati esposti nel presente lavoro, anche di altri ottenuti in questo laboratorio e attualmente in corso di pubblicazione (<sup>1</sup>).

(<sup>1</sup>) E. AMALDI, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ, « Nuovo Cimento », **11**, 442, 1934; E. AMALDI, E. SEGRÈ, « Nuovo Cimento », **11**, 452, 1934; O. D'AGOSTINO, « Gazz. Chimica Italiana », in stampa, 1934.

I fatti empirici che sono emersi nello studio delle radioattività artificiali prodotte dal bombardamento con neutroni possono riassumersi nei seguenti punti:

a) Una larga percentuale degli elementi, sia leggeri che pesanti, sono suscettibili di attivarsi per effetto del bombardamento; non si nota da questo punto di vista una particolare differenza tra elementi leggeri e pesanti.

b) Le sezioni d'urto per gli elementi che presentano il fenomeno con notevole intensità arrivano ad essere dell'ordine di grandezza della sezione geometrica del nucleo, e cioè una notevole percentuale dei neutroni che colpiscono il nucleo produce l'effetto.

c) Il prodotto attivo che si forma sotto l'azione del bombardamento in qualche caso è isotopo dell'elemento bombardato; in qualche altro caso esso ha numero atomico inferiore di una o due unità. A questo riguardo sembra vi sia una differenza di comportamento fra elementi leggeri e pesanti. Mentre infatti per i primi nella maggior parte dei casi l'elemento attivo ha numero atomico inferiore a quello dell'elemento originario, ciò non è più vero per elementi pesanti; nei cinque casi esaminati chimicamente di elementi aventi numero atomico maggiore di 32 e non spontaneamente radioattivi si è sempre trovato che il prodotto attivo è isotopo dell'elemento bombardato.

d) Gli elettroni emessi dagli elementi attivati sono sempre negativi; o, per lo meno, non si sono mai trovati casi di emissioni di elettroni positivi con intensità sufficiente per poter essere rivelati.

Non sembra che vi siano speciali difficoltà per rendersi conto del meccanismo del fenomeno per il caso degli elementi leggeri; il processo più frequente sembra in questi casi consistere nell'assorbimento del neutrone urtante, immediatamente seguito dalla espulsione di una particella  $\alpha$  o di un protone. Se l'energia con la quale viene espulsa la particella  $\alpha$  o il protone è di alcuni milioni di volt, risulta dalla teoria di GAMOW che, per elementi leggeri, il tempo necessario per espellere il corpuscolo è estremamente breve, così che la probabilità che la espulsione possa avvenire prima che il nucleo abbia il tempo di liberarsi dal neutrone temporaneamente assorbito è effettivamente considerevole. Dopo finito questo processo, che può durare un tempo dell'ordine di grandezza di  $10^{-20}$  secondi, il nucleo si trova trasformato in un nuovo isotopo avente, almeno in media, peso atomico maggiore di quello che competerebbe al suo numero atomico (si noti che tanto l'assorbimento di un neutrone, quanto la espulsione di un protone o di una particella  $\alpha$  sono processi che tendono ad elevare il numero dei neutroni nucleari in paragone del nu-

mero dei protoni). Questa è verosimilmente la ragione per cui si osserva in genere emissione di elettroni negativi; infatti l'emissione di un elettrone nucleare, che può interpretarsi connessa alla trasformazione di un neutrone in un protone, viene a ristabilire il rapporto normale tra i numeri dei neutroni e dei protoni entro il nucleo, e determina il passaggio ad un isotopo stabile.

Via via che cresce il peso atomico degli elementi bombardati, l'ostacolo opposto dalla barriera di potenziale che circonda il nucleo alla espulsione di particelle  $\alpha$  o di protoni va rapidamente crescendo; è dunque comprensibile che processi nei quali si ha espulsione di una di queste particelle, con conseguente diminuzione del numero atomico dell'elemento, vadano diventando sempre meno probabili col crescere del peso atomico.

Maggiori difficoltà per la interpretazione teorica presentano i casi in cui l'elemento attivo resta isotopo dell'elemento bombardato; questi casi, come si è osservato, sembrano ricorrere normalmente fra gli elementi pesanti. L'ipotesi più ovvia consisterebbe nell'ammettere che il neutrone urtante venisse catturato dal nucleo urtato, formando un prodotto instabile avente peso atomico di una unità maggiore di quello dell'elemento primitivo, e isotopo di questo. Questa interpretazione, che giustificherebbe anche il fatto che normalmente vengano emessi degli elettroni negativi, incontra tuttavia serie difficoltà teoriche quando si cerchi di spiegare con quale meccanismo il neutrone possa essere stabilmente o quasi stabilmente catturato dal nucleo. Se infatti ammettiamo la opinione corrente che i neutroni siano attratti dai nuclei con forze agenti solo quando la loro distanza dal centro del nucleo è dell'ordine di grandezza di  $10^{-12}$  cm, dobbiamo concludere che un neutrone avente un eccesso di energia di alcuni milioni di volt può trattenersi nell'interno di un nucleo (e cioè trovarsi in intensa interazione con i corpuscoli che costituiscono il nucleo) soltanto per un tempo dell'ordine di grandezza di  $10^{-21}$  secondi, pari all'incirca al tempo che il neutrone impiegherebbe classicamente a traversare il nucleo. Perchè il neutrone possa venir catturato sembrerebbe dunque necessario che durante questo tempo brevissimo il neutrone riesca a perdere la sua energia (emettendo p. es. un quanto  $\gamma$ ) in modo da restare legato stabilmente. Ora la probabilità della emissione di un quanto  $\gamma$  in un tempo così breve, almeno se la si calcola con i consueti procedimenti, è molto piccola e sembra assolutamente insufficiente a spiegare la intensità delle radioattività artificiali di questo tipo; se si vuol conservare l'ipotesi che il neutrone urtante resti aderente al nucleo, bisognerebbe dunque ammettere o che la emissione di un quanto  $\gamma$  o altro pro-

cesso equivalente (quale per esempio la formazione di una coppia elettrone-positrone) possa avvenire con una rapidità maggiore di quanto non sia generalmente ammesso; oppure che, per ragioni che sfuggono alla attuale teoria dei nuclei, un nucleo possa mantenersi per un tempo di almeno  $10^{-16}$  secondi in uno stato di energia abbastanza alta da poter espellere un neutrone di alcuni milioni di volt.

Un'altra ipotesi che potrebbe sostituirsi a quella che abbiamo ora discussa consiste nell'ammettere che il neutrone urtante, senza venire catturato, possa produrre l'espulsione di uno dei neutroni del nucleo urtato. Il processo potrebbe descriversi nel modo seguente. Il neutrone primitivo, passando vicino al nucleo, cede ad esso una parte della sua energia eccitandolo e subendo una specie di urto anelastico. Non vi sono difficoltà teoriche per ammettere che processi di questo genere possano avvenire assai frequentemente e che gli urti anelastici possano rappresentare una elevata percentuale degli urti tra neutrone e nucleo. Se la energia ceduta al nucleo è abbastanza grande perchè il processo di emissione di uno dei suoi neutroni diventi esoenergetico, è assai probabile che, prima che il nucleo ritorni allo stato normale emettendo un quanto  $\gamma$ , venga espulso un neutrone, e si formi così un nuovo nucleo isotopo dell'originario ma con peso minore di una unità.

Si può obiettare contro questa ipotesi che se in questi casi il numero dei neutroni decresce invece di crescere, dovrebbe a priori essere più probabile una susseguente emissione di positroni che non una di elettroni negativi quale invece si osserva. A questa obiezione si può tuttavia rispondere che, nei pochi casi studiati di elementi pesanti i quali attivandosi, per bombardamento di neutroni, rimangono isotopi di sé stessi e per i quali è conosciuta la costituzione isotopica degli elementi contigui, esiste sempre un isotopo stabile dell'elemento  $Z + 1$  avente peso atomico di una unità inferiore a quello dell'elemento bombardato. L'elemento perdendo un neutrone e successivamente emettendo un elettrone potrebbe andare a finire in questo isotopo. Fa eccezione l'uranio in cui probabilmente si hanno disintegrazioni successive. Deve infine tenersi presente che se per un nucleo instabile esiste energeticamente la doppia possibilità di disintegrarsi sia emettendo un elettrone negativo che uno positivo, la teoria dei raggi  $\beta$  <sup>(1)</sup> dà che, a parità di altre condizioni, è più probabile la emissione di un elettrone negativo.

In conclusione, allo stato attuale di incertezza delle teorie sul nucleo, sembra prematuro il volersi formare una opinione definitiva

(1) E. FERMI, « Nuovo Cimento », **11**, 1, 1934.

sul meccanismo della disintegrazione per gli elementi pesanti; e converrà attendere che nuove esperienze portino maggiori dati per questa discussione.

Le sorgenti di emanazione per tutte le ricerche compiute in questo Laboratorio sono state preparate dal Prof. G. C. TRABACCHI, direttore del Laboratorio fisico della Sanità Pubblica. Senza questo suo aiuto tutte le ricerche descritte sarebbero state impossibili. Tengo pertanto a esprimergli anche a nome dei miei collaboratori la più viva gratitudine. Larga parte dei mezzi impiegati nella ricerca ci sono stati messi a disposizione dal Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Ringrazio infine i proff. N. PARRAVANO e L. ROLLA per averci procurato alcune sostanze rare.