

NOTAZIONI USATE NELLE TABELLE DEI SINGOLI ELEMENTI

a = raggio di Bohr = $5.28 \cdot 10^{-9}$ cm.

μ = unità di misura di lunghezza (V. formula (2)).

x = raggio vettore in unità μ .

x_0 = raggio dell'atomo.

k = costante per il calcolo del potenziale (formule (7) e (8)).

Le due autofunzioni relativistiche F e G (formule (1) e (1')) sono date, per $x < 0.3$ da:

$$G = x^{-\beta} [u_0 + u_1 x + u_2 x^2 + \dots]$$

$$F = \frac{\beta}{\alpha Z} x^{-\beta} [v_0 + v_1 x + v_2 x^2 + \dots].$$

Per $x > 0.3$ si ha:

$$G = U/x \quad ; \quad U = KR \sin \Theta.$$

Per $x > x_0$ si ha:

$$U = B \sqrt[4]{x} \sin(C \sqrt{x} + D).$$

Nella zona non relativistica G coincide con la autofunzione ψ di Schroedinger.

α_s = correzione di Rydberg.

N° 83.

Fermi, on his arrival in Rome as a professor of theoretical physics at the University, had a very modest salary. In order to improve his earnings he joined the staff of the Encyclopædia Italiana, founded by Giovanni Treccani, and served on it for several years. He contributed a number of articles to the Encyclopædia Italiana, mainly on atomic physics, and had also editorial and organizational duties. He was rather proud of some of his contributed articles. It would be inappropriate to try to collect them all here, but it is found desirable to give a sample of them in order to show also this facet of Fermi's activity. The choice of the following article is mainly dictated by the fact that Fermi occasionally referred to it and suggested it as reading matter to his students.

EMILIO SEGRÈ.

83.

STATISTICA, MECCANICA

«Encyclopædia Italiana di Scienze, Lettere ed Arti», Istituto G. Treccani, Roma, Vol. 32°,
518-523 (1936-XV).

Lo studio della struttura molecolare e atomica della materia ha reso necessario lo sviluppo di metodi particolari, adatti alla discussione delle proprietà di sistemi costituiti da un enorme numero d'individui costituenti. Per la analogia che il problema presenta con lo studio di una popolazione, essa stessa costituita da un grande numero di uomini, si suol dare a questo ramo della fisica il nome di *meccanica statistica*.

È evidente che la complicazione del calcolo matematico del moto di un sistema costituito da miriadi di particelle (e nel più piccolo corpo percepibile ai nostri sensi sono contenute migliaia di miliardi di molecole) è tanto grande da non lasciare alcuna speranza di una trattazione esatta. Conviene per altro osservare che gli elementi del problema che interessa determinare si riferiscono in generale a proprietà di media su un grande numero d'individui. Così, per esempio, si potrà domandare quale sia la velocità media delle molecole; quale la loro energia cinetica media; quale il valore medio della distanza di una molecola da quella che le è più prossima e così di seguito. Ora si trova che l'andamento di queste proprietà di media è estremamente più regolare, e quindi più facilmente accessibile allo studio, che non le proprietà individuali delle singole molecole. Le forti fluttuazioni di queste tendono infatti a livellarsi tra di loro nell'effettuare le medie; e, se il numero degl'individui è abbastanza grande, vengono praticamente a sparire. Così, per esempio, è ben noto che la pressione esercitata da un gas sulle pareti del recipiente che lo contiene è dovuta agli urti delle molecole del gas contro la parete stessa: ciascun urto trasmette un leggero impulso alla parete e la pressione risulta dall'insieme di questi impulsi elementari. È evidente che

gli urti delle varie molecole differiscono di molto in intensità a seconda della velocità della molecola urtante e dell'angolo d'incidenza dell'urto; ma ciò che interessa agli effetti della determinazione della pressione non è l'impulso trasmesso in un singolo urto, bensì il valore medio di questo impulso e il numero (grandissimo) degli urti che hanno luogo nell'unità di tempo. Entrambi questi due fattori sono indipendenti dalle fluttuazioni accidentali nelle proprietà delle singole molecole; e conseguentemente la pressione esercitata da un gas è anch'essa un fenomeno perfettamente regolare.

Il campo della fisica che ha dato origine allo sviluppo della meccanica statistica, e anche quello nel quale la meccanica statistica trova il maggior numero di applicazioni, è lo studio delle proprietà dei gas. Si può anzi dire che meccanica statistica e teoria cinetica dei gas formino un insieme difficilmente divisibile. Alla voce GAS si trova un cenno storico sui fondamenti della teoria cinetica dei gas e un'esposizione dei principali metodi di calcolo; viene anche discussa la connessione tra la probabilità e l'entropia di uno stato di un sistema, che forma il fondamento della termodinamica statistica. Nel seguito di questo articolo supporremo il lettore familiare con queste nozioni e daremo alcune notizie complementari, con particolare riguardo alle connessioni delle teorie statistiche con la teoria dei quanti.

SPAZIO DELLE FASI. — Il problema della statistica di un sistema costituito da un grande numero di costituenti, quale, ad esempio, un gas costituito da un grandissimo numero di molecole si può formulare così. Lo stato di un sistema meccanico si caratterizza, come è ben noto, nella meccanica classica, mediante la conoscenza della posizione e della velocità di tutti i punti materiali che lo costituiscono. Limiteremo per semplicità le nostre considerazioni al caso dei sistemi olonomi a vincoli indipendenti dal tempo (v. CINEMATICA, n. 32), tanto più che a questa categoria appartiene la quasi totalità dei sistemi che occorre considerare nelle applicazioni fisiche. Per questi sistemi, la posizione viene caratterizzata dai valori di certi parametri q_1, q_2, \dots, q_f , detti *coordinate generali*; il numero f di questi parametri è il numero dei gradi di libertà del sistema. La conoscenza delle f coordinate generali determina soltanto le posizioni, e non le velocità dei punti costituenti il sistema; per avere queste ultime occorre, oltre alle q_1, q_2, \dots, q_f , conoscere anche le loro derivate rispetto al tempo $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_f$. Possiamo dunque affermare che, per definire completamente lo stato di un sistema meccanico occorre dare $2f$ grandezze: $q_1, q_2, \dots, q_f, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_f$. È usuale e conveniente, nella meccanica analitica, usare un insieme di coordinate differente da questo: precisamente in luogo delle f grandezze: $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_f$ se ne introducono altre f : p_1, p_2, \dots, p_f , definite al modo seguente. L'energia cinetica T , come del resto qualsiasi altra funzione dello stato del sistema, è una funzione delle q e delle \dot{q}

$$T = T(q_1, q_2, \dots, q_f; \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_f).$$

La variabile p_r , che prende il nome di *momento coniugato* alla q_r , è data, per definizione, da

$$(1) \quad p_r = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \quad (r = 1, 2, \dots, f)$$

Invece che per mezzo delle coordinate generali e delle loro derivate rispetto al tempo, rappresenteremo lo stato del sistema per mezzo delle $2f$ variabili di stato

$$(2) \quad q_1, q_2, \dots, q_f, p_1, p_2, \dots, p_f.$$

Le leggi che determinano come le variabili di stato variano col tempo (equazioni del movimento) si possono scrivere, nella forma canonica di Hamilton,

$$(3) \quad \dot{q}_r = \frac{\partial H}{\partial p_r} \quad , \quad \dot{p}_r = -\frac{\partial H}{\partial q_r} \quad (r = 1, 2, \dots, f),$$

dove la funzione $H(q_1, q_2, \dots, q_f, p_1, p_2, \dots, p_f)$, detta *funzione di Hamilton*, o semplicemente *Hamiltoniana*, s'identifica, per il caso dei sistemi conservativi, con l'energia del sistema.

È assai opportuno, per la rappresentazione degli stati di un sistema, introdurre la seguente locuzione geometrica. Chiameremo, secondo J. W. Gibbs, *spazio delle fasi* uno spazio di $2f$ dimensioni, avente le $2f$ variabili di stato (2) come coordinate cartesiane ortogonali. Esiste evidentemente una corrispondenza tra i punti dello spazio delle fasi e gli stati del sistema: invero, dato lo stato, sono noti i valori delle q_r e delle p_r , e quindi si può costruire un punto dello spazio delle fasi; viceversa, dato un punto nello spazio delle fasi, se ne conoscono le coordinate q_r e p_r , e queste definiscono uno stato del sistema. Possiamo dunque affermare che un punto nello spazio delle fasi rappresenta uno stato del sistema e nel seguito parleremo indifferentemente degli stati del sistema oppure dei punti che li rappresentano nello spazio delle fasi.

Come lo stato di un sistema varia col tempo per effetto del movimento del sistema, così il punto che rappresenta lo stato nello spazio delle fasi si muove descrivendo una traiettoria. Il movimento è determinato dalle equazioni di Hamilton (3) che determinano le derivate rispetto al tempo delle coordinate q_r e p_r del punto rappresentativo e cioè le $2f$ componenti della sua velocità nello spazio a $2f$ dimensioni delle fasi.

Dalla forma delle equazioni di Hamilton risulta che, note le q_r e le p_r al tempo $t = 0$, resta determinato lo stato del sistema, e quindi i valori delle q_r e delle p_r , per ogni istante t passato o futuro. Ciò s'interpreta geometricamente dicendo: se è noto il punto P_0 che rappresenta lo stato al tempo zero, si può determinare il punto $P(t)$ che rappresenta lo stato ad un istante qualunque. Per il punto P_0 passa dunque una traiettoria (e una sola), luogo geometrico di tutti i punti $P(t)$; e tutto lo spazio delle fasi è rigato da una famiglia di tali traiettorie. Nel caso comune che il sistema sia conservativo e la Hamiltoniana H indipendente dal tempo, questa famiglia di traiettorie ha le seguenti proprietà:

a) per ogni punto dello spazio delle fasi passa una e una sola traiettoria;

b) ogni traiettoria giace per intero sopra una delle superficie

$$H = \text{costante}$$

(principio della conservazione dell'energia).

La forma di queste traiettorie, che si distendono sulle superficie $H = \text{cost.}$, è in generale assai complicata; essa ha notevole importanza nei problemi statistici.

A questo proposito si considerano i sistemi *ergodici*, e cioè quelli per cui le predette traiettorie, avvolgendosi continuamente sopra le superficie di energia costante, finiscono per passare per tutti i punti della detta superficie. Il sistema si dice invece *quasi-ergodico* se, pur non esistendo traiettorie che passino per tutti i punti della superficie $H = \text{cost.}$, esistono però delle traiettorie che la riempiono densamente; vale a dire che passano a distanza arbitrariamente piccola da ogni suo punto. Una definizione che sostanzialmente equivale alla precedente è questa: un sistema è quasi-ergodico se, presi sopra ogni superficie $H = \text{cost.}$ due elementi di superficie arbitrariamente piccoli esiste sempre almeno una traiettoria che li attraversa entrambi.

È essenziale, per la deduzione delle proprietà statistiche, il sapere se il sistema che si considera possa, oppur no, considerarsi ergodico o quasi-ergodico. Infatti, per arrivare a una deduzione meccanica della legge di Boltzmann, e cioè della legge fondamentale della meccanica statistica, è necessario ammettere che il sistema in considerazione (gas, corpo solido, ecc.) sia per lo meno quasi-ergodico. Vi sono state pertanto lunghe discussioni per decidere fino a che punto fosse legittima l'ipotesi che i sistemi, ai quali ordinariamente si applica la meccanica statistica, si possano considerare ergodici o quasi-ergodici. La conclusione è stata che, mentre non esistono sistemi meccanici ergodici, possono invece esistere sistemi quasi ergodici; sembra anzi che sistemi meccanici molto complicati e senza speciali caratteristiche di simmetria debbano in generale essere quasi-ergodici. E, naturalmente, i sistemi che occorre considerare nelle applicazioni statistiche, sono sempre di eccezionale complicazione, sia per l'enorme numero di costituenti, sia anche perché, a rigor di termini, si deve considerare che faccia parte del sistema anche l'insieme di tutti quei corpi che possono, per esempio attraverso a una trasmissione di calore, influenzare il movimento del corpo in considerazione. È dunque plausibile l'ipotesi che i sistemi ai quali si applicano le considerazioni statistiche siano quasi-ergodici (ipotesi della quasi-ergodicità).

Tra le proprietà dello spazio delle fasi che hanno maggiore importanza per le applicazioni statistiche dobbiamo ancora citare il teorema di Liouville. Consideriamo, nello spazio delle fasi, un volume elementare τ_o ; a ogni punto P_o appartenente a τ_o , facciamo corrispondere un altro punto P dello spazio delle fasi con la regola che P sia il punto rappresentativo dello stato in cui si trova, al tempo t , un sistema che, al tempo zero, era nello stato rappresentato da P_o . Se teniamo fisso il tempo t , l'insieme dei punti P riempirà un altro elemento di volume τ , corrispondente a τ_o ; il teorema di Liouville afferma che gli ipervolumi di τ e τ_o sono eguali.

LEGGE DI RIPARTIZIONE DI BOLTZMANN. - Il problema fondamentale della meccanica statistica consiste nella ricerca della legge di distribuzione per un sistema che si trovi a una temperatura assegnata. Questo problema

ha avuto per la prima volta una soluzione parziale dal Maxwell, per il caso di un gas costituito da molecole puntiformi; la soluzione generale per un sistema qualsiasi è dovuta a L. Boltzmann, e da lui prende il nome di legge di ripartizione di Boltzmann. Il problema della ricerca della legge di distribuzione si può formulare in modi diversi che vogliamo qui considerare.

Riferiamoci dapprima al caso di un gas costituito da molecole che, per semplicità, ammetteremo essere tutte della stessa specie. Ciascuna delle molecole è un sistema meccanico, il cui stato si potrà rappresentare come un punto in uno spazio delle fasi della molecola. Pensiamo di segnare in questo spazio tutti i punti che rappresentano gli stati in cui si trovano le varie molecole a un certo istante. La legge di densità, secondo cui questi punti sono distribuiti nello spazio delle fasi, determina in questo caso direttamente la distribuzione statistica delle molecole.

Accenniamo a un metodo per determinare tale distribuzione che, pur non essendo in alcun modo logicamente rigoroso, presenta il vantaggio di una grande semplicità ed evidenza. Pensiamo di suddividere lo spazio delle fasi in tante cellette, aventi tutte lo stesso ipervolume. Il volume si può scegliere abbastanza grande perché ogni cella contenga un considerevole numero di molecole, ma abbastanza piccolo perché le variazioni della densità di distribuzione dei punti rappresentativi entro una cella siano trascurabili. Indichiamo le varie celle con un numero d'ordine, e siano $N_1, N_2, \dots, N_s, \dots$ i numeri di molecole i cui punti rappresentativi appartengono alla 1^a, 2^a, ..., s^a, ... cella. Una elementare considerazione di calcolo combinatorio dimostra che il numero di modi di distribuire le N molecole costituenti il gas tra le varie celle, in modo che N_1 , appartengano alla prima cella, N_2 , alla seconda, ecc. ... è dato da

$$(4) \quad \Pi = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_s! \dots}.$$

Ammettendo a priori eguale la probabilità di ogni ripartizione delle molecole tra le varie celle (e si noti che questa ipotesi non è in alcun modo giustificata), l'espressione (4) si può ritenere proporzionale alla probabilità della ripartizione $N_1, N_2, \dots, N_s, \dots$

Conviene ora ricercare la ripartizione più probabile, quella cioè per cui Π è massimo. Occorre tener conto che le N_s sono vincolate da due relazioni. Una di esse:

$$(5) \quad N_1 + N_2 + \dots + N_s + \dots = N$$

esprime che il numero totale delle molecole è N; l'altra esprime il principio della conservazione dell'energia e si può formulare nel modo seguente. La energia di una molecola è una funzione dello stato di essa, e quindi del corrispondente punto nello spazio delle fasi; data però la piccola estensione delle celle, si può ritenere che entro ogni cella l'energia non varii sensibilmente. Chiameremo w_s l'energia delle molecole appartenenti alla s^a cella. Indicando con W l'energia totale del gas avremo allora la relazione

$$(6) \quad N_1 w_1 + N_2 w_2 + \dots + N_s w_s + \dots = W.$$

Il problema della ricerca della ripartizione più probabile si riduce così alla determinazione dei numeri $N_1, N_2, \dots, N_s, \dots$ in modo che soddisfino le due relazioni (5) e (6) e rendano massimo (4). Si trova così che i numeri N_s sono espressi da

$$(7) \quad N_s = g e^{-\beta w_s},$$

in cui g e β sono costanti, che si possono determinare in modo da soddisfare (5) e (6) e, al solito, e denota la base dei logaritmi naturali. La costante β si può anche esprimere per mezzo della temperatura assoluta T a cui è legata dalla relazione.

$$(8) \quad \beta = \frac{1}{kT},$$

dove la costante k , detta costante di Boltzmann, non è altro che il rapporto tra la costante R dei gas perfetti e il numero di Avogadro. Il valore di k è

$$k = 1,36 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2 \text{ gr sec}^{-2} \text{ gradi}^{-1} (*).$$

Siccome tutte le celle in cui abbiamo diviso lo spazio delle fasi hanno egual volume, i numeri N_s sono proporzionali alla densità dei punti rappresentativi nello spazio delle fasi. Possiamo dunque così formulare il risultato precedente:

Il numero delle molecole le cui coordinate e i cui momenti sono rispettivamente comprese negl'intervalli

$$(9) \quad \left\{ \begin{array}{l} q_1 \text{ e } q_1 + dq_1; \quad q_2 \text{ e } q_2 + dq_2; \dots; \quad q_f \text{ e } q_f + dq_f; \\ p_1 \text{ e } p_1 + dp_1; \quad p_2 \text{ e } p_2 + dp_2; \dots; \quad p_f \text{ e } p_f + dp_f \end{array} \right.$$

(e cioè i cui punti rappresentativi cadono nell'elemento d'ipervolume dello spazio delle fasi $dq_1 dq_2 \dots dq_f dp_1 dp_2 \dots dp_f$) è dato da:

$$(10) \quad dn = Ae^{-\frac{w}{kT}} dq_1 dq_2 \dots dq_f dp_1 dp_2 \dots dp_f,$$

A essendo una costante (che si può determinare conoscendo il numero totale delle molecole), mentre w rappresenta l'energia di una molecola espressa in funzione delle sue variabili di stato q_1, \dots, p_1, \dots . La formula (10) esprime la legge di ripartizione di Boltzmann, e si può considerare il risultato più importante della meccanica statistica.

Casi particolari e conseguenze importanti della legge di Boltzmann (10) sono:

La legge di ripartizione delle velocità di Maxwell: in un gas alla temperatura T il numero di molecole, per le quali le componenti u, v, w della velocità di traslazione sono comprese entro i limiti u ed $u + du$; v e $v + dv$; w e $w + dw$, è dato da

$$(11) \quad dn = \text{cost } e^{-\frac{m}{2kT}(u^2+v^2+w^2)} du dv dw,$$

m essendo la massa di una molecola (v. GAS).

(*) Questo valore di k era quello accettato al tempo della composizione di questo articolo. Un valore più approssimato è $1,38 \cdot 10^{-16}$ nelle stesse unità (N. d. R.).

Il principio della equipartizione dell'energia, che si può formulare nel modo seguente. Supponiamo che le molecole del gas siano riferite a un sistema di coordinate generali ortogonali, tali cioè che l'energia cinetica, che è in genere una forma quadratica delle \dot{q} , sia una forma quadratica ortogonale

$$(12) \quad T = \frac{1}{2} [m_1(q) \dot{q}_1^2 + m_2(q) \dot{q}_2^2 + \cdots + m_f(q) \dot{q}_f^2].$$

In questo caso l'energia cinetica si spezza nella somma di f addendi, ciascuno dei quali rappresenta l'energia pertinente a uno degli f gradi di libertà della molecola. Il principio della equipartizione dell'energia, che si può dedurre abbastanza semplicemente dalla legge di Boltzmann, afferma che: il valore medio dell'energia cinetica pertinente a ciascuno dei gradi di libertà della molecola è costante ed uguale a $kT/2$ (per le applicazioni di questo principio v. GAS).

Il problema della ricerca della legge di ripartizione si può formulare anche in una forma differente, che presenta in qualche caso notevoli vantaggi su quella che abbiamo fin qui illustrato. Invece di rappresentare individualmente lo stato di ciascuna molecola come un punto nello spazio delle fasi della singola molecola, riguarderemo il nostro corpo, ed eventualmente anche tutti gli altri corpi con i quali esso può interagire, come un unico sistema meccanico, avente un numero estremamente grande di gradi di libertà, e conseguentemente uno spazio delle fasi di un numero elevatissimo di dimensioni. Lo stato di questo sistema complesso sarà rappresentato da un punto del suo spazio delle fasi; e questo punto, col variare del tempo, si muoverà lungo una traiettoria che, se il sistema è quasi-ergodico, finirà per riempire densamente tutta una ipersuperficie di energia costante.

Accenniamo qui a un procedimento per arrivare con queste considerazioni a stabilire la legge di ripartizione di Boltzmann, in base alla ipotesi della quasi-ergodicità del sistema. Premettiamo perciò le seguenti proposizioni:

a) Si abbia un numero molto grande N di sistemi quasi-ergodici, tutti identici e del tutto indipendenti uno dall'altro. Lo stato di ciascuno di questi sistemi sarà rappresentato da un punto dello spazio delle fasi. Al variare del tempo ogni punto rappresentativo si muove su una superficie di energia costante, descrivendola tutta densamente. Supponiamo ora che le energie degli N sistemi siano ripartite uniformemente in uno strettissimo intervallo di energia da E ad $E + \Delta E$. Per conseguenza i punti rappresentativi saranno tutti contenuti nella intercapedine tra le due ipersuperficie

$$(13) \quad H = E \text{ ed } H = E + \Delta E.$$

Inizialmente i punti siano ripartiti tra queste due ipersuperficie con una legge di densità arbitraria. Col variare del tempo i punti si sposteranno e la densità della distribuzione verrà in generale a variare col tempo. Si può dimostrare, con una facile applicazione del teorema di Liouville, che la sola legge di densità che si mantiene stazionaria col tempo è quella uniforme. Per tale distribuzione di densità il numero di punti rappresentativi appar-

tenenti a un elemento di volume dello spazio delle fasi, contenuto nell'intercapedine tra le due superficie (13), è proporzionale al volume dell'elemento stesso; o, in altre parole, la probabilità che uno dei sistemi si trovi in uno stato appartenente all'elemento di volume è proporzionale al volume dell'elemento.

b) Consideriamo un sistema costituito da due parti, tra le quali si eserciti una interazione debolissima; e supponiamo che ciascuno dei due sistemi parziali 1 e 2 abbia un grandissimo numero di gradi di libertà. (Si pensi, per fissare le idee, a due corpi, contenenti ciascuno miriadi di molecole, e posti in contatto l'uno con l'altro, in modo che possano avvenire scambi di calore). Siano x_1, x_2, \dots, x_{N_1} , le coordinate e i momenti del primo sistema, e siano y_1, y_2, \dots, y_{N_2} le coordinate e i momenti del secondo sistema parziale. Dovremo allora considerare tre diversi spazi delle fasi: quello del primo sistema parziale, avente coordinate x_1, x_2, \dots, x_{N_1} ; quello del secondo sistema parziale con coordinate y_1, y_2, \dots, y_{N_2} ; e infine quello del sistema complessivo, costituito dall'insieme dei due sistemi parziali, che ha come coordinate $x_1, x_2, \dots, x_{N_1}, y_1, y_2, \dots, y_{N_2}$. Si noti che un elemento di volume dello spazio delle fasi complessivo si può scrivere nella forma $dx_1 dx_2 \dots dx_{N_1} dy_1 dy_2 \dots dy_{N_2}$ e cioè come prodotto di un elemento di volume del primo spazio delle fasi (e cioè $dx_1 dx_2 \dots dx_{N_1}$) per un elemento di volume del secondo spazio delle fasi (e cioè $dy_1 dy_2 \dots dy_{N_2}$).

Il volume dello spazio delle fasi del primo sistema, corrispondente a stati di energia compresa tra E_1 ed $E_1 + dE_1$, si potrà scrivere

$$(14) \quad d\tau_1 = \omega_1(E_1) dE_1;$$

e similmente per il secondo sistema avremo

$$(15) \quad d\tau_2 = \omega_2(E_2) dE_2.$$

È facile convincersi che se, come abbiamo ammesso, entrambi i sistemi hanno un numero grandissimo di gradi di libertà, ω_1 e ω_2 sono funzioni rapidissimamente crescenti dei loro argomenti. Si riconosce, per esempio, senza difficoltà, che se uno dei sistemi è un gas perfetto, contenente N molecole puntiformi, racchiuse in un recipiente di volume costante, si ha

$$(16) \quad \omega(E) = \text{cost } E^{\frac{3N}{2}-1}.$$

E siccome N è un numero grandissimo, l'esponente di E è molto grande e quindi la funzione ω rapidissimamente crescente.

Sia:

$$(17) \quad E = E_1 + E_2$$

l'energia totale del sistema complessivo. La probabilità che l'energia del primo sistema parziale sia compresa entro i limiti E_1 ed $E_1 + dE_1$ (e conseguentemente l'energia del secondo sistema parziale entro i limiti $E - E_1$ ed $E - E_1 - dE_1$) è proporzionale, secondo quanto si è detto in a), al volume dello spazio delle fasi complessivo corrispondente agli stati predetti. Un calcolo elementare dimostra che questo è a sua volta proporzionale a:

$$\omega_1(E_1) \omega_2(E_2) dE_1.$$

La ripartizione di energia più probabile si ha cercando il massimo della espressione precedente (o, che è lo stesso, del suo logaritmo) con la condizione di vincolo (17). Si trova così la seguente condizione di massimo:

$$(18) \quad \frac{d \log \omega_1(E_1)}{dE_1} = \frac{d \log \omega_2(E_2)}{dE_2}.$$

Siccome d'altra parte le due funzioni ω_1 e ω_2 crescono rapidissimamente al crescere dei loro argomenti, si riconosce che la probabilità di ripartizioni dell'energia totale E sensibilmente diverse da quella definita da (18) è praticamente trascurabile.

Il risultato precedente ci dice dunque che, se si portano in contatto diversi sistemi, aventi ciascuno un numero assai grande di gradi di libertà (in pratica costituito ciascuno da un grandissimo numero di molecole), l'energia si ripartisce tra di loro in modo tale che, per tutti i sistemi, la grandezza

$$\frac{d \log \omega(E)}{dE}$$

abbia lo stesso valore. E ciò significa che la grandezza precedente non dipende dalle particolarità speciali dei singoli sistemi, ma è funzione unicamente della temperatura T comune a tutti i sistemi in contatto. Possiamo dunque scrivere, per ogni sistema contenente un grande numero di molecole,

$$(19) \quad \frac{d \log \omega(E)}{dE} = F(T),$$

dove F è il simbolo di una funzione universale.

La relazione precedente si può usare per una definizione statistica della temperatura assoluta; oppure si può determinare $F(T)$ per mezzo della temperatura assoluta definita da un termometro a gas perfetto nel modo seguente. Applicando la (19) al caso di un gas perfetto, e tenendo conto della (16), si trova (trascurando l'unità in confronto del numero grandissimo N delle molecole)

$$F(T) = \frac{3N}{2E}.$$

D'altra parte l'energia delle N molecole - vedi GAS, formule (8), (8') - è:

$$E = \frac{3}{2} N k T$$

e quindi risulta:

$$F(T) = \frac{1}{kT}.$$

La (19) si può dunque scrivere:

$$(20) \quad \frac{d \log \omega(E)}{dE} = \frac{1}{kT}.$$

Siamo ora in grado di ottenere una semplice dimostrazione della legge di ripartizione di Boltzmann. Dato un sistema che si trovi alla temperatura T , ci proponiamo di trovare la probabilità che il punto rappresentativo del suo stato si trovi entro un elemento di volume $d\tau$ dello spazio delle fasi del sistema dato. Per mantenere il sistema alla temperatura T , possiamo pen-

sare di porlo in contatto con un corpo assai più grande del sistema dato e che si trovi alla temperatura T ; questo sistema funziona da «bagno di temperatura» e dovremo ammettere che esso abbia un numero grandissimo di gradi di libertà così che per esso valga la relazione (20). Chiamiamo w l'energia posseduta dal primo sistema quando il suo stato è rappresentato da un punto appartenente a $d\tau$. Se E è l'energia totale, l'energia del secondo sistema «bagno di temperatura» sarà $E - w$; per ipotesi w si può considerare assai piccolo in confronto di E . La probabilità cercata è proporzionale al volume dello spazio delle fasi per il sistema totale (primo + secondo); e questo volume è a sua volta proporzionale a:

$$\omega(E - w) d\tau.$$

Tenendo conto di (20), e del fatto che w si può considerare infinitesimo rispetto ad E , troviamo:

$$\omega(E - w) = \omega(E) e^{-\frac{w}{kT}}$$

e siccome $\omega(E)$ non dipende dallo stato del primo sistema, possiamo concludere che la probabilità che questo si trovi in uno stato appartenente a $d\tau$ è proporzionale a:

$$e^{-\frac{w}{kT}} d\tau,$$

che esprime la legge di Boltzmann. La costante di proporzionalità, ove occorra, si può determinare con la condizione che la probabilità totale è eguale ad 1; tale costante è dunque:

$$\frac{1}{\int e^{-\frac{w}{kT}} d\tau},$$

dove l'integrale si deve estendere a tutto lo spazio delle fasi.

Un'altra conseguenza notevole della formula (20) è la relazione, stabilita da Boltzmann, tra l'entropia di un sistema e la probabilità del suo stato. Da quanto si è detto risulta infatti che $\omega(E)$ si può ritenere proporzionale alla probabilità che il sistema abbia energia E . Integrando la (20) si ricava d'altra parte:

$$k \log \omega(E) = \int \frac{dE}{T}.$$

Il secondo membro rappresenta l'entropia; la relazione precedente si può dunque leggere:

$$\text{entropia} = k \log \text{probabilità}.$$

LA STATISTICA DELLA TEORIA DEI QUANTI. — Lo sviluppo della teoria dei quanti, iniziatosi per opera di M. Planck negli ultimi anni del secolo XIX, e cioè, poco dopo i classici lavori di Boltzmann, fu profondamente influenzato e, si può anzi dire, promosso dalle considerazioni statistiche; e a sua volta reagì sopra queste, modificandole in molti punti essenziali.

Il principio dell'equipartizione dell'energia, che è una diretta conseguenza della legge di ripartizione di Boltzmann, prende una forma parti-

colarmente espressiva nel caso che il sistema a cui lo si applica sia soggetto a forze di tipo elastico; è noto infatti che in questo caso i valori medi delle energie cinetica e potenziale sono eguali, e quindi l'energia totale è il doppio dell'energia cinetica media; quest'ultima, d'altra parte, è eguale, per il principio della equipartizione, a $(1/2)f\kappa T$, essendo f il numero dei gradi di libertà del sistema. Il valore medio \bar{w} dell'energia in un sistema elastico risulta dunque:

$$(21) \quad \bar{w} = f\kappa T.$$

Questo risultato, come anche del resto tutte le altre conseguenze del principio dell'equipartizione, si mostra in accordo con i fatti sperimentali solo parzialmente.

Così, per esempio, la (21) si può applicare a un corpo solido contenente N atomi, riguardando in prima approssimazione gli atomi come punti materiali legati tra di loro da forze elastiche; il numero dei gradi è in questo caso $3N$, e quindi la (21) ci dà:

$$w = 3N\kappa T$$

come espressione dell'energia termica del corpo solido. Se, per esempio, ci riferiamo ad un grammo-atomo, N è il numero di Avogadro; quindi $N\kappa = R$. La relazione diventa:

$$w = 3RT,$$

a cui corrisponde il calore atomico

$$c = \frac{dw}{dT} = 3R,$$

cioè: il calore atomico di tutti gli elementi solidi è costante e eguale a $3R$ (cioè circa 6 calorie-gradi). Questa non è altro che l'espressione della legge trovata empiricamente da Dulong e Petit.

Mentre così da una parte troviamo una conferma sperimentale del principio della equipartizione, lo stesso risultato conduce d'altro lato a serie difficoltà per la teoria. In primo luogo è noto infatti che la legge di Dulong e Petit è valida per la maggioranza dei corpi solidi a temperatura ordinaria; a basse temperature invece il calore atomico dei solidi scende al disotto del valore di Dulong e Petit, e tende ad annullarsi allo zero assoluto. Secondo il principio della equipartizione il calore specifico dei solidi dovrebbe invece essere costante. Altra difficoltà per la teoria si incontra quando si analizza la legittimità della ipotesi che, agli effetti statistici, gli atomi del solido si possono riguardare come punti materiali. È ben noto al contrario che l'atomo è un edificio di notevole complessità, avente un gran numero di gradi di libertà interni, che non sono stati considerati nella computazione del calore specifico del solido. Nella statistica classica non si trova alcuna giustificazione del perché questi gradi di libertà interni si debbano trascurare. Una difficoltà analoga, e cioè che alcuni dei gradi di libertà si debbono computare e altri trascurare agli effetti del calore specifico, si trova anche nella teoria del calore specifico dei gas.

Come ultimo esempio delle difficoltà che s'incontrano per l'applicazione del principio della equipartizione, citiamo il caso dello spettro del corpo nero, cioè della radiazione che si stabilisce entro una cavità, le cui pareti siano mantenute alla temperatura uniforme T . Si può dimostrare che il campo di radiazione entro una cavità di volume V ha proprietà dinamiche simili a quelle di un solido elastico che riempisse la cavità; ed è in particolare suscettibile di vibrare con certe frequenze caratteristiche, ognuna delle quali si può considerare corrispondente a un grado di libertà del sistema. Naturalmente, trattandosi di un sistema continuo, il numero totale dei gradi di libertà è infinito; si trova più precisamente che il numero delle frequenze caratteristiche comprese tra i limiti ν e $\nu + d\nu$ è dato da:

$$dn = \frac{8\pi V}{c^3} \nu^2 d\nu ;$$

(l'espressione precedente, integrata rispetto a ν da 0 a ∞ , diverge; ciò che indica appunto che il numero totale dei gradi di libertà è ∞).

Secondo il principio dell'equipartizione dell'energia si sarebbe indotti ad attribuire a ognuno di questi gradi di libertà, secondo la (21), l'energia media kT . Quindi, nella radiazione del corpo nero, l'energia raggiante di frequenza tra ν e $\nu + d\nu$ dovrebbe essere:

$$(23) \quad dw = \frac{8\pi k}{c^3} VT \nu^2 d\nu.$$

Questa formula, stabilita da Rayleigh e Jeans, si mostra in accordo con l'esperienza soltanto per basse frequenze ed alte temperarure. Che essa non possa esser valida in generale, risulta tra l'altro dal fatto che in questo caso l'energia totale della radiazione nera dovrebbe essere infinita, poiché si trova un risultato infinito integrando la (23) rispetto a ν da 0 a ∞ .

Appunto tentando di risolvere le difficoltà incontrate nella teoria statistica del corpo nero il Planck fu per il primo indotto a introdurre l'ipotesi dei quanti (v. ATOMO).

Il risultato fondamentale della teoria dei quanti, e cioè l'esistenza, per ogni sistema atomico o molecolare, di una successione discreta di valori possibili per l'energia, ha conseguenze statistiche assai notevoli. Siano $w_1, w_2, \dots, w_r, \dots$ i livelli energetici di un atomo o molecola. Possiamo domandarci quale è la probabilità che, alla temperatura T , il sistema si trovi in uno stato di energia w_r ; questo problema, che è l'analogo quantistico della ricerca della legge di ripartizione di Boltzmann, si può trattare in modo analogo al caso classico; si trova che le probabilità che il sistema sia negli stati $w_1, w_2, \dots, w_r, \dots$ sono rispettivamente proporzionali a:

$$e^{-\frac{w_1}{kT}}, e^{-\frac{w_2}{kT}}, \dots, e^{-\frac{w_r}{kT}}, \dots$$

Si noti che, affinché il risultato precedente sia valido, i livelli $w_1, w_2, \dots, w_r, \dots$, debbono essere tutti semplici; e quindi, in caso di degenerazione, ogni livello energetico deve venir ripetuto tante volte quanto è il suo grado di degenerazione.

Questa estensione della legge di Boltzmann ai sistemi quantizzati ha conseguenze molto importanti. Essa permette, per esempio, quando la si

applica a un oscillatore armonico, di calcolare il valore medio dell'energia alla temperatura T. Questo risulta:

$$(24) \quad \bar{w} = \frac{\hbar v}{\frac{\hbar v}{kT} - 1},$$

dove v è la frequenza propria dell'oscillatore e \hbar la costante di Planck. Nel caso limite, in cui $\hbar v$ sia trascurabile di fronte a kT , la formula precedente ci dà, come nella statistica classica, $\bar{w} = kT$; mentre altrimenti \bar{w} risulta minore di quanto corrisponderebbe al principio della equipartizione della energia. Attribuendo a ciascuno degli oscillatori (22) l'energia media (24) si trova, in luogo della formula di Rayleigh e Jeans, la seguente espressione per l'energia della radiazione del corpo nero avente frequenza compresa tra v e $v + dv$

$$(25) \quad dw = \frac{8\pi V}{c^3} \frac{\hbar v^3}{e^{\frac{\hbar v}{kT}} - 1} dv.$$

È questa la celebre formula di Planck per lo spettro del corpo nero, che è ottimamente verificata dall'esperienza, e costituì il primo fondamento sperimentale della teoria dei quanti.

La formula (24) fu successivamente applicata da Einstein e da P. Debye al problema dei calori specifici dei corpi solidi, e permise di trovare una spiegazione assai soddisfacente del fatto che la legge di Dulong e Petit cessa di essere valida per temperature molto basse e che il calore specifico dei solidi tende allo zero quando la temperatura scende allo zero assoluto.

Troviamo ancora nell'estensione della legge di Boltzmann ai sistemi quantizzati la giustificazione del fatto che normalmente nel calcolo dei calori specifici gli atomi si possono considerare come punti materiali, trascurando completamente i loro gradi di libertà interni: in genere negli atomi la differenza di energia tra il livello energetico più profondo (livello fondamentale) e gli altri livelli energetici è molto grande a confronto di kT . Perciò risulta dalle estensioni della legge di Boltzmann che la probabilità che l'atomo non si trovi nel livello energetico fondamentale è praticamente nulla. Per conseguenza l'energia dovuta ai gradi di libertà interni dell'atomo non varia al variare della temperatura; e questi dunque non portano alcun contributo al calore specifico della sostanza. Naturalmente risulta dalla spiegazione che abbiamo data, che essa non è valida in senso assoluto, ma solo finché la temperatura non oltrepassa certi limiti. Che del resto il contributo dei vari gradi di libertà del sistema al calore specifico vada decrescendo con la temperatura risulta anche, per il caso dell'oscillatore armonico, della (24); un'elementare discussione di questa formula mostra infatti che, per T tendente a zero, non solo \bar{w} , ma anche $d\bar{w}/dT$ tende a zero.

RELAZIONI CON IL PRINCIPIO DI NERNST. — Conviene qui notare la connessione dei risultati, a cui abbiamo accennato, col terzo principio della termodinamica o principio di Nernst (v. TERMODINAMICA).

Questo, come è noto, fissa la costante additiva che resta indeterminata nell'usuale definizione termodinamica dell'entropia, stabilendo che per tutti

i corpi (condensati) l'entropia si annulla allo zero assoluto. L'entropia di un corpo alla temperatura T si ottiene dunque dall'integrale

$$S = \int_{\circ}^T \frac{dQ}{T},$$

esteso ad un processo in cui il corpo viene riscaldato in modo reversibile dalla temperatura zero alla temperatura T ; dQ è il differenziale della quantità di calore trasmessa al corpo. Se indichiamo con c il calore specifico, potremo scrivere, per l'unità di massa della sostanza, $dQ = cdT$; e l'integrale precedente prende la forma

$$S = \int_{\circ}^T \frac{cdT}{T}.$$

Di qui si riconosce la necessità, affinché l'integrale converga nel limite inferiore, che il calore specifico c si annulli per $T = 0$. La statistica dei sistemi quantizzati conduce appunto a questo risultato.

Che, del resto, vi debba essere una correlazione tra l'esistenza di stati quantici discreti e la determinazione della costante dell'entropia, risulta anche dalle considerazioni seguenti.

Riferiamoci a un sistema A, costituito da un grande numero N di sistemi α indipendenti, tutti uguali tra di loro. Classicamente il problema della distribuzione statistica di un tale sistema si tratta suddividendo lo spazio delle fasi di ciascuno dei sistemi α in cellette aventi tutte lo stesso ipervolume. Se N_1, N_2, \dots sono i numeri dei sistemi α , il cui punto rappresentativo appartiene alla prima, alla seconda, ... cella, la probabilità dello stato, definita come numero di modi di realizzare la data distribuzione, è

$$\Pi = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots},$$

e la distribuzione più probabile, che corrisponde alla legge di ripartizione di Boltzmann, è quella che rende massima la probabilità Π .

In questa considerazione, basata sulla meccanica classica, il valore di Π , data la legge di densità della distribuzione nello spazio delle fasi, non è completamente determinato, poiché esso dipende ancora dalla scelta arbitraria del volume delle celle in cui è stato diviso lo spazio delle fasi. Un facile calcolo mostra che, cambiando questo volume per un fattore δ , Π si altera approssimativamente di un fattore.

$$\delta^{-N}.$$

Abbiamo stabilito d'altra parte, tra entropia S e probabilità Π la relazione di Boltzmann

$$S = k \log \Pi.$$

Al fattore che resta indeterminato in Π , per l'arbitrarietà nella scelta del volume delle celle, corrisponde, secondo questa formula, un'indeterminazione per una costante additiva nell'entropia S . Ciò indica che, servendosi della meccanica statistica classica, si ottiene l'interpretazione del secondo principio della termodinamica, ma non quella del principio di Nernst.

La situazione è del tutto differente, se introduciamo la quantizzazione dei sistemi a . In questo caso infatti resta automaticamente introdotta una classificazione discreta degli stati possibili dei sistemi a , senza la necessità di un'arbitraria suddivisione in cellette dello spazio delle fasi; e la distribuzione resta definita dalla conoscenza dei numeri N_1, N_2, \dots dei sistemi, che si trovano rispettivamente nel primo, nel secondo, ... stato quantico. Resta così tolto ogni elemento arbitrario dalla definizione della probabilità Π e conseguentemente, attraverso alla relazione di Boltzmann, anche dalla definizione statistica dell'entropia. Si potrebbe facilmente dimostrare che questa definizione dell'entropia corrisponde statisticamente al principio di Nernst.

Secondo quanto abbiamo esposto, alle varie celle, in cui si divide lo spazio delle fasi nella meccanica classica, corrispondono, nel caso dei sistemi quantizzati, gli stati quantici. È interessante notare quali sono le conseguenze di questo fatto nel caso limite di grandi numeri quantici, quando cioè, secondo il principio di corrispondenza, le differenze tra meccanica classica tendono a sparire. Riferiamoci per semplicità ad un sistema a un solo grado di libertà, avente la coordinata generale q e il momento coniugato p . Lo spazio delle fasi è in questo caso a due dimensioni e ha q e p come coordinate.

Nel caso limite dei grandi numeri quantici vengono, come è noto, a coincidere non soltanto i risultati della meccanica quantistica e di quella classica, ma anche quelli ottenuti dalle condizioni di quantizzazione di Bohr-Sommerfeld. La condizione di Sommerfeld

$$\int pdq = nh$$

s'interpreta geometricamente, nel « piano » delle fasi, così: l'area del piano delle fasi racchiusa entro l'orbita corrispondente all' n^{mo} stato quantico è nh . Ne segue che, se tracciamo, nel piano delle fasi, le orbite corrispondenti a tutti gli stati quantici, l'area compresa tra due orbite successive è uguale ad \hbar . E siccome ciascuno stato quantico corrisponde a una cella, concludiamo che: nel caso di sistemi a un grado di libertà lo spazio (piano) delle fasi si deve suddividere in celle di estensione (area) \hbar . Se il sistema avesse invece f gradi di libertà, le celle dovrebbero prendersi d'ipervolume \hbar^f .

Questi risultati si possono altresì mettere in relazione col principio di indeterminazione di Heisenberg

$$\Delta p \cdot \Delta q \sim \hbar.$$

Questo equivale, infatti, a dire che è fisicamente impossibile determinare lo stato di un sistema come un punto nello spazio delle fasi; il margine d'incertezza è, nelle migliori condizioni, entro un'area dell'ordine di grandezza \hbar , pari cioè all'estensione che abbiamo trovato doversi attribuire alle celle dello spazio delle fasi.

LE NUOVE STATISTICHE. — Abbiamo fin qui considerata la legge di ripartizione di Boltzmann da due punti di vista diversi, cioè:

a) esprimere la probabilità che un sistema, mantenuto a una data temperatura T, si trovi in un certo stato quantico (probabilità proporzionale ad $e^{-w/kT}$);

b) dato un sistema, costituito dall'insieme di molti sistemi elementari eguali tra di loro (atomi, molecole, ...), ricercare il numero di sistemi elementari che si trovano in un determinato stato quantico (numero proporzionale ad $e^{-w_r/kT}$).

Per la validità della legge di ripartizione di Boltzmann in questo secondo caso è necessario che i sistemi elementari che costituiscono il sistema totale siano indipendenti tra di loro (e cioè lo stato in cui si trova uno di essi non sia influenzato dallo stato in cui si trovano gli altri). Così, per esempio, la legge di Boltzmann sarà certamente valida se i sistemi elementari sono completamente isolati uno dall'altro; se invece i sistemi parziali sono distribuiti entro lo stesso volume, come per esempio, gli atomi o le molecole di un gas, esistono in genere delle interdipendenze tra di essi che vengono a infirmare la validità della legge di Boltzmann.

Se anche si esclude il caso che tra le molecole del gas si esercitano delle forze considerevoli, e cioè si considera il caso limite di un gas ideale, le molecole non si possono considerare indipendenti le une dalle altre a causa del fatto che esse sono indistinguibili tra di loro.

È noto che in un sistema contenente un certo numero di corpuscoli identici (quali, per esempio, gli elettroni di un atomo, oppure le molecole di un gas) si osservano dei fenomeni peculiari dovuti all'identità dei corpuscoli. Da questo punto di vista i diversi tipi di corpuscoli si possono classificare in due categorie:

a) corpuscoli, per cui vale il principio di Pauli (per esempio elettroni, protoni): hanno la proprietà che uno stato quantico semplice può essere occupato al più da un solo corpuscolo; uno stato degenero può essere al massimo occupato da tanti corpuscoli, quanto è il grado di degenerazione dello stato (v. ATOMO). Le autofunzioni sono in questo caso caratterizzate dalla proprietà di essere antisimmetriche (e cioè di cambiare di segno e non di valore) rispetto allo scambio delle coordinate di due qualunque delle particelle identiche;

b) corpuscoli, per i quali vale la statistica di Bose-Einstein (la giustificazione di questo nome si vedrà tra breve), quali, ad esempio, il nucleo di elio, l'atomo d'idrogeno o di elio, i quanti di luce, ecc.: sono caratterizzati matematicamente dalla proprietà delle loro autofunzioni di essere simmetriche rispetto allo scambio di due dei corpuscoli. Per quanto interessa le applicazioni statistiche, la proprietà che importa notare è la seguente: siano $N_1, N_2, \dots, N_r, \dots$ i numeri di corpuscoli che occupano rispettivamente il $1^{\circ}, 2^{\circ}, \dots, r^{\text{mo}}, \dots$ stato quantico; esiste uno, e un solo, stato del sistema definito dalla conoscenza dei «numeri di occupazione» $N_1, N_2, \dots, N_r, \dots$. Per intendere il significato di questo, si tenga presente che, per dedurre la legge di Boltzmann, abbiamo ammesso che lo stato predetto si potesse invece realizzare in

$$\frac{N!}{N_1! N_2! \dots}$$

modi diversi.

È facile convincersi che la probabilità *a priori* dei diversi stati viene considerevolmente alterata da queste proprietà dei sistemi contenenti particelle identiche. Possiamo chiarire la situazione con un esempio particolarmente semplice: si abbia un sistema contenente due particelle identiche, ciascuna suscettibile di occupare due stati quantici 1, 2. Siano N_1 ed N_2 i numeri di occupazione dei due stati; essi potranno *a priori* avere i valori

$$(2, 0) \quad (1, 1) \quad (0, 2).$$

Il numero di modi per realizzare questi tre stati sono, nel caso di Boltzmann, rispettivamente 1, 2, 1 – il fatto che lo stato (1, 1) si possa realizzare in due modi deriva dalla circostanza che le due particelle possono prendersi in un ordine oppure nell'ordine opposto –. Se invece vale la statistica di Bose-Einstein, i numeri di modi di realizzare i tre stati sono 1, 1, 1. Infine, se vale il principio di Pauli, i due stati (2, 0) e (0, 2) non si possono realizzare, e quindi i numeri di modi di realizzare i tre stati sono rispettivamente 0, 1, 0.

Si comprende agevolmente come queste peculiarità dei sistemi contenenti particelle identiche vengano ad alterare i pesi statistici da attribuirsi ai diversi stati di un gas, e quindi ad alterarne le proprietà.

I principi della statistica di Bose-Einstein furono per la prima volta usati dal fisico indiano Bose nell'applicazione alla teoria della radiazione del corpo nero considerata come un gas di fotoni (1925); successivamente Einstein riconobbe che il principio usato da Bose nella numerazione degli stati era suscettibile di applicazione più generale, e svolse la sua teoria di un gas ideale le cui molecole obbediscano alla statistica di Bose-Einstein.

Le conseguenze statistiche del principio di Pauli furono sviluppate da E. Fermi (1925)^(*); la statistica basata su questo principio è perciò chiamata statistica di Fermi.

Successivamente lo sviluppo della meccanica quantistica, particolarmente per opera di Heisenberg e Dirac, permise di riconnettere la validità della statistica di Fermi o di Bose-Einstein per le varie particelle elementari al carattere di antisimmetria oppure di simmetria delle autofunzioni rispetto allo scambio delle coordinate di due delle particelle identiche.

Le proprietà di un gas che obbedisca alla statistica di Fermi o a quella di Bose-Einstein, differiscono assai poco dalle leggi classiche dei gas perfetti (deducibili in base alla statistica di Boltzmann) finché la temperatura è elevata e la densità non troppo grande; le deviazioni diventano invece sensibili per basse temperature e per densità elevate, e sono, per le due nuove statistiche, in verso opposto. Precisamente, nel caso della statistica di Fermi, la pressione risulta più alta di quanto corrisponderebbe alla equazione di stato dei gas perfetti, mentre, se vale la statistica di Bose-Einstein, essa è più bassa. Tuttavia, se si considera un gas ordinario, il campo di temperatura e di pressione in cui queste deviazioni sono sensibili, è quello in cui si hanno già fortissime deviazioni dalle leggi dei gas perfetti, dovute all'azione delle forze intermolecolari e all'estensione finita delle molecole;

(*) Le relative pubblicazioni (Nº 30, 31) sono del 1926 (N.d.R.).

queste deviazioni sono tanto grandi da mascherare l'effetto puramente statistico.

Per conseguenza l'importanza delle nuove statistiche nell'applicazione ai gas ordinari è piuttosto scarsa. La statistica di Fermi ha invece trovato un'applicazione interessante allo studio del comportamento degli elettroni nell'interno di un metallo; è noto che alcuni degli elettroni nell'interno di un metallo possono spostarsi da atomo ad atomo e costituiscono una specie di «gas elettronico». La densità di questo è talmente grande, che le sue leggi statistiche e la sua equazione di stato deviano completamente dalle leggi dei gas perfetti, e obbediscono invece a quelle deducibili dalla statistica di Fermi. Le conseguenze della statistica di Fermi nello studio delle proprietà elettriche dei metalli sono state specialmente sviluppate da Sommerfeld (1927), che ha potuto, in base ad esse, dare un'interpretazione qualitativa della maggior parte delle proprietà dei metalli.

Raccogliamo qui i principali risultati delle nuove statistiche.

Legge di distribuzione: il numero medio di molecole in un stato quantico (completamente definito, sia per quanto riguarda lo stato interno, sia per quanto riguarda il moto del baricentro della molecola) è dato da

$$\frac{I}{A e^{\frac{w}{kT}}}$$

nel caso di Boltzmann;

$$\frac{I}{A e^{\frac{w}{kT}} - 1}$$

nel caso di Bose-Einstein;

$$\frac{I}{A e^{\frac{w}{kT}} + 1}$$

nel caso di Fermi; A è una costante, e w l'energia dello stato considerato. È chiaro che se l'espressione $A e^{\frac{w}{kT}}$ è molto maggiore di 1, e cioè se la probabilità di occupazione dello stato è molto piccola, i risultati delle tre statistiche vengono praticamente a coincidere; altrimenti si hanno considerevoli deviazioni tra di esse.

La differenza tra la legge di ripartizione di Boltzmann e le leggi di ripartizione delle nuove statistiche ha come conseguenza una differenza nella equazione di stato di un gas ideale (intendendosi con ciò un gas per il quale siano trascurabili le forze che si esercitano tra le varie molecole). Queste deviazioni, e i fenomeni ad esso connessi, si vogliono chiamare *fenomeni di degenerazione*.

L'entità dei fenomeni di degenerazione è determinata dal valore del parametro

$$(26) \quad D = \frac{n h^3}{(2 \pi m k T)^{3/2}},$$

dove n è il numero delle molecole per unità di volume ed m la massa molecolare. I fenomeni di degenerazione sono piccoli o grandi a seconda che D

è piccolo o grande in confronto all'unità. Così, ad esempio, per un gas ideale monoatomico, costituito da N molecole alla temperatura T e pressione p , occupanti il volume V , vale, secondo la statistica di Boltzmann, la classica equazione di stato dei gas perfetti

$$pV = NkT.$$

Nel caso delle nuove statistiche si trovano invece equazioni di stato differenti, che nel caso limite di piccola degenerazione, si possono scrivere

$$(27) \quad pV = NkT \left\{ 1 \mp \frac{N\hbar^3}{2^{5/2} V (2\pi mkT)^{3/2}} \right\}.$$

Vale il segno superiore nel caso della statistica di Bose-Einstein, e il segno inferiore nel caso della statistica di Fermi.

Dalla (27) risulta che le divergenze dall'equazione classica dei gas perfetti tendono a scomparire, quando il parametro di degenerazione si annulla. Se invece D è comparabile con l'unità, cioè nel caso limite di forte degenerazione, le leggi del gas degenere vengono a differire completamente dalle leggi classiche.

Si trova così, per esempio, che in un gas ideale che obbedisca alla statistica di Fermi, sia la pressione sia l'energia cinetica media delle molecole non si riducono a zero allo zero assoluto; esse tendono invece a valori limiti (detti rispettivamente *pressione* ed *energia allo zero assoluto*) dati da

$$(28) \quad P_0 = \frac{1}{20} \left(\frac{6}{\pi} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2 n^{5/3}}{m} \quad ; \quad L_0 = \frac{3}{40} \left(\frac{6}{\pi} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2 n^{2/3}}{m}.$$

Parimenti si trova che, per un gas ideale che obbedisca alla statistica di Fermi, il calore specifico C_v a volume costante non è costante, come risulterebbe dalla statistica di Boltzmann, ma decresce con la temperatura, e tende a zero per $T = 0$.

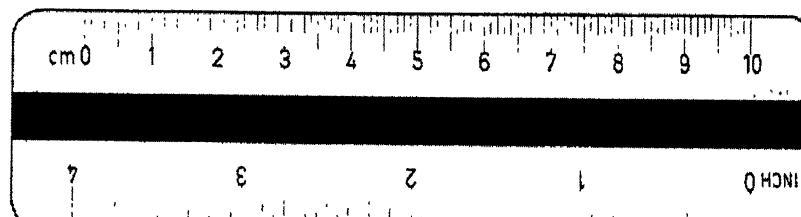
Queste proprietà, come abbiamo già accennato, hanno importanza per la spiegazione delle proprietà elettriche dei metalli. Si trova infatti che il gas di elettroni, a cui sono dovute queste proprietà, si trova in condizioni di degenerazione assai forte (infatti per esso, data la considerevole concentrazione e la piccola massa degli elettroni, il parametro D risulta molto grande anche a temperature elevate) e quindi il suo comportamento è sotto molti punti di vista del tutto differente da quello che avrebbe un gas secondo le leggi classiche.

BIBLIOGRAFIA.

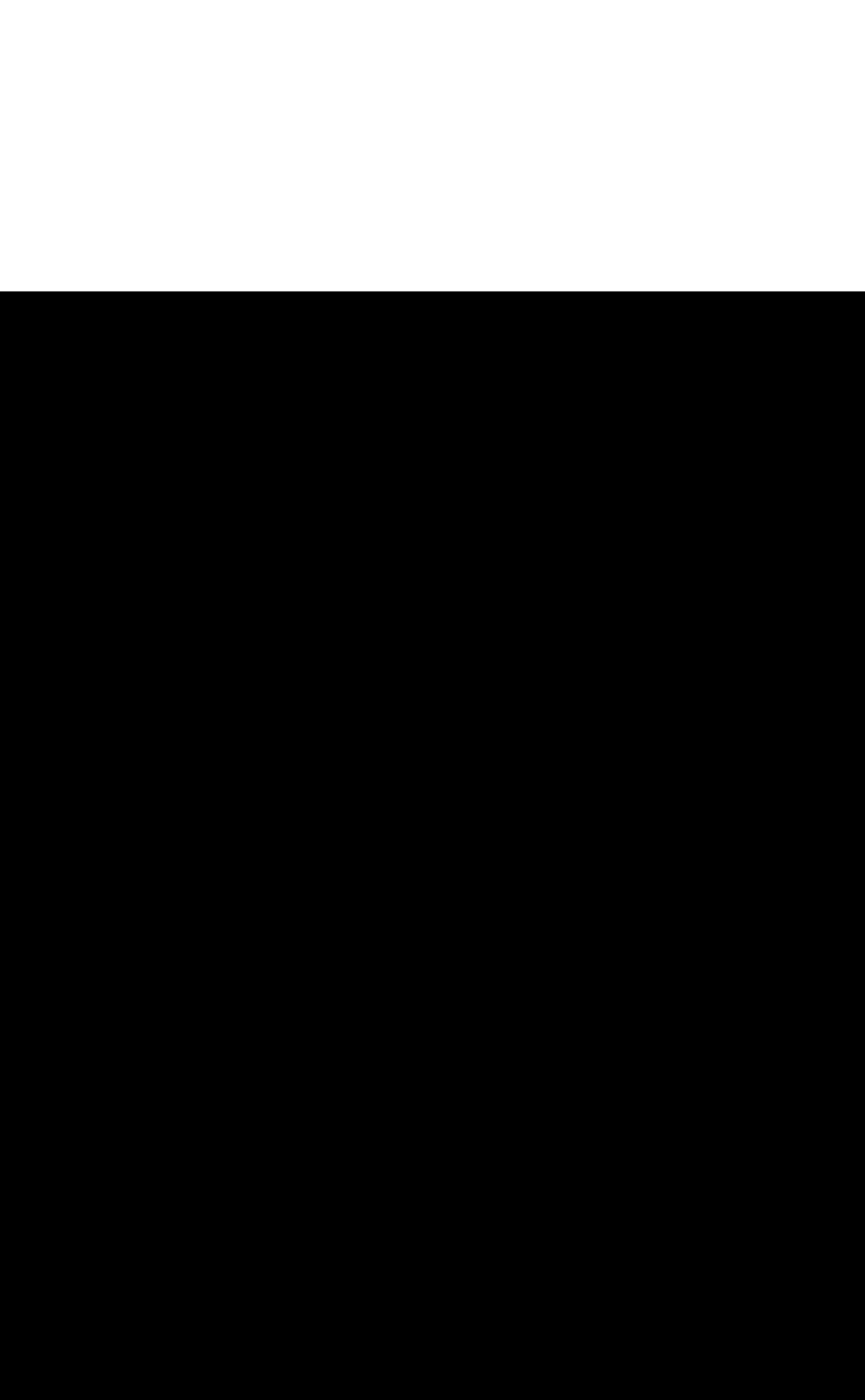
- L. BOLTZMANN, *Leçons sur la théorie des gas*. Parigi 1902.
- J. H. JEANS, *The Dynamical Theory of Gases*, Cambridge 1925.
- R. H. FOWLER, *Statistical Mechanics*, ivi, 1929.
- L. BRILLOUIN, *Les statistiques quantiques et leurs applications*. Parigi 1930.
- F. FERMI, *Molecole e cristalli*, Bologna 1934.



Geiger-Müller counter used by E. Fermi in his early work on artificial radioactivity.



One of the neutron sources used in the work on artificial radioactivity.



Nº 84 a to 110 (*).

Papers Nº 84 to 110 will be considered together. Their results are the culmination of the experimental activity of Fermi in Italy and they embrace one of the most fruitful periods of his career.

Fermi himself in the Nobel lecture of 1938 (Nº 128) gave a review of the work on the slow neutrons performed in Italy, and that paper should be kept in mind for a historical appraisal of the work.

Fermi's activity until 1934 had been mainly theoretical, but it is clear that he had already acquired some skill and experience in experimental physics as shown by the papers written up to that date on experimental subjects (e.g. Nº 28, 40 a, 78).

After Fermi had established himself in Rome and formed a school of young physicists, he had considered many times the possibility of fostering experimental work in Italy. Several of the physicists around him, who later became his close collaborators for years, were interested not only in theory but primarily in experimental physics and often the group had discussed which experimental fields looked most promising. Although the experimental equipment of the Institute of Rome was almost exclusively spectroscopic, and although the spectroscopic tradition was quite strong, there had been the feeling for several years that spectroscopy was approaching its maturity and that one should branch out into nuclear physics, because that was the field which held most promise.

Between 1930 and 1934 several of the group in Rome went to visit laboratories abroad in order to acquire knowledge of experimental techniques which were unknown at the time in Italy. Most of this work was subsidized by grants from the Rockefeller Foundation. Among the laboratories visited at length were those of Millikan in Pasadena (Rasetti), Stern in Hamburg and Zeeman in Amsterdam (Segrè), Debye in Leipzig (Amaldi) and Meitner in Berlin (Rasetti). Several of us spent a year or more in these laboratories learning several experimental techniques and when we returned to Rome we discussed at length what we had seen. After lively debates in which different opinions were discussed with plenty of vigor, it was decided, mainly on the impulse of Fermi, that the laboratory should branch into the nuclear field. It was at this stage that Rasetti, who had learned some of the nuclear techniques at Dahlem, started to prepare several pieces of apparatus and also initiated some experimental work, traces of which are found in these papers (Nº 78).

The occasion for a really new departure in the nuclear field occurred in 1934 with the discovery by I. Curie and F. Joliot of artificial radioactivity. Fermi immediately saw that their work could be expanded tremendously by using neutrons as projectiles. Just an occasion of this type was needed to trigger large-scale experimental activity in Rome. The start of the neutron experiments was facilitated by the very lucky circumstance that Professor G. C. Trabacchi in the "Laboratorio della Sanità Pubblica", which was located in the same premises as the Physics Institute in Via Panisperna in Rome, had on hand more than one gram of radium and the plant with which to extract the radium emanation and prepare radon-

(*) In arranging this group of papers it was found advisable to put together those having the same title and subject matter. This has produced some departure from a strictly chronological order. This remark applies especially to papers Nº 84 to 92.

Artificial Radioactivity by Neutron Bombardment VI is in "Ricerca Scientifica", 5 (2), 381 (1934) and as it is written by AMALDI, D'AGOSTINO and SEGRÈ it has been omitted from the series.

There is a number of papers: Nº 101, 104, 111, 126 which were written mainly in order to satisfy requests for semi-popular expositions or for other reasons important only at the time. They have not been reproduced.

beryllium sources. His wholehearted cooperation was invaluable and all the neutron sources which were used in the years 1934-1937 were prepared at this plant. The neutron work started in 1934 during Easter vacation. Fermi decided to put to the experimental test his idea that neutrons would be powerful projectiles for inducing nuclear transmutation. With his own hands, he built some primitive Geiger-Mueller counters of aluminum which looked very ugly but worked adequately for the purpose, and then started to bombard with radon plus beryllium neutrons all elements in order of increasing atomic number. The first source available was quite weak: 50 millicuries of radon plus beryllium. For a few days trials did not bring success, but Fermi was a systematic man. He stuck to the order of increasing Z. He started with hydrogen, and followed with lithium, beryllium, boron, carbon, nitrogen, oxygen, all with negative results. However, he was finally successful when he tried fluorine and got the expected result.

This was on March 25, 1934 and the letter announcing this result was promptly sent to the "Ricerca Scientifica" (Nº 84). Fermi, who wanted to proceed as fast as possible with the work, asked Amaldi and Segrè to help him carry out the experiment. Rasetti was absent in Morocco at the time and was notified to give him the opportunity to come back as soon as possible and participate in the work. D'Agostino was not originally in our group; he was a chemist in the laboratory of the Sanità Pubblica and at the time of this work he had a fellowship in Paris at the laboratory of Madame M. Curie. At the beginning, Fermi, Amaldi and I tried to push the work as fast as we could. We organized our activities in this way: Fermi would do a good part of the experiments and the calculations; Amaldi would take care of what we would now call the electronics, and I would secure the substances to be irradiated, the sources, and other necessary equipment. This division of labor was by no means rigid and each of us participated in all phases of the work. We proceeded at very great speed. It was soon apparent that chemistry would be an essential tool for the work to be performed and we were very glad to be able to get the help of a professional chemist, D'Agostino, when he returned from Paris for the Easter vacation. We barely knew him at the time, but soon became excellent friends. He never used his return ticket to Paris. Soon Rasetti also returned from his trip.

The papers Nº 84-88 are a faithful record written at short intervals of time of the work performed during the spring and early summer of 1934. The first thing we decided to do was the obvious: irradiate all the substances we could lay our hands on. Luckily, we obtained a small subsidy from the Consiglio Nazionale delle Ricerche in Rome, a sum of approximately 20,000 lire ($\sim \$1,000$ at the time) which we could spend with complete freedom. The irradiations went on quite regularly and soon we identified the (n, p) and (n, α) reactions. We also found that in many cases the neutron would produce radioactive isotopes of the target and there was great doubt whether this was the result of an $(n, 2n)$ or an (n, γ) reaction. At the time we still had the thought that the more energetic the neutrons, the more effective they would be in producing reactions. We finally reached the irradiation of uranium (Nº 86). The activities that we could produce were weak and it was necessary to purify the uranium from all its beta active products which would mask any artificial radioactivity produced by us. This was a very tedious task and allowed us to work only for a short time because the natural growth of beta activity in purified uranium prevented us from following the artificial activity for a long time. We thought that the irradiation of uranium should produce transuranic elements, for which we expected properties similar to those of Re, Os, Ir, Pt. We proceeded to show that uranium irradiated with neutrons did not produce any elements which have an atomic number between that of lead and uranium. The proof of this fact was obtained and was correct, but the possibility of fission somehow escaped us, although it was called specifically to our attention by I. Noddack, who sent us an article in which she clearly predicted the possibility of fission. The reason for our blindness is not quite clear; Fermi said occasionally, years later, that the data on mass defect available at the time were misleading and that on the basis of that information fission did not seem to be possible to him.

The summer vacation followed and Fermi spent it in South America. (See paper Nº 101). On his return to Europe he did not go directly to Rome but stopped in England for an International Conference on physics. (See papers Nº 102-103) At this conference he

reported the results of the work performed in Rome. During the same summer Amaldi and I went to Cambridge, England. Lord Rutherford had followed our work closely and on receiving one of the early letters to the «Ricerca Scientifica», had congratulated Fermi saying:

23rd April, 1934.

“Dear Fermi,

“I have to thank you for your kindness in sending me an account of your recent experiments in causing temporary radioactivity in a number of elements by means of neutrons. Your results are of great interest, and no doubt later we shall be able to obtain more information as to the actual mechanism of such transformations. It is by no means clear that in all cases the process is as simple as appears to be the case in the observations of the Joliot's.

“I congratulate you on your successful escape from the sphere of theoretical physics! You seem to have struck a good line to start with. You may be interested to hear that Professor Dirac also is doing some experiments. This seems to be a good augury for the future of theoretical physics!

Congratulations and best wishes,

Yours sincerely,

RUTHERFORD

. When we went to Cambridge, we discussed with him, in great detail, our work. The work which had been accomplished up to that date by our group is summarized in a paper which was presented by Lord Rutherford to the Royal Society (paper N° 98). The manuscript of this paper had been prepared in Rome and delivered to him in Cambridge. He read it immediately with great attention, made several corrections to improve our English, and turned it over to the Royal Society. I asked him whether it would be possible to obtain a speedy publication and he immediately answered, “What did you think I was President of the Royal Society for?” Unfortunately my understanding of Rutherford's English at the time was quite imperfect, and I lost several of his remarks. One of the questions which seemed of great importance to us was whether the reactions in which an isotope of the target was formed were (n, γ) or $(n, 2n)$. We tried to solve this problem by cross bombardments. At Cambridge at the time Bjerge and Westcott were working on similar problems and we joined forces. A reaction was found which we thought was a very clear-cut example of an (n, γ) reaction. The result was considered very important by us and was correct, although part of the argument by which the conclusion was reached was wrong.

In September, Amaldi and I returned to Rome. We immediately tried to reinforce our conclusions on the question of (n, γ) versus $(n, 2n)$ reactions by irradiating other substances besides the one used by Bjerge and Westcott. We thought we had found another clear-cut example of an (n, γ) reaction in aluminum, and we immediately communicated this result to Fermi who was still at the London International Conference. He referred to our experiment at one of the meetings. Shortly afterwards I caught a cold and could not go to the laboratory for several days. Amaldi tried to repeat our experiments and found a different decay period for irradiated aluminum which showed that our so called (n, γ) reaction did not occur. This was hurriedly relayed to Fermi who resented having communicated a result which now looked to be in error. He strongly criticized us and did not conceal his displeasure. The whole business was becoming very troublesome because we could not find any fault with the various experiments which gave inconsistent results. At this time we were joined by B. Pontecorvo who had just finished his Ph. D. thesis during the preceding year and had shown considerable promise. He was asked to help in the work and from there on participated in our research. It was now the beginning of the scholastic season 1934-35, and we started irradiations, again in a systematic fashion. In paper N° 98, published in the “Proceedings of the Royal Society”, the activity induced in various elements had been classified in a qualitative manner as strong (*s*), medium (*m*), and

weak (*w*). Such a classification seemed unsatisfactory to us and we decided to establish a quantitative scale of activability, even if it was a purely arbitrary one. Amaldi and Pontecorvo were assigned the study of this problem. They began to search for conditions of irradiation which would give easily reproducible results, using the 2.3 min period induced in silver as a standard.

They immediately encountered some problems because it became apparent that the intensity of the radioactivity that was obtained depended on the conditions of irradiation. In particular, there were certain tables supporting a spectroscope which had miraculous properties, since silver irradiated on those tables became much more active than when it was irradiated on other marble tables in the same room. The explanation was that the spectroscopic tables were of wood, and the source on the wood gave slow neutrons, whereas the source on the marble did not give them.

To clear up the mystery we felt the need for systematic observations. In the observation notebooks (the notebooks are now in the archives of the Domus Galilaeana) the data are recorded beginning with October 18, 1934. The first step is a series of measurements taken by Amaldi in and outside a small lead house (castelletto) whose walls were 5 cm thick. The results of these measurements show clearly that while, outside lead, the activation greatly decreases with the increase in distance, this does not happen in the lead house.

The next day these same measurements and other analogous ones were repeated, always in order to explain the action of the surrounding lead. Particular attention was focused on an absorption measurement in lead. As the next step a lead wedge was prepared to be inserted between the neutron source and the detector with the idea of comparing its absorption with that of a wide brick of lead of the same thickness. The lead was ready the morning of the 20th of October but it was actually used only a few days later. That morning Fermi^(*) suddenly decided to try first filters of light elements instead of the prepared lead filter. Paraffin was tried first. Although the experiment was performed during an examination period and several of us were absent, our friends Persico and Rossi were kibitzing on our work. About noon, we were all summoned to watch the miraculous effects of the filtration by paraffin. At first I thought that some counter had gone wrong because such strong activities had seldom appeared before. But it was immediately demonstrated that this strong activation was the result of filtering the radiation producing the radioactivity through paraffin. All this happened around noon. We tried a few more substances as filters and recognized that the powerful effect occurred only with paraffin. We went to lunch extremely puzzled by our observations and came back around three o'clock, after our usual siesta, to find that Fermi in the meantime had found the explanation of the strange behavior of filtered neutrons. He hypothesized that the neutrons could be slowed down by collisions and in this way become more effective, an idea which was contrary to our expectations. If Fermi's explanation was correct, it was clear that several consequences followed: for instance, maybe one could find an explanation of the (n, γ) versus $(n, 2n)$ reaction. During the same afternoon each of us thought of and repeated some past experiment with the slowing down hypothesis in mind. In about half an hour we had the explanation of the disagreement between the results of the different irradiations in aluminum; slow neutrons produced one activity, fast neutrons another. This was a great relief to us because it gave us the explanation to a serious puzzle and showed that we did not need to correct the minutes of the London Conference. We also tested that the radiation which produced the activity (neutrons and slow neutrons) was emitted by radon plus beryllium and not by radon alone, and that the effect of the paraffin was characteristic of hydrogen and not of carbon. Finally, Fermi went to the extreme of thinking that the neutrons could really be thermalized, and devised in the same day an experiment (unsuccessful at the time) to demonstrate this fact by slowing down the neutrons in hot water instead of cold water. All this happened on October 22, 1934, and by the evening of that day a short letter to the "Ricerca

(*) In this connection see the introductory remarks by CHANDRASEKHAR to the paper on *Origin of cosmic rays* to be published in volume 2 of these "Collected papers".

Scientifica" telling of all these surprising effects was on its way (Nº 105). The discovery of the hydrogen effect obviously opened a host of problems and we had to re-orient our entire research program. The first step was to measure, for many substances, what we called the "coefficient of aquaticity": namely, how much immersion in water would increase the activity, under specified conditions. This measurement gave us a confirmation that the (n, γ) reactions were the only ones sensitive to hydrogenous substances and by early November we were convinced that the slowing-down was the correct explanation of the phenomena observed (Nº 88). Our attention then turned more to the study of the slow neutrons themselves than the substances they produced, and we again tried to see whether slowing down in hot or cold water would change the properties of the neutrons. We had strong suspicions that neutrons were effectively thermalized, but at first we could not show any positive effect. Nevertheless, we kept trying this idea. Ultimately, Moon and Tillman in England succeeded in showing a thermal effect and we eagerly repeated their experiments. We soon found that some substances—for instance cadmium—absorb slow neutrons very strongly and we measured crude cross sections for this effect. We detected the capture gamma rays and we also started crude measurements of the density of slow neutrons in a hydrogenous medium as a function of the distance from the source. Finally, we tried to slow down neutrons by collisions with substances other than hydrogen and found some effects of inelastic collisions which explained our original observations on the effect of surrounding the source and the detector by lead. All this work was initiated and had given significant results by December, 1934; that is, about six weeks after the discovery of the slow neutrons themselves. Papers Nº 105 and Nº 106 are a chronological record of the experiments performed in those weeks. Approximately at this time, Professor Corbino, director of the laboratory, suggested that slow neutrons might have important practical applications and that it would be advisable to take out a patent on this work. This was done and resulted in Italian patent Nº 324458, of October 26, 1935, which was later extended to other countries.

The boron reaction was studied immediately afterwards and interpreted correctly as an (n, α) reaction (Nº 90). More systematic work followed in line with previous studies of activations and with considerable emphasis on uranium on which, however, we did not make great progress.

In this connection it may be interesting to recall the following unsuccessful attempt, made in January-February 1935, to explain the great number of new activities induced in thorium and uranium which had been isolated by the group in Rome as well as by other groups. Since, at that time, we tried to interpret all the activities observed as due to transuranic elements and their possible decay products, we thought that besides beta activity there must also be new radioactive alpha emitters. Thus we began to irradiate some foils of uranium or thorium (in the form of oxides), and put them, immediately after the irradiation, in front of a thin-window ionization chamber connected to a linear amplifier. As we failed to observe any alpha activity, we thought that this might be due to the fact that the corresponding half lives were too short, perhaps a fraction of a second. Therefore we set uranium in front of the ionization chamber and irradiated it there with a neutron source surrounded by paraffin. We set a piece of lead between the neutron source and the chamber, to reduce the action of gamma rays on the ionization chamber.

In performing these experiments, we thought that if the alpha emitters existed, and if they had a short half life, they ought to emit (according to Geiger-Nuttall's law) alpha particles of a range considerably greater than that of the particles emitted by uranium or thorium. For this reason the experiments were always carried out with uranium or thorium covered with a layer of aluminium equivalent to 5 or 6 cm of air. The experiments gave a negative result, and today it can be said that the phenomenon of fission of the heavy elements, discovered in 1939 by Hahn and Strassman, was not seen in Rome early in 1935 because of that aluminium layer. The aluminium layer stopped all the fission fragments and thus prevented them from getting inside the ionization chamber. In retrospect, it is difficult to say whether the fission explanation would have been found even if the phenomenon had been seen.

The main results of all the work mentioned above were summarized in a paper for the Royal Society (Nº 107) written in February, 1935. In it are the seeds of most of the important ideas and facts of neutron physics. Indeed, by this time Fermi had already made very substantial progress in the study of the theory of the slowing-down process. From the point of view of nuclear physics, there was a serious difficulty caused by the apparent lack of correlation between the scattering and the capture cross sections in cases where the capture cross section was very large, as for instance, cadmium. Fermi made several attempts to explain this phenomenon, but the reason became clear only through Bohr's work on the compound nucleus. On the other hand, the concept of scattering length and the possibility of resonances were very much present in Fermi's mind. Actually, the concept of scattering length with its typical diagram had been developed by Fermi since 1933 in order to explain some spectroscopic phenomena (pressure shift of spectral lines) which had been discovered experimentally by Amaldi and Segrè (Nº 95). Fermi had a great insight for discerning analogies in phenomena which were apparently completely unrelated, and much to our surprise he transferred the theory of the shift of the spectral lines to neutron physics without any difficulty. At this time, Fermi also made a number of calculations on the behavior of neutrons in hydrogenous media by what we would call today the Monte Carlo method. At the time he did not speak about it very much and I learned of this only many years later from Fermi himself. This experimenting with the theory of slowing-down neutrons brought its fruit the following year, as we shall see. In the spring of 1935, we also devised a mechanical experiment by which one could compare the velocity obtained by the neutrons with mechanical velocities in a wheel (Nº 92 a), and soon after the experiments of Moon and Tillman showing the influence of temperature, we could not only confirm their results but also measure by a mechanical device some data relevant to the velocity of the neutrons. A fast rotating wheel had been prepared for this experiment for some time, but it was possible to perform the work only in the very last days before Fermi's departure. The results did not become statistically established until Fermi's luggage was packed and he was about to take a boat from Naples. This is the only case I can remember of a real rush, at the time of the Rome work, and it certainly was very much against our general attitude and method of work which was intensive but never rushed.

With this we had reached the summer of 1935. When we left for our summer vacations our mood was not as happy as in previous years. The political developments of the time, especially the preparations of the Ethiopian war, and the grave deterioration of the situation in Europe, had seriously affected our work. During the summer of 1935 Fermi went abroad and some of us went to the United States to work at Columbia University. When the fall of 1935 came and we all should have returned to Italy, the Ethiopian crisis was at its height. Rasetti remained in the United States; Segrè had been appointed director of the physics laboratory at Palermo, and moved there; Pontecorvo had left Italy for France; and D'Agostino was busy with his work at the Sanità Pubblica. The group was virtually disbanded. Only Amaldi and Fermi were left in Rome with neutron sources. From there on the investigation concentrated mainly on the study of the slowing-down process and on the "groups of neutrons". Although very early it was surmised that the groups might correspond simply to different velocities, as it is in fact, there were many difficulties to be surmounted before this explanation was established. At a certain time it was even thought that there might be several kinds of neutrons, possibly different in spin. This work, however, was carried on under distressing conditions. The Ethiopian war and the sanctions imposed by the League of Nations on Italy for her aggression produced a gloomy atmosphere in Rome. There was a reduction of electric power and fairly severe regulations which required keeping windows sealed after dark. Fermi and Amaldi worked extremely hard, in part to forget the unpleasant situation. I remember visiting Rome from Palermo and finding them in a tired, preoccupied mood, very different from the one which had prevailed only a few months earlier.

84 a.

RADIOATTIVITÀ INDOTTA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — I.

« Ric. Scientifica », 5 (1), 283 (1934).

Desidero riferire in questa lettera sopra alcune esperienze destinate ad accettare se un bombardamento di neutroni non determini dei fenomeni di radioattività susseguente analoghi a quelli osservati dai coniugi Joliot con bombardamento di particelle α .

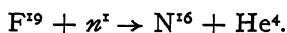
Il dispositivo che ho usato è il seguente: La sorgente di neutroni è costituita da un tubetto di vetro contenente polvere di berillio ed emanazione. Usando circa 50 millicurie di emanazione, che mi sono stati forniti dal professor G. C. Trabacchi che qui desidero ringraziare vivissimamente, si possono così ottenere oltre 100.000 neutroni al secondo, misti naturalmente a una intensissima radiazione γ , che però non dà alcun disturbo per esperienze di questo genere. Dei cilindretti contenenti l'elemento in esame sono sottoposti per un tempo variabile da alcuni minuti ad alcune ore alle radiazioni di questa sorgente.

Essi vengono poi rapidamente disposti attorno ad un contatore a filo, la cui parete esterna è formata da una foglia d'alluminio di spessore di circa 0,2 mm. tale quindi da permettere l'ingresso di eventuali raggi β nel contatore. Fino ad ora l'esperienza ha dato esito positivo per due elementi:

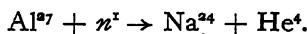
Alluminio. — Un cilindretto di alluminio irradiato dai neutroni per un paio d'ore e posto successivamente attorno al contatore determina nei primi minuti un aumento assai considerevole degli impulsi, che crescono di 30 o 40 al minuto. L'effetto decresce col tempo riducendosi a metà in circa 12 minuti.

Fluoro. — Il fluoruro di calcio, irradiato per pochi minuti e portato poi assai rapidamente accanto al contatore determina nei primi momenti un aumento del numero degli impulsi. L'effetto si smorza rapidamente, riducendosi a metà in circa 10 secondi.

Una possibile interpretazione di questi fenomeni è la seguente. Il fluoro, bombardato coi neutroni, si disintegra emettendo particelle α . La reazione nucleare è probabilmente:



Si formerebbe così un azoto di peso 16 che, emettendo successivamente una particella β può trasformarsi in O^{16} . Una simile interpretazione potrebbe avversi per l'alluminio, conformemente alla possibile reazione nucleare:



Il Na^{24} così formato sarebbe un nuovo elemento radioattivo e si trasformerebbe in Ca^{24} con emissione di una particella β .

Se queste interpretazioni sono corrette, si avrebbe qui la formazione artificiale di elementi radioattivi che emettono normali particelle β , a differenza di quelli trovati dai Joliot che emettono invece positroni. In particolare nel caso dell'azoto si avrebbero due isotopi radioattivi: N^{13} , trovato dai Joliot, che emettendo un positrone si trasforma in C^{13} ; ed N^{16} che, emettendo un elettrone si trasforma in O^{16} .

Sono in corso esperienze per estendere l'esame ad altri elementi e per studiare meglio le particolarità del fenomeno.

Roma, 25 marzo 1934-XII.

85 a.

RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — II.

«Ric. Scientifica», 5 (1), 330-331 (1934).

Proseguendo le esperienze col metodo descritto nella precedente lettera, sono state studiate le radioattività che si producono sotto bombardamento di neutroni ottenuti da un preparato di Emanazione + Berillio in numerosi altri elementi.

Ferro. — Periodo circa 2 ore. Nel caso di questo elemento si è potuta effettuare la separazione chimica. Il prodotto attivo che si forma è probabilmente manganese, perché segue questo metallo nelle sue reazioni caratteristiche.

Silicio. — Effetto molto intenso. Periodo circa 3 minuti. Gli elettroni emessi sono stati fotografati nella camera di Wilson. Si ottiene la stessa vita media sia usando silicio metallico che in forma di quarzo.

Fosforo. — Periodo circa 3 ore. Effetto intenso. Elettroni fotografati nella camera di Wilson. Una separazione chimica dà per il prodotto attivo che si forma i caratteri del silicio.

Cloro. — Dà un effetto con periodo molto più lungo degli altri elementi fino ad ora esaminati.

Vanadio. — Periodo 5 minuti.

Alluminio. — A conferma dei risultati della lettera precedente gli elettroni sono stati fotografati nella camera di Wilson.

Rame. — Effetto non intenso. Periodo circa 6 minuti.

Arsenico. — Periodo circa 2 giorni.

Argento. — Effetto intenso. Periodo circa 2 minuti.

Tellurio. — Periodo circa 1 ora.

Jodio. — Effetto intenso. Periodo circa 30 minuti.

Cromo. — Effetto intenso. Periodo circa 6 minuti. Elettroni fotografati nella camera di Wilson.

Bario. — Piccolo effetto. Periodo circa 2 minuti.

Hanno anche date indicazioni di effetti di varie intensità e periodo Na, Mg, Ti, Zn, Zr, Se, Sb, Br, La.

Alcuni elementi danno indicazioni di avere due o più periodi che possono in parte essere dovuti a diversi costituenti isotopi, e in parte anche a successive trasformazioni radioattive. Si proseguono le esperienze per precisare meglio questi risultati ed estendere lo studio ad altri elementi.

La reazione nucleare che determina questi fenomeni può essere diversa nei diversi casi. Le separazioni chimiche effettuate nel caso del ferro e del

fosforo sembrano indicare che, almeno in questi due casi, venga assorbito il neutrone ed emesso un protone. Il prodotto instabile, rispettivamente manganese e silicio, con emissione di una particella beta ritorna eguale all'elemento di partenza.

Le separazioni chimiche sono state eseguite dal dott. O. D'Agostino; per la parte fisica hanno collaborato i dott. E. Amaldi ed E. Segrè.

Roma, *Istituto Fisico dell'Università.*

86 a.

RADIOATTIVITÀ «BETA» PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — III.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ
«Ric. Scientifica», 5 (1), 452–453 (1934).

Sono state proseguiti ed estese le esperienze di cui alle Note precedenti⁽¹⁾ coi risultati che ricordiamo appresso.

Idrogeno – Carbonio – Azoto – Ossigeno. — Non danno effetto apprezzabile. Sono stati esaminati paraffina irradiata al solito modo per 15 ore con una sorgente di 220 mC, acqua irradiata per 14 ore con 670 mC e carbonato di guanidina irradiato per 14 ore con 500 mC.

Fluoro. — Il periodo del Fluoro è sensibilmente minore di quanto indicato precedentemente e cioè di pochi secondi.

Magnesio. — Il Magnesio ha due periodi, uno di circa 40 secondi e uno più lungo.

Alluminio. — Oltre al periodo di 12 minuti segnalato precedentemente ve ne è anche un altro dell'ordine di grandezza di un giorno. L'attività corrispondente a questo secondo periodo segue le reazioni chimiche caratteristiche del Sodio. Si tratta probabilmente di un Na^{24} .

Zolfo. — Il periodo dello S è assai lungo, certamente di molti giorni. L'attività si separa con le reazioni caratteristiche del Fosforo.

Cloro. — Si comporta analogamente allo S. Anche qui si può separare un principio attivo; probabilmente si tratta di un P^{32} identico a quello che si ricava dallo S.

Manganese. — Ha un effetto debole con un periodo di circa 15 minuti.

Cobalto. — Ha un effetto di 2 ore. Il principio attivo si comporta come Mn. Data l'identità di periodo e di comportamento chimico si tratta quasi certo di un Mn^{56} identico a quello che si forma irradiando il Fe.

Zinco. — Ha due periodi, uno di 6 minuti e uno assai più lungo.

Gallio. — Periodo 30 minuti.

Bromo. — Ha due periodi, uno di 30 minuti e l'altro di 6 ore. L'attività corrispondente al periodo lungo e probabilmente anche l'altra, seguono chimicamente il Br.

Palladio. — Periodo di alcune ore.

Jodio. — Periodo 30 minuti. L'attività segue chimicamente lo Jodio.

Praseodimio. — Ha due periodi. Uno di 5 minuti e l'altro più lungo.

Neodimio. — Periodo 55 minuti.

Samario. — Ha due periodi uno di 40 minuti e uno più lungo.

Oro. — Periodo dell'ordine di grandezza di 1 o 2 giorni.

(1) E. FERMI, «Ricerca Scientifica», 5 (1) p. 283, p. 330 (1934).

Uranio. — L'U liberato dai prodotti dotati di attività β che lo accompagnano e susseguentemente irradiato dà un effetto intenso con più periodi: uno di circa 1 minuto, uno di 13 minuti oltre a periodi più lunghi non ancora esattamente determinati. I raggi β corrispondenti al periodo di 13 minuti sono notevolmente penetranti.

Si è cercato di riconoscere con operazioni chimiche se l'elemento che si disintegra col periodo di 13 minuti fosse un isotopo di qualcuno degli elementi più pesanti. Possiamo escludere immediatamente che si tratti di un isotopo dell'U (92) o del Th (90) perché il principio attivo si separa facilmente da questi due elementi. Più difficile è la prova che non si tratti di un isotopo del Pa (91) dato che manca una sostanza radioattiva β adatta per queste prove, isotopa del Pa. Ci siamo dovuti servire per questo dell'UX₂ il quale ha un periodo di soli 70 secondi e perciò costringe a eseguire le operazioni chimiche molto rapidamente. Tuttavia operando in circa 2 minuti siamo riusciti a separare insieme a Mn, il principio attivo dall'U senza che venisse trascinata altro che una piccola frazione dell'attività di UX₂ che si sarebbe dovuta avere tenendo conto del decadimento di questa sostanza. Una tale separazione effettuata precipitando con NaClO₃ il MnO₂ da una soluzione nitrica fortemente acida è ugualmente completa anche in presenza di Ce e La. Ciò sembrerebbe escludere che il principio attivo abbia numero atomico 89 data l'analogia di questo elemento con le terre rare. La stessa reazione sembra anche escludere che si tratti di un isotopo del Ra (88) e tanto più di un ekacesio (87) o di una emanazione (86).

Questo insieme di conclusioni che stiamo cercando di suffragare con ulteriori esperienze fa sorgere spontanea l'ipotesi che il principio attivo dell'U possa avere numero atomico 93 (omologo del renio); il processo in questa ipotesi potrebbe consistere in una cattura del neutrone da parte dell'U con una formazione di un U⁹³ il quale subirebbe successivamente delle disintegrazioni β .

Abbiamo anche esaminato se alcune delle disintegrazioni osservate nei vari elementi fossero accompagnate da emissione di raggi γ . L'osservazione veniva fatta cercando se le sostanze agivano su di un contatore attraverso 2 millimetri di Pb.

Hanno dato un effetto positivo i seguenti elementi:

Al (ambedue i periodi) ; Si ; Fe ; Zn ; As ; U.

Hanno dato effetto negativo:

Mg ; S ; Ag ; Br ; J.

È stato infine costruito un dispositivo magnetico per determinare il segno delle particelle emesse analogo a quello descritto da J. Thibaud (2). Per ragioni di intensità dell'effetto si sono potuti studiare finora i seguenti elementi:

Al ; Si ; P ; S ; Ga ; Cr ; Fe ; Ag ; Br ; J.

In tutti i casi si sono osservati solo elettroni negativi.

Istituto Fisico della R. Università.

Roma, 10 maggio 1934-XII

(2) J. THIBAUD, «C. R.», 197, 447 (1933).

87 a.

RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — IV.

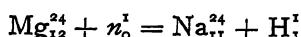
E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ

«Ric. Scientifica», 5 (1), 652-653 (1934).

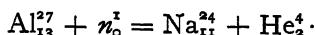
A complemento dei risultati comunicati nelle lettere precedenti⁽¹⁾, riferiamo su alcune ulteriori osservazioni.

Fluoro. — Abbiamo rideterminato il periodo del F in 9 secondi. Gli elettroni emessi sono assai penetranti riducendosi a metà in 0,32 gr/cm² di alluminio. Anche nelle seguenti misure gli assorbimenti sono fatti con spessori di alluminio. L'emissione dei raggi β del F è probabilmente accompagnata da raggi γ, poiché 2 mm. di Pb non assorbono completamente la radiazione emessa.

Magnesio. — Oltre al periodo di 40 secondi, abbiamo misurato il periodo lungo che è risultato di circa 15 ore ed è accompagnato da emissione γ. Gli elettroni corrispondenti a questo periodo si riducono a metà (spessore di dimezzamento) con 0,07 gr/cm². Il principio attivo si comporta come il sodio e si identifica probabilmente, poiché ha approssimativamente lo stesso periodo e la stessa penetrazione, col Na²⁴ estratto dall'Al. Le reazioni nucleari corrispondenti potrebbero essere le seguenti:

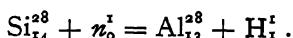


e



Alluminio. — Lo spessore di dimezzamento dell'attività corrispondente, al periodo di 12 minuti è circa 0,09 gr/cm². Il principio attivo del periodo breve non è stato ancora estratto chimicamente, ma è probabilmente Mg²⁷.

Silicio. — Lo spessore di dimezzamento dei raggi β è 0,2 gr/cm.² L'attività si separa chimicamente coll'Al e ciò rende probabile che la reazione nucleare sia



Ciò confermerebbe l'ipotesi dei coniugi Joliot e di Preiswerk che si formi qui l'Al²⁸ ottenuto dai Joliot bombardando con particelle α il Mg.

Fosforo. — Abbiamo confermato il risultato dei Joliot sull'esistenza di un periodo di circa 3 minuti. Lo spessore di dimezzamento dei raggi β corrispondenti al periodo di 3 ore è 0,11 gr/cm².

(1) «Ric. Scientifica», 5 (1), p. 283, 330, 452 (1934).

Zolfo e Cloro. - Lo spessore di dimezzamento risulta 0,12 gr/cm². La coincidenza delle curve di assorbimento della radiazione emessa conferma che si tratta in entrambi i casi della produzione di un P₁₅³².

Cromo. - Spessore di dimezzamento 0,2 gr/cm². Ha raggi γ . La coincidenza dei periodi fa supporre che V e Cr diano luogo a uno stesso isotopo radioattivo V⁵².

Ferro. - Spessore di dimezzamento 0,2 gr/cm².

Zinco. - È stato separato il principio attivo del periodo di 6 minuti che segue il Cu. L'egualanza dei periodi può far pensare che il principio attivo si identifichi con quello del Cu.

Arsenico. - Lo spessore di dimezzamento degli elettroni è di 0,2 gr/cm².

Molibdeno. - Ha almeno due periodi di cui uno dell'ordine di grandezza di un quarto d'ora e l'altro assai più lungo. L'effetto è poco intenso.

Rodio. - È molto attivo. Abbiamo rilevato 2 periodi. Uno di circa 2 minuti e uno molto più lungo. Lo spessore di dimezzamento per il periodo breve è circa 0,12 gr/cm².

Palladio. - Lo spessore di dimezzamento è circa 0,03 gr/cm².

Argento. - Oltre al periodo di due primi abbiamo rilevato un periodo breve, di poche decine di secondi. Lo spessore di dimezzamento è di 0,1 gr/cm².

Jodio. - Lo spessore di dimezzamento è di circa 0,11 gr/cm².

Tungsteno. - Ha un debolissimo effetto con periodo dell'ordine di grandezza di 1 ora che potrebbe forse esser giustificabile con impurità.

Iridio. - Effetto cospicuo. Periodo di circa 20 ore. Lo spessore di dimezzamento è di 0,17 gr/cm².

Oro. - Lo spessore di dimezzamento è 0,03 gr/cm².

Mercurio. - Debolissimo effetto con periodo di poche decine di primi, forse giustificabile con impurità.

I seguenti elementi irradiati per alcune ore con sorgenti dell'ordine di grandezza di mezzo Curie non hanno dato effetto apprezzabile:

Li ; Os ; Pb ; Bi ; Ru ; Tl.

Le sezioni d'urto per gli elementi più attivi sono dell'ordine di grandezza di 10⁻²⁴ ÷ 10⁻²⁵ cm². Naturalmente i neutroni usati da noi hanno una distribuzione continua di energia non ben conosciuta.

Tuttavia, a titolo di esperienza di orientamento per cominciare a farci un'idea dell'effetto che l'energia dei neutroni ha sulla sezione d'urto, abbiamo attivato F, Ag, J, e U con neutroni provenienti da una sorgente di Em+Be nell'intervallo di tempo in cui l'emanaione si stava mettendo in equilibrio coi suoi prodotti che emettono particelle α e in particolare col Ra C.

Dal confronto dell'attività prima e dopo che si fosse raggiunto l'equilibrio non ci sembra di poter dedurre che i neutroni più veloci, almeno nel piccolo intervallo di energia sperimentata, abbiano una sezione d'urto molto più grande di quelli lenti. Un aumento di attività sensibilmente maggiore che negli altri casi si osserva per lo Jodio.

88 a.

RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — V.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ

«Ric. Scientifica», 5 (2), 21-22 (1934).

Riferiamo su alcune ulteriori osservazioni che completano i risultati già comunicati nelle lettere precedenti.

Sodio. — Il periodo di dimezzamento di questa sostanza è di circa 40 secondi, l'intensità media. Da alcune separazioni chimiche di fluoro dal sodio attivato, sembra che il principio attivo non sia fluoro.

Vanadio - Cromo - Manganese. — Per tutti e tre gli elementi abbiamo riconosciuto un periodo di circa 4 minuti con misure più precise di quelle fatte in precedenza per il vanadio ed il cromo. Separazioni chimiche hanno mostrato che il principio attivo del cromo e del manganese è vanadio. È molto plausibile che si tratti di un V^{52} che si formerebbe anche dal V^{51} bombardato. Per il manganese, oltre il periodo di 4 minuti, se ne è osservato uno di circa 150 minuti il cui principio attivo non si lascia separare dal manganese ed è presumibilmente Mn^{56} che si forma anche dal ferro e dal cobalto.

Arsenico. — Una separazione chimica del principio attivo in presenza di gallio e germanio permette di escludere che si tratti del primo elemento e rende poco verosimile anche il secondo. L'ipotesi più probabile è che l'attività sia dovuta ad As^{76} .

Rubidio. — Ha un effetto molto debole con periodo di circa 20 minuti.

Rodio. — Abbiamo rideterminato i periodi e come valori più probabili diamo 50 secondi e 5 minuti.

Cadmio. — Ha un effetto molto debole con periodo di circa un'ora.

Iridio. — Una separazione chimica del principio attivo in presenza di osmio e renio sembra escludere che l'attività sia dovuta a questi elementi. Probabilmente essa proviene da isotopi dell'iridio.

Oro. — Una separazione chimica del principio attivo in presenza di iridio, platino e mercurio ci induce a ritenere che esso sia isotopo dell'oro.

Torio. — Da saggi preliminari sul torio liberato dai suoi prodotti radioattivi β , risulta una forte attività con almeno due periodi di cui uno minore di 1 minuto e l'altro dell'ordine di grandezza di un quarto d'ora.

Uranio. — Oltre ai periodi già noti di 10 secondi, 40 secondi e 13 minuti, si è determinato uno dei periodi lunghi dell'uranio attivato; esso è di circa un'ora e mezza.

Abbiamo cercato di stabilire con maggior precisione il rendimento dell'estrazione dell'attività di 13 minuti con la reazione del biossido di manga-

nese la quale trascina anche un po' dell'elemento 91 (UX_2). Si è trovato che il rendimento della reazione rispetto ai due elementi è nettamente diverso variando le condizioni di precipitazione. Per l'attività di 13 minuti si riesce a mantenerlo praticamente costante intorno al 15 % dell'attività totale, mentre quello per l' UX_2 oscilla tra l'1 ed il 7 %.

Si è ripresa anche la reazione di separazione del solfuro di renio in soluzione fortemente acida, con l'impiego di iposolfito sodico. Si è trovato che in questo modo si riesce a separare una quantità assai grande dell'attività di 13 minuti e di 100 minuti. Questa reazione oltre ad avere un rendimento intorno al 50 % è tanto selettiva in confronto all' UX_1 , e UX_2 che permette di separare le due attività anche da uranio non depurato. Queste reazioni sembrano confermare l'ipotesi che si tratti di elementi con numero atomico maggiore di 92.

Abbiamo anche determinato approssimativamente il numero di atomi dell'elemento attivo con periodo di 13 minuti che si disintegrano ogni minuto, formatisi in un grammo di uranio elemento irradiato in equilibrio alla distanza di 1 cm da una sorgente di un millicurie di radon + berillio. Tale numero è dell'ordine di grandezza di 50.

Istituto Fisico della R. Università.

Roma, 12 luglio 1934-XII.

89 a.

RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — VII.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÈ

« Ric. Scientifica », 5 (2), 467-470 (1934).

1. NUOVE ATTIVITÀ. — Abbiamo determinato i periodi di dimezzamento per l'attività dei seguenti elementi irradiati:

Potassio. — Ha una debole attività con periodi 16 ore (α)⁽¹⁾; una separazione chimica di Cl, A e Ca lascia l'attività nel K. Essa è quindi probabilmente dovuta a un nuovo isotopo radioattivo del potassio.

Gallio. — Ha un periodo di un giorno (α), oltre quello breve già segnalato.

Cadmio. — Il cadmio irradiato molto a lungo in acqua dà un debolissimo periodo di circa due giorni. Tuttavia, secondo le condizioni di irradimento, si eccitano attività con periodi diversi.

Indio. — Il periodo breve è di 13 secondi (α).

Antimonio. — Oltre a un periodo breve e debole ne ha uno di 2, 5 giorni intenso (α).

Praseodimio. — Oltre quello di 5 minuti ha un periodo di un giorno intenso (α).

Delle seguenti sostanze sono stati rimisurati con l'elettrometro alcuni dei periodi già indicati, ottenendo risultati piuttosto precisi: Mn-150^m, As-26^b, Rh-44^s.

2. SENSIBILITÀ ALLE SOSTANZE IDROGENATE. — Per cominciare a precisare quantitativamente l'effetto delle sostanze idrogenate sull'attivazione, abbiamo irradiato alcune sostanze sotto forma di cilindri del diametro del contagatore, mettendo la sorgente all'interno del cilindro, in modo da ottenere la massima attivazione possibile. L'irradiazione era fatta prima in un blocco di paraffina di dimensioni molto grandi, poi in aria. Il rapporto fra le attività osservate dà grossolanamente un coefficiente di sensibilità α all'azione di sostanze idrogenate che risulta, naturalmente, eguale ad 1 per quelle sostanze che non presentano un aumento di attività, irradiate in paraffina. Si trova per Na (40^s) $\alpha = 1$, Mg (40^s) $\alpha = 1$, Al (12^m) $\alpha = 1$, Al (2,5^m) α molto grande, Si (2,5^m) $\alpha = 1$, Cl (45^m) α molto grande, V (4^m) $\alpha = 40$, Cu (6^m) $\alpha = 15$, Rh (44^s) $\alpha = 15$, Ag (2^m) $\alpha = 15$, Ag (20^s) $\alpha = 30$, In (13^s) $\alpha = 12$, U (10^s, 13^m, 90^m) $\alpha = 1,6$.

(1) Il simbolo (α) significa che il periodo in questione ha un elevato coefficiente di sensibilità alle sostanze idrogenate (vedi N. 2 di questa Nota).

Questi dati sono da intendersi come puramente indicativi, poiché piccole variazioni nelle condizioni geometriche di irraggiamento influiscono molto sul risultato.

3. SEPARAZIONE DI ISOTOPI RADIOATTIVI. — Abbiamo separato, con vari metodi, gli isotopi radioattivi degli alogenzi, dell'arsenico e del manganese da quelli ordinari. Approfittando del fatto che l'urto neutronico può decomporre molecole o ioni e lasciarli in uno stato diverso da quello iniziale Szilard e Chalmers⁽²⁾ erano riusciti ad arricchire in isotopo radioattivo lo iodio estratto dallo ioduro di metile e il bromo estratto dal bromoformio.

Abbiamo ripetuto le loro esperienze estendendole anche al cloro (45^m) irradiato sotto forma di vari composti organici. Successivamente abbiamo riconosciuto che lo stesso effetto si può avere in composti inorganici, purché l'elemento sia legato in complessi difficili a formare spontaneamente. Per esempio, abbiamo irradiato iodati, bromati e clorati alcalini sia allo stato solido che in soluzione. Precipitando successivamente una traccia di ioduro, bromuro, o cloruro di argento, si trova dal 25 al 50% dell'attività totale nel precipitato.

Analogamente irradiando acido cacodilico, abbiamo potuto separare buona parte dell'attività dell'arsenico, precipitando dalla soluzione tracce di sulfuro d'arsenico. Irradiando permanganato potassico, si può raccogliere circa l'80% dell'attività precipitando una traccia di carbonato manganoso.

Dallo ioduro di metile o di etile gassosi irradiati è stato anche possibile raccogliere lo iodio radioattivo sopra un elettrodo di nichel (inattivabile) posto nel gas che si trovava in un campo elettrico destinato a facilitare la raccolta degli ioni. Il rendimento tuttavia non era molto elevato.

4. VELOCITÀ DEI NEUTRONI NELLA PARAFFINA. — Nell'ipotesi che l'azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata da bombardamento di neutroni sia dovuta al rallentamento dei neutroni stessi, abbiamo cercato di farci un'idea della velocità di questi neutroni, che chiameremo convenzionalmente «lenti». Poiché con una ventina di urti successivi con protoni, la velocità dei neutroni si può ridurre all'ordine di grandezza di quella dovuta all'agitazione termica, si potrebbe pensare che la temperatura agisse sulla densità del gas dei neutroni. Per controllare questo punto abbiamo fatto la seguente esperienza: Una lastrina di Rh veniva prima attivata in un miscuglio di idrocarburi (pentano e benzolo) alla temperatura ambiente; quindi a 200° in un altro miscuglio di idrocarburi (paraffina) che aveva, a quella temperatura, la stessa densità e composizione elementare del miscuglio freddo. La lastrina di Rh nelle due esperienze era irradiata nelle identiche condizioni geometriche (1 cm. dal pelo libero del liquido, 2 cm. dalla sorgente).

Non si è constatata alcuna differenza nell'attivazione, dal che sembra si possa concludere che l'energia dei neutroni «lenti» sia maggiore dell'energia di agitazione termica.

(2) L. SZILARD e T. A. CHALMERS, «Nature», 134, 462 (1934).

5. ASSORBIMENTO DEI NEUTRONI «LENTI». — Continuando le misure di assorbimento dei neutroni lenti abbiamo trovate diverse altre sostanze che presentano sezioni d'urto anormalmente grandi. Tali sezioni d'urto, prendendo per unità 10^{-24} cm² risultano per i seguenti elementi: Cl, 130; Co, 100; Ag, 100; Cd, 10000; In, 450; I, 40; Pr, 100; Au, 100; Hg, 1000.

Queste sezioni d'urto corrispondono ad assorbimenti misurati dal confronto della attività indotta nel rivelatore (Rh), posto in una cavità scavata nella paraffina, con quella indotta nello stesso rivelatore, posto nella medesima cavità, ma protetto da due strati della sostanza assorbente in esame. Occorre osservare che se le esperienze vengono fatte all'esterno della paraffina, anziché in una cavità, si trovano coefficienti di assorbimento minori; questo fatto può interpretarsi, nell'ipotesi che si tratti di neutroni «lenti», osservando che la loro velocità media in una cavità è minore che all'esterno della paraffina.

Abbiamo rilevato la curva di assorbimento, nel cadmio, dei neutroni «rallentati» dalla paraffina: si trova che l'attività trasmessa diminuisce con l'aumentare dello spessore assorbente, seguendo una legge non esponenziale; precisamente si arriva a valori tali dello spessore assorbente che un aumento dello spessore stesso influisce molto poco sull'attività. Questo fatto ha riscontro in misure da noi eseguite attivando del Rh, a distanza fissa dalla sorgente, in un recipiente contenente una soluzione con concentrazione variabile di acido borico⁽³⁾. Questi risultati possono interpretarsi ricordando che la distribuzione di velocità dei neutroni è continua.

In qualche misura di assorbimento abbiamo usato come rivelatore argento oltre che rodio, ottenendo risultati sostanzialmente eguali.

Per studiare l'assorbimento dei neutroni non «rallentati» da mezzi idrogenati, abbiamo interposto uno spessore di 5 gr/cm² di acido borico tra la sorgente e un cilindretto di Rh: la attivazione non è affatto minore di quella ottenuta in identiche condizioni geometriche, senza assorbitore.

6. EMISSIONE DI RAGGI γ . — Abbiamo istituito esperienze per stabilire se ai forti assorbimenti dei neutroni «lenti», particolari per alcuni elementi, corrispondesse l'emissione di radiazioni secondarie. Per questo scopo ci siamo serviti di una sorgente di Po + Be (circa 60 mC) e di un contatore di Geiger-Müller, immersi entrambi in un grosso blocco di paraffina. Sul percorso diretto si trovava uno spessore di 10 cm. di piombo per assorbire i raggi γ del Po + Be. Il contatore era protetto da una lamina di 2 mm. di piombo. Ponendo all'esterno di questa un sottile strato dei seguenti elementi: Cd, Hg, Cl, Y, Ir, abbiamo notato un aumento del numero degli impulsi, che arrivava fino a un centinaio per minuto. Si tratta probabilmente dell'emissione di raggi γ , che possono interpretarsi come corrispondenti all'energia di legame del neutrone «lento» catturato. Non abbiamo osservato tale radiazione, e neppure una eventuale radiazione secondaria meno penetrante (α , β , H) nel caso del boro, benché anche questo elemento presenti una grande sezione d'urto.

(3) «Ricerca Scientifica», 5 (2), 380 (1934).

Sono in corso esperienze per cercare di chiarire tale punto.

7. ATTIVAZIONE IN FUNZIONE DELLA DISTANZA. — Abbiamo studiato la variazione della intensità dell'attivazione del rivelatore di Rh in funzione della distanza dalla sorgente, qualora ambedue siano immersi in una vasca d'acqua di grandi dimensioni. Il risultato è riassunto nella seguente tabella:

Distanza in cm.	I	Attività 100
» » 2	» 92
» » 3	» 86
» » 4	» 76
» » 5	» 71
» » 6	» 54
» » 7	» 46
» » 8	» 33
» » 9	» 26
» » 10	» 22

Si vede che l'attivazione decresce piuttosto lentamente con la distanza. Sostituendo l'acqua con una soluzione di acido borico, pur diminuendo, naturalmente, l'attivazione, la forma della curva di dipendenza dalla distanza non cambia sensibilmente.

8. DIFFUSIONE DEI NEUTRONI «LENTI». — Abbiamo fatto inoltre una serie di esperienze per ricercare elementi che diffondessero i neutroni «lenti». Sull'asse di un blocco cilindrico, a 3 cm. dalla base superiore, viene posta la sorgente; sulla base superiore viene collocata una lastrina di Rh; il confronto tra l'attività così ottenuta nel Rh, con quella che si ha ricoprendo la lastrina con le diverse sostanze, dà una idea della diffusione dei neutroni «lenti» da parte delle sostanze stesse.

Si è trovato un aumento ben netto dell'attivazione ricoprendo la lastrina di Rh con carbone; (uno strato di parecchi cm. di spessore arriva a quintuplicare l'attività); un risultato analogo si ottiene con uno strato di basalto. Anche strati sottili di elementi leggeri (Be, C) producono un aumento sensibile della attivazione.

Con lo stesso dispositivo è stata fatta la curva della intensità della attivazione della lastrina di Rh in funzione dei cm di spessore di acqua sovrapposti; uno spessore di 1 cm. di acqua sovrapposto alla lastrina di Rh appoggiata sulla paraffina raddoppia circa la attivazione; per spessori maggiori l'incremento della attività si va facendo più lento.

Analoghi risultati si ottengono sovrapponendo alla lastrina di Rh strati variabili di paraffina.

Abbiamo anche studiato l'assorbimento e la diffusione di alcune sostanze con il seguente dispositivo: nel centro di un blocco cilindrico di paraffina di 11 cm. di altezza e 13 cm. di diametro, si trova la sorgente di neutroni: un cilindretto di argento (rivelatore) è posto a 30 cm. dalla sorgente.

Tra il cilindro di paraffina e il rivelatore, a 6 cm. dal rivelatore, possono interporvi gli strati delle diverse sostanze. Le condizioni geometriche delle esperienze sono tali che l'assorbitore intercetta esattamente i raggi provenienti dal cilindro di paraffina.

La differenza tra le attivazioni dell'argento, con e senza assorbitori, è dovuta a diffusione + assorbimento. Con un diffusore di paraffina si trova che 0,5 gr/cm² riducono l'attivazione a metà, ma la curva di assorbimento non è esponenziale. Sembra dunque che il cammino libero medio dei neutroni lenti nella paraffina sia dell'ordine di 7 o 8 mm.

L'esperienza fatta con diversi spessori diffondenti di acqua non ha dato risultati sostanzialmente dissimili.

Nel caso che lo strato assorbente sia di acido borico, l'assorbimento prevale sulla diffusione, e si trovano i risultati già riferiti. Per il carbonio si trova che 5 gr/cm² riducono all'incirca a metà; 3,45 gr/cm² di piombo riducono nel rapporto $0,83 \pm 0,07$; tale valore è da attribuirsi alla diffusione, perché sappiamo che uno strato di 3,45 gr/cm² di Pb non assorbe praticamente i neutroni «lenti».

9. EFFETTO DI SOSTANZE NON IDROGENATE SULL'ATTIVAZIONE. — Abbiamo anche cercato se sostanze non idrogenate producano incrementi nella attivazione analoghi a quelli dovuti, per esempio all'acqua e alla paraffina. Nelle poche sostanze fin qui esaminate (piombo, grafite, basalto), abbiamo trovato sempre un effetto, notevolmente minore tuttavia di quello dovuto, per esempio, all'acqua:

Piombo. — Un cilindretto di Rh è posto a 10 cm. dalla sorgente, in un interstizio praticato in mezzo al piombo; la quantità usata di piombo è tale che, grossolanamente, il punto medio del segmento sorgente-Rh può ritenersi al centro di una sfera di piombo di 50 cm. di diametro.

L'attività indotta nel Rh è circa 3 volte maggiore di quella che si ottiene attivando il Rh nelle identiche condizioni geometriche, ma senza piombo. Il fattore per cui si moltiplica l'attività diminuisce, naturalmente, quando diminuisce la distanza della sorgente dal rivelatore. Un effetto dovuto al piombo si trova anche nella attivazione dell'argento. Usando il silicio come rivelatore, per contro, non si osserva alcun effetto, analogamente a quanto avviene nei mezzi idrogenati. Quest'ultimo fatto suggerisce l'ipotesi che il fenomeno abbia la stessa natura di quello che si osserva nelle sostanze idrogenate: abbiamo quindi cercato se la radiazione che attiva il Rh in ambiente di Pb sia considerevolmente assorbita dal Cd, proteggendo il cilindretto di Rh con spessori variabili di Cd: si trova che il Cd assorbe notevolmente (riduzione a metà in circa 1 gr/cm²), in misura minore tuttavia di quanto assorbirebbe in ambiente idrogenato. Si noti che nel caso di un elemento pesante quale il Pb, non sembra possibile spiegare l'effetto come un rallentamento di neutroni dovuto a urti elastici. Se veramente si tratta di neutroni rallentati, potrebbe pensarsi all'influenza di urti anelastici.

L'effetto della *grafite* sull'attivazione del Pb è più intenso dell'effetto dovuto al Pb; l'intensità dell'attivazione, nel silicio, non aumenta in ambiente di grafite. La radiazione attivante il Rh è assorbita dal Cd, in misura

almeno altrettanto grande che nel caso del Pb. La massa di grafite a disposizione era assai piccola; un suo aumento potrebbe forse produrre un aumento considerevole degli effetti osservati. Con *basalto* si ottengono effetti analoghi a quelli sopra descritti.

È in corso una ricerca sistematica sull'effetto delle diverse sostanze sulla radioattività provocata da bombardamento di neutroni, dato che queste azioni sembrano essere generali e che spesso si producono involontari aumenti della attivazione per effetto degli oggetti circostanti: appunto per questa ragione le misure descritte in questo paragrafo non sono molto precise.

Istituto Fisico della R. Università.

Roma, 6 dicembre 1934-XIII.

90 a.

RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — VIII.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÈ
 « Ric. Scientifica », 6 (1), 123-125 (1935).

1. NUOVE ATTIVITÀ. — Abbiamo determinato i periodi di dimezzamento per i seguenti elementi irradiati:

Magnesio. — Irradiando MgO purissimo di Kahlbaum esente da alluminio, oltre alle attività già note ne abbiamo rilevata una debole con periodo di circa 10 minuti (a). Essa è probabilmente dovuta all'isotopo radioattivo ^{27}Mg (periodo 12 minuti) che si forma anche dall'alluminio irradiato con neutroni. In questo caso si tratterebbe di un nuovo esempio di cattura del neutrone.

Silicio. — Quarzo fuso irradiato ha mostrato una debole attività con periodo di qualche ora. Riteniamo si tratti anche qui di cattura del neutrone con formazione del ^{31}Si (periodo 145^m) che si ottiene anche dal P irradiato.

Bario. — Oltre al periodo breve abbiamo rilevato un periodo di circa 80^m (a).

Gadolino. — Ossido di Gd purissimo, gentilmente donatoci dal professor L. Rolla mostra un'attività con periodo di circa 8 ore (a).

Tungsteno. — Tungsteno mostra irradiato un'attività con periodo di circa 1 giorno (a).

2. DETERMINAZIONE PRECISA DI PERIODI. — Servendoci di una camera di ionizzazione (vedi 4), abbiamo determinato con maggior precisione i periodi di dimezzamento seguenti: Si, 137^s; P, 145^m; V, 225^s; Ga, 23^h; Br, 18^m e 255^m; Ag, 22^s e 140^s; J, 25^m; Pr, 19^h; Re, 24^h (oltre a un periodo più breve); Ir, 19^h; Au, 65^h.

3. SENSIBILITÀ ALLE SOSTANZE IDROGENATE. — Col metodo descritto nella lettera precedente abbiamo determinato il coefficiente di sensibilità α alle sostanze idrogenate per i seguenti elementi: P (137^s), Cr (225^s), Mn (225^s), Fe (150^m), Zn (6^m), Ba (3^m), Pr (5^m), Th (1^m e 15^m) hanno $\alpha = 1$. Se (35^m), Ba (80^m) hanno α molto grande.

4. — ASSORBIMENTO DEGLI ELETTRONI EMESSI — RAGGI γ . — Per le misure di assorbimento ci siamo serviti di una camera di ionizzazione riempita di CO₂ alla pressione di 3 Atm. e chiusa con una foglia di alluminio di 0,1 mm. di spessore. Le sostanze irradiate erano disposte in strato piano e

l'assorbimento era misurato interponendo foglie di alluminio. Per alcune sostanze che presentano un'intensa radiazione γ , (rivelata dalla ionizzazione residua che si ha schermendo la camera con 2 mm. di Pb) abbiamo tenuto conto di questa attività nel valutare il coefficiente di assorbimento dei raggi β . Una misura di controllo eseguita su UX₂ e RaE ha dato per i valori dei coefficienti di assorbimento quelli ordinariamente ammessi.

La seguente tabella dà gli spessori di dimezzamento in gr/cm² di alluminio per le stanze indicate.

P 145 ^m	0,15	In 54 ^m	0,045
V 225 ^s	0,17	Sb 2,5 ^d	0,09
Mn 150 ^m	0,14	J 25 ^m	0,10
Ga 30 ^m	0,17	Pr 19 ^h	0,13
As 26 ^h	0,16	Re 24 ^h	0,12
Br 18 ^m	0,12	Ir 19 ^h	0,12
Br 255 ^m	0,12	Au 65 ^h	0,04
Rh 44 ^s	0,15	U 13 ^m	0,14

Data la maggiore intensità di molti prodotti attivi attualmente disponibili in seguito alla esaltazione del potere attivante dei neutroni in sostanze idrogenate, abbiamo potuto rilevare una emissione di raggi γ per alcuni elementi, (Rh 44^s, Br 18^m e 255^m), nei quali ci era sfuggita in ricerche precedenti. Si è inoltre osservata emissione di raggi γ in V (225^s), Mn (150^m), Cu (6^m), Ga (23^h), In (54^m), Sb (2,5^d), J (25^m), W (1^d).

5. SEPARAZIONI CHIMICHE. — *Antimonio* metallico irradiato è stato sciolto in acqua regia. Aggiunto Sn e separatolo dall'antimonio col metodo di Clarke, l'attività seguiva l'antimonio. Allo stesso Sb abbiamo aggiunto, e quindi separato da esso, indio, approfittando della diversa solubilità dei solfuri negli acidi diluiti. L'In è stato trovato inattivo. Anche Te e J, aggiunti e separati, rispettivamente l'uno per riduzione, l'altro come AgJ, sono stati trovati inattivi. L'attività dell'antimonio di periodo 2,5^d è quindi da attribuirsi a un suo isotopo.

Anidride tungstica irradiata è stata disciolta in soda caustica e dalla soluzione è stato separato il tantalio come pentossido, inattivo. Alla soluzione di tungstato è stato poi aggiunto renio in soluzione nitrica e separato il W come anidride tungstica. Il Re rimasto in soluzione era inattivo. Non disponendo di hafnio abbiamo separato da una soluzione ammoniacale di anidride tungstica l'idrato di zirconio inattivo. È perciò molto probabile che l'attività sia dovuta a un isotopo del W.

Dal *renio* irradiato sciolto in HNO₃ si sono separati successivamente Ta come pentossido e W come anidride tungstica e trovati inattivi. Le attività sono dovute probabilmente ad isotopi del Re.

6. AZIONE DEI NEUTRONI LENTI SUL BORO. — Abbiamo accennato in precedenti lettere che:

a) i neutroni rallentati dalla paraffina o dall'acqua sono anomalmente assorbiti dal B (riduzione a metà da 0,004 gr/cm²);

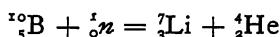
b) che a differenza di quanto accade per parecchi altri elementi che hanno un assorbimento intenso per neutroni lenti, il B (come anche il Li) non emette raggi γ all'atto dell'assorbimento del neutrone. Mentre preventivamente non eravamo riusciti ad osservare in questo caso l'emissione di particelle, abbiamo potuto ora rilevare, colle esperienze che passiamo a descrivere, una radiazione α .

1. - Una camera di ionizzazione è stata riempita di $B F_3$ gassoso. Ponendola in presenza di una sorgente di 50 mC, di Po + Be e circondandola di paraffina per rallentare i neutroni, si osserva una ionizzazione molto intensa. Il valore di tale ionizzazione si riduce circa a metà schermendo la camera con Cd in strato di 0,02 gr/cm²; ciò indica che l'effetto è specifico dei neutroni lenti. Un'altra conferma si ha dal fatto che il Po + Be senza paraffina non dà un effetto paragonabile col precedente.

2. - Lo stesso effetto in misura naturalmente minore si può osservare con una camera di ionizzazione piena d'aria disponendo del boro elemento sul fondo della camera. Variando la pressione nello strumento e determinando la differenza tra la ionizzazione senza e con uno schermo di Cd, (cioè la frazione della ionizzazione dovuta ai neutroni lenti), si può determinare per quale pressione il «range» delle particelle ionizzanti emesse dal boro in queste condizioni diventa paragonabile colle dimensioni della camera di ionizzazione. Si trova così un percorso di 0,7 o 0,8 cm.

3. - Abbiamo osservato lo stesso fenomeno per mezzo di un amplificatore proporzionale: probabilmente nelle esperienze preliminari questa radiazione ci era sfuggita a causa della sua piccola penetranza. Anche le misure coll'amplificatore proporzionale sono in accordo con le precedenti e danno un percorso di 7 od 8 mm. Queste osservazioni hanno permesso anche di misurare il valore massimo della ionizzazione totale prodotta in un singolo processo. Questa (40.000 coppie di joni) corrisponde alla ionizzazione prodotta da una particella α del percorso di 0,8 cm.; poiché tale valore coincide con quello osservato, concludiamo che si tratta molto probabilmente di particelle α di circa 14×10^5 e V.

Da ciò e dal fatto che nel B non si osserva radioattività indotta, si è portati a ritenere come la reazione nucleare più plausibile:



Computando anche l'energia del nucleo di Li di rinculo, l'energia che si libera nella reazione è di 22×10^5 eV.

Calcolata in base ai difetti di massa, l'energia di reazione, trascurando la piccola energia del neutrone primario, risulterebbe di 2×10^6 eV. più grande.

Anche il Li irradiato con neutroni lenti emette particelle pesanti di percorso di alcuni centimetri. Sono in corso ulteriori esperienze in proposito.

7. EFFETTO DI SOSTANZE NON IDROGENATE SULL'ATTIVAZIONE. - Abbiamo studiato l'effetto del silicio e del ferro sulla attivazione provocata da bombardamento di neutroni. A 10 cm. di distanza dalla sorgente veniva

attivato il Rh, prima in aria, poi in un recipiente contenente silice. L'attività del rodio viene moltiplicata circa per un fattore 2,5 in un ambiente di SiO_2 . Se si attiva del Si per conto, non si ottiene nessun aumento di attività in ambiente di SiO_2 .

Abbiamo invece constatato che grosse masse di ferro circostanti alla sorgente e il rivelatore non producono un aumento notevole della attivazione, sia nel Rh che nel Si.

8. SUI NEUTRONI PRODOTTI DA RAGGI γ + Be. - L. Szilard e T. A. Chalmers⁽¹⁾, L. Meitner⁽²⁾ hanno osservato che, usando come sorgente di neutroni del Be sottoposto all'azione dei raggi γ , si attivano soltanto gli elementi che rimangono isotopi di sé stessi. Poiché i neutroni rallentati nella paraffina godono, per quanto finora noto, della stessa proprietà, abbiamo ricercato se i neutroni di Szilard e Chalmers fossero assorbiti notevolmente da un elemento, come il Cd, che presenta per i neutroni lenti una sezione d'urto elevatissima. Per questo abbiamo usato come sorgente di neutroni un preparato di 100 mgr di Ra circondato da Be; l'attivazione in un cilindretto di Rh non diminuiva sensibilmente quando la sorgente era protetta da 0,5 gr/cm². di Cd. Ciò può interpretarsi ammettendo che i neutroni di Szilard e Chalmers siano notevolmente più veloci di quelli rallentati in paraffina.

Istituto Fisico della R. Università.

Roma 11 gennaio 1935-XIII.

(1) L. SZILARD e T. A. CHALMERS, « Nature », 134, 494 (1934).

(2) L. MEITNER, « Naturw. », 22, 759 (1934).

91 a

RADIOATTIVITÀ INDOTTA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI (*). — IX.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, E. SEGRÈ

«Ric. Scientifica», 6 (1), 435-437 (1935).

1. DETERMINAZIONE PRECISA DI PERIODI. — Abbiamo determinato con precisione per mezzo di una camera di ionizzazione collegata con un elettrometro i periodi di dimezzamento di alcune sostanze bombardate con neutroni:

Al 137 secondi e 10 minuti; S 14 giorni; Cl 37 minuti; Cu 5 minuti; Zn 10 ore; Ga 20 minuti; Rh 3,9 minuti; Sb 2,5 giorni; Th 24 minuti.

2. SENSIBILITÀ ALLE SOSTANZE IDROGENATE. — Col metodo descritto precedentemente abbiamo determinato il coefficiente di sensibilità alle sostanze idrogenate nei seguenti elementi:

F (9 secondi e 45 secondi) $\alpha = 1$, Mn (150 minuti) $\alpha = 23$,
 Zn (10 ore) $\alpha = 1$, Ga (20 minuti) $\alpha = 2,5$, As (26 ore) $\alpha = 6$,
 Se (35 minuti) $\alpha = 5$, Br (18 minuti) $\alpha = 8$, Rh (3,9 minuti) $\alpha = 25$,
 Sb (2,5 giorni) $\alpha = 4$, J (25 minuti) $\alpha = 5$, Ba (80 minuti) $\alpha = 9$.

3. ASSORBIMENTO DEGLI ELETTRONI EMESSI. — Col metodo descritto precedentemente abbiamo misurato lo spessore di dimezzamento in gr/cm^2 di Al per gli elettroni emessi nelle seguenti attività:

Si (137 secondi) 0,19; P (145 minuti) 0,15 (nella nota precedente per errore di stampa era stato dato 0,07); S (14 giorni) 0,10; Ag (140 secondi) 0,08; J (25 minuti) 0,11.

4. SEPARAZIONI CHIMICHE. — *Fosforo*. — L'attività con periodo 137 secondi è stata separata insieme ad alluminio. Una soluzione di acido fosforico irradiato è stata neutralizzata con carbonato sodico; quindi si è aggiunta una traccia di cloruro di alluminio. Il fosfato di alluminio separato ha trascinato tutta l'attività.

Cloro. — Ad acido cloridrico irradiato e neutralizzato con soda abbiamo aggiunto acido nitrico facendo poi bollire. Aggiungendo alla soluzione acido solforico e fosforico abbiamo precipitato solfato di bario e fosfato ammonico magnesiaco ambedue inattivi. Il cloruro sodico residuo conteneva l'attività (37 minuti) che deve quindi attribuirsi a un isotopo del cloro.

(*) Cfr. «Ricerca Scientifica», 5 (1), pp. 283, 330, 452, 652 (1934); 5 (2), pp. 21, 381 467 (1934); 6 (1), p. 123 (1935).

Rame. — Rame metallico irradiato è stato sciolto in acido cloridrico e vi si sono aggiunte tracce di cobalto nichel e zinco. Dalla soluzione si è separato il rame come solfuro, che è stato trovato attivo. Lo zinco, il cobalto e il nichel separati anch'essi come solfuri per neutralizzazione del filtrato sono stati trovati inattivi. Il tempo impiegato per questa prova permette di concludere solo per la vita di 10 ore che essa si deve attribuire a un isotopo del rame.

Zinco. — Da zinco metallico irradiato e sciolto in acido cloridrico abbiamo separato come sopra il rame in presenza di nichel e cobalto. Il rame trascinava l'attività, mentre gli altri metalli rimasti in soluzione, separati, erano inattivi. Quindi anche la vita di 10 ore dello zinco è da attribuirsi a rame.

Gallio. — Con lo stesso procedimento indicato altra volta per l'attività di 20 minuti si è esaminata l'attività di 23 ore: anche questa si deve attribuire ad un isotopo del gallio.

Selenio. — Anidride selenica irradiata è stata sciolta in acido cloridrico al 30% e alla soluzione è stata aggiunta anidride arseniosa. Dalla soluzione abbiamo separato selenio metallico con anidride solforosa. Il selenio separato era attivo, mentre l'arsenico precipitato dal filtrato come solfuro era inattivo. Siccome anche il germanio non è precipitato dall'anidride solforosa, esso precipita come solfuro; questa prova indica quindi che l'attività del selenio è dovuta a un isotopo del selenio.

Torio. — Le prove chimiche si sono limitate a considerare l'attività con periodo di 24 minuti. Il torio è stato depurato dai suoi prodotti radioattivi precipitandolo più volte, con acqua ossigenata, in presenza di bario, lantanio, piombo e bismuto.

Dalla soluzione molto diluita di nitrato di torio irradiato è stato separato il torio come fluoruro in presenza di uranio e rispettivamente tantalio. Il torio separato conservava l'attività mentre l'uranio o il tantalio precipitati come idrati dal filtrato, erano inattivi.

In altre prove è stato separato il torio dall'uranio come carbonato con carbonato di ammonio. L'uranio separato dalla soluzione ammoniacale era quasi inattivo. La piccola attività trovata è probabilmente giustificabile con le piccole quantità di torio precipitate insieme all'uranio. Da una soluzione acida di nitrato di torio irradiato è stato separato zirconio come fosfato. Il precipitato era quasi inattivo, mentre il torio conservava l'attività. Da queste prove sembra doversi escludere che l'attività sia dovuta a isotopi dell'uranio e del protoattinio.

Dalla soluzione diluita di nitrato di torio irradiato abbiamo precipitato il bario come solfato che abbiamo trovato inattivo. In altre prove abbiamo separato dalla soluzione diluita di nitrato di torio, il torio con acqua ossigenata in presenza di bario e lantanio. Dal filtrato è stato separato il bario come solfato e il lantanio come idrato, che abbiamo trovato inattivi, mentre l'attività rimaneva nel torio. Sembra quindi che l'attività non sia dovuta nemmeno ad isotopi del Pb, Bi, Ra, Ac e Po. È quindi probabile che l'attività con periodo di 24 minuti del torio sia dovuta a un suo isotopo.

In tutte le operazioni chimiche su sostanze radioattive naturali, accade talvolta che i residui di un'imperfetta depurazione si concentrino in qualcuna delle frazioni separate, il che richiede particolari cure per l'identificazione dell'attività dal periodo di decadimento ed è una delle cause che rendono tali operazioni chimiche notevolmente delicate ed impongono grandi cautele nella interpretazione dei risultati.

Uranio. — Abbiamo già detto in note precedenti che i coefficienti di sensibilità alle sostanze idrogenate dei periodi di 15 secondi, 13 minuti e 100 minuti sono leggermente maggiori di 1 e sensibilmente eguali. Il coefficiente di sensibilità per la attività con periodo di 40 secondi è invece inferiore a quello delle attività precedenti. È evidente che tutti i prodotti che derivano da uno stesso processo primario debbano avere lo stesso coefficiente di sensibilità: ne concludiamo quindi che l'attività con periodo di 40 secondi è dovuta a un processo primario a sè mentre le altre tre attività son dovute probabilmente allo stesso processo primario. In questa ipotesi le tre attività potrebbero essere o prodotte in catena o avere relazioni più complicate attraverso ramificazioni. Un indizio a favore della prima ipotesi, almeno per quanto riguarda i periodi di 13 minuti e di 100 minuti è dato dal seguente esperimento: abbiamo misurato con l'elettrometro la curva di decadimento di uno strato spesso di uranio irradiato; questa curva analizzata in esponenziali con i periodi di 13 minuti e 100 minuti mostra che le attività iniziali sono nel rapporto di 100 a 45; d'altra parte lo spessore di dimezzamento per i raggi β dell'attività di 13 minuti è di 0,14 gr/cm² di Al; quello del periodo più lungo non si è potuto misurare con precisione ma è certamente più piccolo del precedente e probabilmente circa la metà. Questo risultato è in accordo con l'ipotesi che il numero iniziale delle disintegrazioni per i due periodi, con la sostanza irradiata a saturazione, sia lo stesso, il che è necessario per ammettere che le due attività siano in catena.

In una lettera precedente abbiamo messo in evidenza con prove chimiche che l'attività con periodi di 13 minuti e 100 minuti non possono essere attribuite ad isotopi di elementi con $Z < 92$. Von Grosse e Agruss⁽¹⁾ hanno criticato queste nostre prove deducendo da esperimenti eseguiti solamente su sostanze non irradiate con neutroni, che l'attività con periodo di 13 minuti era dovuta ad un isotopo del protoattinio. Noi abbiamo perciò ripetuto i nostri vecchi esperimenti confermandoli ed abbiamo eseguito anche alcune nuove prove.

La precipitazione dell'attività con un solfuro è stata ripetuta usando diversi metalli (Ag, Cu, Pb, Hg): l'acidità della soluzione cloridrica era di circa il 20 %. Il rendimento della separazione era generalmente buono (circa il 50 %) e variava secondo le condizioni di precipitazione. La presenza di acido nitrico abbassa molto il rendimento della separazione. In presenza di acido fluoridrico e tantalio invece si è ottenuto un elevato rendimento; il protoattinio come è noto segue, il tantalio nelle sue reazioni e quest'ultimo precipita solo con grande difficoltà da soluzioni fluoridriche.

(1) VON GROSSE e AGRUSS, «Phys. Rev.», vol. 46, p. 241 (1934).

Abbiamo anche fatta la prova esplicitamente consigliata da v. Grosse come la più caratteristica del protoattinio. Abbiamo sciolto ossido di uranio purificato e irradiato in HCl al 25%: abbiamo aggiunto nitrato di zirconio e acido fosforico; il precipitato di fosfato di zirconio era inattivo mentre nel filtrato si poteva raccogliere l'attività con la reazione dei solfuri col rendimento solito.

Secondo von Grosse e Agruss questa reazione deve essere considerata una prova che le attività di 13 minuti e 100 minuti non sono dovute a isotopi del protoattinio. Con differenti prove chimiche, da noi stessi successivamente ripetute e confermate, O. Hahn e L. Meitner⁽²⁾ concludono anche essi che le attività di 13 minuti e 100 minuti sono dovute a elementi transuranici.

Le due attività hanno certo caratteri chimici molto simili: un indizio di separazione fu ottenuto soltanto col seguente esperimento; ossido di uranio depurato fu irradiato e sciolto in HCl. La soluzione fu versata in carbonato di ammonio fino a ridisciogliere completamente il precipitato di carbonato di uranile. Aggiungendo alla soluzione nitrato di manganese o piombo e raccogliendo il carbonato corrispondente si trovava in questo una parte delle attività di 13 minuti e 100 minuti. Nel filtrato dopo averlo acidificato abbiamo precipitato solfuro di rame; anche questo era attivo. Sembra però che il rapporto delle due attività sia diverso nei due precipitati e precisamente che l'attività con periodo di 13 minuti sia più abbondante nel precipitato dei sulfuri.

Da tutte le prove eseguite, la nostra ipotesi che le attività di 13 minuti e 100 minuti si debbano attribuire ad elementi transuranici riceve una nuova conferma. La più semplice interpretazione, in accordo con i fatti conosciuti, è che le attività di 10 secondi, 13 minuti, 100 minuti, siano in catena e che si debbano attribuire ad elementi di numero atomico 92, 93, 94 e peso atomico 239.

ASSORBIMENTO DEI NEUTRONI LENTI ED EMISSIONE DI RAGGI GAMMA SOTTO L'AZIONE DEI NEUTRONI LENTI. — Abbiamo studiato l'assorbimento per cattura del cloro, usando come rivelatore sia il rodio che il vanadio; nei due casi abbiamo trovato sostanzialmente la stessa sezione d'urto.

Abbiamo anche determinato il libero cammino medio dei neutroni lenti nella paraffina, usando come rivelatore il rodio, e abbiamo rilevato una curva analoga a quella che avevamo trovato precedentemente usando per rivelatore l'argento.

In una lettera precedente abbiamo descritto un dispositivo sperimentale atto a rilevare l'emissione di raggi γ da parte di alcune sostanze, sotto l'azione dei neutroni lenti. Con lo stesso dispositivo abbiamo compiuto una ricerca sistematica, che ha confermato le previsioni secondo le quali agli elementi con grande sezione d'urto corrisponde l'emissione di raggi γ (fanno eccezione il boro e il litio, di cui è già stato detto): oltre agli elementi già elencati, si riscontra una notevole emissione di raggi γ in cobalto, rame, oro.

Istituto Fisico della R. Università

Roma, 3 aprile 1935-XIII.

(2) HAHN e MEITNER, «Naturw.», vol. 23, p. 37 (1935).

92 a.

RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI^(*). — X.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, E. SEGRÈ

«Ric. Scientifica», 6 (1), 581-584 (1935).

1. RADIOATTIVITÀ INDOTTA NEL BROMO. — Abbiamo constatato anche noi l'esistenza di un terzo isotopo radioattivo del Br con periodo di circa 36 ore, già rilevato da Kourtchatow, etc.⁽¹⁾, ed abbiamo confermato le loro misure sui raggi β . Abbiamo constatato che questa attività è sensibile, come le altre due del Br, all'azione delle sostanze idrogenate, il che rende molto-inverosimile la spiegazione data dai citati Autori che il radioelemento relativo a questa attività sia ottenuto da un isotopo stabile con l'espulsione di un neutrone, poiché un neutrone lento non ha l'energia necessaria per provare questo processo.

Poiché sembra esclusa, secondo dati gentilmente forniti da Aston, l'esistenza di un terzo isotopo stabile del Br, la natura di questa terza attività presenta un interessante problema, probabilmente simile a quello dell'indio^(2,3).

2. INFLUENZA DELLA TEMPERATURA. — Moon e Tillman⁽⁴⁾ hanno recentemente osservato una differenza di attivazione nell'argento, rodio e iodio rallentando i neutroni con paraffina a temperatura ambiente o alla temperatura dell'aria liquida. Alcuni mesi or sono avevamo anche noi tentato, senza successo⁽⁵⁾, di mettere in evidenza un simile effetto di temperatura. Ripetendo ora l'esperienza nelle condizioni gentilmente comunicateci da Moon e Tillman e analoghe a quelle da loro descritte, abbiamo potuto constatare anche noi un aumento di intensità nell'attivazione di vari elementi col calare della temperatura della paraffina. Abbiamo trovato aumenti tra il 10 e il 20 % nell'attivazione di Ag (2,3^m), V, Al (2,3^m): nel rodio invece non abbiamo trovato alcun aumento apprezzabile di attività.

(*) Cfr. «Ricerca Scientifica», 5 (1), pp. 283, 330, 452, 652 (1934); 5 (2), pp. 21, 381, 467 (1934); 6 (1), pp. 123, 435 (1935).

(1) KOURTCHATOW, MYSSOWSKY, ROUSSINOW, «C. R.», 200, 1201 (1935).

(2) SZILARD e CHALMERS, «Nature», 135, 98 (1935).

(3) «Proc. Roy. Soc.», 149, 592 (1935).

(4) MOON e TILLMAN, «Nature», 135, 904 (1935).

(5) «Proc. Roy. Soc.», 149, 592 (1935); «Ricerca Scientifica», 5 (2), 467 (1934).

Se queste differenze di comportamento di vari elementi, osservate anche da Moon e Tillman, saranno confermate, dovrà ritenersi che il processo di cattura dei neutroni lenti sia più complicato di quanto finora si potrebbe ritenere basandosi sulla legge di forza comunemente ammessa tra neutroni e nuclei (buca di potenziale delle dimensioni del nucleo).

Le differenze si potrebbero, forse, interpretare ammettendo che esista anche tra neutrone e nucleo una forza debolissima con raggio di azione relativamente grande.

3. TRASCINAMENTO MECCANICO DEI NEUTRONI LENTI. - Per confermare con un metodo indipendente i risultati delle esperienze di Moon e Tillman abbiamo cercato di determinare con una esperienza meccanica per quanto tempo i neutroni si trattengono nella paraffina.

Una ruota d'acciaio di 80 cm di diametro porta sul suo contorno una sorgente di Em + Be e accanto a questa a circa 5 cm di distanza, rispettivamente a destra e a sinistra, due rivelatori eguali dei neutroni lenti. I rivelatori erano in alcune esperienze di manganese in altre di vanadio.

La ruota veniva fatta girare tra due grossi anelli di paraffina di sezione rettangolare (10×20 cm circa) disposti con gli assi coincidenti con l'asse della ruota uno posteriormente, l'altro anteriormente al piano della ruota, e ad una distanza di circa 6 cm dal piano stesso: il peso degli anelli era complessivamente di circa un quintale.

Si faceva girare la ruota con una velocità angolare di circa 1600 giri al minuto per un tempo conveniente a seconda del rivelatore usato e si misurava quindi il rapporto tra le attività acquistate dai due rivelatori. Per la misura della attività i rivelatori venivano staccati dalla ruota: dopo questa prima misura si rimettevano i rivelatori nelle stesse condizioni, si faceva girare la ruota in senso inverso, e si rimisurava il rapporto tra le attività dei due rivelatori.

Il risultato è che il rivelatore che segue, nel senso del moto, la sorgente, acquista una attività circa del 10 % superiore a quella presentata dal rivelatore che precede la sorgente.

Questo risultato mostra anzitutto che i neutroni raggiungono veramente velocità dell'ordine di quelle dell'agitazione termica. Si può precisare inoltre il significato di questa esperienza colla seguente considerazione: la stessa differenza del 10 % tra le attività dei due rivelatori si ottiene spostando, con la ruota ferma, la sorgente dal punto di mezzo tra i due rivelatori, di circa 0,5 cm (questa taratura è stata fatta usando come rivelatore il radio). Questo spazio è percorso dalla periferia della ruota in $7 \cdot 10^{-5}$ secondi e quindi questo deve essere, approssimativamente, il tempo di indugio dei neutroni lenti nella paraffina. Assumendo che i neutroni lenti abbiano la velocità di agitazione termica (2500 m/sec) e un cammino libero medio⁽⁶⁾ di circa 0,5 cm, quale risulta da esperienze di diffusione, se ne deduce che un neutrone

(6) « Proc. Roy. Soc. », loc. cit. e WESTCOTT e BJERGE, « Proc. Camb. Phil. Soc. », 31, 145 (1935).

subisce in media circa 30 urti dopo esser pervenuto alla velocità dell'agitazione termica e prima di essere diffuso fuori dalla paraffina o catturato dai nuclei presenti.

4. EMISSIONE DI NEUTRONI DA PARTE DI DIVERSE SOSTANZE. — Poiché il rodio in ambiente idrogenato costituisce un rivelatore particolarmente sensibile per i neutroni, abbiamo ricercato in alcuni elementi una emissione di neutroni sotto l'azione delle particelle α .

Sia il silicio che il fosforo, mescolati a 200 mC di emanazione, hanno mostrato di attivare un cilindretto di rodio con una intensità che con i nostri contatori ammontava a circa 100 impulsi iniziali al minuto: l'emissione dei neutroni da parte di questi due elementi è molto debole rispetto alla emissione di neutroni in tutti i casi fino a oggi osservati, come abbiamo constatato con esperimenti eseguiti sul boro, litio, alluminio, ecc. Nel caso del fosforo l'emissione osservata è probabilmente legata alla formazione di cloro radioattivo⁽⁷⁾ per positroni. Con molte sostanze si ha una piccola emissione di neutroni, probabilmente dovuta a impurità superficiali; tra le sostanze da noi sperimentate il nichel è quello che dà l'effetto minore.

Abbiamo anche cercato di determinare alcune proprietà dei neutroni emessi dal litio, boro, alluminio, fluoro e magnesio. Per questo abbiamo costruito sorgenti simili a quelle solite, sostituendo il berillio con l'elemento da studiare.

Boro. — Abbiamo misurato, con una sorgente di Em + B, il coefficiente di sensibilità α alle sostanze idrogenate delle attività delle sostanze sotto-segnate. Per confronto diamo anche gli α che corrispondono ad una sorgente di Em + Be.

		α_B	α_{Be}
Si	(135 ^s)	1	1
V	(225 ^s)	120	40
Rh	(44 ^s)	50	15
Ag	(140 ^s)	20	15
J	(25 ^m)	10	5

Si vede da questi dati, che però hanno un valore più che altro di indicazione, che i coefficienti α_B risultano maggiori dei coefficienti α_{Be} per un fattore che varia grosso modo da 3 a 1.

È inoltre interessante confrontare gli effetti di radioattività provocata, senza rallentare i neutroni da due sorgenti di Em + B e di Em + Be di eguale forma geometrica e contenenti la stessa quantità di emanazione; irradiando il V in aria si trova un rapporto tra l'attività con la sorgente con Be e l'attività ottenuta con la sorgente con B di circa 12. Tale rapporto, irradiando il Si (135^s) è maggiore di 15. Questo insieme di fatti potrebbe spiegarsi con la seguente ipotesi: nello spettro dei neutroni emessi da una sor-

(7) FRISCH, «Nature», 133, 721 (1934).

gente Em + Be vi è una banda di neutroni molto lenti, all'esistenza della quale sono dovuti i valori relativamente bassi dei coefficienti α e una banda di neutroni molto veloci, che sono quelli già noti per altre esperienze, responsabile della relativamente intensa attivazione del Si; nello spettro di una sorgente Em + B per contro mancherebbero i neutroni molto lenti e quelli molto veloci. Considerazioni di questo genere possono essere d'altra parte suggerite anche dai risultati della seguente esperienza: abbiamo costruito la curva di attivazione in funzione della distanza dalla sorgente con una sorgente di Em + B; il rivelatore era di Rh, la irradiazione avveniva in acqua in una vasca di $40 \times 30 \times 80$ cm e le misure erano fatte con una camera di ionizzazione: si trova una curva che ha una forma leggermente diversa da quella dell'analogia curva ottenuta con una sorgente Em + Be⁽⁸⁾; precisamente per piccole distanze la attivazione con Em + B decresce più lentamente di quella con Em + Be; per distanze maggiori di 10 cm. le due curve hanno la stessa forma.

Abbiamo infine misurato, col dispositivo descritto in una precedente lettera, il coefficiente di assorbimento dei neutroni lenti nel Cl, usando una sorgente di Em + B: si trova lo stesso valore già ottenuto con una sorgente di Em + Be (prima riduzione a metà in $0,3 \text{ gr/cm}^2$).

Fluoro. - Una sorgente di circa 300 mC di CaF₂ + Em non attiva sensibilmente il Si, mentre si riusciva ad osservare una notevole attivazione del V e del Rh soltanto se l'irradiazione avveniva in acqua.

Magnesio. - Neutroni di una sorgente di Mg + Em di circa 600 mC attivano il P (2,4^b), il Si (135^a), l'Al (10^m), il Rh (44^s) e il V (225^s). I coefficienti di sensibilità α_{Mg} sono notevolmente più grandi dei coefficienti α_{Be} per Rh (44^s) e V (225^s).

Alluminio. - Neutroni di una sorgente Al + Em di circa 600 mC non attivano il Si in modo apprezzabile ma attivano il Rh (44^s). Il coefficiente α_{Al} per il Rh (44^s) è maggiore del corrispondente α_{Be} .

Una conoscenza più precisa ed estesa di dati simili a quelli raccolti in questo paragrafo fornirà utili indicazioni, da un lato sullo spettro di velocità dei neutroni emessi dalle varie sostanze bombardate con particelle α , dall'altro, sulla energia necessaria per l'attivazione dei vari elementi a mezzo di neutroni.

5. ESPERIMENTI SULLA PRODUZIONE DI NEUTRONI A MEZZO DI RAGGI γ . - Abbiamo confrontato le attività provocate nel rodio in paraffina usando come sorgenti MsTh + Be e MsTh + D₂O (questa sorgente contiene circa 35 mC di RdTh); gli esperimenti sono stati fatti usando 25 grammi di berillio e 25 grammi di D₂O (98 %) disposti nelle stesse condizioni geometriche: in tali condizioni abbiamo trovato che il numero dei neutroni emessi dal D₂O sotto l'azione dei raggi γ del MsTh è circa 3,5 volte maggiore di quelli emessi dal berillio. Abbiamo eseguito le stesse misure sostituendo il preparato di MsTh con uno di 100 mgr di Ra: nel caso del berillio, nelle nostre condizioni

(8) « Proc. Roy. Soc. », I. c.

geometriche, si ottenevano usando come rivelatore il rodio, circa 200 impulsi al minuto iniziali, mentre con il D₂O non si riusciva ad avere una attività apprezzabile. Questo insieme di fatti si interpreta facilmente qualora si tenga presente che il neutrone è legato più debolmente nel berillio che nel deuterio. Notiamo infine che il numero di neutroni emessi dal berillio è circa lo stesso usando sorgenti equivalenti di mesotorio e radio.

Sempre con una sorgente MsTh + D₂O e MsTh + Be abbiamo rilevato le curve di attivazione in funzione della distanza dalla sorgente. L'irradiazione era fatta in una vasca di acqua di dimensioni 40 × 30 × 80 cm, il rivelatore era un cilindretto di rodio (misure fatte con il contatore).

Le due curve trovate nel caso del Be e del D₂O hanno sostanzialmente la stessa forma. Nella seguente tabella è l'attività (numero di impulsi) corrispondente alle diverse distanze nel caso per esempio che la sorgente sia MsTh + D₂O.

Distanza cm	Attivazione
4	1100 ± 50
6	962 ± 40
9	388 ± 20
12	188 ± 14
14	107 ± 7

I primi numeri indicano in cm le distanze misurate dal rivelatore all'asse del tubetto contenente il MsTh.

Istituto Fisico della R. Università.

Roma, 14 giugno 1935-XIII.

84 b.

RADIOACTIVITY INDUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT.—I.

Translated from « Ric. Scientifica », 5 (1), 283 (1934) (*).

In this letter I want to report on several experiments undertaken to determine whether a bombardment with neutrons will produce phenomena of induced radioactivity similar to those observed by M. and Mme. Joliot when the bombardment was done with α -particles.

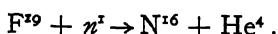
I used the following apparatus: The source of neutrons was a small glass tube containing beryllium powder and emanation. Using about 50 milli-curie of emanation (which was given to me by Professor G. C. Trabacchi, to whom I extend here my cordial thanks), I could obtain more than 100,000 neutrons per second, mixed, of course, with a very intense γ -radiation; however, the latter does not influence experiments of this kind. Small cylindrical containers filled with the substances tested were subjected to the action of the radiation from this source during intervals of time varying from several minutes to several hours.

Immediately after being irradiated, the targets were placed in the vicinity of a Geiger-Müller counter, whose wall was formed of aluminum sheet about 0.2 mm thick, allowing β -rays to enter the counter. Positive results have been obtained, so far, with the two following elements:

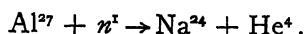
Aluminum. — A small aluminum cylinder, irradiated by neutrons for about two hours, gives rise, in the first few minutes after the end of the irradiations, to a considerable increase in the rate of pulses from the counter, the rate increasing by about 30–40 pulses per minute. A decrease follows, the rate reducing to half of its initial value in about 12 minutes.

Fluorine. — Calcium fluoride, irradiated for a few minutes and rapidly brought into the vicinity of the counter, causes in the first few moments an increase of pulses; the effect decreases rapidly, reaching the half-value in about 10 seconds.

These phenomena can possibly be explained in the following way. Fluorine under neutron bombardment disintegrates with the emission of an α -particle, the probable nuclear reaction being:



The isotope N^{16} may then, by emitting a β -ray, transmute into O^{16} . A similar interpretation can be given to the case of aluminum, the possible nuclear reaction being:



(*) The translations of papers № 84 b to 92 b were issued by John Crerar Library. The Editors have made some changes in the original translations.

The atom Na^{24} must be a new radioactive isotope, which, through the emission of a β -particle, transforms into Ca^{24} .

If these interpretations are correct, we have here an artificial formation of radioactive elements emitting ordinary β -particles, in contradistinction to the substances discovered by Joliot, which emit positrons. In the case of nitrogen, we would have two radioactive isotopes: N^{13} , found by Joliot, which transforms into C^{13} by positron emission, and N^{16} , which, emitting an electron, transmutes into O^{16} .

Experiments are in progress, extending the investigation to other elements, and studying the details of the phenomenon.

Rome, March 25, 1934-XII.

85 b.

RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT.—II.

Translated from «Ric. Scientifica», 5 (1), 330–331 (1934).

Continuing the experiments with the method described in the preceding letter, radioactivities were studied which are produced by neutron bombardment from a preparation of emanation + beryllium, on numerous other elements.

Iron. — Period: about 2 hours. With this element a chemical separation could be obtained. The active product formed is probably manganese, because it gave all the characteristic reactions of this metal.

Silicon. — A very strong effect was observed. Period: about 3 minutes. The electrons produced were photographed in a Wilson chamber. By using the pure metallic element or quartz, the same mean life is obtained.

Phosphorus. — Period: about 3 hours. Strong effect. The electrons have been photographed in a Wilson chamber. The chemical separation of the active product formed exhibits the characteristics of silicon.

Chlorine. — Gives the effect with the longest period of all elements investigated so far.

Vanadium. — Period: 5 minutes.

Aluminum. — In order to confirm the results of the preceding letter, the electrons have been photographed in a Wilson chamber.

Copper. — No strong effect. Period: about 6 minutes.

Arsenic. — Period: about 2 days.

Silver. — Strong effect. Period: about 2 minutes.

Tellurium. — Period: about 1 hour.

Iodine. — Strong effect. Period: about 30 minutes.

Chromium. — Strong effect. Period: about 6 minutes. The electrons have been photographed in a Wilson chamber.

Barium. — Small effect. Period: about 2 minutes.

Indications of effects of different intensities and periods were given by Na, Mg, Ti, Zn, Zr, Se, Sb, Br, La.

Some elements seem to possess two or more periods which may be due to different isotopes, or to consecutive radioactive transformations. The experiments are being continued in order to determine better these results and to extend the investigation to other elements.

The nuclear reaction which determines these phenomena can be different in different cases. The chemical separations in the case of iron and phosphorus appear to indicate, at least in these two cases, that the neutron is absorbed and one proton is emitted. The unstable product, manganese or silicon, emitting a β -particle, transforms into the original element.

The chemical separations were carried out by Dr. O. D'Agostino; for the physical part, Dr. E. Amaldi and Dr. E. Segrè have collaborated in this work.

86 b.

BETA-RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT.—III.

Translated from E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ
 «Ric. Scientifica», 5 (1), 452-453 (1934).

The experiments reported in the preceding letters⁽¹⁾ have been continued and extended. We communicate the results obtained:

Hydrogen-Carbon-Nitrogen-Oxygen do not give appreciable effects. Paraffin irradiated in the usual manner for 15 hours with a source of 220 mC, water irradiated for 14 hours with 670 mC and guanidine carbonate irradiated for 14 hours with 500 mC have been examined.

Fluorine. — The period of fluorine is remarkably smaller than previously indicated, that is, a few seconds.

Magnesium. — Magnesium has two periods: one of about 40 seconds, the other longer.

Aluminum. — Besides the period of 12 minutes previously announced there is also another period about one day long. The activity corresponding to the second period has the characteristic chemical reactions of sodium. Probably it is due to Na^{24} .

Sulphur. — The period of sulphur is very long, certainly many days. The activity is distinguished by the characteristic reaction of phosphorus.

Chlorine. — Cl behaves like S. Here also an active substance can be separated; probably it is P^{32} , identical to that obtained from S.

Manganese. — Mn has a small effect with a period of approximately 15 minutes.

Cobalt. — Co has an effect of 2 hours. The active substance behaves like Mn. The period and chemical behavior indicate that we have a Mn^{56} , identical with that which is obtained by irradiating Fe.

Zinc. — Zn has two periods: one 6 minutes, the other much longer.

Gallium. — Ga has a period of 30 minutes.

Bromine. — Br has two periods: one 30 minutes, the other 6 hours. The activity corresponding to the longer period and probably the other activity also, show the chemical reactions of Br.

Palladium. — Period of several hours.

Iodine. — Period of 30 minutes. The activity shows the chemical reactions of iodine.

Praseodymium. — Has two periods: one 5 minutes, the other longer.

Neodymium. — Period 55 minutes.

Samarium. — Has two periods: one 40 minutes, the other longer.

(1) FERMI, «Ric. Scientifica», 5 (1), pp. 283, 330 (1934).

Gold. - Period of 1 or 2 days.

Uranium. - Uranium was freed from β -active products and subsequently irradiated. It gives a very intense effect with several periods: one period of about 1 minute, another of 13 minutes besides longer periods not yet exactly determined. The β -rays corresponding to the 13 minute period are considerably penetrating.

Using chemical operations, an attempt was made to determine whether the element which disintegrates with the period of 13 minutes is an isotope of one of the heavier elements. We can immediately conclude that it is not an isotope of U (92) or Th (90) because the active substance is easily separated from these two elements. Much more difficult is the proof that it is not an isotope of Pa (91), since there is not a β -radioactive substance suitable for this proof, i.e., an isotope of Pa of convenient period. For this reason we used UX_2 , which has a period of only 70 seconds and which therefore forces to speed up the chemical operations. However, in about 2 minutes we succeeded in separating (together with Mn) the active substance from U by carrying along only a small fraction of the UX_2 , which should have been present taking into account the decay of this substance. This separation was accomplished by precipitating MnO_2 with $NaClO_3$ from a strong nitric acid solution, and is equally complete even in the presence of Ce and La. This fact seems to exclude the possibility that the active substance has atomic number 89, since this element is analogous to the rare earth elements. The same reaction also appears to exclude the possibility that we deal with an isotope of Ra (88) and all the more of eka-cesium (87) or emanation (86).

This complex of conclusions which we are trying to corroborate by means of further experiments gives rise to the spontaneous hypothesis that the active substance of U might have atomic number 93 (homologous with rhenium); the process in this hypothesis could consist in the capturing of the neutron by U with the formation of U^{239} , which subsequently would undergo β -disintegration.

We also tried to find out whether some disintegration, which was observed in different elements, was accompanied by γ -ray production. The experiment was carried out by trying to determine whether the substances acted upon a counter through 2 mm of Pb.

A positive effect was given by: Al (both periods), Si, Fe, Zn, As, U.

A negative effect was observed with: Mg, S, Ag, Br, I.

A magnetic device similar to that described by Thibaud⁽²⁾ was constructed in order to determine the charge of the particles produced. For intensity reasons, only the following elements have been studied up to now: Al, Si, P, S, Ga, Cr, Fe, Ag, Br, I. In all cases only negative electrons could be observed.

Istituto Fisico della R. Università.

Rome, May 10, 1934-XII.

(2) J. THIBAUD, «C. R.», 197, 447 (1933).

87 b.

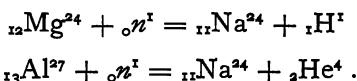
RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT.—IV.

Translated from E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ
 «Ric. Scientifica», 5 (1), 652–653 (1934).

In order to supplement the results previously communicated (*), additional observations have been made and we report them here:

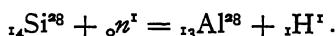
Fluorine. — We redetermined the period of F as 9 seconds. The electrons emitted are very penetrating and are reduced to one-half in 0.32 gr/cm² of aluminum. The absorption measurements reported below were also performed with aluminum absorbers. The emission of β-rays of F is probably accompanied by γ-rays, because 2 mm of Pb do not completely absorb the radiation emitted.

Magnesium. — In addition to the 40-second period, we also have measured a long period, which is about 15 hours and is accompanied by γ-emission. The electrons corresponding to this period are reduced to one-half by 0.07 gr/cm² of absorber (half-value thickness). The active substance behaves like sodium and can probably be identified with the Na²⁴ extracted from Al, because it has approximately the same period and the same absorption curve for the electrons. The corresponding nuclear reactions could be the following:



Aluminum. — The half-value thickness of the activity corresponding to the 12-minute period is about 0.09 gr/cm². The active substance of the short period has not yet been extracted chemically, but probably it is ${}_{12}\text{Mg}^{27}$.

Silicon. — The half-value thickness for the β-rays is 0.2 gr/cm². The activity is chemically separated together with Al and it seems probable that the nuclear reaction is:



This would confirm Joliot's and Preiswerk's hypothesis that the same ${}_{13}\text{Al}^{28}$ is formed, which was obtained by the Joliot's bombarding Mg with α-particles.

Phosphorus. — We confirmed the Joliot's result concerning the existence of a 3-minute period. The half-value thickness of the β-rays corresponding to the 3-hour period is 0.11 gr/cm².

(1) «Ric. Scientifica», 5 (1), pp. 283, 330, 452 (1934).

Sulphur and Chlorine. - The half-value thickness is 0.12 gr/cm². The identity of the absorption curves for the radiations emitted confirms that in both cases the production of ^{32}P is involved.

Chromium. - The half-value thickness is 0.2 gr/cm² and also γ -radiations are emitted. The identity in the periods observed suggests that V and Cr produce the same radioactive isotope, V^{52} .

Iron. - The half-value thickness is 0.2 gr/cm².

Zinc. - The active substance of a 6-minute period has been separated, and chemically it follows copper. The equality of the periods suggests that the active substance is identical with that of Cu.

Arsenic. - The half-value thickness of the electrons is 0.2 gr/cm².

Molybdenum. - Has at least two periods: one of about a quarter of an hour, the other much longer. The effect is of low intensity.

Rhodium. - It is very active. We found two periods: one of about 2 minutes, the other much longer. The half-value thickness for the short period is about 0.12 gr/cm².

Palladium. - The half-value thickness is about 0.03 gr/cm².

Silver. - Besides showing a period of 2 minutes, we found a second period of the order of twenty seconds. The half-value thickness is 0.1 gr/cm².

Iodine. - The half-value thickness is about 0.11 gr/cm².

Tungsten. - Has a very small effect with a period of about one hour. This effect could be ascribed to the presence of impurities.

Iridium. - Has a large effect. The period is about 20 hours. The half-value thickness is 0.17 gr/cm².

Gold. - The half-value thickness is 0.03 gr/cm².

Mercury. - Very small effect with a period of a few dozen minutes, probably due to impurities.

The following elements were irradiated for several hours with one-half Curie sources, and they did not show any appreciable effect:

Li, Os, Pb, Bi, Ru, Tl.

The cross-sections for the most active elements are of the order of magnitude 10^{-24} - 10^{-25} cm². Of course the neutrons we used have a continuous energy distribution which is poorly known.

However, in order to orient ourselves on the effect, which the neutron energy has on the cross-sections, we performed a preliminary experiment, activating F, Ag, I, and U with neutrons coming from a source of Em+Be in the time interval in which the emanation was not in equilibrium with its α -emitting products, especially with RaC.

By comparing the activity before and after equilibrium has been reached it seems that we may conclude that the faster neutrons, at least in this small energy interval, do not have a much larger cross-section than the slower ones. An increase in activity appreciably larger than for other elements was observed for iodine.

88 b.

RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT.—V.

Translated from E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ
« Ric. Scientifica », 5 (2), 21-22 (1934).

We report some further observations which supplement the results communicated in preceding letters:

Sodium. — The half-life of this substance is about 40 seconds, and the intensity is average. From chemical separations of fluorine from activated sodium it appears that the active substance is not fluorine.

Vanadium. — *Chromium.* — *Manganese.* — For all three elements we have determined a period of 4 minutes with more accurate measurements than those carried out previously for vanadium and chromium. Chemical separations have shown that the active substance of chromium and manganese is vanadium. It is very likely that V^{52} is involved, which also could be obtained by bombarding V^{51} . For manganese, besides the period of 4 minutes, another of about 150 minutes was observed, the active substance of which cannot be separated from manganese and is probably Mn^{56} , which also is obtained from iron and cobalt.

Arsenic. — A chemical separation of the active substance in presence of gallium and germanium enables us to exclude the possibility that it is gallium and makes it very unlikely that it is germanium. The most probable hypothesis is that the activity is due to As^{76} .

Rubidium. — Has a very small effect with a period of about 20 minutes.

Rhodium. — We redetermined the periods of rhodium and found 50 seconds and 5 minutes to be the most probable values.

Cadmium. — Has a very small effect with a period of one hour.

Iridium. — A chemical separation of the active substance in the presence of osmium and rhenium seems to exclude the possibility that the activity is due to these elements. Probably it is due to iridium isotopes.

Gold. — A chemical separation of the active substance in the presence of iridium, platinum, and mercury leads us to believe that an isotope of gold is involved.

Thorium. — From preliminary experiments on thorium, separated from its β -radioactive products, a strong activity results with at least two periods: one period of less than one minute and another of about 15 minutes.

Uranium. — Besides the known periods of 10 seconds, 40 seconds, and 13 minutes, one of the longer periods of uranium has been determined: it is about one hour and a half.

We tried to determine with higher precision the extraction yield of the 13-minute activity using the manganese dioxide reaction, which, however, carries along some of the element 91 (UX_2). On varying the precipitation conditions it appears that the yield for the two elements is completely different. For the 13-minute activity it is possible to maintain the yield practically constant: about 15 per cent of the total activity, while that for UX_2 varies between 1 per cent and 7 per cent.

The reaction for the separation of rhenium sulphide in a strong acid solution, by using sodium thiosulphate, was repeated. It has been found that in this way it is possible to separate a very high amount of the 13-minute and 100-minute activity. These reactions, besides giving a yield of about 50 per cent, are so specific with respect to UX_1 and UX_2 that they also allow the separation of the two activities from unpurified uranium, in equilibrium with its products. These two reactions appear to confirm the hypothesis that we have elements of atomic number higher than 92.

We also determined the approximate number of atoms of the active element with the 13-minute period which disintegrate each minute and which were formed irradiating to equilibrium one gram of uranium at a distance of 1 cm from a source of 1 mC of radon + beryllium. The number was found to be of the order of magnitude of 50.

Istituto Fisico della R. Università.

Rome, July 12, 1934-XII.

89 b.

RADIOACTIVITY PRODUCED
BY NEUTRON BOMBARDMENT.—VII.

Translated from E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÈ
« Ric. Scientifica », 5 (2), 467-470 (1934).

1. NEW ACTIVITIES. — We have determined the half-lives of the substances produced by the irradiation of the following elements:

Potassium. — It shows a weak activity with periods of 16 hours (*a*)⁽¹⁾. The chemical separation of Cl, A and Ca does not remove the activity from K. The activity is probably due to a new radioactive isotope of potassium.

Gallium. — Besides the short period previously reported it also has another one of one day (*a*).

Cadmium. — Cadmium which has been irradiated for a long time in water has a very weak activity corresponding to a period of about two days. However, depending on the conditions of irradiation, activities with different periods are produced.

Indium. — The short period is 13 seconds (*a*).

Antimony. — Besides a short and weak period it also has an intensive one of 2.5 days (*a*).

Praseodymium. — Besides the period of 5 minutes it also has an intensive one of one day (*a*).

Some of the previously quoted periods of the following substances were remeasured with the electrometer, and the results obtained are rather precise: Mn-150 min; As-26 hrs; Rh-44 sec.

2. SENSITIVITY TO HYDROGENOUS SUBSTANCES. — In order to begin to determine quantitatively the effect of hydrogenous substances on the activation, we irradiated some substances by putting the sources inside a cylinder of the same diameter as the counter so as to obtain the maximum possible activation. First the irradiation was carried out in a paraffin block of very large dimensions and then in air. The ratio of the activities observed gives, roughly, a coefficient of sensitivity α , to the action resulting from the hydrogenous substances. This coefficient is one for those substances which do not show any increase in activity when irradiated in paraffin. We find for: Na (40 sec) $\alpha = 1$; Mg (40 sec) $\alpha = 1$; Al (12 min) $\alpha = 1$; Al (2.5 min) $\alpha = \text{very high}$; Si (2.5 min) $\alpha = 1$; Cl (45 min) $\alpha = \text{very high}$; V (4 min)

(1) The letter (*a*) means that the period in question has a high sensitivity coefficient towards hydrogenous substances (see N. 2 of this paper).

$\alpha = 40$; Cu (6 min) $\alpha = 15$; Rh (44 sec) $\alpha = 15$; Ag (2 min) $\alpha = 15$; Ag (20 sec) $\alpha = 30$; In (13 sec) $\alpha = 12$; U (10 sec, 13 min, 90 min) $\alpha = 1.6$.

These figures should be considered only as an indication, because small variations in the geometrical conditions of irradiation have an important influence on the result.

3. SEPARATION OF RADIOACTIVE ISOTOPES. — Using a variety of methods, we separated the radioactive isotopes of the halogens, arsenic, and manganese from the ordinary isotopes. Szilard and Chalmers have succeeded in enriching iodine and bromine in radioactive isotopes, extracting them from irradiated methyl iodide and from bromoform, respectively. They took advantage of the fact that neutron bombardment can decompose molecules and ions and leave them in conditions differing from those which prevailed before the bombardment⁽²⁾.

We repeated their experiments extending them also to chlorine (45 min) which was irradiated in different organic compounds. Subsequently it was recognized that the same effect can be obtained with inorganic compounds, provided the element is present as a complex which cannot form spontaneously. For instance, we irradiated alkaline iodates, bromates, and chlorates both in solutions and in the solid state. In subsequent precipitations of *only traces* of silver chloride, bromide, or iodide, the precipitate exhibited about 25–50 per cent of the total activity.

In an analogous manner, irradiating cacodylic acid we succeeded in separating a good deal of arsenic activity, by precipitating traces of arsenic sulphide from the solution. Irradiating potassium permanganate, about 80 per cent of the activity can be obtained by precipitating a trace of manganous carbonate.

Radioactive iodine could be obtained from gaseous methyl- or ethyl-iodide by collecting ions from the gas with the help of an electric field. Nickel electrodes, which are not activated, were placed in the gas. However, the yield was not very high.

4. VELOCITY OF THE NEUTRONS IN PARAFFIN. — Assuming that the action of the hydrogenous substances on radioactivity induced by neutron bombardment is due to the slowing-down of the neutrons, we tried to get an idea about the velocity of the neutrons, which by convention we shall call "slow." Since the velocity of the neutrons which have suffered about 20 successive proton collisions can be reduced to a value of the order of that of thermal agitation, it could be expected that the temperature acts on the density of the neutron gas. In order to check this point, we carried out the following experiment: A rhodium plate was first activated in a mixture of hydrocarbons (pentane and benzene) at room temperature; then it was activated at 200° in another hydrocarbon mixture (paraffin) which, at this temperature, had the same density and composition as the cold mixture.

(2) «Nature», 134, 462 (1934).

In both experiments the Rh-plate was irradiated using the same geometrical arrangement (one cm from the liquid surface and two cm from the source).

No difference in the activation was observed, and hence it seems we may conclude that the energy of the "slow" neutrons is larger than the energy of thermal agitation.

5. ABSORPTION OF THE "SLOW" NEUTRONS. — Continuing the measurements of absorption of "slow" neutrons, we found other substances which have abnormally large collision cross-sections. If 10^{-24} cm² is taken as unity, the effective cross-sections for the following elements are: Cl, 130; Co, 100; Ag, 100; Cd, 10,000; In, 450; I, 40; Pr, 100; Au, 100; Hg, 1,000.

These effective cross-sections correspond to absorptions measured by comparing the activity produced in a Rh detector, located in a cavity in paraffin, with the activity induced in the same detector located in the same cavity but protected by two layers of the absorbing substance being examined. We remark that if the experiments are carried out outside the paraffin, instead of in a cavity, smaller absorption coefficients are obtained. This fact can be explained, assuming that the activation is due to "slow" neutrons, by observing that their average velocity in a cavity is smaller than outside of the paraffin.

We obtained the absorption curve, for cadmium, of the neutrons "slowed down" by paraffin. It has been found that the transmitted activity on increasing the absorbing thickness does not decrease according to an exponential law. Precisely we can reach absorber thicknesses such that an increase in thickness has little influence on the activity. This fact is paralleled by the measurements we made activating Rh at a fixed distance from the source in a vessel containing a boric acid solution of variable concentration (3). These results can be explained by taking into account the fact that the velocity distribution of the neutrons is continuous.

In some absorption measurements, silver instead of rhodium has been used as a detector, but the results obtained were essentially the same.

In order to study the absorption of neutrons which are not "slowed down" by hydrogenous media, we inserted boric acid with a thickness of 5 gr/cm² between the source and a small rhodium cylinder; the activation is not smaller than the one obtained under identical geometrical conditions without the absorber.

6. EMISSION OF γ -RAYS. — We began experiments to determine whether strong absorption of "slow" neutrons, which is characteristic for some elements, corresponds to the emission of secondary radiations. For this purpose we used Po+Be (about 60 mC) as a source and a Geiger-Müller counter. Both were put in a big paraffin block. In the direct path there was a lead filter 10 cm thick to absorb the γ -rays of Po+Be. The counter was protected by a lead plate two millimeters thick. When using a thin layer of the elements Cd, Hg, Cl, Y, and Ir outside the counter, we noticed an increase

(3) « Ric. Scientifica », 5 (2), 380 (1934).

in the number of impulses up to 100 per minute. Probably this has to do with the emission of γ -rays, which can be interpreted as having an energy corresponding to the capture of "slow" neutrons. We did not observe such radiation nor even a secondary, less penetrating, radiation (α , β , H) in boron, although this element also has a large absorption cross-section.

Experiments are now in progress to clear up this point.

7. ACTIVATION AS A FUNCTION OF DISTANCE. — We studied the variation in the activation of an Rh detector as a function of the distance from the source, when both are immersed in a large water container. The following table gives the results:

Distance in cm.	Activity
1	100
» » » 2	» 92
» » » 3	» 86
» » » 4	» 76
» » » 5	» 71
» » » 6	» 54
» » » 7	» 46
» » » 8	» 33
» » » 9	» 26
» » » 10	» 22

It can be seen that the activation decreases rather slowly with the distance. By substituting a boric acid solution for water, although we diminish the activation, the curve showing the distance dependence does not show a marked change of shape.

8. SCATTERING OF "SLOW" NEUTRONS. — We carried out a series of experiments to search for elements which scatter "slow" neutrons. The source was put on the axis of a cylindrical block at a distance of 3 cm from the upper base. An Rh-plate was placed on the upper base. The comparison between the activity thus obtained and the one obtained by covering the Rh-plate with different substances gives an indication of the scattering of the "slow" neutrons due to the covering substances.

By covering the Rh-plate with carbon a remarkable increase in activation was observed (a layer of several cm increases the activity by a factor five); a similar result was obtained with a basalt layer. Also, thin layers of light elements (Be, C) produce a remarkable increase in activity.

With the same arrangements, the curve of activation intensity of the Rh-plate was determined, as a function of thickness of an overlying water layer increasing in 1 cm steps. The thickness of one cm of water over the Rh-plate, lying on the paraffin, approximately doubles the activation; for larger thicknesses the increase in activity is smaller.

Analogous results are obtained by covering the Rh-plate with paraffin layers of variable thickness.

We also studied absorption and scattering of some substances with the following device: a neutron source was placed at the center of a cylindrical paraffin block 11 cm high and 13 cm in diameter; a small silver cylinder (detector) was placed a distance of 30 cm from the source. Between the paraffin cylinder and the detector, 6 cm from the detector, layers of different substances were inserted. The geometrical conditions of the experiment were such that the absorber intercepted exactly the rays coming from the paraffin cylinder.

The difference between the activation of silver, with and without the absorber, is due to scattering plus absorption. With a paraffin scatterer it is found that 0.5 gr/cm^2 reduces the activation to one-half, but the absorption curve is not exponential. It appears, therefore, that the mean free path of slow neutrons in paraffin is 7-8 mm.

The experiment made with different thicknesses of water gives essentially similar results.

When using boric acid as the absorbing layer, absorption prevailed over scattering and the results previously indicated were found. Using carbon 5 gr/cm^2 caused a reduction of about one-half; 3.45 gr/cm^2 of lead caused a reduction in the ratio of 0.83 ± 0.07 ; this value is due to scattering, because it is known that a layer of 3.45 gr/cm^2 of lead absorbs hardly any "slow" neutrons.

9. EFFECT OF NON-HYDROGENOUS SUBSTANCES ON ACTIVATION. — We also tried to determine whether non-hydrogenous substances produce increases in activation as do water and paraffin. With the few substances examined so far (lead, graphite, basalt) we always obtained much smaller effects than, for example, with water.

Lead. — A small Rh cylinder is put into a slot in a block of lead at a distance of 10 cm from the source; the quantity of lead used is such that roughly the center of the line source-Rh detector could be considered at the center of a lead sphere with a diameter of 50 cm.

The activity induced in Rh is about three times higher than that obtained activating Rh under identical geometrical conditions, but in the absence of the lead. The factor, of course, by which the activity is multiplied decreases if the distance of the source from the detector is smaller. An effect due to lead is also found in the activation of silver. However, when silicon is used as a detector, no effect is observed, just as with hydrogenous media. This fact suggests the hypothesis that the phenomenon is of the same nature as that observed in hydrogenous substances; therefore, we tried to determine whether the radiation which activates Rh in a lead medium is considerably absorbed by Cd, by protecting the small Rh cylinder with variable thicknesses of Cd; it was found that the absorption due to the Cd was considerable (reduction of one-half by about 1 gr/cm^2), although less than in a hydrogenous medium. It is of interest to note that in the case of a heavy metal like Pb, it is not possible to explain the effect as a slowing down of the neutrons due to elastic collisions. If the effect is actually due to slow neutrons, we should rather ascribe it to inelastic collisions. The effect of graphite on the activa-

tion of Rh is stronger than that of Pb; the activation intensity in silicon does not increase in a graphite medium. The radiation which activates Rh is absorbed by Cd at least to the same extent as in the case of Pb. We had at our disposal only a small amount of graphite; an increase in the amount of graphite probably could considerably increase the observed effects. With basalt the same effects are obtained as those described above.

Systematic research into the effect of different substances on radioactivity induced by neutron bombardment is in progress, since it appears that these results are general, and often incidental increases in activation are produced by surrounding objects. Just for these reasons the measurements described in this paragraph are not very precise.

Istituto Fisico della R. Università.

Rome, December 6, 1934-XIII.

90 b.

RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT.—VIII.

Translated from E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÈ
« Ric. Scientifica », 6 (1), 123–125 (1935).

1. NEW ACTIVITIES. — We have determined the half-lives of the following irradiated elements:

Magnesium. — By irradiating very pure Kahlbaum's MgO, aluminum free, we discovered, besides the activities already known, a weak one with a period of about 10 minutes (*a*). It is probably due to the radioactive isotope Mg²⁷ (period: 12 minutes) which is also produced by irradiating Al with neutrons. This case is a new example of neutron-capture.

Silicon. — Irradiated fused quartz has shown a weak activity with a period of several hours. We believe that this is also a case of neutron-capture with the formation of Si³¹ (period: 145 minutes), which is also obtainable from irradiated phosphorus.

Barium. — Besides the short period we found a period of about 80 minutes (*a*).

Gadolinium. — Gd oxide, kindly given to us by Professor L. Rolla, shows an activity with a period of about 8 hours (*a*).

Tungsten. — Irradiated tungsten shows an activity with a period of about one day (*a*).

2. PRECISE DETERMINATION OF PERIODS. — By using an ionization chamber (see 4, below) we determined with greater precision the half-lives of the following elements: Si, 137 seconds; P, 145 minutes; V, 225 seconds; Ga, 23 hours; Br, 18 minutes and 255 minutes; Ag, 22 seconds and 140 seconds; I, 25 minutes; Pr, 19 hours; Re, 24 hours (besides a shorter period); Ir, 19 hours; Au, 65 hours.

3. SENSITIVITY TO HYDROGENOUS SUBSTANCES. — With the method described in the preceding letter we determined the sensitivity coefficient α towards hydrogenous substances for the following elements: P, 137 seconds; Cr, 225 seconds; Mn, 225 seconds; Fe, 150 minutes; Zn, 6 minutes; Ba, 3 minutes; Pr, 5 minutes; Th, 1 minute and 15 minutes; they all have $\alpha = 1$. Se, 35 minutes, and Ba, 80 minutes, have a very high α .

4. ABSORPTION OF THE ELECTRONS. GAMMA RAYS. — For absorption measurements we used an ionization chamber filled with CO₂ at 3 atm pres-

sure and closed with an Al foil having a thickness of 0.1 mm. The irradiated substances were arranged in flat layers and the absorption was measured by interposing Al foils. For some substances which give intensive γ -radiations (detected by the residual ionization obtained by screening the chamber with 2 mm Pb) we took into account this residual activity in evaluating the absorption coefficient of the β -rays. A control measurement carried out on UX₂ and RaE gave values of the absorption coefficient equal to those ordinarily accepted.

The following table gives the half-value thickness in gr/cm² of Al for the substances indicated:

P	145	min	. . . . .	0.15	In	54	min	. . . . .	0.045
V	225	sec	. . . . .	0.17	Sb	2.5	days	. . . . .	0.09
Mn	150	min	. . . . .	0.14	I	25	min	. . . . .	0.10
Ga	30	min	. . . . .	0.17	Pr	19	hrs	. . . . .	0.13
As	26	hr	. . . . .	0.16	Re	24	hrs	. . . . .	0.12
Br	18	min	. . . . .	0.12	Ir	19	hrs	. . . . .	0.12
Br	255	min	. . . . .	0.12	Au	65	hrs	. . . . .	0.04
Rh	44	sec	. . . . .	0.15	U	13	min	. . . . .	0.14

Since many active products are presently at our disposal with higher intensity on account of the increase of the activating power of neutrons in hydrogenous substances, we could detect an emission of γ -rays for some elements (Rh 44 sec, Br 18 min and 255 min) where it escaped us in previous experiments. In addition, the emission of γ -rays was observed in V (225 sec), Mn. (150 min), Cu (6 min), Ga (23 hrs), In (54 min), Sb (2.5 days), I (25 min), W (1 day).

5. CHEMICAL SEPARATIONS. — Irradiated metallic antimony has been dissolved in aqua regia. By adding Sn and separating it by Clarke's method, the activity followed antimony. To the same Sb we added and subsequently separated indium, by taking advantage of the different solubilities of the sulphides in diluted acids. We found In inactive. We also added to active Sb, Te and I and separated Te by reduction and I as AgI. They were found to be inactive. The activity of Sb with a period of 2.5 days is due therefore to one of its isotopes.

Irradiated tungstic anhydride was dissolved in sodium hydroxide and inactive tantalum was separated as pentoxide. To this tungstic solution rhenium in nitric acid solution was added, and the tungsten was separated as tungstic anhydride. Rhenium which remained in solution was inactive. Not having Hf at our disposal, we separated inactive Zr hydroxide from an ammonium solution containing active tungstic anhydride. Therefore, it is very likely that the activity is due to an isotope of tungsten.

From irradiated Re dissolved in HNO₃, Ta and W were separated: the former as pentoxide, the latter as tungstic anhydride. Both were found to be inactive. The activities therefore are probably due to isotopes of Re.

6. ACTION OF SLOW NEUTRONS ON BORON. — In previous letters we mentioned that:

a) The neutrons slowed down by paraffin or water are abnormally absorbed by B (reduction to one-half by 0.004 gr/cm^2);

b) Boron (as well as Li) differs from several other elements, which have a strong slow-neutron absorption, in that it does not emit γ -rays during neutron absorption. While in previous experiments we could not observe any emission of particles in this specific case, now with the experiments we are going to describe, we could detect α -radiation.

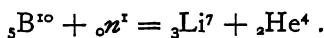
1. - An ionization chamber was filled with gaseous BF_3 . By placing it near a source of 50 mC of Po+Be and by surrounding it with paraffin to slow down the neutrons, a very intense ionization could be observed. The value of such ionization is reduced to about one-half if the chamber is screened with Cd in a layer of 0.02 gr/cm^2 thickness; this indicates that the effect is specifically due to slow neutrons.

Another confirmation of this interpretation results from the fact that Po+Be without paraffin does not give any effect comparable to the preceding one.

2. - The same effect, but in smaller proportions, can be observed with an ionization chamber filled with air and containing boron at the bottom of the chamber. By varying the pressure in the chamber and determining the difference between the ionization with and without a Cd absorber (that is, the fraction of the ionization due to slow neutrons), one can determine at which pressure the range of the ionizing particles, which are emitted by boron under these conditions, becomes comparable to the dimensions of the ionization chamber. The range was found to be 0.7 or 0.8 cm.

3. - The same phenomenon was observed using a proportional amplifier; this radiation probably escaped us in our preliminary experiments because of its small range. The measurements with the proportional amplifier agree with the preceding measurements and give a range of about 7 or 8 mm. These observations allowed also the measurement of the maximum value of the total ionization produced in a single process. This ionization (40,000 ion pairs) corresponds to the ionization produced by a single α -particle having a range of 0.8 cm; since this value agrees with that observed, we conclude that the radiation is due to α -particles of about $14 \cdot 10^5 \text{ eV}$.

From this fact and from the fact that no induced radioactivity is observed in boron we believe that the most plausible nuclear reaction is the following:



Taking into account also the recoil energy of Li, the reaction energy is $22 \times 10^5 \text{ eV}$.

If we neglect the small amount of energy of the primary neutron, on the basis of the mass defects, the calculated reaction energy should be $2 \times 10^6 \text{ eV}$ higher.

Li irradiated with slow neutrons emits also heavy particles of several cm range. Further experiments are in progress with regard to this reaction.

7. EFFECT OF NON-HYDROGENOUS SUBSTANCES ON ACTIVATION. - We have been studying the effect of silicon and iron on activation induced by

neutron bombardment. At a distance of 10 cm from the source, Rh was activated, first in air and then in a box containing silicon dioxide. The activity of Rh is multiplied by a factor of about 2.5 in a SiO_2 medium. If silicon is activated, no increase in activity due to the SiO_2 medium is obtained.

However, we noticed that surrounding the source and detector with large masses of iron produces no noticeable increase in the activation in either Rh or Si.

8. NEUTRONS PRODUCED BY γ -RAYS + Be. - L. Szilard and T. A. Chalmers⁽¹⁾ and L. Meitner⁽²⁾ have observed that by using Be irradiated with γ -rays as a neutron source the only elements activated are those whose activity is due to isotopes of the target. Since neutrons slowed down in paraffin, as far as it is known at the present time, have the same property, we tried to find out whether Szilard and Chalmers' neutrons are noticeably absorbed by an element, like Cd, which shows a very high absorption cross-section for slow neutrons.

For this experiment we used as a neutron source 100 mgr of Ra surrounded by Be; the activation of a Rh cylinder did not show any appreciable decrease, when the source was screened by 0.5 gr/cm² of Cd. This can be explained assuming that Szilard and Chalmers' neutrons are much faster than those slowed down in paraffin.

Istituto Fisico della R. Università.

Rome, January 11, 1935-XIII.

(1) «Nature», 134, 494 (1934).

(2) «Naturwissenschaften», 22, 759 (1934).

91 b.

RADIOACTIVITY INDUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT^(*).—IX.

Translated from E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, E. SEGRÈ
 «Ric. Scientifica», 6 (1), 435–437 (1935).

1. PRECISE DETERMINATION OF PERIODS. — We determined the half-life of some substances activated by neutron bombardment using an ionisation chamber connected with an electrometer; the measurements are rather precise:

Al, 137 seconds and 10 minutes; S, 14 days; Cl, 37 minutes; Cu, 5 minutes; Zn, 10 hours; Ga, 20 minutes; Rh, 3.9 minutes; Sb, 2.5 days; Th, 24 minutes.

2. SENSITIVITY TO HYDROGENOUS SUBSTANCES. — With the method previously described we determined the sensitivity coefficient to hydrogenous substances for the following elements:

F (9 seconds and 45 seconds) $\alpha = 1$, Mn (150 minutes) $\alpha = 23$, Zn (10 hours) $\alpha = 1$, Ga (20 minutes) $\alpha = 2.5$, As (26 hours) $\alpha = 6$, Se (35 minutes) $\alpha = 5$, Br (18 minutes) $\alpha = 8$, Rh (3.9 minutes) $\alpha = 25$, Sb (2.5 days) $\alpha = 4$, I (25 minutes) $\alpha = 5$, Ba (80 minutes) $\alpha = 9$.

3. ABSORPTION OF EJECTED ELECTRONS. — With the method previously described we measured the half-value thickness in gr/cm² of Al for the electrons emitted by the following substances:

Si (137 seconds), 0.19; S (14 days), 0.10; Ag (140 second), 0.08; I (25 minutes), 0.11.

4. CHEMICAL SEPARATIONS. — *Phosphorus.* — The activity with a period of 137 seconds was separated together with Al. An irradiated phosphoric acid solution was neutralized with sodium carbonate; then a trace of aluminum chloride was added. Aluminum phosphate was separated and it carried along all the activity.

Chlorine. — Irradiated hydrochloric acid was neutralized with sodium carbonate. Nitric acid was added and the solution was boiled. Sulphuric and phosphoric acids were added and we precipitated barium sulphate and ammonium magnesium phosphate. Both were inactive. The remaining

(*) «Ric. Scientifica», 5 (1), pp. 283, 339, 452, 652 (1934); 5 (2), pp. 21, 381, 467 (1934); 6 (1), p. 123 (1935).

sodium chloride showed an activity (37 minutes) which must be due to an isotope of chlorine.

Copper. - Irradiated metallic copper was dissolved in hydrochloric acid and traces of cobalt, nickel, and zinc were added. Copper was separated from the acid solution as a sulphide, and was found to be active. Zn, Co, and Ni were also separated as sulphides by neutralizing the filtrate, and were found to be inactive. The time required for this test allows us to conclude, for the 10 hour activity only, that it is due to an isotope of copper.

Zinc. - From irradiated zinc dissolved in hydrochloric acid we separated, in the manner described above, copper in the presence of nickel and cobalt. Copper carried along the activity, while the other elements which remained in solution, after further precipitation, did not show any activity. Therefore, the 10-hour life in zinc is to be attributed to copper.

Gallium. - Chemical properties of the 23-hour activity were determined with the same procedure as that used for 20-minute activity; here also the activity must be assigned to an isotope of gallium.

Selenium. - Irradiated selenic anhydride was dissolved in 30 per cent hydrochloric acid, and arsenious anhydride was added to it. From the solution metallic selenium was separated with sulphur dioxide. The separated selenium was active, while arsenic precipitated from the solution as sulphide was inactive. Since germanium is also not precipitated by sulphur dioxide, it would be precipitated as sulphide; this test indicates that the activity of selenium is due to an isotope of selenium.

Thorium. - The chemical tests were limited to investigate the 24-minute activity. Thorium was purified from its radioactive products by repeated precipitations with hydrogen peroxide in the presence of barium, lanthanum, lead, and bismuth.

From a very dilute solution of irradiated thorium nitrate, thorium was separated as a fluoride in the presence of uranium and tantalum. The separated thorium conserved the activity, while uranium and tantalum, precipitated as hydroxides, were inactive.

In other tests thorium was separated from uranium as a carbonate using ammonium carbonate. Uranium separated from the ammonium solution was almost inactive. The small activity found in uranium is probably due to small quantities of thorium precipitated together with uranium. From an irradiated thorium nitrate solution, zirconium was separated as phosphate. The precipitate was almost inactive, while thorium retained its activity. From these experiments it seems that the activity cannot be attributed to isotopes of uranium and protactinium.

From the irradiated, dilute, thorium nitrate solution we precipitated barium as a sulphate; it was found to be inactive. In other tests we precipitated thorium from the thorium nitrate solution with hydrogen peroxide in presence of barium and lanthanum. From the filtrate barium and lanthanum were separated as sulphate and hydroxides, respectively. Both were found to be inactive, while the activity remained in thorium. It appears, therefore, that the activity is not due to isotopes of Pb, Bi, Ra, Ac, and Po either.

Therefore, it is probable that the activity of thorium with a period of 24 minutes is due to one of its isotopes.

In all chemical operations with naturally radioactive substances it sometimes happens that active residues due to incomplete purification concentrate themselves in some fractions. This fact requires special attention for the identification of the activity from its disintegration period and it is one of the reasons which make chemical operations quite delicate. Great caution is therefore indicated in the interpretation of the results.

Uranium. — We have already said that the sensitivity coefficients to hydrogenous substances of the 15-second, 13-minute, and 100-minute periods are slightly higher than 1 and practically equal. The sensitivity coefficient for the 40-second activity, however, is smaller than that of the activities mentioned above. It is obvious that all products resulting from the same primary process must have the same sensitivity coefficient; we conclude, therefore, that the activity with the period of 40 seconds is due to one primary process, while the other activities probably are due to a different primary process, the same for all three. In this hypothesis the three activities could be either genetically related or have more complicated relations through branchings. The following experiment favors the first hypothesis, at least for the 13-minute and 100-minute periods. We measured the decay curve of an irradiated thick uranium layer with an electrometer; by analysing this curve in exponentials of 13-minute and 100-minute periods, it appears that the initial activities are in the ratio of 100 : 45; on the other hand, the half-thickness value for the β -rays of the 13-minute activity is 0.14 gr/cm² of Al; the half-value thickness connected with the longer period could not be measured exactly, but certainly it is smaller than the other and probably about one-half of it. This result agrees with the hypothesis that the initial number of disintegrations for the two periods, when the substance is irradiated to saturation, is the same. This fact would be necessary in order to admit that the two activities are genetically related.

In a previous communication we showed by chemical tests that the activity with periods of 13 and 100 minutes cannot be attributed to isotopes of elements with $Z < 92$ ⁽¹⁾. Von Grosse and Agruss have criticized our tests, concluding, from experiments carried out by them only on substances which were not irradiated by neutrons, that the 13-minute activity was due to an isotope of protactinium. Therefore, we repeated our old experiments and confirmed our results. At the same time some new tests were carried out.

The precipitation of the activity with a sulphide has been repeated by using different metals (Ag, Cu, Pb, Hg); the concentration of the hydrochloric acid solution was about 20 per cent. The yield of the separation generally was good (about 50 per cent) and depended on the conditions of precipitation. The presence of nitric acid substantially lowers the yield of separation. In the presence of hydrofluoric acid and tantalum a high yield was obtained; protactinium, as is well known, follows tantalum in its reactions, and the latter precipitates only with great difficulty from hydrofluoric acid solutions.

(1) VON GROSSE and AGRUSS, «Phys. Rev.», 46, 241 (1934).

We also carried out the test suggested by von Grosse as the most characteristic reaction for protactinium. We dissolved irradiated and purified uranium oxide in 25 per cent HCl; we added zirconium nitrate and phosphoric acid; the precipitated zirconium phosphate was inactive, while the activity could be collected from the filtrate as sulphide with the usual yield.

According to von Grosse and Agruss this reaction should be considered a test to determine that the activities of 13 and 180 minutes are not due to isotopes of protactinium. By different chemical tests, which were repeated and confirmed by us, O. Hahn and L. Meitner⁽²⁾ conclude, too, that the activities of 13 and 100 minutes are due to transuranic elements.

Certainly the two activities have very similar chemical characteristics. An indication of separation was obtained only with the following experiment: uranium oxide was purified, irradiated, and dissolved in HCl. To the solution, ammonium carbonate was added until complete solution of the uranyl carbonate, which precipitates at first, was obtained. By adding manganese nitrate or lead nitrate to the solution and separating the corresponding carbonates, a part of the 13-minute and 100-minute activities was found in them; the filtrate was acidified and copper was precipitated as copper sulphide; the copper sulphide was active; it seems, however, that the ratio of the two activities is different in the two precipitates, i.e., the activity with the period of 13 minutes is more abundant in the sulphide precipitate.

From all our experiments the hypothesis that the 13-minute and 100-minute activities are to be attributed to transuranic elements is again confirmed. According to the known facts the simplest interpretation is that the activities of 10 seconds, 13 minutes, and 100 minutes are genetically related and must be attributed to elements having the atomic numbers 92, 93, 94, and the atomic weight 239.

5. ABSORPTION OF SLOW NEUTRONS AND EMISSION OF GAMMA RAYS BY THE ACTION OF SLOW NEUTRONS. – We studied the neutron absorption by chlorine, using either rhodium or vanadium as detectors; in both cases the same cross-section was found.

We also determined the mean free path of slow neutrons in paraffin by using rhodium as a detector. The curve obtained was analogous to that found previously using silver as a detector.

In a previous letter we described an experimental arrangement suited to detecting γ -ray emission produced in some substances by the action of slow neutrons. With the same apparatus we carried out a systematic experiment, which confirmed the expectation that elements with large cross-sections emit γ -rays (we mentioned that boron and lithium are exceptions). Besides the elements already listed, cobalt, copper, and gold emit considerable amounts of γ -rays.

Istituto Fisico della R. Università.

Rome, April 3, 1935-XIII.

(2) HAHN and MEITNER, «Naturwissenschaften», 23, 37 (1935).

92 b.

RADIOACTIVITY INDUCED
BY NEUTRON BOMBARDMENT^(*).—X.

Translated from E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, E. SEGRÈ
«Ric. Scientifica», 6 (1), 581–584 (1935).

1. RADIOACTIVITY INDUCED IN BROMINE. — We also noticed the existence of a third radioactive isotope of Br with a period of 36 hours, mentioned by Kurtchatow and others,⁽¹⁾ and we confirmed their measurements on the β -rays. We noticed that this activity is sensitive to the action of hydroogenous substances as are the other two Br activities. This fact renders very unlikely the explanation proposed by the above-mentioned authors postulating that this activity is obtained from a stable bromine isotope by the emission of one neutron, because a slow neutron has insufficient energy to bring this process about.

Since, according to information kindly given to us by Aston, the existence of a third stable isotope of bromine can be excluded, the nature of this third activity presents an interesting problem, probably similar to that of indium⁽²⁾.

2. INFLUENCE OF TEMPERATURE. — Moon and Tillman⁽³⁾ recently observed a difference in the activation of silver, rhodium and iodine by slowing down neutrons with paraffin either at room temperature or at the temperature of liquid air. Several months ago⁽⁴⁾ we tried to detect a similar temperature effect without success. By repeating the experiment under the conditions kindly communicated to us by Moon and Tillman, we too noticed an increase in the activation intensity of different elements by lowering the temperature of the paraffin. We noticed an increase from 10 to 30 per cent in the activation of Ag (2.3 minutes), V, Al (2.3 minutes); in rhodium, however, we did not find any appreciable increase in activity.

If the different behavior of various elements, also observed by Moon and Tillman, is confirmed, the process of slow neutron-capture must be considered more complicated than is now assumed, on the basis of the commonly accepted force law between neutron and nuclei (potential hole of nuclear dimensions).

(*) Cfr. «Ricerca Scientifica», 5 (1), pp. 283, 330, 452, 652 (1934); 5 (2), pp. 21, 381, 467 (1934); 6 (1), pp. 123, 432 (1935).

(1) KURTCHATOW, MYSSOWSKY, ROUSSINOW, «C. R.», 200, 1201 (1935).

(2) SZILARD and CHALMERS, «Nature», 135, 98 (1935); «Proc. Roy Soc.», 149, 592 (1935).

(3) MOON and TILLMAN, «Nature», 135, 904 (1935).

(4) «Proc. Roy. Soc.», 149, 592 (1935); «Ricerca Scientifica», 5 (2), p. 467 (1934).

The differences in behavior probably could be interpreted by assuming that there exists a very weak force between neutron and nucleus having a relatively large radius of action.

3. MECHANICAL TRANSPORT OF SLOW NEUTRONS. — In order to confirm by an independent method the results of Moon and Tillman's experiments, we tried to determine with a mechanical experiment how long the neutrons remain in paraffin.

A steel wheel of 80 cm diameter has on its edge a source of $\text{Em} + \text{Be}$ and near to it, 5 cm to the right and to the left respectively, two equal slow neutron detectors. In some of the experiments the detectors were of manganese, in some of vanadium.

The wheel was rotated between two large paraffin rings with rectangular cross section (10×20 cm), the axes of which coincided with the axis of the wheel. One of the rings was in the front, the other in the rear of the plane of the wheel at distance of 6 cm from said plane; the weight of the rings was about 100 kg.

The wheel was rotated with an angular velocity of about 1,600 revolutions per minute for a certain time, according to the detector used, and subsequently the ratio of the activities acquired by the two detectors was measured. For the measurement of the activity the detectors were removed from the wheel; after the first measurement the detectors were placed again in the same conditions as before, the wheel was now rotated in the opposite direction and the ratio between the activities of both detectors was measured again.

The result is that the detector which follows the source in the direction of motion acquires about 10 per cent more activity than the detector which precedes the source.

This result shows first of all that the neutrons indeed acquire a velocity corresponding to that of thermal agitation. The meaning of this experiment can be made more precise with the following explanation.

The same difference of 10 per cent between the activities of the two detectors is obtained by displacing the source from the center of the two detectors by about 0.5 cm and by keeping the wheel fixed (this check was made by using rhodium as a detector). This distance is passed by the periphery of the wheel in 7×10^{-5} seconds and therefore it must approximately coincide with the time slow neutrons survive in paraffin. Assuming that slow neutrons have the velocity of thermal agitation (2500 m/sec) and an average mean free path of 0.5 cm⁽⁵⁾, as results from scattering experiments, we can infer that a neutron undergoes on the average about 30 collisions after it has reached thermal velocity and before it diffuses out of the paraffin or before it is captured by the surrounding nuclei.

4. NEUTRON EMISSION BY DIFFERENT SUBSTANCES. — Since rhodium in a hydrogenous medium is a particularly sensitive neutron detector, we in-

(5) « Proc. Roy. Soc. », 149, 592 (1935), and WESTCOTT and BJERGE, « Proc. Cambridge Phil. Soc. », 31, p. 145, (1935).

vestigated with it some elements for neutron emission under α -particle bombardment.

Both silicon and phosphorus mixed with 200 mC of emanation activated a rhodium cylinder with an initial activity of about 100 counts per minute on our counters. In all experimental cases observed up to now the emission of neutrons from silicon and phosphorus is very low compared with the emission of neutrons from boron, lithium, aluminum, etc. In the case of phosphorus the emission observed is probably associated with the formation of radioactive chlorine⁽⁶⁾. With many substances a small emission of neutrons is obtained, probably due to surface impurities; among the substances examined, nickel shows the smallest effect.

We also tried to determine some properties of neutrons emitted by lithium, boron, aluminum, fluorine, magnesium. For this purpose we constructed sources similar to the usual ones but replacing beryllium with the element to be studied.

Boron. — We measured with a source Em + B the sensitivity coefficient to hydrogenous substances, α , of the elements listed below. For purposes of comparison we also list the value of α corresponding to a source Em + Be.

		α_B	α_{Be}
Si	(135 sec)	1	1
V	(225 sec)	120	40
Rh	(44 sec)	50	15
Ag	(140 sec)	20	15
I	(25 min)	10	5

From these data, which are however only indicative, it can be seen that the coefficient α_B is higher than α_{Be} by a factor which roughly varies from 3 to 1.

Furthermore it is interesting to compare the activities produced without slowing down the neutrons by two sources of Em + Be and Em + B of the same geometrical form and containing the same amount of emanation. By irradiating V in air the ratio between the activity obtained with the Be source and the activity obtained with the B source is found to be about 12. The similar ratio obtained by irradiating Si (135 sec) is larger than 15. These facts could be explained by the following hypothesis: in the spectrum of the neutrons emitted by an Em + Be source, there is a band of very slow neutrons to which the relatively low value of the coefficient α is attributed, and a band of very fast neutrons, already known from other experiments, responsible for the relatively strong activation of Si; on the other hand, in the spectrum of an Em + B source very slow and very fast neutrons are absent. Such considerations are suggested also by the results obtained from the following experiments: we measured the activation as a function of the distance from the source with a source Em + B; the detector used was Rh, the irradiation was carried out in a water tank of dimensions 40 × 30 × 80

(6) FRISCH, «Nature», 133, 721 (1936).

cm, and the measurements were made with an ionization chamber: a curve is obtained which differs slightly from that obtained by using as source $\text{Em} + \text{Be}$ ⁽⁷⁾; for small distances the activation by $\text{Em} + \text{B}$ decreases slower than that by $\text{Em} + \text{Be}$; for distances larger than 10 cm both curves have the same form.

Finally we measured with the apparatus described in a preceding communication the absorption coefficient of slow neutrons in chlorine using an $\text{Em} + \text{B}$ source; we obtained the same value as with an $\text{Em} + \text{Be}$ source (first reduction to halfvalue in 0.3 g/cm³).

Fluorine. — A source of about 300 mC of $\text{CaF}_2 + \text{Em}$ does not appreciably activate silicon, but a noticeable activation of V and Rh was observed when the irradiation was carried out in water.

Magnesium. — Neutrons from a 600 mC source of $\text{Mg} + \text{Em}$ activate P (2.4 hrs), Si (135 sec), Al (10 min), Rh (44 sec) and V (225 sec). The sensitivity coefficients α_{Mg} are remarkably larger than the coefficients α_{Be} for Rh (44 sec) and V (225 sec).

Aluminum. — Neutrons of a source Al + Em of about 600 mC do not activate Si appreciably, but activate Rh (44 sec). The coefficient α_{Al} for Rh (44 sec) is larger than the corresponding α_{Be} .

A more exact and more detailed knowledge of data similar to those collected above should give valuable information about the velocity spectrum of the neutrons emitted by various substances under α -particle bombardment and, on the other hand, about the energy necessary for the activation of various elements by neutrons.

5. EXPERIMENTS CONCERNING THE PRODUCTION OF NEUTRONS BY γ -RAYS. — We compared the activities produced in rhodium surrounded by paraffin by the two sources $\text{MsTh} + \text{Be}$ and $\text{MsTh} + \text{D}_2\text{O}$ (this source contains about 35 mC RdTh); the experiments were carried out by using 25 g beryllium and 25 g D_2O (98 %), in the same geometry. In such conditions we found that the number of neutrons emitted by D_2O under the action of γ -rays coming from MsTh is about 3.5 times as great as that emitted by Be. We carried out the same measurements by substituting the MsTh source with one containing 100 mg Ra. In the case of Be, under our geometrical conditions, using rhodium as detector, we obtained about 200 impulses per minute, while with D_2O we did not succeed in obtaining any appreciable activity. These facts can be easily interpreted if we consider that the neutron is bound more loosely in beryllium than in deuterium. Finally, we noticed that the number of neutrons emitted by Be was about the same as when we used the equivalent sources of mesothorium and radium.

With a source $\text{MsTh} + \text{D}_2\text{O}$ and $\text{MsTh} + \text{Be}$ we measured the activation as a function of the distance from the source. The irradiation was carried out in a water tank of the dimensions $40 \times 30 \times 80$ cm; the detector was a small rhodium cylinder (measurements have been made with counters).

(7) « Proc. Roy. Soc. », loc. cit.

The two curves obtained with Be and D₂O have substantially the same form.

The following table shows the activity (number of impulses) corresponding to different distances with the source MsTh + D₂O.

Distance in cm	Activation
4	1100 ± 50
6	962 ± 40
9	388 ± 20
12	188 ± 14
14	107 ± 7

The numbers to the left indicate in cm the distances from the detector to the axis of the tube containing MsTh.

Istituto Fisico della R. Università.

Rome, June 14, 1935-XIII.

Nº 93.

This paper is a summary and in part a translation of papers Nº 84 and 85.

93.

RADIOACTIVITY INDUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT

« Nature », (London) 133, 757 (Letter) (1934).

Experiments have been carried out to ascertain whether neutron bombardment can produce an induced radioactivity giving rise to unstable products which disintegrate with emission of β -particles. Preliminary results have been communicated in a letter to « La Ricerca Scientifica », 5 (1), 283 (1934).

The source of neutrons is a sealed glass tube containing radium emanation and beryllium powder. The amount of radium emanation available varied in the different experiments from 30 to 630 millicuries. We are much indebted to Prof. G. C. Trabacchi, Laboratorio Fisico della Sanità Pubblica, for putting at our disposal such strong sources.

The elements, or in some cases compounds containing them, were used in the form of small cylinders. After irradiation with the source for a period which varied from a few minutes to several hours, they were put around a Geiger counter with walls of thin aluminium foil (about 0.2 mm thickness) and the number of impulses per minute was registered.

So far, we have obtained an effect with the following elements:

Phosphorus. - Strong effect. Half-period about 3 hours. The disintegration electrons could be photographed in the Wilson chamber. Chemical separation of the active product showed that the unstable element formed under the bombardment is probably silicon.

Iron. - Period about 2 hours. As the result of chemical separation of the active product, this is probably manganese.

Silicon. - Very strong effect. Period about 3 minutes. Electrons photographed in the Wilson chamber.

Aluminium. - Strong effect. Period about 12 minutes. Electrons photographed in the Wilson chamber.

Chlorine. - Gives an effect with a period much longer than that of any element investigated at present.

Vanadium. - Period about 5 minutes.

Copper. - Effect rather small. Period about 6 minutes.

Arsenic. - Period about two days.

Silver. - Strong effect. Period about 2 minutes.

Tellurium. - Period about 1 hour.

Iodine. - Intense effect. Period about 30 minutes.

Chromium. - Intense effect. Period about 6 minutes. Electrons photographed in the Wilson chamber.

Barium. - Small effect. Period about 2 minutes.

Fluorine. - Period about 10 seconds.

The following elements have also given indication of an effect: sodium, magnesium, titanium, zirconium, zinc, strontium, antimony, selenium and bromine. Some elements give indication of having two or more periods, which may be partly due to several isotopic constituents and partly to successive radioactive transformations. The experiments are being continued in order to verify these results and to extend the research to other elements.

The nuclear reaction which causes these phenomena may be different in different cases. The chemical separation effected in the cases of iron and phosphorus seems to indicate that, at least in these two cases, the neutron is absorbed and a proton emitted. The unstable product, by the emission of a β -particle, returns to the original element.

The chemical separations have been carried out by Dr. O. D'Agostino. Dr. E. Amaldi and Dr. E. Segrè have collaborated in the physical research.

Physical Institute, Royal University.

Rome, April, 10.

94.

SULLA POSSIBILITÀ DI PRODURRE ELEMENTI DI NUMERO ATOMICO MAGGIORE DI 92

E. FERMI, F. RASETTI, O. D'AGOSTINO

«Ric. Scientifica», 5 (1), 536-537 (1934).

In una precedente lettera è stata data notizia di esperienze preliminari per studiare la attivazione dell'Uranio per effetto del bombardamento con neutroni⁽¹⁾. Desideriamo qui esporre con maggiore dettaglio le osservazioni fatte e altre ulteriori.

Le curve di decadimento della attività β , che si ottengono dall'Uranio, preventivamente liberato dai suoi ordinari prodotti di decadimento, i quali renderebbero impossibile ogni misura, e successivamente bombardato con neutroni per un tempo variabile da pochi secondi a una dozzina di ore, possono analizzarsi in esponenziali con i seguenti periodi: 10^s, 40^s, 13^m, oltre ad almeno altri due più lunghi. Questi fatti indicano che il processo è certamente complicato e che hanno luogo disintegrazioni successive; tuttavia, per la necessaria imprecisione delle misure, dovuta alle fluttuazioni statistiche, non è ancora possibile decidere quali siano processi alternativi e quali processi in catena. Come già abbiamo detto nella precedente lettera, si è cercato di riconoscere la natura chimica dell'elemento con periodo di 13^m, che per ragioni pratiche si presenta il più conveniente. Lo schema generale della ricerca è stato il seguente. Alla soluzione di Uranio in forma di nitrato, prima purificato radioattivamente e quindi irradiato con neutroni, si aggiungeva una certa quantità di un ordinario elemento dotato di attività β tale da dare un migliaio di impulsi per minuto nel contatore. Se si riesce a dimostrare che l'attività indotta, riconoscibile dal suo periodo caratteristico, può essere separata chimicamente dalla attività aggiunta, è ragionevole ammettere che le due attività non siano dovute a isotopi. Si è già detto che l'attività di 13^m è trascinata da un precipitato di biossido di Manganese in soluzione acida. Questa reazione ci ha permesso di separare questa attività da molti elementi pesanti. Sono state ripetute e confermate le separazioni già precedentemente annunziate da U, Pa, Th. Inoltre si è effettuata anche la separazione dal Ra e dall'Ac, che sono stati aggiunti nella forma di Ms Th 1 e di Ms Th 2; conviene anche, affinché la separazione avvenga in modo completo, aggiungere alla soluzione piccole quantità di Bario e di Lantanio a sostegno degli elementi precedenti. Si è trovato infine che le condizioni di precipitazione del biossido di Manganese si possono regolare in modo che il precipitato si formi in presenza

(1) «La Ricerca Scientifica», 5 (1), p. 452, (1934).

di Piombo e Bismuto inattivi senza trascinarli e portando seco invece la attività di 13^m .

In questo modo sembra doversi escludere che la attività di 13^m sia dovuta a un isotopo di U (92), (Pa) (91), Th (90), Ac (89), Ra (88), Bi (83), Pb (82). Il suo comportamento esclude anche Ekacesio (87) ed Emanazione (86).

Da questo complesso di prove negative sembra plausibile considerare la possibilità già enunciata che il numero atomico dell'elemento in questione sia maggiore di 92. Se fosse un elemento 93, esso sarebbe omologo del Manganese e del Renio. Questa ipotesi è confermata in qualche misura dal fatto osservato che la attività di 13^m è trascinata da un precipitato di solfuro di Renio insolubile in HCl. Tuttavia, poiché molti elementi pesanti precipiterebbero in questa forma, questa prova non può considerarsi molto dimostrativa.

La possibilità di un numero atomico 94 o 95, non sarebbe facile da distinguere dalla precedente, poiché le proprietà chimiche di questi elementi sono probabilmente abbastanza simili. Utili informazioni sui processi che si svolgono si potrebbero probabilmente ricavare da un esame di una eventuale emissione di particelle pesanti. Naturalmente non è però possibile osservare eventuali disintegrazioni di lunga vita; e nemmeno disintegrazioni rapide, poiché l'osservazione di particelle pesanti richiede di necessità manipolazioni chimiche per portare la sostanza attiva in uno strato sottile. In queste condizioni appare pertanto prematuro formare ipotesi troppo definite sulla serie di disintegrazioni che hanno luogo, prima che altre esperienze abbiano ulteriormente chiarito i fenomeni.

Istituto Fisico della R. Università.

Roma, 6 giugno 1934-XII.

Nº 95.

This paper originated in connection with some experimental work by Amaldi and Segre on the absorption spectrum of the alkali metals near the limit of the $s-p$ series. It was found experimentally that the presence of a foreign gas under pressure shifted the absorption lines without broadening them in an excessive way, with the result that even the terms between $20\ \text{\AA}$ and $30\ \text{\AA}$ were observable. The absence of the expected broadening and the shift of the energy levels were rather puzzling and were discussed extensively with Fermi. It occurred to him that the outer electron might feel the influence of the dielectric constant of the gas (a similar idea recurs later in studies on the stopping power) and he made a calculation on this hypothesis. The order of magnitude of the effect agreed with observation, but when several gases were tried, it was found that nitrogen gave an effect of the wrong sign. The dielectric effect always shifts the lines towards the long wave lengths and here the shift was towards the short wave lengths. Further meditation by Fermi led him to discover another cause for the shift of the levels, which could have both signs and was comparable in magnitude with the dielectric effect.

This is described in the second part of the paper, in which we meet for the first time the concept of scattering length and of "pseudo-potential". The theoretical development is remarkable because it shows for the first time the application of Born's method to a deep and narrow potential and gives a technique that Fermi used many times in connection with his neutron work. Indeed Fig. 1 was a sort of trademark in many of his later theoretical studies.

E. SEGRÈ.

95.

SOPRA LO SPOSTAMENTO PER PRESSIONE DELLE RIGHE ELEVATE DELLE SERIE SPETTRALI

«Nuovo Cimento», II, 157-166 (1934).

SUNTO. — Lo spostamento dei termini elevati delle serie di assorbimento dei vapori alcalini, osservato da Amaldi e Segre quando il vapore si trova in una atmosfera di gas estraneo, viene studiato teoricamente. Si stabilisce una relazione tra lo spostamento delle righe e la sezione d'urto limite per elettroni di velocità piccolissima contro le molecole del gas perturbatore.

§ 1. E. Amaldi ed E. Segre hanno descritto nella Nota precedente⁽¹⁾ il considerevole spostamento che subiscono le righe di ordine elevato delle serie di assorbimento dei vapori alcalini, quando questi si trovano immersi in un gas estraneo. Le caratteristiche più notevoli del fenomeno osservato da questi Autori possono così riassumersi:

(1) E. AMALDI ed E. SEGRÈ, «Nuovo Cimento», II, 145 (1934).

Lo spostamento dei termini elevati della serie di assorbimento è, a parità di pressione del gas estraneo, assai maggiore di quello che subiscono i primi termini della serie.

Lo spostamento, al crescere del numero d'ordine della riga, sembra convergere verso un limite approssimativamente proporzionale alla pressione del gas estraneo.

Nei due vapori esaminati, sodio e potassio, lo spostamento è eguale, entro i limiti della precisione delle misure.

La grandezza dello spostamento, e anche il suo verso, dipendono dalla natura del gas estraneo.

Mi propongo in questa Nota di discutere teoricamente il comportamento dei termini elevati di un atomo in atmosfera di un gas estraneo nel caso, che corrisponde alle condizioni realizzate sperimentalmente da Amaldi e Segrè, in cui le orbite siano tanto estese da contenere, entro il raggio dell'orbita, alcune migliaia di atomi perturbatori.

Dal punto di vista qualitativo due cause principali intervengono a determinare uno spostamento per pressione delle righe di ordine elevato, e cioè:

a) Quando eccitiamo un atomo, trasportando un suo elettrone in una orbita molto lontana, tutti gli atomi del gas perturbatore che si trovano a una distanza dal nucleo minore del raggio dell'orbita dell'elettrone allontanato, vengono a trovarsi in un campo elettrico dovuto al fatto che, alla azione di schermo della carica nucleare da parte degli elettroni, manca il contributo dell'elettrone che è stato allontanato. Questo campo determina una polarizzazione degli atomi estranei, e l'energia necessaria a produrla dà luogo a uno spostamento dei termini. Faremo vedere nel § 2 che questa causa agisce sempre nel senso di produrre uno spostamento delle righe verso il rosso.

b) Gli atomi del gas perturbatore agiscono sopra l'elettrone luminoso come buche di potenziale disseminate sul suo cammino; si potrebbe pensare che l'effetto di queste buche potesse valutarsi per mezzo della prima approssimazione della teoria delle perturbazioni, considerando che esse vengono ad abbassare il livello medio del potenziale in cui si muove l'elettrone esterno. Se così fosse, ci si dovrebbe attendere in ogni caso un abbassamento dei livelli energetici elevati rispetto al termine fondamentale, e quindi uno spostamento delle righe verso il rosso. Una considerazione più accurata dimostra invece che la prima approssimazione non solo non è sufficiente dal lato quantitativo, ma può perfino dare errato il verso dello spostamento. Faremo vedere infatti che l'effetto delle buche di potenziale può, a seconda dei casi, consistere in uno spostamento verso il rosso o verso il violetto, e che l'ordine di grandezza dello spostamento è, almeno di solito, più grande di quello dello spostamento dovuto alla causa a); per modo che, in accordo con quanto si osserva dovremo attenderci che lo spostamento totale delle righe avvenga in alcuni casi verso il rosso e in altri verso il violetto. Faremo anche vedere che, almeno nel caso che il gas estraneo sia monoatomico, esiste una semplice relazione tra lo spostamento delle righe spettrali e la sezione d'urto di elettroni lentissimi contro gli atomi del gas estraneo; relazione che, nel caso dei gas monoatomici studiati da Amaldi e Segrè, sembra effettivamente essere verificata.

Nei §§ 2 e 3 studieremo gli spostamenti dovuti alle due cause *a)* e *b*). Nel § 4 discuteremo poi come si possa giustificare il fatto che, nonostante la presenza di un grande numero di atomi perturbatori nell'interno dell'orbita, i termini restino tuttavia abbastanza definiti perché si possano osservare le righe spettrali fino a un ordine assai elevato.

§ 2. Lo spostamento delle righe dovuto alla polarizzazione degli atomi del gas estraneo si calcola nel modo seguente. Quando l'elettrone luminoso viene eccitato, esso si porta sopra una orbita di raggio tanto grande, che nel suo interno vengono ad essere contenuti molti atomi del gas estraneo; questi si trovano ora ad essere soggetti all'azione della carica elettrica e del resto atomico. Sia r_i la distanza di uno degli atomi estranei dal centro dell'atomo alcalino; esso verrà a trovarsi in un campo elettrico di intensità e/r_i^2 . Indichiamo con α il coefficiente di polarizzabilità di un atomo del gas estraneo, legato alla costante dielettrica ϵ del gas dalla relazione:

$$(1) \quad \epsilon = 1 + 4\pi n \alpha$$

dove n è il numero di atomi per unità di volume. Si calcola elementarmente che l'energia dell'atomo, per effetto della sua polarizzazione, quando lo si pone in un campo elettrico E è data da $-\alpha E^2/2$. Ponendo $E = e/r_i^2$ si trova dunque, per effetto della polarizzazione degli atomi del gas estraneo, una variazione dell'energia

$$(2) \quad \Delta W_\epsilon = -\frac{\alpha e^2}{2} \sum \frac{1}{r_i^4} .$$

La somma si deve estendere a tutti gli atomi del gas estraneo che si trovano entro una distanza dal nucleo dell'atomo considerato minore della distanza media dell'elettrone eccitato; o anche praticamente, data la grande estensione dell'orbita, la somma in (2) potrà estendersi a tutti gli atomi del gas estraneo.

Lo spostamento delle righe dovuto a questa causa dipende dunque essenzialmente dalla somma degli inversi delle quarte potenze della distanza degli atomi perturbatori dal nucleo dell'atomo perturbato. Si riconosce facilmente che il valor medio di una tale somma quando almeno si trascuri l'estensione finita degli atomi, risulta infinito; tuttavia il valore più probabile della somma stessa è finito. Ponendo

$$z_i = \frac{4\pi}{3} r_i^3 n$$

si ha

$$\sum \frac{1}{r_i^4} = \left(\frac{4\pi n}{3} \right)^{4/3} \sum \frac{1}{z_i^{4/3}} .$$

Inoltre, se gli atomi sono distribuiti con la concentrazione n , le variabili z_i possono prendere tutti i valori positivi e la probabilità che uno dei valori z_i cada nell'intervallo tra z e $z + dz$ è eguale a dz . In queste condizioni la legge di distribuzione statistica dell'espressione $\sum z_i^{-4/3}$ è stata calcolata recen-

temente da G. C. Wick ⁽²⁾, che ha trovato che il valore più probabile di essa è approssimativamente 2,6. Troviamo dunque, come valore più probabile di $\Sigma \frac{1}{r_i^4}$ il seguente

$$(3) \quad \left(\Sigma \frac{1}{r_i^4} \right)_o = \left(\frac{4\pi n}{3} \right)^{4/3} 2,6 \cong 17,5 n^{4/3}.$$

Per la causa che stiamo esaminando dunque la riga si allarga e si sposta; e lo spostamento del punto in cui la intensità è massima è dato, secondo la (3), da

$$\Delta W_e = -17,5 \frac{\alpha e^2}{2} n^{4/3}.$$

Siccome dall'altra parte la legge di distribuzione statistica di $\Sigma \frac{1}{r_i^4}$

non è in alcun modo simmetrica rispetto al suo massimo, ma decresce assai più rapidamente per valori piccoli che per valori grandi, riteniamo che, in pratica, il punto che si osserva effettivamente non coincida col punto della riga in cui l'intensità è massima ma sia più spostato verso il rosso. Probabilmente un dato un po' più corrispondente alla pratica delle osservazioni si ottiene sostituendo a 17,5 il valore 20. La differenza del resto non produce altro che una alterazione quasi insensibile dei risultati. Tenendo conto anche di (1) scriveremo:

$$(4) \quad \Delta W_e = -20 \frac{(\epsilon - 1) e^2}{8\pi} n^{4/3}.$$

La causa che stiamo esaminando produce dunque un abbassamento dei termini di ordine elevato rispetto al termine fondamentale. Essa dà pertanto origine a uno spostamento delle righe spettrali verso il rosso che, espresso in numeri di onde, è dato da:

$$(5) \quad \Delta_e = +20 \frac{(\epsilon - 1) e^2}{8\pi\hbar c} n^{4/3} = +0,00093 (\epsilon - 1) n^{4/3}$$

(il segno + significa spostamento verso il rosso). Lo spostamento dovuto a questa causa, per gas estranei a pressione dell'ordine di grandezza di una atmosfera, risulta dell'ordine di un cm^{-1} . Deve notarsi infine che tutti i risultati precedenti sono validi solo nel caso che il gas estraneo non abbia un dipolo permanente. Le osservazioni di Amaldi e Segrè si limitano appunto a casi di questo tipo.

§ 3. Passiamo ad esaminare l'effetto della causa δ) del § 1 che, come si è già detto, è, almeno nella maggior parte dei casi, più importante della precedente. Tratteremo il caso che il gas perturbatore sia monoatomico.

Il potenziale che agisce sopra l'elettrone luminoso quando questo si trova in uno stato di numero quantico assai elevato è costituito dalla somma del potenziale U del resto atomico, e cioè da una funzione che, ove si eccettui la immediata vicinanza del resto atomico, varia assai regolarmente e lentamente, più le buche di potenziale V, che rappresentano l'azione esercitata

(2) G. C. WICK, « Rend. Lincei ». 19, 27 (1934).

sull'elettrone dai singoli atomi del gas perturbatore. Queste buche di potenziale sono notevolmente profonde ma hanno dimensioni piccole a confronto della lunghezza d'onda di De Broglie dell'elettrone poiché gli atomi perturbatori sono neutri. La autofunzione ψ dell'elettrone, sotto l'azione di questo potenziale, avrà evidentemente un andamento medio con variazione lenta e regolare, al quale si sovrappongono delle irregolarità localizzate in una piccola zona attorno a ciascuna delle buche di potenziale. Converrà pertanto considerare, accanto alla ψ , un'altra funzione, che indicheremo con $\bar{\psi}(x, y, z)$, e che rappresenta il valor medio di ψ in un intorno del punto x, y, z piccolo a confronto della lunghezza d'onda di De Broglie, ma abbastanza grande per contenere un numero considerevole di atomi del gas estraneo. La funzione $\bar{\psi}$ riproduce l'andamento generale di ψ , senza avere le irregolarità di questa ultima funzione in corrispondenza delle buche di potenziale.

Dalla definizione di $\bar{\psi}$ risulta, con calcoli elementari, che

$$(6) \quad \Delta \bar{\psi} = \bar{\Delta \psi}$$

dove Δ è l'operatore di Laplace.

L'equazione di Schrödinger per il nostro elettrone ha la forma

$$(7) \quad \Delta \psi + \frac{8\pi^2 m}{\hbar^2} (W - U - \sum V_i) \psi = 0.$$

Prendiamo la media della (7) in un intorno come quello definito precedentemente del punto x, y, z , che sia abbastanza piccolo perché U non subisca in esso considerevoli variazioni. Otteniamo, tenendo conto anche di (6)

$$(8) \quad \Delta \bar{\psi} + \frac{8\pi^2 m}{\hbar^2} (W - U) \bar{\psi} - \frac{8\pi^2 m}{\hbar^2} \sum V_i \bar{\psi} = 0.$$

Per calcolare l'ultimo valor medio si osservi che, entro una delle buche di potenziale, $W - U$ è trascurabile di fronte al potenziale V della buca. Inoltre la ψ in una regione circostante alla buca di potenziale, a distanza da questa grande in confronto al raggio ρ della buca, ma piccola in confronto alla lunghezza d'onda di De Broglie, ha valore praticamente costante ed eguale in prima approssimazione a $\bar{\psi}$; si riconosce dunque che la ψ nell'interno della buca e nelle sue vicinanze dipende praticamente solo dalla distanza r dal centro della buca. Ponendo perciò in questa regione

$$(9) \quad \psi = \frac{u(r)}{r}$$

la funzione $u(r)$ soddisferà in prima approssimazione all'equazione differenziale:

$$(10) \quad u''(r) = \frac{8\pi^2 m}{\hbar^2} V(r) u(r).$$

All'esterno della buca, dove $V(r)$ si annulla, la u è dunque una funzione lineare di r . E siccome il valore di ψ lontano dalla buca

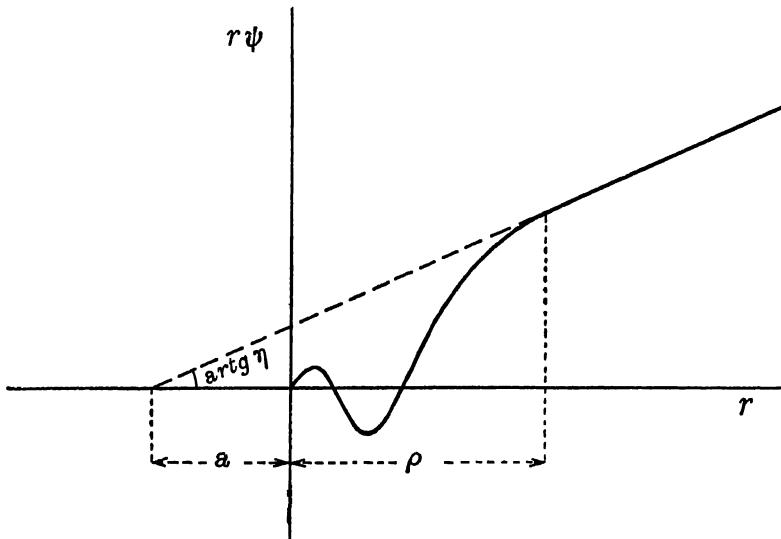


Fig. 1.

deve tendere approssimativamente al valore $\bar{\psi}$, si potrà porre, all'esterno della buca:

$$(11) \quad u(r) = (a + r)\bar{\psi}$$

dove a è una lunghezza, il cui significato è chiarito nella Fig. 1. In essa sono riportati in ascisse i valori di r e in ordinate quelli di u . La u , come risulta dalla (9), è nulla per $r = 0$, mentre, per r maggiore di ρ ha per grafico una retta. Prolunghiamo questa retta fino ad incontrare l'asse delle ascisse; a è la distanza del punto di intersezione dall'origine delle coordinate.

Tenendo conto di (9), (10) e (11) troviamo

$$(12) \quad \frac{8\pi^2 m}{h^2} \int V \psi d\tau = 4\pi \frac{8\pi^2 m}{h^2} \int V u r dr = 4\pi \int u'' r dr \\ = 4\pi [u' r - u]_0^r = -4\pi a \bar{\psi}$$

e siccome nell'unità di volume sono contenute n buche di potenziale, ricaviamo infine

$$(13) \quad \frac{8\pi^2 m}{h^2} \sum V_i \psi = -4\pi a n \bar{\psi}.$$

Con ciò la (8) diventa

$$(14) \quad \Delta \bar{\psi} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (W_0 - U) \bar{\psi} = 0$$

dove si è posto

$$(15) \quad W_0 = W + \frac{h^2 a n}{2\pi m}.$$

L'equazione (14) per ψ ha la forma dell'equazione di Schrödinger per il caso in cui non esista il gas estraneo. Segue dunque da essa che W_0 prenderà valori eguali ai livelli energetici dell'atomo imperturbato. Secondo la (15) l'energia W dell'elettrone in presenza del gas estraneo differisce da W_0 per la costante

$$(16) \quad -\frac{\hbar^2 an}{2\pi m}.$$

Per a positivo i termini elevati si abbassano rispetto al termine fondamentale, mentre per a negativo essi si alzano. Nel primo caso le righe si spostano verso il rosso e nel secondo si ha invece spostamento verso il violetto. Lo spostamento, in cm^{-1} è dato da

$$(17) \quad \Delta_a = \frac{\hbar an}{2\pi mc}.$$

La costante a che figura in questa formula e che ha l'ordine di grandezza delle dimensioni atomiche, potrebbe calcolarsi, integrando l'equazione differenziale (10) se fosse conosciuta la forma del potenziale V dovuto a un atomo del gas estraneo. In realtà la conoscenza di questo potenziale è troppo imprecisa per permettere anche una valutazione grossolana della costante.

È interessante però osservare che la grandezza di a , non però il suo segno, si possono ricavare quando si conosca la sezione d'urto di elettroni lentissimi contro gli atomi del gas estraneo. Per elettroni lentissimi infatti la sezione d'urto è dovuta, come è noto, solamente alla diffusione delle onde s . In questo caso essa è data da⁽³⁾

$$(18) \quad \sigma = \frac{\hbar^2}{\pi p^2} \sin^2 \delta_0$$

dove p è la quantità di moto (per ipotesi assai piccola) dell'elettrone e δ_0 misura la differenza di fase tra onde s corrispondenti ad elettroni liberi di impulso p e onde corrispondenti ad elettroni su cui agisce il potenziale V dell'atomo. Dalla (11) si vede facilmente che, al limite per p molto piccolo, si ha

$$(19) \quad \delta_0 = \frac{2\pi p a}{\hbar}.$$

Con ciò la (18), sostituendo l'arco al seno, diventa

$$(20) \quad \sigma = 4\pi a^2.$$

Questa formula permette di ricavare il valore assoluto di a , non però il suo segno. Sostituendo nella (17) si ottiene

$$(21) \quad \Delta_a = \pm n \frac{\hbar V_0}{4\pi^{3/2} mc}.$$

Lo spostamento complessivo delle righe è dato dalla somma di Δ_s e di Δ_a ; esso risulta dunque, secondo la (5) e la (17),

$$(22) \quad \Delta = 20 \frac{(\varepsilon - 1)e^2}{8\pi hc} n^{1/3} + \frac{\hbar an}{2\pi mc}.$$

(3) Cfr. per esempio G. WENTZEL, « Handbuch der Physik », XXIV/1, p. 711, 2^a edizione, Berlino 1933.

Nella maggior parte dei casi, il secondo termine è prevalente rispetto al primo, e siccome esso può essere per alcuni gas positivo e per altri negativo, ne risulta che anche lo spostamento totale delle righe può essere sia verso il rosso che verso il violetto, come effettivamente si osserva.

Per il confronto delle formule qui ottenute con l'esperienza rimandiamo al citato lavoro di Amaldi e Segré.

Terminiamo questo paragrafo ricapitolando le condizioni necessarie per la validità dei risultati qui raggiunti. Esse sono:

a) che il gas estraneo sia monoatomico, in modo che il suo potenziale possa considerarsi avere simmetria sferica;

b) che la densità del gas estraneo sia abbastanza grande perché entro un cubo di lato eguale alla lunghezza d'onda di De Broglie dell'elettrone luminoso siano contenuti molti atomi del gas; questa condizione è effettivamente verificata per gas a pressione dell'ordine di una atmosfera e per termini aventi numero quantico totale di alcune decine;

c) che il gas estraneo sia abbastanza rarefatto perché la distanza media tra i suoi atomi risulti grande sia rispetto al raggio degli atomi stessi, che rispetto al raggio d'urto per elettroni di piccola velocità.

§ 4. Vogliamo da ultimo precisare le condizioni necessarie perché la perturbazione esercitata dagli atomi del gas estraneo non sia tale da determinare una confusione delle righe tra di loro, che renderebbe impossibile ogni osservazione. Trascuriamo in ciò le comuni cause di allargamento delle righe spettrali (effetto Doppler, urti di tutto l'atomo contro gli atomi del gas estraneo, ecc.) limitandoci solo a tener conto di quelle che sono peculiari del fenomeno che stiamo esaminando. Esse sono sostanzialmente due, una delle quali è da ricondursi all'effetto della polarizzabilità degli atomi del gas estraneo, che è stato esaminato nel § 2; mentre l'altra dipende dall'azione delle buche di potenziale esaminata nel § 3.

La prima causa di allargamento dipende dal fatto che lo spostamento ΔW_s del termine, come risulta dalla (2) è proporzionale alla grandezza $\Sigma \frac{1}{r_i^4}$.

Il valore di questa dipende dalla distribuzione degli atomi del gas estraneo attorno al resto atomico dell'atomo considerato, ed i suoi valori possono, a seconda delle possibili distribuzioni, oscillare entro limiti piuttosto larghi. Dai calcoli di Wick sopra la legge di distribuzione della grandezza $\Sigma \frac{1}{z_i^{4/3}}$, risulta che la funzione che dà la distribuzione statistica di questa grandezza ha valori eguali alla metà del massimo della funzione stessa in corrispondenza degli argomenti 2 e 5 circa. Da ciò si deduce, al modo seguito nel § 2 che la riga ha, per questa ragione, una larghezza di circa

$$(23) \quad 20 \frac{(\epsilon - 1) e^2}{8\pi\hbar c} n^{1/3} \text{ cm}^{-1}$$

che in condizioni pratiche può spesso superare un cm^{-1} .

Una seconda causa di allargamento delle righe è la seguente. Consideriamo classicamente il moto dell'elettrone luminoso lungo la sua grande orbita

di numero quantico assai elevato. Esso traversa nel suo percorso gli atomi del gas estraneo, muovendosi abbastanza lentamente attraverso ad essi. Ora è evidentemente necessario, affinché le righe possano apparire distinte, che l'elettrone possa percorrere almeno alcuni giri lungo la sua orbita prima che un urto contro una delle molecole del gas estraneo ne disturbi il movimento. Se σ è la sezione d'urto di un elettrone lentissimo contro gli atomi del gas estraneo, il suo cammino libero medio è

$$(23) \quad l = 1/\sigma n .$$

Perché le righe possano apparire distinte è dunque necessario che questo cammino libero medio sia più grande del perimetro dell'orbita. Tale perimetro, per orbite p di numero quantico totale n^* elevato, è dato approssimativamente da

$$(24) \quad 4 \pi n^{*2}$$

dove a rappresenta qui il raggio della prima orbita di Bohr. La condizione che il perimetro dell'orbita sia piccolo a confronto del cammino libero medio dell'elettrone ci dà dunque

$$(25) \quad 4 \pi n^{*2} < \frac{l}{\sigma n} .$$

Dal che si ricava che, per questa ragione, non è praticamente possibile osservare righe di numero d'ordine superiore a

$$(26) \quad n_o^* = \frac{l}{2 \sqrt{\sigma n}} .$$

Per esempio nel caso che il gas estraneo sia Argon alla concentrazione normale di $2,7 \cdot 10^{19}$ atomi per cm^3 prendendo per la sezione d'urto il valore trovato da Amaldi e Segrè $\sigma = 11,6 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ si trova da (26) $n_o^* = 39$. In pratica naturalmente, per effetto delle altre cause di allargamento, il numero d'ordine delle ultime righe fino alle quali si riesce a seguire la serie di assorbimento in presenza della concentrazione indicata di atomi di Argon sarà alquanto minore di questo limite.

96.

RADIOATTIVITÀ PRODOTTA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI^(*)

«Nuovo Cimento», II, 429—441 (1934).

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 α , 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. Joliot e I. Curie⁽¹⁾ 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.

Nelle loro esperienze i coniugi Joliot si sono serviti, per bombardare i diversi elementi, delle particelle α del polonio. Queste particelle, a causa della repulsione coulombiana, possono, come è ben noto, esercitare un effetto soltanto sopra elementi leggeri. Infatti Joliot e altri⁽²⁾ poterono constatare che alcuni elementi leggeri (B, N, Mg, Na, Al, P) divengono radioattivi per azione del bombardamento con particelle α . In tutti questi casi, ad eccezione del

(*) Confronta le note preliminari in «Ricerca Scientifica», 5 (1), pp. 283, 330, 452, 533, 650; (2) p. 21 (1934); «Nature», 133, 757, 898 (1934).

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

(2) I. CURIE e F. JOLIOT, loc. cit., L. WERTENSTEIN, «Nature», 133, 564 (1934), O. FRISCH, «Nature», 133, 721 (1934).

magnesio, di cui si parlerà in seguito, il corpuscolo emesso è un positrone. Cockcroft, Gilbert, Walton e altri⁽³⁾ ottennero fenomeni analoghi a quelli osservati dai Joliot bombardando il carbonio con protoni accelerati artificialmente; infine Crane, Lauritsen e Harper⁽⁴⁾ 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 α 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 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 zero 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 γ . 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 α . Deve infine tenersi presente che i neutroni del berillio sono anche accompagnati da una radiazione γ assai dura (5 o 6 milioni di volt; circa un quanto γ per ogni neutrone); sembra tuttavia improbabilissimo che i fenomeni che descriveremo siano connessi con la presenza di questa radiazione γ , poiché radiazioni γ estremamente più intense e di durezza non molto inferiore non producono alcun effetto osservabile.

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

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

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 infilate 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 sicché 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, poiché 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 ad 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, poiché 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 durezze 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, σ , 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,

$$\sigma = 2,1 \cdot 10^{-23} \frac{Mi}{n}.$$

Se si prende n approssimativamente eguale a 1000 si ha dunque

$$(1) \quad \sigma = 2 \cdot 10^{-26} Mi.$$

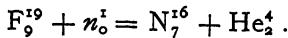
Per la discussione della reazione nucleare che dà origine all'elemento attivo è essenziale poter individuare la natura chimica di questo. Lo schema generale secondo cui può condursi questa ricerca è il seguente. È naturale ammettere che, bombardando un elemento chimico, questo possa trasformarsi in un 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 isolargli 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 dettagliatamente 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 α , può ritenersi probabile che avvenga la reazione nucleare seguente



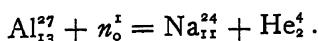
Si formerebbe così un N^{16} instabile che, disintegrandosi ulteriormente con emissione di una particella β si trasformerebbe in O^{16} . Il fatto che il prodotto finale che si forma sia l'ossigeno, che, come è ben noto, corrisponde a una configurazione nucleare assai stabile, trova riscontro nel fatto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

La attività del fluoro è molto intensa e corrisponde approssimativamente a $i \sim 0,7$; l'effetto è reso ancora più appariscente dal fatto che i raggi β 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 $i \sim 0,8$; 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:

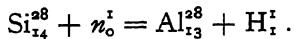


Il Na²⁴ si disintegrebbbe successivamente con emissione di un elettrone trasformandosi nell'isotopo stabile Mg²⁴.

Non è stata fatta una separazione dell'elemento attivo con la vita di 12 minuti. Si può tuttavia ritenere plausibile che esso sia un Mg²⁷; infatti le altre possibilità, Al²⁸ e Al²⁶ sono probabilmente da escludersi, la prima perché Al²⁸, come vedremo tra un momento, è un isotopo radioattivo avente periodo di circa 3 minuti, la seconda perché Al²⁶, se esiste, dovrebbe verosimilmente disintegrasarsi emettendo dei positroni.

14. *Silicio*. — Anche il silicio irradiato coi neutroni si attiva con notevole intensità ($i \sim 0,7$). 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 sulfati di alluminio e di magnesio. Il silicio si elimina come fluoruro e nel residuo si precipita l'alluminio che trascina con sè l'attività. Resta con ciò assai probabile che la reazione nucleare avvenga secondo lo schema

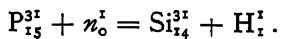


Si formerebbe così un isotopo radioattivo dell'alluminio, Al²⁸, che disintegrando con emissione di elettroni, si trasforma di nuovo in Si²⁸. Resta con ciò confermata l'ipotesi dei Joliot e di Preiswerk⁽⁵⁾ che questo sia lo stesso Al²⁶ che si forma bombardando il Mg²⁵ con particelle α a che, entro i limiti 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 $i \sim 0,6$) e una breve di circa 3 minuti, segnalata dai coniugi Joliot; l'intensità di questa è circa 10 volte minore di quella della precedente.

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 sè l'attività.

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



Il Si³¹ così formato, con emissione di un elettrone, si trasforma di nuovo nell'elemento di partenza P³¹.

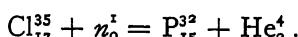
(5) I. CURIE, F. JOLIOT, P. PREISWERK, «C. R.», 198, 2089 (1934).

Non è stata fatta, fino ora, una separazione chimica del prodotto con il periodo di 3 minuti. Sembra tuttavia probabile, data la egualanza delle vite medie, che si formi lo stesso Al²⁸ che si ottiene dal silicio.

17. *Cloro*. - L'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 disiolto 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 sè l'attività.

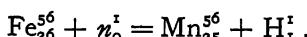
La reazione nucleare che dà origine alla attivazione del cloro sembra in conseguenza essere



Il P³² formato, con emissione di elettroni, si trasforma nell'isotopo stabile S³².

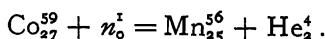
26. *Ferro*. - Il ferro presenta un effetto non molto intenso ($i \sim 0,05$) con periodo di dimezzamento di circa 2,5 ore.

Il prodotto attivo che si forma ha le reazioni del manganese; lo si può separare per esempio 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 Mn⁵⁶ con emissione di un elettrone ritorna Fe⁵⁶.

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 Mn⁵⁶ 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 $i \sim 0,5$.

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 ($i \sim 0,4$).

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 I¹²⁷ si trasformi in un suo isotopo radioattivo I¹²⁸ oppure I¹²⁶ 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⁽⁶⁾.

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 della maggior parte dei casi l'elemento attivo ha un 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 α o di un protone. Se l'energia con la quale viene espulsa la particella α 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

(6) E. AMALDI, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ, «Nuovo Cimento», **xx**, 442 (1934); E. AMALDI, E. SEGRÈ, «Nuovo Cimento», **xx**, 452 (1934); O. D'AGOSTINO, «Gazz. Chimica Italiana», in stampa, 1934.

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 α sono processi che tendono ad elevare il numero dei neutroni nucleari in paragone del numero 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 α 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^{-22} secondi, pari all'incirca al tempo che il neutrone impiegherebbe classicamente a traversare il nucleo. Perché il neutrone possa venir catturato sembrerebbe dunque necessario che durante questo tempo brevissimo il neutrone riesca a perdere la sua energia (emettendo per esempio un quanto γ) in modo da restare legato stabilmente. Ora la probabilità della emissione di un quanto γ 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 γ o altro processo 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 perché 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 γ , 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 β ⁽⁷⁾ 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 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.

(7) E. FERMI, «Nuovo Cimento», II, 1 (1934).

97.

NUOVI RADIOELEMENTI PRODOTTI CON BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI^(*)

E. AMALDI, E. FERMI, F. RASETTI ed E. SEGRÈ

«Nuovo Cimento», **IX**, 442-447 (1934).

SUNTO. — In questo lavoro viene dato un secondo elenco di elementi che diventano radioattivi per bombardamento con neutroni. Alla fine si trova una tabella che riassume i risultati di tutte le ricerche compiute in questo campo.

Le prime ricerche sulla radioattività provocata dal bombardamento di neutroni hanno mostrato l'interesse di esaminare sistematicamente il comportamento del maggior numero possibile di elementi.

Il metodo generale seguito in questa ricerca è stato già descritto nella Nota precedente⁽¹⁾. Le operazioni chimiche, che sono state eseguite dal dott. O. D'Agostino, sono qui semplicemente accennate perché egli ne riferirà in un prossimo lavoro.

Abbiamo esaminato i seguenti elementi:

1. *Idrogeno*. — Acqua irradiata 14 ore con una sorgente di emanazione più berillio di 670 mC non ha dato effetto misurabile.

3. *Litio*. — Litina irradiata 14 ore con 750 mC non ha dato effetto misurabile.

4. *Berillio*. — Abbiamo usato il berillio allo stato di elemento, fornитoci da Fraenkel & Landau, puro al 98%; si è notata una leggera attività con periodo di alcuni minuti che però potrebbe essere dovuta ad impurità di sostanze fortemente attive (Si, Al).

5. *Boro*. — Abbiamo trovato una traccia di attività che però non riteniamo molto significativa data la poca purezza della sostanza a disposizione.

6. *Carbonio*. — Paraffina irradiata 15 ore con 220 mC non ha dato effetto misurabile.

7. *Azoto*. — Carbonato di guanidina, che contiene circa il 35% di azoto, irradiato 15 ore con 500 mC non ha dato effetto misurabile.

8. *Ossigeno*. — Inattivo, vedi idrogeno.

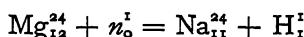
11. *Sodio*. — Questo elemento si attiva con un periodo di circa 40 secondi. Intensità dell'ordine di grandezza 0,1. Abbiamo tentato di separare chimicamente il principio attivo nell'ipotesi che fosse fluoro aggiungendo ad una soluzione di nitrato sodico irradiato acido fluoridrico e precipitando fluoruro cerico. Il precipitato esaminato 2 minuti dopo a fine dell'irradiamento

(*) Vedi le comunicazioni preliminari sulla «Ricerca Scientifica», **5** (1), pp. 283, 330, 452, 533, 650 (1934).

(1) E. FERMI, «Nuovo Cimento», **IX**, 429 (1934).

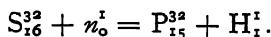
del nitrato sodico si è dimostrato inattivo, il che ci fa ritenere poco probabile che il principio attivo del sodio sia fluoro.

12. *Magnesio*. - Il magnesio ha due periodi; uno di circa 40 secondi ed uno di circa 15 ore. Intensità media. Dalla soluzione cloridrica del magnesio irradiato, previa aggiunta di alluminio e sodio, sono stati separati il magnesio e l'alluminio come fosfati. Essi sono inattivi. Nel filtrato contenente il sodio aggiunto si ritrova il principio attivo con periodo di 15 ore. La relazione nucleare è probabilmente la seguente:



e quindi dà luogo allo stesso Na^{24} radioattivo che si ottiene irradiando l'alluminio. Questa identificazione è confermata anche dalle misure di assorbimento dei raggi β (2).

16. *Zolfo*. - Ha un periodo di circa 13 giorni. Il principio attivo si può separare dall'acido solforico irradiato aggiungendo una traccia di fosfato sodico e separando il fosforo come fosfomolibdato ammonico. Riteniamo che si tratti di un P^{32} ottenuto dallo zolfo secondo la reazione nucleare seguente.



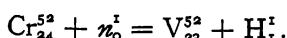
Esso si identifica col fosforo estratto dal cloro; questa identificazione, che non potrebbe farsi con grande sicurezza attraverso il confronto dei periodi di dimezzamento i quali sono noti con poca precisione, è invece confermata da misure di assorbimento dei raggi β discretamente esatte.

20. *Calcio*. - Non ha dato effetto sensibile.

22. *Titanio*. - Ha un debolissimo effetto con periodo di circa 3 minuti. Non riteniamo del tutto escluso che possa essere dovuto a impurità.

23. *Vanadio*. - Ha un periodo di 4 minuti, intensità media. La coincidenza del periodo, entro gli errori di osservazione, fa pensare che il principio attivo sia lo stesso V^{52} che sembra formarsi dal cromo e dal manganese.

24. *Cromo*. - Ha un effetto intenso con periodo di circa 4 minuti. Per identificarne il principio attivo abbiamo irradiato del cromato ammonico, aggiunto vanadato sodico e separato il vanadio per aggiunta di cloruro ammonico. L'attività è stata ritrovata nel vanadio. Abbiamo anche aggiunto titanio, in presenza di vanadio, e separato il titanio per idrolisi; l'attività sembra non segua il titanio. Pertanto riteniamo probabile che il principio attivo sia V^{52} formatosi secondo la reazione

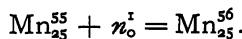


25. *Manganese*. - Questo elemento irradiato sotto forma di biossido si attiva con media intensità e due periodi: uno di circa 4 minuti l'altro di circa 150 minuti. L'attività con periodo lungo non si separa dal manganese aggiungendo cromo e vanadio e precipitandoli come cromato e vanadato di piombo. È da ritenersi perciò probabile che il principio attivo sia Mn^{56} . Ciò è convalidato dall'identità del periodo lungo del manganese con quelli del

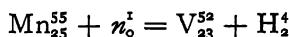
(2) E. AMALDI ed E. SEGRÈ, «Nuovo Cimento», **xx**, 452 (1934).

ferro e cobalto irradiati, da cui si estrae un manganese attivo, e da misure di assorbimento.

La reazione nucleare sembra dunque essere:



Per studiare l'attività con periodo di 4 minuti abbiamo irradiato nitrato di manganese, aggiunto un sale di vanadio e separato il vanadio come vanadato di piombo. L'attività è stata ritrovata nel precipitato di vanadato. Una reazione analoga eseguita col cromo ha pure trascinato un po' dell'attività ma con rendimento molto minore. Riteniamo perciò probabile che il principio attivo del periodo breve sia V^{52} formato secondo le reazioni



e quindi identico al vanadio radioattivo che si ottiene per irradiazione del cromo e del vanadio. I rapporti genetici tra ferro, cobalto, manganese e vanadio sono schematicamente illustrati nella Fig. 1.

28. *Nichel*. - Irradiato 13 ore con sorgente di 250 mC non ha dato effetto misurabile.

29. *Rame*. - Ha un periodo di circa 6 minuti e intensità media. La coincidenza del periodo con quello dello zinco fa ritenere possibile che il principio attivo sia un isotopo del rame.

30. *Zinco*. - Ha un periodo di 6 minuti con piccola intensità e uno assai più lungo debolissimo. L'attività del periodo breve è stata separata col rame in presenza di nichel sia facendo precipitare solfuro rameoso che facendo depositare elettrochimicamente il rame su zinco inattivo. Il nichel è stato precipitato con dimetilgliossima e trovato inattivo. Anche lo zinco, dopo estratto il rame, è inattivo. Riteniamo dunque probabile che l'attività con periodo di 6 minuti provenga da un isotopo del rame.

31. *Gallio*. - Ha un effetto abbastanza intenso con un periodo di mezz'ora.

33. *Arsenico*. - Ha un effetto intenso con un periodo di circa un giorno. Si è cercato di separare il principio attivo insieme a gallio e germanio, precipitando il primo come ferrocianuro il secondo come solfuro. Per il germanio si è anche fatta una distillazione di cloruro germanico. L'attività è però sempre rimasta nell'arsenico. Riteniamo escluso che si tratti di gallio, mentre la prova per il germanio non può considerarsi definitiva. La reazione nucleare più plausibile ci sembra comunque:



34. *Selenio*. - Ha un debole effetto con periodo di circa 35 minuti.

35. *Bromo*. - Ha un effetto intenso con due periodi uno di circa 30 minuti e l'altro di circa sei ore. Il principio attivo di ambedue i periodi non si lascia separare né coll'arsenico né col selenio. Il primo è stato separato come solfuro ed il secondo elettrochimicamente. Precipitando bromuro di argento da una soluzione di bromuro ammonico irradiato si trova l'attività nel precipitato. Riteniamo che l'attività derivi da Br^{80} e Br^{82} .

37. *Rubidio*. - Ha un effetto molto debole con periodo di circa 20 minuti.

38. *Stronzio*. - Irradiato allo stato di idrato per 13 ore con sorgente di 400 mC non ha dato effetto apprezzabile.

39. *Ittrio*. - Irradiato allo stato di ossido per 30 minuti con sorgente di 750 mC è risultato inattivo.

40. *Zirconio*. - Ha un debolissimo effetto con periodo di qualche minuto. Non escludiamo che possa trattarsi di impurità.

42. *Molibdeno*. - Ha due periodi con debole intensità. Uno di circa 15 minuti e l'altro di giorni.

4. *Rutenio*. - Irradiato 40 minuti con 750 mC non ha dato effetto.

45. *Rodio*. - Il rodio è stato irradiato in lamina metallica. Ha due periodi il primo di circa 50 secondi, il secondo di 5 minuti. L'attività del periodo breve è intensa; l'altra media.

46. *Palladio*. - Si attiva con media intensità. Sembra che abbia un periodo intorno a 6 ore e forse anche uno più breve.

48. *Cadmio*. - Abbiamo irradiato del cadmio metallico; esso si attiva debolmente con periodo di circa 70 minuti.

50. *Stagno*. - Ha mostrato una traccia di attività di cui non abbiamo potuto misurare il periodo. Forse è dovuta ad impurità.

51. *Antimonio*. - Come l'elemento precedente.

52. *Tellurio*. - Ha una debole attività che decade con un periodo dell'ordine di grandezza di mezz'ora.

55. *Cesio*. - Ha un debolissimo effetto con periodo non ancora determinato.

56. *Bario*. - Abbiamo irradiato idrato di bario. Esso ha una debole attività che decade con un periodo di 3 minuti.

57. *Lantanio*. - Nonabbiamo potuto rilevarne un'attività.

58. *Cerio*. - Nitrato di cerio irradiato per 30 minuti con 400 mC non ha dato effetto misurabile.

59. *Praseodimio*. - Abbiamo irradiato ossido purissimo generosamente donatoci dal prof. Rolla insieme a ossidi di Nd, Sm, La, Gd, per il che teniamo ringraziarlo anche qui. Il praseodimio ha una debole attività con periodo di circa 5 minuti e forse anche un periodo più lungo.

60. *Neodimio*. - Abbiamo irradiato l'ossido; ha un debole effetto con un periodo di circa un'ora.

62. *Samario*. - Abbiamo irradiato l'ossido. Ha una debole attività con un periodo di circa 40 minuti.

73. *Tantalo*. - Irradiato due ore e mezzo con 750 mC non ha dato effetto misurabile.

74. *Tungsteno*, - Irradiato 12 ore con sorgente di 650 mC ha mostrato una debolissima attività, di periodo probabilmente piuttosto lungo.

75. *Renio*. - Irradiato 10 minuti con sorgente di 750 mC non ha mostrato effetto.

76. *Osmio*. - Irradiato 15 ore con 450 mC non dà effetto.

77. *Iridio*. - Irradiato in lamina ha un effetto intenso con periodo di 20 ore. Osmio e renio aggiunti ad una soluzione di cloruro di iridio irradiato e poi separati, il primo per distillazione del tetrossido, il secondo come

solfuro, sono stati trovati inattivi. L'iridio invece rimane attivo facendo supporre che l'attività sia dovuta a un isotopo di questo elemento.

78. *Platino*. - Platino metallico fisicamente puro di Heraeus ha mostrato una traccia di attività.

79. *Oro*. - Abbiamo irradiato oro in lamina; esso ha un periodo di circa 2 giorni e una discreta attività. Sciolto l'oro irradiato in acqua regia, con platino e iridio, abbiamo precipitato questi ultimi due elementi come cloroplatinati e cloroiridiati. Essi erano inattivi. L'oro invece era rimasto attivo e conservava questa attività anche dopo sciolto in mercurio ed evaporato quest'ultimo. Reputiamo che l'attività sia dovuta ad un isotopo dell'oro.

80. *Mercurio*. - Ha un effetto debolissimo forse dovuto ad impurità.

81. *Tallio*. - Come l'elemento precedente.

82. *Piombo*. - Irradiato per una diecina di ore con sorgente su i 500 mC non mostra attività.

83. *Bismuto*. - Come l'elemento precedente.

90. *Torio*. - Da saggi preliminari sul torio liberato dai suoi prodotti radioattivi β risulta una forte attività con almeno due periodi di cui uno più breve di un minuto e l'altro dell'ordine di grandezza di un quarto d'ora.

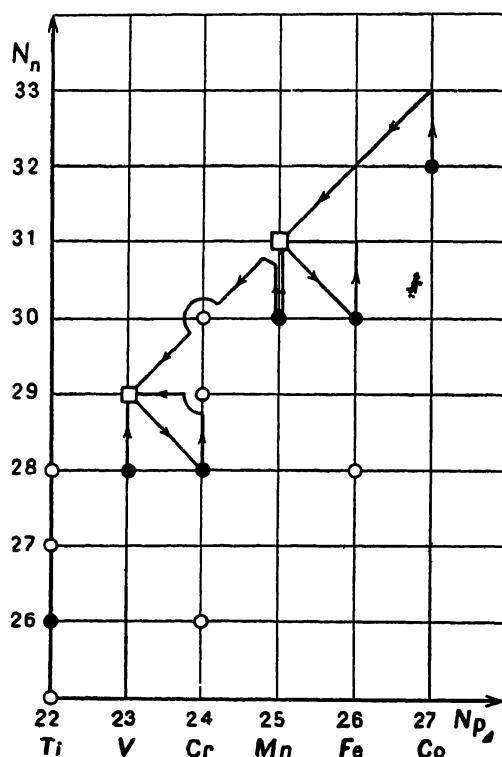


Fig. 1. - In questa figura sono illustrate le trasformazioni degli elementi con Z compreso tra 23 e 27. Le ascisse danno il numero di protoni e le ordinate quello dei neutroni dei nuclei. Gli isotopi stabili sono rappresentati da circoletti pieni se l'isotopo costituisce più del 20 % dell'elemento, vuoti altrimenti. I quadratini denotano gli isotopi radioattivi e le linee con le frecce indicano le successive trasformazioni.

92. *Uranio.* - Questo elemento dà luogo a fenomeni più complessi dei precedenti e ha formato oggetto di una Nota a parte⁽³⁾.

RIASSUNTO DEI RISULTATI ESPOSTI IN QUESTO E IN ALTRI LAVORI⁽⁴⁾.

I risultati sono ricapitolati nella seguente tabella.

La prima colonna dà il simbolo degli elementi studiati e il loro numero atomico. La seconda i pesi degli isotopi; sono scritti in grassetto gli isotopi che rappresentano più del 20% dell'elemento. La terza colonna dà i periodi di dimezzamento, un tratto indica che l'elemento è stato sperimentato e trovato inattivo. La quarta dà l'intensità dell'attivazione. Essa è indicata con tre lettere: *f* (forte), *m* (media), *d* (debole). Per una definizione più precisa della intensità vedi⁽⁵⁾. I dati di questa colonna e delle successive si riferiscono ordinatamente ai diversi periodi indicati nella terza colonna. La quinta colonna dà l'energia media degli elettroni in milioni di volt. Questi dati generalmente alquanto incerti sono dedotti da misure di assorbimento, qualche volta con forti estrapolazioni⁽⁶⁾. La sesta colonna indica se sono stati trovati raggi γ . Un tratto significa che sono stati cercati e non trovati. La settima colonna dà l'isotopo a cui è dovuta l'attività. Nei casi dubbi in cui non si sa se il neutrone sia stato assorbito od emesso si è sempre supposto che esso sia stato assorbito.

Numero Atomico ed Elemento	Isotopi	Periodi di dimezza- mento	Intensità	Energia media elet- troni in 10^6 e. volt	Raggi γ	Isotopo attivo
1 H	1, 2	—	—			
3 Li	6, 7	—	—			
4 Be	9	?	?			
5 B	10, 11	?	?			
6 C	12, 13	—	—			
7 N	14, 15	—	?			
8 O	16, 17, 18	—	—			
9 F	19	9^s	<i>f</i>	2	si	N^{16} (?)
11 Na	23	40^s	<i>m</i>			
12 Mg	24, 25, 26	40^s ; 15^h	<i>m; m</i>	—; 0,5	(?); si	—; Na^{24}
13 Al	27	12^m ; 15^h	<i>f; f</i>	0,6; 0,5	si; si	—; Na^{24}
14 Si	28, 29, 30	3^m	<i>f</i>	1,3	si	Al^{28}
15 P	31	3^m ; 3^h	<i>m; f</i>	—; 0,7	?	Si^{32}
16 S	32, 33, 34	13^d	<i>m</i>	0,8	—	P^{32}
17 Cl	35, 37	13^d	<i>m</i>	0,8	—	P^{32}
20 Ca	40, 42, 43, 44	—	—			
22 Ti	46, 47, 48, 49, 50	3^m	<i>d</i>			
23 V	51	4^m	<i>m</i>	1,3		V^{52} (?)
24 Cr	50, 52, 53, 54	4^m	<i>m</i>	1,3	si	V^{52}
25 Mn	55	4^m ; 150^m	<i>m; m</i>	—; 1,3		Mn^{52} ; Mn^{56}
26 Fe	54, 56	150^m	<i>m</i>	1,3	si	Mn^{56}
27 Co	59	150^m	<i>d</i>			Mn^{56}
28 Ni	58, 60, 61, 62	—	—			
29 Cu	63, 65	6^m	<i>m</i>			
30 Zn	64, 66, 67, 68, 70	6^m ; ?	<i>d; d</i>			
31 Ga	69, 71	30^m	<i>m</i>			
33 As	75	1^d	<i>f</i>	1,3	si	As^{76}
34 Se	74, 76, 77, 78, 80, 82	35^m	<i>d</i>			
35 Br	79, 81	30^m ; 6^h	<i>f; f</i>	—; 0,7 (?)	—	Br^{80} ; Br^{82}
37 Rb	85, 87	20^m	<i>d</i>			
38 Sr	86, 87, 88	—	—			
39 Y	89	—	—			

(3) E. FERMI, F. RASETTI, O. D'AGOSTINO, «Ricerca Scientifica», 5, (1), p. 533 (1934). Vedi anche «Nature», 133, 898 (1934).

(4) E. FERMI, loc. cit.; E. AMALDI ed E. SEGRÈ, loc. cit.

(5) E. FERMI, «Nuovo Cimento», loc. cit.

Numeri Atomici ed Elemento	Isotopi	Periodi di dimezzamento	Intensità	Energia media elettronica in 10^6 e. volt	Raggi γ	Isotopo attivo
40 Zr	90, 91, 92, 94, 96	?	d			
42 Mo	92, 94, 95, 96, 97, 98, 100	15 ^m ; (?)	d; d			
44 Ru	96, 98, 99, 100, 101, 102, 104	—	—			
45 Rh	—	50 ^s ; 5 ^m	f; m	—; 0,8	—	
46 Pd	—	6 ^b (?)	d	0,3	—	
47 Ag	107, 109	20 ^s ; 2 ^m	f; f	—; 0,7	—	
48 Cd	110, 111, 112, 113, 114, 116	70 ^m	d			
50 Sn	112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 124	—	—			
51 Sb	121, 123	?	?			
52 Te	122, 123, 124, 125, 126, (127), 128, 130	30 ^m (?)	d	0,7	—	I ^{ra8}
53 I	127	30 ^m	f (?)			
55 Cs	133	(?)	d			
56 Ba	135, 136, 137, 138	3 ^m	—			
57 La	139	—	—			
58 Ce	140, 142	—	—			
59 Pr	141	5 ^m	d			
60 Nd	142, 143, 144, 145, 146	1 ^h	d			
62 Sm	144, 147, 148, 149, 150, 152, 154	40 ^m	d			
73 Ta	181	—	—			
74 W	182, 183, 184, 186	(?)	d (?)			
75 Re	185, 187	—	—			
76 Os	186, 187, 188, 189, 190, 192	—	—			
77 Ir	—	20 ^h	f	I, I	si	Ir
78 Pt	—	(?)	d (?)			
79 Au	—	2 ^d	f	0,3	—	Au
80 Hg	196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204	(?)	(?)			
81 Tl	203, 205	(?)	(?)			
82 Pb	203, 204, 205, 206, 207, 208, 209	—	—			
83 Bi	209	—	—			
90 Th	232	1 ^m (?); 15 ^m ?	f; f			
92 U	238	15 ^s ; 40 ^s 13 ^m 100 ^m	f; f; f; f		si	(?)

(6) E. AMALDI ed E. SEGRÈ, «Nuovo Cimento», loc. cit.

(7) Vedi E. FERMI, F. RASETTI, O. D'AGOSTINO, «Ricerca Scientifica», loc. cit. «Nature», loc. cit.

98.

ARTIFICIAL RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT

E. FERMI, E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, F. RASETTI, and E. SEGRÈ

(Communicated by Lord Rutherford, O. M., F.R.S.—Received July 25, 1934)

« Proc. Roy. Soc. » (London) Series A, 146, 483–500 (1934).

I. — INTRODUCTION.

This paper aims at giving a fuller account of experiments made in the Physical Laboratory of the University of Rome, on new radio-elements produced by neutron bombardment. Preliminary results have already been announced in short communications⁽¹⁾.

Curie and Joliot⁽²⁾ first discovered that the product atom of an artificial disintegration need not always correspond to a stable isotope, but could also disintegrate with a relatively long mean life with emission of light particles. As bombarding particles they used α -particles from polonium, and found that the light particle emitted was generally a positron. Similar results were obtained on several elements by other experimenters using α -particles, and artificially accelerated protons and deutons⁽³⁾.

The use of charged particles for the bombardment, limits the possibility of an activation only to light elements. Indeed, only about ten elements up to the atomic number 15 could be activated by these methods.

It seemed therefore convenient to try the effect of a neutron bombardment, as these particles can reach the nucleus even of the heaviest elements. Available neutron sources are, of course, much less intense than α -particles or proton or deuton sources. But it was reasonable to assume that this factor would be partly compensated by the higher efficiency of neutrons in producing disintegrations. Indeed, experiment showed that more than forty elements out of about sixty investigated could be activated by this method.

(1) FERMI, « Ric. Scient. », vol. I, pp. 283, 330 (1934); AMALDI, D'AGOSTINO, FERMI, RASETTI and SEGRÈ, « Ric. Scient. », vol. I, pp. 452, 652, 21 (1934); FERMI, RASETTI and D'AGOSTINO « Ric. Scient. », vol. I, p. 533 (1934); FERMI, « Nature », vol. 133, pp. 757, 898 (1934). See also FERMI, « Nuovo Cim. », vol. II, p. 429 (1934); AMALDI, FERMI, RASETTI and SEGRÈ, « Nuovo Cim. », vol. II, p. 442 (1934); AMALDI and SEGRÈ, « Nuovo Cim. », vol. II, p. 452 (1934); D'AGOSTINO « Gazz. Chim. Ital. », in press (1934).

(2) « C. R. Acad. Sci. Paris », vol. 198, pp. 254, 561 (1934).

(3) FRISCH, « Nature », vol. 133, p. 721 (1934); WERTENSTEIN, « Nature », vol. 133, p. 564 (1934), COCKCROFT, GILBERT and WALTON, « Nature », vol. 133, p. 328 (1934), NEDDERMEYER and ANDERSON, « Phys. Rev. », vol. 45, p. 498 (1934); LAURITSEN, CRANE and HARPER, « Science », vol. 79, p. 234 (1934).

2. - THE EXPERIMENTAL METHOD.

The neutron source consisted of a sealed glass tube about 6 mm in diameter and 15 mm in length, containing beryllium powder and radon in amounts up to 800 millicuries. According to the ordinarily assumed yield of neutrons from beryllium, the number of neutrons emitted by this source ought to be of the order of 1000 neutrons per second per millicurie. These neutrons are distributed over a very wide range of energies from zero up to 7 or 8 million volts, besides a very small percentage having energies about twice as high as this limit.

The neutrons are mixed with a very intensive γ -radiation. This does not, however, produce any inconvenience, as the induced activity is tested after irradiation, and it was shown that radon without beryllium produced no effect. The neutrons from beryllium are accompanied by a γ -radiation harder than any emitted by the radon products (5 to 6 million volts—about one γ -quantum per neutron). It seems, however, most unlikely that the observed effects are in any way connected with this γ -radiation, as a γ -radiation of enormously greater intensity and only slightly lower energy produces no effect.

The emission of electrons from the activated substances was tested with Geiger-Müller counters about 5 cm in length and 1.4 cm diameter. The walls of the counter were of thin aluminium foil, 0.1 to 0.2 mm in thickness. The applied voltage ranged between 1000 and 1500 volts. The amplified impulses were counted on a mechanical meter worked by a thyratron.

The substances to be investigated were generally put into form of cylinders, which could be fitted round the counter in order to minimize the loss in intensity through geometrical factors. During irradiation the material was located as close as possible round the source. Substances which had to be treated chemically after irradiation were often irradiated as concentrated water solutions in a test tube.

The decay curves of the induced activity were for many elements simple exponentials. Sometimes they could be analysed into two or more exponentials; it was then convenient to irradiate the substance for different lengths of time in order to activate the various components with different intensity. The existence of several mean lives is, sometimes, certainly due to different isotopic constituents of the element; when a single isotope is present it may be attributed to alternative processes of disintegration, and sometimes (uranium) to a chain of disintegrations. The intensity of activation varies within a wide range among the different elements. In some the effect is hardly measurable, the number of impulses produced by the irradiated substance being of the order of magnitude of the number of spontaneous impulses in the counter. In others the activation is so strong that when the substance is placed too near the counter the number of impulses is of the order of some thousands per minute, so that they cannot be counted because of lack of resolving power.

No accurate measurement of the intensity of activation of the different elements was carried out, as it would require experimenting in well-defined geometrical conditions, and a knowledge of the efficiency of our counters in counting electrons, and of the absorption in the substance and in the aluminium foil. However, a very rough evaluation of these factors was made, and for some elements a number expressing the intensity of activation (i) is given. This intensity is defined as the number of disintegrations per second which take place in 1 gm of the element, placed at the distance of 1 cm from a neutron source consisting of one millicurie of radon (in equilibrium with its decay products) and beryllium powder. The substance was always irradiated until saturation of the active product was reached. The efficiency of our counters (including absorption in the aluminium foil and geometrical factors) was about $1/20$, as determined by the measurement of the impulses from known quantities of potassium and uranium.

From this number expressing the intensity it is easy to obtain the cross-section for the activating neutron impact, if the number of neutron emitted per second by a one millicurie source is known. Assuming this number to be 1000, one finds immediately the cross-section

$$\sigma = 2 \cdot 10^{-26} i \cdot A,$$

A being the atomic weight of the element.

In order to be able to discuss the nuclear reaction giving rise to the active element, it is essential to identify it chemically. It is reasonable to assume that the atomic number of the active element should be close to the atomic number Z of the bombarded element. As the amount of the active substance is exceedingly small (in the most favourable cases about 10^9 atoms), there is no hope of separating it by ordinary methods. The irradiated substance was therefore dissolved, and small amounts of the inactive elements, which are suspected of being isotopic with the active product, were added. These added elements and the irradiated element were then chemically separated from each other, and separately tested for activity. It is generally found that the activity follows definitely one element. The active product can then be considered as identified with this element.

A preliminary investigation of the penetrating power of the β -rays of the new radio-elements has been carried out. For this purpose counters of the standard type were used, and the substance, instead of being put quite close to the counter, was shaped in the form of a cylinder of inner diameter somewhat larger than the diameter of the counter in order to allow cylindrical aluminium screens of different thicknesses to be interposed. In this way absorption curves of a more or less exponential type were obtained. As the geometrical conditions of this absorption measure are different from the standard ones, and moreover, the number of impulses instead of the total ionization is computed, we checked the method by measuring the absorption coefficients for known radioactive substances; as expected, we found a difference (about 20%). The data are corrected for this factor.

In several cases the absorption by 2 mm of lead was not complete; this was assumed as a proof of the existence of a γ -radiation.

It was very important to determine whether the emitted particles were positive or negative electrons. Owing to the weakness of the radiation it seemed convenient to use for this purpose Thibaud's⁽⁴⁾ method of the inhomogeneous magnetic field. Even by this intensive arrangement this investigation had to be limited to elements which could be strongly activated (Al, Si, P, S, Cr, As, Br, Rh, Ag, I, Ir, U). In every case only negative electrons were observed. This, however, does not exclude that a small percentage (up to about 15 %) of the emitted particles might be positrons.

For a few very strongly activated elements the emitted electrons could be also photographed in a Wilson chamber.

3. - EXPERIMENTAL RESULTS.

The elements investigated are here arranged in order of atomic number; a summary of the results to be found in a table at the end of the paper.

1. *Hydrogen*. - Shows no effect when water is irradiated 14 hours with a 670-millicuries source.

3. *Lithium*. - The hydroxide irradiated 14 hours with 750 millicuries is inactive.

4. *Beryllium*. - Shows an extremely weak activity which might well be due to impurities.

5. *Boron*. - Same as beryllium.

6. *Carbon*. - Paraffin irradiated 15 hours with 220 millicuries is inactive.

7. *Nitrogen*. - Guanidine carbonate (about 35 % N) irradiated 14 hours with 500 millicuries is inactive.

8. *Oxygen*. - No activity: see hydrogen.

9. *Fluorine*. - This element irradiated as calcium fluoride can be strongly activated ($i = 0.7$). As calcium proves to be inactive, the effect is due to fluorine. The activity decreases with a very short half period, about 9 seconds. No chemical separation was possible in this case. However, as it is known that fluorine disintegrates under neutron bombardment with emission of an α -particle, the active nucleus is probably N^{16} . This unstable isotope goes over to stable O^{16} with emission of an electron. The remarkable stability of the latter nucleus agrees with the observed very high energy of the β -rays; the intensity reduces to half value in 0.24 gm/cm² Al. This and all the following absorption data are given for aluminium.

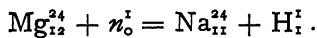
11. *Sodium*. - This element has been irradiated as carbonate. Sodium shows fairly strong activation, decreasing with a period of about 40 seconds.

12. *Magnesium*. - This element can be fairly strongly activated, and the decay curves show the existence of two periods, of about 40 seconds and 15 hours. Half-value thickness for the long period 0.06 gm/cm².

The active element decaying with the 15 hours' period could be chemically separated. The irradiated magnesium was dissolved, and a sodium salt was added. The magnesium was then precipitated as phosphate and found

(4) «C. R. Acad. Sci. Paris», vol. 197, p. 447 (1933).

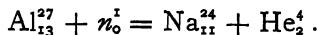
to be inactive, while the sodium which remains in the solution carries the activity. The active atom is thus proved not to be an isotope of magnesium, and as neon also can be excluded, we assume it to be an isotope of sodium, formed according to the reaction:



13. *Aluminium*. - This element acquires a strong activity under neutron bombardment. The decay curves indicate two periods of about 12 minutes ($\tau = 0.8$) and 15 hours ($\tau = 0.5$). Half-value thickness respectively, 0.07 and 0.06 gm/cm².

The long-period activity could be chemically separated by dissolving the irradiated aluminium and adding to it small quantities of sodium and magnesium. Aluminium and magnesium are then precipitated as hydroxides and phosphates, and are found to be inactive. The solution containing sodium is then dried up, and shows an activity decaying with the 15 hours' period.

The active element is probably the same as in the former case of magnesium, as the identity of the periods and of the half-value thickness suggests. In the present case the nuclear reaction is

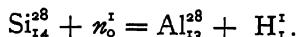


This active isotope Na²⁴ then goes over to the stable isotope Mg²⁴ with emission of an electron.

The active product with the 12-minute period has not been separated. However, we consider it likely to be Mg²⁷, as the other two possible cases, Al²⁸ and Al²⁶, are probably to be excluded, the first because Al²⁸, as we shall next see, is a radioactive isotope with a period of 3 minutes, and the latter because Al²⁶ should probably disintegrate with emission of positrons.

14. *Silicon*. - Silicon is also strongly active ($\tau = 0.7$), and has a period probably somewhat shorter than 3 minutes. Half-value absorption thickness of the β -rays, 0.16 gm/cm².

The chemical separation of the active element has been performed by evaporating irradiated silica with hydrofluoric and sulphuric acids, after addition of aluminium and magnesium. Silicon is eliminated as fluoride, and aluminium precipitated from the residue is found to contain the activity. The active product is therefore probably an isotope of aluminium, and the nuclear reaction is



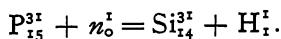
This is in accordance with the hypothesis of Curie, Joliot and Preiswerk (5) about the identity of this active isotope with the one which is formed by the impact of α -particles on Mg²⁵, and which has actually the same period.

15. *Phosphorus*. - This element shows a strong activity ($\tau = 0.6$) decaying with a period of about 3 hours, and also an activity ten times less intense with a period of 3 minutes, first noticed by Curie, Joliot and Preiswerk. The half-value thickness for the β -rays of the 3 hours' product is 0.09 gm/cm².

(5) «C. R. Acad. Sci. Paris», vol. 198, p. 2089 (1934).

The 3 hours' active product could be chemically separated. For this purpose phosphorus was irradiated as a concentrated solution of phosphoric acid. This solution was afterwards diluted with water, adding sulphuric acid and a small amount of sodium silicate. The substance is dried up to render silica insoluble, and then dissolved in water and filtered. The activity is found with the silica.

The nuclear reaction is then probably

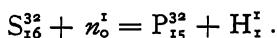


The 3 minutes' active product has not been chemically separated. The identity of period suggests that it might be the same Al^{28} obtained from silicon.

16. *Sulphur*. - Sulphur shows a fairly strong activity, decaying with a period of about 13 days (rather inaccurately measured). Half-value absorption thickness of the β -rays 0.10 gm/cm².

A chemical separation of the active product was carried out as follows: irradiated sulphuric acid was diluted, a trace of sodium phosphate added, and phosphorus precipitated as phosphomolybdate by addition of ammonium molybdate. The activity was found in the precipitate.

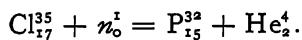
We think, in consequence, that the nuclear reaction is



This active P^{32} is transformed by emission of an electron into the stable isotope S^{32} .

17. *Chlorine*. - Half-period and penetration of the β -rays of this element are about the same as for sulphur. Intensity, $i = 0.1$. The active substance was separated with a method quite similar to that used for sulphur. Irradiated ammonium chloride was dissolved in diluted nitric acid, and then phosphorus added and separated as in the former case. This element carried the activity as before.

The nuclear reaction which gives rise to the same active phosphorus as obtained from sulphur is



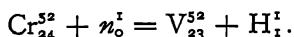
20. *Calcium*. - No activity could be detected.

22. *Titanium*. - A very weak effect, with a period of a few minutes, could be observed. However, it cannot be excluded that it might be due to impurities.

23. *Vanadium*. - This element shows a medium activity. The half-period is about 4 minutes, and coincides within experimental error with those observed in chromium and manganese, which are due to isotopes of vanadium. This suggests the hypothesis that the active element might be V^{32} . The half-value thickness is also the same as for chromium, 0.16 gm/cm².

24. *Chromium*. - Metallic chromium becomes fairly strongly active under neutron irradiation. The half-period, is, as in the former case, about 4 minutes. Half-value absorption thickness, 0.16 gm/cm².

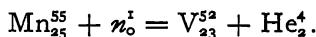
In order to identify the active element, we proceeded as follows: to irradiated ammonium chromate some sodium vanadate was added, and vanadium precipitated by addition of ammonium chloride. The activity being found in the precipitate, it is certainly not due to an isotope of chromium. To see whether it was an isotope of titanium, a titanium salt was added besides vanadium to the irradiated chromium compound, and titanium precipitated by hydrolysis. The precipitate showed no activity. In consequence, we consider the active substance to be probably the same isotope V^{52} as before, formed according to the nuclear reaction



25. *Manganese.* - We irradiated manganese dioxide and found a fairly intense activity decaying with two periods: about four minutes and two and a half hours. Half-value absorption thickness for the electrons of the 2.5 hours' product, 0.16 gm/cm².

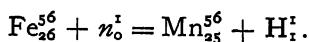
The activity with the long period cannot be separated from manganese by adding chromium and vanadium and precipitating them respectively as chromate and vanadate of lead. It is therefore probably due to an isotope of manganese, Mn^{56} , the same which is extracted from irradiated iron and cobalt, as the identity of the half-life periods suggests.

In order to identify the 4-minute active element, we irradiated manganese nitrate, added a vanadium compound and precipitated vanadium as vanadate of lead. The activity was carried down in the precipitate. A similar reaction was carried out with chromium and also in this case the precipitate was found to be active, but apparently with a definitely lower yield. The active principle is probably the isotope V^{52} , and the nuclear reaction is



The same active vanadium is thus probably obtained from chromium, vanadium and manganese, fig. 1.

26. *Iron.* - This element shows a fairly intense activity ($i = 0.05$), decaying with a period of 2.5 hours⁽⁶⁾. Half-value absorption thickness, 0.16 gm/cm². The active product can be separated as follows: the irradiated iron is dissolved in nitric acid, a small amount of a soluble manganese salt is added, and then the Mn is precipitated as MnO_2 by addition of sodium chlorate. The activity is found in the manganese precipitate. The active element is probably formed according to the reaction



and is the same as obtained from manganese.

27. *Cobalt.* - Cobalt can be activated, and the decay curves show the same half-period as iron. The active product can be chemically separated with manganese by the same method as that described for iron. This sug-

(6) See also FLEISCHMANN, «Naturw.», vol. 22, p. 434 (1934).

gests that it may be again the isotope Mn⁵⁶. In the present case the nuclear reaction would be

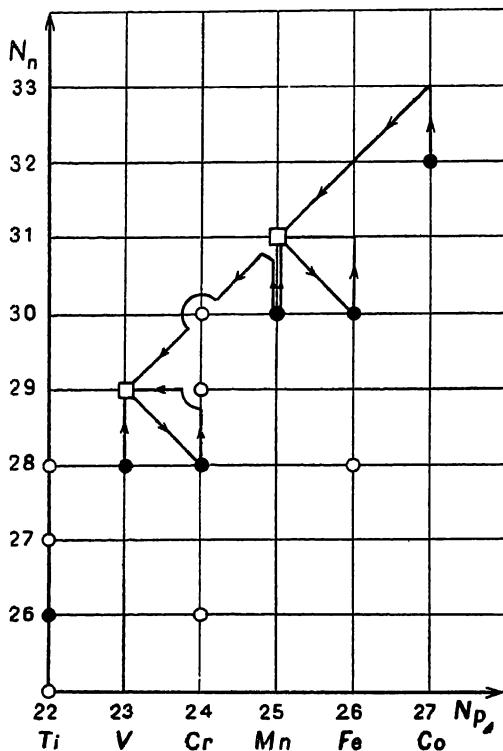
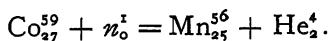


Fig. 1. - The figure shows a possible scheme of the transformations which take place in the elements of atomic number 23 to 27, plotted in a proton-neutron diagram. Stable isotopes are indicated by dots (●) when representing more than 20% of the element, otherwise by circles (○). Active isotopes are indicated by small squares (□). The arrows indicate the transformations.

The active isotope Mn⁵⁶ appears to originate from cobalt, iron and manganese (see fig. 1).

28. *Nickel.* - The metal, irradiated 13 hours with 250 millicuries, was found to be inactive.

29. *Copper.* - This element shows a medium activity, decaying with a period of about 6 minutes. We suggest as a possibility that the active nucleus might be the same as that which is produced from zinc, that is, an isotope of copper.

30. *Zinc.* - Shows a weak activity, whose decay curve is composed of two periods, one of about 6 minutes and the other much longer and not yet measured.

The active element with the 6-minute period has been chemically separated, dissolving the irradiated metal, adding copper and nickel, and then precipitating copper as sulphide, or depositing it electrochemically on a zinc plate. In both cases copper carries the activity. The added nickel, precip-

itated with dimethylglyoxime, was found to be inactive. The active element is thus probably an isotope of copper.

31. *Gallium*. - This element shows a moderately intense activity, decaying with a period of about 30 minutes.

33. *Arsenic*. - Has a strong effect, the activity decaying with a period of about one day. Half-value absorption thickness, 0.16 gm/cm². We have tried to separate the active substance by adding gallium and germanium and precipitating the former as ferrocyanide, the latter as sulphide after elimination of the arsenic. While the precipitation of the gallium appeared to be complete, in the case of germanium we are not sure that this element had been completely separated. In both cases the substance separated was found to be inactive, suggesting as probable that the activity belongs to an isotope of arsenic. However, as the reaction with germanium gave a somewhat uncertain result, we cannot give this conclusion as proved beyond doubt.

34. *Selenium*. - This element could be weakly activated. The half-period is about 35 minutes.

35. *Bromine*. - Ammonium bromide was found to be strongly activated by neutron irradiation. The decay curves show two periods, of about 30 minutes and 6 hours. In order to identify the active substance we added arsenic and selenium, and separated the former as sulphide, the latter electro-chemically. Both were found to be inactive. The active elements seem thus to be isotopes of bromine. As a control we added arsenic and selenium and precipitated bromine as silver bromide, and found that the precipitate carried down the activity. We suggest that the two periods may be due to two active isotopes, Br⁸⁰ and Br⁸², formed from the two ordinary isotopes, Br⁷⁹ and Br⁸¹.

37. *Rubidium*. - Rubidium nitrate showed a very weak activity, decaying with a period of about 20 minutes.

38. *Strontium*. - This element irradiated 13 hours with 400 mC was found inactive.

39. *Yttrium*. - This element irradiated 30 minutes with 750 mC was found inactive.

40. *Zirconium*. - Zirconium oxide showed an extremely weak activity with a period of a few minutes. It is possibly due to impurities.

42. *Molybdenum*. - This element shows a very weak activity. The decay curves indicate at least two periods, one of about 15 minutes and one longer than a day.

44. *Ruthenium*. - This element irradiated 40 minutes with 750 mC was found inactive.

45. *Rhodium*. - Metallic rhodium could be strongly activated, and the decay curves found are consistent with the existence of two periods, one of about 50 seconds and the other of 5 minutes. Most of the activity belongs to the shorter period. Half-value thickness for the electrons of the 5 minutes' active product, 0.10 gm/cm².

46. *Palladium*. - This element becomes moderately active under neutron bombardment. The decay curves are not very accurate, but indicate a period of the order of six hours. Half-value thickness, 0.03 gm/cm².

47. *Silver.* - A strongly active element. The decay curves show a period of about 20 seconds and one of about 2 minutes (intensity of the latter, $i = 0.5$; half-value thickness, 0.08 gm./cm^2).

48. *Cadmium.* - Metallic cadmium could be only weakly activated. The decay curves indicate a period slightly longer than one hour.

50. *Tin.* - This metal showed an extremely weak activity, perhaps due to impurities.

51. *Antimony.* - The same as tin.

52. *Tellurium.* - Shows a weak activity decaying with a period of about half an hour.

53. *Iodine.* - We irradiated both the element and ammonium iodide. Both showed a strong activity, decaying with a period of 30 minutes. Intensity, $i = 0.4$. Half-value thickness, 0.09 gm/cm^2 . The active element follows the iodine when this substance is precipitated by adding nitric acid to the solution of the irradiated ammonium iodide, to which tellurium and antimonium had been added. It also follows the same element when precipitated as silver iodide in presence of tellurium and antimonium. It is very likely that we have here the formation of an active isotope of iodine.

55. *Cæsium.* - Cæsium (tartrate) showed a very weak activity, whose period has not yet been measured with any accuracy.

56. *Barium.* - We irradiated the hydroxide and found it weakly active. The curves indicate a period of about 3 minutes.

57. *Lanthanum.* - This element irradiated 40 minutes with 400 mC was found inactive.

58. *Cerium.* - This element irradiated 30 minutes with 400 mC was found inactive.

59. *Praseodymium.* - This element, as well as the other rare earths—Nd, Sm, and Pr—were kindly given to us by Professor Rolla, of the University of Florence. They are very pure, and in the form of oxides.

Praseodymium shows a rather weak activity. The decay curves indicate a period of about 5 minutes, and perhaps a longer one.

60. *Neodymium.* - Shows a rather weak activity. Period about one hour.

62. *Samarium.* - Also has a rather weak activity. Period about 40 minutes.

73. *Tantalum.* - This element irradiated 2.5 hours with 750 mC was found inactive.

74. *Tungsten.* - This element shows an extremely weak activity of probably long period. This might possibly be due to impurities.

75. *Rhenium.* - This element irradiated 10 minutes with 750 mC was found inactive.

76. *Osmium.* - This element irradiated 15 hours with 450 mC was found inactive.

77. *Iridium.* - This element has a strong activity, decaying with a period of about 20 hours. Half-value thickness, 0.13 gm/cm^2 .

In order to establish the chemical nature of the activity, we irradiated the tetrachloride, added osmium and rhenium, and separated the former by

distillation of the tetroxide, and the latter as sulphide. Both were found to be inactive. Iridium still contained the activity, which appears to be due to an isotope of this element.

78. *Platinum*. - Pure platinum from Heræus showed an extremely weak activity of short period.

79. *Gold*. - We irradiated the metal, which showed a fairly intense activity. The period is about two days. Half-value thickness 0.33 gm/cm².

We tried to separate the active substance by dissolving the irradiated gold foil in aqua regia, adding platinum and iridium, and precipitating these elements as respectively chloroplatinates and chloroiridiates. Both were found to be inactive, while the activity was still found in gold, thus indicating an isotope of this element as the active nucleus. The activity remains with gold also when mercury is added and evaporated.

80. *Mercury*. - This element, strongly irradiated, showed an extremely weak activity which might be due to impurities.

81. *Thallium*. - The same as mercury.

82. *Lead*. - This element irradiated 10 hours with 500 mC was found inactive.

83. *Bismuth*. - The same as lead.

90. *Thorium*. - This element has not been investigated sufficiently at present. Thorium nitrate, freed of its ordinary β -active decay products and irradiated, becomes strongly active. The decay curves indicate at least two periods, of less than 1 minute and about 15 minutes.

92. *Uranium*. - We give here only the main results on this element, as its behaviour has been discussed recently elsewhere⁽⁷⁾.

Besides the half-periods of 10 seconds, 40 seconds and 13 minutes, we have identified later one more of about 1.5 hours. The intensity of the activation is of the order of 0.5 for each of these lives. We have already discussed experiments which appear to prove that the 13 minutes' active product is not isotopic with any of the elements with atomic number from 86 to 92 (emanation, ekacæsium, radium, actinium, thorium, protactinium, uranium). These experiments have been repeated under different conditions, chiefly in order to obtain a negative proof of the identity of the 13-minute product with protactinium, this proof being the most difficult to establish on account of the short period of the available Pa isotope, UX₂. The manganese reaction which has already been described gives a yield of about 15% for the 13-minute product. Its yield for UX₂ depends widely upon the conditions of the reaction, and may be varied between 2% and 10%, account being taken of the natural decay of this substance. A more effective reaction for obtaining the 13-minute active product is the following: irradiated uranium nitrate is dissolved in diluted hydrochloric acid; some rhenium nitrate is added, and then rhenium is precipitated as sulphide by addition of sodium thiosulphate. This precipitate carries about 50% of the activity, and sometimes more. The percentage of UX₁ and of UX₂ found in the rhenium precipitate varies also with the conditions of the reaction (particularly with

(7) FERMI, « Nature », vol. 133, p. 898 (1934).

the acidity), but can be made very low, probably less than 1 %. It was actually possible to separate the 13-minute active product and to measure its period using uranium which had not been purified at all from UX. The 90-minute active product has apparently chemical properties very analogous to those of the 13-minute active product, as in every type of reaction they are always obtained in about the same percentage. These activities seem, therefore, both to be due to products with atomic number higher than 92, and possibly to isotopes of a same element.

4. - THEORETICAL DISCUSSION.

We want here to discuss, from the theoretical point of view, the processes that may take place under neutron bombardment. At the present state of the nuclear theory these considerations can have only a provisional character. We can resume the empirical results of the preceding sections in the following points.

a) A large percentage of elements of any atomic weight can be activated. From this point of view no special difference can be noticed between light and heavy elements.

b) The cross-sections for neutron impact for the elements which can be most intensely activated are of the order of the geometrical cross-section of the nucleus. This means that a large percentage of the neutrons which hit the nucleus produce an active atom.

c) The active product is sometimes an isotope of the original atom (atomic number Z); in other cases its atomic number is lower by one or two units. In this respect there appears to be a difference between light and heavy elements. For light elements the atomic number of the active products is usually lower than Z, while in the five cases investigated for heavy, non-spontaneously radioactive elements, the active product is always an isotope of the bombarded element.

d) The emitted electrons always have a negative charge, or at least no positrons could ever be detected.

There seems to be no special difficulty in explaining the general mechanism of the activation for light elements. This seems to consist usually in the capture of the impinging neutron, followed immediately by the expulsion of an α -particle or a proton. If the energy of the emitted α -particle or proton is of some million volts, it results from Gamow's theory that the time which is necessary to emit the particle is extremely short, and there is therefore a fairly high probability for the process to happen before the neutron has left the nucleus. After this process, which may last a time of the order of 10^{-20} seconds, the nucleus has been transformed into a new one having, on the average, an atomic weight higher than would belong to its nuclear charge, as the processes of absorbing a neutron and emitting an α -particle or a proton increase the neutron/proton ratio in the nucleus. This is probably the reason why an emission of negative electrons is always observed. The process of

the electron emission re-establishes the correct value for neutron/proton ratio, and corresponds to the formation of a stable isotope.

As the atomic weight of the bombarded element increases, the potential barrier around the nucleus becomes an increasingly strong obstacle to the emission of heavy, positively-charged particles; it is therefore easy to understand why processes with emission of protons and α -particles become very improbable.

The reactions whose theoretical interpretation seems to meet with difficulties are those, normally occurring among heavy elements, in which the activated atom is isotopic with the original atom. The simplest hypothesis would be to assume a capture of the impinging neutron, giving rise to an unstable isotope of the bombarded element with an atomic weight higher by one unit than before the process. This hypothesis, which would be in agreement with the observed fact of the emission of negative electrons, gives rise, however, to serious theoretical difficulties when one tries to explain how a neutron can be captured by the nucleus in a stable or quasi-stable state. It is generally admitted that a neutron is attracted by a nucleus only when its distance from the centre of the nucleus is of the order of 10^{-12} cm. It follows that a neutron of a few million volts' energy can remain in the nucleus (*i.e.*, have a strong interaction with the constituent particles of the nucleus) only for a time of the order of 10^{-21} seconds; that is, of the classical time needed to cross the nucleus. The neutron is captured if, during this time, it is able to lose its excess energy (*e.g.*, by emission of a γ -quantum). If one evaluates the probability of this emission process by the ordinary methods one finds a value much too small to account for the observed cross-sections. In order to maintain the capture hypothesis, one must then either admit that the probability of emission of a γ -quantum (or of an equivalent process, as, for example, the formation of an electron-positron pair) should be much larger than is generally assumed; or that, for reasons that cannot be understood in the present theory, a nucleus could remain for at least 10^{-16} seconds in an energy state high enough to permit the emission of a neutron.

An alternative hypothesis is to admit that the impinging neutron is not captured, but causes the expulsion of another neutron from the nucleus. This process could be described as follows: the primary neutron loses part of its energy, bringing the nucleus into an excited state by a sort of inelastic impact. One can easily understand, theoretically, that these processes may take place in a large percentage of the collisions between nuclei and neutrons. If the excitation energy is large enough, a neutron can be emitted before the nucleus loses its energy by emission of a γ -quantum. The atom formed by such a process is an isotope of the original one, with atomic weight lower by one unit.

An objection which may be raised against this hypothesis is that if the number of neutrons decreases instead of increasing, it is, *a priori*, more likely that the atom, in the following disintegration, should emit a positron than a negative electron as observed. However, in the few cases investigated of heavy elements which are activated by neutron bombardment and are trans-

formed into their isotopes, when the isotopic constitution of the neighbouring elements is known, there always exists a stable isotope of the element $Z + 1$, having atomic weight one unit less than the original element, as a possible end-product of the transformation.

One has, moreover, to bear in mind that if an unstable nucleus has energetically the possibility of emitting both an electron and a positron the theory of the β -rays⁽⁸⁾ gives *ceteris paribus* the emission of an electron as the most probable.

In conclusion, the choice between these two alternatives seems at present rather uncertain, and further experiments must be performed to test this point.

The radon sources were supplied by Professor G. C. Trabacchi, Laboratorio Fisico della Sanità Pubblica, Rome, without whose kind help these researches would have been impossible. To him, therefore, our warmest thanks are due. A fund for this work was granted to us by the Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rome. Our thanks are due also to Professor N. Par travano and Professor L. Rolla, who have supplied us some rare chemicals.

(8) FERMI, «Z. Physik», vol. 88, p. 161 (1934).

5. - TABULAR SUMMARY.

The main result of this investigation are summarized in the table. Column 1 contains the atomic number and symbol of the elements investigated. Column 2 gives the isotopic constitution, numbers in bold type refer to isotopes which represent more than 20% of the element. Column 3 gives the observed half-periods, a heavy—means that the activity was sought for and not found. Column 4 gives a rough evaluation of the intensity *s* (strong), *m* (medium), *w* (weak). Column 5 gives the average energy of the electrons in million volts. This was obtained from the absorption measurement by a rather rough extrapolation based on the absorption coefficients of ordinary β -active substances without strong γ -rays (Ra E and UX₂). Column 6 shows whether γ -rays were observed or not; a line means that γ -rays have been sought for and not observed. Column 7 gives a probable active product. For simplicity we have always assumed that the neutron is captured; if, instead, a neutron was emitted, the corresponding atomic weights should be decreased by two units. When two or more periods are present, the data of columns 4, 5, 6 and 7 refer to the different periods in their order.

Atomic number	Isotopes	Half-period	Intensity	Mean energy of β -rays in 10^6 volts	γ -rays	Active isotope
1 H	1, 2	—	—			
3 Li	6, 7	—	—			
4 Be	9	?	?			
5 B	10, 11	?	?			
6 C	12, 13	—	—			
7 N	14, 15	—	—			
8 O	16, 17, 18	—	—			
9 F	19	9 s.	<i>s</i>	2	yes	N^{16} (?)
11 Na	23	40 s.	<i>m</i>			
12 Mg	24, 25, 26	40 s.; 15 h.	<i>m; m</i>	—; 0.5	?	yes
13 Al	27	12 m.; 15 h.	<i>s; s</i>	0.6; 0.5	yes; yes	—; Na^{24}
14 Si	28, 29, 30	3 m.	<i>s</i>	1.3	yes	Al^{28}
15 P	31	3 m.; 3 h.	<i>m; s</i>	—; 0.7	?	
16 S	32, 33, 34	13 d.	<i>m</i>	0.8	—	S^{32}
17 Cl	35, 37	13 d.	<i>m</i>	0.8		P^{32}
20 Ca	40, 42, 43, 44	—	—			
22 Ti	46, 47, 48, 49, 50	3 m.	<i>w</i>			
23 V	51	4 m.	<i>m</i>	1.3		V^{52} (?)
24 Cr	50, 52, 53, 54	4 m.	<i>m</i>	1.3	yes	V^{52}
25 Mn	55	4 m.; 150 m.	<i>m; m</i>	—; 1.3		$Mn^{52}; Mn^{56}$
26 Fe	54, 56	150 m.	<i>m</i>	1.3	yes	Mn^{56}
27 Co	59	150 m.	<i>w</i>			Mn^{56}
28 Ni	58, 60, 61, 62	—	—			
29 Cu	63, 65	6 m.	<i>m</i>			
30 Zn	64, 66, 67, 68, 70	6 m.; ?	<i>w; w</i>			Cu; —
31 Ga	69, 71	30 m.	<i>m</i>			
33 As	75	1 d.	<i>s</i>	1.3	yes	As^{76}
34 Se	74, 76, 77, 78, 80, 82	35 m.	<i>w</i>			
35 Br	79, 81	30 m.; 6 h.	<i>s; s</i>	—; 0.7 (?)	—	$Br^{80}; Br^{82}$
37 Rb	85, 87	20 m.	<i>w</i>			
38 Sr	86, 87, 88	—	—			
39 Y	89	—	—			
42 Zr	90, 91, 92, 94, 96	?	<i>w</i>			
42 Mo	92, 94, 95, 96, 97, 98, 100	15 m.; (?)	<i>w; w</i>			
44 Ru	96, 98, 99, 100, 101, 102, 104	—	—			
45 Rh	—	50 s.; 5 m.	<i>s; m</i>	0.8	—	
46 Pd	—	6 h. (?)	<i>w</i>	0.3	—	
47 Ag	107, 109	20 s.; 2 m.	<i>s; s</i>	—; 0.7	—	

Tabular Summary—(continued).

Atomic number	Isotopes	Half-period	Intensity	Mean energy of β -rays in 10^6 volts	γ -rays	Active isotope
48 Cd	110, 111, 112, 113, 114, 116	70 m.	w			
50 Sn	112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 124	—	—			
51 Sb	121, 123	?	?			
52 Te	122, 123, 124, 125, 126, (127), 128, 130	30 m. (?)	w			
53 I	127	30 m.	s w (?)	0.7	—	I ¹²⁸
55 Cs	133	(?)				
56 Ba	135, 136, 137, 138	3 m.	w			
57 La	139	—	—			
58 Ce	140, 142	—	—			
59 Pr	141	5 m.	w			
60 Nd	142, 143, 144, 145, 146	1 h.	w			
62 Sm	144, 147, 148, 149, 150, 152, 154	40 m.	w			
73 Ta	181	—	—			
74 W	182, 183, 184, 186	(?)	w (?)			
75 Re	185, 187	—	—			
76 Os	186, 187, 188, 189, 190, 192	—	—			
77 Ir	—	20 h.	s	1.1	yes	Ir
78 Pt	—	(?)	w (?)		—	Au
79 Au	—	2 d.	s	0.3	—	
80 Hg	196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204	(?)	(?)			
81 Tl	203, 205	(?)	(?)			
82 Pb	203, 204, 205, 206, 207, 208, 209	—	(?)			
83 Bi	209	—	—			
90 Th	232	1 m. (?) ; 15 m.	s; s			
92 U	238	15 s.; 40 s.; 13 m. 100 m.	s; s; s; s		yes	(*)

(*) See under "uranium" in section 3. of this paper.

99.

POSSIBLE PRODUCTION OF ELEMENTS
OF ATOMIC NUMBER HIGHER THAN 92

« Nature » (London), 133, 898-899 (1934).

Until recently it was generally admitted that an atom resulting from artificial disintegration should normally correspond to a stable isotope. M. and Mme. Joliot first found evidence that it is not necessarily so; in some cases the product atom may be radioactive with a measurable mean life, and go over to a stable form only after emission of a positron.

The number of elements which can be activated either by the impact of an α -particle (Joliot) or a proton (Cockcroft, Gilbert, Walton) or a deuton (Crane, Lauritsen, Henderson, Livingston, Lawrence) is necessarily limited by the fact that only light elements can be disintegrated, owing to the Coulomb repulsion.

This limitation is not effective in the case of neutron bombardment. The high efficiency of these particles in producing disintegrations compensates fairly for the weakness of available neutron sources as compared with α -particle or proton sources. As a matter of fact, it has been shown⁽¹⁾ that a large number of elements (47 out of 68 examined until now) of any atomic weight could be activated, using neutron sources consisting of a small glass tube filled with beryllium powder and radon up to 800 millicuries. This source gives a yield of about one million neutrons per second.

All the elements activated by this method with intensity large enough for a magnetic analysis of the sign of the charge of the emitted particles were found to give out only negative electrons. This is theoretically understandable, as the absorption of the bombarding neutron produces an excess in the number of neutrons present inside the nucleus; a stable state is therefore reached generally through transformation of a neutron into a proton, which is connected to the emission of a β -particle.

In several cases it was possible to carry out a chemical separation of the β -active element, following the usual technique of adding to the irradiated substance small amounts of the neighbouring elements. These elements are then separated by chemical analysis and separately checked for the β -activity with a Geiger-Müller counter. The activity always followed completely a certain element, with which the active element could thus be identified.

(1) E. FERMI, « Ricerca Scientifica », 5 (1), 283, 330 (1934), « Nature » 133, 757, May 19 (1934); E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ, « Ricerca Scientifica », 5 (1), 452 (1934).

In three cases (aluminium, chlorine, cobalt) the active element formed by bombarding the element of atomic number Z has atomic number $Z - 2$. In four cases (phosphorus, sulphur, iron, zinc) the atomic number of the active product is $Z - 1$. In two cases (bromine, iodine) the active element is an isotope of the bombarded element.

This evidence seems to show that three main processes are possible: (a) capture of a neutron with instantaneous emission of an α -particle; (b) capture of the neutron with emission of a proton; (c) capture of the neutron with emission of a γ -quantum, to get rid of the surplus energy. From a theoretical point of view, the probability of processes (a) and (b) depends very largely on the energy of the emitted α - or H-particle; the more so the higher the atomic weight of the element. The probability of process (c) can be evaluated only very roughly in the present state of nuclear theory; nevertheless, it would appear to be smaller than the observed value by a factor 100 or 1,000.

It seemed worth while to direct particular attention to the heavy radioactive elements thorium and uranium, as the general instability of nuclei in this range of atomic weight might give rise to successive transformations. For this reason an investigation of these elements was undertaken by the writer in collaboration with F. Rasetti and O. D'Agostino.

Experiment showed that both elements, previously freed of ordinary active impurities, can be strongly activated by neutron bombardment. The initial induced activity corresponded in our experiments to about 1,000 impulses per minute in a Geiger counter made of aluminium foil of 0.2 mm thickness. The curves of decay of these activities show that the phenomenon is rather complex. A rough survey of thorium activity showed in this element at least two periods.

Better investigated is the case of uranium; the existence of periods of about 10 sec, 40 sec, 13 min, plus at least two more periods from 40 minutes to one day is well established. The large uncertainty in the decay curves due to the statistical fluctuations makes it very difficult to establish whether these periods represent successive or alternative processes of disintegration.

Attempts have been made to identify chemically the β -active element with the period of 13 min. The general scheme of this research consisted in adding to the irradiated substance (uranium nitrate in concentrated solution, purified of its decay products) such an amount of an ordinary β -active element as to give some hundred impulses per minute on the counter. Should it be possible to prove that the induced activity, recognizable by its characteristic period, can be chemically separated from the added activity, it is reasonable to assume that the two activities are not due to isotopes.

The following reaction enables one to separate the 13 min-product from most of the heaviest elements. The irradiated uranium solution is diluted in 50 per cent nitric acid; a small amount of a manganese salt is added and then the manganese is precipitated as dioxide (MnO_2) from the boiling solution by addition of sodium chlorate. The manganese dioxide precipitate carries a large percentage of the activity.

This reaction proves at once that the 13 min-activity is not isotopic with uranium. For testing the possibility that it might be due to an element 90 (thorium) or 91 (protactinium), we repeated the reaction at least ten times, adding an amount of uranium $X_1 + X_2$ corresponding to about 2,000 impulses per minute; also some cerium and lanthanum were added in order to sustain uranium X . In these conditions the manganese reaction carried only the 13 min-activity; no trace of the 2,000 impulses of uranium X_1 , (period 24 days) was found in the precipitate; and none of uranium X_2 , although the operation had been performed in less than two minutes from the precipitation of the manganese dioxide, so that several hundreds of impulses of uranium X_2 (period 75 sec) would have been easily recognizable.

Similar evidence was obtained for excluding atomic numbers 88 (radium) and 89 (actinium). For this, mesothorium-1 and-2 were used, adding barium and lanthanum; the evidence was completely negative, as in the former case. The eventual precipitation of uranium- X_1 and mesothorium-1, which do not emit β -rays penetrating enough to be detectable in our counters, would have been revealed by the subsequent formation respectively of uranium- X_2 , and mesothorium-2.

Lastly, we added to the irradiated uranium solution some inactive lead and bismuth, and proved that the conditions of the manganese dioxide reaction could be regulated in such a way as to obtain the precipitation of manganese dioxide with the 13 min-activity, without carrying down lead and bismuth.

In this way it appears that we have excluded the possibility that the 13 min-activity is due to isotopes of uranium (92), protactinium (91), thorium (90), actinium (89), radium (88), bismuth (83), lead (82). Its behaviour excludes also ekacæsium (87) and emanation (86).

This negative evidence about the identity of the 13 min-activity from a large number of heavy elements suggests the possibility that the atomic number of the element may be greater than 92. If it were an element 93, it would be chemically homologous with manganese and rhenium. This hypothesis is supported to some extent also by the observed fact that the 13 min-activity is carried down by a precipitate of rhenium sulphide insoluble in hydrochloric acid. However, as several elements are easily precipitated in this form, this evidence cannot be considered as very strong.

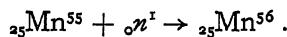
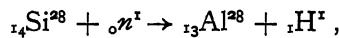
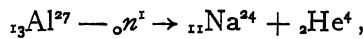
The possibility of an atomic number 94 or 95 is not easy to distinguish from the former, as the chemical properties are probably rather similar. Valuable information on the processes involved could be gathered by an investigation of the possible emission of heavy particles. A careful search for such heavy particles has not yet been carried out, as they require for their observation that the active product should be in the form of a very thin layer. It seems therefore at present premature to form any definite hypothesis on the chain of disintegrations involved.

100.

ARTIFICIAL RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT

« Nature » (London), 134, 668 (1934).

E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti and E. Segrè have recently published an account of their experiments on the artificial production of radioactive elements by bombarding various elements with neutrons (« Proc. Roy. Soc. », A, Sept.). Preliminary announcements have appeared in « Nature » and in Italian papers. The neutrons can enter the nuclei of even the heaviest elements, and more than forty elements have been activated. The activity decays with halving periods varying from a few minutes to some days. In all the cases where the activity was sufficiently strong to be tested by Thibaud's inhomogeneous magnetic deflection method, the particles emitted were found to be β -particles. In many cases the artificial radio-elements could be separated out by chemical precipitations after addition of an isotopic element, and the chemical nature of the radio-elements could therefore be securely placed. The nuclear reactions studied are of the following types:



102.

NATURAL BETA DECAY

« International Conference on Physics », London 1934, Vol. I, Nuclear Physics, 66-71
Physical Society (London).

DISCUSSION

Prof. E. FERMI. – In connexion with the theory of β -rays I should like to point out that there is apparently some disagreement between theory and experiment as to the drop in intensity of the continuous β spectrum for low energies.

I do not think that experimental results are completely definite on this point, as the small penetrating power of low energy electrons greatly increases the difficulties of investigating them; if however a disagreement should be established beyond doubt, it would still be possible to alter the particular form of interaction between protons and neutrons on one hand and electrons and neutrinos on the other, in order to reestablish the agreement. The form of this interaction that has been given in my theory of the β -rays was chosen only on account of its simplicity, but there is a large variety of other special forms for the interaction which might be tried if needed. This refers not only to the energy distribution in the continuous β -spectrum, but also to the selection rule of forbidden transitions, although the evidence which has been presented in Dr. Ellis' report seems to be definitely in favour of the selection rule in its present form.

I heartily agree with Dr. Gamow, that both his empirical evidence and the more general argument of symmetry strongly support the possibility of the existence of a negative proton. I should like nevertheless to point out some difficulties for his view-point, which are chiefly connected with the theoretical interpretation of the fact that the atomic weights are approximately equal to twice the atomic numbers. In Heisenberg's theory the interpretation of this fact is based on the simple assumption that the proton-neutron interaction is the main force in determining the nuclear binding, and is quite independent of more special assumptions on this interaction. If we now assume the existence inside the nucleus of a new kind of particle into which neutrons can transform with emission of a positive electron, it seems difficult to understand why the number of these negative protons always

remains very small and is not noticeable in the relation of atomic weight to atomic number.

I agree with Dr. Gamow that this difficulty is in no way a fundamental one, as one might assume that there are strong repulsive forces between protons of different signs, acting only at close distances; but if we assume these forces, it seems to me that they must be very delicately adjusted in order to prevent the formation of negative protons in considerable number, and yet to allow for their presence in nuclei of very different atomic weights, as beryllium and lead.

103.

ARTIFICIAL RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT

« International Conference on Physics », London 1934, Vol. I, Nuclear Physics, 75–77
Physical Society (London).

ABSTRACT. — The advantages of neutrons as bombarding particles are pointed out, and experiments are described in which radioactive elements are produced by this process. About 40 cases were found, out of 60 examined.

In general, the atomic number of the radioelement formed is either that of the parent element, or is less than this by either 1 or 2 units, the first case being commonest among the heavier elements.

It is assumed that the first stage is the capture of the neutron, and that this is followed by the ejection of a quantum of γ -radiation, a proton or an α -particle. The first stage presents no theoretical difficulty, but the subsequent ejection is not easy to understand. The theoretical difficulties presented here are briefly discussed.

After the discovery by Mons. and Mme Joliot that radioactive substances could be obtained by bombardment with α -particles, I undertook experiments in the Physical Institute of the University of Rome to investigate whether phenomena analogous to those observed by the Joliots could also be obtained as a result of neutron bombardment. Although the neutron sources which it is possible to employ are inferior to the sources of α -particles or of swift protons, yet right from the beginning we could expect a certain compensation owing to the fact that neutrons, being uncharged, are more efficient in producing artificial disintegrations than charged particles; in particular we could hope for results even in the case of heavy atoms which up to the present have been unaffected by bombardment with charged particles.

Experience has fully confirmed these expectations, neutron bombardment having given rise to the formation of radioactive products in about 40 cases (out of 60 elements studied up to the present). This high fraction of elements which can be activated is very roughly the same for light elements as for heavy ones.

Without describing in detail the results obtained to date, which have been published⁽¹⁾, I must give a little space to certain problems relating to the interpretation of the results themselves.

One of the points of greatest interest is that of ascertaining what is the nuclear reaction which gives rise to the formation of the radio-element ob-

(1) For a résumé of this work see FERMI, AMALDI, D'AGOSTINO, RASSETTI and SEGRÈ, « Proc. Roy. Soc. », A, 146, 483 (1934).

tained by bombarding a given element of atomic number Z with neutrons. An important factor in discussing this question is the chemical examination of the radioactive element, an examination which it has been possible to carry out in a fairly large number of cases. The result has been to show that the atomic number of the element formed may be (except for the case of uranium, where probably several successive transformations are involved) one of the following: $Z - 2$, $Z - 1$, Z .

The first two cases are common among the light elements, whilst for heavy elements only the last case has been encountered up to the present.

In interpreting these facts we may assume that the process of formation of radioelements consists in the absorption of neutrons by the bombarded nucleus, with the emission either of an α -particle (radio-element with atomic number $Z - 2$) or a proton (radio-element with atomic number $Z - 1$) or a quantum of γ -radiation, necessary because the neutron loses its initial energy (radio-element of atomic number Z). In the cases examined up to now, this hypothesis is compatible with the facts; in particular, if the atomic weight of the radioactive isotope which would be formed by the bombardment is calculated on this hypothesis, it never corresponds to that of a known stable isotope; further, whenever on the basis of these three possible processes, it is found that isotopic isobars should be obtained by bombardment of different elements, then they are actually found to have the same mean life, which confirms that the same radioactive element is in this case obtained in different ways.

Turning now to the consideration of these processes from the point of view of present theories of nuclear structure, it appears that there is no theoretical difficulty in understanding how it may happen that the neutron is captured in a large percentage of cases with the expulsion of an α -particle or a proton; remembering that these particles, in order to escape from the atom, must penetrate Gamow's potential barrier, it is found, in agreement with experiment, that the probability of processes of this kind decreases fairly rapidly with increasing atomic number of the bombarded element; in such a way that unless we accept rather unlikely values for the energy of the emitted α -particle or proton, the process would become practically impossible for the heavy elements. On the other hand, there are considerable theoretical difficulties in understanding the simple capture of the neutron, which would lead to the formation of a radio-element isotopic with the original element but with an atomic weight greater by unity. As a matter of fact, in this case the neutron at the moment of capture has an energy surplus equal to its kinetic energy, i.e. several millions of electron volts. In this condition, the neutron would escape from the nucleus in an extremely short time which, if we accept the usual views on nuclear structure, would be of the order of 10^{-20} 10^{-21} sec; to ensure the capture of the neutron a quantum of γ -radiation of sufficient frequency to carry off the excess energy of the neutron must be emitted in this short interval of time, so that the probability of simple capture of the neutron would equal the probability of emission of the quantum of γ -radiation in a time interval of the order mentioned. If we accept the usual data for the probability of emission of γ -radiation by an excited nucleus, the

calculated probability comes out much less than that observed. If we wish to retain the hypothesis of the possibility of this process of neutron capture, we must admit that for some reason which we do not know the neutron can remain in the excited nucleus for a much longer time than that quoted; or else the process of expelling the excess energy, either by the emission of a quantum of γ -radiation or by some other unknown process, can occur much more rapidly. In view of this position of the theory, the observations of Bjerge and Westcott on the activation of sodium, and those of Amaldi and Segrè on aluminium, are to be considered particularly important; they seem to prove that, at least in one of the processes of activation, a radioactive isotope of the same element is formed, having an atomic weight increased by one unit. Finally we must note that completely analogous difficulties of interpretation to those just discussed present themselves in the explanation of the synthesis of heavy hydrogen observed by Lea when hydrogen is bombarded with neutrons.

105 a.

AZIONE DI SOSTANZE IDROGENATE SULLA RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA NEUTRONI.—I.

E. FERMI, E. AMALDI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÈ

« Ric. Scientifica », 5 (2), 282-283 (1934).

Nel corso di esperienze sulla radioattività provocata nell'argento da bombardamento di neutroni si sono notate anomalie nella intensità della attivazione; uno spessore di alcuni centimetri di paraffina interposto fra la sorgente e l'argento invece di diminuire l'attivazione la aumenta. In seguito abbiamo potuto constatare che la presenza di grossi blocchi di paraffina circondanti la sorgente e l'oggetto irradiato esalta l'intensità della attivazione per un fattore che, a seconda delle condizioni geometriche, varia da alcune decine ad alcune centinaia.

In seguito a questa constatazione abbiamo cercato di riconoscere, in modo per ora sommario, le circostanze in cui si presenta questo fenomeno. I fatti che sono emersi fino ad ora sono i seguenti:

a) un preparato di radio senza berillio non produce effetto, ciò che induce ad attribuire i fenomeni ai neutroni e non ai raggi γ ;

b) un effetto approssimativamente della stessa intensità di quello ottenuto colla paraffina si ha coll'acqua. Riteniamo molto probabile che esso dipenda dalla presenza dell'idrogeno perché sostanze ossigenate prive di idrogeno (NaNO_3) non producono un aumento di attività, almeno nello stesso ordine di grandezza;

c) il fenomeno osservato nel caso dell'argento non si presenta in tutti gli elementi che si attivano con i neutroni. Abbiamo finora constatato che per il silicio, zinco e fosforo, non si ha un aumento apprezzabile di intensità, mentre il rame, l'argento e lo iodio danno luogo ad effetti enormemente maggiori di quelli che si avrebbero senza la presenza dell'acqua.

Da questi pochi casi sembra valga la regola che siano sensibili solo quegli elementi che per bombardamento danno luogo a sostanze radioattive isotope con l'elemento di partenza.

Notevole è il caso dell'alluminio, il quale si attiva nell'acqua con un periodo di poco inferiore a tre minuti che corrisponde a quello del Al^{28} estratto dal silicio irradiato. Questa attività, prodotta in condizioni normali, è così debole che quasi scompare di fronte alle altre dello stesso elemento.

Parimenti lo zinco ed il rame, che danno origine agli stessi prodotti attivi⁽¹⁾ isotopi del rame, in condizioni normali hanno attività dello stesso ordine di grandezza mentre nell'acqua il rame lascia a grande distanza lo zinco.

(1) T. BJERGE e C. H. WESTCOTT, « Nature », 134, 286 (1934).

Una possibile spiegazione di questi fatti sembra essere la seguente: i neutroni per urti multipli contro nuclei di idrogeno perdono rapidamente la propria energia. È plausibile che la sezione di urto neutrone-protone cresca al calare della energia e può quindi pensarsi che dopo alcuni urti i neutroni vengano a muoversi in modo analogo alle molecole diffondentesi in un gas, eventualmente riducendosi fino ad avere solo l'energia cinetica competente alla agitazione termica. Si formerebbe così intorno alla sorgente qualcosa di simile ad una soluzione di neutroni nell'acqua o nella paraffina. La concentrazione di questa soluzione in ogni punto dipenderebbe dalla intensità della sorgente, dalle condizioni geometriche della diffusione e da eventuali processi di cattura del neutrone da parte dell'idrogeno o di altri nuclei presenti.

Non è escluso che un simile punto di vista possa avere importanza nella spiegazione degli effetti osservati da Lea⁽²⁾.

Sono in corso indagini su tutto questo complesso di fenomeni.

Istituto Fisico della R. Università.

Roma, 22 ottobre 1934-XII.

(2) D. E. LEA, «Nature», 133, 24 (1934).

106 a.

EFFETTO DI SOSTANZE IDROGENATE SULLA RADIOATTIVITÀ PROVOCATA DA NEUTRONI. — II.

E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI

«Ric. Scientifica», 5 (2), 380—381 (1934).

In una precedente comunicazione abbiamo riferito sulla azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata da bombardamento di neutroni, accennando anche alla ipotesi che l'esaltazione dell'effetto fosse dovuta al rallentamento dei neutroni emessi dalla sorgente.

Abbiamo ora eseguito le seguenti esperienze:

1. — Osservato che l'attivazione diretta da parte di una sorgente di 350 mC di Em + Be posta a 20 cm di distanza da un cilindretto di argento è trascurabile, abbiamo immerso la sorgente al centro di un vaso cilindrico di acqua del diametro di 14 cm. Si nota allora che l'argento, nelle stesse condizioni geometriche si attiva fortemente dando, nei nostri contatori, un centinaio di impulsi al minuto, cioè circa quanti se ne otterrebbero ponendo il cilindretto a contatto della sorgente, senza acqua.

Nella ipotesi che l'azione delle sostanze idrogenate sia effettivamente dovuta alla diffusione e conseguente rallentamento dei neutroni, questa esperienza può interpretarsi al modo seguente: i neutroni, o almeno molti di essi, prima di uscire dal vaso di acqua, sono rallentati così che pur rimanendo costante, o se mai diminuito, il flusso dei neutroni uscenti, la loro velocità media è considerevolmente diminuita. La esperienza permette allora di confrontare l'azione dello stesso numero di neutroni con velocità differente e rivela la enorme efficacia di quelli lenti.

2. — Il fatto che i neutroni lenti siano così efficaci nell'attivare le sostanze, fa pensare che essi debbano anche essere molto assorbiti. Per verificare questo punto abbiamo fatto una seconda serie di esperienze: una lastrina di rodio in una cavità praticata in un blocco di paraffina viene attivata una volta senza schermi e una volta circondando il rodio con assorbitori di spessore fino a 0,5 cm; la ricerca è stata finora limitata solo a forti assorbimenti. È stato scelto come rivelatore dei neutroni lenti il rodio perché è attivissimo, così che si possono comodamente seguire i fenomeni all'elettroscopio anche usando una lamina di pochi cm². In ambiente idrogenato si attiva praticamente solo il periodo breve del rodio, che è di circa 44 secondi, ed ha dunque un valore comodo per le misure. Da tali esperienze è risultato che esistono enormi

disparità nel potere assorbente dei diversi elementi per i neutroni lenti; per citare alcuni estremi noteremo che l'attivazione vien ridotta a metà da uno strato di circa 4 milligrammi per centimetro quadrato di boro o da 15 milligrammi di ittrio: si hanno dunque poteri assorbenti paragonabili addirittura con quelli per le particelle α . Invece, per esempio, per produrre lo stesso assorbimento col piombo, occorrono spessori di parecchi centimetri. Questi risultati si possono indicare esprimendo il potere assorbente per mezzo di una sezione di urto per atomo. I valori che si trovano per tali sezioni di urto nel caso degli elementi che assorbono più intensamente sono dell'ordine di 10^{-21} cm², ossia un migliaio di volte maggiori delle sezioni geometriche dei nuclei. Le sezioni di urto più grandi finora trovate sono $3 \cdot 10^{-21}$ pel B, $7 \cdot 10^{-21}$ per l'Y, $0,8 \cdot 10^{-21}$ per l'Ir, $0,4 \cdot 10^{-21}$ pel Rh, $0,16 \cdot 10^{-21}$ pel Li. Sezioni di urto considerevoli si hanno anche pel Cl, Co, Ag. È in corso una ricerca sistematica su questo argomento, dato che simili sezioni di urto sono inusuali per assorbimenti nucleari.

Alcune delle sostanze con grandi sezioni di urto sono tra quelle che si attivano più energeticamente in ambiente idrogenato. Per queste, da un computo sommario del numero totale di attivazioni ottenibili all'esterno di un recipiente di acqua contenente la sorgente, risulta che, almeno come grossolana approssimazione, il numero di atomi attivati coincide con quello dei neutroni emessi. Invece per altre sostanze, per esempio il Li ed il B, al forte coefficiente di assorbimento non corrisponde una apprezzabile attivabilità. Ciò può interpretarsi o ammettendo che si formino in questi casi dei prodotti attivi che ci siano sfuggiti a causa del loro periodo (molto lungo o molto corto), o della scarsa penetranza dei loro raggi β ; ovvero, colla formazione per cattura del neutrone di isotopi stabili, per esempio trasformazione del Li⁶ in Li⁷ o del B¹⁰ in B¹¹.

Abbiamo anche ricercato con esito negativo se degli assorbimenti anomali si avessero nella attivazione diretta, senza l'uso di sostanze idrogenate. Ciò fa pensare che l'azione sia specifica per neutroni lenti.

Si è fatta infine una esperienza sulla attivazione del rodio tenuto ad una distanza fissa dalla sorgente, in un vaso contenente soluzioni di acido borico di concentrazione variabile. Come era da prevedere bastano concentrazioni assai piccole per ridurre grandemente l'attivazione. La presenza di boro elemento al 2% riduce l'attivazione a metà, nelle nostre condizioni geometriche (Rh a circa 3 cm dalla sorgente). Concentrazioni maggiori non producono una ulteriore riduzione nello stesso rapporto. Per esempio per concentrazione tripla l'assorbimento è circa del 70%.

105 b.

INFLUENCE OF HYDROGENOUS SUBSTANCES ON THE RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRONS.—I.

Translated from E. FERMI, E. AMALDI, B. PONTECORVO, F. RASETTI and E. SEGRÈ
«Ric. Scientifica», 5, (2) 282-283 (1934) (*)

In performing some experiments on the neutron-induced radioactivity of silver we noticed the following anomaly in the intensity of the activation: a layer of paraffin a few centimeters thick inserted between the neutron source and the silver increases the activity rather than diminishing it. Following this experiment we have ascertained that the presence of large paraffin blocks surrounding the neutron source and the target increases the activation intensity by a factor which according to the geometry used ranges from a few tens to a few hundreds.

Following these observations we tried to ascertain, for the time being only summarily, the circumstances under which this phenomenon occurs. The facts which have been ascertained up to now are the following:

a) a radium source, without beryllium, does not produce the effect: a circumstance which makes us attribute the effect to neutrons and not to gamma rays;

b) an effect of approximately the same intensity as with paraffin, is obtained with water. We deem it very probable that the effect depends on the presence of hydrogen because substances containing oxygen, but not hydrogen (NaNO_3) do not produce an increase of activity, at least of the same order of magnitude;

c) the effect observed in silver is not shown by all elements which can be activated by neutrons. We have observed, up to now, that silicon, zinc and phosphorus do not show an appreciable increase in activity, whereas copper, silver and iodine give rise to activities much larger than one would obtain without the presence of water.

From these few cases it seems that there is the rule that only those elements are sensitive to hydrogenous substances which under bombardment give rise to activities due to isotopes of the starting element.

The case of aluminum is noteworthy. In water it acquires an activity showing a period slightly shorter than 3 minutes, corresponding to that of Al^{28} which can be extracted from irradiated silicon. This activity under normal conditions is so weak that it almost disappears compared to other activities generated in the same element.

(*) Translation by E. Segrè.

Similarly zinc and copper, which give rise to the same active products ⁽¹⁾, isotopic with copper, under normal conditions acquire activities of the same order of magnitude, while in water copper shows a much larger effect than zinc.

A possible explanation of these facts seems to be the following: neutrons rapidly lose their energy by repeated collisions with hydrogen nuclei. It is plausible that the neutron-proton collision cross section increases for decreasing energy and one may expect that after some collisions the neutrons move in a manner similar to that of the molecules of a diffusing gas, eventually reaching the energy corresponding to thermal agitation. One would form in this way something similar to a solution of neutrons in water or paraffin, surrounding the neutron source. The concentration of this solution at each point depends on the intensity of the source, on the geometrical conditions of the diffusion process and on possible neutron-capture processes due to hydrogen or to other nuclei present.

It is not ruled out that this point of view may be important in explaining the effects observed by Lea ⁽²⁾.

The investigation of all these phenomena is being continued.

Istituto Fisico della R. Università.

Rome 22 October 1934-XII.

(1) T. BJERGE and C. H. WESTCOTT, «Nature», 134, 286 (1934).

(2) D. E. LEA «Nature», 133, 24 (1934).

106 b.

INFLUENCE OF HYDROGENOUS SUBSTANCES ON THE RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRONS.—II.

Translated from E. FERMI, B. PONTECORVO and F. RASETTI
«Ric. Scientifica», 5 (2), 380–381 (1934) (*)

In a preceding Letter we reported on the action of hydrogenous substances on the radioactivity produced by neutron bombardment, also mentioning the hypothesis that the increased effect might be due to slowing down of the neutrons emitted by the source.

We have now carried out the following experiments:

1.—Having observed that the direct activation of a small silver cylinder by a 350-mC Em + Be source placed at 20 cm distance is negligible, we immersed the source at the center of a water-filled cylindrical container of 14 cm diameter. One then observes that the silver, under the same geometrical conditions, becomes strongly active, yielding in our counters about one hundred counts per minute, roughly as many as would be recorded by placing the small cylinder in contact with the source in the absence of water.

On the hypothesis that the action of hydrogenous substances is actually due to diffusion and consequent slowing down of the neutrons, this experiment may be interpreted as follows: the neutrons, or at least a large fraction of them, before leaving the water container, are slowed down in such a way that, although the outgoing flux remains constant or possibly decreases, their average velocity is considerably lowered. The experiment then enables one to compare the effects of the same number of neutrons with different velocities and reveals the enormous effectiveness of the slower ones.

2.—The fact that slow neutrons appear so effective in activating various substances induces one to believe that they must also be strongly absorbed. To verify this point we performed a second series of experiments. A small rhodium plate, located in a cavity inside a paraffin block, is activated once without filters, and once surrounded by absorbers up to 0.5 cm in thickness. Up to now we have investigated only strong absorbers. Rhodium was chosen as a slow-neutron detector because of its very strong activity, such that the effects may be conveniently observed on an electroscope even using a rhodium plate of a few square centimeters surface. In a hydrogenous

(*) Translation by F. Rasetti.

medium practically only the short-lived activity of rhodium is excited. It has a 44 seconds half-life, a value convenient for the measurements. The result of these experiments was that there are enormous differences in the absorbing power of different elements for slow neutrons. To mention a few extreme cases, we note that the activity is halved by a boron layer of about 4 mg/cm² or an yttrium layer of 15 mg/cm². Hence one has absorbing powers even comparable with those for alpha-particles. Instead, in order to produce the same absorption in lead, thicknesses of the order of several centimeters are required. These results may be described by expressing the absorbing power through an atomic cross section. The values of the cross sections found for the most strongly absorbing elements are of the order of magnitude of 10^{-21} cm², hence about one thousand times larger than the geometric nuclear cross sections. The largest cross sections yet found are 3×10^{-21} for boron, 7×10^{-21} for yttrium, 0.8×10^{-21} for iridium, 0.4×10^{-21} for rhodium, and 0.16×10^{-21} for lithium. Large cross sections are also shown by chlorine, cobalt, and silver. A systematic investigation of this topic is under way, as such cross sections are unusual for nuclear absorption processes.

Some of the elements with the largest cross sections are among those that show the strongest activities in hydrogenous media. For these elements a crude estimate of the total number of active nuclei obtainable outside of a water-filled vessel containing the source, yields the result that, at least approximately, the number of activated atoms equals the number of emitted neutrons. For other elements, instead, such as lithium and boron, no appreciable activity corresponds to the large absorption coefficient. This fact may be interpreted either by assuming that the radioactive nuclei formed escaped us because of their half-lives (either very long or very short) or of the low penetration of their beta-rays; or that neutron capture leads to the formation of stable isotopes, such as the transformation of Li⁶ into Li⁷ or B¹⁰ into B¹¹.

We also searched, with negative results, for anomalous absorptions in direct activation, without the use of hydrogenous media. This fact leads one to believe that the effect is specific for slow neutrons.

Finally, an experiment was performed on the activation of rhodium kept at a fixed distance from the source, in a vessel containing boric acid solutions of different concentrations. As it might be foreseen, very low concentrations are sufficient greatly to reduce the activation. The presence of a concentration of 0.2 per cent of boron element reduces the activity to one-half under our geometric conditions (rhodium at about 3 cm from the source). Higher concentrations do not produce a further reduction in the same ratio. For example, for a concentration three times higher the absorption is about 70 per cent.

107.

ARTIFICIAL RADIOACTIVITY PRODUCED BY NEUTRON BOMBARDMENT.—II.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, and E. SEGRÈ

(Communicated by Lord Rutherford, O. M., F.R.S.—Received February 15, 1935)

« Proc. Roy. Soc. » (London), Series A, 149, 522–558 (1935)

INTRODUCTION.

We describe in this paper some further results on artificial radioactivity induced by neutron bombardment, which have been obtained in the Physical Laboratory of the University of Rome, after the publication of our first paper on the same subject.⁽¹⁾ Preliminary reports containing the main results have been already published by several of us.⁽²⁾

By far the most interesting new result concerns the effect of hydrogenated substances on the activation of several elements by neutron bombardment (§ 1). We give an interpretation of this phenomenon by assuming that neutrons are slowed down by impacts against hydrogen nuclei (§ 2). Some anomalously large absorption cross-sections for slow neutrons are discussed in § 3. In many cases the anomalous absorption is connected with the emission of γ -rays (§ 4). § 5 describes some attempts to get information about the energy of the slow neutrons. Scattering experiments on slow neutrons are described in § 6, while § 7 deals with the production of slow neutrons through the action of non-hydrogenated substances. In § 8 the above results are discussed from a theoretical point of view. §§ 9 and 10 are dedicated to chemical methods for the separation of radioactive isotopes, and to improvements in the technique of the measurements. Results of a systematic investigation of the different elements are given in § 11. These results are collected in a table at the end of the paper.

(1) FERMI, AMALDI, D'AGOSTINO, RASETTI, SEGRÈ, « Proc. Roy. Soc. », A, vol. 146, p. 483 (1934).

(2) FERMI, AMALDI, PONTECORVO, RASETTI, SEGRÈ, « Ric. Scient. », vol. 2, p. 280 (1934); FERMI, PONTECORVO, RASETTI, « Ric. Scient. », vol. 2, p. 380 (1934); AMALDI, D'AGOSTINO, SEGRÈ, « Ric. Scient. », vol. 2, p. 381 (1934); AMALDI, D'AGOSTINO, FERMI, PONTECORVO, RASETTI, SEGRÈ, « Ric. Scient. », vol. 2, p. 467 (1934); vol. 1, p. 123 (1935). Some of our experiments have been repeated with analogous results by BJERGE and WESTCOTT, « Proc. Camb. Phil. Soc. », vol. 31, p. 145 (1935); we thank them for having submitted their manuscript to us.

§ I. - EFFECT OF HYDROGENATED SUBSTANCES ON THE ACTIVATION.

In our previous work we had noticed some irregularities in the intensity of the activation of silver by neutrons from a radon + beryllium source, which apparently depended upon some not very clear geometrical factors. Further investigation showed that the activation was strongly influenced by objects surrounding the neutron source, and in particular that the activation could be enormously increased by surrounding the source and the activated substance with a large amount of water or paraffin wax. This effect appeared at once to be due to the presence of hydrogen, as other substances not containing hydrogen failed to give comparable effects (see § 7).

To ascertain whether these large activations were due to the neutrons or to the γ -rays emitted very strongly from our source, we repeated the experiment using as a source 100 mg radium, without beryllium, and found no induced radioactivity. It follows that the effect is actually connected with the neutrons. As a check on this point, we observed the same hydrogen effect with a Po + Be neutron source with an intensity in accordance with the number of neutrons emitted.

Not every substance which is activated by neutrons shows an increase in activity when irradiated under water. Among the strongly influenced activities are: Na (15 h); Al (2.3 m); V (3.75 m); Ag (22 s, 2.3 m); Cu (5 m); Rh (44 s, 3.9 m). The activation of other elements, or possibly of single decay periods, is not influenced by water; among these are: Si (2.3 m); Al (10 m); Mg (40 s); Mn (3.75 m); Zn (5 m). We have observed that in every case where the active element is known to be an isotope of the bombarded one (about 20 cases), the activation is increased by the presence of water.

In order to measure approximately the sensitivity of the different activations to the action of water or paraffin, we express it in a conventional scale. A cylinder (about 2 cm in diameter and 5 cm in height) of the substance under investigation is irradiated by putting the source in its centre. Source and cylinder are sustained by thin metallic supports at some distance from other objects. The activity reached after a convenient time of irradiation is measured. Afterwards the same cylinder is irradiated with the same source in the same relative position for an equal length of time surrounding both with a large cylindrical block of paraffin 27 cm in diameter and 20 cm in height. The ratio of the activities with and without paraffin is taken as a measure of the sensitivity to hydrogenated substances and denoted by α . In this scale $\alpha = 1$ means that the substance shows no increase in activity when irradiated in paraffin. Of course this definition of the sensitivity coefficient is only an empirical one, as it depends somewhat on the geometrical conditions.

Sensitivity coefficients different from one have been observed ranging from $\alpha = 1.6$ for U (13 m, 100 m) to $\alpha = 40$ for V (3.75 m). However, it must be pointed out that the last figure may not be the largest, because many substances fail to show some activities when irradiated in air, and these activities appear only by irradiation under water, and then rather weakly.

The ratio of increase in activation due to the presence of paraffin or water is much larger if source and irradiated substance are kept some centimeters apart (see § 5).

§ 2. - INTERPRETATION IN TERMS OF SLOW NEUTRONS.

The experiments described in the preceding section can be explained on the hypothesis that the effect of water, or better of hydrogen, surrounding the source is due to scattering and slowing down of the primary neutrons by elastic collisions with hydrogen nuclei.

It is easily shown that an impact of a neutron against a proton reduces, on the average, the neutron energy by a factor $1/e$. From this it follows that 10 impacts reduce the energy to about $1/20,000$ of its original value. Assuming the initial energy to be $4 \cdot 10^6$ electron volts, the energy after 10 impacts would be about 200 electron volts: and less than 20 impacts would be necessary to reduce the energy to thermal equilibrium values. The phenomena that we have described can now be explained on the assumption that slow neutrons are more easily captured by some nuclei than fast ones. In this and in the following sections we shall discuss our experiments in terms of this hypothesis.

The increase in activity through the action of hydrogen may be ascribed both to the scattering which causes an increased neutron flow through the substance to be activated and to the higher efficiency of the impact of a slow neutron as compared with that of a fast one. In order to show that this second factor is largely important, we performed the following experiment.

A silver cylinder was irradiated with a Rn + Be source containing 350 mC; the distance between source and cylinder was 20 cm. If nothing but air surrounded the source and the cylinder, no activity could be detected in this last after irradiation. Keeping the distance between the source and the irradiated cylinder constant, we then put round the source a cylinder (14 cm diameter and 14 cm depth) filled with water. A strong activity is shown by the silver irradiated in these conditions (about 100 impulses per minute in our counters). This experiment shows that the slow neutrons are much more effective than the fast ones. Indeed, the numbers of neutrons impinging on the silver per second is not increased (possibly slightly lowered through absorption) by the water surrounding the source. As the activation is much increased by the water in these conditions, we must conclude that the yield of activation per impinging neutron is very much enhanced by the slowing down of the neutrons.

§ 3. - ABSORPTION OF SLOW NEUTRONS.

From the result of the preceding section, that the collision cross-section of slow neutrons for the activation of many elements is much larger than that of fast neutrons, one is led to investigate whether slow neutrons are strongly absorbed by the elements which are most strongly activated by them. We

therefore made a systematic investigation of the absorption of slow neutrons in the different elements.

The main purpose of this investigation was to find elements with anomalously large absorption coefficients for the slow neutrons, and hence we generally used fairly thin layers of absorbing material. The arrangement for these absorption measures is shown in fig. 1. The source of neutrons, a Rn + Be tube (S) is put inside a paraffin cylinder P (24 cm diameter, 14 cm height) about 2 cm under the upper surface. A second paraffin cylinder P' was put on P; in its lower surface a hole a few centimetres diameter and 2 or 3 cm in depth was excavated. The detector of the slow neutrons, a rhodium plate (sometimes also a silver plate), was put inside this hole and its activation measured, after irradiation during a standard length of time, once without absorbing layers and once interposed between two layers A of the absorbing material, as shown in the figure.

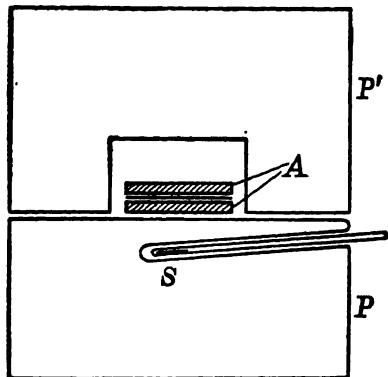


Fig. 1.

The ratio of the activities without or with absorbing layers gives the absorption. In these as well as in many other experiments, we generally used rhodium as detector of the slow neutrons, because the activity induced in this element is very large and can be measured very exactly with an ionization chamber; moreover, of the two periods of Rh, 44 s and 3.9 m, practically the first only is of importance, which makes the reduction of the measurements very easy.

The ratio of the activities without or with

absorbing layers gives the absorption. In these as well as in many other experiments, we generally used rhodium as detector of the slow neutrons, because the activity induced in this element is very large and can be measured very exactly with an ionization chamber; moreover, of the two periods of Rh, 44 s and 3.9 m, practically the first only is of importance, which makes the reduction of the measurements very easy.

As a result of these absorption measures, we found that the half-value thickness δ for the absorption of slow neutrons for the different elements varies over a very wide range. For several elements it is exceedingly small. As an example we found for boron $\delta = 0.004 \text{ gm/cm}^2$; for yttrium $\delta = 0.015 \text{ gm/cm}^2$; for cadmium $\delta = 0.014 \text{ gm/cm}^2$; for some other elements instead, δ is several thousands times larger; for instance, several centimetres of lead absorb less than a few milligrams per cm^2 of boron.

Expressing the absorption coefficients in terms of a nuclear cross-section σ for the activating impact of a slow neutron, we find in some cases surprisingly large values, e.g., $\sigma = 3000 \cdot 10^{-24}$ for B; $\sigma = 7000 \cdot 10^{-24}$ for Y; $10,000 \cdot 10^{-24}$ for Cd. This last is the largest cross-section as yet found. It is remarkable how much larger these cross-sections are than the geometrical cross-sections of nuclei, while, as is well known, fast neutrons have cross-sections comparable to the geometrical cross-sections.⁽³⁾ Indeed, we found directly that the absorption of boron for ordinary fast neutrons is at least 1000 times less than the absorption found for slow neutrons in the same element.

These absorption measurements do not refer to homogeneous neutrons. Indeed, the absorption curves are by no means exponentials; the absorption

(3) DUNNING, « Phys. Rev. », vol. 45, p. 586 (1934).

coefficient decreases with increasing thickness, as shown, for instance, by the absorption curve of cadmium, fig. 2. It must also be noticed that the half-

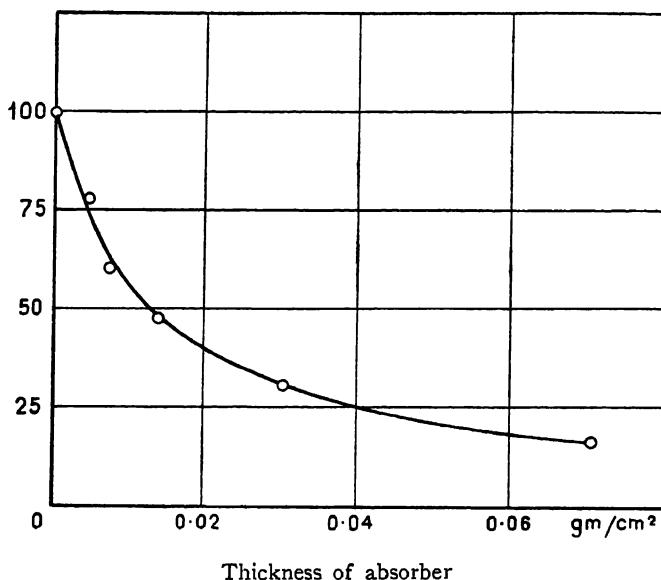


Fig. 2.

value thickness depends to some extent upon the arrangement of the paraffin, as this affects the average velocity of the neutrons. For instance absorption of the neutrons inside a hole in paraffin is larger than outside a paraffin block.

§ 4. - EMISSION OF γ -RAYS THROUGH THE CAPTURE OF THE NEUTRON.

In connection with the anomalous absorption of slow neutrons, one is led to investigate more closely the absorption process. The simplest assumption is to admit that the neutron is captured by the nucleus with formation of an isotope heavier by one mass unit. If this heavier isotope is unstable, we might expect a strong induced radioactivity for the strongly absorbing elements. This occurs, for example, for indium and iridium, which are known to go over into radioactive isotopes. A rough evaluation of the intensity of the activation of the absorbing substance and of the number of the absorbed neutrons, shows that approximately an activated atom is formed in each absorption process. In other cases it is found that no activation, or at least no strong activation, corresponds to an anomalously large absorption (B, Y, Cd). In these cases we might expect that the capture of the neutron leads to the formation of a stable nucleus. It is obvious that this should happen more easily for elements with many stable isotopes differing in atomic weight by one unit (Cd, Hg).

In both cases, if the slow neutron is simply captured, we might expect that the absorption process should be accompanied by the emission of a

γ -radiation, with energy corresponding to the binding energy of the neutron. For fast neutrons a γ -radiation of this type has already been announced by Lea⁽⁴⁾.

In the case of the absorption of slow neutrons we were able to show for some elements the emission of a relatively strong γ -radiation of this type by the following experiment.

A Po + Be neutron source S, fig. 3, of about 60 millicuries was immersed in a paraffin block together with one of our standard Geiger Müller counters C.

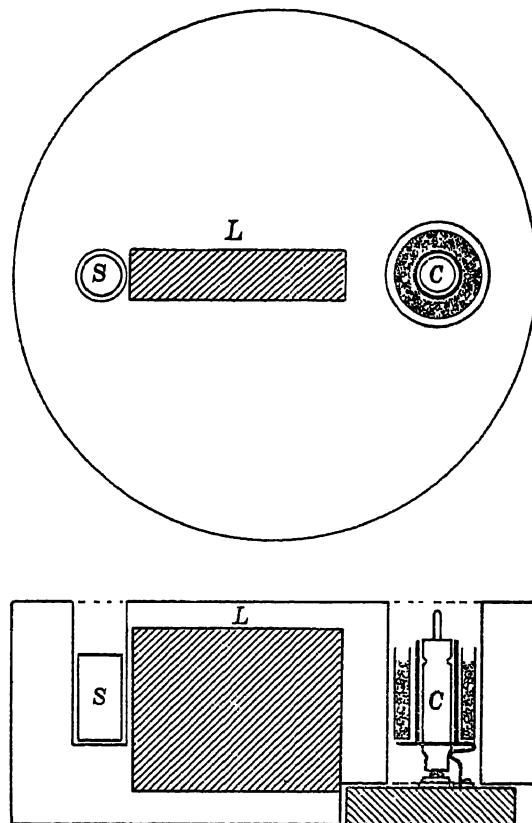


Fig. 3.

A lead absorber L, 10 cm thick, protected the counter from the direct γ -rays of the source. The counter was surrounded by a lead foil 2 mm thick. The counter registered in these conditions about 30 counts per minute. Small cylindrical layers of the various substances were placed around the counter, outside the lead foil. We generally observed a very marked increase in the number of counts for the strongly absorbing substances. This was observed, for instance, for Co, Cd, Y, Cl, Ir, Au, Hg, when the number of counts was sometimes more than doubled. An exception to this behaviour is shown by

(4) «Nature», vol. 133, p. 24 (1934).

boron and lithium, which, although showing a strong absorption for the slow neutrons, do not emit γ -rays. In these elements the absorption of the slow neutrons has been found to be connected instead to the emission of heavy particles (see § 11). This alternative possibility to the emission of γ -rays appears theoretically likely only for very light elements owing to the low potential barrier.

That the emission of γ -rays, as described before for some substances, was actually due to slow neutrons was shown by the fact that no emission was observed by removing the paraffin. Furthermore, the effect was very much reduced by surrounding substances and counters with a boron screen.

§ 5. - ENERGY OF THE SLOW NEUTRONS.

It would be very important to evaluate somehow the mean energy of the slow activating neutrons, and we describe in this section some attempts to do this.

We have already stated that the mean energy of the neutrons is reduced by a factor $1/e$ for each elastic collision against a proton, provided the values of the energy are large compared with the thermal energy. If the energy of the slow neutrons were really reduced down to this limit, one would expect that the diffusion process might be influenced by temperature. We made an attempt to find such an effect by the following experiment.

A rhodium or a silver detector was irradiated with the Rn + Be neutron source under the same geometrical conditions, once in hot paraffin at 200° C, and once at 20° C in a mixture of benzene and penthane having at this temperature the same density and elementary composition as paraffin at 200° C. No difference in the activation was found in the two tests, within the accuracy of 2 %. The mixtures filled a cylinder 26 cm in diameter and 15 cm in height. The detector was on the axis of the cylinder 1 cm under the liquid surface; the source, also on the axis, 2 cm lower. It must be concluded that temperature, at least in these conditions, does not affect the activation, which might be interpreted to mean that the energy of the activating neutrons is higher than the thermal energy. This is, however, not quite conclusive, as the dependency of both the cross-section for activation and the mean free path upon the velocity for very slow neutrons is unknown.

A direct method of measuring or at least of establishing an upper limit to the energy of the slow neutrons would be to measure the average ionization produced in each collision of a slow neutron against a hydrogen nucleus. This might be done either by measuring the total ionization in a hydrogen-filled chamber or by directly measuring the ionization in a single process by means of a linear amplifier. In both methods the action of the slow neutrons can be separated from that of the fast ones, by screening the chamber with a thin boron layer. Experiments of this kind are being attempted but have not yet led to definite results.

We have investigated whether the increase in activation produced by paraffin is also to be found with different sources of neutrons. We have done

this with the neutrons emitted by beryllium irradiated with the γ -rays of radium,⁽⁵⁾ and found a large effect with this source. This shows that the slow neutrons of paraffin are slower than the neutrons emitted in this nuclear reaction.

§ 6. - SCATTERING AND DIFFUSION OF THE SLOW NEUTRONS.

In connection with the absorption measurements described in § 4, we have made a rough survey of the scattering properties of the different substances. The experimental arrangement is shown in fig. 4. The source S is

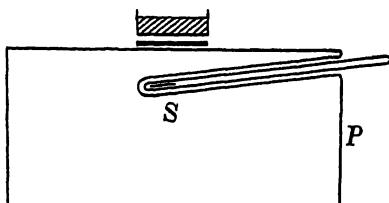


Fig. 4.

enclosed in the cylindrical paraffin block P as described in § 4. The rhodium plate used as detector was activated by placing it on the top of this paraffin block. The activation was measured once with the substance to be investigated placed in a layer above the rhodium plate, and once without it. In some cases an increased activation was found when a substance was superimposed,

indicating an action from slow neutrons scattered back from the substance. For instance, a layer of carbon a few centimetres thick increases the activation about five times. Similar results are found with several light elements (Be, C, Si). Heavy elements generally produce a much smaller effect. Boron, which has a large absorption coefficient, does not produce any appreciable increase of activity. This shows that the anomalously large absorption of this element is mainly due to real absorption and not to scattering.

We have repeated the same experiment with water, obtaining the curve reproduced in fig. 5 for the intensity of activation as a function of the thickness of the scattering layer. A similar result is obtained employing paraffin instead of water.

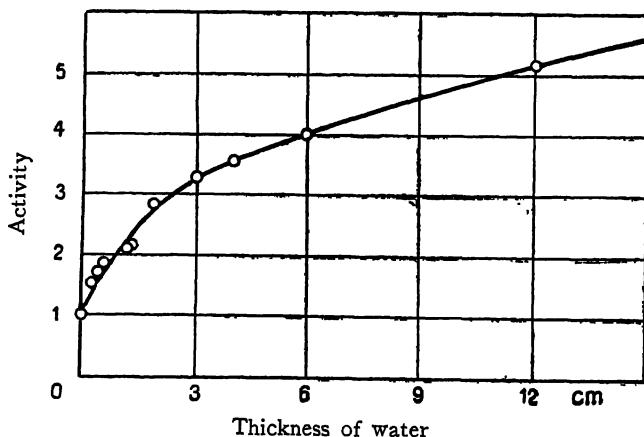


Fig. 5.

(5) SZILARD and CHALMERS, «Nature», vol. 134, p. 494 (1934).

Other experiments on scattering have been made by the arrangement shown in fig. 6. A paraffin cylinder, 13 cm diameter and 11 cm high, contains in its centre the neutron source S. The detector, a silver or rhodium cylinder R, is kept at a distance of 30 cm from the source. A screen D of the scattering material is interposed between the source and the detector; its dimensions are such as to intercept exactly all the neutrons which might reach the detector from the paraffin block. The difference in the activity of the detector measured when irradiated with or without the screen D gives a measure of the effect of scattering + absorption. We found by this apparatus that a paraffin layer 0.5 gm/cm² thick reduces the intensity of the silver activation to about one-half; here also we found that the absorption is not exponential. A similar result is obtained, using water as a scatterer. From this we might deduce the order of magnitude of the mean free path of slow neutrons in water or paraffin, this being comparable with the observed half-value thickness.

For carbon the half-value thickness is about 5 gm/cm². Lead of a thickness of about 4 gm/cm² gave a slight decrease in intensity, which is mainly due to scattering.

Another set of experiments was made in order to determine how the intensity of the activation of rhodium in water decreases with the distance from the source. The source was immersed in a water basin of the dimensions

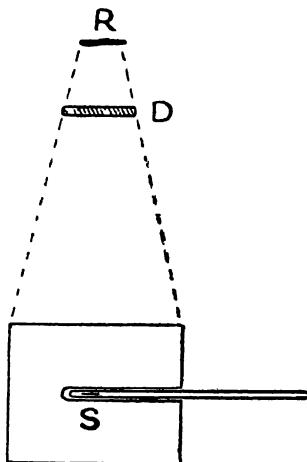


Fig. 6.

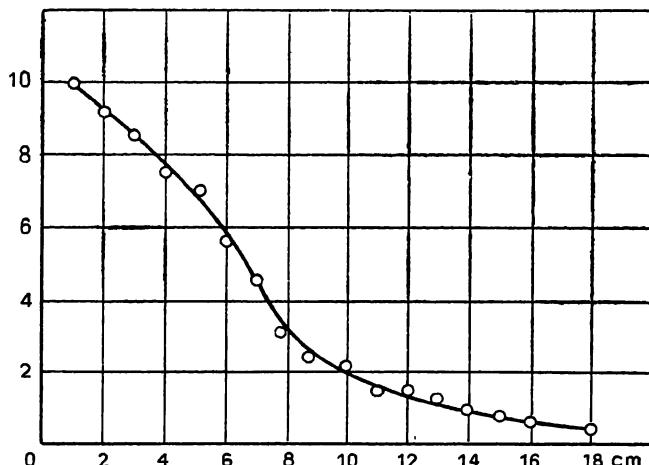


Fig. 7.

40 × 40 × 100 cm and the activity induced in rhodium at different distances measured with an ionization chamber. The result is shown in fig. 7, where the activity is plotted as a function of the distance. A similar experiment

was made with 2% boric acid dissolved in the water, obtaining a curve similar to the former, only very much reduced in intensity, owing to the absorption of boron.

The general picture of the slowing down process, which one gets from these experiments is the following. The largest part of the diffusion process takes place when the primary neutron still retains much of its original energy, having collided only a few times with hydrogen nuclei; as the velocity is reduced down to the value for which the absorption by boron becomes appreciable, the mean free path in hydrogen appears to be fairly small, so that the diffusion process after this stage is contained in a small volume. This explains also the fact that the absorption coefficient of boron for the neutrons in water is fairly independent of the distance from the source.

§ 7. - EFFECT OF NON-HYDROGENATED SUBSTANCES ON THE ACTIVATION.

We have tried if effects similar to that of water or paraffin could be obtained also with non-hydrogenated substances. Owing to the large amount of materials necessary for these experiments, only a few substances have been tested: Pb, SiO_2 , C, Fe. In all these, with the exception of Fe, a definite increase of the activation of rhodium was observed. Under the geometrical conditions to be described later, the effect was increased by a factor two to five, while in water the factor would have been of some hundreds. That this increase in activity is not simply due to scattering of the neutrons but mainly to their loss in velocity, is proved by the fact that the activation of silicon under the same circumstances is not increased; moreover, very thin cadmium absorbers considerably reduced the activation of rhodium. These facts seem rather surprising chiefly for lead, as it would be difficult to explain the slowing down of neutrons as due to elastic collisions.

The details of these experiments were as follows. We built with lead blocks a cube of side of about 50 cm. The neutron source was placed in the centre and the rhodium detector 10 cm apart. The activity is about three times larger than in the same geometrical conditions without lead. A similar result is obtained with silver as detector instead of rhodium, while a silicon detector shows no increase in the activity. This fact is to be taken as an indication that the velocity of the neutrons is reduced by the impact against lead nuclei. This view is confirmed by the observation that the activation of rhodium in lead is reduced to half value by an absorber of cadmium of 1 gm/cm^2 . Comparing this absorption of cadmium with that of the same element for the slow neutrons in water (half-value thickness 0.014 gm/cm^2), one is led to assume that the average velocity of the neutrons in lead is not so low as in water.

A similar experiment was performed using a graphite cylinder of 3 litres volume. The source was placed in the centre and the rhodium detector at 5 cm distance. The increase in activation was about the same as that produced by lead in the former experiment and the absorption of the neutrons in cadmium was certainly not smaller. Similar results were obtained with silica

in the form of "Kieselguhr". The failure to observe a similar effect with iron is probably due to its relatively large absorption.

We conclude from these experiments that the property of intensifying the activation is shown by most materials. The possible action of surrounding objects, possibly even of air, must always be considered, when experimenting quantitatively on the activation of some substances. For these reasons, the figures given above for the effect of some materials are to be taken only as an indication.

§ 8. - THEORETICAL CONSIDERATIONS ON THE PROPERTIES OF SLOW NEUTRONS.

In our first paper we left undecided the question whether whenever the neutron bombardment gives rise to a radio element isotopic with the original one, the neutron is captured or causes the expulsion of a neutron from the struck nucleus, *i.e.*, whether the atomic weight of the radioactive product is $A + 1$ or $A - 1$. We believe that the evidence accumulated since then speaks all in favour of the first hypothesis. The main points of this evidence are the following.

(a) Two new weak activities have been recorded: one, a 15-hour period in sodium, the other a 2.3-minute period in aluminium. Both their identity with known periods, in the first case of aluminium and magnesium, in the second case of silicon and phosphorus, and the chemical evidence in the case of sodium (see § 11), show that the radio elements are respectively isotopes of Na and Al. As both these elements have only one stable isotope, *i.e.*, ^{23}Na and ^{27}Al , the choice remains for radio sodium between ^{24}Na and ^{22}Na , for radio aluminium between ^{28}Al and ^{26}Al . Now both the lighter isotopes ^{22}Na and ^{26}Al are known from other nuclear reactions to have different periods and to emit positrons instead of electrons, so that it seems well founded to admit that, at least in these cases, the neutron is captured.

(b) While there is no theoretical difficulty in understanding how a neutron with a negligible kinetic energy can be captured by a nucleus, it seems unlikely that it could knock out a stably bound neutron from the nucleus. Still more difficult it would be to understand that in the latter case energy could be left over to account for the emission of γ -rays.

We shall, then, discuss the experimental facts on the standpoint that the neutrons, and particularly slow ones, are easily captured by many nuclei.

There are, however, some theoretical difficulties in understanding this capture process, or at least to account for the large cross-sections that have been experimentally observed in some cases. Nevertheless it may be worth while to state some general consequences of the theory, which must be always kept in mind in the discussion of this problem.

Let us admit, as it has been generally assumed, that the forces acting between the neutron and a nucleus extend about as far as the nuclear radius itself. If this is so, the de Broglie wave-length is, for fast neutrons, of the order of the radius of action, and consequently for slow neutrons

is much larger. The well-known theory of the impact, in which the nucleus is treated as a potential hole, takes in this case an extremely simple form. Let ψ be the s -eigenfunction corresponding to zero energy. In fig. 8 the product $r\psi$ is plotted as a function of the radius vector r , and

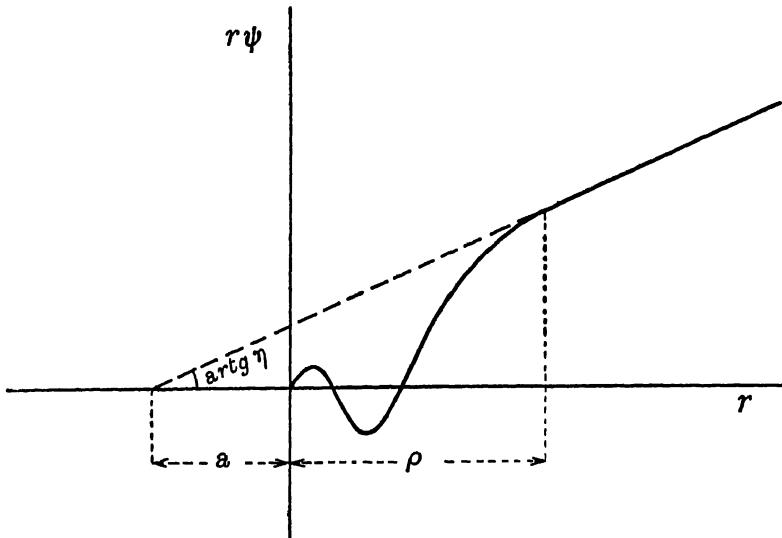


Fig. 8.

ρ represents the radius of action. The curve has an irregular shape for $r < \rho$, while for $r > \rho$ it becomes a straight line. We normalize ψ taking $\psi(0) = 1$. Let then the equation of the straight line into which $r\psi$ goes over for large values of r be

$$r\psi \rightarrow \eta(a + r),$$

where the geometrical meaning of η and a is clear from the figure. The values of these two quantities could be easily calculated if one knew the form of the potential hole representing the nucleus. The cross-section for elastic collisions in the limit for low velocities is found to be

$$(1) \quad \sigma_{el} = 4\pi a^2,$$

while the density of probability for the neutron to be found in the centre of the nucleus is

$$(2) \quad P = n/\eta^2,$$

where n is the density of the neutrons outside of the nucleus.

Whatever the mechanism of capture may be, it is natural to assume that, at least to a certain approximation, the probability of capture of the neutron by a nucleus per unit time will be proportional to P , i.e., that this probability will be given by $k n / \eta^2$, where k is a constant for each nucleus.

This probability can be expressed in terms of a cross-section σ_{ca} for the capture process through the relation

$$(3) \quad \sigma_{ca} = k/\eta^2 v,$$

where v is the velocity of the neutron. A limit to the validity of (3) is set by the fact that σ_{ca} can evidently be at most of the order of magnitude of the square of de Broglie wave-length. This allows one, considering the largest cross-sections found experimentally (Cd, $\sigma_{ca}=10^{-20}$), to set an upper limit for the energy of the slow neutrons. This limit turns out to be a few hundred volts. However, it must be borne in mind that this deduction is valid only under the explicitly stated assumptions.

Formula (3), valid only for low velocities, gives a cross-section for capture for a given nucleus inversely proportional to the velocity of the neutron. This explains why the cross-section for capture is generally larger for slow neutrons than for fast ones. This result may also be expressed by saying that the mean life of a slow neutron in a substance is independent of its velocity. While the capture cross-section is inversely proportional to the velocity, the cross-section for elastic impact expressed by (1) is independent of the velocity, which means that the mean free path for this type of collisions is also independent of the velocity.

One more feature of (3) is that σ_{ca} is inversely proportional to η^2 . The straight line of fig. 8 may occasionally be nearly parallel to the abscissae axis. In this case η is very small and consequently the capture cross-section becomes very large. This behaviour of the eigenfunction is probably responsible for the anomalously large cross-sections observed for a few nuclei.

In order to deduce from (3) the absolute values of the cross-sections, it would be necessary to know also the values of k , which quantity depends on the physical mechanism of the capture. We know from the experiments that there are two different processes. In some light elements (Li, B) the capture of the neutron is followed by the emission of heavy particles; while in the heavier elements the normal process seems to be capture with emission of a γ -ray. The binding of an additional neutron to a nucleus sets free an amount of energy which, on the average, has a value about 7 million electron volts. This surplus energy might in some cases produce the emission of an α -particle, provided the potential barrier surrounding the nucleus is low enough to allow for a quick escape of the particle. Therefore this process is expected to occur only for the lightest elements, whereas in the activation by fast neutrons, owing to the kinetic energy of the impinging neutron which is to be added to the binding energy, the emission of charged particles is possible also in elements of higher atomic weight.⁽⁶⁾

In the case of capture with emission of a γ -ray, which is observed for elements of any atomic weight up to the highest, the ordinarily accepted mechanism of irradiation gives apparently rather too small a value for k . k depends upon two factors which are rather difficult to evaluate: matrix elements and energy of the emitted γ -quanta. As the probability of emission of a γ -quantum is *ceteris paribus* proportional to v^3 , it is to be assumed that processes by which the binding energy of the neutron is very large ought to be preferred; this binding energy might in several

(6) MEITNER, «Naturwiss.», vol. 45, p. 789 (1934).

cases considerably exceed 10 million volts. Nevertheless one ought probably to assume rather too high a value for the matrix elements in order to get a plausible interpretation of the relative frequency of the anomalously large cross-sections. From the theory one would also expect that generally anomalous cross-sections for the capture process were connected to anomalous elastic cross-sections. No experimental evidence has yet been found for this fact.

In this section we shall also discuss briefly the velocity distribution law for the slow neutrons in hydrogen. From the above theoretical considerations (formulae (1) and (3)), it seems plausible to assume that neutrons having velocities smaller than a certain limit have a constant mean free path λ for elastic collisions, and a constant mean life-time τ before they are captured by the nuclei present in the medium. One can then easily show that the number of neutrons in a hydrogenated substance, having velocities between v and $v + dv$, is proportional, for v less than the above-stated limit to

$$(4) \quad \frac{vdv}{(v+\lambda/\tau)^3}.$$

This distribution law of the slow neutrons might be used for interpreting the fact that the absorption curves of the slow neutrons are not exponentials.

§ 9. - SEPARATION OF RADIOACTIVE ISOTOPES.

Szilard and Chalmers⁽⁷⁾ were the first to separate radioactive iodine from usual iodine by chemical methods. We have extended their procedure to some other cases, using also inorganic instead of organic compounds. The principle of the method is the following: let us suppose that the element before irradiation is bound in a molecule or radical which, once decomposed, has a practically negligible probability of being rebuilt. As the neutron strikes the atom, this is generally knocked out from the molecule, and has a tendency to remain in an atomic or ionic state. It follows that, after irradiation, the modified atoms are in a different chemical state from the main bulk of the unmodified ones, and can thus be separated by convenient reactions. The energy of the chemical bond is a few volts, and, even admitting that the impinging neutron might have a negligible energy, the recoil of the γ -quantum emitted in the capture of the neutron would be sufficient to overcome the binding chemical forces.

Szilard and Chalmers separated radioactive iodine from irradiated, ethyl iodide adding a trace of free iodine, reducing and precipitating I^- with $AgNO_3$. The same method was applied by us to bromoform, chloroform, carbon tetrachloride and some other halogenic organic compounds.

(7) « Nature », vol. 134, p. 462 (1934).

We were always able to separate almost completely the radioactive halogen from the bulk of the inactive substance.

We have also separated radioactive chlorine (^{35}m) starting from sodium chlorate. The chlorine atom is knocked out of the ClO_3^- ion by the neutron impact; adding a small trace of Cl^- to carry the radioactive isotope and precipitating carefully with AgNO_3 , with addition of HNO_3 to prevent precipitation of AgClO_3 , one finds the activity concentrated in the AgCl precipitate. Similar results are obtained also with bromates and iodates. In these last compounds the nitric acid was substituted with ammonia. From 70 to 90% of the total activity is concentrated in the precipitate.

Cacodylic acid $(\text{CH}_3)_2\text{AsOOH}$ is a good starting substance for concentrating radioactive arsenic. By precipitating arsenic sulphide from irradiated cacodylic acid, it is possible to concentrate the activity.

Potassium permanganate irradiated and then filtered through an ordinary paper filter left much of the activity on the filter with manganese dioxide formed in the oxidation of the paper. About 80% of the total activity was separated, adding a trace of a manganous salt and precipitating the manganous carbonate. The MnO_4^- ion is dissociated by the neutron bombardment and the manganese atom is left in lower states of oxidation; these are collected with manganese dioxide on the filter, or precipitated by carbonates. We tried this separation starting either from solid salts or from solutions; there is no very remarkable difference between the two cases. Also no marked influence of the acidity or alkalinity of the irradiated solution was observed.

A physical method for separating radioactive isotopes is analogous to the well-known method of collecting the active deposit from the emanation. We tried this method with a gaseous iodine compound. A glass cylinder of about 1 litre volume with a large cylindrical aluminium electrode close to the wall and a nickel electrode along the axis was filled with methyl or ethyl iodide saturated vapour. The temperature of the cylinder was regulated so that the vapour pressure was about an atmosphere. The whole apparatus was immersed in hot water and a potential difference of 3000 volts applied to the electrodes. A $\text{Rn} + \text{Be}$ source was placed outside the wall. After irradiation the nickel electrode was removed and showed an activity decaying with the iodine period. Nickel was used as a support because it does not become radioactive under neutron bombardment. The yield was rather a poor one. Inversion of the polarity of the electrodes gave no consistent results.

§ 10. - METHODS OF MEASUREMENTS.

The observed fact of the intense activating effect of the slow neutrons opened the possibility of obtaining stronger sources of the artificial radio elements than were available last year. This allows more accurate measurements of the constants of these substances by using an ionization chamber instead of Geiger Müller counters.

The ionization chamber was built of steel; the inner electrodes were a wire net and a brass rod. The β -rays entered the chamber through a circular window of 6 cm diameter on the top, closed by an aluminium foil 0.01 cm thick. The chamber was filled with CO_2 at 3 atmospheres, pressure. The chamber was connected to a Perucca electrometer, the total capacity of the system being about 20 cm, the electrometer sensitivity 0.02 volts per scale division. The system was perfectly constant both in its zero effect and in its sensitivity (as controlled by a uranium standard preparation). We reproduce in figs. 9 and 10 some decay curves obtained with this apparatus.

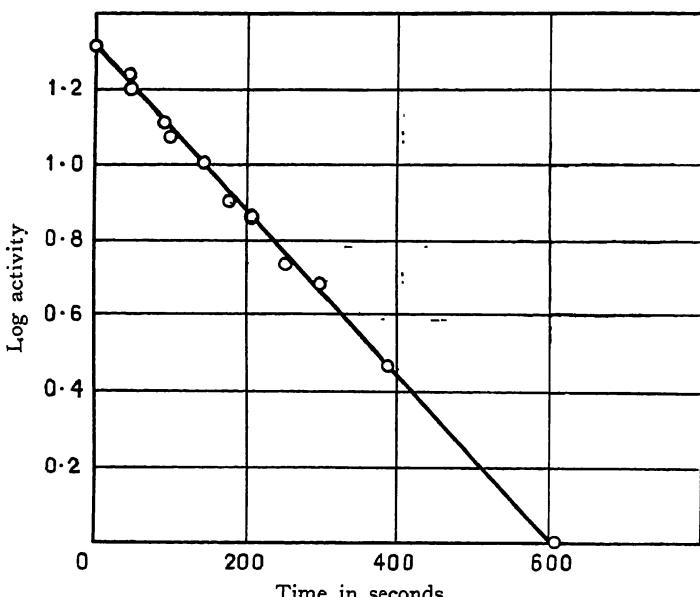


Fig. 9.

The same apparatus was used for measurements of the absorption of the β -rays. The window was protected with aluminium foils and the activity plotted as a function of the aluminium thickness. The absorption curve was roughly exponential. Sometimes substances show besides the β -activity a strong γ -radiation. We conventionally attributed to β -rays the residual ionization when the chamber was screened with 2 mm of lead. In the evaluation of the absorption coefficients for β -rays allowance has been made for the γ -radiation. To check the measurements, the absorption coefficients of the β -rays of RaE and UX_2 have been measured and results obtained in accordance with the values commonly admitted.

§. II - SYSTEMATIC INVESTIGATION OF ELEMENTS.

In this section we shall report all the new data that we have found about each element, both as regards the induced activities and the properties with respect to slow neutrons. Some data differ slightly from our previous ones, owing to the increased precision of our measurements.

1 - *Hydrogen* - No activity could be detected either in water or in paraffin irradiated in a large can of water with 500 millicuries Rn + Be for several days.

3 - *Lithium* - Lithium hydroxide was found to be inactive after irradiation with slow neutrons (14 hours, 400 millicuries). Although lithium remains inactive, it strongly absorbs the slow neutrons; half-value thickness $\delta = 0.05 \text{ gm/cm}^2$. This absorption is not accompanied by a γ -radiation. It was shown independently by Chadwick and Goldhaber⁽⁸⁾ and by us that when the slow neutrons are absorbed, heavy charged particles

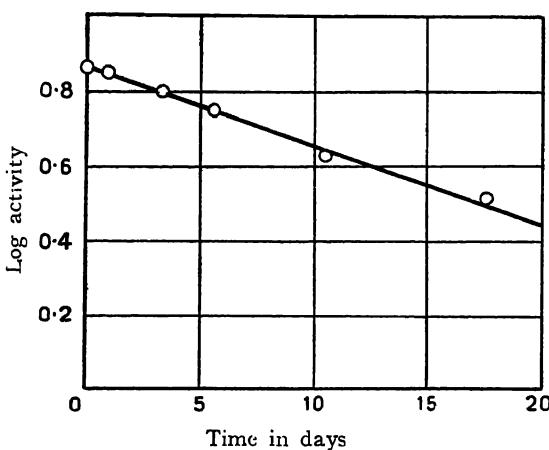
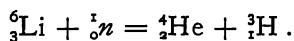


Fig. 10.

are emitted. According to Chadwick and Goldhaber, the nuclear process is represented by the following reaction,

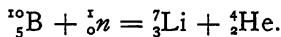


4 - *Beryllium* - Metallic beryllium (purity 99 %), strongly irradiated with slow neutrons, showed only an extremely weak activity possibly due to impurities. Owing to the very strong activation of several elements when irradiated under water, impurities might easily be misleading.

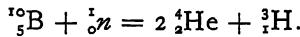
5 - *Boron* - Metallic boron irradiated 14 hours under water with 500 millicuries was found inactive. Boron has the highest absorption coefficient as yet found for slow neutrons, $\delta = 0.004 \text{ gm/cm}^2$, corresponding to a cross section of about $3 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$. No γ -rays have been found to accompany this absorption: instead of a γ -radiation in this case as well as for lithium, α -particles are emitted, as was shown by Chadwick and Goldhaber⁽⁸⁾ and by us. This effect can be easily detected by the strong discharge in an ionization chamber filled with boron trifluoride surrounded by paraffin and irradiated with a Po+Be neutron source. Screening the ionization chamber with a thin cadmium foil in order to absorb the slow neutrons, reduces con-

(8) «Nature», vol. 135, p. 65 (1935).

siderably the ionization current. The same effect was observed with the ionization chamber filled with air, some boron being spread on its floor. The emission of α -particles was also detected with a small ionization chamber connected to a linear amplifier, either spreading some boron on its walls or filling it with boron trifluoride. In order to explain these phenomena we have proposed the nuclear reaction,



Chadwick and Goldhaber have proposed instead the reaction,



We do not think that there is at present sufficient evidence to decide between these two possibilities, and we are now experimenting to try to get a more exact measurement of the number of ions formed in each process in an ionization chamber containing boron either in a gaseous form (total process) or spread on its walls (effect of only one or two particles). We are also trying to observe the disintegration in a Wilson chamber containing a gaseous compound of boron⁽⁹⁾.

6 — *Carbon* — No activity; see hydrogen. For the scattering properties see § 6.

7 — *Nitrogen* — Ammonium nitrate irradiated 12 hours with 600 millicuries under water showed no activity.

8 — *Oxygen* — No activity, see hydrogen.

9 — *Fluorine* — Both activities of this element (periods 9 seconds and 40 seconds) are not sensitive to hydrogenated substances.

10 — *Sodium* — This element has two activities: one of these (period 40 seconds) is not sensitive to hydrogenated substances. A very weak, activity with a long period was reported by Bjerge and Westcott⁽¹⁰⁾. As this activity is strongly enhanced by water, we were able to measure its period with reasonable accuracy and found it to be 15 hours. Owing to the theoretical importance of this activity (see § 8), we compared very carefully its decay curve with that of the long period of aluminium in order to check their identity. For a chemical investigation of the active substance we irradiated pure sodium carbonate (Kahlbaum). We dissolved the irradiated substance in hydrochloric acid and added aluminium and magnesium chlorides. A precipitate of the hydroxides of the latter elements obtained by adding ammonia, was found inactive. Afterwards we added some sodium fluoride to the solution, and precipitated the fluorine as barium fluoride; this precipitate was also found inactive. The solution containing the original sodium was then evaporated and ignited gently, in order to eliminate neon, where an active isotope of this element would have been formed. The activity was found in the dried sodium salt. We conclude that the active prod-

(9) [Note added in proof—TAYLOR and GOLDHABER, «Nature», vol. 135, p. 341 (1935), have shown that the reaction takes place according to the first scheme].

(10) BJERGE and WESTCOTT, «Nature», vol. 134, p. 286 (1934).

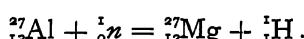
uct is an isotope of sodium, ^{24}Na . The same isotope was produced by us last year by bombarding magnesium or aluminium with neutrons. ^{24}Na has also been produced recently in considerable amounts and studied very completely by Lawrence⁽¹¹⁾ bombarding several elements with artificially accelerated particles.

12 - *Magnesium* - Pure magnesium oxide (Kahlbaum), especially tested by us in order to ensure that it was aluminium free, was irradiated under water. The substance was kept at some distance from the source in order to prevent the activation of the periods not sensitive to water. A new very weak activity with a period of about 10 minutes was found. As this period coincides with the 10-minute period of aluminium, which is known to be due to ^{27}Mg (see aluminium), it is very likely that it is due to the same isotope formed by the capture of a neutron by ^{26}Mg present in an amount of 11% in ordinary magnesium.

The 40-second period is insensitive to water.

13 - *Aluminium* - Aluminium irradiated in water shows a fairly strong new activity decaying with a period of 2.3 minutes (measured with an ionization chamber). Irradiated outside of water, this activity is extremely weak. As the period of the new activity coincides with the 2-3-minute period of silicon, which is due to ^{28}Al , we assume that this activity is also due to the same isotope formed by capture of a neutron from ^{27}Al .

The second period of aluminium has been measured with the ionization chamber and found to be 10 minutes instead of 12. This activity is insensitive to water. A chemical separation of the carrier of this activity has been performed. Irradiated metallic aluminium was dissolved in a caustic soda solution and magnesium chloride was added. The precipitate of magnesium hydroxide carried the 10-minute activity. We assume that the active isotope is ^{27}Mg formed according to the reaction,



14 - *Silicon* - We have determined with the ionization chamber the short period of this element, finding it to be 2.3 minutes. This activity is insensitive to water.

Besides this activity, we found a new longer period of some hours in fused silica irradiated in water. This activity is very weak and very sensitive to water. We think probably that its carrier is ^{31}Si which is obtained by irradiated phosphorus and has a period of 2.4 hours. ^{31}Si could be formed by capture of a neutron from ^{30}Si present in an amount of 3%.

15 - *Phosphorus* - The short-period activity of this element (2.3 minutes) is not enhanced by water. Curie, Joliot and Preiswerk⁽¹²⁾ ascribe this period to ^{28}Al . A chemical test in favour of this hypothesis is the following: we irradiated phosphoric acid, neutralized the solution with sodium carbonate, and added aluminium chloride; the activity was found to be concentrated in the precipitated aluminium.

(11) « Phys. Rev. », vol. 47, p. 17 (1935).

(12) « C.R. Acad. Sci. Paris », vol. 198, p. 2089 (1934).

We have observed, with the aid of the ionization chamber, the decay-curve of the longer period of phosphorus. Its period is 2.4 hours instead of 3 as given before. We have also measured, with the ionization chamber, the half-value thickness of the corresponding β -rays and found it to be 0.15 gm/cm² Al.

16 - *Sulphur* - We have determined in the ionization chamber the period of phosphorus extracted from irradiated sulphur. We found: period 14 days, half-value thickness of the β -rays 0.10 gm/cm² Al.

17 - *Chlorine* - Chlorine irradiated under water showed a new period of 35 minutes measured electrometrically. For the chemical tests on the carrier of this activity see § 9.

Chlorine absorbs fairly strongly the slow neutrons (half-value thickness $\delta = 0.3$ gm/cm²). The process of absorption is accompanied by emission of γ -rays.

19 - *Potassium* - We have found in irradiated potassium an induced activity strongly sensitive to water, decaying with a period of 16 hours. A chemical investigation of the carrier of the activity, performed by the same method described for sodium, excluded the elements Cl, A, Ca. We conclude therefrom that the activity is probably carried by an isotope of potassium. According to von Hevesy⁽¹³⁾, this isotope is to be identified with a ^{40}K , that was obtained by him by neutron bombardment of scandium, and has the same decay period.

20 - *Calcium* - No activity was found in calcium fluoride irradiated 14 hours in water with a 600 millicuries source.

23 - *Vanadium* - The decay of the activity induced in vanadium has been measured in the ionization chamber with the following results: half-value period 3.75 minutes; half-value thickness of the β -rays 0.17 gm/cm² Al. The β -rays are accompanied by a γ -radiation. The activation of vanadium is strongly sensitive to hydrogenated substances; with the definition of § 1, $\alpha = 40$.

24 - *Chromium* - The activity of chromium is insensitive to water.

25 - *Manganese* - The activity with short period (3.75 minutes) is insensitive to water ($\alpha = 1$). On the other hand, the activity with longer period (2.5 hours measured in the ionization chamber) is strongly enhanced by water ($\alpha = 23$). Half-value thickness of β -rays measured electrometrically is 0.14 gm/cm² Al; the disintegration is accompanied by γ -rays. The 2.5-hour product is known to be an isotope of manganese; in § 9 a method for concentrating the activity has been described. In order to get new evidence in favour of the fact that the active product is really an isotope of manganese, we first concentrated the activity obtained in irradiated manganese permanganate by a precipitation of manganese carbonate. The carbonate containing the activity was then dissolved in hydrochloric acid, and large amounts of chromium, vanadium and iron salts were added to the solution. Afterwards the manganese was separated once again as diox-

(13) «Nature», vol. 135, p. 96 (1935).

ide, with nitric acid and sodium chlorate. The manganese precipitate carried the activity, while the fractions containing chromium, vanadium and iron were found to be inactive.

26 - *Iron* - The activity of this element (period 2.5 hours) is insensitive to water. Half-value thickness for the absorption of slow neutrons 8 gm/cm².

27 - *Cobalt* - This element absorbs fairly strongly the slow neutrons; half-value thickness 0.7 gm/cm². The absorption is accompanied by the emission of a γ -radiation.

28 - *Nickel* - Strongly irradiated nickel showed only a dubious trace of activity.

29 - *Copper* - Both induced activities of this element (periods 5 minutes, measured electrometrically, and 10 hours) are strongly enhanced by water. For the first $\alpha = 15$. Copper absorbs the slow neutrons with a half-value thickness of about 3 gm/cm²; this absorption is accompanied by a weak γ -radiation.

Irradiated metallic copper was dissolved in hydrochloric acid, and small quantities of cobalt, nickel and zinc salts were added. Copper sulphide was precipitated from the acid solution and found to be active. The precipitates of the zinc, cobalt and nickel sulphides, obtained by neutralizing the solution and adding ammonium sulphide, were inactive. As the time employed for this test was rather long, the test refers only to the longer period. The carrier of this activity can then be assumed to be an isotope of copper, as suggested by Bjerge and Westcott (*loc. cit.*).

30 - *Zinc* - The activity of the short period of zinc is not enhanced by water. The longer period was measured electrometrically and found to be 10 hours. The carrier of this activity has been investigated by means of the following test: irradiated metallic zinc was dissolved in hydrochloric acid, and a small quantity of copper, nickel and cobalt salts added. Copper was precipitated partially by reduction on small traces of undissolved metallic zinc and partially as sulphide in the acid solution. The collected copper was strongly active. Neutralizing the solution and adding ammonium sulphide, the other elements were precipitated and found to be inactive. This confirms the results of Bjerge and Westcott that the long period of zinc is due to copper, probably to the same isotope of copper which is responsible for the longer period of this element. There is only a certain difference between these authors and us with respect to the period (6 hours according to Bjerge and Westcott).

31 - *Gallium* - The 20-minute period (measured electrometrically) is not very sensitive to water ($\alpha = 3$). Half-value thickness of the corresponding β -rays in 0.17 gm/cm² Al. The carrier of this activity is probably an isotope of gallium. In order to test this point, we irradiated gallium nitrate and afterwards added to the solution traces of copper and zinc. Copper was separated as a metallic deposit on zinc powder and zinc as zinc mercury sulphocyanate after adding mercury sulphocyanate. Both elements were found to be inactive.

Besides this 20-minute activity, we have also found, irradiating under water, a new activity which is accompanied by a rather strong γ -radiation; it decays with a period of 23 hours (measured electrometrically).

33 - *Arsenic* - The activity of this element is strongly sensitive to water ($\alpha = 6$). We have measured electrometrically its period (26 hours) and its half-value thickness of the β -rays ($0.16 \text{ gm/cm}^2 \text{ Al}$). For a concentration of the activity, see § 9.

34 - *Selenium* - The activity of this element (period 35 minutes) is sensitive to water ($\alpha = 4$). Irradiated selenious anhydride was dissolved in 30% hydrochloric acid and some arsenious anhydride added to the solution. We precipitated metallic selenium by reduction with gaseous sulphurous anhydride, and found it strongly active. We precipitated from the solution arsenic sulphide and found it inactive. This test seems to rule out also germanium, and we conclude that the activity is due to an isotope of selenium.

35 - *Bromine* - Both activities of this element are sensitive to water. The short-period activity has $\alpha = 10$. The periods have been measured electrometrically; they are 18 minutes and 4.2 hours. The half-value thickness of the γ -rays is for both activities $0.12 \text{ gm/cm}^2 \text{ Al}$, and both are accompanied by γ -rays. For the concentration of the activity see § 9.

38 - *Strontium* - No activity was found after a long and strong irradiation under water.

39 - *Yttrium* - Strongly irradiated yttrium oxide showed only a very weak activity possibly due to impurities. Yttrium absorbs very intensively the slow neutrons (half-value thickness $\delta = 0.015 \text{ gm/cm}^2$). This absorption is accompanied by γ -rays.

40 - *Zirconium* - Strongly irradiated zirconium nitrate showed only a very weak activity probably due to impurities.

41 - *Niobium* - The same as zirconium.

43 - *Rhodium* - The short-period activity is sensitive to water ($\alpha = 15$). Period and half-value thickness of the β -rays have been determined electrometrically (44 seconds; $0.15 \text{ gm/cm}^2 \text{ Al}$). We also made a more accurate measurement in the ionization chamber of the longer period and found it to be 3.9 minutes. The activity is accompanied by a weak γ -radiation. Rhodium absorbs fairly strongly the slow neutrons (half-value thickness 0.3 gm/cm^2): the absorption probably corresponds to the formation of the active isotopes.

46 - *Palladium* - Also the activities of this element are sensitive to water. We find at least two periods: a short one of about a quarter of an hour and one of about 12 hours. McLennan, Grimmett, and Read record a period of 14 hours, which is consistent with our precision.

47 - *Silver* - The two periods have been redetermined with the ionization chamber. They are 22 seconds and 2.3 minutes. They are both very sensitive to water, having $\alpha = 30$ and 15 respectively. To the strong activation of this element corresponds a considerable absorption for slow neutrons (half-value thickness $\delta = 1.2 \text{ gm/cm}^2$).

We added palladium nitrate and rhodium chloride to a solution of irradiated silver nitrate. Adding hydrochloric acid, we precipitated silver which was found active. From the filtered solution we precipitated palladium with dimethylgloxime and rhodium by reduction. Both were inactive. This test is valid only for the longer period, owing to the time employed, and shows that the carrier of the activity is probably an isotope of silver.

48 - *Cadmium* - Cadmium irradiation under different conditions showed several weak activities with various periods not yet identified. Cadmium absorbs with great intensity the slow neutrons. (Half-value thickness 0.013 gm/cm^2). The corresponding cross-section is the largest as yet found for slow neutrons ($\sigma = 10^{-20} \text{ cm}^2$). The absorption is accompanied by an intensive γ -radiation and probably corresponds to the transformation of a stable isotope of cadmium into another stable isotope of the same element.

49 - *Indium* - The activity induced in indium shows three periods: the shortest period (13 seconds) corresponds to an activity sensitive to water ($\alpha = 12$). Also the second period (54 minutes, measured electrometrically) is very sensitive to water. Magnetic deflection experiments show that the corresponding electrons are negative; their half-value thickness is 0.045 gm/cm^2 Al. A still longer period of some hours is recorded by Szilard and Chalmers; ⁽¹⁴⁾ this last activity is either insensitive to water or is only moderately sensitive.

Chemical tests have been made in order to identify the carriers of the last two activities. To a solution of irradiated indium nitrate, silver was added and precipitated as silver chloride; the precipitate was inactive. Afterwards we added to the solution tin, antimony and cadmium and precipitated them as sulphides with sulphuretted hydrogen. The acidity of the solution must be adjusted in such a way as to leave the indium in solution while precipitating the other metals. This precipitate also was inactive; neutralizing the solution, we precipitated the indium sulphide which carried the activity.

Corresponding to the strong activation of indium, it is found that this element has a considerable absorption power for the slow neutrons: half-value thickness $\delta = 0.3 \text{ gm/cm}^2$.

50 - *Tin* - Tin strongly irradiated under water showed no activity.

51 - *Antimony* - We have found an induced activity in this element, decaying with a period of 2.5 days; the activation is sensitive to hydrogenated substances. The half-value thickness for the emitted β -rays is 0.09 gm/cm^2 Al. The following chemical test indicates that the carrier of this activity is probably an isotope of antimony. We dissolved metallic irradiated antimony in aqua regia and added some tin to the solution; after separation of tin as a sulphide according to Clarke, we found the activity in a precipitate of sulphide of antimony. The antimony sulphide was then dissolved again; indium was added to the solution and antimony separated as a sulphide in a moderately acid solution; the solution was neutralized and indium precipi-

(14) « Nature », vol. 135, p. 493 (1935).

tated and found to be inactive. To a new solution of the antimony we added tellurium and iodine and separated the first by reduction and the second as a silver iodide. Both were inactive.

52 - *Tellurium* - Shows a weak activity sensitive to water; the period resulted 45 minutes instead of 30 as given in our former paper.

53 - *Iodine* - Period and half-value thickness of the β -rays were determined electrometrically: period 25 minutes; half-value thickness 0.11 gm/cm² Al. The activation is moderately sensitive water ($\alpha = 5$). For the concentration of the activity see § 9.

56 - *Barium* - A new activity sensitive to water ($\alpha = 8$) with a period of 80 minutes has been found. The following chemical test is in favour of the assumption that the carrier of this activity is an isotope of barium. We dissolved irradiated barium hydroxide in hydrochloric acid, and added a small quantity of sodium chloride and precipitated barium sulphate. The activity was carried by the precipitate; we evaporated the solution and found the residual sodium to be inactive.

57 - *Lanthanum* - No activity was found after strong irradiation under water.

58 - *Cerium* - Same as lanthanum.

59 - *Praseodymium* - The short-period activity (5 minutes) is insensitive to water. Irradiating under water we have found a new water-sensitive activity decaying with a period of 19 hours; half-value thickness of the corresponding β -rays 0.12 gm/cm² Al (both measured electrometrically).

64 - *Gadolinium* - We irradiated under water a very pure sample of gadolinium oxide kindly given to us, together with the other rare earths, by Professor L. Rolla. We found an activity, decaying with a period of 8 hours.

73 - *Tantalum* - Only a dubious activity was found after 12 hours' irradiation under water with 500 millicuries.

74 - *Tungsten* - Metallic tungsten was irradiated under water and showed an activity ($\alpha = 15$) decaying with a period of about 1 day.⁽¹⁵⁾

We irradiated tungstic anhydride, dissolved it in caustic soda and then added and separated tantalum pentoxide which was found to be inactive. To the tungstic solution we added a nitric rhenium solution and precipitated the tungstic anhydride adding hydrochloric acid. The precipitate carried the activity, while the rhenium, precipitated from the filtrate as sulphide, was inactive. As we have no hafnium, we have made the following experiment in order to exclude an isotope of this element as carrier of the activity. From a solution of irradiated tungstic anhydride in ammonia, we precipitated zirconium hydroxide. The precipitate was inactive. We conclude that the activity of tungsten is probably due to an isotope of this element.

75 - *Rhenium* - We irradiated pure metallic rhenium under water; its activity is enhanced by water and decays with a period of about 20 hours. The half-value thickness of the electrons is 0.12 gm/cm² Al. The activity

(15) Cf. McLENNAN, GRIMMETT, and READ, «Nature», vol. 135, p. 147 (1935).

is probably carried by an isotope of rhenium. Irradiated rhenium was dissolved in nitric acid; we added tantalum and tungsten and separated them as tantalum pentoxide and tungstic anhydride. Both were inactive, while rhenium conserved the activity.

77 - *Iridium* - The activity induced in this element is strongly sensitive to water. Period and half-value thickness of the β -rays have been measured in the ionization chamber; period 19 hours, half-value thickness 0.12 gm/cm² Al. To the strong activation of iridium corresponds a strong absorption of the slow neutrons; half-value thickness 0.3 gm/cm²; the absorption is accompanied by the emission of γ -rays.

78 - *Platinum* - Very pure metallic platinum (Heraeus 4th purity standard) irradiated under water showed an activity decaying with a period of about 50 minutes. McLennan, Grimmett, and Read (*loc. cit.*) record a period of 36 minutes.

79 - *Gold* - The activity of this element is sensitive to water; its period has been measured electrometrically and is 2.7 days. The β -rays were magnetically deflected and found to be negative. They have a very small penetrating power: half-value thickness 0.04 gm/cm² Al⁽¹⁶⁾.

80 - *Mercury* - No activity was found after strong irradiation. This element absorbs intensely the slow neutrons, half-value thickness 0.2 gm/cm². γ -rays are emitted during the absorption.

81 - *Thallium* - No activity was found after strong irradiation.

82 - *Lead* - The same as thallium.

83 - *Bismuth* - The same as thallium.

90 - *Thorium* - The 1-minute and 24-minute (measured electrometrically) periods are scarcely sensitive to water.

92 - *Uranium* - We have also studied the influence of hydrogenated substances on the induced activities of this element. (Periods 15 seconds, 40 seconds, 13 minutes, 100 minutes). The result was that while the activities corresponding to the first, third and fourth period are slightly increased by water, no increase was found for the activity corresponding to the 40-second period. We have measured the increase in activity for the 15-second, 13-minute, and 100-minute activities. We have found for all these α = about 1.6. For the 15-second activity the measurement was made with the counters and, owing to the shortness of the period, is not very exact. The α values for the other two activities have been measured in the ionization chamber, special care being taken in order to verify that the α values for these two periods are equal. For this we compared three decay curves of the activity obtained by irradiating the same amount of uranium oxide for 14 hours, once in air placing the uranium around the source inside a test tube; once in the same geometrical disposition surrounding the test tube with paraffin, and once inside a large mass of paraffin placing the source at about 5 cm from the test tube containing the uranium. In all these tests we found that the decay curves were proportional, *i.e.*, showed the same ratio of the two activities. We think, therefore, that the test on the

(16) Gold bombarded with slow neutrons emits a strong γ -radiation.

identity of the sensitivities to water for these two periods is rather more accurate than the absolute value of the sensitivity coefficient and also than the identity in sensitivity coefficient with the 15-second activity. It is now evident that all the active products arising from the same primary process must have the same sensitivity coefficient. We conclude, therefore, that the 40-second activity is due to an independent primary process while the other three activities are probably due to the same primary process. This conclusion is limited by the possibility of a chance coincidence of the sensitivity coefficients within the rather wide limits of our precision. In this assumption the three activities could either be chain products (the short-period activities being parents of the long-period activities) or their relations could be complicated by branching phenomena. A certain amount of evidence in favour of the former assumption, at least as regards the 13-minute and the 100-minute periods, is given by the following test. We have measured on the electrometer the decay curves of a thick layer of irradiated uranium; these curves analysed in exponentials with the periods 13 minutes and 100 minutes show that the initial activities are in the ratio of about 100:45. The half-value thickness for the β -rays of the 13-minute activity is 0.14 gm/cm² Al; for the longer period it could not be measured with any accuracy, but is definitely less than the former value and probably about a half. These results are consistent with the assumption that the number of disintegrations for the 13-minute and the 100-minute periods is equal.

In our former paper we gave some chemical evidence which seemed to indicate that the carriers of the 13-and the 100-minute activities were not isotopes of any of the known heaviest elements, and that they were probably due to transuranic elements. Our point of view has in the meantime been criticized by von Grosse and Agruss⁽¹⁷⁾ who, although never having experimented on activated uranium, deduced from our chemical tests the opposite conclusion, that these activities were due to isotopes of protactinium. We have therefore performed some new chemical experiments on the behaviour of these activities.

The precipitation of the activity with a sulphide was repeated, precipitating several metals (silver, copper, lead, mercury); the acidity of the solution (hydrochloric acid) was about 20%; sometimes slightly varied in order to facilitate the precipitation of the sulphide of the metal used. The yield in activity of the precipitate was generally good—about 50%—and varied according to the conditions of the precipitation. Nitric acid lowers the yield of the reaction very much. The usual high yield of the sulphide reaction is also obtained in presence of a hydrofluoric solution of tantalum. We also made a test in order to see whether the induced activities presented a reaction which is given by von Grosse as the most characteristic of protactinium.

We dissolved in a 25% hydrochloric acid solution uranium oxide which had been purified and irradiated; we added to the solution zirconium nitrate

(17) «Phys. Rev.», vol. 46, p. 241 (1934).

and phosphoric acid; the precipitate of zirconium phosphate was inactive. After the separation of zirconium we precipitated a sulphide from the filtered solution, and collected the activity in the sulphide with the usual yield. According to von Grosse and Agruss, this reaction must be considered a proof of the non-identity of the carrier of the activity with a protactinium isotope.

By different chemical experiments, Hahn and Meitner⁽¹⁸⁾ conclude also that the 13-and 100-minute activities are very probably due to transuranic elements; we have repeated some of their experiments finding the same results.

The two activities have beyond doubt a similar chemical behaviour. Some slight evidence of a possible separation was obtained only in the following experiment. Carefully purified uranium oxide was irradiated and dissolved in hydrochloric acid. The solution was poured into an ammonium carbonate solution until the uranium precipitate was completely dissolved again. Adding lead or manganese nitrate, we collected the precipitate of carbonates and found it to carry a fraction of the 13-and 100-minute activities. In the filtrate we precipitated copper sulphide, and this also carried a fraction of the activities. It seems that the ratio of the two activities was somewhat different in the two precipitates, the 13-minute activity being more abundant in the sulphide precipitate.

Through these experiments our hypothesis that the 13-minute and 100-minute induced activities of uranium are due to transuranic elements seems to receive further support. The simplest interpretation consistent with the known facts is to assume that the 15-second, 13-minute and 100-minute activities are chain products, probably with atomic number 92, 93 and 94 respectively and atomic weight 239.

We express our warmest thanks to Professor G. C. Trabacchi who supplied us with the radon sources. Our thanks are due also to Professor L. Rolla who placed at our disposal some rare earths, to Dr. G. Fea for help in the experiments and to the Consiglio Nazionale delle Ricerche for making a grant.

(18) «Naturwiss.», vol. 23, p. 37 (1935).

Element	Isotopes	Half-periods	Half-value thickness gm/cm ² Al	γ-rays	Sensitivity to hydrogen	Carrier of the activity	δ gm/cm ²
¹ H	¹ , 2, 3	—					
² H ^e	3, 4	—					
³ Li	6, 7	—					
⁴ Be	9	—					
⁵ B	¹⁰ , ¹¹	—					
⁶ C	¹² , ¹³	—					
⁷ N	¹⁴ , ¹⁵	—					
⁸ O	¹⁶ , ¹⁷ , ¹⁸	—					
⁹ F	¹⁹	—					
¹⁰ Ne	²⁰ , ²¹ , ²²	—					
¹¹ Na	²³	—					
¹² Mg	²⁴ , ²⁵ , ²⁶	—					
¹³ Al	²⁷	—					
¹⁴ Si	²⁸ , ²⁹ , ³⁰	—					
¹⁵ P	³¹	—					
¹⁶ S	³² , ³³ , ³⁴	—					
¹⁷ Cl	³⁵ , ³⁷	—					
¹⁸ A	³⁶ , ³⁸ , ⁴⁰	—					
¹⁹ K	³⁹ , ⁴¹	—					
²⁰ Ca	⁴⁰ , ⁴² , ⁴³ , ⁴⁴	—					
²¹ Sc	⁴⁵	—					
²² Ti	⁴⁶ , ⁴⁷ , ⁴⁸ , ⁴⁹ , ⁵⁰	—					
²³ V	⁵¹	—					
²⁴ Cr	⁵⁰ , ⁵² , ⁵³ , ⁵⁴	—					
²⁵ Mn	⁵⁵	—					
²⁶ Fe	⁵⁴ , ⁵⁶	—					
²⁷ Co	⁵⁹	—					
²⁸ Ni	⁵⁶ , ⁵⁸ , ⁶⁰ , ⁶¹ , ⁶⁴	—					
²⁹ Cu	⁶³ , ⁶⁵	—					
³⁰ Zn	⁶⁴ , ⁶⁶ , ⁶⁷ , ⁶⁸ , ⁷⁰	—					
³¹ Ga	⁶⁹ , ⁷¹	—					
³² Ge	⁷⁰ , ⁷² , ⁷³ , ⁷⁴ , ⁷⁶	—					
³³ As	⁷⁵	—					
³⁴ Se	⁷⁴ , ⁷⁶ , ⁷⁷ , ⁷⁸ , ⁸⁰ , ⁸²	—					
³⁵ Br	⁷⁹ , ⁸¹	—					
³⁶ Kr	⁷⁸ , ⁸⁰ , ⁸² , ⁸³ , ⁸⁴ , ⁸⁶	—					
³⁷ Rb	⁸⁵ , ⁸⁷	—					
³⁸ Sr	⁸⁶ , ⁸⁷ , ⁸⁸	—					
³⁹ Xe	⁸⁹	—					
⁴⁰ Zr	⁹⁰ , ⁹¹ , ⁹² , ⁹⁴ (96)	—					

42 Mo	92, 94, 95, 96, 97, 98, 100	30 m; 36 h		>3
43 Ma	96, 98, 99, 100, 101, 102, 104	44 s; —	>3	<2
44 Ru	107, 109	15 m; 3.9 m	0.3	1.2
45 Rh	106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115	22 s; 2.3 m	—; 0.08	—; Ag
46 Pd	116	?	30 s; 15	0.013
47 Ag	113, 115	13 s; 54 m; 3 h (?)	—; 0.045; —	—; In; In
48 Cd	112, 114, 115	—	yes	12; a; —
49 In	121, 122, 124	2.5 d	yes	>10
50 Sn	121, 123	45 m	yes	>10
51 Sb	122, 123, 124, 125, 126, (127), 128, 130	25 m	yes	4
52 Te	127	—	yes	Sb
53 I	124, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 136	—	yes	¹²⁸ I
54 Xe	133	—	yes	5
55 Cs	135, 136, 137, 138	—	yes	1.5
56 Ba	139	3 m; 80 m	yes	8
57 La	140, 142	—	yes	—; Ba
58 Ce	141	5 m; 19 h	yes	—; a
59 Pr	142, 143, 144, 145, 146	1 h	yes	1.5
60 Nd	144, 147, 148	40 m	yes	—; 0.12
61 Sm	151, 153	8 h	yes	—
62 Eu	155, 156, 157, 158	—	yes	a
63 Gd	159	—	yes	—
64 Tb	161, 162, 163, 164	—	yes	—
66 Dy	165	—	yes	—
67 Ho	166, 167, 168, 170	—	yes	—
68 Er	169	—	yes	—
69 Tm	171, 172, 173, 174, 176	—	yes	W
70 Yb	175	—	yes	¹⁵ W
71 Lu	176, 177, 178, 179, 180	—	yes	R _e
72 Hf	181	—	yes	Ir
73 Ta	182, 183, 184, 186	—	yes	Au
74 W	185, 187	—	yes	2
75 Re	186, 187, 188, 189, 190, 192	—	yes	0.2
76 Os	—	—	yes	>6
77 Ir	—	—	yes	>10
78 Pt	—	—	yes	—
79 Au	196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204	2.7 d	yes	1.6; ¹ ; ¹ ; ¹ .6
80 Hg	203, 204	—	yes	See § 1.6
81 Tl	203, 205	—	yes	1.6; ¹ ; ¹ ; ¹ .6
82 Pb	203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210	—	yes	1.6; ¹ ; ¹ ; ¹ .6
83 Bi	209	—	yes	1.6; ¹ ; ¹ ; ¹ .6
92 U	232	—	yes	1.6; ¹ ; ¹ ; ¹ .6
	238	1 m; 24 m 15 s; 40 s; 13 m 100 m	yes	1.6; ¹ ; ¹ ; ¹ .6

§ 12. - TABULAR SUMMARY.

The main results of radioactivity induced by neutron bombardment are summarized in the table. Column 1 contains the atomic numbers and symbols of the elements investigated. Column 2 gives the isotopic constitution; numbers in bold type refer to isotopes which represent more than 20% of the element. Column 3 gives the observed half-value periods in order of increasing magnitude. Column 4 gives the half-value thickness of the β -rays in gm/cm² of aluminium; the mean energy of the β -rays in millions volts might be very roughly obtained by multiplying the figure of column 4 by 8. Column 5 indicates whether γ -rays have been observed to accompany the β -disintegration. Column 6 indicates the carrier of the activity. Column 7 gives the sensitivity of the activation to hydrogenated substances; this is given either by the numerical value of the sensitivity coefficient (for definition see § 1; sensitivity coefficient 1 means that the activation is not enhanced by hydrogenated substances) or by the letter a , which means that the activation is increased by hydrogenated substances, but the sensitivity coefficient has not been measured. Column 8 gives the half-value thickness for the absorption of the slow neutrons.

In a few cases the periods of products, known from chemical evidence to be equal, but obtained by bombardment of different atoms are given as equal, even when measured very accurately only in one case. The same holds for some half-value thicknesses of β -rays.