

SULLE PROPRIETÀ DEI NEUTRONI LENTI (1)

Nota di BRUNO PONTECORVO

Sunto. - *Si descrive una serie di esperimenti che permettono di studiare le proprietà geometriche (diffusione, efficacia in funzione della distanza ecc.) dei neutroni rallentati attraverso urti multipli contro nuclei di idrogeno. Si discute quindi il problema della velocità dei neutroni e si descrivono alcuni esperimenti in proposito. Si studia infine l'effetto di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata da bombardamento di neutroni.*

Recentemente nell'Istituto Fisico della R. Università di Roma è stato osservato (2) che la radioattività provocata da bombardamento di neutroni è molto influenzata dalla presenza di sostanze idrogenate circostanti la sorgente di neutroni e il corpo irradiato; precisamente quando il principio attivo dell'elemento irradiato è isotopo dell'elemento stesso, si trova che la presenza di sostanze idrogenate aumenta enormemente l'intensità della attivazione, del resto in maniera differente a seconda dell'elemento irradiato; se invece il principio attivo dell'elemento irradiato non è isotopo dell'elemento stesso, la presenza di sostanze idrogenate non altera sensibilmente l'intensità della attivazione. Sembra naturale spiegare l'effetto delle sostanze idrogenate con l'ipotesi dei neutroni lenti, con l'ipotesi cioè che i neutroni per urti multipli contro nuclei d'idrogeno perdano rapidamente la propria energia; non insistiamo sull'ipotesi dei neutroni lenti e sulle considerazioni teoriche connesse (3) rimandando agli

(1) Questo lavoro va letto in connessione con quelli di E. FERMI e F. RASETTI, E. AMALDI, E. SEGRÈ pubblicati su questo numero del « Nuovo Cimento » e con quello di O. D'AGOSTINO pubblicato sulla « Gazzetta Chimica »; di queste note la presente fa parte integrante.

(2) FERMI, AMALDI, PONTECORVO, RASETTI, SEGRÈ, « Ric. Scient. », 2, 280, 1934; FERMI e RASETTI, loc. cit..

(3) FERMI e RASETTI, loc. cit..

altri lavori citati, anche per ciò che riguarda le sezioni d'urto per cattura dei neutroni lenti (FERMI e RASETTI), i nuovi radioelementi trovati (AMALDI), le nuove misure eseguite (SEGRÈ) e infine la parte chimica di queste ricerche (D'AGOSTINO). L'insieme dei risultati ottenuti con ricerche sui neutroni lenti è riassunto in un lavoro di E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E SEGRÈ ⁽¹⁾.

Scopo di questa nota è riferire sulle proprietà dei neutroni lenti e sull'effetto di sostanze non idrogenate sulla radioattività provocata da bombardamento di neutroni; notizie preliminari su questi esperimenti sono contenute nella « Ricerca scientifica » ⁽²⁾. WESTCOTT e BJERGE hanno in parte ripetuto ⁽³⁾ gli esperimenti descritti in questa nota, confermando sostanzialmente i nostri risultati.

Considerazioni generali sui dispositivi sperimentali.

§ 1. Si può dire che ogni dispositivo adatto a esperimenti del genere di quelli da noi fatti, deve constare oltre che di elementi variabili a seconda della esperienza che si vuole eseguire, dei seguenti elementi:

- a) Una sorgente di neutroni;
- b) Un dispositivo per il rallentamento dei neutroni;
- c) Un rivelatore della intensità dei neutroni.

La sorgente di neutroni era costituita da un tubetto di vetro saldato, col diametro esterno di 6 mm. circa, lunga 15 mm., nel quale era contenuto del berillio con emanazione di radio. Si ritiene generalmente che una sorgente di questo genere emetta circa 1000 neutroni al secondo per millicurie di radon. Non potendosi avere, allo stato attuale della tecnica, una sorgente monocromatica di neutroni, sarebbe stato almeno estremamente interessante, ai fini delle nostre esperienze, conoscere la distribuzione delle velocità dei neutroni della sorgente $Rn + Be$; disgraziatamente tale distribuzione non è nota, potendosi soltanto affermare che si tratta di uno spettro continuo di energie che si estende da 0 a 7 o 8 milioni di volt; sembra inoltre che vi sia una piccola percentuale di neutroni aventi energie fino a

(1) AMALDI, D'AGOSTINO, FERMI, PONTECORVO, RASETTI, SEGRÈ, « Proc. Roy. Soc. », **149**, 535, 1935.

(2) FERMI, AMALDI, PONTECORVO, RASETTI, SEGRÈ, « Ric. Scient. », **2**, 280, 1934; FERMI, PONTECORVO, RASETTI, « Ric. Scient. », **2**, 380, 1934; AMALDI, D'AGOSTINO, FERMI, PONTECORVO, RASETTI, SEGRÈ, « Ric. Scient. », **2**, 467, 1934; **1**, 123, 1935.

(3) WESTCOTT e BJERGE, « Proc. Camb. Phil. Soc. », **31**, 145, 1935.

15 milioni di volt; diciamo incidentalmente che avviene talvolta che esperienze eseguite sui neutroni lenti diano utili indicazioni sullo spettro dei neutroni primari emessi dalla sorgente. La quantità di emanazione usata variava da 400 a 800 millicurie. Per il rallentamento dei neutroni con nuclei di idrogeno, la sorgente veniva posta o dentro l'acqua o entro blocchi di paraffina di forma variabile a seconda della esperienza da eseguire. La intensità dei neutroni lenti veniva misurata dalla attivazione prodotta in un elemento assunto come rivelatore, per es. il sodio o l'argento; la radioattività provocata nel rivelatore veniva studiata a mezzo di contatori di GEIGER-MÜLLER o, nel caso che le condizioni geometriche della esperienza permettessero una intensità della attivazione sufficiente, a mezzo di una camera di ionizzazione a pressione collegata a un elettrometro di PERUCCA. Quando è possibile eseguire misure con la camera di ionizzazione, il vantaggio dell'uso di questa su quello del contatore è grandissimo, perchè evidentemente in tempo molto più breve si compiono delle misure notevolmente più precise; a questo bisogna aggiungere che la probabilità di un disfunzionamento di una camera di ionizzazione è molto più piccola della analoga probabilità per il caso di un contatore. La camera di ionizzazione è descritta altrove ⁽¹⁾; essa era piena di CO_2 a 3 atmosfere. L'uso del rodio come rivelatore di neutroni lenti presenta notevoli vantaggi, perchè il rodio, oltre al periodo più debole di $3,9^m$, ha un periodo soltanto di 44^s , con « coefficiente di sensibilità ⁽²⁾ alle sostanze idrogenate » $\alpha = 15$, con intensissima attività. Si può quindi irradiare un pezzo di rodio per tempo brevissimo e, senza perdita di tempo, ripetere le esperienze con lo stesso pezzo di rodio, la cui attività può considerarsi nulla dopo alcuni minuti dall'irradiamento; l'argento (periodo 140^s) presenta rispetto al rodio lo svantaggio di avere una intensità minore.

Efficacia dei neutroni lenti.

§ 2. Si potrebbe pensare che l'enorme aumento della intensità della attivazione dovuto alla presenza di sostanze idrogenate fosse da ascriversi non alla maggior efficacia di quelli lenti su quelli veloci, ma a un aumento del numero di neutroni che incontrano il rivelatore; se infatti pensiamo di porre la sorgente dentro a un cilindretto, per es. di argento, e di circondare il tutto con paraffina, si capisce che il rivelatore è investito non soltanto dagli stessi neu-

⁽¹⁾ E. SEGRÈ, loc. cit..

⁽²⁾ E. SEGRÈ, loc. cit..

troni che lo colpirebbero in assenza di paraffina, ma anche da quelli diffusi indietro in seguito a urti con protoni. La differente azione tra neutroni lenti e veloci può peraltro mettersi in evidenza cambiando le condizioni della esperienza; abbiamo anzitutto constatato che la attivazione diretta da parte di una sorgente di 350 mC di $Rn + Be$, posta a 20 cm di distanza da un cilindretto di argento, è trascurabile; abbiamo allora immerso la sorgente al centro di un vaso cilindrico di acqua del diametro di 14 cm.: l'argento, ancora a 20 cm di distanza dalla sorgente, si attiva fortemente dando, nei nostri contatori, un centinaio di impulsi al minuto, cioè circa quanti se ne otterrebbero ponendo il cilindretto a contatto con la sorgente, senza acqua. L'esperienza rivela la enorme efficacia dei neutroni lenti, perchè permette di confrontare l'azione dello stesso numero di neutroni, con velocità differente: basta infatti osservare che 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.

È interessante studiare come varia l'attivazione prodotta per es. nell'argento (neutroni lenti) all'esterno di una sfera di acqua contenente la sorgente, al variare del raggio della sfera; nella esperienza si sono usati cilindri di vetro pieni di acqua, con diametro uguale alla altezza; la distanza tra la sorgente, posta al centro del cilindro, e il cilindretto di argento era di 20 cm. Si trova che l'intensità della radioattività provocata nell'argento, misurata con un contatore, cresce dapprima rapidamente, al crescere del raggio del cilindro; ha un massimo per un valore del raggio di circa 8 cm, e cala grosso modo esponenzialmente al crescere ulteriore del raggio del cilindro di acqua. L'interpretazione della curva sperimentale dell'attività in funzione del raggio è assai semplice, nell'ipotesi dei neutroni lenti: per un certo tratto della curva al crescere del raggio della sfera aumenta la percentuale dei neutroni rallentati, e quindi la attivazione; l'assorbimento dei neutroni lenti (sintesi del deutone) da parte di nuclei di idrogeno è responsabile del tratto discendente della curva.

Attivazione in funzione della distanza.

§ 3. È molto importante conoscere come varia la densità del « gas di neutroni » al variare della distanza dalla sorgente; se i neutroni si propagassero rettilineamente, senza subire urti contro nuclei di sostanze circostanti, la attivazione del rivelatore varierebbe eviden-

temente in ragione inversa del quadrato della distanza dalla sorgente; la presenza di sostanze circostanti ha per effetto di alterare tale legge; in ambiente idrogenato ci si può attendere a priori di trovare un decremento dell'attività piuttosto lento al crescere della distanza. La curva che riportiamo (fig. 1) è stata rilevata con una

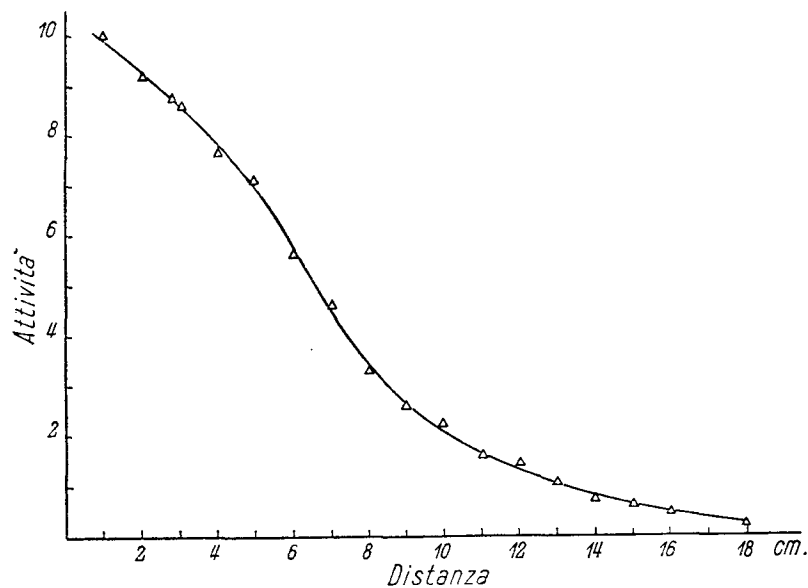


Fig. 1

sorgente $Rn + Be$ immersa in H_2O ; è bene osservare a questo proposito che la forma della curva varia al variare della sorgente impiegata, perchè dipende notevolmente dalla distribuzione delle velocità dei neutroni primari emessi; si può anzi aggiungere a questo proposito che il confronto tra due curve di attivazione in funzione della distanza ottenute con sorgenti diverse, può dare utili indicazioni sulle differenze esistenti tra gli spettri dei neutroni primari emessi dalle dette sorgenti.

La sorgente era immersa in un vaso di acqua di dimensioni 40 cm \times 40 cm \times 100 cm; l'intensità dell'attivazione provocata nel rivelatore di rodio veniva misurata con una camera di ionizzazione collegata a un elettrometro di Perucca, per modo che i punti della curva sono conosciuti con notevole precisione.

Un esperimento simile a quello descritto è stato fatto sostituendo all'acqua una soluzione di H_3BO_3 al 2%; a causa della enorme sezione d'urto che il boro presenta per i neutroni lenti, la attivazione

diminuisce molto; tuttavia la forma della curva non cambia sensibilmente

Il fatto che la attivazione decresca lentamente con la distanza ha molta importanza pratica, nelle ricerche di radioattività provocata da bombardamento di neutroni, perchè dà modo di studiare contemporaneamente molti elementi con una sola sorgente, senza che occorra lottare contro i fattori geometrici che intervengono quando la irradiazione viene fatta in aria invece che in acqua.

Diffusione dei neutroni lenti.

§ 4. Nella fig. 2 è mostrato un dispositivo adatto allo studio della diffusione dei neutroni lenti da parte delle diverse sostanze: la sorgente *S* di neutroni viene posta, a 3 cm dalla base superiore, sull'asse di un blocco cilindrico di paraffina *P*, di 24 cm di diametro

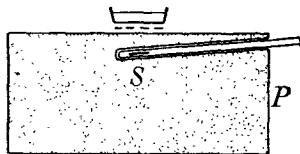


Fig. 2

e 14 cm di altezza. Sulla base superiore viene collocata una lastrina di rodio; il confronto tra l'attività così ottenuta nel rodio con quella che si ha ricoprendo la lastrina con diverse sostanze dà un'idea della diffusione dei neutroni lenti da parte delle sostanze stesse. Le misure sono state fatte con una camera di ionizzazione. Si è trovato un aumento ben netto della attivazione ricoprendo la lastrina di rodio con carbone (uno strato di parecchi cm di spessore arriva a quintuplicare l'attività). Simili risultati si ottengono con alcuni elementi leggeri, come il berillio e il silicio, dei quali anche un piccolo strato produce un aumento sensibile della attivazione. Gli elementi pesanti per contro non danno generalmente questo effetto.

Il boro, che presenta un assorbimento enorme per neutroni lenti, non dà un apprezzabile incremento della attività. Questi risultati devono essere connessi con quanto sarà detto al paragrafo 6, sull'effetto di sostanze non idrogenate sulla attivazione.

Col dispositivo della fig. 2 abbiamo anche fatto esperimenti sull'acqua, ottenendo la curva (fig. 3) della intensità della attivazione del rodio in funzione dei cm di spessore di acqua sovrapposti; si vede che uno spessore di 1 cm di acqua sovrapposto alla lastrina di rodio appoggiata sulla paraffina raddoppia circa la attivazione:

per spessori maggiori l'incremento dell'attività si va facendo più lento.

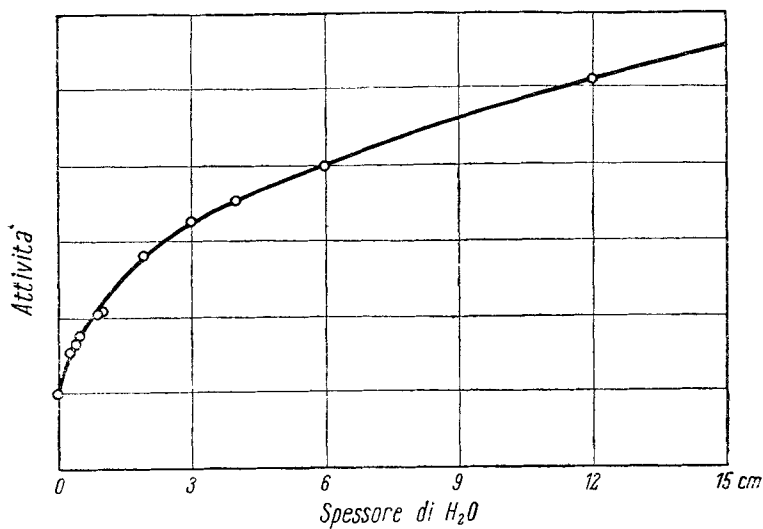


Fig. 3

Analogo risultato si ottiene ricoprendo il rodio con spessori di paraffina.

Altri esperimenti sulla diffusione sono stati fatti col dispositivo mostrato schematicamente in fig. 4: nel centro di un cilindro di

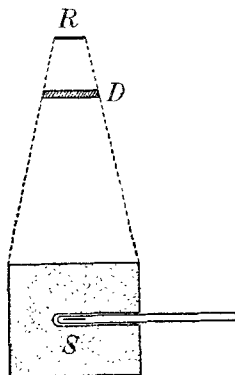


Fig. 4

paraffina di 13 cm di diametro e 11 cm di altezza è posta la sorgente S ; il rivelatore R è un cilindretto di una sostanza attivabile posto a una distanza di 30 cm dalla sorgente. Tra il cilindro di

paraffina e il rivelatore, a 6 cm dal rivelatore, si interpone uno schermo D della sostanza diffondente; le condizioni geometriche sono scelte in modo che D intercetta esattamente i neutroni provenienti dal cilindro di paraffina. La differenza tra le attivazioni del rivelatore, con e senza il diffusore D , è dovuta a un effetto di diffusione + assorbimento. Con questo dispositivo le misure richiedono conteggi assai lunghi al contatore di Geiger-Müller, perchè l'intensità dell'attivazione non è sufficiente per misure con la camera di ionizzazione. Usando per rivelatore l'argento, con un diffusore di paraffina, si trova che $0,5 \text{ gr/cm}^2$ riducono l'attivazione a metà: la curva di assorbimento tuttavia non è esponenziale, il che del resto si comprende tenendo presente che la distribuzione di velocità dei neutroni è continua.

Usando per rivelatore il rodio si trova lo stesso risultato, dal quale sembra si possa concludere che il libero cammino medio dei neutroni lenti nella paraffina sia dell'ordine di 7 o 8 mm; l'espe-

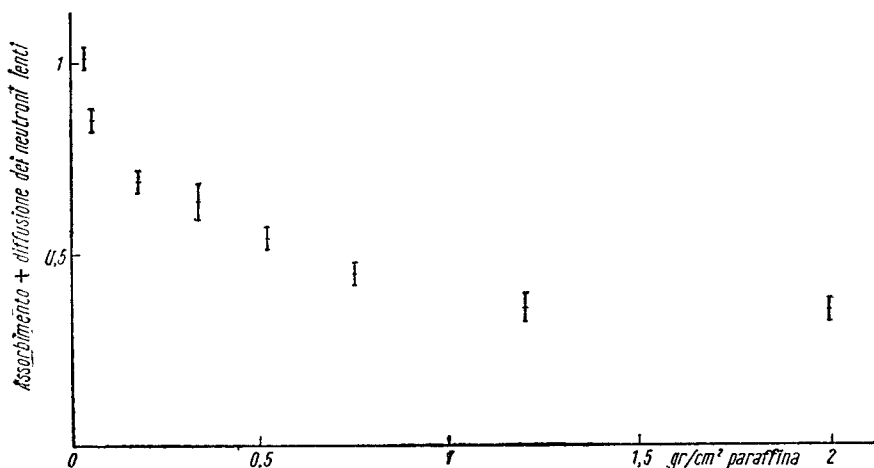


Fig. 5

rienza fatta con diversi spessori di acqua, non ha dato risultati sostanzialmente dissimili. Nella fig. 5 è rilevata la curva di assorbimento + diffusione della paraffina, usando come rivelatore il rodio.

Sempre col dispositivo schematizzato in fig. 4, si trova che 5 gr/cm^2 di carbonio riducono circa a metà l'attivazione; $3,45 \text{ gr/cm}^2$ di piombo riducono nel rapporto $0,83 \pm 0,07$: tale valore è da attribuirsi alla diffusione, perchè sappiamo che uno strato di $3,45 \text{ gr/cm}^2$ di piombo non assorbe praticamente (cfr. FERMI e RASSETTI, l. cit.) i neutroni lenti.

Energia dei neutroni lenti.

§ 5. Il problema della energia dei neutroni lenti presenta molte difficoltà, perchè non è facile immaginare esperienze conclusive in proposito.

Poichè in un urto elastico neutrone-protone (cfr. FERMI e RASSETTI, l. cit.) l'energia del neutrone viene ridotta per un fattore $\frac{1}{e}$, una ventina di urti successivi ridurrebbe l'energia dei neutroni primari, per es. di $4 \cdot 10^6$ Ve , ai valori competenti all'energia di agitazione termica; se veramente l'energia dei neutroni lenti si riducesse all'energia termica, ci si potrebbe attendere che la temperatura influisse sul processo di diffusione dei neutroni. Per chiarire l'influenza della temperatura sulla densità del gas di neutroni, abbiamo fatto la seguente esperienza.

Il rivelatore di rodio o di argento era irradiato con una sorgente $Rn + Be$, prima in paraffina a $200^\circ C$, poi nelle stesse condizioni geometriche, a $20^\circ C$ in un miscuglio di pentano e benzolo avente, a questa temperatura, la stessa densità e composizione elementare che la paraffina a $200^\circ C$. Nei due casi non si è riscontrata alcuna differenza nella attivazione misurata con una camera di ionizzazione connessa a un elettrometro di Edelman. La pentola in cui veniva posta la paraffina e il miscuglio di pentano e benzolo era di forma cilindrica, con diametro di 26 cm e altezza di 15 cm; il rivelatore nelle due prove era irradiato a 1 cm dal pelo libero del liquido e a 2 cm dalla sorgente. Si può concludere che la temperatura, almeno nelle condizioni della esperienza, non abbia influenza sulla attivazione; ciò potrebbe interpretarsi ammettendo che l'energia dei neutroni attivanti sia maggiore dell'energia termica; tuttavia l'esperimento non deve assolutamente ritenersi conclusivo, perchè nulla si sa della sezione d'urto per l'attivazione e del libero cammino medio di neutroni lentissimi.

Abbiamo anche fatto il seguente esperimento sui neutroni emessi da una sorgente di tipo « raggi $\gamma + Be$ ». L. SZILARD e T. CHALMERS ⁽¹⁾, L. MEITNER ⁽²⁾ hanno osservato che, usando come sorgente di neutroni del berillio sottoposto all'azione dei raggi γ , si attivano soltanto gli elementi che rimangono isotopi di sè stessi. Poichè i neutroni rallentati nella paraffina godono della stessa proprietà, abbiamo ricercato se i neutroni di SZILARD e CHALMERS fossero assor-

⁽¹⁾ SZILARD e CHALMERS, « Nature », **134**, 494, 1934.

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

biti notevolmente da un elemento, come il cadmio, 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 radio circondato da berillio; l'attivazione di un cilindretto di rodio non diminuiva sensibilmente quando la sorgente era protetta da 0,5 gr/cm² di cadmio (misure eseguite con un contatore). Ciò può interpretarsi ammettendo che i neutroni di SZILARD e CHALMERS siano notevolmente più veloci di quelli rallentati in paraffina. Questa conclusione del resto può dedursi anche dal fatto che i neutroni di SZILARD e CHALMERS sono sensibili alle sostanze idrogenate.

Effetto di sostanze non idrogenate sulla radioattività provocata da bombardamento di neutroni.

§ 6. Ci si può porre la domanda se un effetto sulla attivazione analogo a quello dell'acqua e della paraffina possa essere prodotto da sostanze non idrogenate.

In mancanza di grandi quantità di diversi elementi, che occorrebbero per esperienze di questo genere, sono state sperimentate soltanto le seguenti sostanze: *Pb*, *SiO₂*, *C*, *Fe*. Si è trovato che tutte queste sostanze, ad eccezione del ferro, producono un aumento ben netto della attività indotta nel rodio; nelle nostre condizioni geometriche l'effetto consiste in un incremento dell'attivazione per un fattore da 2 a 5: l'effetto prodotto dall'acqua, nelle stesse condizioni geometriche di irradiazione, consisterebbe in un incremento dell'attivazione per un fattore di alcune centinaia. Diamo i dettagli degli esperimenti, che infine discuteremo.

L'attività era misurata con un contatore di Geiger-Müller. Un cilindretto di rodio 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-cilindretto di rodio può ritenersi al centro di una sfera di piombo di 50 cm di diametro.

L'attività indotta nel rodio è circa tre volte maggiore di quella che si ottiene attivando il rodio 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 nell'attivazione dell'argento.

Usando il silicio ($\alpha = 1$), in forma di cilindretto di quarzo, come rivelatore, non si osserva per contro alcun effetto, analogamente a quanto avviene nei mezzi idrogenati. Il fatto che nel silicio

non si osservi incremento di attivazione suggerisce l'ipotesi che il fenomeno abbia la stessa natura di quello che si osserva nelle sostanze idrogenate; abbiamo quindi cercato se la radiazione di neutroni che attiva il rodio in ambiente di piombo sia considerevolmente assorbita dal cadmio, che ha sezione d'urto grandissima per i neutroni rallentati in paraffina, proteggendo il cilindretto di rodio con spessori variabili di cadmio: si trova che il cadmio assorbe notevolmente, dal che sembra potersi concludere che l'effetto del piombo consiste in un rallentamento dei neutroni. La curva di assorbimento del cadmio per i neutroni in ambiente di piombo non è esponenziale: ciò si interpreta osservando che si ha una distribuzione continua di neutroni. La prima riduzione a metà avviene in 1 gr/cm^2 di cadmio; il confronto di questo assorbimento del cadmio con l'assorbimento dello stesso elemento in ambiente idrogenato (riduzione a metà in $0,014 \text{ gr/cm}^2$), mostra che l'energia media dei neutroni nel piombo è molto maggiore di quelli dei neutroni nella paraffina.

L'effetto della grafite sull'attivazione del rodio è più intenso dell'effetto dovuto al piombo; l'intensità dell'attivazione, nel silicio, non aumenta in ambiente di grafite. La radiazione attivante il rodio è assorbita dal cadmio, in misura almeno altrettanto grande che nel caso del piombo. Il volume di grafite a disposizione era assai piccolo (3 litri); un suo aumento potrebbe forse produrre un aumento considerevole degli effetti osservati.

Simili risultati si ottengono con SiO_2 in forma di « Kieselguhr ». Il fatto che in ambiente di ferro non si osservi incremento della attivazione del rodio è probabilmente da attribuirsi alla notevole sezione d'urto che il ferro presenta per i neutroni lenti.

Le misure contenute in questo paragrafo presentano notevoli difficoltà di interpretazione. Nel caso di un elemento pesante come il piombo infatti non sembra possibile spiegare l'incremento dell'attivazione osservato come un rallentamento di neutroni dovuto a urti elastici; poichè sembra, dalle esperienze descritte, che si tratti di un vero e proprio rallentamento, potrebbe pensarsi all'influenza di urti anelastici. D'altra parte non si comprende la ragione per la quale non si constati alcun aumento di attivazione nel silicio: vi dovrebbe essere infatti una parte di neutroni che, essendo diffusi elasticamente, non vengono rallentati in un elemento pesante come il piombo, per modo che, per la presenza del piombo, un maggior numero di neutroni veloci investirebbe il rivelatore di silicio, aumentandone l'attivazione.

Dall'insieme dei risultati sopra esposti segue che la intensifica-

zione della radioattività provocata da neutroni è una proprietà comune a molte sostanze: di questo fatto bisogna sempre tener conto in ricerche sperimentali sulle proprietà geometriche dei neutroni lenti, per evitare effetti nocivi da parte di sostegni, oggetti circostanti, ecc.; appunto per questa ragione i dati contenuti in questo paragrafo non devono ritenersi molto precisi.
