

## 57. SULLA SCISSIONE DELL'URANIO CON NEUTRONI VELOCI.

In un precedente lavoro <sup>(1)</sup> abbiamo esposto i risultati di alcune misure intese a confrontare la sezione d'urto media per scissione dell'uranio, quale si ottiene usando neutroni veloci provenienti da diverse reazioni nucleari. Siamo così riusciti a mostrare che, entro gli errori di misura, ossia entro circa l'8 %, la sezione d'urto media per i neutroni delle reazioni  $D + D$ ,  $D + Be$ ,  $D + B$  sembra essere costante. Questo risultato ci sembra costituire una prova sperimentale del fatto previsto teoricamente da Bohr e Wheeler <sup>(2)</sup>, che la sezione d'urto dell'uranio per il fenomeno di scissione deve rimanere praticamente costante per energie del neutrone superiori a 0,7 MV.

Un'analoga misura eseguita con i neutroni del  $D + Li$  ci ha dato una sezione d'urto circa 1,4 volte maggiore. Per quanto la differenza osservata con i neutroni del  $D + Li$ , rispetto a quella ottenuta con le sorgenti di neutroni sopra nominate, sia assai superiore all'errore da cui sono affette le singole misure, abbiamo ritenuto opportuno ripetere un confronto degli effetti prodotti sull'uranio dai neutroni del  $D + Be$  e del  $D + Li$ , facendo uso di una tecnica diversa.

Infatti potrebbe venire il sospetto che il procedimento usato nelle misure esposte nella nota precedente dia risultati affetti da un errore sistematico dovuto al non tener conto in modo sufficiente dell'anisotropia con cui i neutroni vengono emessi nelle diverse reazioni nucleari.

Ci siamo quindi preoccupati di usare una tecnica in cui si tenesse conto in modo completo sia della anisotropia dei neutroni veloci che della assai minore anisotropia dei neutroni lenti.

Premettiamo che i risultati così ottenuti confermano il fatto precedentemente osservato, ossia che la sezione d'urto dei neutroni della  $D + Li$  aventi uno spettro estendentesi da 0 fino a 15 MV <sup>(3)</sup> è circa 1,4 volte maggiore di quella  $D + Be$  (0-4,6 MV) <sup>(4)</sup>.

Come abbiamo osservato nella nota precedente, per determinare la sezione d'urto media, in misura relativa, basta misurare il rapporto fra il numero di scissioni che si osservano in uno strato di uranio, anche spesso, di forma sferica, col centro nel punto della targhetta colpita dai deutoni, al numero totale dei neutroni incidenti. Come si è fatto notare più volte la necessità di far misure su tutto l'angolo solido è imposta dalla anisotropia con cui i neutroni sono emessi nelle diverse reazioni.

Faremo uso di questo lavoro di alcuni dati già pubblicati nella tabella II del lavoro precedentemente citato; e precisamente del numero  $n$  di scissioni osservate in un minuto nella camera a  $U_3O_8$  posta a 5,7 cm. dal centro della targhetta, in una direzione a  $90^\circ$  con la direzione dei neutroni incidenti <sup>(1)</sup>. Tali dati sono riportati nella terza colonna della tabella I. Nella seconda colonna della stessa tabella riportiamo i corrispondenti valori dell'attività  $a$  di una lastra di Rh di  $5 \times 5,5 \text{ cm}^2$  e 0,36 gr./ $\text{cm}^2$  di spessore, quale si ottiene sostituendo questo rivelatore allo strato di uranio e immergendo il tutto in un cilindro di acqua di 25 cm. di altezza e 28 cm. di diametro.

Per tener conto in modo completo della anisotropia con cui i neutroni veloci vengono emessi nelle diverse reazioni nucleari, abbiamo montato la stessa camera a uranio su di un braccio, in modo da poterla far girare attorno ad un'asse giacente nel piano della targhetta. La distanza dello strato di  $U_3O_8$  dall'asse di rotazione era di 11 cm. E' stato così possibile misurare sia nel caso del Li che del Be il numero  $I$  <sup>(6)</sup> di scissioni che si osservano nella nostra camera ad U in un dato tempo, in funzione dell'angolo  $\theta$  fra la direzione dei deutoni incidenti e la direzione dei neutroni osservati. Le misure, che sono state eseguite di  $22^\circ$  e  $\frac{1}{2}$  in  $22^\circ$  e  $\frac{1}{2}$  da  $0^\circ$  fino a  $135^\circ$ , verranno riportate e discusse altrove.

Consideriamo il rapporto

$$[I] \quad s = I/I (90^\circ)$$

del valor medio ottenuto dando il peso di  $\sin \theta$  alla misura  $I(\theta)$  alla misura eseguita a  $90^\circ$ . E' questo evidentemente il fattore per cui bisogna moltiplicare il numero di scissioni osservate a  $90^\circ$  con la direzione dei deutoni incidenti per avere il numero medio, rispetto all'angolo, delle scissioni provocate dai neutroni in esame. I valori del rapporto  $s$  sono dati dalla quarta colonna della tabella I; la quantità  $\frac{n_n s}{a}$  data nella quinta colonna, è evidentemente proporzionale al numero di scissioni osservato in media su tutto l'angolo solido, diviso per l'attività del Rh.

TABELLA I.

Reazione	a	$n_u$	s	$n_u s/a$
Be + D 0,85 MV . . .	2217 ± 23	580 ± 7	1,04 ± 0,03	0,272 ± 0,009
Li + D 0,75 MV . . .	1627 ± 30	660 ± 8	0,98 ± 0,08	0,398 ± 0,015
Li + D 0,60 MV . . .	780 ± 6	310 ± 5	0,98 ± 0,03	0,390 ± 0,014

TABELLA II.

Reazione	i	b	i/b	$\sim \sigma$	$\sigma_{Li}/\sigma_{Be}$
1 <sup>a</sup> { Be + D . . .	8312 ± 116	408 ± 11	20,4 ± 0,6	133	1,37 ± 0,09
	Li + D . . .	6063 ± 107	280 ± 6	21,6 ± 0,6	
2 <sup>a</sup> { Be + D . . .	8247 ± 115	388 ± 6	21,2 ± 0,5	128	1,49 ± 0,09
	Li + D . . .	5197 ± 100	252 ± 3	20,6 ± 0,5	
3 <sup>a</sup> { Be + D . . .	7474 ± 112	1430 ± 30	5,23 ± 0,01	520	1,34 ± 0,08
	Li + D . . .	8128 ± 114	1440 ± 30	5,65 ± 0,01	
					1,40 ± 0,05

Per misurare il numero totale di neutroni emessi dalla sorgente ci siamo anche questa volta serviti del metodo di rallentare i neutroni a mezzo di una sostanza idrogenata (acqua) di volume sufficientemente grande, e di misurarli a mezzo della radioattività provocata dai neutroni lenti. Mentre però nel precedente lavoro su questo argomento ci siamo serviti di una lastra di rodio che veniva posta a diverse distanze dalla

targhetta, in avanti oppure a  $90^\circ$  con la direzione dei deutoni incidenti, abbiamo preferito, allo scopo di ottenere una grandezza proporzionale alla densità dei neutroni lenti, integrata su tutto il volume della sostanza idrogenata, sciogliere entro l'acqua stessa il sale di un elemento che divenga radioattivo sotto l'azione dei neutroni lenti. Se, dopo un certo tempo di irraggiamento, si mescola la soluzione e si misura l'attività di una sua porzione, questa è evidentemente proporzionale al numero totale dei neutroni emessi, essendosi automaticamente mediato sia rispetto alla distanza dalla targhetta che rispetto all'angolo.

A tale scopo abbiamo disciolto in 100 litri di acqua 30 kg. di  $MgCl_2$  ed abbiamo disposto questa soluzione, in forma di un cilindro di 50 cm. di altezza e 50 cm. di diametro, in modo che la targhetta venisse a trovarsi nel suo centro. Tale soluzione veniva irradiata per 40 minuti in modo da attivare il periodo di 37 minuti del cloro. Durante l'irraggiamento la soluzione veniva continuamente rimescolata soffiando, a mezzo di una pompa, dell'aria in prossimità del fondo del recipiente. Finito l'irraggiamento un recipiente di vetro a pareti sottili, avente la forma di un cilindro cavo della capacità di 20 cm<sup>3</sup> veniva riempito di soluzione e infilato su di un contatore di vetro a pareti sottili di 20 mm. di diametro; veniva così determinato il numero totale degli impulsi registrati dal contatore in 40 minuti di misura, contati a partire da tre minuti dopo la fine dell'irraggiamento. Abbiamo sempre mantenuto costante sia il tempo di irraggiamento che quello di misura per evitare di introdurre errori dovuti alla presenza, nella nostra soluzione, di altri elementi radioattivi, per esempio il magnesio, che si attivano con diversi periodi. Questa precauzione era particolarmente resa necessaria dal fatto che il cloruro di magnesio da noi usato era un prodotto commerciale contenente varie impurità, fra cui una certa quantità di potassio. L'effetto di zero del contatore veniva quindi sempre misurato ponendo, attorno al contatore, il suddetto recipiente di vetro ripieno di soluzione non irradiata; in queste condizioni si avevano circa 63 impulsi al minuto. I numeri d'impulsi, i, dati nella seconda colonna della tabella II sono già corretti per l'effetto di zero ( $\simeq 62 \times 40$ ).

Al doppio scopo di assicurarsi della costanza di emissione dei neutroni da parte del tubo, durante i 40 minuti di irraggiamento, e di poter

confrontare i risultati ottenuti con la  $D + Li$  e la  $D + Be$ , veniva misurata a intervalli di 5 minuti l'attività di una lastra di rodio irradiata per un minuto in una posizione fissa rispetto alla targhetta, entro la soluzione di  $MgCl_2$ .

Nella terza colonna della tabella II è dato il valore medio  $b$  delle misure eseguite con la solita lastra di rodio in questo modo. Mentre però nelle due coppie di misure I e II (vedi tabella II) il rodio veniva posto a 13,2 cm. dalla targhetta in una direzione a  $90^\circ$  rispetto alla direzione dei deutoni incidenti, nella terza coppia di misure il rodio era stato posto nella stessa direzione ma a soli 5,7 cm. dalla targhetta. I risultati ottenuti nelle esperienze I e II si possono confrontare con il risultato della III esperienza, dato che, come risulta dalle nostre curve dell'attività del rodio  $A(r)$  in funzione della distanza, il rapporto  $A(5,7)/A(13,2)$  risulta lo stesso nel caso della  $D + Li$  e della  $D + Be$ ; abbiamo anche controllato che questo rapporto non viene alterato dalla presenza di sale.

Nella quarta colonna della tabella II è dato il rapporto  $i/b$  dei dati delle colonne seconda e terza, ossia dell'attività media della soluzione all'attività del rodio.

E' ora evidente che il rapporto dei dati della quarta colonna della tabella I ai dati della quarta colonna della tabella II è proporzionale alla sezione d'urto media per il processo di scissione per i neutroni usati; tali dati sono riportati nella quinta colonna della tabella II, mentre nella sesta colonna sono dati i rapporti dei risultati ottenuti con i neutroni del Li e del Be per le due coppie di misure. Si trova dunque, prendendo la media dei tre valori ottenuti, che la sezione media dei neutroni del Li è 1,4 volte maggiore della sezione d'urto media dei neutroni del Be. Questo risultato sembra dunque confermare pienamente il risultato ottenuto nel precedente lavoro con una diversa tecnica.

Abbiamo tentato di eseguire con la stessa tecnica una misura di neutroni del  $D + D$  (targhetta di  $Zr + D_2$ ), ma l'attivazione della soluzione era troppo debole per poter dare risultati attendibili.

D'altra parte l'aver confermato nel caso delle reazioni  $D + Be$  e  $D + Li$ , con una tecnica assai diversa, i risultati ottenuti nel precedente lavoro, ci sembra costituire una prova della correttezza delle misure là esposte.

In conclusione ci sembra di poter affermare che la sezione d'urto per la scissione dell' $U^{238}$  è, in media, costante per i neutroni delle reazioni  $D + D$ ,  $D + Be$  e  $D + B$ , mentre per i neutroni della reazione  $D + Li$  è circa 1,4 volte maggiore.

Siamo grati al prof. Bohr per averci suggerito, in una comunicazione privata, la seguente spiegazione dell'aumento subito dalla sezione d'urto del fenomeno di scissione dell'uranio per elevate energie dei neutroni incidenti.

Come è stato mostrato da Bohr e Wheeler, la sezione d'urto del fenomeno di scissione dell' $U^{238}$  è circa  $1/5$  della sezione d'urto per la formazione, sotto l'azione dei neutroni incidenti, del nucleo composto  $U^{239}$ ; per questo sono infatti possibili due processi: la scissione e l'evaporazione di un neutrone; questo secondo processo è circa quattro volte più probabile della scissione. Ora purchè il nucleo  $U^{239}$  sia sufficientemente eccitato è possibile che, dopo l'evaporazione di un neutrone, il nucleo residuo  $U^{238}$  abbia ancora un'energia superiore alla corrispondente energia critica per la scissione. Infatti dato che l'uranio  $U^{238}$  è un nucleo contenente un numero pari sia di protoni che di neutroni, ci si deve aspettare che ad esso corrisponda un'energia critica per la scissione minore di quella necessaria per l'emissione di un neutrone; in altri termini il caso dell' $U^{238}$  è simile a quello dell' $U^{236}$ .

Si comprende da tutto ciò che, usando neutroni di energia sufficientemente elevata, la sezione d'urto del fenomeno di scissione aumenti, in quanto oltre alla scissione per così dire diretta dell' $U^{239}$  diventa possibile, da un certo punto in poi, la scissione dell' $U^{238}$  ottenuto in seguito alla evaporazione di un neutrone dell' $U^{239}$ . Per neutroni di energia sufficientemente elevata si avrebbe quindi, dato che presumibilmente circa metà dei nuclei  $U^{238}$  eccitati si scinderebbero e metà darebbero luogo a ulteriore evaporazione di un neutrone, che la sezione d'urto totale per la scissione (diretta dall' $U^{239}$  + mediata dell' $U^{238}$ ) è circa tre volte maggiore della sezione d'urto che si ha per neutroni di alcuni milioni di volt di energia.

Se in seguito all'evaporazione del neutrone il nucleo  $U^{238}$  venisse lasciato sempre egualmente eccitato, ci si dovrebbe attendere anche per questo fenomeno un'energia critica  $E_f$  al di sotto della quale il fenomeno

non potrebbe avvenire, mentre al di sotto di  $E'_t$  la sezione d'urto relativa a questo processo dovrebbe rimanere costante. In realtà l' $U^{238}$  viene lasciato, in seguito all'evaporazione di un neutrone, in diversi stati di eccitazione, i quali peraltro sono distribuiti su di un intervallo di pochi milioni di volt. Ci sembra quindi che si possa grossolanamente cercare di rappresentare l'andamento della sezione d'urto come sopra abbiamo detto, e cercare di valutare, servendoci del nostro dato sperimentale, l'energia critica  $E'_t$ .

Detta  $\alpha$  la percentuale di neutroni dello spettro del  $D + Li$  aventi energia superiore ad  $E'_t$  si ha infatti:

$$\sigma(1 - \alpha) + 3\sigma\alpha = 1,4\sigma$$

da cui:

$$\alpha = 0,20$$

che confrontato con i dati dello spettro del  $D + Li$ , darebbe  $E'_t \approx 11$  MV.

L'elevato valore dell'energia critica  $E'_t$  giustifica il fatto da noi precedentemente osservato che la sezione d'urto con i neutroni della  $D + B$  è circa eguale a quella ottenuta nella reazione  $D + Be$ .

#### RIASSUNTO

Si conferma, avendo ripetuto le misure con una tecnica diversa, che la sezione d'urto per scissione dell' $U$  dei neutroni della reazione  $D + Li$  è 1,4 volte maggiore di quella dei neutroni della reazione  $D + Be$ . Si dà l'interpretazione di questo risultato proposta da N. Bohr.

#### SUMMARIUM

Cum nova quadam ratione ac via dimensiones rursus repetiverint, Auctores haec confirmant: collisionis caesuram per scissionem eius quod dicitur  $U$  neutronum reactionis  $D + Li$ , esse 1,4 maiorem quam caesuram neutronum reactionis  $D + Be$ . Idem referunt huius facti interpretationem quam protulit N. Bohr.

BIBLIOGRAFIA

- (<sup>1</sup>) AGENO M., AMALDI E., BOCCIARELLI D., CACCIAPUOTI B. N. e TRABACCHI G. C.,  
Atti Acc. d'Italia, 12, VII, I (1940) e Rend. Ist. Sanità Pubblica in corso di stampa.
- (<sup>2</sup>) BOHR N. WHEELER J. A., Phys. Rev., 56, 426 (1939).
- (<sup>3</sup>) BONNER T. W., BRUBAKER W. M., Phys. Rev., 47, 973 (1935); 48, 742 (1935);  
STEPHENS W. E., Phys. Rev., 53, 223 (1938).
- (<sup>4</sup>) BONNER T. W., BRUBAKER W. M., Phys. Rev., 50, 308 (1936).

