

13. Mario AGENO. — Sulle radiazioni molli emesse dal $^{104}_{45}\text{Rh}$.

Si deve a Weizsäcker ⁽¹⁾ l'aver mostrato la possibilità di spiegare l'esistenza di livelli nucleari metastabili, con vita media di parecchie ore o giorni, purchè si ammetta che l'eccesso di energia rispetto al livello fondamentale sia di poche decine di KeV e che la radiazione emessa nella transizione dallo stato metastabile a quello fondamentale, sia dovuta ad un multipolo di ordine 1 sufficientemente elevato.

I numerosi casi (circa trenta) di isomeria nucleare dimostrati ormai con sicurezza vengono oggi interpretati in base a questa ipotesi la quale è stata in seguito elaborata, da un punto di vista teorico, da vari autori ⁽²⁾.

Una fondamentale conferma della correttezza di tale interpretazione del fenomeno della isomeria è stata portata da Pontecorvo nel caso del rodio. ⁽³⁾ Questo elemento, costituito per la quasi totalità dell'isotopo di massa 103 (un secondo isotopo di massa 101 ha una abbondanza inferiore a 1/1300 e non va quindi preso in considerazione agli effetti della produzione di sostanze radioattive artificiali) dà luogo per cattura di un neutrone lento, alla formazione di due attività aventi periodo di decadimento pari rispettivamente a $T=4,34$ min e $T=41,8$ sec, le quali vengono attribuite a due isomeri del $^{104}_{45}\text{Rh}$ a causa della identità del nucleo di partenza e del processo di produzione.

Nell'ipotesi di Weizsäcker una delle due attività, e precisamente quella corrispondente al livello metastabile, deve essere accompagnata dalla emissione di una radiazione γ fortemente convertita dato che si tratta di quanti γ emessi per multipolo di ordine elevato.

In questo ordine di idee Pontecorvo ha cercato di mettere in evidenza gli elettroni dovuti alla conversione della radiazione γ emessa nella transizione isomerica. Usando contatori a parete molto sottile egli ha effettivamente osservato che il periodo di 4,3 min è accompagnato dalla

⁽¹⁾ C. F. v. WEIZSÄCKER, *Naturwiss*, 24, 813 (1936).

⁽²⁾ B. PONTECORVO, *Travaux du Congrès du Palais de la Découverte*, Paris (1938); M. H. HEBB, G. E. UHLENBECK, *Physica*, 5, 605 (1938); S. M. DANCOFF, P. MORRISON, *Phys. Rev.*, 55, 122 (1939); M. H. HEBB, E. NELSON, *Phys. Rev.*, 58, 486 (1940).

⁽³⁾ B. PONTECORVO, *Phys. Rev.*, 54, 486 (1940).

emissione di elettroni di 35-60 KeV corrispondenti a una riga γ avente $h\nu \simeq 80$ KeV (l'energia di ionizzazione dell'anello K del Rh è 23 KeV).

Lo schema proposto, in seguito a tali osservazioni, per interpretare il comportamento del Rh è il seguente.

Il $^{103}_{45}\text{Rh}$ bombardato con neutroni lenti dà luogo alla formazione del $^{104}_{45}\text{Rh}$, parte nello stato fondamentale e parte in uno stato eccitato per circa 80 KeV.

Il $^{104}_{45}\text{Rh}$ nello stato fondamentale si disintegra con periodo di dimezzamento pari a 41,8 sec emettendo elettroni e dando così luogo al $^{104}_{46}\text{Pd}$ stabile; il $^{104}_{45}\text{Rh}$ eccitato passa invece allo stato fondamentale per emissione di un quanto γ (in parte convertito) con periodo di 4,3 min; il nucleo così formato emette quindi con periodo pari a 41,8 sec un elettrone.

Il numero di questi elettroni decresce naturalmente con periodo pari a 4,3 min dato che si stabilisce l'equilibrio radioattivo fra la transizione γ a vita lunga e la successiva emissione β a vita breve.

Tale schema permette fra l'altro di interpretare la identità, riconosciuta da varii autori, degli spettri β relativi alle due attività di periodo pari a 41,8 sec e 4,3 min ⁽⁴⁾.

Per quanto i risultati sperimentali relativi al ^{104}Rh raccolti fino ad oggi vengano tutti inquadrati in modo soddisfacente nel suddetto schema, mi è sembrato opportuno studiare a fondo questo caso di isomeria. Mi sono quindi proposto di esaminare le seguenti questioni:

1) mettere in evidenza in modo diretto la radiazione γ emessa nella transizione isomerica e misurarne l'energia. Un confronto di tale valore con l'energia degli elettroni molli osservati da Pontecorvo permette di decidere se essi siano effettivamente prodotti per conversione di detta riga o se siano emessi in seguito a qualche altro processo.

2) mettere in evidenza le righe X che il rodio deve emettere in seguito alla conversione della riga γ negli anelli elettronici esterni. La misura della lunghezza d'onda di tali radiazioni caratteristiche permette di individuare il numero atomico del nucleo che le ha emesse.

3) misurare il coefficiente di conversione della riga γ corrispondente alla transizione isomerica.

⁽⁴⁾ F. C. CRITTENDEN, Phys. Rev., 56, 709 (1939); E. R. GAERTTNER, J. J. TURIN, H. R. CRANE, Phys. Rev., 49, 793 (1936).

Il valore di tale coefficiente dipende dalla energia del quanto γ e dall'ordine l del multipolo. D'altra parte, secondo la teoria di Weizsäcker, anche la vita media della transizione isomerica è una funzione di $h\nu$ ed l ; una volta noto $h\nu$ si può quindi controllare tale teoria confrontando il valore di l dedotto dal valore della vita media con quello dedotto dal coefficiente di conversione. Qualora l'accordo sia soddisfacente il valore di l così determinato rappresenta la variazione subita dal momento angolare J del nucleo nella transizione isomerica.

2. — LA CURVA DI ASSORBIMENTO DEGLI ELETTRONI MOLLI.

Come prima cosa ho ritenuto opportuno fare una esperienza simile a quella di Pontecorvo, ossia misurare la curva di assorbimento degli elettroni molli.

A tale scopo ho fatto uso di un contatore di 2 cm di diametro, ad aria a pressione atmosferica, munito di una finestra di alluminio di $4,5 \times \text{cm}^2$ di area e di $1,9 \text{ mg/cm}^2$ di spessore. Esso era connesso, attraverso ad un amplificatore, ad un sistema a demoltiplicazione di 16 fatto con valvole Philips 4686.

Gli strati di Rh usati consistevano in due depositi elettrolitici su lastra di nichel di $3 \times 6 \text{ cm}^2$ di area e 1 mm di spessore: il Rh depositato aveva nei due casi uno spessore rispettivamente di 2,1 e 2,3 mg/cm^2 . Una lastra di nichel identica alle precedenti ma priva di deposito di Rh mi ha permesso di riconoscere che nelle mie condizioni sperimentali l'attività indotta in questo elemento era trascurabile rispetto a quella del rodio.

I due strati di Rh venivano irradiati alternativamente per 5 min entro un recipiente pieno d'acqua posto sotto l'estremità del tubo ad 1 MeV esistente nell'Istituto Superiore di Sanità.

Allo scopo di lasciar decadere la vita breve le misure venivano iniziate 5 min dopo la fine dell'irraggiamento e seguite per 10 min.

Le letture venivano eseguite ogni minuto su di un intervallo di 45 sec alternativamente con e senza un assorbitore di Al fra il Rh e il contatore. I 15 sec di intervallo fra una misura e la successiva servivano appunto per inserire o togliere l'assorbitore.

Con ogni assorbitore sono state eseguite almeno quattro misure, due con ciascuno dei due strati di Rh. I valori medi dei risultati di tali misure

sono riprodotti nella fig. 1 ove è data in ordinate la percentuale di elettroni trasmessi da un assorbitore il cui spessore è dato in ascisse.

Da tale curva risulta che gli elettroni molli sono assorbiti quasi completamente da 5 mg/cm^2 . Tenendo conto dello spessore delle pareti del contatore ($1,9 \text{ mg/cm}^2$) si ha così che il percorso di questi elettroni è

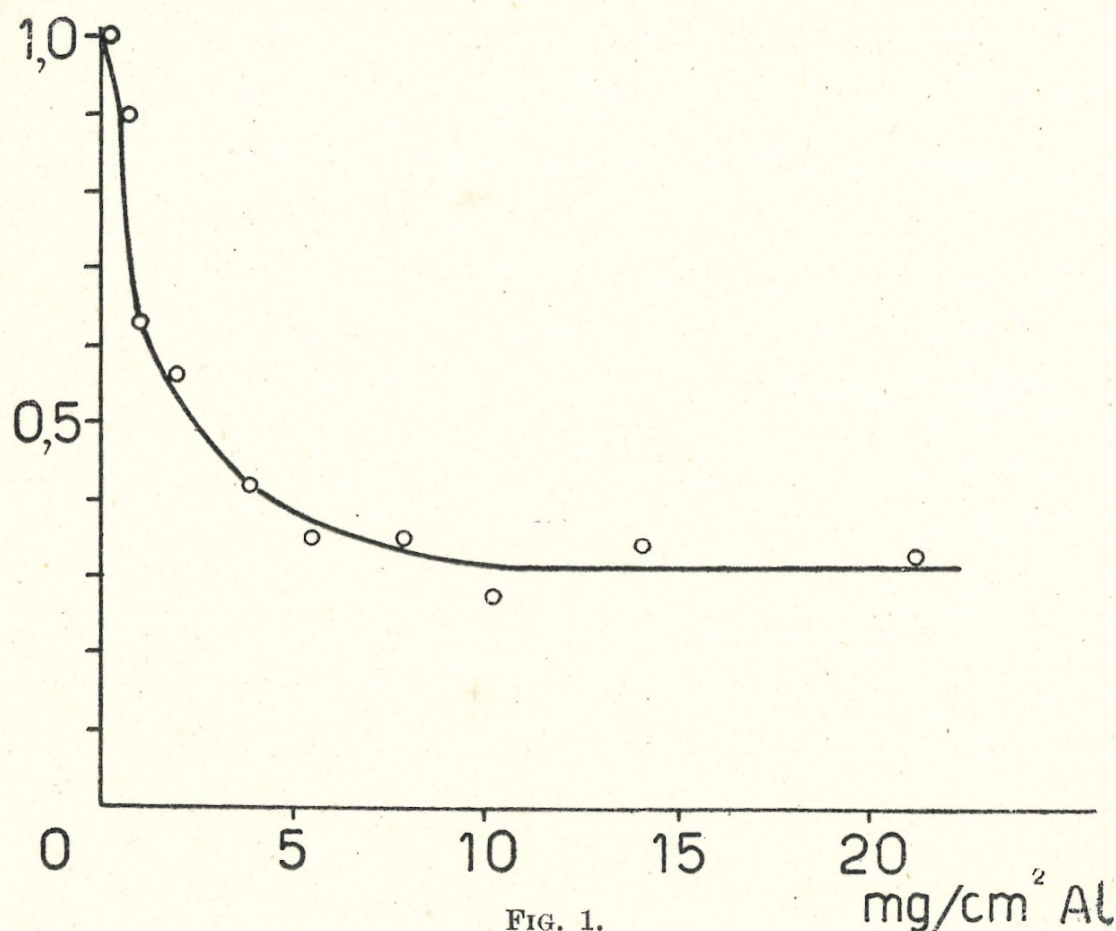


FIG. 1.

7 mg/cm^2 di Al corrispondenti a circa 70 KeV . Tale valore, per quanto lievemente superiore va considerato in soddisfacente accordo con quello dato da Pontecorvo.

Da questo valore dell'energia degli elettroni molli e dal valore dell'energia di ionizzazione dell'anello K del Rh si calcola per l'energia del quanto γ emesso nella transizione isomerica $\sim 90 \text{ KeV}$.

Nel prossimo paragrafo vedremo un altro metodo, a mio giudizio più attendibile, di valutare questa energia.

3. — LE CURVE DI ASSORBIMENTO DEI RAGGI X E DEI RAGGI γ .

Mi sono quindi proposto di mettere in evidenza in modo diretto l'emissione di un quanto γ di $\sim 80\text{-}90 \text{ KeV}$ da parte del ^{104}Rh ($T=4,3 \text{ min}$) sembrandomi questo un punto assai importante nella interpretazione

data da Pontecorvo degli elettroni molli di cui abbiamo precedentemente parlato. Se tale interpretazione è corretta il ^{104}Rh deve emettere, come processo secondario della conversione del suddetto quanto γ nell'anello K, le righe X caratteristiche del Rh ($\lambda_{\alpha_1} = 0,612$; $\lambda_{\alpha_2} = 0,616 \text{ \AA}$).

Ho quindi cercato di costruire dei contatori molto sensibili per radiazioni di lunghezza d'onda $\lambda = 0,2-0,6 \text{ \AA}$.

Dopo alcune prove e tentativi ho costruito dei contatori di vetro a pareti di 2-3 decimi di millimetro, aventi un diametro pari a 1,5 cm e una lunghezza utile pari a 5 cm. Il filo è di Mo di 0,1 mm di diametro e l'altro elettrodo è costruito da una spirale di filo di rame. Il vetro è reso conduttore esternamente nella sua parte centrale a mezzo di un sottile strato di grafite colloidale.

I contatori così costruiti, dopo essere stati lavati con acido nitrico (prima concentrato e poi diluito) e ben lavati con acqua distillata, sono stati essiccati e sgassati ponendoli per molte ore in una stufa a circa 300 C° sotto pompaggio con una pompa a diffusione. Essi sono stati quindi divisi in vari gruppi che sono stati riempiti in diversi modi. Oltre a 1,5 cm di pressione di alcool che è stato introdotto in tutti i contatori, in alcuni ho messo argon a 70 cm, in altri xenon a 18 cm, e in altri ancora xenon a 70 cm di mercurio.

Dopo aver determinato per ciascun contatore la tensione di funzionamento (essi hanno tutti un intervallo di funzionamento o pianerottolo di oltre 100-150 volt) li ho confrontati facendo uso di un tubo a raggi X a 60 KV posto a una conveniente distanza e opportunamente schermato in modo da ridurre il numero degli impulsi ad un valore misurabile a mezzo del sistema di demoltiplicazione di 16 usato.

Da tali prove è risultato che, per le radiazioni X usate ($h\nu \leq 60 \text{ Ke V}$, $\lambda \geq 0,2 \text{ \AA}$) il rendimento di un contatore a Xe è 10 volte maggiore di quello di un contatore ad A ad egual pressione; e che il rendimento di un contatore a Xe è proporzionale alla pressione di questo gas; infatti variando la pressione dello Xe da 18 a 70 cm di mercurio il numero degli impulsi registrato in un dato tempo è cresciuto di un fattore $\sim 4,4$.

Ciò significa che vengono praticamente registrati solo quei quanti X che danno luogo ad un processo di ionizzazione del gas e non quelli che generano elettroni secondari nelle pareti del contatore.

Questa conclusione è confermata anche dal confronto dei contatori ad A con quelli a Xe in quanto facendo uso delle ben note tabelle e formule per il calcolo dei coefficienti di assorbimento dei raggi X, si trova che a parità di pressione e di spessore attraversato una radiazione X di $0,6 \text{ \AA}$ viene assorbita 10 volte di più nello Xe che nell'argon, in ottimo accordo con l'esperienza.

Una volta dimostrato che per le radiazioni X in questione gli impulsi registrati dai miei contatori sono dovuti praticamente solo ai quanti assorbiti nel gas, è assai facile valutare il loro rendimento.

A mezzo delle tabelle di Edvin Jönsson ⁽⁵⁾ si trova che per lo Xe si ha

$$\lambda = 0,160 \text{ \AA} \quad \frac{\mu}{\rho} = 3,66$$

$$\lambda = 0,613 \text{ \AA} \quad \frac{\mu}{\rho} = 26$$

valori da cui si deducono i seguenti rendimenti per i contatori a 70 cm di mercurio di pressione

$$\lambda = 0,160 \text{ \AA} \quad \gamma = 2 \%$$

$$\lambda = 0,613 \text{ \AA} \quad r_x = 14 \%$$

$$(1) \quad \frac{r_x}{r_\gamma} = 7$$

Chiarito questo punto, ho connesso due contatori a Xe a 70 cm di mercurio di pressione (aventi una tensione di funzionamento di 3400 volt) attraverso a due amplificatori eguali fra loro, a due sistemi di demoltiplicazione di 16 dei quali uno fatto con tubi Philips 4686 secondo schemi ormai ben noti e l'altro fatto con tubi 6J7 secondo lo schema di Conversi-Piccioni ⁽⁶⁾.

Questo secondo si è mostrato alla prova dei fatti di funzionamento particolarmente stabile e sicuro tanto da sembrarmi assai superiore agli altri tipi di demoltiplicatori correntemente in uso.

Allo scopo di eliminare i raggi β duri emessi dal Rh, ciascuno di questi due contatori era protetto da un lato da uno strato di paraffina di 20 mm di spessore ($1,8 \text{ g/cm}^2$) il quale, come risulta dalle ben note

⁽⁵⁾ M. SIEGBAHN, Spektroskopie del Roentgenstrahlen, Berlino, 1931, pag. 470-471.

⁽⁶⁾ N. Cim., 11, I, 12 (1943).

curve energia-percorso è largamente sufficiente per assorbire completamente elettroni aventi al massimo 2,6 MeV di energia (⁷).

Per ridurre l'effetto di zero, i due contatori erano protetti da tutti gli altri lati da uno strato di piombo di 5 cm di spessore.

Le lamine di rodio usate per questa esperienza, avevano un'area pari a $5 \times 5,5 \text{ cm}^2$ e uno spessore di $0,36 \text{ g/cm}^2$. Lo strato assorbente delle radiazioni X e γ veniva inserito fra il rodio e la paraffina.

Allo scopo di eliminare l'influenza sia delle variazioni, da misura a misura, della intensità del tubo sia della diversa sensibilità dei due sistemi contatore — amplificatore — sistema di demoltiplicazione e conteggio, ho eseguito le misure con il seguente metodo:

Due lastre di rodio (non necessariamente eguali) vengono irradiate contemporaneamente entro l'acqua per un dato tempo (5 min) mettendole in due posizioni molto ben definite rispetto all'estremità del tubo a neutroni; esse vengono quindi messe davanti ai due contatori, la prima con l'assorbitore e l'altra senza. Vengono quindi determinati i numeri totali $N_1(a)$, $N_2(o)$ degli impulsi registrati dai due impianti per 20 min a partire da 2 min dalla fine dell'irraggiamento. Detta I la intensità del tubo durante questo irraggiamento si ha

$$(2) \quad N_1(a) = K_1 I A \quad N_2(o) = K_2 I B$$

avendo indicato con K_2 e K_1 due coefficienti che rappresentano la sensibilità del primo e del secondo sistema di rivelazione e conteggio e con A e B i numeri di impulsi che si avrebbero per intensità del tubo $I=1$ e valori unitari di K_1 e K_2 rispettivamente con o senza l'assorbitore usato.

Se ora si ripete la misura ponendo le due lastre di rodio sia nelle stesse posizioni rispetto al tubo durante l'irraggiamento, sia davanti agli stessi contatori durante la misura, salvo che l'assorbitore viene posto davanti alla lastra 1, si ha

$$(3) \quad N_1'(o) = K_1 I' B \quad N_2'(a) = K_2 I' A$$

avendo indicato con I' l'intensità del tubo durante questo secondo irraggiamento, e con $N_1'(o)$ e $N_2'(a)$ i numeri registrati. Dalle (1) e (2) si ricava

$$\frac{N_1(a)}{N_1'(o)} = \frac{I}{I'} \frac{A}{B}; \quad \frac{N_2'(a)}{N_2(o)} = \frac{I'}{I} \frac{A}{B}$$

(⁷) MATTAUCH, S. FLUEGGE, Kernphysikalische Tabellen, Berlino 1942.

dalle quali, moltiplicando membro a membro, ed estraendo la radice quadrata, si ha

$$(4) \quad T = \frac{A}{B} = \sqrt{\frac{N_1(a)}{N_1'(0)} \frac{N_2'(a)}{N_2(0)}}$$

avendo indicato con T la frazione trasmessa dall'assorbitore usato.

Questo metodo è molto semplice e permette di ottenere risultati assai precisi ogni qualvolta si debba fare una curva di assorbimento

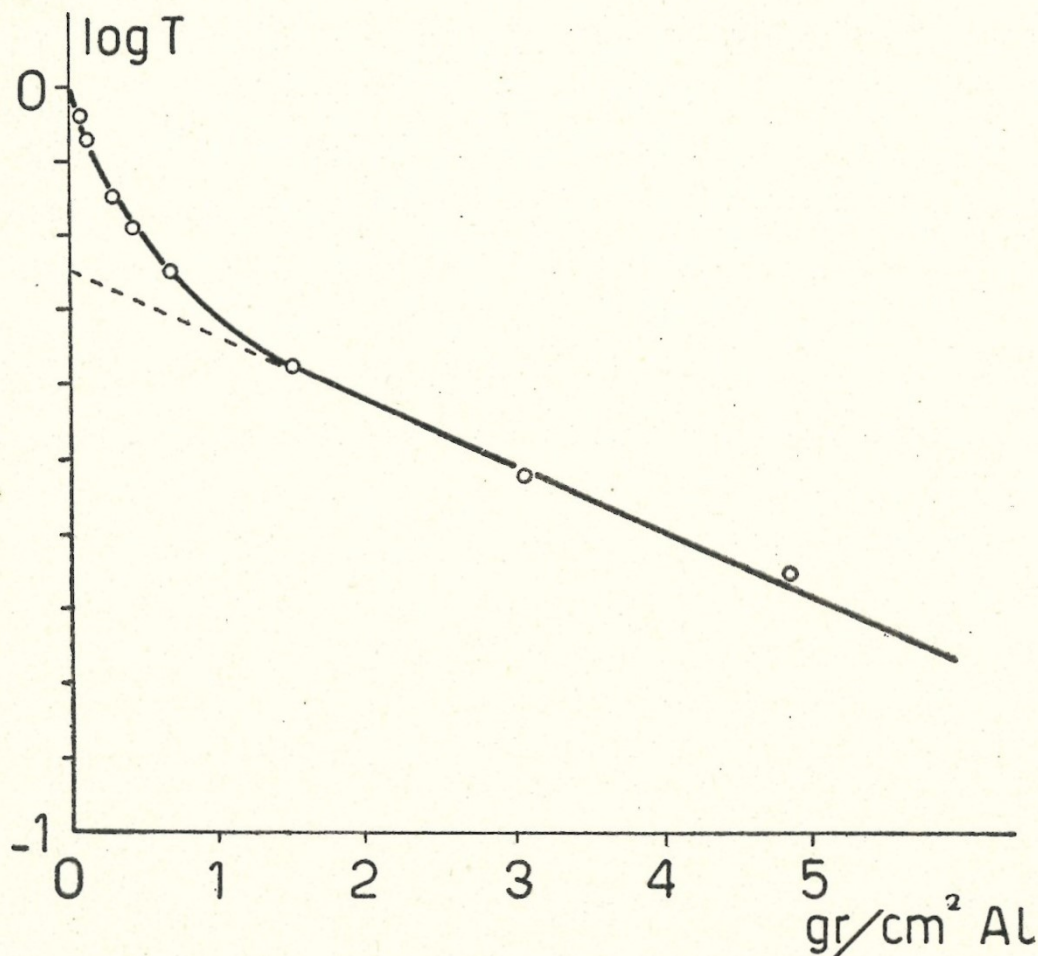


FIG. 2.

(o altra misura analoga) facendo uso di una sorgente di neutroni non perfettamente costante.

Con questo metodo ho eseguito la misura della curva di assorbimento delle radiazioni X e γ nell'Al e nell'Ag. I risultati ottenuti con l'Al sono riprodotti in scala logaritmica nella fig. 2.

Da tale curva risulta evidente l'esistenza di due radiazioni di diversa durezza. Lo spessore di dimezzamento della componente più dura è $3,4 \text{ g/cm}^2$ corrispondente a $\frac{\mu}{\rho} = 0,204 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Da tale valore del coefficiente di assorbimento si ottiene, per interpolazione grafica fra i valori dati nelle tabelle di S.J.M. Allen ⁽⁸⁾,

$$(5) \quad \lambda = 0,155 \text{ \AA}$$

corrispondenti a

$$(6) \quad h\nu = 80 \text{ KeV}$$

in ottimo accordo con il valore dedotto da Pontecorvo e da me dalle misure di assorbimento degli elettroni di conversione.

Dal grafico si riconosce inoltre che la radiazione γ dovuta alla transizione isomerica rappresenta il 56 % ($\simeq 60\%$) della radiazione totale rivelata dal contatore. Il rimanente 40% è costituito da una radiazione più molle. Nella fig. 3 è riprodotta, in grafico logaritmico la curva di assorbimento di questa radiazione, quale si ottiene detraendo dai valori sperimentali la curva

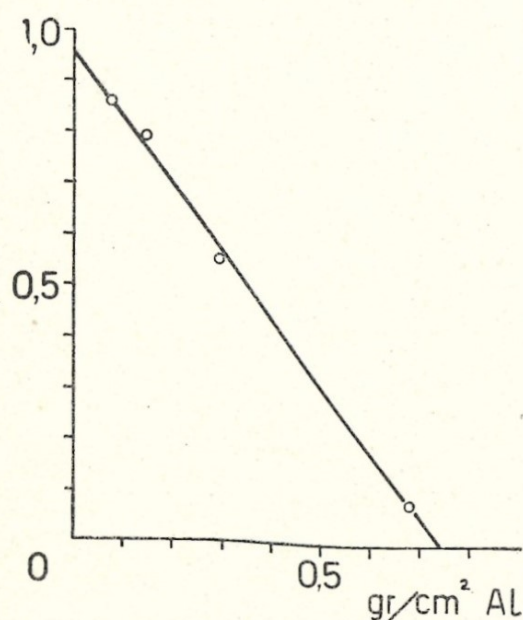


FIG. 3.

$$0,56 e^{-0,204\Delta}$$

essendo Δ lo spessore, in g/cm^2 , dell'assorbitore.

Lo spessore di dimezzamento risulta da tale curva $0,24 \text{ g/cm}^2$ di Al corrispondente a $\frac{\mu}{\rho} \simeq 3$ ossia $\lambda \simeq 0,6 \text{ \AA}$. Si tratta evidentemente delle righe X caratteristiche del Rh o di uno degli elementi vicini.

Una analoga curva di assorbimento è stata eseguita anche con l'argento. Per quanto queste misure fossero meno precise di quelle fatte con gli assorbitori di alluminio, si è trovato che la radiazione registrata dal contatore a Xe, nelle mie condizioni sperimentali, era costituita da circa il 60% di raggi γ di lunghezza d'onda $\lambda \simeq 0,160 \text{ \AA}$, e da circa il 40% di raggi X di lunghezza d'onda $\lambda \simeq 0,6 \text{ \AA}$.

L'assai soddisfacente concordanza fra i risultati ottenuti con l'Al e con l'Ag costituisce una prova ulteriore, se necessario, del fatto che le

(⁸) A. H. COMPTON, S. K. ALLISON, X-Rays in theory and experiment, Londra.

radiazioni da me misurate in questa esperienza sono esclusivamente di natura elettromagnetica e non corpuscolare.

4. — GLI ASSORBIMENTI SELETTIVI.

La misura della curva di assorbimento dell'Al permette di stabilire con sufficiente precisione il valore della lunghezza d'onda della radiazione γ emessa nella transizione isomerica. Viceversa essa, pur permettendo di riconoscere l'ordine di grandezza della lunghezza d'onda delle radiazioni X caratteristiche, non consente di stabilire a quale elemento queste corrispondono. Ho quindi ritenuto opportuno cercare di individuare con maggior precisione la lunghezza d'onda di questa radiazione servendomi degli assorbimenti selettivi.

Gli elementi da prendere in considerazione come responsabili possibili dell'emissione di radiazioni X caratteristiche sono il Ru, Rh, Pd.

Infatti, secondo la schema proposto da Pontecorvo i raggi X emessi dovrebbero essere quelli del Rh, mentre sarebbero quelli del Pd se la riga γ di 80 KeV e i corrispondenti elettroni di conversione venissero emessi, come processo secondario, dal Pd formatosi in seguito alla emissione β da parte del ^{104}Rh .

Questa seconda ipotesi lascerebbe completamente inspiegato il problema della isomeria del Rh e sembra quindi meno ragionevole della prima; ciò non toglie che una prova diretta, basata sulla determinazione della lunghezza d'onda delle righe X caratteristiche avrebbe un carattere decisivo.

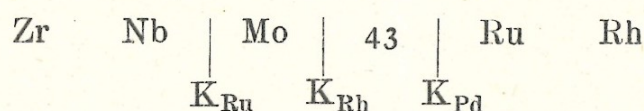
A priori si potrebbe avere anche l'emissione delle righe X caratteristiche del Ru. Infatti pur ammettendo valido lo schema di Pontecorvo, sarebbe possibile che il ^{104}Rh , oltre che disintegrarsi β dando luogo alla formazione del ^{104}Pd , si disintegrasse per cattura K (è noto che esso non emette positroni) ⁽⁹⁾ dando luogo a ^{104}Ru dato che questo nucleo esiste in natura.

Dato che le masse di questi tre isobari 104 non sono note, non è possibile dire a priori se un tale processo sia o meno possibile energeticamente. D'altra parte per uno dei due metodi di misura del coefficiente di conver-

⁽⁹⁾ E. AMALDI, E. SEGRÈ; N. Cim., 9, II, 452 (1934).

sione della riga γ di 80 Kev che verranno esposti nel prossimo paragrafo, è essenziale sapere che tutti i nuclei radiattivi di ^{104}Rh formati in seguito al bombardamento di neutroni danno luogo alla emissione di un raggio β duro.

Le righe K del Ru, Rh e Pd cadono fra i limiti K degli elementi seguenti



ossia per distinguere con questo metodo se le radiazioni X sono quelle del Rh o quelle del Pd sarebbe necessario disporre di assorbitori fatti dall'elemento 43.

Non mi è quindi stato possibile studiare questo punto e mi sono dovuto limitare a esaminare l'esistenza o meno di radiazioni caratteristiche del Ru. A tale scopo ho confrontato l'assorbimento che subiscono le radiazioni in questione nello Zr e nel Mo.

TABELLA I.

	$\frac{\mu}{\rho}$ Zr	$\frac{\mu}{\rho}$ Mo
K_{Ru}	90	14,6
K_{Rh}	78,5	90
K_{Pd}	68,8	79,6

Nella tabella I sono dati i coefficienti di assorbimento di questi elementi per le righe K del Ru, Rh e Pd quali si ottengono dalle tabelle di Edvin Jönson (⁵).

Gli assorbitori usati sono stati preparati con due tecniche diverse. Alcuni sono stati ottenuti mescolando Zr O₂ oppure Mo O₃ ridotti a polvere finissima con paraffina e preparando poi degli straterelli di questo impasto dello spessore di circa 1 mm. Altri sono stati ottenuti filtrando assai lenta-

mente attraverso ad un filtro piano delle sospensioni in acqua dei suddetti ossidi.

Le misure di assorbimento sono state eseguite con lo stesso metodo esposto nel paragrafo precedente per il caso dell'Al. I risultati sono riprodotti nella fig. 4 dove in ascisse è dato lo spessore, in mg/cm^2 dell'elemento presente nell'assorbitore, mentre in ordinate è data la frazione trasmessa. I cerchi e triangoli pieni sono fatti con gli assorbitori di paraffina + ossido: i cerchi e i triangoli vuoti con assorbitori costituiti da filtri intasati. La riga punteggiata rappresenta il fondo della riga γ di 80 KeV.

Come si vede da tale figura non vi è differenza apprezzabile fra l'assorbimento nel Mo e nello Zr. Si può quindi escludere la presenza in quantità apprezzabile delle righe caratteristiche del Ru. Dai punti sia dello Zr che del Mo, si calcola inoltre un valore medio del coefficiente di assorbimento pari a circa 86, valore in miglior accordo con l'ipotesi che si tratti delle righe X del Rh che non quelle del Pd (vedi tabella 1); questo punto non si può tuttavia considerare come definitivamente accertato.

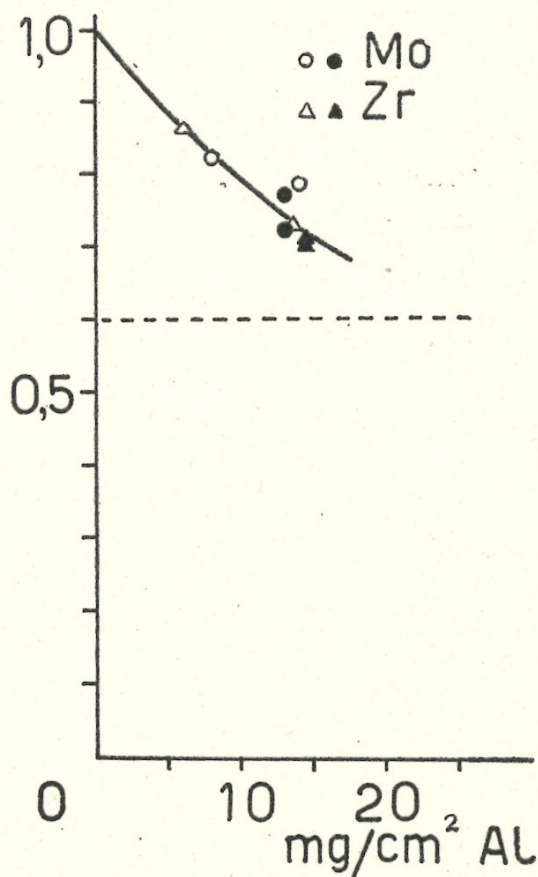


FIG. 4.

5. — IL COEFFICIENTE DI CONVERSIONE DELLA RIGA.

Ho quindi cercato di determinare il coefficiente di conversione dei raggi γ con due metodi indipendenti i quali, come vedremo, hanno dato risultati in accordo assai soddisfacenti tra loro.

1) Avendo dimostrato che il ^{104}Rh non subisce il processo di disintegrazione per cattura K, si può affermare che il numero N_{ed} degli elettroni duri emessi con periodo di 4,3 min è uguale al numero delle transizioni isomeriche, dallo stato eccitato allo stato fondamentale del ^{104}Rh . D'altra parte il numero degli elettroni molli N_{em} è pari al numero di quanti convertiti per modo che il coefficiente di conversione, definito

come rapporto del numero di elettroni emessi per conversione, al numero di quanti γ emessi risulta pari a

$$(7) \quad \alpha = \frac{N_{em}}{N_{ed} - N_{em}}$$

La cosa più semplice consisterebbe quindi nel misurare il rapporto del numero degli elettroni molli al numero degli elettroni duri a mezzo di un contatore quale quello usato per le misure esposte nel par. 2. In tal modo però si introduce l'ipotesi, difficilmente controllabile e certamente non verificata nel caso del contatore usato per la misura della curva di assorbimento della fig. 1, che il suo rendimento sia lo stesso per gli elettroni dei due tipi. Come è risultato da alcuni controlli il contatore descritto nel par. 2, aveva un rendimento assai minore per gli elettroni molli; non mi è stato peraltro possibile mettere in chiaro quantitativamente questo punto. Si comprende quindi che i dati ottenuti con questo contatore e riprodotti nella fig. 1 pur essendo pienamente attendibili per una misura del percorso degli elettroni molli, non sono utilizzabili per una misura del coefficiente di conversione.

Sono quindi ricorso all'uso di una camera di ionizzazione il cui elettrodo a tensione è costituito da una gabbia di rete metallica cilindrica avente diametro pari a 10 cm e altezza pari a 11,5 cm.

L'altro elettrodo era connesso al filo di un normale elettrometro e il tutto era protetto da un involucro metallico messo a terra.

Le misure sono state eseguite con gli strati di Rh di 2,2 mg/cm² di spessore depositati su nichel di cui abbiamo parlato nel par. 2.

Uno di questi veniva irradiato per 10 min e quindi appoggiato direttamente sulla rete metallica; la attività veniva misurata a partire da 10 min dopo la fine dell'irraggiamento allo scopo di lasciar decadere completamente il periodo di 41,8 sec formatosi direttamente sotto il bombardamento di neutroni.

Contemporaneamente veniva irradiata e quindi posta su di un'altra camera di ionizzazione di tipo uguale una lastra di Rh di 0,36 g/cm² di spessore largamente sufficiente (vedi fig. 1) per eliminare completamente gli elettroni molli e sufficientemente sottile per non ridurre in modo sensibile gli elettroni duri. Le misure sono state eseguite sia con 200 che con 300 volt applicati alla camera di ionizzazione; il fatto che i risultati siano risultati eguali nei due casi, entro gli errori di misura, prova che la camera di

ionizzazione era in condizioni di saturazione. Da tali misure ho trovato che il rapporto fra la ionizzazione provocata nella camera sia dagli elettroni molli che dagli elettroni duri $I_m + I_d$ (misurata senza assorbitore di Al) sta alla ionizzazione dovuta ai soli elettroni duri I_d (misurata con l'assorbitore di Al) nel rapporto.

$$\frac{I_m + I_d}{I_d} = 2,01 \pm 0,09 \quad \text{da cui} \quad \frac{I_m}{I_d} = 1,01 \pm 0,09 \quad (8)$$

Per risalire da tale rapporto delle ionizzazioni al rapporto $\frac{N_{em}}{N_{ed}}$ del numero degli elettroni molli al numero degli elettroni duri basta applicare le seguenti relazioni

$$(10) \quad \frac{I_m}{e} = N_{em} \frac{\bar{R}}{R} \frac{60}{33} 10^3 + N_{em} 0,25 \frac{\bar{R}_A}{R_A} \frac{20}{33} 10^3$$

$$(11) \quad \frac{I_d}{e} = N_{ed} \bar{1} 80$$

dove e è la carica elementare, $\frac{60}{33} 10^3$ è il numero di coppie di ioni generato da un elettrone molle, $\frac{\bar{R}}{R}$ è un fattore introdotto per tener conto del fatto che lo spessore dello strato di Rh non è trascurabile rispetto al percorso R nel rodio di elettroni di 60 KeV di energia. Tenendo conto del fatto che il potere frenante atomico è proporzionale alla radice quadrata del peso atomico si deduce dal percorso in Al il seguente valore del percorso nel Rh: $R:R = 11,7 \text{ mg/cm}^2$.

Con considerazioni elementari si trova per il percorso residuo medio $\bar{R}$ degli elettroni di percorso totale R emessi da uno strato di spessore Δ

$$(12) \quad \bar{R} = R + \frac{\Delta}{2} \left\{ \ln \frac{\Delta}{R} - \frac{3}{2} \right\}$$

che, ponendo $R = 11,7 \text{ mg/cm}^2$ e $\Delta = 2,2 \text{ mg/cm}^2$ dà $\bar{R} = 9,3 \text{ mg/cm}^2$ ossia

$$(13) \quad \frac{\bar{R}}{R} = 1,26.$$

Nel par. 6 torneremo a discutere questa correzione.

Il secondo termine che figura nella (10) costituisce una piccola correzione ed è stata introdotta per tener conto degli elettroni Auger aventi una energia di circa 20 KeV i quali vengono emessi, come risulta dal valore 0,75 del coefficiente di fluorescenza per l'anello K degli elementi di nu-

mero atomico prossimo a $Z=45$, nel 25% dei casi di eccitazione di tali livelli. Il fattore $\frac{R_A}{\bar{R}_A}$ è stato introdotto per tener conto che il percorso residuo medio $\bar{R}_A$ degli elettroni Auger è minore del loro percorso massimo R_A .

Nel calcolo di R_A è necessario tener presente che R_A è minore dello spessore Δ dello strato di rodio; facendo uso di una formula analoga alla (12) e del valore $\bar{R}_A = 1,75 \text{ mg/cm}^2$ di Rh si trova

$$(14) \quad \frac{\bar{R}_A}{R_A} = 0,2$$

Nella (11) il fattore 80 è il numero di ioni prodotti per centimetro di percorso di un elettrone duro (1 — 2,5 KeV) ed $\bar{l}$ è il percorso medio seguito da tale elettrone nella camera.

Con considerazioni elementari, trascurando le dimensioni lineari dello straterello di rodio rispetto a quelle della camera si trova

$$(15) \quad \bar{l} = -d \ln \cos \operatorname{arctg} \frac{r}{d} + r \left\{ \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{r}{d} \right\}$$

avendo indicato con $r=5 \text{ cm}$ il raggio della camera e con $d=11,5 \text{ cm}$ la sua altezza; si ha così

$$(16) \quad \bar{l} = 6,8 \text{ cm.}$$

Dalle (10), (11) e (8) sostituendo i valori numerici si trova

$$\frac{N_{em}}{N_{ed}} \approx 0,4$$

da cui, applicando la (7)

$$(17) \quad \alpha \approx 0,6-0,7$$

ossia un fattore di conversione dell'ordine di 1.

Questo valore non è certo molto preciso; vedremo tuttavia nel par. 6 discutendo questi risultati in relazione alla teoria, che per trarre le conclusioni che ci interessano basta conoscere poco più che l'ordine di grandezza di α .

Ho quindi ritenuto opportuno valutare il valore di α con un altro metodo del tutto indipendente dal precedente, basato sulla determinazione del rapporto del numero di quanti γ di 80 KeV al numero dei raggi X caratteristici. Infatti mentre il numero di quanti γ è pari al numero

delle transizioni isomeriche, il numero N_x dei quanti X, corretto per l'effetto Auger, è pari al numero degli elettroni di conversione.

Dalla curva di assorbimento della fig. 2 risulta che le intensità delle radiazioni X e γ stanno nel rapporto 0,4 : 0,6.

Potremo quindi scrivere

$$(18) \quad 0,4 = \frac{N_{em} 0,75}{16,6} 0,77 - 0,45 - r_x$$

$$(19) \quad 0,6 = \frac{N_\gamma 0,65}{2,9} 0,98 - 0,71 - r_\gamma$$

dove i coefficienti numerici hanno i seguenti significati

0,75 = coefficiente di fluorescenza dell'anello K del Rh;

16,6; 2,9 = coefficienti di assorbimento delle radiazioni con $\lambda = 0,613$ e $\lambda = 0,155 \text{ \AA}$ nel Rh; tali fattori servono a tener conto dell'assorbimento delle suddette radiazioni nella lamina di rodio che le emette; per i raggi X essa ha spessore infinito, per i raggi γ è stato necessario introdurre l'altro fattore $0,65 = 1 - e^{-2,9 \times 0,36}$;

0,45 e 0,71 riduzione subita dall'intensità delle due suddette radiazioni nell'altraversare 20 mm di paraffina.

0,77 e 0,98 riduzione subita dall'intensità delle due suddette radiazioni nell'attraversare le pareti di vetro del contatore;

r_x , r_γ rendimenti del contatore per le due suddette radiazioni i cui valori sono dati dalla (1).

I valori dei coefficienti di assorbimento necessari per calcolare questi fattori sono stati presi, quando possibile, dalle tabelle di Edvin Jönsson ⁽⁵⁾; altrimenti sono stati interpolati graficamente fra i valori delle tabelle di S.J.M. Allen ⁽⁸⁾.

Dalle (18) e (19) si trova infine

$$(20) \quad z = \frac{N_{em}}{N_\gamma} = 6,5 \frac{r_\gamma}{r_x} \simeq 0,9$$

in assai buon accordo con il valore trovato con il metodo precedente.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI.

Nel par. 2 ho esposto i risultati della misura del percorso in alluminio degli elettroni di conversione della riga γ la cui energia è risultata, dalle misure di assorbimento riassunte nella fig. 2, pari a

$$(21) \quad h\nu = 80 \text{ KeV}$$

Dalle curve della fig. 1, tenendo conto dello spessore della parete del contatore, si riconosce che mentre la maggior parte degli elettroni molli ha un'energia inferiore a 60 KeV come ci si deve attendere in base alla (21) e alla energia di ionizzazione dell'anello K del Rh (23 KeV) ve ne è una piccola percentuale dotata di energia assai prossima ad 80 KeV.

Questi elettroni sono probabilmente dovuti alla conversione della riga di 80 KeV nell'anello L la cui energia di ionizzazione, per $Z = 45$, è 3,4 KeV; infatti il rapporto dei fattori di conversione nell'anello L e nell'anello K, pur variando a seconda dell'energia $h\nu$ del quanto e dell'ordine l del multipolo ⁽⁴⁾, è generalmente dell'ordine del 10 — 20% ossia dell'ordine di grandezza necessario per giustificare l'andamento della figura 1.

Nei par. 3 e 4 oltre all'energia del quanto emesso nella transizione isomerica, ho misurato l'assorbimento delle radiazioni X caratteristiche ed ho trovato qualche indicazione che esse non siano dovute al Rh anziché al Pd.

Qualora si potesse accertare questo punto, i risultati esposti in questo lavoro costituirebbero una conferma definitiva dello schema proposto da Pontecorvo per interpretare l'isomeria osservata nel $^{104}_{45}\text{Rh}$.

Nel par. 5 ho infine esposto due metodi per la determinazione del coefficiente di conversione della riga γ .

Il primo di questi fornisce certamente un limite inferiore. Infatti il fattore di correzione $\frac{R}{R} = 1,26$ da me introdotto per tener conto dello spessore non trascurabile dello strato di Rh rispetto al percorso degli elettroni di conversione, è stato calcolato nella ipotesi che questi si muovano rettilineamente entro lo straterello di Rh. Tale ipotesi, certamente non molto rispondente alla realtà data la bassa energia degli elettroni in questione dà evidentemente luogo ad un valore del coefficiente di conversione inferiore a quello vero.

Il valore così trovato (0,6—0,7) non si differenzia tuttavia che assai poco dal valore 0,9 ottenuto in base alle misure eseguite sui raggi γ e sui raggi X caratteristici con il contatore a Xe, tanto da poter concludere con sicurezza che il coefficiente di conversione della riga γ (21) è di poco inferiore alla unità.

Si può cercare di vedere quali conclusioni si possono trarre dalla conoscenza di questo coefficiente e della vita media dello stato metastabile del $^{104}_{45}\text{Rh}$.

Secondo i risultati di Hebb e Nelson ⁽²⁾ in una transizione in cui il momento angolare del nucleo varia da J a J' viene emessa una radiazione γ per multipolo elettrico o magnetico il cui ordine l corrisponde al minimo valore di $|J-J'|$ permesso dalle regole di selezione dovute alla parità dei livelli ed argomenti di simmetria.

Se la transizione $J-J'$ è permessa si ha emissione per 2^l — polo elettrico; se tale transizione è proibita, si ha emissione o per 2^l — polo magnetico o per 2^{l+1} — polo elettrico o tutti e due.

I coefficienti di conversione nell'anello K sia per multipolo elettrico che per multipolo magnetico, sono stati calcolati da Dancoff e Morrison ⁽²⁾; per ciò che segue ci basta far uso delle formule valide nel caso in cui

$$h\nu \ll mc^2$$

Esse sono:

Multipolo elettrico:

$$(22) \quad \alpha_K^l = Z^3 \left(\frac{2\pi e^2}{hc} \right)^4 \frac{1}{l+1} \left(\frac{2mc^2}{h\nu} \right)^{l+5/2}$$

multipolo magnetico:

$$(23) \quad \beta_K^l = Z^3 \left(\frac{2\pi e^2}{hc} \right)^4 \left(\frac{2mc^2}{h\nu} \right)^{l+3/2}$$

che, ponendo $Z = 45$ e $h\nu = 80 \text{ KeV}$ danno

$$(24) \quad \alpha_K^l = 2,57 \cdot 10^{-4} \frac{1}{l+1} (12,5)^{l+5/2}$$

$$\beta_K^l = 2,57 \cdot 10^{-4} (12,5)^{l+3/2}$$

dalle quali si riconosce innanzi tutto che aumentando di una unità l'ordine del multipolo, il coefficiente di conversione cresce di un fattore 12,5. Da questa osservazione segue che, per quanto il valore determinato sperimentalmente del coefficiente di conversione non sia molto preciso, esso è purtuttavia sufficiente per valutare il corrispondente valore di l .

Dalle (24) si riconosce subito che per avere un coefficiente di conversione dell'ordine dell'unità, la radiazione γ emessa deve essere o di dipolo elettrico ($l=1$) o di quadrupolo magnetico ($l=2$).

Per decidere fra queste due possibilità si può far uso della relazione esistente fra la costante di disintegrazione λ del livello metastabile e l'ordine del multipolo. Tale relazione è

$$(25) \quad \lambda = \left(\frac{2\pi\nu}{c} \right)^{2l+1} \frac{e^2}{h^2} \eta^2 \frac{x^{2l}}{[1.3.5 \dots (2l-1)]^2} \text{sec}^{-1}$$

dove η è un fattore dell'ordine dell'unità e x le dimensioni del multipolo irraggiante che è evidentemente una grandezza poco nota. A. C. Helmholtz ⁽¹⁰⁾ prende x eguale al raggio nucleare ossia $x = A^{1/3} \times 1,4 \times 10^{-13}$ cm e deduce così dalla (25) la seguente espressione comoda per i calcoli numerici

$$(26) \quad \log_{10} \lambda = 20,3 - 2 \log_{10} [1.3.5 \dots (2l-1)] - (2l+1)[1,30 - \log_{10} h\nu \text{ Mev}] - 2l[0,84 - \frac{1}{3} \log A];$$

questa formula va usata nel seguente modo.

Se la transizione corrispondente al minimo valore di $J-J'$ è permessa per modo che il quanto γ viene emesso per $2^{(J-J')}$ polo elettrico la vita media del livello metastabile è data da $\frac{1}{\lambda(l)}$.

Se tale transizione è proibita e il quanto viene emesso o per 2^l polo magnetico o per 2^{l+1} polo elettrico, si deve prendere il valore di λ corrispondente a $l+1$. Tenendo infine conto del fatto che la transizione è accelerata dal processo di conversione interna ⁽²⁾ si hanno le seguenti due formule per la vita media del livello metastabile

$$(27) \quad 2^l \text{ — polo elettrico} \quad \tau = \frac{1}{(1+\alpha)\lambda(l)}$$

$$(28) \quad 2^l \text{ — polo magnetico} \quad \tau = \frac{1}{(1+\alpha)\lambda(l+1)}$$

dove α è il coefficiente di conversione totale.

Applicando la (26) e la (27) con $l=1$ (dipolo elettrico corrispondente al minimo valore di $J-J'$ si trova $\tau \simeq 10^{-14}$ sec, con $l=2$ (quadrupolo elettrico) $\tau \simeq 10^{-8}$ sec.

Nel caso invece si tratti di quadrupolo magnetico bisogna porre nella (26) $l=2+1=3$ a cui corrisponde, grazie alla (28), $\tau \simeq 1$ sec; per $l=4$ si ha già $\tau \simeq 10^7$ sec.

Fra tutti questi valori quello più vicino al risultato sperimentale

$$(29) \quad \tau = \frac{4,34 \text{ min}}{0,693} = 375 \text{ sec}$$

⁽¹⁰⁾ Phys. Rev., 60, 415 (1941).

è evidentemente quello corrispondente al quadrupolo magnetico per il quale si ottiene $\tau \simeq 1$ sec. Un fattore 400 in più nel valore della costante di disintegrazione λ rispetto al valore sperimentale non è troppo grave quando si pensi che essa dipende dalla sesta potenza delle dimensioni lineari del multipolo irraggiante; basterebbe infatti che x fosse 2,6 volte minore del raggio nucleare perchè la (26) desse luogo al giusto valore della costante di disintegrazione.

In conclusione mi sembra che si possa considerare come molto probabile che la transizione isomerica del $^{104}_{45}\text{Rh}$ avvenga per quadrupolo magnetico.

Desidero infine ringraziare i proff. G. C. Trabacchi e D. Bocciarelli per l'aiuto datomi nella esecuzione delle misure e il prof. E. Amaldi per i molti consigli e per le proficue discussioni sull'argomento.

RIASSUNTO

Dopo aver riassunto i dati forniti da vari autori sugli isomeri del $^{104}_{45}\text{Rh}$ con periodo di dimezzamento $T=4,34$ min, $T=41,8$ sec, vengono esposti i risultati di varie esperienze: misure della curva di assorbimento degli elettroni molli (par. 2); misura della curva di assorbimento in Al e Ag delle radiazioni X e γ emesse dal Rh, a mezzo di contatori a Xe (par. 3); misura degli assorbenti selettivi delle righe X caratteristiche (par. 4); misura, con due metodi diversi del coefficiente di conversione della riga γ emessa nella transizione isomerica (par. 5).

Dal confronto del valore di tale coefficiente con la teoria si conclude infine che, molto probabilmente, la transizione isomerica del $^{104}_{45}\text{Rh}$ è dovuta a quadrupolo magnetico.

SUMMARIUM

Auctor, ubi summatim exposuit quaecumque a nonnullis doctis hominibus prolata sunt super isomeribus ad $^{104}_{45}\text{Rh}$ pertinentibus, cum dimidiatis temporibus, haberentur $T=4,34$ min. et $T=41,8$ sec., complurium experimentorum exhibentur exitus, scilicet : a) dimensio curvaturae absorptionis in Al et Ag radiationum x et γ , quas Rh effundit, idque computatore adhibito qui Xenon appellatur (par. 3); c) dimensio absorptionum selectivarum in propriis seutypicis lineis (par. 4); d) dimensio duabus di-

sparibusque methodis effecta coefficientis, quod dicimus, conversionis lineae γ in transitione isomerica effusae (par. 5). Huius autem coefficientis valore cum disciplina formula conlato, valde probabiliter arguitur, translationem $^{104}_{45}\text{Rh}$ isomericam quadrupolo magnetico esse tribuendam.

Roma. — Istituto Superiore di Sanità - Laboratorio di fisica.
