

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-59/44 (1959)

M. Ladu: DOSIMETRIA FOTOGRAFICA DI RAGGI X,  $\gamma$  E DEI  
NEUTRONI.

Estratto da: Minerva Nucleare, 3, 399 (1959)

# MINERVA NUCLEARE

ORGANO MENSILE DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI BIOLOGIA E MEDICINA NUCLEARE  
INTERNATIONAL REVIEW OF NUCLEAR BIOLOGY AND MEDICINE

---

DIRETTORI

P. BASTAI

L. ANTOGNETTI - E. BENASSI - C. FOA'

G. MONASTERIO - A. ROSSI-FANELLI

---

Casella Postale 491 - C.C.P. 2/40912 - Corso Bramante, 83-85 - Telef. 69.46.82-3-4 — TORINO

---

Laboratori Nazionali di Frascati del C.N.R.N.

---

MARIO LADU

---

## Dosimetria fotografica dei raggi X, gamma e dei neutroni

*Estratto da MINERVA NUCLEARE*

Vol. III - N. 12 - Pag. 399-405 (Dicembre 1959)

---

EDIZIONI MINERVA MEDICA

---

**Introduzione.** — La necessità di difendere il personale esposto alle radiazioni ionizzanti dal grave pericolo derivante da una sovraesposizione alle radiazioni stesse, ha portato ad un continuo sviluppo dei metodi di dosimetria personale.

Non è infatti sufficiente per la sicurezza personale la conoscenza del livello di radiazione esistente nell'ambiente di lavoro, in quanto ciò non offre una garanzia assoluta contro sovraesposizioni accidentali, le cui conseguenze, spesso gravi, potrebbero rivelarsi, e in genere si rivelano, solo a lunga scadenza.

E' invece una buona garanzia la conoscenza, il più possibile esatta, della dose assorbita singolarmente, per poter prendere, se del caso, le misure idonee ad evitare, nei limiti del possibile, ogni pericolo immediato e futuro.

Di qui la necessità di dotare tutte le persone che lavorano esposte alle radiazioni, di uno strumento registratore di dose, che sia pratico, preciso ed economico. Ciò non esclude naturalmente il sistematico e periodico controllo dell'ambiente di lavoro ove si abbiano sorgenti di radiazioni, il che equivale a dire che deve essere fatta e controllata con una certa frequenza la mappa delle radiazioni. In questo modo è facile individuare sia zone particolarmente pericolose, che eventuali difetti della schermatura disposta intorno alle sorgenti. Questo controllo rientra comunque nelle norme riguardanti le condizioni generali di sicurezza e protezione del personale e non è certo idoneo a determinare la dose assorbita dalle persone singole esposte alla radiazione diffusa.

### Dosimetri personali

Due sono oggi, in generale, gli strumenti usati per la registrazione della dose assorbita singolarmente e precisamente gli stilodosimetri e i dosimetri fotografici.

Gli stilodosimetri per raggi X e  $\gamma$  altro non sono che piccole camere d'ionizzazione, aventi o no un elettrometro incorporato: i primi sono a lettura diretta e permettono la determinazione della dose mediante lettura su una scala graduata in r o mr, gli altri sono a lettura indiretta e in questo caso è necessario un apparecchio ausiliario per la determinazione della dose registrata.

La camera di ionizzazione degli strumenti è generalmente costituita da un impasto di materia plastica con alta percentuale di grafite; l'equivalenza all'aria può ritenersi buona dai 40-50 Kev fino a circa 2 MeV.

Gli stilodosimetri per neutroni lenti consistono anch'essi in una piccola camera di ionizzazione, rivestita internamente di boro; la sensibilità ai neutroni è legata alla reazione  $B^{10} (n, \alpha) Li^7$ . La dose assorbita si rileva leggendola direttamente su una scala graduata in rem o mrem.

Il principio informatore della dosimetria fotografica è basato sul meccanismo del trasferimento di energia dalla radiazione all'emulsione e sulla conseguente risposta dell'emulsione, che si traduce in una maggiore o minore densità di annerimento.

La persona su cui si vuole controllare la dose assorbita porta su di sé una speciale pellicola radiografica di formato dentale, contenuta in apposita custodia. Dopo l'esposizione la pellicola viene sviluppata e fissata in condizioni standard; quindi si procede alla determinazione della densità di annerimento, che permette di risalire alla dose sulle base di opportuni dati di taratura.

Il sistema, certamente assai pratico ed economico, non si può considerare ancora completamente a punto. Pur tuttavia esso è oggi ritenuto il più idoneo per la determinazione contemporanea di dose su un grande numero di persone.

La dosimetria fotografica dei neutroni lenti come si dirà in seguito, si può ricondurre sostanzialmente alla dosimetria  $\gamma$ , mentre per i neutroni veloci si fa uso di emulsioni nucleari che, previa taratura, per-

mettono di risalire alla dose assorbita, mediante conteggio ed eventualmente misura della lunghezza delle tracce lasciate dai protoni di rinculo.

### Dosimetria X e $\gamma$

Il dosimetro fotografico è costituito da uno strato di emulsione sensibile, spesso 10-20  $\mu\text{m}$ . steso su film e protetto da uno spessore di 0,5  $\mu\text{m}$ . di gelatina.

Sotto l'azione delle radiazioni ionizzanti, si forma la cosiddetta immagine latente, che con opportuno trattamento diventa poi l'immagine finale permanente.

Il meccanismo di formazione dell'immagine latente trova una soddisfacente spiegazione nella teoria di Gurney e Mott.

La risposta dello strumento in termini di dose espressa in r o mr, si fonda su determinati dati di taratura, mediante i quali rimane stabilita una corrispondenza quantitativa tra ionizzazione in aria e densità di annerimento.

Occorre infatti tener presente che mentre il r è una misura di energia assorbita localmente in aria, l'azione fotografica è il risultato di una ionizzazione nei cristalli dei sali d'argento dell'emulsione: di conseguenza, è logico attendersi che l'azione ionizzante in funzione dell'energia dei quanti, sia sostanzialmente diversa nei due casi (Greening).

La dipendenza della sensibilità dall'energia della radiazione incidente è mostrata in fig. 1 per un particolare tipo di emulsione. Dal punto di vista qualitativo l'andamento è lo stesso per qualunque tipo di emulsione.

Il massimo intorno a 0,03 MeV (livello K dell'argento) trova una facile spiegazione nell'assorbimento, assai forte a confronto di quello dell'aria, che la radiazione di quell'energia subisce da parte dell'emulsione.

Per energie superiori a 0,2-0,3 MeV la sensibilità rimane costante entro larghi limiti. Riprende a risalire lentamente, da 1,5 fino a circa 10 MeV, senza superare in complesso il 25 %.

La forte dipendenza della sensibilità dall'energia della radiazione, impone la necessità di una taratura dei film, con dosi note e con quanti di energia non lontana da quella per cui i film stessi verranno usati.

Bisogna inoltre tener presente, sulla base del grafico di fig. 1, che se la dipendenza dall'energia non

è sufficientemente ridotta, la scelta delle energie per la taratura è critica fino a circa 0,2 MeV.

Comunque per energie al di sotto di 0,2 MeV non è difficile rilevare le dosi assorbite semprechè si proceda ad una buona taratura, che tenga principalmente conto dell'energia della radiazione da registrare.

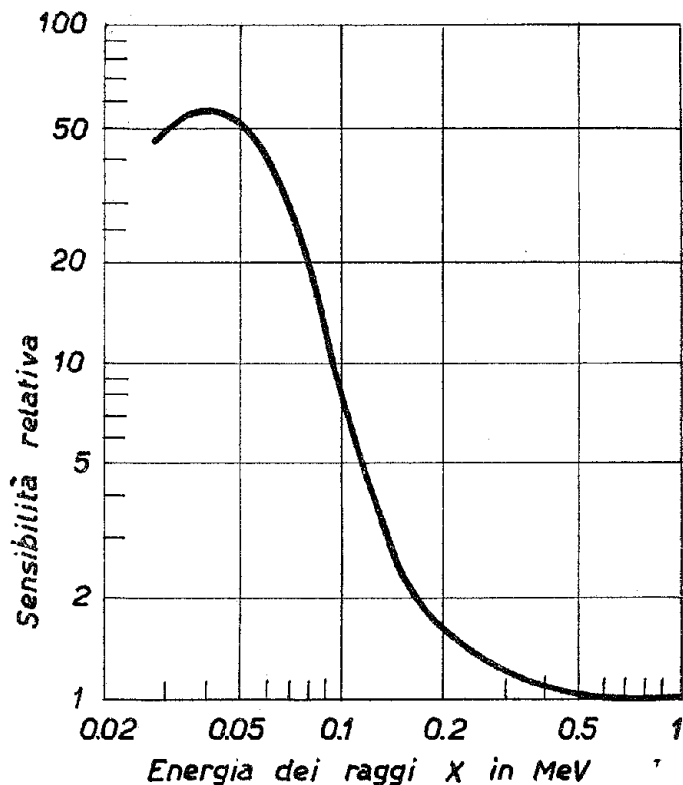


Fig. 1. — Sensibilità della Ilford Line.

La cosa però non si presenta facile in un campo di radiazione la cui energia si estenda largamente al di sopra e al di sotto di 0,2 MeV, anche se a partire da quest'ultimo valore la sensibilità dell'emulsione varia solo leggermente. Ciò perchè accanto alla radiazione diretta si presenta anche quella diffusa, dando luogo in sostanza e nel caso più generale ad uno spettro di energia piuttosto complesso.

La ricerca di un tipo di emulsione avente sensibilità il più possibile indipendente dall'energia, ha dato origine ad un notevole lavoro. Si è così tentato di realizzare pellicole poco selettive, ma il conseguente abbassamento di sensibilità, ha sconsigliato i ricercatori dall'insistere per questa via. Ugualmente

è stato abbandonato il metodo di esporre la pellicola a diretto contatto con uno scintillatore organico, perchè così è soprattutto la luce emessa dallo scintillatore ad impressionare la pellicola; sono infatti in questo caso notevoli le cause di errore (Hine e Brownell).

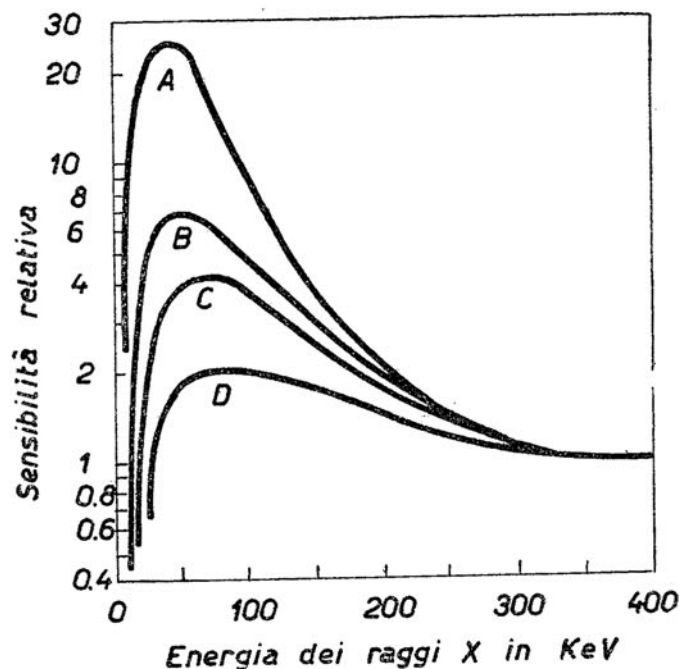


Fig. 2. — Sensibilità dell'emulsione Du Pont 502. - A senza filtro - B con filtro di ottone di 0,5 mm. - C con filtro di cadmio di 0,5 mm. - D con filtro di cadmio di 1 mm.

Si è poi usato il metodo, ormai comunemente accettato, di esporre l'emulsione sotto spessori di materiali assorbenti (Amadesi e coll.; Wachsmann e Petrozzi), capaci di ridurre la dipendenza della sensibilità dall'energia.

A questo scopo, come si può vedere dalla figura 2, si prestano bene diversi materiali la cui scelta potrebbe anche consentire, in linea di principio, di avere indicazioni circa l'energia della radiazione che ha impressionato l'emulsione. La cosa assume notevole importanza ai fini della protezione, perchè permetterebbe di valutare il grado di pericolo proveniente dalla radiazione assorbita (Wachsmann e Petrozzi).

Dalla densità di annerimento riscontrata in corrispondenza degli assorbitori, si risale, previa taratura, alla dose di radiazione registrata.

Il metodo, per quanto oggi sia da tutti seguito, non è privo di inconvenienti. Infatti la porzione di emulsione che si trova sotto un assorbitore, viene impressionata anche dalla radiazione diffusa dall'assorbitore adiacente (Ehrlich).

L'angolo sotto cui incide la radiazione ha anche esso la sua importanza nel caso in cui la pellicola sia esposta con filtri assorbenti. A una incidenza obliqua corrisponde infatti l'attraversamento effettivo di un maggiore spessore assorbente. Non ha invece importanza, anche per incidenze quasi radenti, quando il dosimetro sia esposto senza filtri.

Idealmente, per una risposta uniforme alle radiazioni da qualunque parte esse provengano, il dosimetro dovrebbe avere una geometria perfettamente sferica.

Per angoli d'incidenza fra  $0$  e  $25^\circ$  e per energie fra  $0,11$  e  $1,2$  MeV la risposta del dosimetro può essere inferiore del  $20\%$  rispetto a quella reale, mentre è notevolmente più bassa per energie inferiori a  $1,2$  MeV e per angoli d'incidenza di oltre  $40^\circ$  (Ehrlich).

Sulla base di quanto è stato detto si comprende quale importanza rivesta la taratura, che nelle migliori condizioni deve essere fatta con esposizioni a sorgenti monocromatiche, soprattutto al disotto di  $0,2-0,3$  MeV.

Per radiazioni di energia al di sopra dei  $0,2-0,3$  MeV, per quanto sia sempre preferibile una sorgente monocromatica, una buona taratura si può fare anche con sorgenti non monocromatiche, poichè la dipendenza della sensibilità dall'energia, oltre tale limite, varia assai poco.

Una volta effettuata una buona taratura la risposta dello strumento è da ritenersi abbastanza soddisfacente, potendo essere l'errore contenuto entro il  $15-20\%$  (Amadesi e coll.), purchè siano osservate determinate norme nei procedimenti ai quali il film deve essere sottoposto. Le letture infatti effettuate al densitometro e la successiva traduzione in  $r$  delle dosi registrate non hanno alcun valore, se non grossolanamente indicativo, qualora non vengano osservate certe precauzioni nei confronti dei film esposti.

La scelta del tipo di film, la conservazione dei film stessi, le condizioni di sviluppo e di fissaggio sono altrettanti fattori che possono influenzare notevolmente la risposta del dosimetro.



Nella scelta del tipo di film è bene dare la preferenza a quelli di alto contrasto i quali traducono piccole differenze delle dosi assorbite in forti differenze di densità di annerimento, il che significa che la loro curva densità di annerimento-esposizione ha una forte pendenza, che varia sia con le condizioni di sviluppo che con l'energia della radiazione.

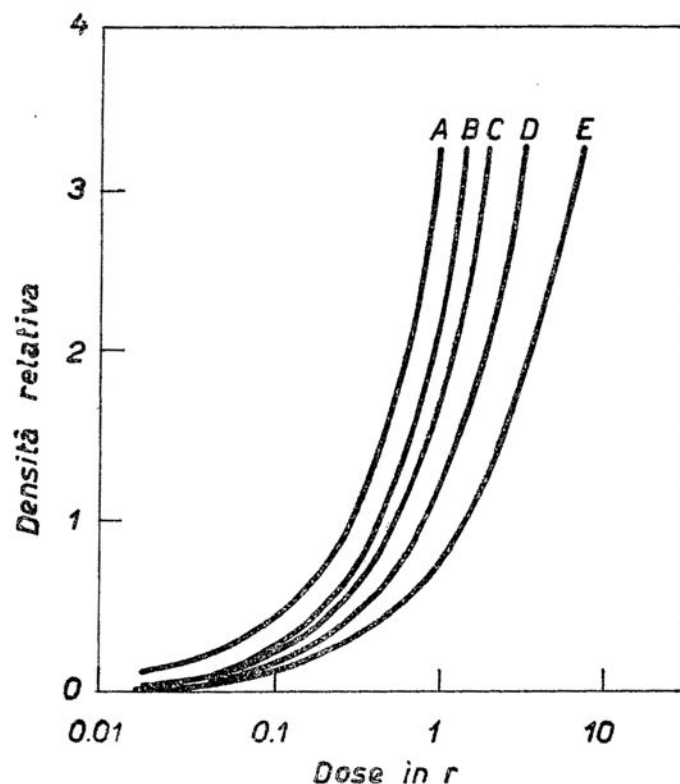


Fig. 3. — Variazione della densità di annerimento con il tempo di sviluppo. A 8'; B 5'; C 4'; D 3'; E 2'.

La scelta del film va anche basata sulla sua sensibilità che si usa definire come l'inverso della dose di radiazione richiesta per produrre una certa densità di annerimento.

Insieme con un buono contrasto e un'alta sensibilità deve essere richiesta all'emulsione una conveniente uniformità, che permetta di riprodurre adeguatamente i risultati densitometrici. Ciò si può ottenere, una volta scelto il tipo di film, usando film di una stessa partita.

Lo sviluppo deve essere fatto in condizioni standard e altrettanto il fissaggio. Lo sviluppo, che deve essere sempre fresco, riduce in argento i sali di argento

esposti alla radiazione. Gli sviluppi al metolo e all'idrochinone, il primo dei quali agendo rapidamente dà inizio a un debole annerimento delle zone esposte, mentre il secondo agendo più lentamente ne esalta il contrasto, rispondono assai bene allo scopo:

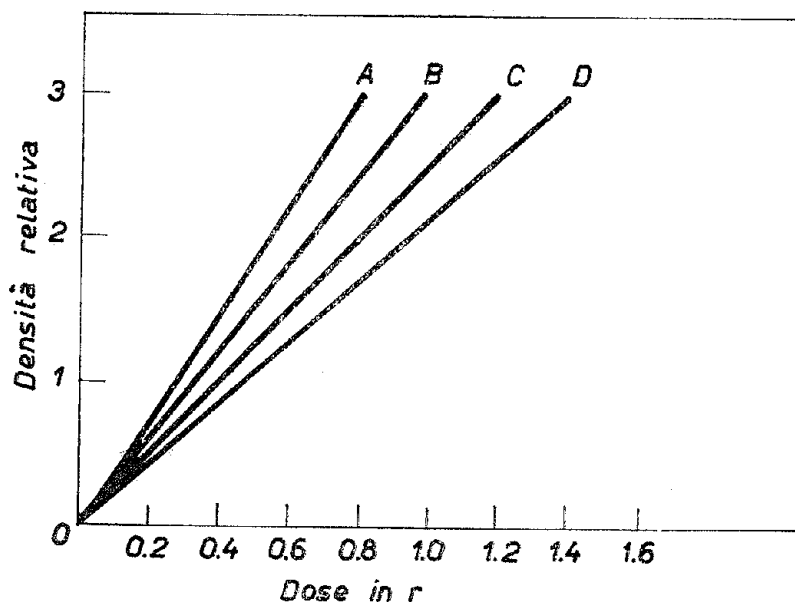


Fig. 4. — Variazione della densità di annerimento con la temperatura di sviluppo. A 23° C - B 21° C - C 20° C - D 18 C°.

La temperatura e il tempo di sviluppo vanno rigorosamente controllati. Eventuali variazioni dell'una e dell'altro alterano sensibilmente la risposta dei film egualmente esposti e precisamente l'aumento del tempo di sviluppo e della temperatura del bagno, producono un notevole aumento della densità di annerimento (fig. 3 e 4). Così due film egualmente esposti ma non sviluppati in condizioni rigorosamente uguali, danno due risposte del tutto diverse. Durante lo sviluppo non bisogna trascurare l'agitazione del bagno per non ritardare l'effetto dello sviluppo stesso. Fra due film egualmente esposti e sviluppati, uno però con agitazione ed uno senza (Wiltshire), la maggior densità di annerimento si riscontra nel primo (fig. 5).

Il fissaggio agisce convertendo i sali di argento in composti solubili. Un'aggiunta di acido acetico (intorno al 2%) serve a neutralizzare l'effetto di eventuali tracce di sviluppo rimaste nell'emulsione.

Un cenno a parte merita l'effetto dell'indebolimento dell'immagine latente (fading). Il fenomeno, non ancora del tutto chiaro, risulta strettamente legato al tipo di emulsione e in particolare alle condizioni di temperatura e umidità alle quali i film vengono conservati prima e dopo l'esposizione.

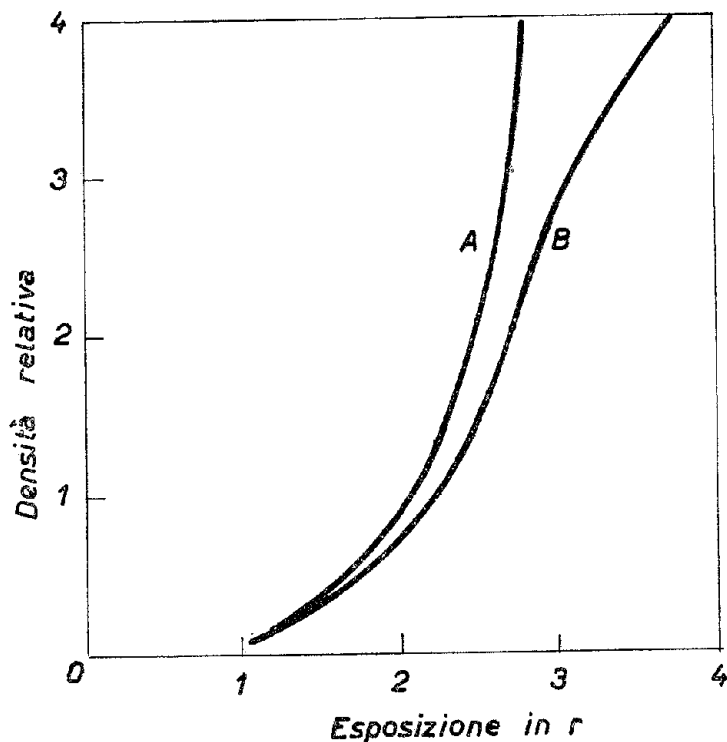


Fig. 5. — Effetto dell'agitazione sulla densità di annerimento. A con agitazione - B senza agitazione

Pertanto, una volta formata l'immagine latente, se non si procede immediatamente allo sviluppo e successivo fissaggio, l'emulsione dimentica almeno in parte la registrazione effettuata.

Quando i film sono usati per dosimetria personale non si procede in genere allo sviluppo e al fissaggio se non dopo un periodo piuttosto lungo. Essi rimangono infatti esposti anche per 30 giorni, dimenticando quindi ogni giorno una parte della dose assorbita nei giorni precedenti.

In un periodo di 8 giorni, a seconda del tipo di film, la conservazione a una temperatura di 22° C e in ambiente col 60 % di umidità relativa, ha permesso di osservare una diminuzione della dose registrata, variabile dal 15 al 60 % (Ehrlich, McLaughlin e Ehrlich).

Sembra pertanto sconsigliabile l'uso continuato dello stesso film per un lungo periodo di tempo; una frequenza settimanale nel cambio dei dosimetri, insieme con una conservazione in ambiente ove non si verificano notevoli variazioni di temperatura e di umidità, è perlomeno desiderabile.

Un'altra raccomandazione è da farsi: poichè i film, a seconda del tipo, rispondono bene entro determinati limiti di dose, per una corretta risposta è necessario che questi non vengano superati. Si trovano oggi dei film che rispondono bene entro larghissimi intervalli di dose (Argiero, Ehrlich).

Tutte le cause di errore alle quali si è accennato, pur non essendo facilmente eliminabili, si possono abbastanza bene valutare, e il ricorso a corretti metodi di teratura e di lettura al densitometro permette in definitiva una valutazione delle dosi entro limiti accettabili per la sicurezza personale (Amadesi e coll.).

### Dosimetria dei neutroni

Lo stato insoddisfacente al quale si trova la dosimetria dei neutroni, si può spiegare con la grande complessità dei processi fisici legati alle interazioni neutroni-materia.

La maggioranza delle sezioni d'urto varia rapidamente con l'energia dei neutroni e le variazioni sono spesso notevoli e improvvise, con picchi di risonanza assai marcati.

In pratica, quantunque altre difficoltà sorgano per la scarsità d'informazioni entro alcuni intervalli di energia, il problema della dosimetria di queste particelle si può semplificare tenendo conto delle interazioni prevalenti con i tessuti.

Procedendo con estremo rigore e tenendo presente che generalmente si ha a che fare con distribuzioni spettrali continue, a causa della dipendenza della EBR dall'energia una corretta valutazione dosimetrica dovrebbe farsi con dosimetri selettivamente sensibili entro limitate regioni dello spettro. Le difficoltà pratiche di un tale procedimento impongono una soluzione semplificata del problema, soluzione che riconduce sostanzialmente a due gli intervalli di energia da considerare ed è nel contempo accettabile per la sicurezza personale.

Alla semplificazione si arriva tenendo conto delle interazioni neutroni-tessuti, che per energie fino a

circa 100 eV si manifestano soprattutto tramite le reazioni  $H(n, \gamma)D$  e  $N^{14}(n, p)C^{14}$ , la prima delle quali dà un  $\gamma$  di 2,2 MeV e la seconda un protone di circa 600 KeV. Per energie sopra i 20 KeV e fino ai 20 MeV esse si manifestano in prevalenza tramite scattering elastici n-p, con trasferimento di gran parte dell'energia ai nuclei d'idrogeno, che a loro volta la perdono per ionizzazione nei tessuti. Nell'intervallo fra 100 eV e 20 KeV le interazioni n-p non avvengono con un processo semplice; ma agli effetti biologici la cosa non è di estremo interesse se si pensa che i neutroni di tale intervallo di energia vengono termalizzati dopo una penetrazione di 2-3 cm di tessuto.

Per gli scopi dosimetrici e tenendo conto del fatto che l'organismo può essere considerato, senza grave errore (10 % circa), come costituito solo da idrogeno, si comprende come i neutroni si possano sostanzialmente classificare in lenti e veloci. Quantunque il limite di separazione fra lenti e veloci non sia ben definito si può dire che rientrano fra i primi quelli per i quali prevale la reazione di cattura  $(n, \gamma)$  e fra i secondi quelli per i quali prevale la diffusione elastica n-p (Hine e Brownell, Musumeci).

**Neutroni lenti.** — Il metodo più seguito nella dosimetria fotografica dei neutroni lenti è quello che utilizza la reazione  $Cd^{113}(n, \gamma)Cd^{114}$  (Kalil). Ponendo infatti da una parte e dall'altra di un film utilizzabile per la dosimetria  $\gamma$ , un foglietto di cadmio spesso 0,5 mm, viene catturato il 99 % circa dei neutroni termici incidenti, con emissione di  $\gamma$  di cattura che anneriscono sensibilmente il film nella zona coperta dal cadmio. Con questo metodo un rem di neutroni termici dà un annerimento quasi uguale a quello prodotto da 2,3 rem di  $\gamma$ .

Nel film vi sono tre distinte zone di esposizione: una ricoperta da entrambe le parti con un sottile foglio di cadmio, una senza assorbitore ed una terza ricoperta da entrambe le parti da uno spessore assorbente, scelto in modo tale da permettere di conoscere qual'è il valore della densità di annerimento, sotto il cadmio, che deve essere attribuita ai neutroni termici. E' sufficiente per questo che l'assorbente scelto possieda le stesse proprietà assorbenti del cadmio per i  $\beta$  e i  $\gamma$ .

Per il suo contributo alla dose assorbita dall'organismo, dato il contenuto in azoto di quest'ultimo,

presenta un certo interesse la reazione  $N^{14} (n, p) C^{14}$ ; ma tale reazione richiede l'uso di emulsioni nucleari nelle quali il protone emesso con un'energia di 0,63 MeV percorre circa 10  $\mu\text{m}$ . La radioattività del  $C^{14}$  è di nessuna importanza a causa del lungo periodo di decadimento dell'isotopo.

Con normali emulsioni nucleari, il semplice conteggio dei protoni della reazione sopracitata, consente una discreta stima di flussi elevati di neutroni lenti (Demers).

Incorporando nelle emulsioni nucleari del boro, si può utilizzare anche la reazione  $B^{10} (n, \alpha) Li^7$ , che obbedisce alla legge  $1/v$  fino a energie dell'ordine di 10 KeV (Price e coll.).

Emulsioni Ilford di 200  $\mu\text{m}$  di spessore, aventi una sensibilità molto elevata, sono state ottenute con l'aggiunta di 34  $\text{mg}/\text{cm}^3$  di boro e 12  $\text{mg}/\text{cm}^3$  di litio. Grazie alle sezioni d'urto piuttosto alte del  $Li^7$  e del  $B^{10}$ , e in particolare di quest'ultimo, Kaplan e Yagoda hanno ottenuto con tale sistema una sensibilità di 0,94 tracce/ $\text{cm}^2$  per unità di flusso neutronico.

Utilizzando film normali, i neutroni lenti possono inoltre essere rivelati grazie all'attività  $\beta$  e  $\gamma$  indotta nell'argento dell'emulsione od anche sfruttando il metodo dei fogli irradianti e in particolare del rodio.

Nel primo caso i due isotopi  $Ag^{108}$  e  $Ag^{110}$  vengono attivati con emissione  $\beta$  e  $\gamma$ . La conseguente risposta dell'emulsione è molto imprecisa anche per la difficoltà di una buona taratura, specie a causa del complesso spettro dei  $\beta$  di decadimento (Dudley, Jochilin e Golden).

Nel secondo caso basta mettere da una parte e dall'altra del film un foglietto di rodio di 0,3 mm di spessore che assorbe circa il 30 % dei neutroni termici che vi incidono perpendicolarmente, con conseguente emissione di  $\beta$  e di  $\gamma$  che impressionano l'emulsione; dalla densità di annerimento si risale poi al flusso di neutroni incidenti. Anche in questo caso la risposta è molto imprecisa a causa delle difficoltà di taratura (Dudley).

L'uso dei film utilizzati normalmente nella dosimetria  $X$  e  $\gamma$ , impone logicamente l'osservanza delle stesse norme e un trattamento identico a quello già descritto. Naturalmente alla base di un risultato accettabile per la sicurezza personale, sta sempre una buona taratura che consenta di ottenere risposte precise intorno al  $\pm 30$  %.

**Neutroni veloci.** — La dosimetria fotografica dei neutroni veloci per i quali, come si è detto, prevale la diffusione elastica n-p, è quasi esclusivamente basata sul conteggio e sulla misura della lunghezza delle tracce lasciate dai protoni di rinculo nelle emulsioni nucleari (Cheka).

Altri metodi, basati sulla produzione di particelle cariche attraverso particolari reazioni nucleari, o su attività  $\beta$  e  $\gamma$  indotta, sono ben lontani dal dare un grado di precisione accettabile per la sicurezza personale, sia per la scarsa sensibilità, che per le difficoltà di taratura. L'uso però di emulsioni nelle quali sia stato incorporato del litio, permette di utilizzare la reazione  $\text{Li}^6 (n, \alpha) \text{H}^3$  che copre un intervallo di energia che va da 30 KeV fino a 1,5 MeV (Keeping e Roberts, Roberts e coll.).

Val la pena a questo punto di osservare che già per energie di poco inferiori a 0,3 MeV, i protoni di rinculo lasciano nell'emulsione una traccia non facilmente identificabile.

Con la reazione citata, grazie alla notevole sezione d'urto del litio, la tecnica delle emulsioni nucleari permette quindi di coprire l'intervallo fra 30 KeV e almeno 0,3 MeV e di determinare anche lo spettro di energia dei neutroni entro tale intervallo e fino a 1,5 MeV con buona precisione (Roberts e coll.).

Le emulsioni usate per la dosimetria dei neutroni veloci tramite i protoni di rinculo, hanno uno spessore di 30-40  $\mu\text{m}$  o più e la loro composizione è diversa da quella delle emulsioni usate per la dosimetria X e  $\gamma$ . In tab. I è data la composizione della Kodak NTA e della Ilford C2. Il processo di sviluppo e di fissaggio non si discosta eccessivamente da quello descritto in precedenza, ammenochè, non si tratti di emulsioni spesse 100  $\mu\text{m}$  o più (Demers).

TABELLA I. — *Composizione chimica delle emulsioni Eastman Kodak e Ilford C2*

Elemento	Ilford C2 gr/cm <sup>3</sup>	Kodak NTA gr/cm <sup>3</sup>
Ag	2,025	1,70
Br	1,46	1,22
I	0,057	0,054
C	0,30	0,34
O	0,20	0,17
N	0,073	0,11
H	0,049	0,043
S	0,011	—

Nelle emulsioni il percorso dei protoni di rinculo si rivela dopo lo sviluppo, all'osservazione al microscopio, come una successione di granuli d'argento allineati e più o meno addensati gli uni agli altri.

La risposta dell'emulsione può essere notevolmente migliorata, se l'emulsione stessa viene circondata con materiale idrogenoso. L'uso poi di filtri appropriati permette in alcuni casi di fare determinazioni di dose, indipendentemente dall'energia dei neutroni, fra 1 e 10 MeV (Cheka, Cook).

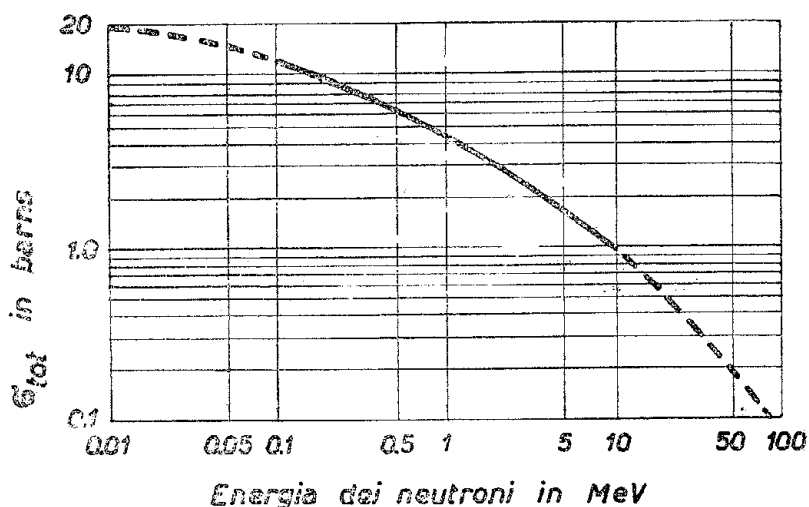


Fig. 6.

Un particolare procedimento è quello di racchiudere l'emulsione fra due supporti d'acetato di cellulosa di 30 mg/cm<sup>2</sup>, due fogli di alluminio di 30 mg/cm<sup>2</sup> e due foglietti di carta di 15 mg/cm<sup>2</sup>.

Così facendo lo spessore idrogenato aumenta la sensibilità dell'emulsione per i neutroni di energia maggiore di 2 MeV, mentre la foglia di alluminio la diminuisce per i neutroni di bassa energia; nel complesso la densità di tracce risulta, entro certi limiti, indipendente dall'energia dei neutroni fra circa 1 e 10 MeV (Cheka).

Con tale sistema, una Eastman Kobak NTA da 40  $\mu$ m di spessore che abbia subito un'irradiazione di 0,3 rem, registra in media 4000 tracce protoniche per cm<sup>2</sup>, per neutroni fra 0,5 e 10 MeV.

E' sufficiente quindi con un sistema del genere il solo conteggio delle tracce per risalire, in base ad una buona taratura, al flusso dei neutroni incidenti.



Un altro sistema è quello descritto da Cook, che permette di ottenere risultati corretti entro un fattore 2, per neutroni di energia compresa fra 0,3 e 10 MeV, con una sensibilità di  $10^4$  tracce per  $\text{cm}^2$  e per rem e per dosi fra 0,05 e 100 rem.

La sezione d'urto totale dell'idrogeno, per neutroni di energia fra 0,1 e 10 MeV è rappresentata in fig. 6. Essa decresce con l'aumentare dell'energia dei neutroni e mentre a 0,1 MeV è di circa 14 barns e 10 MeV scende a meno di 1 barn.

Nel caso in questione interessano solo gli urti elastici n-p; i neutroni urtano infatti elasticamente contro i nuclei d'idrogeno dell'emulsione ed eventualmente di radiatori secondari, e il loro percorso viene registrato dall'emulsione.

L'angolo  $\Theta$  fra la direzione del protone urtato e quella del neutrone incidente è dato dalla relazione:

$$E_p = E_n \cos^2 \Theta \quad (\Theta \leq 90^\circ)$$

dalla quale si vede che il neutrone può cedere al protone tutta la sua energia.

Poichè è la stessa la probabilità di produrre protoni di tutte le energie minori di  $E_n$ , l'energia media dei protoni è  $E_n/2$  e lo spettro è rettangolare.

Risulta quindi che quando un gas di neutroni monoenergetici incide sull'emulsione, le tracce dei protoni registrati avranno tutte le possibili lunghezze al di sotto di un certo massimo, nonchè tutte le orientazioni e inclinazioni possibili in seno all'emulsione.

Per risalire con sufficiente rigore alla dose effettiva registrata dall'emulsione esposta ad uno spettro di neutroni diffusi, oltre al numero delle tracce dei protoni di rinculo, nel caso più generale bisogna misurarne anche la lunghezza (Rosen).

In tal modo, una volta determinato lo spettro di energia, se ne terrà il debito conto per la valutazione dell'E.B.R. e quindi della dose.

Lo spettro di energia dei neutroni per un'irradiazione isotropa è ricavabile dalla formula di Zinn e Szilard

$$N(E) = \frac{E}{H \sigma_{n,p}(E)} \cdot \frac{dR(E)}{dE}$$

dove  $N(E)$  è il numero di neutroni di energia fra  $E$  ed  $E+dE$ ,  $R(E)$  è il numero di protoni negli stessi intervalli di energia,  $\sigma_{n,p}(E)$  la sezione d'urto di scat-

tering elastico per neutroni di energia  $E$ , ed  $H$  il numero di nuclei d'idrogeno nel volume di emulsione esplorato.

La misura della lunghezza delle tracce, pur non presentando difficoltà, è piuttosto lunga e faticosa. Essendo infatti le tracce distribuite a caso e con diversa inclinazione, per risalire alla lunghezza effettiva occorre tener conto sia della loro inclinazione rispetto al piano dell'emulsione, sia del fattore di contrazione dell'emulsione stessa.

La più corretta valutazione delle dosi richiede inoltre la sottrazione sia delle così dette tracce di fondo che si incontrano in ogni emulsione e che provengono generalmente da contaminazione radioattiva, sia delle tracce provenienti dalla reazione  $N^{14} (n, p) C^{14}$ .

In sostanza anche in questo caso è assolutamente indispensabile una buona taratura che tenga conto di ogni possibile causa d'errore e delle particolari condizioni in cui il dosimetro fotografico viene esposto. Questo viene infatti portato normalmente all'altezza del petto, alla distanza di 1-2 cm. dalla superficie del corpo, la cui presenza, per il suo contenuto in idrogeno, modifica la densità dei neutroni a causa della diffusione all'indietro.

Di conseguenza nella taratura si deve tenere conto del fatto che l'emulsione, mentre posta in un punto lontano da diffusori misurerebbe la dose che un corpo riceverebbe in quel punto, portata addosso ad una persona non può più misurare la dose corretta (Cheka).

In ogni caso si può dire che la dose che si misura è una dose media rappresentativa. Infatti poichè la persona che porta il dosimetro si muove continuamente, varia di continuo non solo l'angolo di incidenza dei neutroni, ma anche il grado di protezione del corpo sul dosimetro stesso. Ma mentre la variazione dell'angolo d'incidenza può portare a notevoli variazioni della risposta, la protezione del corpo può non essere una grave fonte di errore, perchè portando il dosimetro all'altezza del petto considerato come zona di probabile massima esposizione, quando il film è parzialmente protetto, è parzialmente protetta la corrispondente parte del corpo.

Sostanzialmente gli effetti dei diffusori e dell'angolo d'incidenza possono così riassumersi (Cheka):

- 1) la diffusione all'indietro e la conseguente

variazione di flusso dovute alla presenza di un diffusore, aumentano con l'aumentare dell'energia media dei neutroni; la diffusione laterale è minore della diffusione all'indietro;

2) un diffusore di paraffina di 16 cm. di spessore, viene attraversato dal 10-20 % circa dei neutroni incidenti, la percentuale essendo maggiore per una maggiore energia media;

3) per un'incidenza parallela alla superficie dell'emulsione e senza diffusori vicini, la risposta del dosimetro, salvo particolari accorgimenti (Cook), è il 50-60 % di quella registrata con incidenza normale. E' infine il 60-70 % di quella che si ha per un'incidenza normale, quando il dosimetro si fa ruotare, in modo da simulare mediamente i movimenti della persona che lo porta.

L'effetto del fading infine, pur essendo sempre legato alle condizioni di esposizione e di conservazione delle emulsioni (in particolare umidità e temperatura), varia da emulsione a emulsione.

Trascurabile nelle Ilford C 2, anche per periodi di esposizione di 12 settimane (Cook), l'effetto raggiunge notevoli valori nelle Kodak NTA (Cheka), per cui in pratica in una settimana di esposizione, si perde non meno del 10-15 % delle tracce.

Per neutroni di energia superiore a 15 MeV la dosimetria fotografica potrebbe sfruttare la reazione  $B^{10}(n,2\alpha)H^3$  (Lattes e Occhialini); ma l'interesse dosimetrico per tale campo di energia, i cui aspetti d'altronde sono stati discussi da Moyer, è molto limitato, soprattutto perchè agli affetti della protezione personale le misure che interessano sono quelle che vengono fatte oltre le schermature, dove i primari sono fortemente attenuati e in sostanza si hanno solo  $\gamma$  e neutroni di bassa energia.

*Riassunto.* - Si fa una breve rassegna dei principali lavori sulla dosimetria fotografica dei raggi X,  $\gamma$  e dei neutroni, mettendo in evidenza i vantaggi e le limitazioni del metodo. Si accenna ai metodi di taratura, alle principali cause di errore e ai procedimenti ai quali i film devono essere sottoposti per dare una risposta accettabile per la sicurezza personale.

*Summary.* - The Author gives here a short survey of the most important papers on the photographic dosimetry of X,  $\gamma$  rays and of the neutrons, pointing out the advantages

and limitations of the method. Mention is given to calibration, to the causes of errors and to the proceedings by which an acceptable response for the personal security can be obtained.

#### BIBLIOGRAFIA

- Amadesi P., Grimellini N., Guenzi G., Rimondi O. *Min. Nucl.*, 2, 44, 1959.  
Argiero L. *Nuovo Cimento*, 10, 1035, 1953.  
Cheka J. S. *Phys. Rev.*, 90, 353, 1953.  
Cheka J. S. *Nucleonics*, 6, 40, 1954.  
Cook J. E. *Aere HP R*, 2744, 1958.  
Demers P. *Ionographie*, pag. 49 e segg. e pag. 380, Ed. Les Presses Universitaires de Montréal, 1958.  
Dudley R. A. *Nucleonics*, 12, 24, 1954.  
Ehrlich M., Fitch S. H. *Nucleonics*, 9, 3, 1951.  
Ehrlich M. *N.B.S. Handbook*, 57, 1954.  
Greening J. R. *Proc. Phys. Soc.*, B, 64, 977, 1951.  
Guiney R. W., Mott N. F. *Proc. Roy. Soc.*, 164, 151, 1938.  
Hine J., Brownell G. L. *Radiation Dosimetry*, pag. 330-331, e pag. 670 e segg., Ed. Academic Press, New York, 1956.  
Jochilin E., Golden R. *Nucleonics*, 8, 26, 1953.  
Kalil F. *Nucleonics*, 11, 91, 1955.  
Kaplan N., Yagoda H. *Rev. Sci. Instr.*, 23, 155, 1952.  
Keepling G. R., Roberts J. H. *Rev. Sci. Instr.*, 21, 163, 1950.  
Lattes C. M. G., Occhialini G. P. S. *Nature*, 159, 331, 1947.  
McLaughlin W. L., Ehrlich M. *Nucleonics*, 10, 34, 1954.  
Moyer B. J. *Nucleonics*, 4, 14, 1952.  
Moyer B. J. *Nucleonics*, 5, 14, 1952.  
Musumeci L. *Min. Nucl.*, 10, 303, 1958.  
Price B. T., Horton C. C., Spinney K. T. *Radiation Shielding*, pag. 138, Ed. Pergamon Press, 1957.  
Roberts J. H., Darlington L., Haugsnes J. *Phys. Rev.*, 82, 299, 1951.  
Roberts J. H., Nakaji E., Solano W. *Phys. Rev.*, 81, 327, 1951.  
Roberts J. H., Solano W., Wood D. E., Billington H. B. *Phys. Rev.*, 89, 905, 1953.  
Rosen L. *Nucleonics*, 7, 32, 1953.  
Rosen L. *Nucleonics*, 8, 38, 1953.  
Wachsmann F., Petrozzi E. *Min. Nucl.*, 1, 27, 1959.  
Wiltshire W. J. *Industrial Radiology*, pag. 104-109, Ed. Edward Arnold Ltd, London, 1957.  
Zinn W. H., Szilard L. *Phys. Rev.*, 56, 619, 1939.