

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/41 (1962)

R. Breschi, M. Ladu, E. Rotondi: SPETTRO DI ENERGIA DI NEUTRONI  
DIFFUSI INTORNO AL SINCROTRONE DI FRASCATI.

Estratto dalla: Minerva Nucleare, 6, 18 (1962)

# MINERVA NUCLEARE

ORGANO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI BIOLOGIA E MEDICINA NUCLEARE  
E DELLA ASSOCIAZIONE ITALIANA DI FISICA SANITARIA  
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.E.N.  
Laboratorio di Dosimetria, Standardizzazione  
e Strumentazione Nucleare Applicata - Sezione di Frascati

---

R. BRESCHI - M. LADU - E. ROTONDI

---

## Spettro di energia dei neutroni diffusi intorno al sincrotrone di Frascati

*Estratto da MINERVA NUCLEARE*  
Vol. 6 - N. 1 - Pag. 18-23 (Gennaio 1962)

---

EDIZIONI MINERVA MEDICA

---

**Introduzione.** — Il trasferimento di energia alla materia, da parte dei neutroni, avviene tramite i nuclei di rinculo originati in collisioni elastiche, le particelle cariche emesse nelle reazioni nucleari e i raggi  $\gamma$  di cattura.

Nella dosimetria biologica rivestono particolare importanza, tenuto conto della costituzione dei tessuti, le reazioni elastiche (n-p) che sono prevalenti nell'intervallo di energia fra 20 KeV e 20 MeV<sup>2</sup>.

Dato il valore notevolmente elevato della EBR dei neutroni in questo intervallo di energia, nel quale varia<sup>5</sup> fra 5 e 10, l'esatta valutazione della dose assorbita non può prescindere dalla conoscenza dello spettro di energia, anche se ragioni di sicurezza giustificano la scelta del valore massimo, per sopravvalutare piuttosto che sottovalutare la dose assorbita.

In generale è assai difficile risalire alla dose assorbita dalla conoscenza del flusso neutronico, poichè i  $\gamma$ , dovunque prodotti, danno un contributo alla dose in punti diversi da quelli nei quali sono stati originati e perchè la diffusione altera lo spettro dei neutroni e la loro distribuzione angolare<sup>9</sup>.

Considerando il caso limite in cui i neutroni interagiscono con un sottile strato di materiale, in modo che ogni neutrone assai difficilmente possa subire più di un urto, la dose D assorbita da un flusso  $\Phi$  di neutroni di energia E è data da

$$D = 0.01 \Phi t E \rho^{-1} \sum N_K \sigma_K f_K$$

ove t è il tempo che dura l'irradiazione,  $\rho$  la densità del materiale,  $N_K$  il numero di atomi/cc. di tipo K,  $\sigma_K$  la sezione d'urto per interazione con atomi di

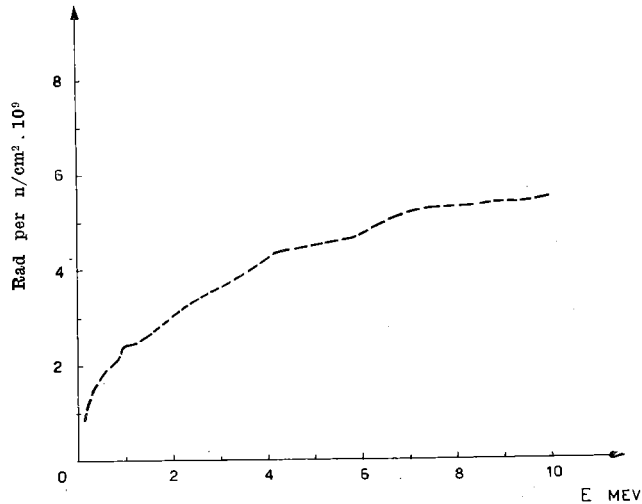


Fig. 1. — Dose di primo urto in tessuto in funzione dell'energia dei neutroni.

questo tipo ed  $f_K$  la frazione media dell'energia dei neutroni trasferita al mezzo in tali interazioni.

La sommatoria è estesa a tutti i tipi di atomi del materiale irradiato e se con lo stesso tipo di atomo si hanno più specie di interazioni, allora

$$\sigma_K f_K = \sigma_{K1} f_{K1}$$

ove  $\sigma_{K1}$  è la sezione d'urto per reazioni del tipo  $i$  con atomi di tipo  $K$  ed  $f_{K1}$  è la frazione media dell'energia dei neutroni trasferita al mezzo in una tale reazione.

Se l'energia delle particelle originate in una reazione è maggiore dell'energia del neutrone incidente,  $f_K$  risulta più grande dell'unità.

La dose così calcolata si chiama dose di primo urto ed è funzione dell'energia dei neutroni. In fig. 1 tale dose è data, fino a 10 MeV, per il tessuto.

Intorno ad un acceleratore, come può essere quello di Frascati, le misure di dosimetria personale hanno senso e si effettuano oltre le schermature della macchina, ove  $\gamma$  e neutroni sono fortemente attenuati in intensità ed energia <sup>4-8</sup>.

Misure effettuate intorno ad altri acceleratori<sup>6</sup> hanno dimostrato che al di là delle schermature l'energia media dei neutroni diffusi si aggira intorno ai 0,5 MeV e che si può praticamente considerare nullo il contributo di neutroni di energia superiore a 1 MeV.

Per quanto si è detto abbiamo ritenuto utile studiare la distribuzione in energia dei neutroni diffusi intorno al sincrotrone, allo scopo di avere un'idea chiara del grado di sicurezza nel quale si svolge il lavoro intorno alla macchina.

### Esposizione delle lastre e misure

Lo spettro in questione è stato determinato con la tecnica delle emulsioni nucleari<sup>1</sup> misurando il range dei protoni di rinculo prodotti dai neutroni nell'emulsione. Le lastre sono state esposte nei punti indicati in fig. 2 con A, B, C, D, E, F, G. Nella stessa figura sono visibili i fasci  $\gamma$  con i quali si lavora normalmente.

La storia delle lastre esposte è la seguente:

— Lastre A, B, C: tipo K2 da 100  $\mu$ ; esposte per 20<sup>m</sup> mentre lavorava il fascio n. 1. Tracce misurate: 1540.

— Lastra D: tipo K2 da 200  $\mu$ ; esposta per 15<sup>m</sup> mentre lavorava il fascio n. 4. Tracce misurate: 1000.

— Lastra E: tipo K2 da 200  $\mu$ ; esposta per 15<sup>m</sup> mentre lavorava il fascio n. 4. Tracce misurate 500.

— Lastre F e G: tipo K2 da 100  $\mu$ ; esposte per complessive 55<sup>h</sup>, di cui 11<sup>h</sup> col fascio n. 1, 8<sup>h</sup> col fascio n. 2 e 36<sup>h</sup> col fascio n. 4. Tracce misurate 1000.

Il tempo di esposizione è stato per queste ultime lastre notevolmente più lungo che per le altre perchè, data la zona di esposizione si poteva ragionevolmente presumere anche in base a numerose esposizioni di prova che sarebbero state investite da un flusso di neutroni piuttosto debole<sup>3</sup>.

Per tutte le lastre si è usato lo sviluppo standard all'amidolo. Sono state misurate le sole tracce che nascono e muoiono nell'emulsione ed è stata successivamente apportata la correzione geometrica valida nel caso di distribuzione isotropa dei neutroni<sup>7</sup>, dato che ogni traccia protonica di range  $R$  interamente contenuta in un'emulsione di spessore  $d$ , rappresenta in realtà un numero di tracce dato da  $d/(d-R \sin \varphi)$ , aventi lo stesso range  $R$  ma angolo di dip  $\varphi$ .

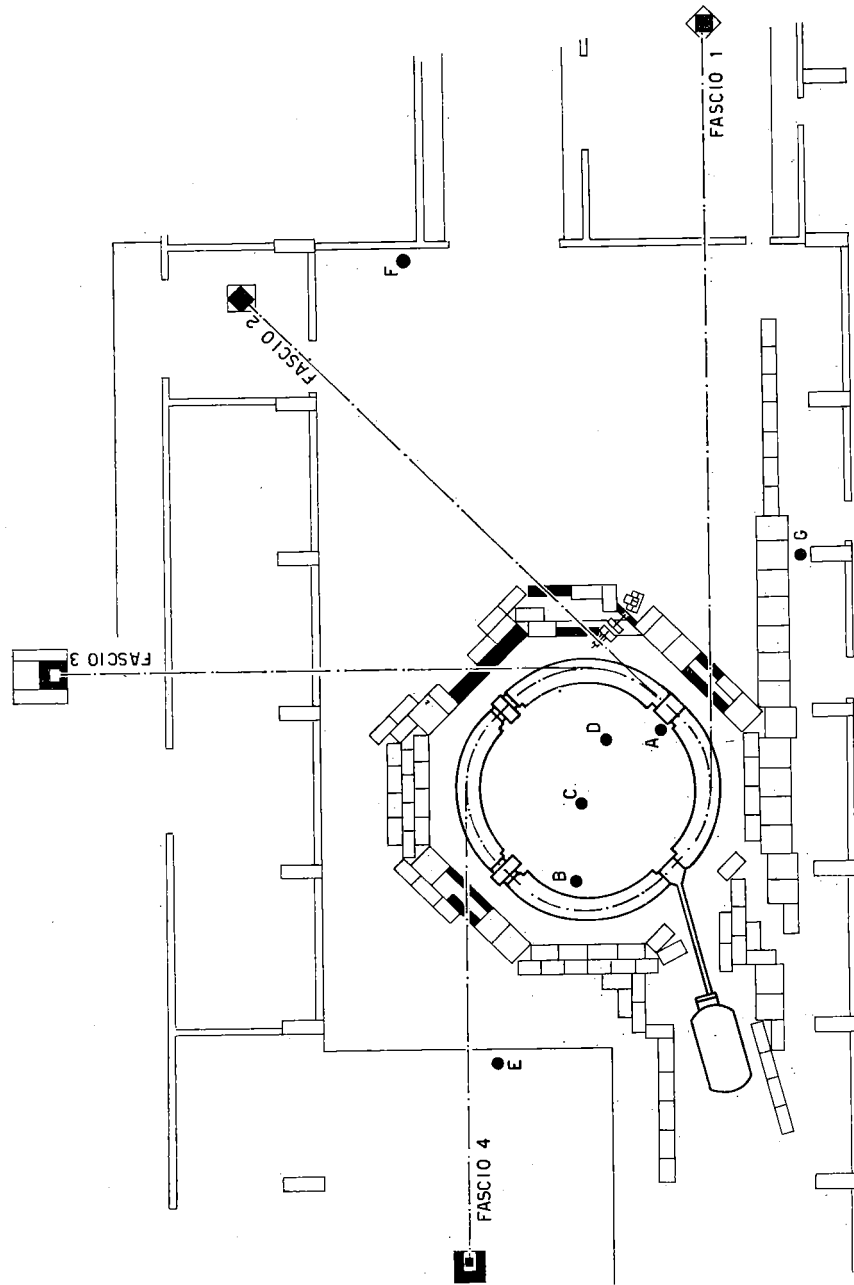


Fig. 2. — Disposizione delle schermature e direzione dei quattro fasci utilizzati per le esperienze. I punti A, B, C, D, E, F, G, sono quelli nei quali erano esposte le lastre.

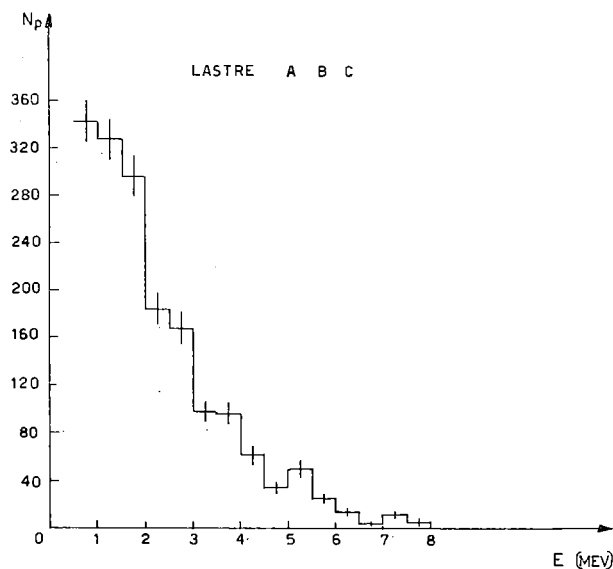


Fig. 3. — Distribuzione dei protoni nelle lastre A, B, C.

### Distribuzione dei neutroni

Gli istogrammi dei protoni sono dati nelle fig. 3, 4, 5, 6. E' stato fatto un istogramma unico per i protoni delle lastre A, B, C e altrettanto per quelli delle lastre F e G, perchè le distribuzioni sono risultate, in questi casi, pressochè uguali.

La corrispondente distribuzione dei neutroni è data in fig. 7, con normalizzazione a 1000 in corrispondenza dell'energia di 1 MeV.

Alla distribuzione data in fig. 6 siamo risaliti sulla base delle seguenti considerazioni: sia  $N_n(E_n) dE_n$  il numero di neutroni con energia fra  $E_n$  ed  $E_n + dE_n$ .

Il numero di interazioni n-p per neutroni di energia fra  $E_n$  ed  $E_n + dE_n$  è proporzionale a

$$N_n(E_n) \sigma_{n-p}(E_n) dE_n$$

Il numero di protoni con energia fra  $E_p$  ed  $E_p + dE_p$  è quindi proporzionale a

$$N_n(E_n) \sigma_{n-p}(E_n) \frac{dE_p}{E_n} dE_n$$

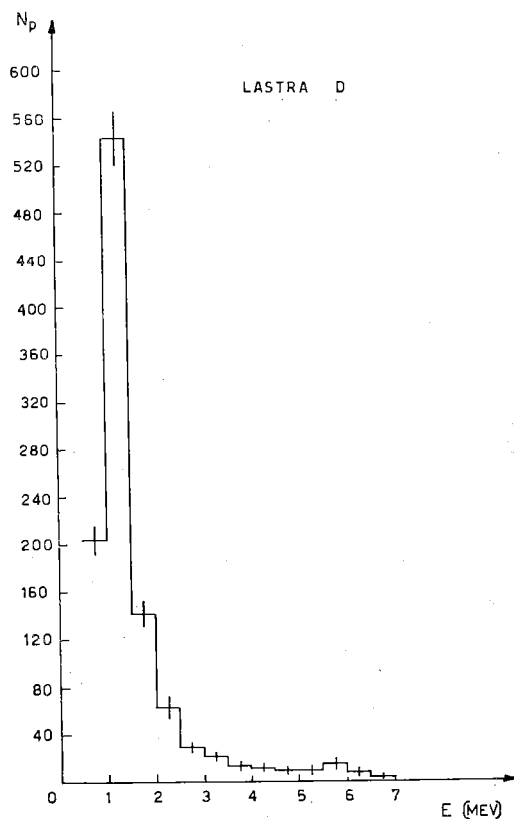


Fig. 4. — Distribuzione dei protoni nella lastra D.

essendo  $dE_p/E_n$  la probabilità che l'energia del protone urtato da un neutrone di energia  $E_n$  sia compresa fra  $E_p$  ed  $E_p + dE_p$ . Il numero di protoni in questo intervallo di energia, dovuto ai neutroni incidenti, è perciò dato da

$$N_p(E_p) dE_p = A_0 dE_p \int_{E_p}^{\infty} \frac{N_n(E_n) \sigma_{n-p}(E_n) dE_n}{E_n}$$



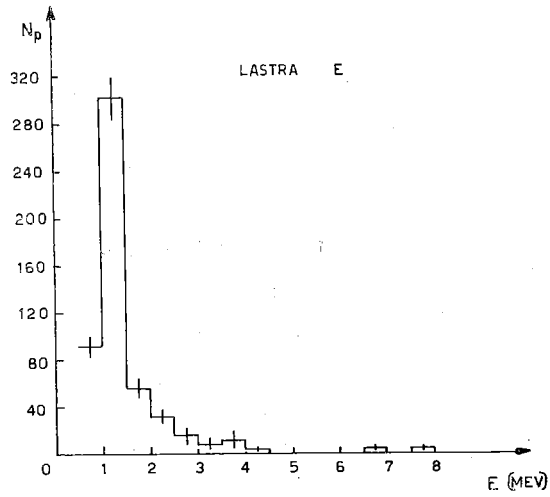


Fig. 5. — Distribuzione dei protoni nella lastra E.

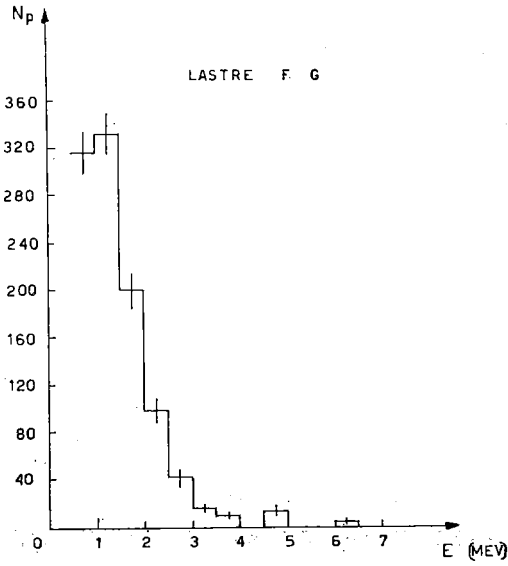


Fig. 6. — Distribuzione dei protoni nelle lastre F, G.

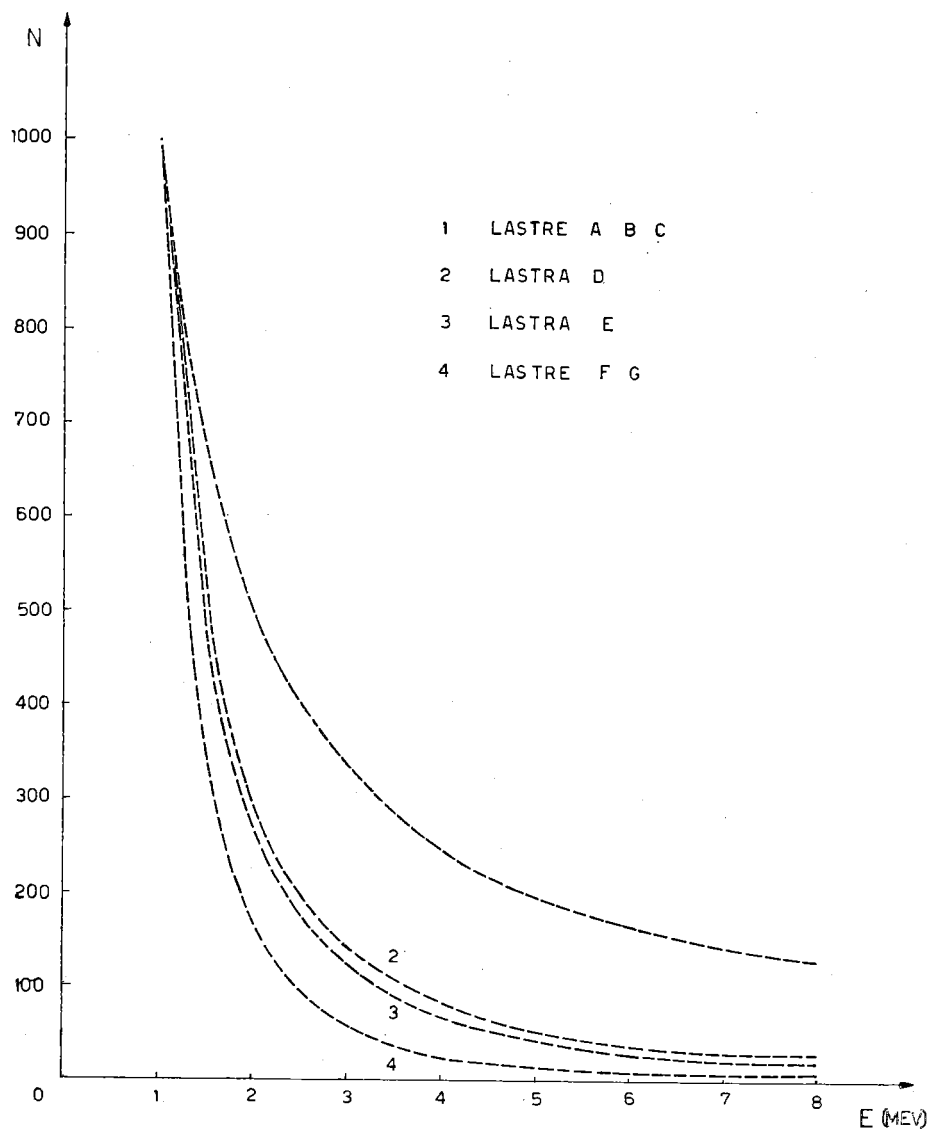


Fig. 7. — Distribuzione dei neutroni nei punti esaminati.

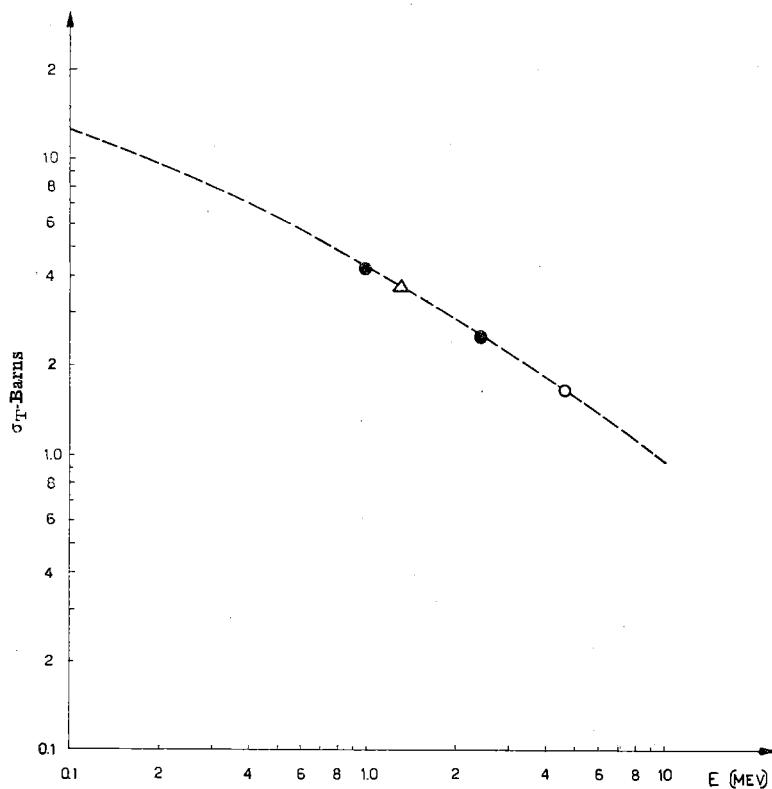


Fig. 8. — Sezione d'urto totale n-p fra 0,1 e 10 MeV.

Se assumiamo per la sezione d'urto  $\sigma_{n-p}(E_n)$  un andamento del tipo

$$\sigma_{n-p}(E_n) = \frac{K}{E_n^\alpha}$$

che è l'andamento effettivo nell'intervallo in cui avvengono in prevalenza le interazioni che ci interessano si sopravvaluta solo di poco il numero totale di protoni<sup>10</sup> (fig 8).

I coefficienti K e  $\alpha$  si possono determinare imponendo alla curva di passare per i due punti (6 barn; 0,5 MeV) e (1,15 barn; 8 MeV). Si ottiene così  $\alpha = 0,6$  e  $K = 3,95 \cdot 10^{-24}$  da cui

$$\sigma_{n-p}(E_n) = \frac{3,95 \cdot 10^{-24}}{E_n^{0,6}}$$

Il numero  $N_p(E_p) dE_p$  sarà allora espresso da

$$\begin{aligned} N_p(E_p) dE_p &= A_0 dE_p \int_{E_p}^{\infty} \frac{3,95 \cdot 10^{-24}}{E_n^{0,6}} \cdot \frac{N_n(E_n) dE_n}{E_n} = \\ &= A dE_p \int_{E_p}^{\infty} \frac{N_n(E_n) dE_n}{E_n^{1,6}} \end{aligned}$$

Per determinare la distribuzione dei neutroni  $N(E_n)$  rimane quindi il problema di cercare una funzione tale che moltiplicata per  $1/E_n^{1,6}$  e poi integrata, porti a dei valori che siano, entro gli errori statistici, in accordo con i valori sperimentali.

In pratica abbiamo riportato l'istogramma dei protoni in carta doppia logaritmica. Limitatamente ai valori sperimentali fino a 5-6 MeV, che sono quelli che hanno il maggior grado di attendibilità, l'andamento dello spettro dei protoni segue una legge di potenza, potendosi entro quei limiti tracciare una retta contenuta entro gli errori statistici.

Per i neutroni l'andamento può quindi essere rappresentato da  $1/E_n^\beta$ . Si ha così

$$\begin{aligned} N_p(E_p) dE_p &= B dE_p \int_{E_p}^{\infty} E_n^{-\gamma} dE_n = \\ &= dE_p \left| \frac{B E_n^{1-\gamma}}{1-\gamma} \right|_{E_p}^{\infty} = \frac{B E_p^{1-\gamma}}{\gamma-1} dE_p \end{aligned}$$

dove  $\gamma = 1,6 + \beta$ .

Per determinare  $\gamma$  e  $B$  per ciascuno spettro si è seguito il metodo dei minimi quadrati, ottenendo per le varie lastre i seguenti valori:

Lastre	$\gamma$	$B$
A, B, C	2,6	$1,05 \cdot 10^3$
D	3,4	$1,21 \cdot 10^3$
E	3,5	$1,55 \cdot 10^3$
F, G	4,2	$3,47 \cdot 10^3$

### Conclusioni

I valori ottenuti mettono in evidenza come il flusso di neutroni nello stesso intervallo di energia vari da un punto all'altro della sala del sincrotrone.

All'interno del pozzo infatti non mancano neutroni fino all'energia di 8 MeV, mentre fuori delle schermature, già a 3 MeV, essi sono in numero trascurabile agli effetti del contributo che possono dare alla dose biologica.

La stessa distribuzione varia inoltre col variare del fascio utilizzato, ciò che d'altronde era stato già messo in evidenza in precedenti ricerche<sup>4-6-8</sup>. Per lo stesso intervallo di energia infatti, con i fasci 1 e 4 si sono ottenuti risultati diversi (fig. 7, curve 1, 2, 3).

Al di là delle schermature, purchè sufficientemente lontani dal fascio qualunque esso sia, i risultati si possono ritenere coincidenti. Ciò è d'altronde comprensibile se si pensa che le diffusioni successive subite dai neutroni finiscono col dare intorno alla macchina, al di là delle schermature, quasi un gas di particelle con una distribuzione pressochè uniforme.

Una valutazione del valore medio di EBR da attribuire nel nostro caso ai neutroni, dovrebbe naturalmente essere fatta su una media pesata dei contributi dei neutroni delle varie energie, ciò che richiede però la conoscenza dello spettro anche per energie più basse di quelle da noi esaminate.

Agli effetti della sicurezza è intanto fuori dubbio che il valore di 10 normalmente attribuito alla EBR dei neutroni, porti ad una sopravvalutazione della dose biologica, il che è di notevole vantaggio, perchè assicura che le dosi realmente assorbite sono inferiori a quelle cui si fa riferimento per evitare di superare i valori massimi ammissibili.

### RIASSUNTO

**R. Breschi, M. Ladu e E. Rotondi: Spettro di energia dei neutroni diffusi intorno al Sincrotrone di Frascati.** - Viene determinato lo spettro di energie dei neutroni veloci diffusi intorno al Sincrotrone, con la tecnica delle emulsioni nucleari. Si trova che oltre le schermature il contributo alla dose biologica dei neutroni di energia maggiore di 2 MeV è trascurabile e si conclude che il valore di 10 normalmente attribuito alla loro EBR porta ad una sopravvalutazione della dose assorbita.

SUMMARY

**R. Breschi, M. Ladu and E. Rotondi: Energy spectrum of neutrons diffused around the Frascati electro-synchrotron.** - The energy spectrum of neutrons diffused around the electro-synchrotron was investigated by the nuclear emulsion technique. Beyond the shielding structures, the proportion of neutrons of more than 2 MeV in the biological dose is negligible. From the point of view of security, the value of 10 usually attributed to neutron RBE, leads to over-evaluation of the biological dose.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Demers P. Ionographie. Les Presses Universitaires de Montréal, 1958.
- 2) Hine G. J., Brownell G. L. Radiation dosimetry. Academic Press Inc., New York, 1956.
- 3) Ladu M. Controllo delle radiazioni intorno al Sincrotrone dei Laboratori Nazionali di Frascati. In corso di stampa.
- 4) McLaughlin J. E., O'Brien K., Solon L. R., Zila A. V., Lowder W. M., Blatz H. U.S.A.E.S., NYO, 4699, suppl. 1, 1958.
- 5) N.B.S. Protection against neutron radiation up to 30 MeV, Handbook, 63, 1957.
- 6) Peterson V. Z. Radiation levels at C.I.T. Synchrotron, 1958.
- 7) Rosen L. Nucleonics, 7, 32, 1953.
- 8) Solon L. R., McLaughlin J. E., Blatz H. U.S.A.E.C., NYO, 4699, 1956.
- 9) U.S.A.E.C. Conference on Shielding of High. Energy Accelerators. New York, 1957.
- 10) U.S.A.E.C. Neutron Cross Section, pag. 54, McGraw Hill, 1955.