

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-74/38(R)  
8 Luglio 1974

F. Lucci e M. Pelliccioni: ESPERIENZA DI SORVEGLIANZA  
FISICA DELLE RADIAZIONI AI CONFINI DEL CENTRO DI  
FRASCATI. -

F. Lucci e M. Pelliccioni: ESPERIENZA DI SORVEGLIANZA FISICA DELLE RADIAZIONI AI CONFINI DEL CENTRO DI FRASCATI. -

I. - INTRODUZIONE. -

Il problema della limitazione delle dosi intorno a impianti nucleari o a macchine radiogene di notevole potenza, quali gli acceleratori d'alta energia, deve di norma essere considerato fin dalla fase di progetto, con l'obbiettivo di garantire, negli ambienti di lavoro e nelle aree limitrofe, livelli di radiazione non eccedenti i valori delle dosi massime ammissibili per le varie categorie di persone esposte.

Normalmente si procede adottando valori di progetto e di lavoro inferiori alle dosi massime ammissibili fissate per legge o consigliate dalle raccomandazioni internazionali. In tal modo, oltre ad ottemperare al principio fondamentale della radioprotezione di contenere al massimo l'entità delle dosi alle persone, ci si garantisce anche un buon margine di sicurezza per far fronte ad eventuali modifiche o miglioramenti del progetto originario. E' appena il caso di accennare che eventualità siffatte, nel campo della ricerca di base effettuata con acceleratori, sono così numerose da costituire piuttosto una regola che un'eccezione.

Successivamente il rispetto dei limiti stabiliti dovrà essere assicurato con tutti gli opportuni interventi di protezione e documentato con adeguati controlli dosimetrici nel quadro della sorveglianza fisica della protezione.

Nel presente lavoro siamo interessati alle zone circostanti Centri in cui siano ubicati acceleratori d'alta energia e, soprattutto, ai relativi problemi di sorveglianza fisica. Trattandosi, per lo più, di zone incondizionatamente di libero accesso per il pubblico, prenderemo inizialmente in considerazione il problema delle dosi massime ammissibili per l'esposizione di popolazioni. Successivamente tratteremo i criteri seguiti nel Centro di Frascati per la limitazione delle esposizioni nelle aree sud-

2.

dette e l'organizzazione della sorveglianza fisica ai confini del Centro, unitamente ai risultati dosimetrici degli ultimi cinque anni.

## II. - LE DOSI LIMITE PER LE ZONE ACCESSIBILI AL PUBBLICO. -

In Italia, com'è noto, le attività con rischi da radiazioni sono disciplinate dal D. P. R. 13/2/64 n. 185 e dai decreti applicativi da esso previsti<sup>(1)</sup>. Le disposizioni che interessano in questa sede sono contenute nell'articolo 95, in cui si stabilisce, tra l'altro, che si debba evitare che la popolazione ed i gruppi particolari<sup>(x)</sup> di essa ricevano dosi superiori ai valori massimi ammissibili, fissati dal decreto applicativo ex articolo 111. Lo stesso articolo 111, ultimo comma, stabilisce inoltre che l'esercente è tenuto a provvedere alla sorveglianza fisica nelle zone sorvegliate.

Premesso che le zone sorvegliate sono quelle in cui sussiste un pericolo permanente di superamento della dose massima ammissibile per l'insieme della popolazione, pari a 5 rem in 30 anni e quindi mediamente a circa 170 mrem/anno, sembra che si possa concludere che:

a) la dose massima ammissibile nelle zone limitrofe al Centro coincide, tenuto conto del tempo prevedibile di permanenza delle persone in esse, con quella prevista per l'esposizione di singoli individui della popolazione, pari a 500 mrem/anno;

b) ove, tuttavia, sia superata la dose limite per la popolazione nel suo insieme o comunque sussista il pericolo permanente di tale superamento, le suddette aree dovranno essere classificate come "zone sorvegliate" e quindi obbligatoriamente assoggettate agli opportuni controlli dosimetrici (sorveglianza fisica).

Da notare che questa interpretazione non è in contrasto con quanto previsto in materia di limitazione delle concentrazioni di contaminanti radioattivi nelle acque e nell'aria, argomento che, pur non riguardando direttamente acceleratori del tipo di quelli installati a Frascati, può tuttavia fornire un utile termine di confronto. Infatti, coerentemente con quanto previsto nel caso di irradiazione esterna, per membri adulti del pubblico esposti all'interno o all'esterno delle zone sorvegliate, tali concentrazioni devono essere inferiori rispettivamente ad un decimo o ad un trentesimo delle concentrazioni massime ammissibili (CMA) per lavoratori professionalmente esposti. Esiste però un'importante eccezione

---

(x) - Tra questi ricordiamo il gruppo 3 costituito dalle "persone che si trovano abitualmente nelle vicinanze della zona controllata e che per tale ragione possono ricevere un'irradiazione superiore a quella fissata per la popolazione nel suo insieme".

riguardante l'esposizione di bambini di età inferiore a 5 anni, per i quali il limite è sempre un trentesimo delle CMA per lavoratori professionalmente esposti.

La scelta di un valore più prudenziale per i bambini può comunque essere semplicemente motivata considerando la peculiarità dei meccanismi di danno propri delle irradiazioni interne, in cui hanno grande importanza molti fattori individuali (età, dimensioni, metabolismo, abitudini personali, ecc.) e, nel caso delle contaminazioni da isotopi dello iodio, la elevata radiosensibilità dei tessuti tiroidei nei giovani. In questo senso la discrepanza tra le norme in materia di irradiazioni esterne ed interne può quindi essere facilmente spiegata e non contrasta l'interpretazione fornita.

Un ultimo cenno merita la questione del come si debba intendere la locuzione "dose massima ammissibile" nel caso di individui della popolazione. Il significato è ben chiaro nel caso dei lavoratori esposti per motivi professionali, per i quali la dose può essere misurata individualmente in modo da verificare che il limite legale non sia superato. Per il pubblico, invece, un controllo dosimetrico individuale non è ovviamente pensabile e si deve ricorrere a controlli ambientali e a considerazioni statistiche.

In definitiva le DMA per individui del pubblico devono essere intese, almeno nella filosofia delle ben note raccomandazioni dell'ICRP<sup>(2)</sup>, da cui del resto derivano di fatto le stesse norme italiane di radioprotezione, soprattutto come "standard" di protezione cui riferirsi sia nella progettazione sia nel disciplinare il funzionamento delle sorgenti di radiazioni al fine di rendere altamente improbabile che membri del pubblico ricevano dosi superiori ad esse. E' appunto in quest'ottica che le raccomandazioni ICRP suggeriscono l'uso della locuzione "dose limite", anziché "dose massima ammissibile", quando ci si riferisca all'esposizione di popolazioni o di membri del pubblico.

### III. - LA LIMITAZIONE DELLE DOSI AI CONFINI E L'ORGANIZZAZIONE DELLA SORVEGLIANZA. -

In base a quanto abbiamo riferito nel paragrafo precedente, risulta dunque chiaro che, se non si desidera una zona sorvegliata estesa al di fuori dei confini di un Centro nucleare (ed è questa la "politica" seguita nel Centro di Frascati), si devono evitare dosi nelle aree ad esso adiacenti superiori mediamente ai 170 mrem/anno.

La soluzione alternativa, consistente nell'usare il limite di 500 mrem/anno valido per gli individui del pubblico, non sembra a nostro avviso completamente appropriata. Oltre alla necessità di assicurare la sorveglianza fisica nelle zone esterne, con gli evidenti inconvenienti di ordine psicologico nei confronti delle persone che abitualmente le frequentano, si devono considerare i vantaggi che offre l'adozione del limite più re

4.

strittivo. In tal caso, infatti:

- il problema di eventuali vincoli di abitabilità non si pone neanche dal punto di vista dell'opportunità, almeno per il presente;
- si ottempera al principio fondamentale della radioprotezione, recepito anche dalla legge italiana, di contenere al massimo, nei limiti del possibile, le dosi alle persone;
- si sarebbe in grado di far fronte facilmente a eventuali abbassamenti dei limiti legali.

E' comunque doveroso segnalare che questa filosofia, pur adottata in molti dei maggiori centri dotati di acceleratori di alta energia, non è tuttavia sempre accettata (si confronti, per esempio, la discussione sul lavoro di cui al riferimento bibliografico<sup>(3)</sup>).

Il limite prescelto ha chiare ripercussioni sull'organizzazione della radioprotezione in tutti i suoi aspetti, sia in fase di progettazione dei dispositivi di protezione, specie le schermature, sia per quanto concerne la regolamentazione del funzionamento delle macchine e la sorveglianza fisica delle radiazioni. In particolare devono essere operanti controlli dosimetrici atti a valutare dosi ai confini dell'ordine di 170 mrem/anno. La scelta dei controlli da fare è dei mezzi di misura è naturalmente affidata al giudizio professionale dell'esperto incaricato della protezione e dipende da molteplici fattori. Un rilevamento diretto delle dosi ai confini o in prossimità di essi è comunque, a nostro avviso, sempre opportuno, se non altro per motivi psicologici e ciò anche in quei casi in cui non fosse strettamente necessario.

In genere nei vari centri in cui si hanno problemi di questo tipo si ricorre a punti di controllo presidiati con camere a ionizzazione, rivelatori di neutroni, dosimetri ad integrazione, e a programmi di sorveglianza periodica da parte di personale specializzato. Nel caso particolare del Centro di Frascati, il superamento del limite di 170 mrem/anno nelle zone esterne è estremamente improbabile in considerazione delle caratteristiche degli acceleratori ivi presenti e dei relativi sistemi di protezione. D'altra parte, per la planimetria stessa del Centro, un tale superamento sarebbe certamente accompagnato da analoghi superamenti dei limiti previsti per le zone accessibili all'interno del Centro. In quest'ultima ipotesi, però, interverrebbero i normali sistemi di controllo e prevenzione.

Si è così deciso di limitare il controllo lungo i confini alle sole dosi gamma, misurate mediante dosimetria termoluminescenza di tipo commerciale. Le caratteristiche del sistema a termoluminescenza adottato, quantunque ampiamente descritte in bibliografia<sup>(4)</sup>, meritano qualche cenno.

I dosimetri sono costituiti da un'ampolla di vetro, tipo valvola radio, contenente un cilindro metallico riscaldabile indirettamente con un filamento, su cui è depositato il materiale termoluminescente ( $\text{CaF}_2$  natu

rale selezionato). Il tutto è racchiuso in un contenitore di plastica, in cui è anche alloggiato un filtro per la correzione della risposta a bassa energia. Tale sistema presenta numerosi vantaggi, tra i quali la gran semplicità d'uso e l'assenza di fenomeni spuri (triboluminescenza e chemioluminescenza). Inoltre il metodo di lettura adottato, basato sull'altezza del terzo picco ad alta temperatura, garantisce una grande stabilità dell'informazione dosimetrica, che si traduce in caratteristiche di "fading" molto favorevoli anche a temperature relativamente alte: nel lavoro già citato<sup>(4)</sup> si riferisce che dopo nove mesi a 20°C o a 45°C il "fading" è inapprezzabile, mentre dopo 45 giorni a 100°C esso è inferiore al 10%.

Un'altra caratteristica importante per misure a basso livello è il fondo proprio dei dosimetri, per il quale la stessa fonte segnala un valore medio  $0,3 \div 0,4$  mR/giorno<sup>(4)</sup>. Alcune prove effettuate presso il nostro laboratorio, anche se non ancora con la continuità desiderabile, fanno tuttavia pensare che si tratti di un valore un pò pessimistico. Alcuni dosimetri conservati in un pozzetto di piombo spesso 10 cm hanno infatti registrato all'incirca 0,2 mR/giorno comprendenti, oltre al fondo del dosimetro, il contributo residuo della componente dura dei raggi cosmici e quello dovuto ad eventuali impurità radioattive presenti nel piombo.

Per quanto riguarda la componente neutronica, in mancanza di dosimetri a integrazione sufficientemente sensibili, si preferisce ricorrere all'estrapolazione dei dati raccolti con film-badges per neutroni posti in prossimità delle macchine e a controlli mediante "rem-meters", effettuati di norma in vicinanza delle stesse, ma estendibili, quando qualche circostanza lo giustifichi, fino ai confini o a distanze confrontabili.

La procedura seguita è evidentemente giustificata dalla prevalenza della componente elettromagnetica nei campi di radiazione intorno agli acceleratori di elettroni, specie in quelle eventuali situazioni di schermature difettose che potrebbero dar luogo a fuoriuscita di radiazioni in misura eccessiva.

#### IV. - RISULTATI DELLA SORVEGLIANZA MEDIANTE TLD. -

Nella Fig. 1 sono mostrate le posizioni delle due principali macchine del Centro e dei dosimetri di controllo dislocati lungo i confini, unitamente ai relativi periodi di misura ed ai valori delle esposizioni annuali medie rilevate. Alcuni punti, considerati "sospetti" nel senso che chiariremo nel seguito, sono stati indicati con un asterisco. Nel considerare i dati riportati in figura, come per quelli riportati nel seguito, conviene comunque tener presenti le seguenti circostanze:

- a) le esposizioni indicate sono comprensive del fondo naturale (di origine terrestre e cosmica) e del fondo proprio dei dosimetri;
- b) i suddetti controlli, iniziati nel maggio 1969, riguardano periodi non sempre esattamente coincidenti con gli anni solari; tutti i dati, perciò,

6.

sono stati normalizzati a 365 giorni;

- c) la disposizione dei dosimetri è stata sostanzialmente modificata a partire dal gennaio 1972, mentre nel 1971 erano stati aggiunti numerosi punti di controllo supplementari.

Nella Fig. 2 sono indicate, anno per anno e per tutto il periodo, le distribuzioni delle esposizioni annuali nei vari punti controllati (l'altezza degli istogrammi indica il numero di punti in cui le esposizioni sono risultate comprese in ogni intervallo di 50 mR/anno). Nella stessa figura sono anche indicati i valori medi annuali, mediante le rette verticali a tratto continuo. Le aree tratteggiate riguardano i punti "sospetti" di cui sopra e le rette verticali tratteggiate le medie escludendo tali punti.

Conviene ora chiarire cosa intendiamo parlando di "punti sospetti". Nei primi anni, quando il controllo era condotto in via sperimentale, anche per verificare l'adeguatezza del sistema a termoluminescenza per questo tipo di misure, ed impiegando sostegni di fortuna (alberi, pali, reti metalliche e lo stesso muro di confine), si constatò che alcuni dosimetri misuravano regolarmente esposizioni dell'ordine di  $300 \div 350$  mR/anno, o anche più, senza che la loro posizione rispetto alle macchine potesse giustificare questa circostanza. Osservato che questi dosimetri erano posti sul muro di confine, fu fatta l'ipotesi che tali dosi fossero provocate dalla radioattività naturale presente nei materiali con cui è costruito il muro.

E' stato allora realizzato uno strumento per misure di intensità di esposizione gamma dell'ordine di  $1 \div 2$   $\mu$ R/h, impiegante un grosso scintillatore plastico e tarato con sorgenti di  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{137}\text{Cs}$ . Da una serie di prove eseguite in laboratorio e lungo il muro di confine, nel tratto indicato in Fig. 1 con la lettera A, è risultato che:

- a) in tali punti il contributo dell'intensità d'esposizione dovuto al funzionamento del Sincrotrone era del tutto inapprezzabile e perciò inferiore a circa  $2$   $\mu$ R/h (equivalenti a circa 10 mR/anno nell'ipotesi di 5000 ore di funzionamento annuo);
- b) a contatto del muro, l'intensità d'esposizione misurata era equivalente a 280 mR/anno, che si riducevano a 184 mR/anno a un metro di distanza;
- c) l'intensità di esposizione misurata all'interno del laboratorio, ad alcuni metri dalle pareti, era dell'ordine di 220 mR/anno;
- d) ponendo il rivelatore all'interno di un pozzetto, realizzato con blocchi di basalto del tipo di quelli con cui è costruito il muro, si misuravano 360 mR/anno.

I risultati delle prove suddette giustificavano perciò in pieno l'ipotesi avanzata. Successivamente, nel gennaio del 1972, si è provveduto ad una nuova disposizione di tutti i punti di controllo lungo il confine, procedendo ad una più razionale distribuzione di essi ed impiegando idonei sostegni.

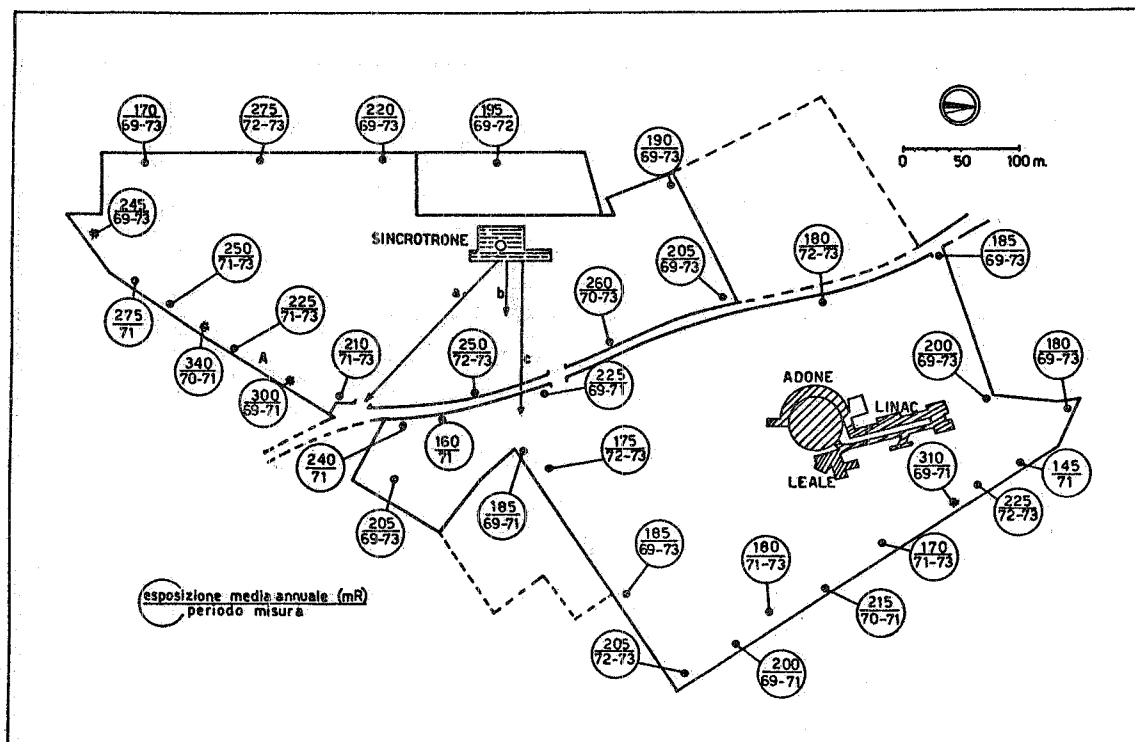


FIG. 1 - Valori medi annuali delle esposizioni rilevate lungo i confini del Centro di Frascati. E' anche indicato, per i vari punti, il relativo periodo di misura.

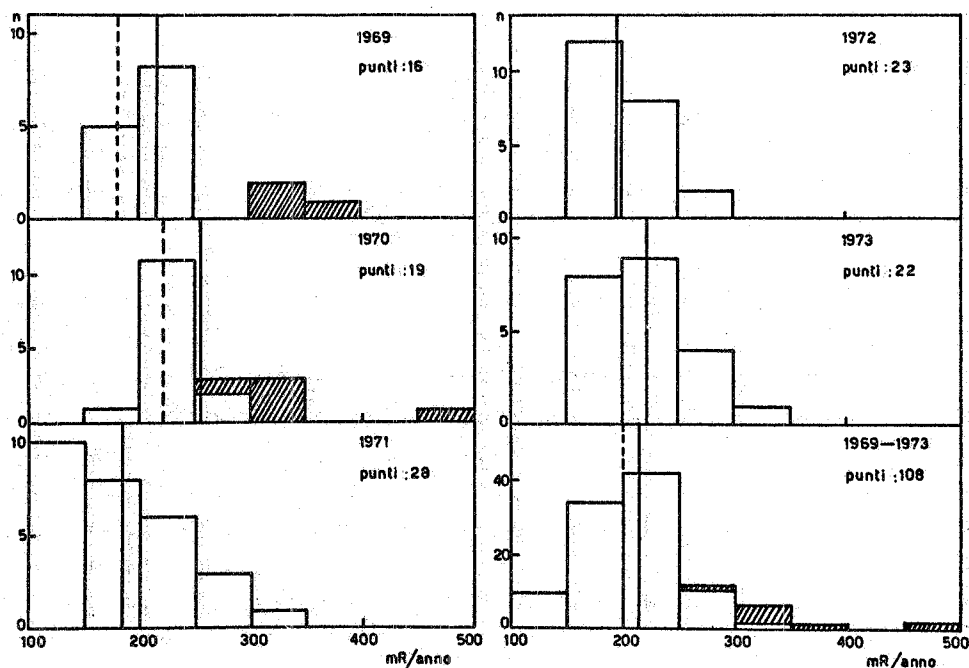


FIG. 2 - Distribuzione delle esposizioni annuali misurate nei vari punti di controllo nel periodo 1969/73. Le aree tratteggiate si riferiscono ai punti "sospetti". Le rette verticali a tratto pieno indicano la media tra tutti i punti controllati; quelle tratteggiate le stesse medie escludendo i punti "sospetti".



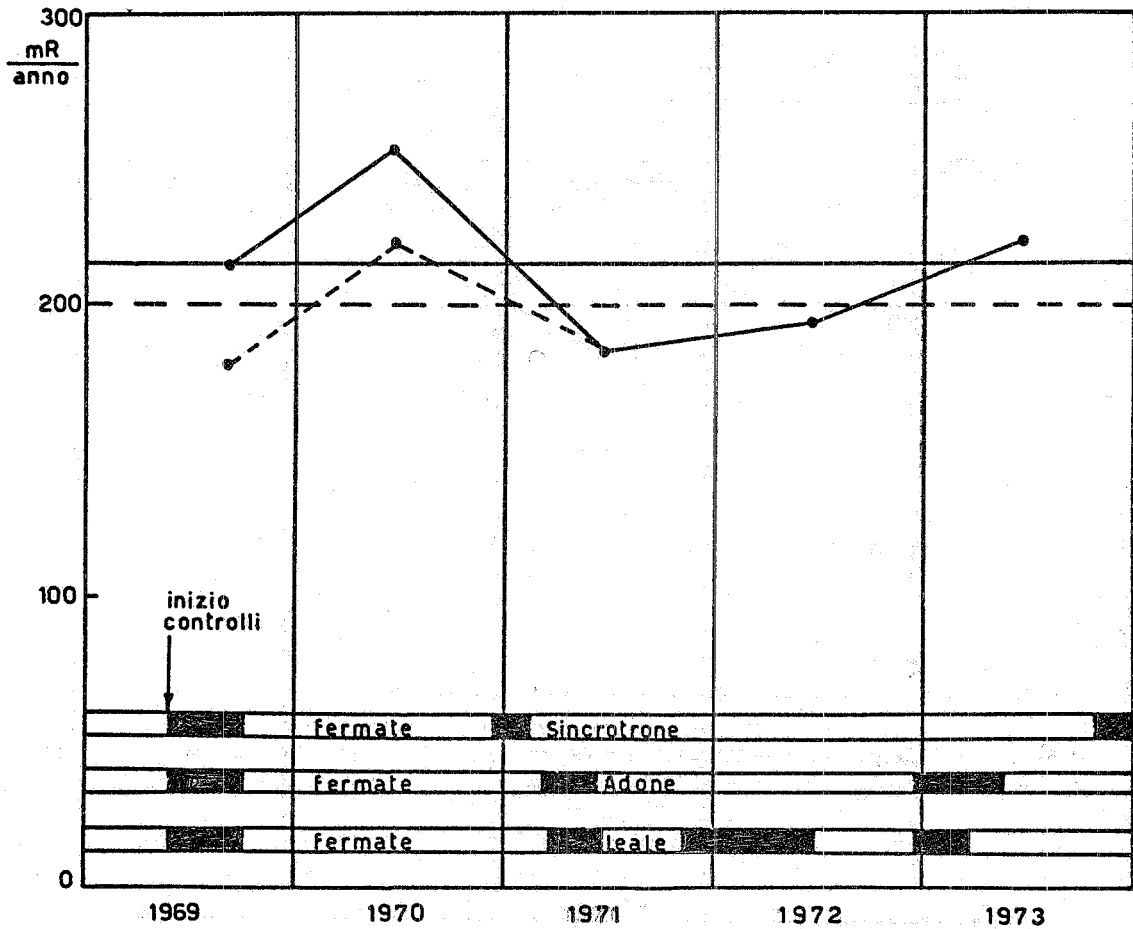


FIG. 3 - Andamento temporale della esposizione media ai confini considerando tutti i punti di controllo (tratto pieno) ed escludendo i punti "sospetti" (a tratti). Le rette orizzontali indicano le medie su tutto il periodo 1969/73. In basso sono indicate le fermate prolungate delle principali macchine del Centro.

In Fig. 3 è mostrato l'andamento temporale della media annuale delle misure lungo i confini sia considerando tutti i punti controllati (tratto continuo), sia escludendo quelli "sospetti" (tratto discontinuo). Le due rette orizzontali rappresentano le rispettive medie su tutto il periodo 1969-73. Non si nota alcuna tendenza significativa, potendo le piccole variazioni attorno al valore medio di 200 mR/anno essere attribuite a circostanze fortuite quali, ad esempio, cambiamenti anche modesti della posizione di qualche dosimetro. In particolare non si nota nemmeno l'effetto delle fermate prolungate delle macchine, anche esse indicate nella figura.

Quest'ultima circostanza, unitamente a quanto già detto a proposito dei punti "sospetti" e delle prove condotte per interpretare i dati ad essi relativi, mettono chiaramente in luce l'importanza del contributo del fondo naturale di radiazioni, cui converrà pertanto dedicare qualche breve cenno.

## V. - I LIVELLI DI RADIAZIONE GAMMA AI CONFINI E LA RADIOATTIVITA' NATURALE. -

E' ben noto che la concentrazione di U, Th e K in rocce e materiali vulcanici può raggiungere valori relativamente elevati e ciò specie nelle zone vulcaniche dell'Italia Centro-Meridionale. E' stato infatti osservato che, a parità di caratteristiche petrografiche, campioni vulcanici provenienti da tali zone, e soprattutto dalla provincia romana, esibiscono abbondanze di U e Th molto più alte di quelle provenienti da altre province vulcaniche<sup>(5, 6)</sup>.

Ci si deve quindi attendere, nella zona del Centro di Frascati, livelli di radiazioni gamma di origine naturale relativamente elevati. Ciò è anche confermato dalle misure effettuate recentemente in Italia in 11 diverse aree scelte in base alle caratteristiche geologiche del terreno<sup>(7)</sup>. Gli autori riportano valori dell'intensità d'esposizione, al netto del contributo dei raggi cosmici, compresi tra un minimo di circa  $1 \mu\text{R}/\text{h}$  (ad es. 1,5  $\mu\text{R}/\text{h}$  su emergenze di calcare compatto situate sul Monte Livata - M. Simbruini - ) ad un massimo di circa  $54 \mu\text{R}/\text{h}$  rilevato su emergenze di lava del vulcano di Vico.

Mancano, purtroppo, nel lavoro citato misure relative alla zona dei Castelli Romani. Possono comunque essere utili, almeno per confronto, i dati sulla zona dei Monti Cimini, che variano tra il citato massimo di  $54 \mu\text{R}/\text{h}$  (equivalenti a  $475 \text{ mR}/\text{anno}$ ) ed un minimo di  $15 \mu\text{R}/\text{h}$  (equivalenti a  $130 \text{ mR}/\text{anno}$ ), ottenuto su terreni agricoli nella zona pianeggiante a nord del Lago di Vico.

Naturalmente, al contributo delle radiazioni di origine terrestre va aggiunto quello dei raggi cosmici che, alla latitudine e all'altezza del Centro di Frascati, dovrebbe aggirarsi sui  $3,8 \mu\text{R}/\text{h}$  (equivalenti a  $33 \text{ mR}/\text{anno}$ ).

Per valutare l'entità dell'intensità di esposizione da radiazioni naturali nel sito del Centro di Frascati si potrebbe far ricorso alle misure intorno ai confini effettuate dal giugno al settembre 1969, periodo in cui tutte le macchine del Centro rimasero ferme. In Fig. 4 è illustrata la distribuzione dei valori dell'esposizione ai confini del Centro di Frascati, normalizzati a 365 giorni e relativi a tale periodo. Escludendo i dati relativi ai punti "sospetti", il valor medio comprensivo anche del fondo proprio dei dosimetri risulta pari a  $175 \text{ mR}/\text{anno}$ . Purtroppo, però, tali dati non sono completamente precisi a causa di una errata calibrazione dello strumento di lettura, che ha reso necessaria l'introduzione a posteriori di un fattore correttivo pari a circa il 30%. Osserviamo, tuttavia, che il suddetto valore di  $175 \text{ mR}/\text{anno}$  può essere comunque considerato un limite inferiore per i contributi naturale e strumentale.

Per meglio chiarire la questione del fondo naturale di radiazione, negli anni scorsi, a partire dal 1969, sono state inoltre condotte, episodicamente, un certo numero di misure, soprattutto in normali abita

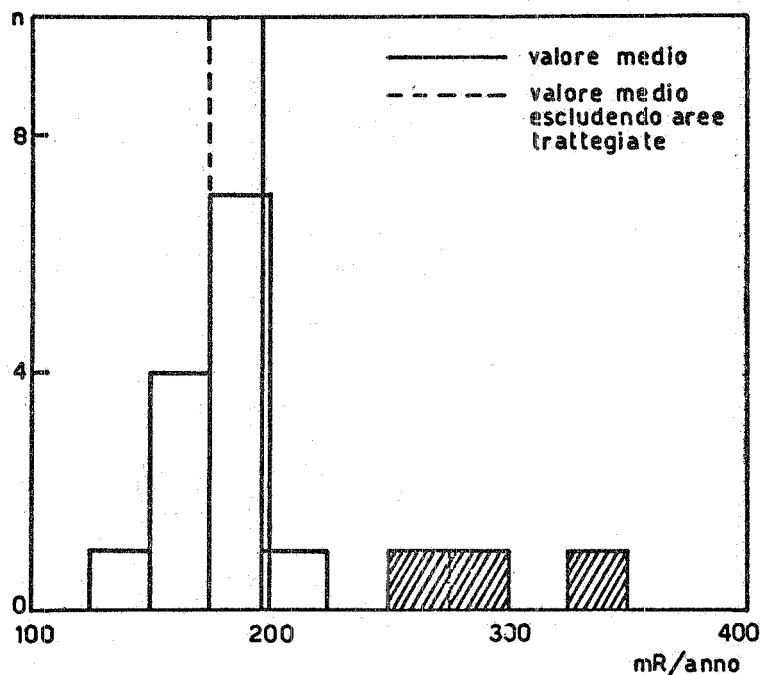


FIG. 4 - Distribuzione delle esposizioni ai confini nel periodo giugno-settembre 1969 (valori normalizzati a 365 giorni). Le aree tratteggiate indicano i punti "sospetti".

tazioni civili site in Roma, ottenendo valori medi di 245 mR/anno, con minimi intorno ai 100 ÷ 150 mR/anno e massimi di 325 ÷ 375 mR/anno. Attualmente, è in corso una serie di prove condotte con maggior sistematicità, i cui primi risultati provvisori mostrano che, nella zona dei Castelli Romani, dovrebbero essere adeguati valori medi intorno a 200 ÷ 220 mR/anno all'aperto (in campagna, giardini, ecc.) e a 250 ÷ 300 mR/anno all'interno di abitazioni. E' appena il caso di ricordare che anche questi valori, come i precedenti, comprendono oltre al fondo naturale di radiazioni anche il fondo intrinseco dei dosimetri.

Alla luce di quanto esposto sulla radioattività naturale e dei risultati dei controlli dosimetrici, si può dunque affermare che il contributo dovuto alle macchine del Centro alle dosi gamma misurate lungo i confini è tanto modesto da poter essere difficilmente distinto dal fondo naturale di radiazioni e, comunque, sicuramente pari ad una piccola frazione del limite medio di 170 mR/anno valido al di fuori delle zone sorvegliate.

#### VI. - I LIVELLI DI RADIAZIONE NEUTRONICA A GRANDI DISTANZE. -

Abbiamo già detto che i dosimetri fotografici per neutroni sono di gran lunga troppo poco sensibili per misurare soddisfacentemente livelli confrontabili con quelli ammissibili fuori delle zone sorvegliate.

D'altra parte una rete di sorveglianza continua per neutroni lungo i confini risulterebbe, a nostro avviso, oltre che dispendiosa, anche sovradimensionata rispetto alle esigenze di protezione poste dagli acceleratori dei Laboratori Nazionali di Frascati, presso i quali la componente elettromagnetica è quella predominante.

Per fissare le idee, consideriamo il problema della propagazione dei neutroni a distanza. E' noto che il ruolo dei neutroni inizialmente emessi verso l'alto e quindi diffusi verso terra (il così detto "skyshine") è in questo caso molto importante. Tralasciando una discussione approfondita del fenomeno per la quale rimandiamo alla bibliografia<sup>(8)</sup>, è sufficiente considerare nel nostro caso distanze limitate a poche centinaia di metri, per le quali non si commetteranno grandi errori rifacendosi alla teoria sviluppata da Lindenbaum<sup>(9)</sup> o ai risultati di calcoli eseguiti a Frascati col metodo di Montecarlo e in buon accordo con essa<sup>(10)</sup>. Dai calcoli citati risulta che, a distanze comprese fra 20 e 300 m da una sorgente puntiforme, la fluenza neutronica  $\phi$ , dovuta a neutroni inizialmente emessi entro un cono verticale di semiapertura  $\theta$ , dipende dalla distanza  $r$  (in metri) tramite la semplice relazione:

$$(1) \quad \phi = A r^{-\alpha}$$

avendo indicato con  $A$  ed  $\alpha$  due costanti i cui valori sono raccolti nella tabella I.

TABELLA I

Valori delle costanti  $A$  e  $\alpha$  per diversi angoli di apertura del cono d'emissione

$\theta$	$A$ (n cm <sup>-2</sup> /neutr. prim.)	$\alpha$
30°	8,24. 10 <sup>-8</sup>	1,53
60°	3,56. 10 <sup>-7</sup>	1,59
90°	6,03. 10 <sup>-7</sup>	1,47

In occasione dell'innalzamento dell'intensità del Sincrotrone, avvenuto nel 1968, furono eseguite misure dei livelli di dose neutronica fino a distanze di circa 200 m dalla macchina. I risultati di queste misure sono mostrati nella Fig. 5.

Rimandando al prossimo paragrafo per le relative considerazioni di carattere protezionistico, si può osservare come le varie curve, dopo un massimo a 20 ÷ 30 m di distanza dalla sorgente, esibiscono, per distanze superiori a circa 50 m, un andamento del tipo previsto dalla (1)

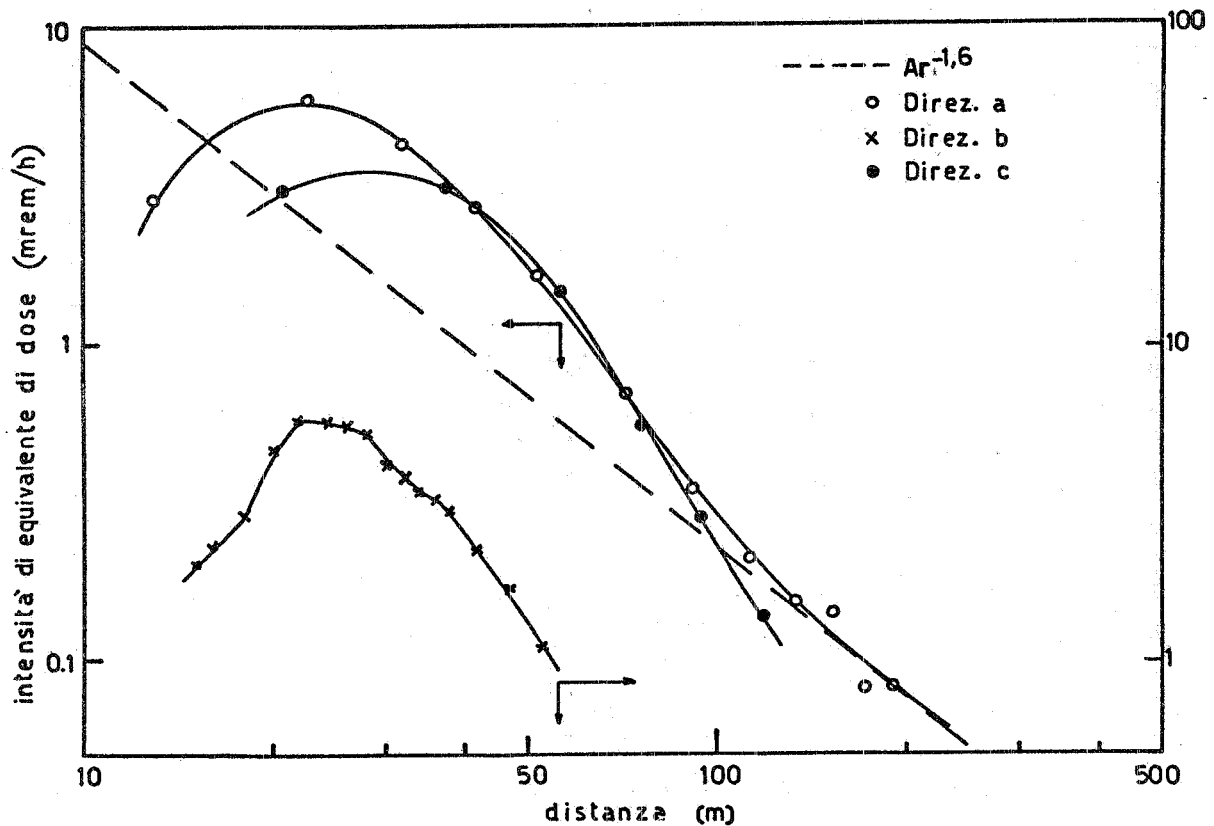


FIG. 5 - Intensità di dosi neutroniche, misurate intorno all'elettrosincrotrone di Frascati lungo le direzioni indicate in Fig. 1, dopo l'innalzamento dell'intensità della macchina e prima della costruzione del tetto.

con valori di  $\alpha$  compresi all'incirca tra 2,5 e 2,7, mentre, d'altra parte, per distanze superiori a 100 - 150 m, i dati relativi alla direzione a non sono in contrasto con una pendenza minore.

Senza voler entrare in una discussione approfondita sul fenomeno dello skyshine sembra per lo meno verosimile che l'andamento delle curve, soprattutto in prossimità della macchina, sia fortemente alterato dalla presenza di edifici e dalla geometria delle schermature. In particolare la presenza di un massimo a 20 - 30 m, seguito da un andamento rapidamente decrescente, sembra possa essere posta in relazione a neutroni inizialmente emessi verso l'alto e quindi diffusi verso il basso da parte delle strutture dell'edificio Sincrotrone.

A conferma di questa interpretazione si può osservare che l'intensità della sorgente di neutroni, valutata mediante la (1) a partire dai dati relativi alla direzione a per distanze superiori a circa 120 m, risulta compresa tra  $2 \cdot 10^{10}$  e  $7 \cdot 10^{10}$  n/sec a seconda che si schematizzi l'effetto delle schermature laterali assumendo  $\theta = 60^\circ$  oppure  $\theta = 30^\circ$ . I valori ottenuti sono senz'altro attendibili, in quanto relativi ad un fascio circolante di circa  $4 \cdot 10^{11}$  e/sec, in grado di produrre per eccitazione

della risonanza gigante durante l'assorbimento completo della cascata elettromagnetica  $5 \cdot 10^{10}$  n/sec in ferro e  $10^{11}$  n/sec in piombo. In questa valutazione si è fatto uso, per passare dall'intensità dell'equivalente di dose alla fluenza, di un fattore di conversione di  $20 \text{ n cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} / \text{mrem h}^{-1}$ , calcolato in base allo spettro dei neutroni a distanza compresa tra 100 e 300 m desumibile dai già citati calcoli col metodo di Montecarlo<sup>(10)</sup>.

In conclusione, almeno nel caso del Sincrotrone, è senz'altro cautelativo ammettere che i livelli di radiazione neutronica a partire da circa 35 m dal centro della macchina decrescano in funzione della distanza secondo la (1), con  $\alpha = 2,6$  fino a 100 m di distanza e quindi con  $\alpha = 1,6$  fino a circa 300 m. Naturalmente quanto sopra non si riferisce al fenomeno di skyshine in generale, ma solo al caso particolare del Sincrotrone di Frascati con la sua geometria e con la presenza dei numerosi edifici che lo circondano. Per altre sorgenti di neutroni si potrà, sempre cautelativamente, usare la (1) con i valori riportati in tabella I.

## VII. - I LIVELLI DI RADIAZIONE NEUTRONICA AI CONFINI. -

Consideriamo ora i dati desumibili dalla Fig. 5 da un punto di vista protezionistico. Si può subito rilevare come i livelli di radiazione neutronica, pur se non preoccupanti da un punto di vista sostanziale, fossero tali, in mancanza di opportuni provvedimenti correttivi, da causare col passar del tempo il superamento dei limiti legali considerati nel paragrafo II ed anche di quelli vigenti per l'interno del Centro.

Naturalmente, come riferito altrove<sup>(11)</sup>, il Sincrotrone ha funzionato nelle condizioni cui si riferisce la Fig. 5 solo per il breve tempo necessario a compiere la serie di controlli dosimetrici di cui le suddette misure facevano parte. Successivamente si è provveduto, come peraltro già preventivamente suggerito<sup>(12)</sup>, a rafforzare le schermature laterali della macchina e, soprattutto, a realizzare una schermatura verso l'alto ("tetto") con blocchi di calcestruzzo ordinario di spessore 50 cm.

L'effetto benefico di questi provvedimenti è evidenziato nella Fig. 6 dove sono confrontate le intensità di dose neutronica sul piazzale antistante l'edificio Sincrotrone, misurate lungo la direzione b della Fig. 1, prima e subito dopo la costruzione del "tetto". In base al valore di 0,3 mrem/h misurato a 20 m dall'edificio Sincrotrone (corrispondenti a circa 33 m dal centro della macchina) si può valutare, tenendo presente quanto riportato nel paragrafo precedente, che l'intensità di dose da neutroni a 80 - 100 m (che è la minima distanza dai confini) non superasse i 0,02 mrem/h. Successivamente si sono ottenuti ulteriori miglioramenti, soprattutto con modifiche dei pozzi di spegnimento.

Analoghi controlli sono naturalmente stati eseguiti attorno a tutto il complesso Linac-Adone-Leale, soprattutto in quei casi in cui po

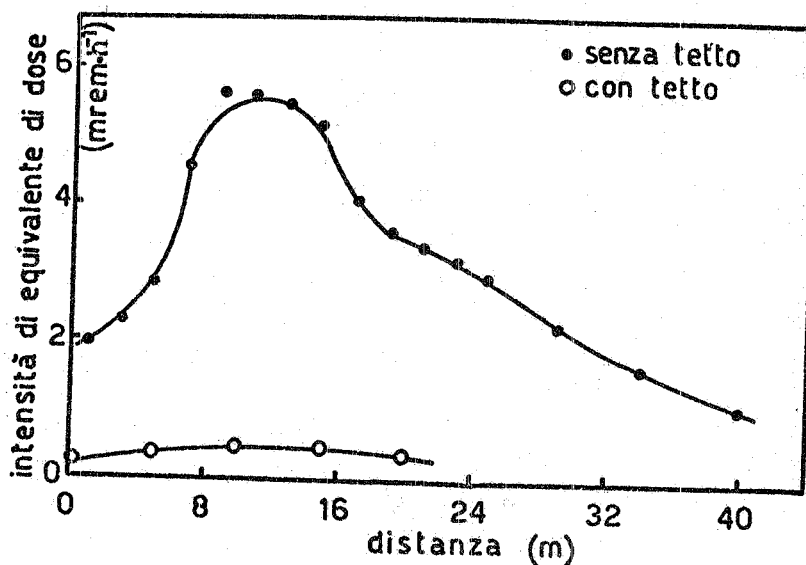


FIG. 6 - Intensità di dose da neutroni misurata sul piazzale Sincrotrone, prima e dopo la costruzione del tetto, lungo la direzione b.

teva essere supposta qualche variazione dei campi di radiazione (modifiche delle schermature, innalzamento dell'intensità di lavoro consentita ecc.). Va rilevato, tuttavia, che il funzionamento di queste macchine non avviene, soprattutto nella fase Leale per la quale è postulabile la massima produzione di neutroni, con la continuità e l'uniformità necessarie per rendere i dati così ricavabili utili per una valutazione attendibile delle dosi ai confini. Convorrà comunque riferire che i livelli di dose lungo il tunnel del Linac sono sempre risultati praticamente nulli, come peraltro era da attendersi in considerazione della ottima schermatura installata lungo la macchina, mentre nelle altre aree, a distanze dell'ordine di  $30 \div 50$  m, sono state misurate dosi da neutroni che, normalizzate alla massima potenza attualmente ottenibile, risultano variare tra 0 e circa  $1 \div 2$  mrem/h. In considerazione della eccezionalità e della sporadicità con cui si possono riscontrare quest'ultimi livelli, non vale però la pena di discuterli ulteriormente.

Allo scopo di dedurre un limite per eccesso della dose ai confini, sembra ora interessante considerare i valori medi dell'equivalente di dose da neutroni nei punti fissi controllati con film-badges e situati a distanze dalle sorgenti comprese all'incirca tra 30 e 50 m. Tali valori, mediati sul periodo 1969-1973, sono presentati in tabella II, ove sono anche indicate la distanza approssimativa dalla principale sorgente e le dosi annuali in punti da questa distanti rispettivamente 100 e 200 m, valutate con i criteri descritti nel paragrafo precedente.

Considerando anche che la dose minima rilevabile con i film-badges per neutroni è piuttosto alta e che perciò si hanno comunque almeno 15 mrem per ogni periodo di servizio (di durata compresa tra 30 e 45 giorni), si può concludere che anche il contributo dei neutroni alle dosi ai

TABELLA II

Dosi annuali medie da neutroni rilevate nei posti fissi controllati con film-badges e valutazione per eccesso delle dosi a distanza (periodo 1969-73).

P o s i z i o n e	Dose annuale media (mrem)	Distanza (m)	Dose annuale a 100 m (mrem)	Dose annuale a 200 m (mrem)
<u>Zona Sincrotrone</u>				
Area esterna fascio 4	≤ 145	45	21	7
Tettoia Piazzale (Sud)	≤ 145	45	21	7
Tettoia Piazzale (Nord)	≤ 135(1)	45	19	6
Lampione Piazzale (Sud)	≤ 130(1)	30	6,5	2
Lampione Piazzale (Nord)	≤ 130(1)	30	6,5	2
Cancello Recinto fascio estratto	≤ 165	30 ÷ 50(2)	8+29	3+10
Ex Confine Recinto fascio estratto	≤ 140	35 ÷ 50(2)	7+24	2+8
<u>Zona Adone-Leale</u>				
Dietro Sala Smistamento	≤ 193	25	21	7
Cancello Recinto Sala Smistamento	≤ 154	30	25	8
Bacheca Leale	≤ 130(1)	45	35	12
Consolle Adone	≤ 140	~45	39	13
Sala Conteggio 1	≤ 135(1)	~45	37	12
Sala Conteggio 2	≤ 130(1)	~45	35	12
Portone Adone	≤ 250	30	37	12

(1) - Media del periodo 1971-73.

(2) - Nei casi di possibili contributi di due o più sorgenti (ad esempio, nella zona Sincrotrone: pozzi di spegnimento, anello, perdite lungo la linea), sono state riportate una distanza minima ed una massima.



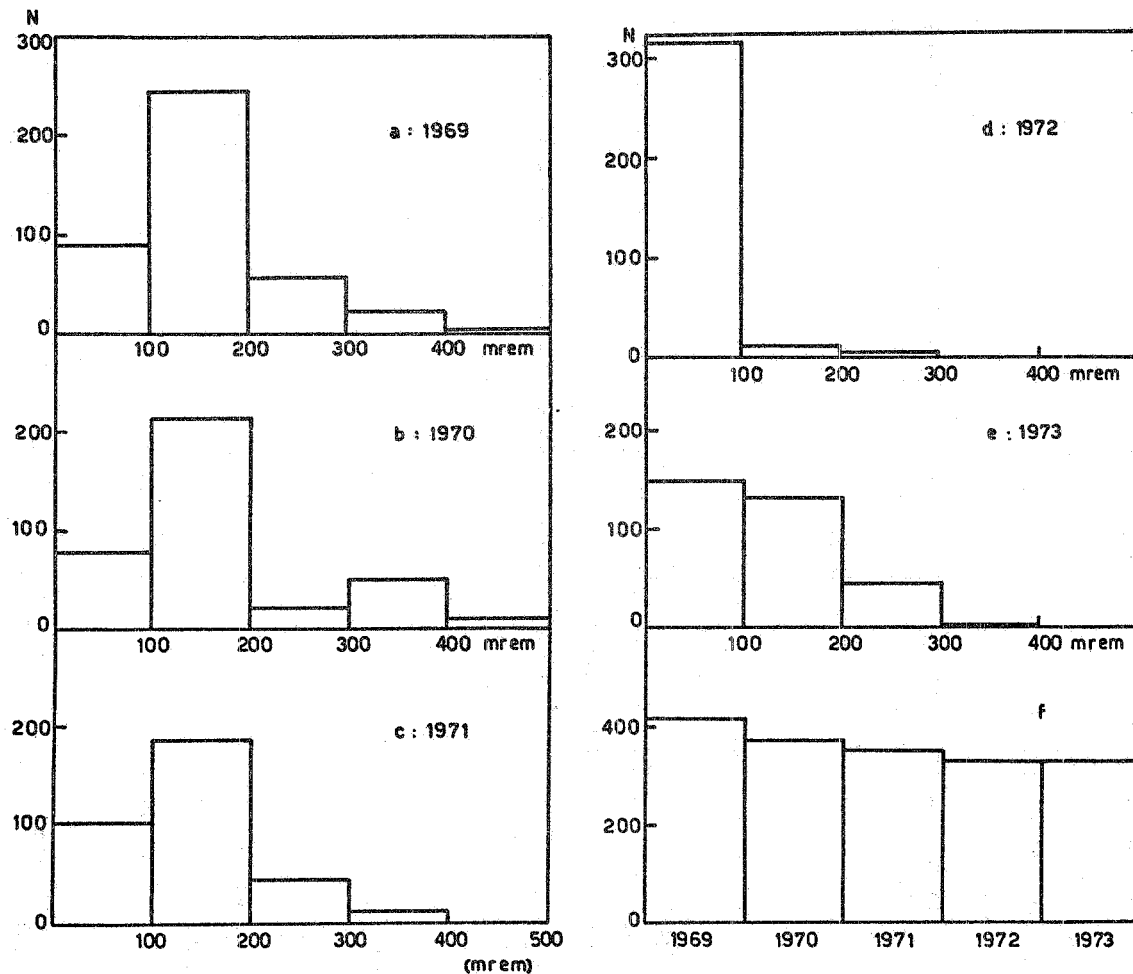


FIG. 7 - Distribuzione delle dosi annuali relative alle persone controllate nel quinquennio 1969-73 (istogrammi a, b, c, d, e) e andamento del numero di persone controllate nello stesso periodo (istogramma f). Tutti i dati, esclusi quelli del 1972, sono comprensivi del fondo strumentale.

confini del Centro è estremamente esiguo, risultando dell'ordine al più di 1 o 2/10 della dose limite per la popolazione nel suo insieme.

#### VIII. - CONCLUSIONI. -

Da quanto sopra esposto ci sembra di poter concludere con le seguenti affermazioni:

a) lungo i confini del Centro, il contributo delle macchine alla dose da raggi gamma è del tutto trascurabile, tenuto conto che le dosi misurate sono praticamente indistinguibili dal fondo naturale;

b) il contributo alla dose neutronica, pur con tutte le approssimazioni cautelative introdotte nelle considerazioni sviluppate nei paragrafi precedenti, può al più essere compreso tra 10 e 40 mrem/anno nei

punti distanti circa 100 m dalle macchine, e tra 2 e 12 mrem/anno per quelli a circa 200 m; nei rari tratti distanti meno di 100 m non si dovrebbero poter superare i 50 mrem/anno.

I livelli sopra indicati sono ampiamente accettabili in quanto rappresentano soltanto una piccola frazione dei limiti legali per la popolazione nel suo insieme. E' tuttavia probabile che i livelli effettivi siano in pratica ancora minori di quelli sopra valutati. Allo scopo di chiarire definitivamente la questione, si sta attualmente mettendo a punto nel nostro laboratorio ulteriore strumentazione idonea per misure di bassi livelli.

Una prova indiretta di questa nostra tesi può essere ricavata dall'osservazione dei risultati dei controlli dosimetrici individuali eseguiti, sempre negli ultimi cinque anni, sul personale controllato per motivi professionali. La distribuzione dei dati dosimetrici individuali, illustrata nella Fig. 7, mostra che nel periodo considerato nessuna delle persone controllate ha ricevuto una dose superiore a 500 mrem/anno, che è il limite ammesso per il gruppo 3 della popolazione. Questo risultato, oltre a confermare la bontà dei provvedimenti adottati per la protezione dei lavoratori nelle zone controllate del Centro, dimostra anche l'esiguità dei livelli di radiazione nelle zone di libero accesso, avvalorando l'ipotesi che lungo i confini questi siano praticamente insignificanti anche rispetto ai valori del fondo naturale.

## BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - "Il regime giuridico dell'impiego pacifico dell'energia Nucleare con particolare riguardo alla sicurezza nucleare e alla protezione sanitaria", Vol. I: Normativa Nazionale - (CNEN, 1972).
- (2) - "Recommendation of the International Commission on Radiological Protection (Adopted September 17, 1965)" - ICRP Publication 9 (Pergamon Press - traduzione italiana a cura dei dott. L. Forti e C. Polvani - CNEN, 1967).
- (3) - K. Goebel, "Radiation Protection Problems in the Design of the European 300 GeV Accelerators" - Proc. Intern. Congress on Protection against Accelerator and Space Radiation (CERN, Geneva, 1971).
- (4) - R. Schayès, C. Brooke, I. Kozlowitz and M. Lhereux, "New developments in thermoluminescent dosimetry", Health Physics 14, 251 (1968).
- (5) - G. Imbò, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla, "Contributions to the volcanological researches by determination of the radioactivity of eruptive products", Bull. Volc. 32, 2/25 (1968).
- (6) - L. Civetta and P. Gasparini, "A review of U and Th distributions in recent volcanics from southern Italy: magmatological and geophysical implications", Osservatorio Vesuviano, Ercolano.
- (7) - A. Cardinale, L. Frittelli, G. Lembo, F. Gera and O. Ilari, "Studies of the natural background radiation in Italy", Health Physics 20, 285 (1971).
- (8) - H. W. Patterson and R. H. Thomas, "Accelerator Health Physics", (Academic Press, New York e London, 1973).
- (9) - S. J. Lindenbaum, "Shielding of high energy accelerators", Annual Rev. Nuclear Sci. 11, 213 (1961).
- (10) - M. Ladu, M. Pelliccioni, P. Picchi and G. Verri, "A contribution to the Shyshine study", Nuclear Instr. and Meth. 62, 51 (1968).
- (11) - M. Ladu, F. Lucci, M. Pelliccioni e M. Roccella, "Problemi di radioprotezione dopo l'innalzamento dell'intensità dell'elettrosincrotrone di Frascati", Giorn. Fis. San. Prot. Rad. 14, n. 1, 1 (1970).
- (12) - M. Pelliccioni, P. Picchi e G. Verri, "Problemi di schermature connessi con l'innalzamento dell'intensità dell'elettrosincrotrone di Frascati", Frascati Report, LNF-68/55 (1968).