

Presentato al XIX  
Congresso Nazionale  
della A. I. F. S. P. R.,  
Levico Terme,  
17/19 Settembre 1975.

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-75/49(R)  
6 Novembre 1975

F. Lucci e M. Pelliccioni: RISCHI DA RADIAZIONE PER IL  
LAVORO INTORNO AD ANELLI D'ACCUMULAZIONE.

F. Lucci e M. Pelliccioni: RISCHI DA RADIAZIONE PER IL LAVORO INTORNO AD ANELLI D'ACCUMULAZIONE.

RIASSUNTO. -

Nel presente lavoro vengono esposti i principali problemi di radioprotezione connessi con la permanenza in prossimità di anelli d'accumulazione per elettroni, all'interno delle schermature, durante il lavoro con fasci accumulati.

Particolare attenzione è dedicata al caso di Adone, l'anello d'accumulazione  $e^+e^-$  da 1.5 GeV installato a Frascati e capace di lavorare con correnti massime di circa 100 mA per fascio, con un totale di  $4 \times 10^{11}$  particelle circolanti. Per questa macchina sono state misurate, praticamente a contatto della ciambella, dosi fino a circa 200 mrad/mA perso. Tali dosi decrescono rapidamente con la distanza fino a risultare del tutto inapprezzabili a 2-3 m dall'anello.

Viene anche preso in considerazione il problema della possibile esposizione alla componente dura della luce di sincrotrone, giungendo alla conclusione che, per quanto le finestre attualmente montate su Adone siano di spessore tale da rendere trascurabile questo rischio, esso debba essere tenuto ben presente nel caso di finestre più sottili o di macchine caratterizzate da un'energia critica più elevata.

2.

## 1. - INTRODUZIONE. -

Gli anelli d'accumulazione hanno ormai assunto da tempo un ruolo rilevante nella ricerca nel campo della fisica delle alte energie. Sono stati infatti realizzati numerosi anelli per protoni o elettroni (ed eventualmente relative antiparticelle), sia con un solo fascio circolante, sia a due fasci incrociati. Sono anche in studio alcuni interessanti sviluppi, quali: a) la costruzione di anelli per  $e^-$  "specializzati", da usare come sorgenti di luce di sincrotrone<sup>(1)</sup>; b) la produzione di fasci di gamma quasi-monocromatici e polarizzati mediante scattering di luce Laser sugli elettroni accelerati<sup>(2)</sup>.

In questo tipo di macchina il numero delle particelle presenti è limitato, anche con correnti circolanti elevate, e le perdite sono contenute entro i minimi valori tecnicamente realizzabili. Di conseguenza i livelli di radiazione sono relativamente modesti, anche in prossimità dell'anello, salvo che durante la fase di iniezione o nel caso di brusca perdita delle particelle accumulate, dovuta a condizioni anomale di funzionamento.

Non si può quindi escludere "a priori" la possibilità di permettere la permanenza in prossimità di anelli per elettroni durante il lavoro con fasci accumulati, all'interno delle schermature o con schermature ridotte.

Nel presente lavoro sono esposti i principali problemi di radioprotezione che è necessario affrontare per disciplinare convenientemente questo tipo di attività, se possibile, dedicando una particolare attenzione al caso di Adone, l'anello d'accumulazione per  $e^+e^-$  da 1,5 GeV installato a Frascati e capace di lavorare con correnti di circa 100 mA per fascio, con un totale di  $4 \times 10^{11}$  particelle circolanti.

## 2. - MECCANISMI DI PERDITA DELLE PARTICELLE ACCUMULATE. -

Un'analisi dei possibili meccanismi di perdita degli elettroni e delle radiazioni risultanti può essere reperita, ad esempio, nelle note in cui vengono descritti i metodi di calcolo adottati per le schermature di Spear<sup>(3, 4)</sup>. Poichè in questa sede si è interessati solo al problema della permanenza all'interno delle schermature, che deve comunque essere interdetta durante l'iniezione, basterà considerare le perdite, graduali o improvvise, dei fasci accumulati.

In queste condizioni, i meccanismi di perdita ipotizzabili sono i seguenti:

- a) Perdite normali (o per "vita media"): si verificano quando, a causa di interazioni col gas residuo e della relativa perdita di energia, le particelle si vengono a trovare al di fuori della zona di fase sta-

bile, con conseguente spiralizzazione e urto, più o meno rapido, con la parete interna della ciambella.

- b) Perdite di potenza o altri disturbi dei campi acceleratori a RF, che portano a perdita totale o parziale dei fasci ancora sulla parete interna della ciambella.
- c) Guasti relativi a magneti o quadrupoli, o comunque variazioni anomale delle condizioni di foccheggiamento, che portano a rapido aumento delle oscillazioni di betatrone o altri meccanismi caratterizzati da perdite con urto a piccoli angoli con le pareti della ciambella.
- d) In casi peraltro assai improbabili, interazione con materie estranee all'interno della ciambella (ad esempio corpi estranei mossi da forze magnetiche, incidenti di natura meccanica, implosione di finestre sottili, ecc.). Tutti questi casi possono essere evidentemente ricondotti all'inserzione di un bersaglio più o meno sottile sulla linea del fascio.

E' evidente che tutti questi possibili meccanismi sono tali da dar luogo a molteplici possibili distribuzioni delle perdite lungo la macchina. In ogni caso, se si escludono i meccanismi di cui alla precedente lettera d), ci si dovrà attendere che il fascio incida a piccoli angoli contro bersagli costituiti da varie parti della macchina, quali le pareti della ciambella, la faccia interna del magnete, ecc. Quanto alla localizzazione delle sorgenti si dovrà pensare a perdite distribuite lungo tutta la macchina o lungo alcuni quadranti (specie nel caso c)), eventualmente con alcuni punti caldi in corrispondenza delle zone in cui l'inviluppo delle orbite è massimo e di collimatori o altre strutture tali da diminuire la sezione utile della ciambella.

### 3. - L'ANELLO COME SORGENTE DI RADIAZIONI. -

Da quanto visto al paragrafo precedente risulta chiara l'importanza di disporre di dati sulla distribuzione angolare, la natura e lo spettro delle radiazioni secondarie originate da fasci di elettroni incidenti, a piccoli angoli, contro vari tipi di bersagli. Le uniche misure disponibili in materia sono, per quanto noto agli autori, quelle sulla distribuzione angolare eseguite a Stanford<sup>(5)</sup>, con fasci di elettroni da 2 GeV incidenti obliquamente a piccoli angoli su una piastra spessa in ferro ed una sottile in alluminio.

I risultati del lavoro citato, per quanto non perfettamente confacenti, possono essere impiegati per tentare una grossolana valutazione, sicuramente per eccesso, dei livelli di radiazione nella zona interna all'anello, a seguito della perdita totale o parziale dei fasci accumulati, nel caso particolare di Adone. Riferendosi in particola-

re ai dati relativi alla piastra spessa di ferro, è senz'altro cautelativo assumere che la radiazione secondaria emessa ad angoli superiori a  $20^\circ$  dia, ad 1 m di distanza e nel caso di sorgente puntiforme, una dose di  $10^{-10}$  rad/elettrone incidente. In queste ipotesi è stato possibile calcolare i valori della dose all'interno dell'anello, che sono mostrati in fig. 1, normalizzati alla corrente persa ed in funzione della distanza dal centro della macchina.

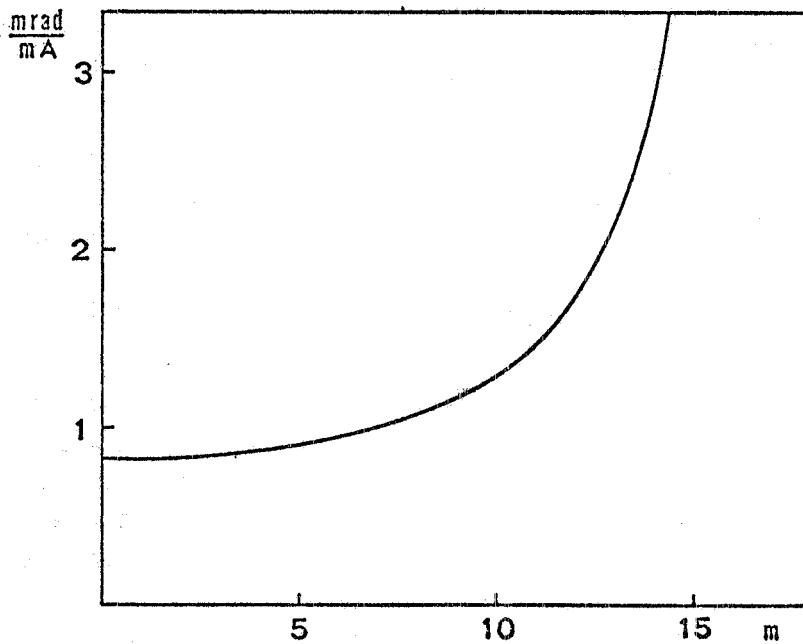


FIG. 1 - Valutazione delle dosi, normalizzate alla corrente persa, all'interno dell'anello in funzione della distanza dal centro della macchina.

Riguardo a questi dati, si ritiene opportuno riferire le seguenti considerazioni. In primo luogo, malgrado le ipotesi pesantemente peggiorative, i valori trovati sono decisamente modesti. Secondariamente, all'esterno dell'anello ci si dovranno attendere livelli ancora minori, data la prevalenza dei meccanismi di perdita che comportano spiralizzazione verso l'interno.

Naturalmente la valutazione precedente tende a perdere di significato per piccole distanze dall'anello, quando cioè potrebbe divenire determinante la distribuzione locale delle perdite. Anche in questo caso, naturalmente, si possono tentare valutazioni a partire dai dati di Stanford, ricorrendo all'approssimazione di una o più sorgenti puntiformi. In questa sede, comunque, ci si limiterà ad osservare che in punti che distino dalla ciambella almeno 50 cm è praticamente impossibile, per motivi geometrici, essere esposti a radiazioni diffuse a più di  $10^\circ$ - $15^\circ$  e che a tali angoli corrispondono dosi ad 1 m dell'ordine di 200 mrad/mA.

Resta infine da considerare, per la zona esterna all'anello, la possibilità di esposizione al fascio di bremmstrahlung originato nei casi di perdita descritti al punto d) del paragrafo precedente. Per quanto tali esposizioni sembrano estremamente improbabili, sia per il tipo di perdita sia per motivi geometrici, è parso infatti doveroso considerarla, almeno come massimo incidente credibile.

In questo caso, un limite superiore alla dose potrà essere stabilito, ad esempio, supponendo che il materiale estraneo costituisca un bersaglio di spessore ottimale per la produzione di bremsstrahlung e che siano interposti materiali sufficienti a raggiungere il massimo dello sciame. Estrapolando dati ottenuti presso l'elettrosincrotrone di Frascati ad 1 GeV<sup>(6)</sup>, si può allora valutare una dose massima a 5 m dal bersaglio pari a 1.8 rad/mA.

Si noti, infine, che le radiazioni neutroniche non costituiscono, in questo caso, un gran problema: ciò sia per il numero limitato di elettroni presenti, sia per l'assenza di schermature massicce che permettano un completo sviluppo della cascata elettrofotonica. Comunque, anche nel caso di assorbimento completo in ferro, potrebbero essere prodotti all'incirca  $8 \times 10^8$  neutroni di risonanza gigante e  $3 \times 10^6$  fotoneutroni di alta energia per perdite di 1 mA, con dosi ad 1 m rispettivamente di 0.25 mrem/mA e di 0.05 mrem/mA.

#### 4. - ESPERIENZA PRATICA PRESSO ADONE. -

Fin dall'inizio del lavoro scientifico presso Adone si è posta l'esigenza di consentire l'accesso in sala dei ricercatori durante il lavoro con fasci accumulati.

Oltre a valutazioni teoriche del tipo illustrato al paragrafo precedente, è stato necessario, naturalmente, provvedere a misurare in modo diretto l'entità delle dosi rilevabili in caso di perdita dei fasci. Sono state così eseguite numerose serie di misure, mediante dosimetri a termoluminescenza, nelle seguenti condizioni<sup>(7)</sup>:

- a) funzionamento normale (perdite per vita media);
- b) perdita improvvisa provocata agendo sul campo a RF;
- c) perdita improvvisa provocata agendo sulle correnti dei quadrupoli.

I risultati delle misure hanno permesso di stabilire che:

- i maggiori rischi potenziali sussistono presso le sezioni dritte, ove l'inviluppo delle orbite è massimo e, d'altra parte, non sono presenti materiali che possano fungere da schermo;
- il campo di radiazione è fortemente piccato all'altezza del fascio;
- la distribuzione delle perdite lungo la macchina dipende fortemente

6.

dalla geometria delle sezioni e dalle modalità della perdita dei fasci; quantitativamente si sono misurate dosi comprese tra valori trascurabili e circa 200 mrad/mA;

- l'emissione avviene a piccoli angoli ed i livelli di radiazione decrescono rapidamente con la distanza.

A titolo di esempio nella fig. 2 sono riportati i risultati di alcune delle misure eseguite a contatto della sezione diritta n. 1, dove sono stati sempre riscontrati i valori più elevati, nei casi di perdite per vita media e di quelle provocate agendo sul campo acceleratore a RF. Le dosi sono, come al solito, normalizzate alla corrente persa. Si noti come le dosi all'esterno dell'anello sono sempre inferiori a quelle misurate all'interno di un fattore prossimo a 10.

La figura 3 mostra invece i risultati ottenuti in prossimità della stessa sezione, a contatto di essa ed a distanze di 25 e 50 cm. Come è facilmente visibile, le curve confermano quanto già riferito circa la rapida decrescita con la distanza. In particolare le dosi si riducono di circa un fattore 20 a 25 cm e di un fattore 200 a 50 cm, mentre non sono mai state registrate dosi apprezzabili a distanze superiori a 2-3 m dalla macchina.

In definitiva si può affermare che, sebbene non siano stati esaminati tutti i possibili casi di perdita dei fasci, le misure eseguite permettono di confermare quanto detto nei paragrafi precedenti circa la relativa esiguità delle dosi rilevabili. In particolare esse confermano che solo in una ristretta zona intorno alla macchina sono possibili significative sovraesposizione alle radiazioni.

## 5. - IL PROBLEMA DELLA LUCE DI SINCROTRONE. -

Un secondo aspetto da considerare è ora quello della pericolosità radiologica della luce di sincrotrone. Tale problema è già stato affrontato per l'anello del CEA<sup>(8)</sup> e per Adone<sup>(9)</sup>.

Rifacendosi a quest'ultimo lavoro, si può definire un'energia critica  $\epsilon_c$ , data dalla:

$$\epsilon_c = 2.22 \frac{E^3(\text{GeV})}{R(\text{m})} \text{ keV},$$

dove E ed R indicano rispettivamente l'energia degli elettroni circolanti ed il raggio di curvatura dell'orbita all'interno del magnete. La fluensa energetica differenziale della luce di sincrotrone può allora essere espressa in funzione della variabile adimensionale  $y = \epsilon/\epsilon_c$ , tramite la:

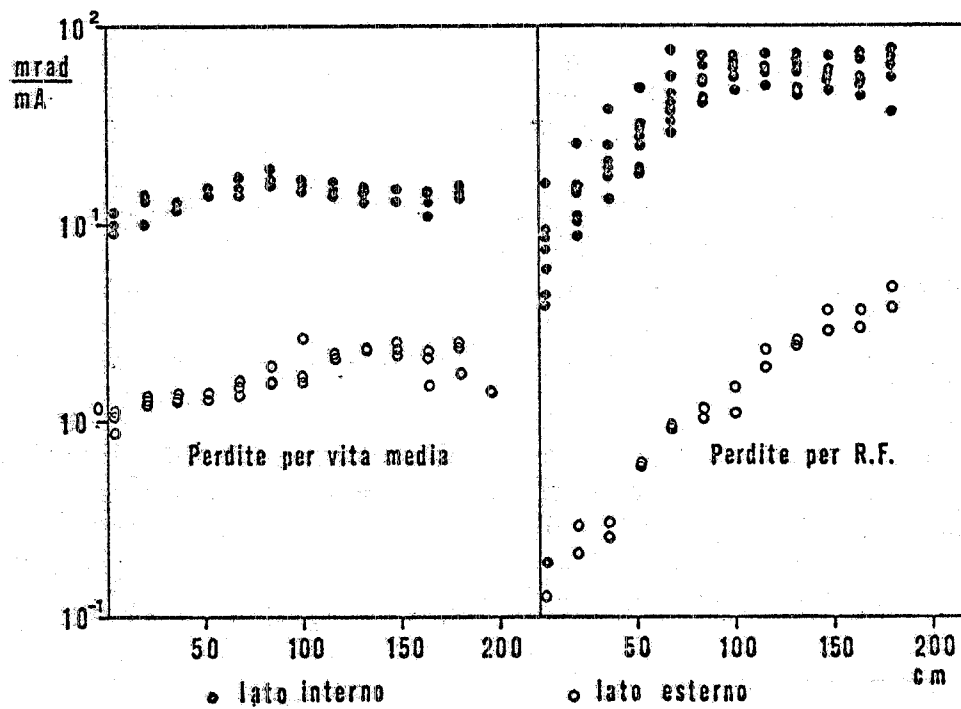


FIG. 2 - Dosi misurate a contatto della sezione diritta n. 1 in funzione della distanza da una delle estremità. I valori sono normalizzati alla corrente persa. Caso delle perdite per vita media o provocate mediante riduzioni del campo acceleratore.

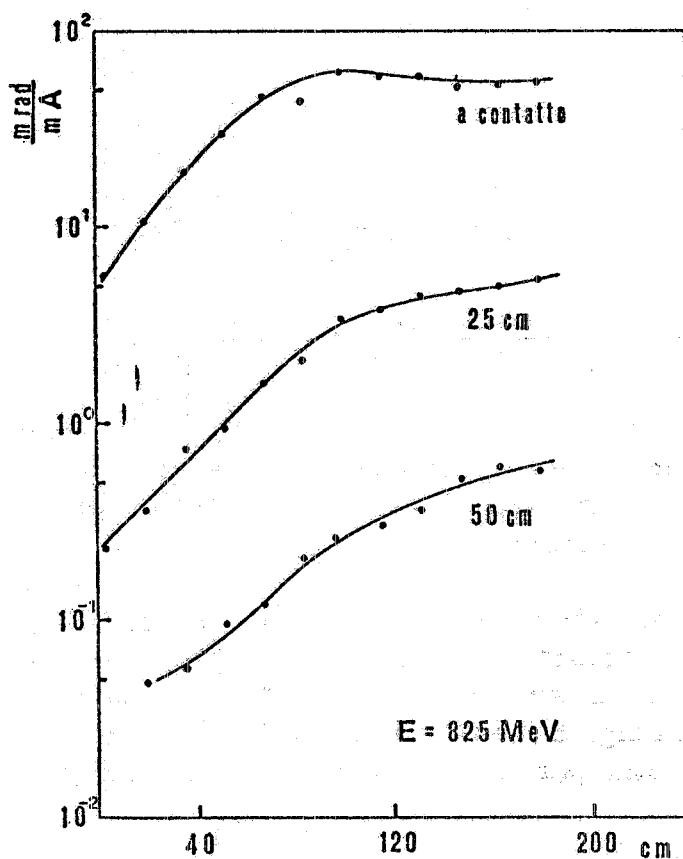


FIG. 3 - Dosi misurate lungo la sezione diritta n. 1 a varie distanze da essa, nel caso di perdite provocate mediante riduzione del campo acceleratore. I valori sono normalizzati alla corrente persa.



$$\frac{d\phi_w}{d\varepsilon} = 2.43 \frac{I(\varepsilon_c \cdot R)^{1/3} \cdot G(y)}{\Delta z \cdot d \cdot y^2} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2 \cdot \text{keV}}$$

dove  $G(y)$  è una funzione universale che può trovarsi graficata in letteratura<sup>(10)</sup>,  $I$  è la corrente circolante in mA,  $\varepsilon_c$  ed  $R$  sono espressi rispettivamente in keV ed in m,  $\Delta z$  indica l'altezza dell'area investita dalla luce di sincrotrone in cm e, infine,  $d$  è la distanza tra il punto considerato e la porzione d'orbita che funge da sorgente anch'essa in cm.

In fig. 4 è appunto mostrata la fluenza energetica differenziale della radiazione di sincrotrone emessa in Adone, calcolata mediante la formula precedente per un punto distante 0,8 m dall'orbita degli elettroni e per diverse energie dei fasci accumulati. Il calcolo è stato eseguito per  $10^{11}$  elettroni circolanti, ponendo  $\Delta z = 2$  mm.

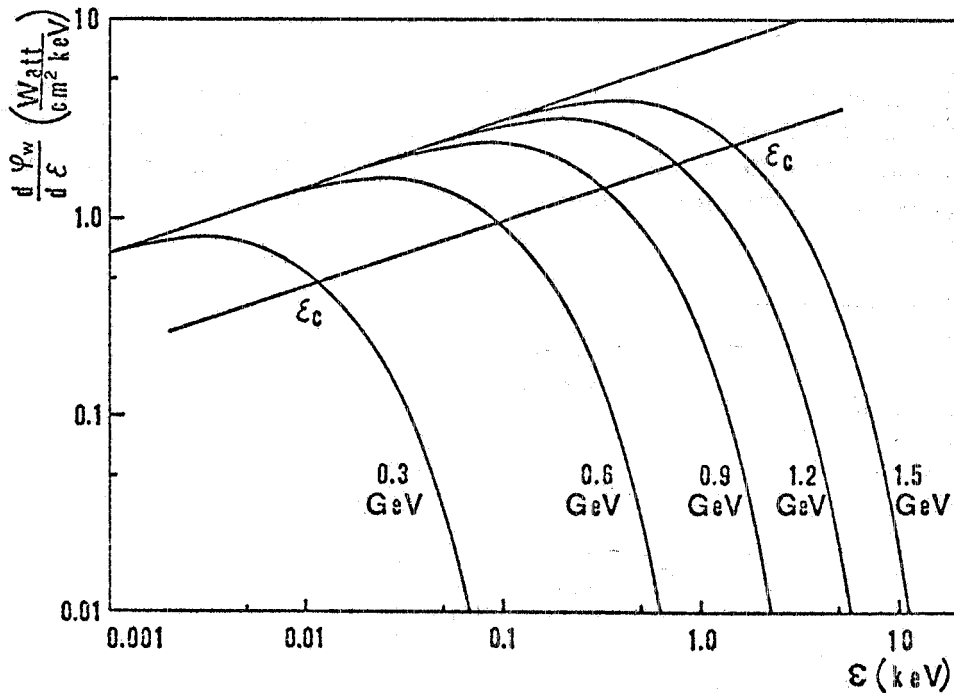


FIG. 4 - Fluenza energetica differenziale della luce di sincrotrone in un punto distante 80 cm dal fascio di Adone, per diverse energie degli elettroni accumulati.

Il calcolo dell'attenuazione attraverso le finestre può essere effettuato in condizioni di buona geometria, viste le spiccate caratteristiche di direzionalità della luce di sincrotrone, ed infine la conversione in dose è immediata. La fig. 5 mostra l'intensità d'esposizione per unità d'energia così ricavata, per finestre in ferro di tre diversi

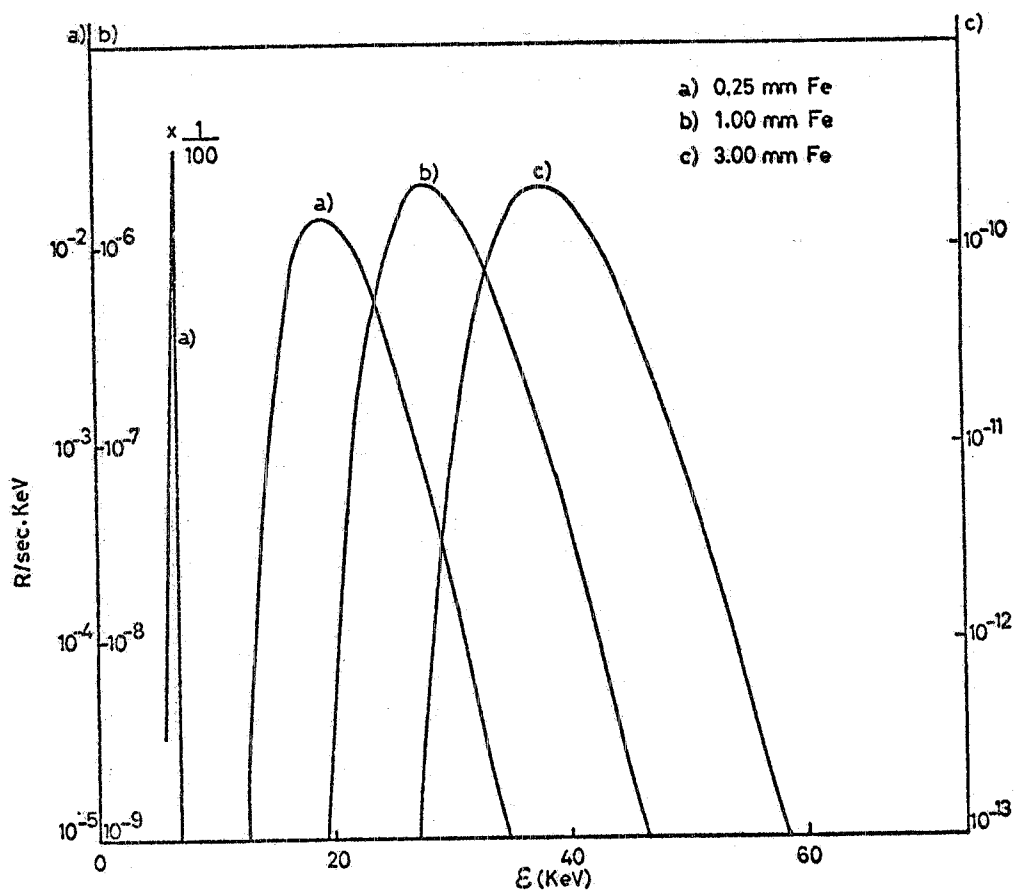


FIG. 5 - Intensità d'esposizione dovuta alla luce di sincrotrone per unità d'energia dei fotoni, in corrispondenza di finestre di ferro di vari spessori.

spessori e per  $E = 1.5 \text{ GeV}$ . Nella tabella I sono invece riportate, per quanto concerne Adone, le intensità di esposizione totali per finestre in ferro, acciaio inox o quarzo di vari spessori.

Si noti come, ricorrendo a finestre in acciaio inox, anziché di ferro, la parte delle curve relativa ad energie superiori a circa 10  $\text{keV}$  resta praticamente immutata, mentre il forte picco di fuga intorno ai 7  $\text{keV}$  subisce una sostanziale riduzione. Nella stessa tabella sono inoltre riportate le intensità di esposizione valutate per l'anello del CEA e del relativo Bypass, per un'energia di 3  $\text{GeV}$  e una corrente di 5  $\text{mA}$ .

Tenendo presente che le finestre più sottili montate su Adone sono in acciaio inox da 3  $\text{mm}$ , si può constatare che, nel caso particolare di tale macchina, il problema allo stato degli atti non si pone. Osservando però come la situazione peggiori drasticamente al crescere dell'energia critica (caso del CEA e del relativo Bypass), resta

TABELLA I - Intensità d'esposizione dovuta a luce di sincrotrone dopo finestre di vario tipo, nei casi di ADONE e del CEA (valori in R/sec).

| Macchina e cond. funzionamento                          | Tipo finestra (mm)                           | Intervallo di energia |                      | Totale               |
|---|--|-----------------------|----------------------|----------------------|
|   |  | 5-7,1 keV             | > 10 keV             |                      |
| ADONE<br>1.5 GeV, $10^{11}$ e<br>$\epsilon_c = 1.5$ keV | Fe 0.25                                      | 0.98                  | 0.13                 | 1.1                  |
|   | Fe 1.0                                       | ----                  | $1.1 \times 10^{-5}$ | $1.1 \times 10^{-5}$ |
|   | Fe 3.0                                       | ----                  | $1.3 \times 10^{-9}$ | $1.3 \times 10^{-9}$ |
|   | Inox 0.25                                    | ----                  | 0.13                 | 0.13                 |
|   | Inox 1.0                                     | ----                  | $1.1 \times 10^{-5}$ | $1.1 \times 10^{-5}$ |
|   | Inox 3.0                                     | ----                  | $1.3 \times 10^{-9}$ | $1.3 \times 10^{-9}$ |
|   | Quarzo 10                                    | ----                  | $6.1 \times 10^{-2}$ | $6.1 \times 10^{-2}$ |
|   | CEA<br>3 GeV, 5 mA<br>$\epsilon_c = 2.3$ keV | Fe 0.25               | 2.0                  | 9.35                 |
| Fe 1.0  | $7.1 \times 10^{-15}$                        | $1.3 \times 10^{-2}$  | $1.3 \times 10^{-2}$ |                      |
| Fe 3.0  | ----   | $7.8 \times 10^{-6}$  | $7.8 \times 10^{-6}$ |                      |
| Inox 0.25   | $6.1 \times 10^{-3}$                         | 9.35                  | 9.4                  |                      |
| Inox 1.0  | $1.9 \times 10^{-25}$                        | $1.3 \times 10^{-2}$  | $1.3 \times 10^{-2}$ |                      |
| Inox 3.0  | ----   | $7.8 \times 10^{-6}$  | $7.8 \times 10^{-6}$ |                      |
| CEA BYPASS<br>3 GeV, 5 mA<br>$\epsilon_c = 5.7$ keV     | Inox 0.25                                    | $2.7 \times 10^{-2}$  | $2.8 \times 10^3$    | $2.8 \times 10^3$    |
| Inox 1.0  | ----   | $1.0 \times 10^2$     | $1.0 \times 10^2$    |                      |
| Inox 3.0  | ----   | 4.0                   | 4.0                  |                      |

confermato che il problema della pericolosità radiologica della componente dura della radiazione di sincrotrone deve essere tenuto nella giusta considerazione.

## 6. - CONCLUSIONI. -

Da quanto sopra esposto risulta che, per anelli d'accumulazione di caratteristiche prossime a quelle di Adone, è possibile consentire l'accesso e la permanenza in sala anello durante il lavoro con fasci accumulati, anche in assenza di schermature attorno alla macchina. Tale materia dovrà essere opportunamente disciplinata in modo da evitare il rischio di indebite sovraesposizioni.

Nel caso particolare di Adone si procede concedendo a persone responsabili due tipi di autorizzazione all'accesso in sala con fasci accumulati:

a) limitatamente alle zone centrali e, comunque, mai a distanza minore di 3-4 m dalla macchina, senza limitazioni sulla corrente circolante;

b) nella zona esterna alla macchina o in prossimità di essa, solo per correnti inferiori a 2 mA.

Il controllo dosimetrico di queste persone viene effettuato, oltre che con i normali film-badge, anche con dosimetri a termoluminescenza, per avere la possibilità di lettura immediata in caso di perdite accidentali dei fasci accumulati. Conviene comunque notare che le dosi finora assorbite da queste persone sono sempre risultate del tutto trascurabili.

Concludendo ci piace ricordare che per anelli di più alta energia o corrente più elevata può essere necessario, ad esempio, ricorrere a schermature immediatamente attorno all'anello. Nel caso di SPEAR, ad esempio, la zona interna all'anello è protetta mediante una schermatura in calcestruzzo spessa 2' in corrispondenza ai magneti e 3' in corrispondenza alle sezioni diritte. Ricordiamo infine che particolare attenzione deve essere rivolta ai sistemi ed alle procedure di sicurezza necessari per evitare la possibilità di iniezioni intempestive con persone presenti in sala anello.

## BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - C. Kunz, Perspectives of synchrotron radiation, Report on a panel discussion, DESY SR-74/15 (1974).
- (2) - A. Marino, G. Matone, M. Roccella e C. Schaerf, Proposta per la realizzazione di un fascio gamma monocromatico e polarizzato mediante scattering di luce Laser sugli elettroni circolanti in Adone, Frascati report LNF-72/57 (1972).
- (3) - J. L. Harris and T. M. Jenkins, Shielding for SPEAR, SPEAR 106 (1971).
- (4) - T. M. Jenkins, Shielding of photons for SPEAR, SLAC-TN-71-5 (1971).
- (5) - T. M. Jenkins, G. J. Warren and J. L. Harris, Angular distribution of radiation from a collimator, a thick plate and a thin plate struck by a 2 GeV electron beam, SLAC TN-70-34 (1970).
- (6) - F. Lucci, M. Pelliccioni and M. Roccella, Measurements on 1 GeV electromagnetic cascade and cascade-produced neutrons in shielding materials, Frascati report LNF-69/27 (1969).
- (7) - M. Pelliccioni et M. Roccella, Contrôle des radiations auprès de l'anneau de stockage Adone de Frascati, Proc. Intern. Congress on Protection against Accelerator and Space Radiation, Ginevra (1971)
- (8) - W. A. Shurcliff, Calculations as to how large a dose-rate of synchrotron radiation would be received by a person standing close to the CEA ring or Bypass when there is a 5 mA-ave 3 GeV beam stored there, Report CEAL-1057 (1972).
- (9) - F. Lucci e M. Pelliccioni, Rischi radiologici legati alla luce di sincrotrone prodotta in Adone, Frascati report LNF-75/14(R) (1975).
- (10) - V. Montelatici, Useful formulae and calculated functions for the luminous electron, Frascati report LNF-72/56 (1972).