

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-75/14(R)
24 Marzo 1975

F. Lucci e M. Pelliccioni: RISCHI RADIOLOGICI LEGATI ALLA
LUCE DI SINCROTRONE PRODOTTA IN ADONE. -

F. Lucci e M. Pelliccioni: RISCHI RADIOLOGICI LEGATI ALLA LUCE DI SINCROTRONE PRODOTTA IN ADONE. -

INTRODUZIONE. -

In questa nota siamo interessati a determinare il grado di pericolosità, da un punto di vista radiologico, della componente dura della luce di sincrotrone prodotta in Adone. Il problema potrebbe eventualmente interessare le persone autorizzate ad accedere in Sala Anello, nella zona esterna alla macchina, durante il funzionamento con i fasci accumulati. Non sarà invece considerato il concomitante problema delle dosi dovute a perdite improvvise o "per vita media" dei fasci accumulati, argomento già trattato in altra occasione⁽¹⁾.

Calcoli dell'intensità di dose dovuta alla radiazione di sincrotrone attorno ad un anello d'accumulazione, in prossimità di finestre, sono stati eseguiti per l'anello del C. E. A.⁽²⁾, mostrando che il rischio in questione non è ipotetico ma reale, almeno in corrispondenza di finestre sottili. D'altra parte il crescente interesse per gli anelli d'accumulazione per elettro- ni come sorgenti di luce di sincrotrone⁽³⁾ consiglia di non sottovalutare il problema.

Abbiamo così ritenuto opportuno esaminare il caso della luce prodotta in Adone, sfruttando calcoli eseguiti da V. Montelatici^(4, 5). Introducendo alcune ipotesi semplificatrici si arriverà a concludere che la componente dura della radiazione di sincrotrone potrebbe costituire un problema radiologico di una certa rilevanza, anche intorno ad Adone, solo nel caso di finestre più sottili di quelle attualmente montate.

I risultati dei calcoli sono comunque tali da confermare che il problema della pericolosità radiologica della luce di sincrotrone merita una certa considerazione, specie attorno ad anelli d'accumulazione di più alta energia o con maggiori correnti circolanti.

2.

FLUSSO D'ENERGIA IN PROSSIMITA' DI UNA FINESTRA INFINITAMENTE SOTTILE. -

Lo spettro della luce irraggiata da un elettrone durante un'orbita completa è pari a⁽⁴⁾:

$$(1) \quad \frac{dW}{d\lambda} = (4\pi)^{1/3} \frac{1}{\Lambda} \frac{c}{R^{2/3}} \frac{e_0^2}{\lambda_c^{7/2}} G(\lambda_c/\lambda)$$

dove λ indica la lunghezza d'onda, $G(\lambda_c/\lambda)$ è una funzione universale, Λ è il cosiddetto fattore d'allungamento, che tiene conto della presenza di eventuali sezioni diritte, c ed e_0 hanno i consueti significati e λ_c è una lunghezza d'onda detta "critica", che dipende solo dal raggio dell'orbita all'interno dei magneti (R) e dall'energia E degli elettroni circolanti tramite la:

$$(2) \quad \lambda_c = \frac{aR}{E^3} \quad \text{con} \quad a = 5,59 \frac{\text{\AA} \text{ GeV}^3}{\text{m}}$$

Naturalmente la (2) definisce implicitamente anche un'energia critica $\epsilon_c = hc/\lambda_c$:

$$(2') \quad \epsilon_c = \frac{bE^3}{R} \quad \text{con} \quad b = 2,22 \frac{\text{KeV m}}{\text{GeV}^3}$$

A questo punto, essendo interessati alla componente dura della radiazione di sincrotrone, conviene sostituire a $G(y)$ la sua forma asintotica per $y = \lambda_c/\lambda \gg 1$ ($G(y) \simeq 1,255 y^{5/2} \exp(-y)$), introducendo in più un fattore correttivo 1,5 per tener conto del fatto che l'espressione asintotica sottovaluta la funzione reale in una parte della zona di spettro che ci interessa. Ciò fatto, passando dalla variabile λ all'energia dei fotoni ϵ e sostituendo ai simboli i valori caratteristici di Adone, si ottiene per lo spettro d'energia della componente dura della luce di sincrotrone, nel caso di 10^{11} elettroni da 1,5 GeV circolanti lungo tutto l'anello, la seguente relazione:

$$\frac{dW}{d\epsilon} = 2,5 \cdot 10^3 \sqrt{y} e^{-y} \frac{\text{Watt}}{\text{KeV}}$$

$$\text{con} \quad y = \epsilon/\epsilon_c \quad \text{ed} \quad \epsilon_c = 1,5 \text{ KeV.}$$

Consideriamo ora un'areola ΔS normale alla traiettoria della luce di sincrotrone, secondo la geometria mostrata in Fig. 1. La frazione della potenza irraggiata che raggiunge ΔS è $\Delta x/2\pi d$, avendo indicato con d la distanza tra l'areola e la porzione di orbita che funge da sorgente. Posto $d = 3$ m e supponendo che l'altezza Δz della zona interessata sia dell'ordine di 2 mm (e ciò è consistente con la dimensione verticale del

fascio circolante, la sua divergenza angolare e la distribuzione angolare della luce emessa), si può ottenere la fluenza energetica differenziale:

$$(4) \quad \frac{d\phi_W}{d\varepsilon} = \frac{1}{2\pi\Delta z} \frac{dW}{d\varepsilon} = 6,6 \sqrt{y} e^{-y} \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \text{KeV}}$$

o più in generale:

$$(4') \quad \frac{d\phi_W}{d\varepsilon} = A \sqrt{y} e^{-y}.$$

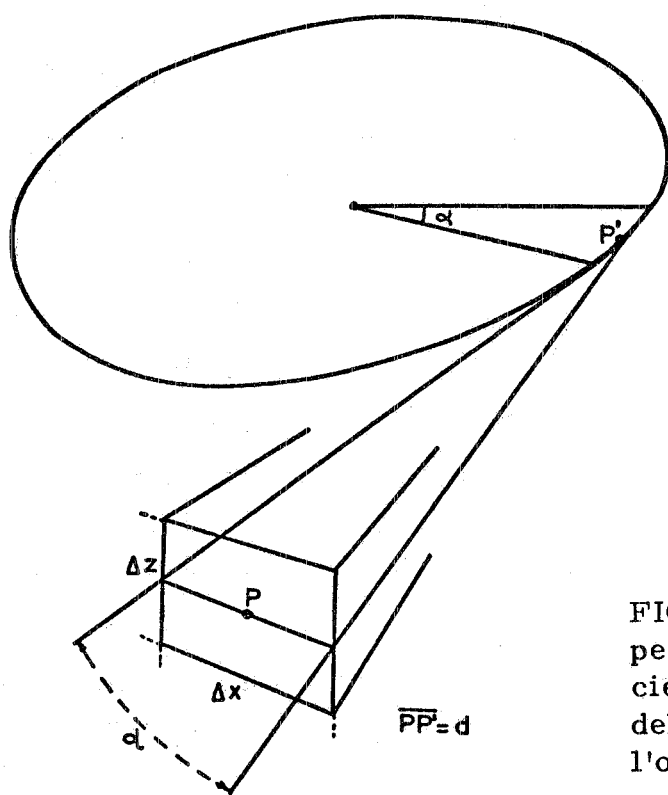


FIG. 1 - Condizioni geometriche per l'irradiazione di una superficie ΔS di centro P posto sul piano dell'orbita (PP' è la tangente all'orbita condotta per P).

Diviene ora facile calcolare l'attenuazione, in funzione dell'energia, attraverso finestre di vari spessori e la conversione in unità di dose. In particolare, vista la spiccata direzionalità della radiazione di sincrotrone, si potranno utilizzare i coefficienti di attenuazione totale in condizioni di "buona geometria". Valori di tali coefficienti per diversi materiali e per le energie che interessano possono essere reperiti in bibliografia (7, 8).

Vogliamo infine osservare che la (4) è stata derivata per le condizioni di massima pericolosità: energia e intensità massime, Δz minimo, posizione distante non più di 0,8 m dall'orbita degli elettroni.

4.

CONVERSIONE IN DOSE E CALCOLI PER VARI TIPI DI FINESTRA. -

Il calcolo della dose in prossimità delle finestre è stato effettuato mediante un semplice programma numerico che fa uso della (4). I valori dei coefficienti d'attenuazione e dei fattori di conversione fluenza-esposizione sono stati calcolati punto per punto per interpolazione logaritmica mediante polinomi del terzo ordine a partire dai dati forniti in ingresso.

Sono state considerate finestre in ferro o in quarzo di vari spessori impiegando i valori indicati nelle Tabelle I e II. Si noti in particolare, per il coefficiente d'attenuazione del ferro la netta discontinuità a circa 7,1 keV, corrispondente alla riga k d'assorbimento.

TABELLA I - Fattori di conversione fluenza d'energia-esposizione⁽⁶⁾.

ξ (keV)	Fatt. conv. ($J/cm^2 R$)	ξ (keV)	Fatt. conv. ($J/cm^2 R$)
10	$1,88 \cdot 10^{-6}$	50	$2,28 \cdot 10^{-4}$
15	$6,80 \cdot 10^{-6}$	60	$3,00 \cdot 10^{-4}$
20	$1,70 \cdot 10^{-5}$	80	$3,72 \cdot 10^{-4}$
30	$5,97 \cdot 10^{-5}$	100	$3,80 \cdot 10^{-4}$
40	$1,37 \cdot 10^{-4}$	150	$3,49 \cdot 10^{-4}$
		200	$3,27 \cdot 10^{-4}$

In Fig. 2 è mostrata l'intensità d'esposizione per unità d'energia, in funzione dell'energia dei fotoni, per finestre di ferro di tre diversi spessori. L'intensità di esposizione totale si otterrà, naturalmente, per integrazione. Si può facilmente notare l'effetto di filtro delle finestre, che al crescere dello spessore tendono a far passare solo la parte più penetrante delle radiazioni incidenti, e, per lo spessore minore (0,25 mm), un pronunciato picco di fuga a circa 7 keV, corrispondente alla discontinuità del coefficiente d'assorbimento.

Le curve di Fig. 2 possono descrivere, con approssimazione sufficiente ai fini protezionistici, anche il caso delle finestre d'acciaio inossidabile per energie superiori a circa 10 keV. Per le energie inferiori, invece, anche le limitate percentuali di nichel e, soprattutto, cromo presenti in tali acciai possono diminuire sostanzialmente il picco di fuga a 7 keV. Ad esempio, con un contenuto del 20% di Cr e del 10% Ni (composizione dell'acciaio inox 304 molto usato presso gli acceleratori) si ha un coefficiente d'attenuazione a 7 keV pari a circa $135 cm^2/g$ contro i $54 cm^2/g$ del ferro, e quindi un'ulteriore attenuazione di un fattore dell'ordine di 10^7 per finestre da 0,25 mm.

TABELLA II - Coefficienti d'attenuazione in quarzo e ferro (escluso lo "scattering" coerente)^(o).

SiO ₂ (Quarzo)		FERRO	
ξ (keV)	μ/ρ (cm ² /g)	ξ (keV)	μ/ρ (cm ² /g)
2,4	1100 ^x	3,15	470
3,15	519 ^x	4,1	245
4,1	256,5 ^x	5,4	115
5,4	117,5 ^x	7,1	54
8,05	37,9 ^x	7,11	465
8,9	28,3 ^x	8,05	325
10	20	8,9	252
15	6,0	10	180
20	2,6	15	58,2
30	0,85	20	25,8
40	0,43	30	8,03
50	0,29	40	3,48
60	0,23	50	1,83
80	0,18	60	1,13
100	0,161	80	0,555
150	0,136	100	0,344
200	0,124	150	0,183
		200	0,138

(o) - I valori sono stati desunti per $\xi \geq 10$ dal rif. bibl. (7), per $\xi < 10$ dal rif. bibl. (8).

(x) - Valori stimati.

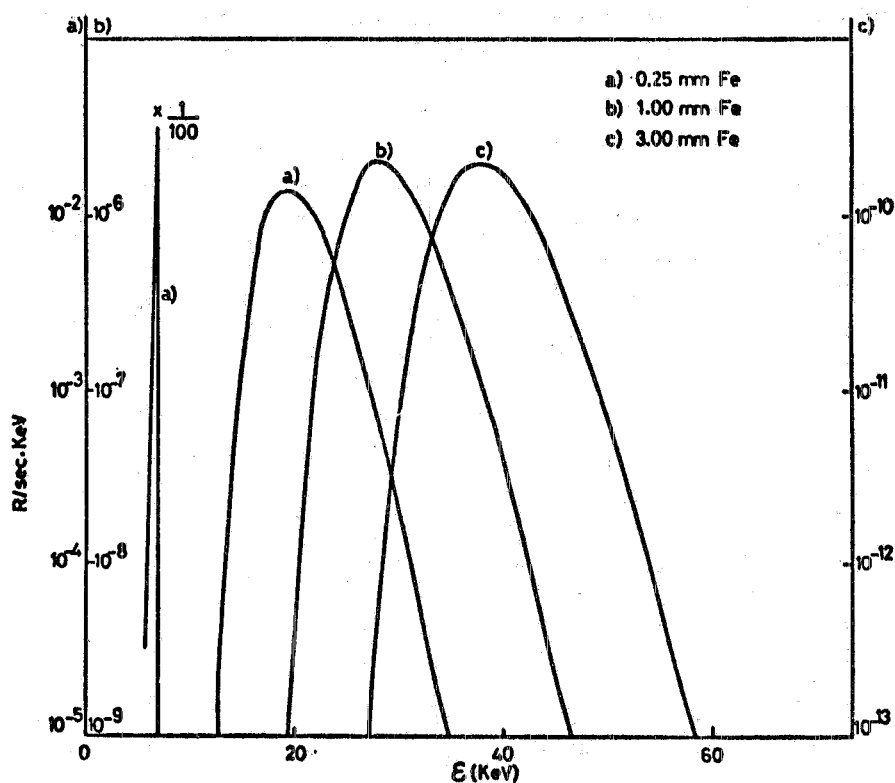


FIG. 2 - Intensità di esposizione per unità d'energia nel punto considerato, dovuta alla luce di sincrotrone dopo l'attraversamento di finestre di ferro di vari spessori.

Curve analoghe sono state ricavate per il quarzo, con spessori di 5, 10 e 15 mm. Ci limitiamo comunque a riportare in Tab. III i valori dell'intensità di dose, unitamente alla posizione del massimo delle curve (prescindendo dal picco di fuga a 7 keV) e all'intervallo di energie per cui $d\dot{X}/d\varepsilon$ si mantiene superiore all'1% del valor massimo.

Analoghi calcoli effettuati per elettroni circolanti da 1 GeV hanno portato ad intensità d'esposizione apprezzabili, da un punto di vista protezionistico, solo per le finestre di ferro da 0,25 mm ($\dot{X} \approx 5$ mR/h). In questo caso l'unico contributo significativo era quello dei fotoni di circa 7 keV.

CONSIDERAZIONI PROTEZIONISTICHE. -

Consideriamo ora i risultati dei calcoli di cui sopra da un punto di vista protezionistico. Osservando i valori riportati in Tab. III, risulta evidente che intorno ad Adone, o anelli di caratteristiche similari, possono sussistere rischi d'irradiazione non trascurabili solo in corrispondenza di finestre più sottili di 2-3 mm di ferro o spessori equivalenti di altri materiali. Naturalmente ci stiamo sempre riferendo alla sola luce di sincrotrone.

TABELLA III - Intensità di esposizione dopo finestre di vario tipo. Sono anche indicati l'energia per cui $d\dot{X}/d\varepsilon$ ha il massimo valore e l'intervallo in cui si mantiene superiore all'1% di esso.

Materiale finestra	Spessore (g/cm ²)	\dot{X} (R/sec)	ε_{\max} (keV)	Intervallo energie (keV)
Ferro	0,197	1,2 ($\varepsilon < 7,1$ keV)	--	--
		0,1 ($\varepsilon > 7,1$ keV)	19	14 - 31
		Totale: 1,3	--	--
	0,79	$1,65 \cdot 10^{-5}$	28	21 - 41
	2,36	$1,92 \cdot 10^{-9}$	38	29 - 52
Quarzo	1,1	1,6	17	12 - 27
	2,2	$5,0 \cdot 10^{-2}$	20	14 - 31
	3,3	$4,9 \cdot 10^{-3}$	23	16 - 34

Nel caso particolare di Adone le finestre più sottili montate in direzione tangenziale sono di acciaio inox da 3 mm e quindi sicuramente più che adeguate. Esistono, inoltre, uscite nel campo del visibile realizzate con finestre di quarzo da 10 mm, poste a 90° rispetto alla direzione della luce di sincrotrone, in modo da consentire l'uscita della luce deviata da un apposito specchio metallico in ferro posto a 45°.

Converrà perciò controllare che non vi sia alcun problema dovuto ai fotoni diffusi a 90°, per "scattering" coerente o incoerente, con energia praticamente immutata. La situazione è schematizzata in Fig. 3.

Supponendo che la diffusione avvenga isotropicamente e ad energia praticamente invariata, la fluenza energetica differenziale, dovuta a fotoni diffusi a 90° a una distanza $D=20$ cm dallo specchio, può essere espressa tramite la:

$$(5) \quad \frac{d\phi_W^*}{d\varepsilon} \simeq \frac{1}{2} (1 - e^{-2\mu T}) \frac{S}{4\pi D^2} f(\varepsilon) \frac{d\phi_W}{d\varepsilon}$$

dove S è l'area della sezione normale del fascio di luce di sincrotrone che incide sullo specchio (nel nostro caso $S \simeq 1$ cm²), $T/\sqrt{2}$ è lo spessore dello specchio, $f(\varepsilon)$ è la frazione dei fotoni di energia ε che subiscono una diffusione coerente o incoerente nel materiale dello specchio (pari a $(\sigma_R + \sigma_C)/\sigma$) ed è mostrata in Fig. 4, ed infine $d\phi_W/d\varepsilon$ è la fluenza energetica differenziale in corrispondenza dello specchio data dalla (4).

Sostituendo i valori appropriati ed approssimando $f(\varepsilon)$ con

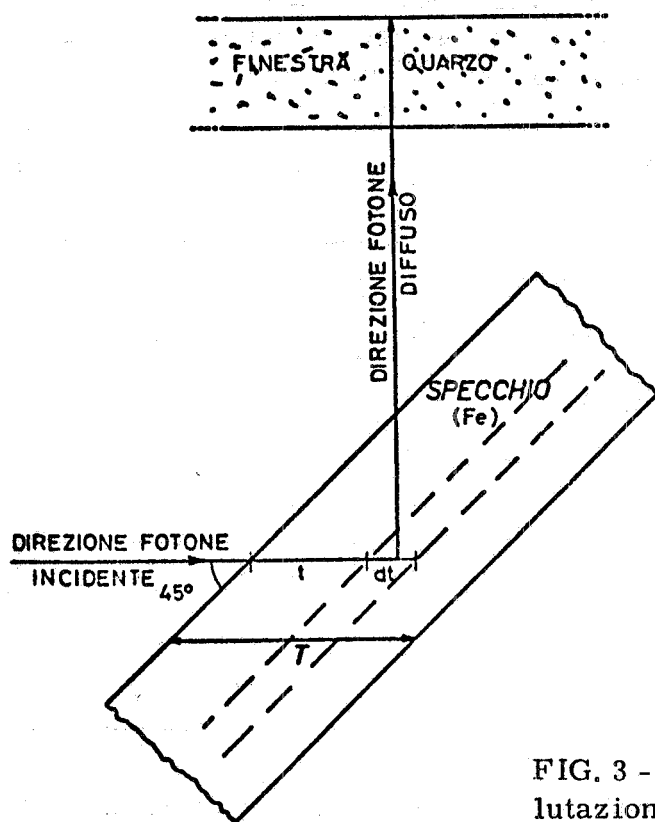


FIG. 3 - Situazione considerata per le valutazioni relative alle uscite di luce a 90° .

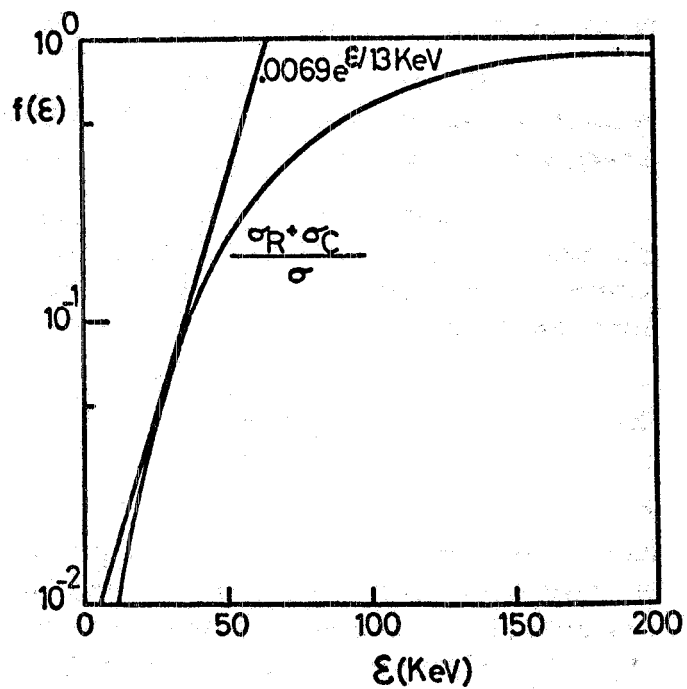


FIG. 4 - Percentuale dei fotoni incidenti che danno luogo nello specchio a fotoni diffusi per effetto Compton e scattering coerente.

$6,9 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(\epsilon/13 \text{ keV})$ per energie minori di 64 keV (vedi Fig. 4) e con 1 per energie superiori (si può valutare che nel nostro caso l'errore sui risultati finali è trascurabile), si ottiene:

$$(6) \quad \frac{d\phi^x}{d\epsilon} \simeq 4,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{y} e^{-0,88y} \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \text{keV}}$$

Si può ora sostituire la (6) al posto della (4) nel programma di calcolo e ricavare così l'intensità di dose all'esterno della finestra di quarzo a 20 cm dallo specchio. Si trova, con 1 cm di spessore, un'intensità di esposizione di circa 0,6 mR/h.

Resta così dimostrato che nessuna delle finestre attualmente montate su Adone è tale da dar luogo a rischi di radiazione apprezzabili. Il problema dovrebbe comunque essere tenuto presente qualora si intendesse montare finestre notevolmente più sottili, anche se tale eventualità appare abbastanza remota per le difficoltà tecniche connesse con i problemi di dissipazione dell'energia depositata su di esse dalla luce di sincrotrone (in tutto lo spettro).

TABELLA IV - Schede dati.

Scheda	Colonne	Contenuto	Formato	
1 2 3	1-80 1-80 1-80	} Valori dell'energia (in keV) per i quali nelle successive 3 schede saranno forniti i corrispondenti fattori di conversione flusso-esposizione (da 4 a 30 valori)	10F8.3 10F8.3 10F8.3	
4 5 6	1-80 1-80 1-80		} Corrispondenti valori del fattore di conversione in $J/cm^2 \cdot R$	10E8.3 10E8.3 10E8.3
7	1-8			Indicazione del materiale che sarà riportata in uscita
	11-28 29-80	Spessori (in g/cm^2) da considerare (fino a 3 valori in ordine di grandezza crescente) Commenti che saranno riportati in uscita		3F6.3 A52
8 9 10	1-8	} Energia ED (in keV) della riga d'assorbimento K del materiale (se superiore a 5 keV) Eventuali energie (in keV) $< ED$ per le quali nella scheda 11, stesse colonne, saranno forniti i valori di μ/ρ (4 valori) Energie $> ED$ (keV) per le quali nei corrispondenti posti nelle schede 11-13 saranno forniti i valori di μ/ρ (da 4 a 25 valori)	F8.3 4F8.3 5F8.3	
	9-40		4F8.3	
	41-80 1-80 1-80		10F8.3 10F8.3	
11 12 13	1-8 9-80 1-80 1-80	} Niente Valori di μ/ρ (in cm^2/g) relativi alle energie specificate nelle schede 8-10 (nelle stesse colonne)	-- 9F8.3 10F8.3 10F8.3	
14	1-20		Costanti per la (4'): A ($Watt/keV \cdot cm^2$) ed ϵ_c (keV)	2E10.4
	21-80		Commenti da riportare in uscita	A60
15	1-20		Limiti dell'intervallo d'energie considerato (keV)	2F10.4
	21-23	Numero delle parti in cui viene diviso tale intervallo	I3	
16	1	Variabile intera IBU che controlla eventuali calcoli successivi (vedi Tab. V)	I1	

APPENDICE. -

Uso del programma di calcolo. -

Il programma è molto semplice e calcola, per tre diversi spessori della finestra e nelle condizioni precisate nei paragrafi precedenti, le seguenti grandezze, nell'intervallo di energie 5-150 keV: la fluenza energetica differenziale in assenza di finestre e con gli spessori dati, la derivata rispetto a ξ dell'intensità di esposizione corrispondente, la fluenza di energia in assenza e in presenza di finestra e la relativa intensità di dose totale.

Come dati d'ingresso devono essere forniti tra l'altro: gli spessori da considerare (fino a 3), una tabella dei coefficienti di conversione flusso d'energia-esposizione, una tabella dei coefficienti d'attenuazione del materiale in funzione dell'energia come specificato, scheda per scheda, nelle Tab. IV e V.

In caso di diverse condizioni di geometria o di altri parametri di macchina si potranno cambiare i coefficienti numerici della (4) o, addirittura, introdurre una diversa espressione.

TABELLA V - Calcoli successivi.

Valore IBU	Descrizione operazione	Sono richieste altre schede del tipo:
0	si terminano i calcoli	nessuna
1	si ricomincia l'elaborazione con nuovi dati relativi a materiale e spessore delle finestre, nonché per un altro intervallo d'energie	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15.
2	si ripete l'elaborazione cambiando gli stessi dati di cui sopra, nonché le costanti che figurano nella (4')	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15.
3	si ripete l'elaborazione cambiando solo le costanti nella (4') e l'intervallo di energie	14, 15.
4	si ripete l'elaborazione per altri spessori dello stesso materiale e per altro intervallo d'energie	7, 15.
5	si ripete l'elaborazione per altro intervallo d'energie	15.

BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - M. Pelliccioni et M. Roccella, Contrôle de radiations auprès de l'anneau de stockage Adone de Frascati, Int. Congr. on Protection against Accelerator and Space Radiation, CERN, Geneva 1971, CERN 71-16 (1971).
- (2) - 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, CEAL-1057 (1972).
- (3) - C. Kunz, Perspectives of Synchrotron radiation - Report on a panel discussion, DESY SR-74/15 (1974).
- (4) - V. Montelatici, Useful formulae and calculated functions for the "luminous" electron, LNF-72/56 (1972).
- (5) - V. Montelatici, Calcoli numerici per la radiazione di sincrotrone: applicazione ad Adone, LNF-74/28(R) (1974).
- (6) - H. E. Johns, The physics of radiology (Charles C. Thomas Publ. , Springfield, 1961).
- (7) - H. Blätz, Editor in chief, Radiation hygiene handbook (McGraw Hill Book Comp. , New York, 1959).
- (8) - C. D. Hodgman, Editor in chief, Handbook of chemistry and physics, (The Chemical Rubber Publ. Co. Cleveland, 1961).