

**VALUTAZIONI DOSIMETRICHE RELATIVE ALL'ATTIVAZIONE
DELL'ARIA DURANTE IL FUNZIONAMENTO DELL'ACCELERATORE
LISA**

A. Esposito, M. Pelliccioni
INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, P.O. Box 13, 00044 – Frascati

E. D'Aurizio
Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria, Università degli Studi di Roma, La Sapienza

F. Desiato
ENEA-DISP, Via V. Brancati 48, 00142 Roma

A. Ferrari
INFN, LASA, Via Fratelli Cervi 201, 20090 Segrate (Milano)

1. – INTRODUZIONE

I principali problemi di radioprotezione posti dal funzionamento dell'acceleratore LISA sono stati esaminati in un precedente rapporto (Pe88). Tra questi, naturalmente, è stato considerato anche quello dell'attivazione dell'aria che, sebbene di non particolare entità, tuttavia rappresenta presumibilmente la più importante via attraverso la quale il funzionamento di un acceleratore di potenza potrebbe in qualche modo interessare l'ambiente esterno.

Una lista dei radionuclidi potenzialmente originabili nell'aria presente intorno a un acceleratore di elettroni, a causa degli intensi campi di radiazione gamma e neutronica che vi si possono produrre, è fornita nella tab. I insieme ad alcune delle loro principali caratteristiche.

I più importanti di essi sono emettitori di positroni di brevissima vita media prodotti attraverso reazioni (γ -n): O-15 ($T_{1/2}=123$ secondi); N-13 ($T_{1/2}=9.96$ minuti); C-11 ($T_{1/2}=20.34$ minuti). A questi si deve poi aggiungere l'Ar-41 ($T_{1/2}=1.83$ ore) originato tramite reazioni (n- γ) che, seppure meno abbondante, finisce per prevalere col passare del tempo dall'arresto del fascio per via della più lunga vita media.

Nel seguito verranno considerati soltanto i contributi dei principali radionuclidi di ciascuna delle due famiglie di reazioni (γ , n) e (n, γ) e cioè O-15, N-13 e Ar-41, il contributo degli altri potendosi considerare relativamente trascurabile.

A proposito del più importante dei radionuclidi trascurati nel calcolo, il C-11, si deve osservare che il C nell'atmosfera è dovuto al CO₂, presente nella misura di circa lo 0.03% per molecola d'aria, sicchè tenuto conto delle relative sezioni d'urto, ci si deve attendere una produzione di questo radionuclide inferiore a quella di O-15 e N-13 di almeno tre ordini di grandezza. Tale circostanza trova peraltro conferma anche nelle valutazioni in materia effettuate per l'acceleratore CEBAF (St87).

TABELLA I – Principali radionuclidi originabili per attivazione dell'aria intorno ad un acceleratore di elettroni (Dati tratti da IAEA79).

Nuclide genitore							
Nuclide	T _{1/2}	MPC (Bq·cm ⁻³)	Abbond.	Nuclide	Reazione	Soglia (MeV)	σ (µb·MeV ⁻¹)
H-3	12.62 a	74	1.562	N-14	(γ,H-3)	22.73	3
			0.424	O-16	(γ,H-3)	25.02	
C-11	20.34 min	0.011	1.5·10 ⁻⁴	C-12	(γ,n)	18.72	0.6
N-13	9.96 min	0.074	1.562	N-14	(γ,n)	10.55	310
O-15	123 s	0.074	0.424	O-16	(γ,n)	15.67	32
N-16	7.14 s	0.018	4.0·10 ⁻⁴	O-18	(γ,np)	21.81	0.01
Cl-38	37.29 min	0.074	4.6·10 ⁻³	Ar-40	(γ,np)	20.59	0.13
Cl-39	55.5 min	0.011	4.6·10 ⁻³	Ar-40	(γ,p)	12.52	0.86
Ar-41	1.83 ore	0.074	4.6·10 ⁻³	Ar-40	(n,γ)		

Tra i sistemi suggeriti per ridurre drasticamente l'attività rilasciata verso l'esterno merita far menzione dei circuiti chiusi di ventilazione dai quali l'aria viene espulsa soltanto dopo un opportuno ritardo rispetto all'arresto del fascio. Trattandosi di sistemi costosi ci si è però spesso posti la domanda se sia effettivamente necessario ricorrere a tali accorgimenti nel caso degli acceleratori più modesti.

In letteratura si trovano valutazioni assai tranquillizzanti in ordine alle dosi prodotte dai gas in parola. A titolo d'esempio si cita che al CERN è stato giudicato del tutto accettabile un rilascio continuo fino a 3·10⁴ Ci/s (circa 7000 Ci/anno), in quanto responsabile di un rateo di equivalente di dose medio inferiore a 0.3 mSv/anno a 100 metri di distanza dal punto di rilascio (Su 82).

2 – IL CALCOLO DELL'ATTIVITA' RILASCIATA

L'impianto di ventilazione della sala dell'acceleratore LISA funzionerà assicurando 0.1 ricambi/ora durante il funzionamento della macchina per poi salire a 6 ricambi/ora a partire dall'arresto del fascio. Le argomentazioni che hanno portato a questa scelta sono illustrate nel già citato rapporto interno (Pe88).

Poichè l'obbiettivo primario delle valutazioni protezionistiche è la stima della massima potenziale pericolosità dell'impianto, il calcolo dell'attività prodotta durante il funzionamento e quindi rilasciata nelle sopra riportate prescelte condizioni di ventilazione è stato effettuato sotto ipotesi fortemente peggiorative.

Si è in primo luogo considerato l'acceleratore sempre funzionante alla massima energia prevista (73 MeV) e alla massima potenza possibile (9.49 kW), supponendo pessimisticamente la perdita di un terzo del fascio sistematicamente per l'intero orario di lavoro (3000 ore/anno) su un bersaglio di piombo di 1 cm di spessore. I restanti 2/3 del fascio sono stati assunti finire nel pozzo di spegnimento senza dare alcun contributo all'attivazione dell'aria.

Lo spettro dei fotoni emergenti dal bersaglio di piombo di cui sopra è stato ricavato con il codice EGS ed è riportato nella Fig. 1.

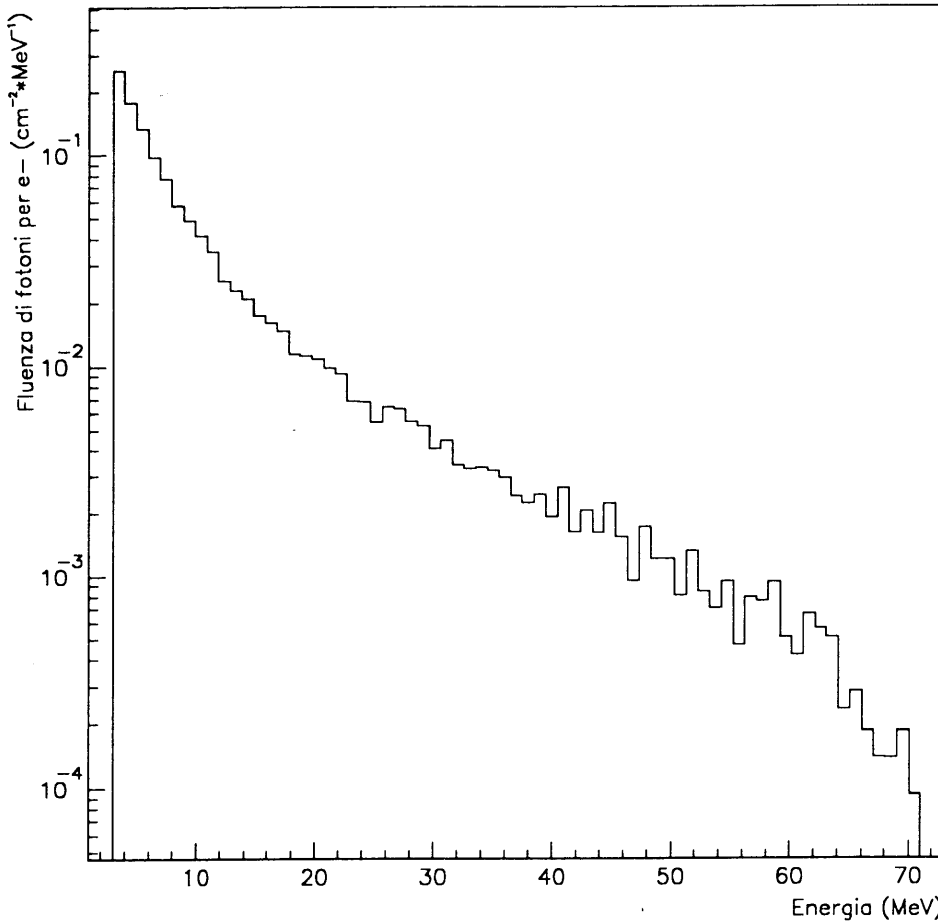


FIG. 1 – Spettro dei fotoni emergenti da un bersaglio di piombo di 1 cm di spessore investito da un fascio di elettroni da 73 MeV.

Le sezioni d'urto usate per le reazioni $^{14}\text{N}(\gamma,n)$ e $^{16}\text{O}(\gamma,n)$ sono state riprese da Ko82, ove sono date in funzione dell'energia.

Per quanto riguarda i neutroni, si è assunta una produzione corrispondente a $10^{12} \text{ ns}^{-1}\text{kW}^{-1}$ con distribuzione angolare isotropa, appropriata per un bersaglio di piombo di spessore ottimale (IAEA79, Fa84).

La fluenza dei neutroni termici presenti è stata ricavata dall'intensità della sorgente di neutroni (Y) mediante la relazione (Mo58, Pa73):

$$\phi_{\text{th}} = 1.25 \times 4\pi \frac{\langle Y \rangle}{S} \quad (1)$$

dove con S si è indicata la superficie del locale di interesse.

La sezione d'urto per la reazione $^{41}\text{Ar}(n,\gamma)$ è stata assunta pari a 630 mb.

Sono stati presi in considerazione due diversi cicli di funzionamento, rispettivamente di 1 ora e 5 ore, intervallati del tempo necessario per scaricare tutti i gas prodotti. Si tratta certamente di situazioni assai severe, in considerazione delle brevi vite medie dei principali gas coinvolti, che in un'ora già praticamente raggiungono le condizioni di saturazione.

Il calcolo è stato condotto usando il modello adottato per analoghe stime per il ciclotrone di Milano (Bi84), secondo il quale, indicato con t il generico tempo di irraggiamento, la corrispondente attività espulsa $A(t)$ per un radionuclide di costante di decadimento λ è data da:

$$A(t) = \frac{m_{\text{OFF}} \langle a_s \rangle V}{\lambda + m_{\text{OFF}}} \left\{ 1 - \exp [- (\lambda + m_{\text{ON}}) t] \right\} + m_{\text{ON}} \langle a_s \rangle V \left\{ t - \frac{1 - \exp [- (\lambda + m_{\text{ON}}) t]}{\lambda + m_{\text{ON}}} \right\} \quad (2)$$

dove m_{ON} e m_{OFF} sono i ricambi orari effettuati rispettivamente durante e dopo il funzionamento, a_s è l'attività a saturazione e V il volume della sala dell'acceleratore.

L'attività a saturazione per unità di volume a_s è a sua volta data da:

$$a_s = \sigma \rho f \frac{N_A}{P_A} \Phi \frac{\lambda}{\lambda + m} \quad (3)$$

dove σ è la sezione d'urto per la reazione considerata, ρ la densità dell'elemento bersaglio, f la relativa frazione isotopica, P_A il suo peso atomico, N_A il numero di Avogadro, Φ la fluenza di particelle incidenti, λ la costante di decadimento e m il numero di ricambi orari.

I risultati ottenuti sono riportati nelle prime tre colonne della Tabella II.

TABELLA II – Attività scaricata annualmente in varie condizioni di funzionamento dell'acceleratore.

Radionuclide	In cicli di 1 ora a 73 MeV e 9.49 kW (MBq/anno)	In cicli di 5 ore a 73 MeV e 9.49 kW (MBq/anno)	In cicli di 1 ora a 25 MeV e 9.49 kW (MBq/anno)
N-13	$1.14 \cdot 10^7$	$3.7 \cdot 10^6$	$1.22 \cdot 10^6$
O-15	$2.77 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^6$	$1.12 \cdot 10^5$
A-41	$0.93 \cdot 10^5$	$5.7 \cdot 10^4$	$3.18 \cdot 10^4$

Conviene a questo punto soffermarsi brevemente sulle cautele introdotte nel calcolo per meglio chiarire come in realtà le attività che verranno effettivamente scaricate sono attese assai inferiori a quelle così valutate.

In primo luogo assai difficilmente la macchina lavorerà a 73 MeV e alla massima potenza. Almeno inizialmente si prevede di lavorare a 25 MeV e con una potenza che non potrà eccedere i 3.25 kW. In queste condizioni l'attività espulsa risulterà, a parità di condizioni di ventilazione e di ipotesi sulle perdite, circa un ordine di grandezza inferiore, come mostrato nell'ultima colonna della Tabella II.

L'ipotesi di una perdita erratica di 1/3 della potenza del fascio su un bersaglio di piombo spesso 1 cm e direttamente situato in aria per l'intero orario di lavoro deve pure ritenersi assai pessimistica. Per il funzionamento della macchina una perdita di tale entità non potrebbe infatti

essere sicuramente sopportata nei tratti lineari per la presenza delle cavità superconduttrici. Se peraltro essa si verificasse nelle zone di ricircolo, ove trovano alloggio i magneti, si dovrebbe considerare che gran parte della radiazione prodotta verrebbe assorbita da questi piuttosto che finire in aria.

Se più realisticamente si fosse ipotizzata la perdita localizzata sulla guida dell'acceleratore, assimilabile a un bersaglio di ferro dell'ordine di 3 mm di spessore, le attività scaricate sarebbero risultate, a 73 MeV, circa 4 volte minori di quelle riportate nella tabella.

Malgrado le brevi vite medie in gioco, si è inoltre sempre trascurato il decadimento fisico dei radionuclidi durante il trasporto nei condotti dell'impianto di ventilazione.

Si devono pertanto considerare le attività riportate nella tab.II come valutazioni assai pessimistiche di quelle reali che verranno effettivamente espulse.

3. – VALUTAZIONI DOSIMETRICHE PRELIMINARI

Per una valutazione preliminare della eventuale pericolosità degli scarichi sopra riportati, si è proceduto alla stima delle dosi a varie distanze dall'impianto, applicando, anche in questo caso, il modello utilizzato per il ciclotrone di Milano e descritto nel primo già citato rapporto (Bi84).

Si tratta di un modello basato su poche ipotesi iniziali assai generali che, prescindendo da un puntuale studio della diluizione e della dispersione in atmosfera degli inquinanti radioattivi, consente di ricavare, in virtù delle numerose approssimazioni per eccesso introdotte, un estremo superiore delle possibili dosi ricevute.

Le più significative delle suddette approssimazioni per eccesso riguardano: l'aver considerato il punto nel quale si valuta la dose sempre all'interno del pennacchio quando il vento spirava in quella direzione; l'aver assunto l'ampiezza del pennacchio pari a quella degli otto settori in cui è stato suddiviso l'angolo giro con centro nel punto (camino) di emissione dei gas; l'aver assunto la velocità del vento, che si è supposto spirare con egual probabilità in tutte le direzioni, assai modesta (1 m/s) così implicando una minore diluizione degli elementi inquinanti immessi in atmosfera; il non aver considerato il decadimento radioattivo, tutt'altro che trascurabile per i radionuclidi di interesse in questa sede.

Nessuna ipotesi è stata fatta sull'altezza del camino, in quanto irrilevante, visto che quando il vento spirava in una certa direzione tutti i punti in quella direzione vengono considerati direttamente investiti dal pennacchio.

I risultati così ottenuti, disaggregati nei contributi dovuti ai raggi β e γ , sono riportati nella Tabella III per le stesse situazioni rappresentate nella Tabella II.

E' a questo punto opportuno confrontare le sopra menzionate ipotesi di calcolo con le condizioni meteorologiche proprie del sito di Frascati e verificare così la cautela delle conclusioni cui si è pervenuti.

TABELLA III – Equivalenti di dose annuali a varie distanze dal punto di scarico per diverse condizioni di funzionamento dell'acceleratore.

Distanza dal punto di scarico (m)	Per cicli di 1 ora a 73 MeV e 9.49 kW (mSv/a)		Per cicli di 5 ore a 73 MeV e 9.49 (mSv/a)		Per cicli di 1 ora a 25 MeV e 3.25 kW (mSv/a)	
	Dose γ	Dose β	Dose γ	Dose β	Dose γ	Dose β
20	0.124	0.348	0.043	0.124	$1.9 \cdot 10^{-2}$	$3.18 \cdot 10^{-2}$
50	0.062	0.087	0.022	0.031	$5.96 \cdot 10^{-3}$	$7.96 \cdot 10^{-3}$
100	0.031	0.022	0.011	0.008	$2.98 \cdot 10^{-3}$	$1.99 \cdot 10^{-3}$
150	0.021	0.009	0.007	0.003	$1.99 \cdot 10^{-3}$	$8.84 \cdot 10^{-4}$
200	0.015	0.005	0.005	0.002	$1.49 \cdot 10^{-3}$	$4.98 \cdot 10^{-4}$
300	0.011	0.002	0.003	0.001	$9.94 \cdot 10^{-4}$	$2.21 \cdot 10^{-4}$
400	0.007	0.001	<0.003	<0.001	$7.45 \cdot 10^{-4}$	$1.24 \cdot 10^{-4}$

Per effettuare il confronto, le condizioni meteorologiche del sito di Frascati sono state identificate con quelle descritte nelle tavole del Servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare relative all'aeroporto di Ciampino, distante circa 6 km in linea d'aria (AM239). Si è reso però necessario aggregare i dati in modo da avere 8 settori, come nel calcolo, anziché i 16 delle sopra menzionate tavole, per ciascuna delle 6 tradizionali categorie di stabilità atmosferica. Le frequenze relative ai venti variabili e a quelli di velocità inferiore a 1 nodo sono state poi ridistribuite, non senza qualche arbitrarietà, su tutti gli otto settori considerati: tale operazione sembra peraltro giustificata in quanto per i venti variabili sembra la più naturale e per quelli di bassa velocità ampiamente probabile. Ciascuna frequenza è stata poi pesata con la frequenza con cui si verificano le 6 categorie di stabilità e la somma delle "frequenze pesate" è riportata per ogni settore nella Fig. 2. Si può così verificare la bontà dell'ipotesi di isotropia della direzione dei venti assunta nel calcolo. Le differenze dall'ideale valore medio di una distribuzione isotropa risultano infatti al più del 38%.

Per quanto riguarda la distribuzione delle velocità dei venti, sempre dal sopra citato rapporto dell'Aeronautica Militare, si può dedurre il quadro mostrato nella Tabella IV. Pur senza pesare la distribuzione con la frequenza con cui ciascuna categoria di stabilità si presenta, appare evidente che la frequenza dei venti con velocità maggiore di 1 m/s non è affatto trascurabile. L'aver nel calcolo sempre assunto questa velocità costituisce quindi, dal punto di vista dosimetrico, una reale approssimazione per eccesso, in quanto la diluizione attesa sul sito di Frascati deve ritenersi abitualmente maggiore di quella così considerata.

La conservatività delle altre ipotesi assunte è del tutto generale e non richiede quindi alcuna più puntuale considerazione.

Ci si deve in particolare attendere che i valori delle dosi beta calcolate a piccole distanze dal cammino siano esageratamente elevati, in quanto trattasi di punti ove è del tutto irrealistico supporre di poter essere investiti dal pennacchio al suolo.

L'aver trascurato il decadimento radioattivo contribuisce infine a un generale, seppur non rilevante, aumento delle dosi, almeno alle distanze più elevate.

Le dosi riportate nella Tabella III rappresentano quindi delle stime sicuramente per eccesso delle dosi effettive e sono state accolte soltanto perchè rappresentano comunque una modesta frazione dei limiti raccomandati.

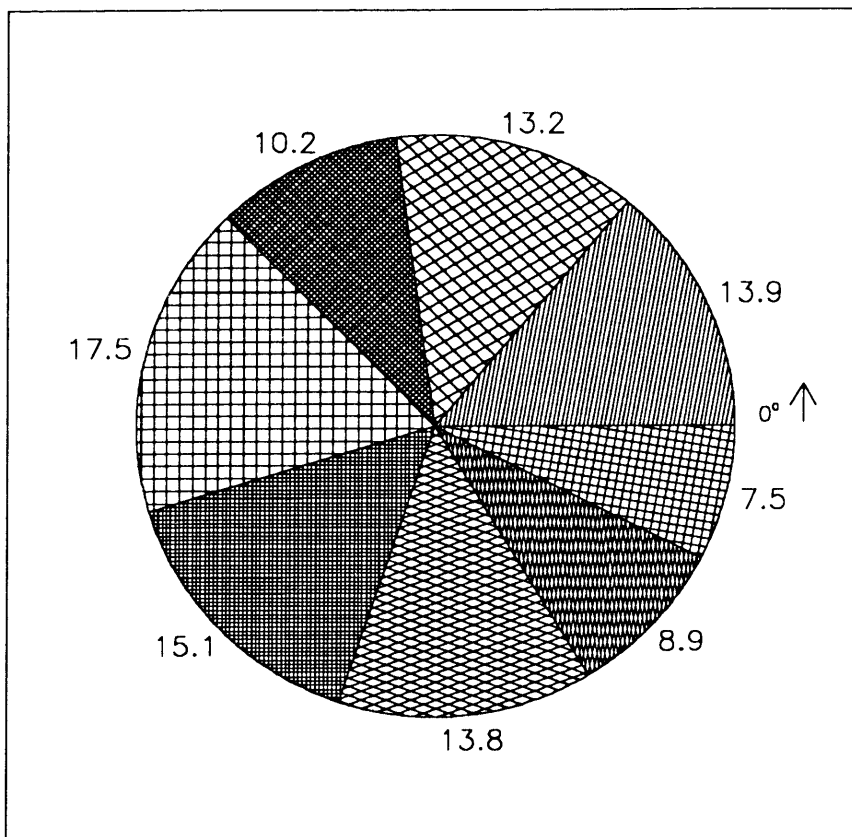


FIG. 2 – Distribuzione percentuale della direzione dei venti negli 8 settori da 45° ciascuno assunti nel calcolo, sulla base dei dati della stazione meteorologica dell'Aeronautica Militare per l'aeroporto di Ciampino.

TABELLA IV – Distribuzione delle frequenze (per mille) delle velocità del vento.

	A	B	C	E	D	F+G
<1 nodo	638.10	481.05	–	205.28	–	691.40
2–4 nodi	232.04	203.39	103.64	85.88	93.13	217.95
5–7 nodi	129.86	228.96	345.24	140.27	698.93	90.64
8–12 nodi	–	86.60	464.10	317.64	207.94	–
13–23 nodi	–	–	84.54	223.52	–	–
24–99 nodi	–	–	2.48	27.00	–	–

4. – NUOVE VALUTAZIONI DOSIMETRICHE

Sebbene i dati dosimetrici presentati nella Tabella III siano del tutto accettabili, specie se letti alla luce delle approssimazioni per eccesso introdotte nel loro calcolo, in considerazione dell'esasperata sensibilità dei lavoratori e del pubblico nei confronti delle radiazioni ionizzanti, si è ritenuto opportuno procedere a nuove valutazioni basate su un più realistico, ma pur sempre conservativo, modello di trasporto degli inquinanti nell'atmosfera.

Allo scopo si è adottato un modello di tipo climatologico, nel quale si è fatto uso degli stessi dati meteorologici provenienti dalla stazione dell'Aviazione Militare di Ciampino sopra menzionati (AM239).

I processi fisici dei quali si è tenuto conto sono la dispersione dovuta alla diffusione turbolenta e il decadimento radioattivo dei radionuclidi espulsi nell'atmosfera.

Non sono state prese in considerazione nè la deposizione a secco sul terreno nè la deposizione umida dovuta a piogge a causa dei brevi tempi di dimezzamento dei radionuclidi in gioco e della loro natura gassosa. Non è stata considerata nemmeno la maggior diluizione dovuta alla presenza di edifici, a tutto vantaggio della sicurezza.

L'innalzamento termodinamico del pennacchio è stato considerato trascurabile, non differendo apprezzabilmente la temperatura dei gas all'uscita del camino dalla temperatura atmosferica, così come il sopraelevamento del pennacchio dovuto alla quantità di moto dei gas all'uscita dal camino, situato ad una quota di 10 metri sul livello del suolo.

Il modello più largamente usato per la stima delle concentrazioni in aria in condizioni meteorologiche stazionarie e su aree a orografia non complessa è il modello gaussiano, secondo il quale il pennacchio diffonde sia lateralmente che verticalmente con una distribuzione di tipo appunto gaussiano. Per un rilascio con rateo costante, supponendo costanti la stabilità atmosferica, la direzione e la velocità del vento, la concentrazione $C(x, y, z)$ nel generico punto di coordinate x, y, z è data da (IAEA82):

$$C(x, y, z) = \frac{\dot{Q}}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (4)$$

dove $C(x, y, z)$ è espressa in Bq/m^3 e l'origine delle coordinate si intende situata nel punto a quota zero al di sotto del camino; x è la coordinata nella direzione del vento (m); y quella ad essa ortogonale (m); z l'altezza sul livello del suolo (m); \dot{Q} il rateo di rilascio costante (Bq/s); u la velocità del vento (m/s); σ_y e σ_z sono parametri di diffusione funzioni di x e della stabilità atmosferica; h è l'altezza a cui avviene il rilascio.

Per ottenere la concentrazione al livello del suolo basta porre $z=0$ nell'eq. (4), ottenendo:

$$C = \frac{\dot{Q}}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (5)$$

Integrando tale espressione nell'intervallo di tempo in cui si possono ritenere costanti le condizioni meteorologiche e in cui viene rilasciata l'attività \dot{Q} si ottiene al livello del suolo e sull'asse di diffusione ($y = 0$) per unità di attività rilasciata:

$$\frac{C}{\dot{Q}} = \frac{1}{\dot{Q}} \int_{\Delta t} C dt = \frac{1}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (6)$$

L' eq. (6) si presta per calcolare la concentrazione integrata nel tempo sull'asse di trasporto del pennacchio come risultato di una emissione costante durante la quale i parametri di diffusione siano rimasti invariati.

Per ottenere la distribuzione spaziale delle concentrazioni medie annuali devono essere considerate le frequenze delle situazioni meteorologiche, definite dalla categoria di stabilità atmosferica, dal settore di provenienza e dalla classe di velocità del vento.

Per tutte le categorie di stabilità, di settore di provenienza del vento e per ogni classe di velocità è stata considerata l'equazione che fornisce il valore di C/\dot{Q} . La somma ponderata di tutti i contributi fornisce la concentrazione media annua in un certo settore p per rateo di rilascio unitario ed è data da (IAEA82):

$$\left(\frac{C}{\dot{Q}} \right) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{N}{2\pi x} \sum_{j=1}^M \frac{\exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_{zj}^2}\right)}{\sigma_{zj}} \sum_{k=1}^K \frac{P_{p,jk}}{u_{jk}} \quad (7)$$

dove N è il numero dei settori di provenienza del vento, $p_{p,jk}$ la frequenza della direzione del vento nel settore p per la categoria di diffusione j e per la velocità di classe k ; K è il numero delle classi della velocità del vento; M è il numero delle categorie di diffusione e u_{jk} è la velocità del vento per la categoria di dispersione j e per la classe di velocità k .

Rispetto alle eq. (5) e (6), in cui la dispersione laterale è di tipo gaussiano, nell'eq. (7) viene considerata, per ciascun settore, una distribuzione laterale uniforme sull'ampiezza del settore stesso, pari a $2\pi x/N$. Ciò è conveniente e opportuno nei modelli di tipo climatologico, in cui si è interessati alle concentrazioni medie sul lungo periodo e i dati anemologici sono aggregati per settore di provenienza del vento.

I coefficienti di dispersione verticale utilizzati sono quelli tradizionali (IAEA82).

Per tener conto della diminuzione di concentrazione dovuta al decadimento radioattivo, il rateo di attività rilasciata \dot{Q} deve essere sostituito con $\dot{Q} \cdot e^{-\lambda x/u}$, λ essendo la costante di decadimento del radionuclide considerato e x/u il tempo trascorso dall'immissione del radionuclide nell'atmosfera.

Quando la nube è sufficientemente dispersa nella direzione verticale, condizione che si verifica allorchè $\sigma_z > h_m(2/\pi)^{0.5}$, avendo indicato con h_m l'altezza dello strato di rimescolamento, si può assumere che la distribuzione verticale delle concentrazioni da gaussiana si appiattisca fino a diventare praticamente costante e inversamente proporzionale ad h_m . In luogo dell'eq. (4) si può scrivere allora (S168):

$$C = \frac{\dot{Q}}{u h_m \frac{\pi x}{8}} \quad (8)$$

Le frequenze relative alle situazioni di vento debole di direzione variabile sono state attribuite ai diversi settori con la stessa distribuzione delle frequenze della prima classe di velocità; inoltre, per questi casi è stato considerato, per l'applicazione dell'eq. (7), un valore della velocità del vento di 1 m/s.

Il calcolo delle concentrazioni è stato eseguito avvalendosi del codice di calcolo AQUILA (Air quality inferred from long term averaged meteorological data) dell'ENEA-DISP, derivato da un modello già applicato per valutazioni di impatto ambientale relative ai rilasci in atmosfera da impianti convenzionali (De86, ENEA87a, ENEA87b).

Il programma calcola automaticamente, sulla base dei dati meteorologici del sito di Ciampino, le concentrazioni per settori circolari centrati sul camino a 20 diverse distanze e in ognuna delle sedici direzioni in cui è stato suddiviso l'angolo giro, nel caso di un effluente radioattivo emesso con un rateo costante di 1 Bq/s per tutto l'anno. Per ciascuna distanza viene individuato il settore dove si ottiene la concentrazione massima, che è poi quella usata cautelativamente per le valutazioni dosimetriche.

L'equivalente di dose ricevuto in un anno nell'organo o tessuto considerato, espresso in Sv/a, è quindi dato da:

$$H = C_{\max} f_{\text{conv}} A \quad (9)$$

dove C_{\max} rappresenta appunto il valore massimo della concentrazione di attività per unità di volume e per unità di rateo di emissione alla distanza di interesse, ricavata con le modalità sopra illustrate, A (Bq/s) il rateo di attività con cui viene scaricato il radionuclide in esame e f_{conv} ($\text{Sv a}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$) il coefficiente di conversione per passare a unità dosimetriche.

I valori di f_{conv} per i radionuclidi di maggior interesse adottati in questo calcolo sono riportati nella Tabella V.

TABELLA V – Valori usati per f_{conv} ($\text{Sv a}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$).

Radionucl.	Dose γ al corpo intero	Dose γ alla pelle	Dose β	Bibl.
O-15	$1.97 \cdot 10^{-6}$	$2.15 \cdot 10^{-6}$	$1.40 \cdot 10^{-6}$	Pi85
N-13	$2.00 \cdot 10^{-6}$	$2.15 \cdot 10^{-6}$	$8.87 \cdot 10^{-7}$	Pi85
Ar-41	$2.04 \cdot 10^{-6}$	$2.36 \cdot 10^{-6}$	$1.21 \cdot 10^{-6}$	Ko79

Usando per A i ratei ottenibili ripartendo su base annuale le attività scaricate, come previste nella Tabella II, si trovano così i risultati mostrati nella Tabella VI.

In considerazione delle ipotesi cautelative introdotte nel loro calcolo, anche questi risultati finiscono per rappresentare un'approssimazione ancora per eccesso della situazione reale. L'aspetto più interessante riguarda tuttavia l'atteso ridimensionamento delle dosi beta in prossimità del camino.

Per chiarezza di confronto, i risultati ottenuti con i due diversi modelli sono riportati nelle Figg. 3 e 4, per cicli di funzionamento della macchina di un'ora rispettivamente a 73 MeV e a 25 MeV.

A parte le sopra menzionate differenze nelle dosi beta in prossimità del camino, per il resto si evidenzia un sostanziale accordo tra le previsioni dei due diversi modelli, specialmente in ordine alla valutazione delle dosi da fotoni.

TABELLA VI – Valori degli equivalenti di dose annuali a varie distanze dal punto di scarico per diverse condizioni di funzionamento dell'acceleratore, secondo i risultati del nuovo calcolo.

Distanza dal punto di scarico (m)	Per cicli di 1 ora a 73 MeV e 9.49 kW (mSv/a)		Per cicli di 5 ore a 73 MeV e 9.49 kW (mSv/a)		Per cicli di 1 ora a 25 MeV e 3.25 kW (mSv/a)	
	Dose γ	Dose β	Dose γ	Dose β	Dose γ	Dose β
20	0.150	0.072	0.052	0.0261	0.0147	0.0067
50	0.085	0.042	0.030	0.0154	0.0085	0.0040
100	0.042	0.020	0.015	0.0075	0.0042	0.0020
150	0.027	0.012	0.009	0.0045	0.0027	0.0012
200	0.017	0.007	0.006	0.0031	0.0017	0.0007
300	0.010	0.005	0.003	0.0017	0.0010	0.0005
400	0.005	0.002	0.002	0.0010	0.0005	0.0002

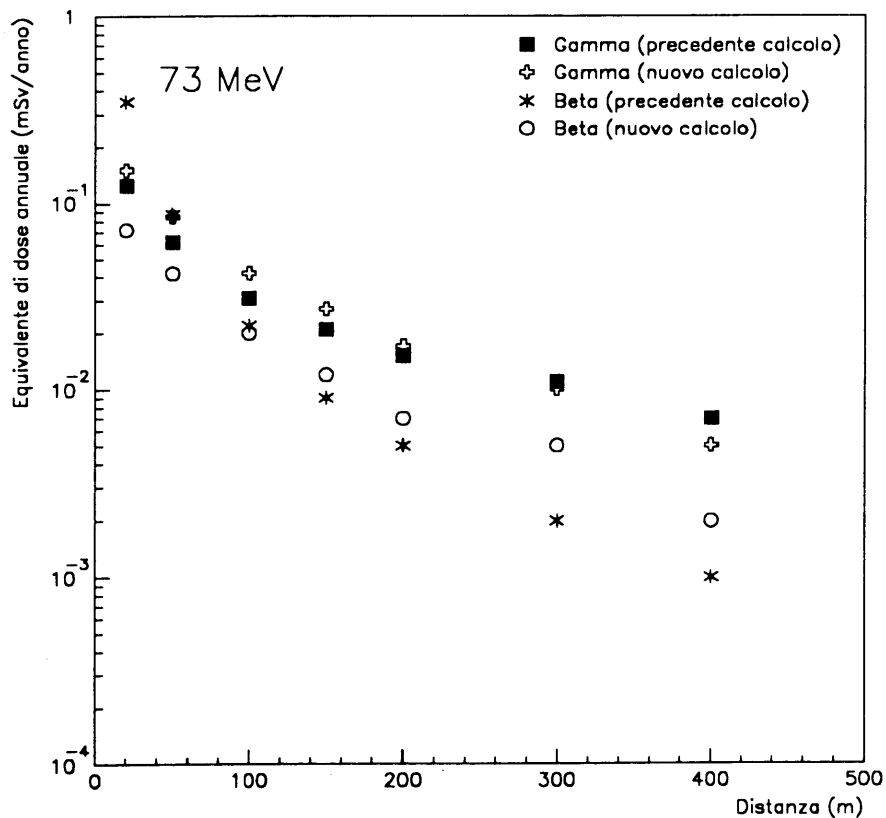


FIG. 3 – Confronto tra i risultati ottenuti con i due metodi di calcolo nel caso di cicli di funzionamento della macchina di 1 ora a 73 MeV.

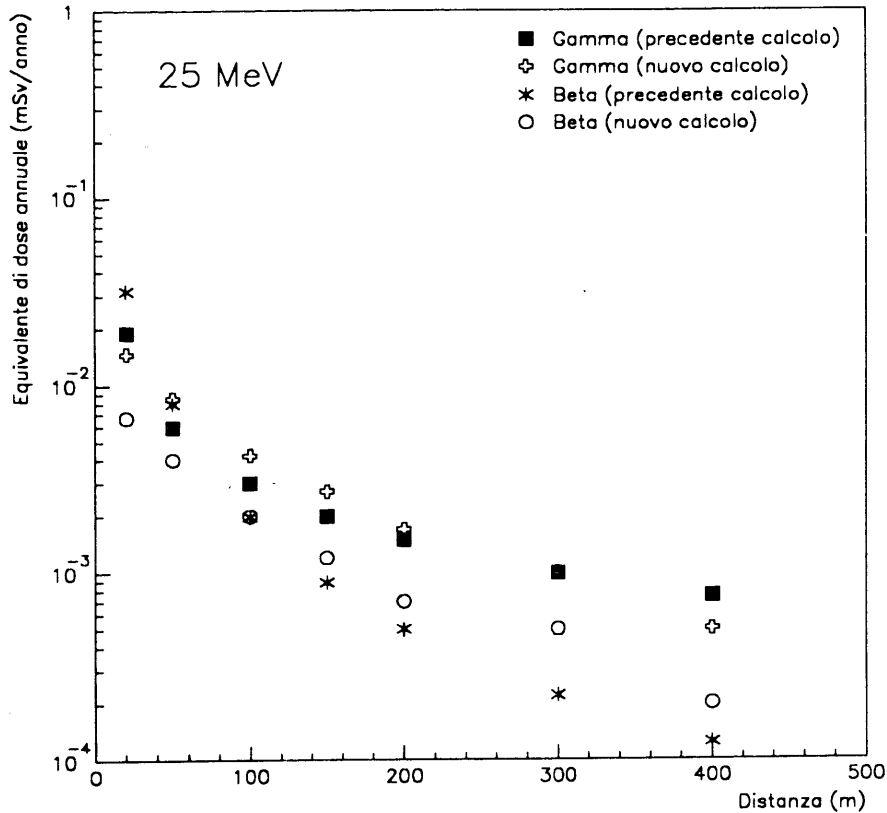


FIG. 4 – Confronto tra i risultati ottenuti con i due metodi di calcolo nel caso di cicli di funzionamento della macchina di 1 ora a 25 MeV.

5. - CONCLUSIONI

Qualunque sia il modello di calcolo adottato, nelle condizioni di ventilazione prescelte per il funzionamento, gli equivalenti di dose attribuibili al rilascio di effluenti radioattivi da parte dell'acceleratore LISA risultano sempre assai modesti. Detti valori costituiscono peraltro una valutazione ancora assai pessimistica delle dosi in gioco, non solo per le varie ipotesi cautelative introdotte nei calcoli, ma soprattutto perchè le attività effettivamente originate in aria durante il funzionamento dell'impianto dovranno essere drasticamente ridotte per non disturbare il funzionamento delle cavità superconduttrici.

Se si tiene poi conto che la macchina lavorerà per il momento a 25 MeV, si può concludere che il contributo dei gas radioattivi espulsi agli equivalenti di dose ricevuti dai lavoratori e da eventuali membri del pubblico risulterà sicuramente del tutto irrilevante.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AM239 Roma Ciampino, Stazione Meteorologica A.M. 239, lat.41 48 Long. 12 35
Alt.129 m.
- Bi 84 C. Birattari, M. Bonardi, A. Ferrari, M. Silari, Il progetto ciclotrone per usi
biomedici di Milano: valutazioni sulla attivazione indotta nell'aria, INFN/TC-
84/29, 1984.
- De 86 F. Desiato, M. Pellegrino, Modello previsionale di dispersione in atmosfera di
sostanze rilasciate da impianti convenzionali, ENEA 1986.
- ENEA 87a ENEA-DISP, Valutazione della compatibilità ambientale della Centrale ENEL di
Tavazzano-Montanaso, Doc. DISP (87)4, 1987.
- ENEA 87b ENEA-DISP, Valutazione della compatibilità ambientale della Centrale ENEL di
Brindisi Sud, Doc. DISP (87)7, 1987.
- Fa 84 A. Fasso', K. Goebel, M. Hoefert, H. Schoenbacher, G.R. Stevenson, A.H.
Sullivan, W.P. Swansson, J.W.N. Tuyn, Radiation problems in the design of the
large electron-positron collider (LEP), CERN 84-02, 1984.
- IAEA 79 International Atomic Energy Agency, IAEA, Radiological safety aspects of the
operation of electron linear accelerators, Technical Reports Series No. 188 , 1979.
- IAEA 82 International Atomic Energy Agency, Generic models and parameters for assessing
the environmental transfer of radionuclides from routine releases, IAEA Safety
Series n.57,1982.
- Ko 80 D.C. Kocher, Dose-rate conversion factor for external exposure to photon and
electron radiation from radionuclides occurring in routine releases from nuclear fuel
cycle facilities, Health Physics, 38, 543, 1980.
- Ko 82 T. Kosako and T. Nakamura, Air activation by an electron accelerator, Health
Physics, 43, 3, 1982.
- Mo 58 B.J. Moyer, Shielding and radiation calculation for USNRDL cyclotron, design
calculation for preliminary engineering report, B1.102-B1.128, 1958.
- Pa 73 H.W. Patterson and R.H. Thomas, Accelerator health physics, New York:
Academic Press, 1973.
- Pe 88 M. Pelliccioni, Radiation protection problems in the design of the LISA project,
Nota Interna LNF-88/25(R).
- Pi 85 H.V. Piltingsrud and G.L. Gels, An evaluation of external radiation exposure
dosimetry and calculation of maximum permissible concentration values for
airborne materials containing ^{18}F , ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C and ^{133}Xe , Health Physics, 49,
805, 1985.
- Sl 68 D. H. Slade Editor, Meteorology and atomic energy, U.S. Atomic Energy
Commission, 1968.
- Su 82 A. H. Sullivan, Criteria for assessing the release of radioactive air from
accelerators, HS-RP/IR/82-26, 1982.
- St 87 G. Stapleton, Air activation at CEBAF, TN-0057-1987.