

# SCHERMATURE

- Particelle cariche
- Fotoni
- Neutroni

(Polvani p 363 e segg)

# **PARTICELLE CARICHE**

# PARTICELLE CARICHE

- Perdita di energia praticamente continua per collisioni: si può definire una profondità di penetrazione (range)
- Necessaria schermatura di spessore maggiore del range
- Necessario tenere conto di eventuale radiazione secondaria penetrante

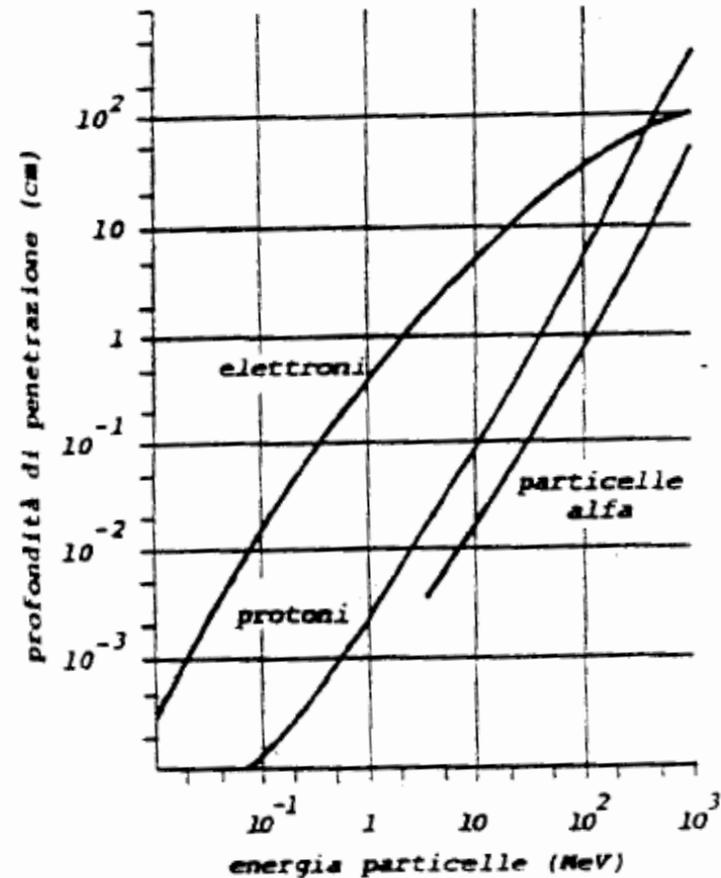
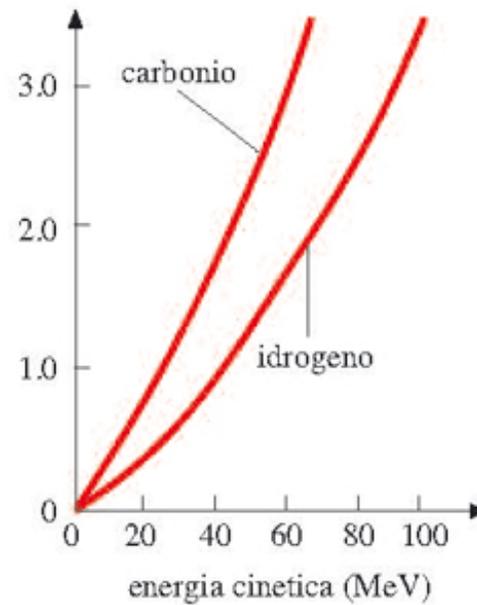


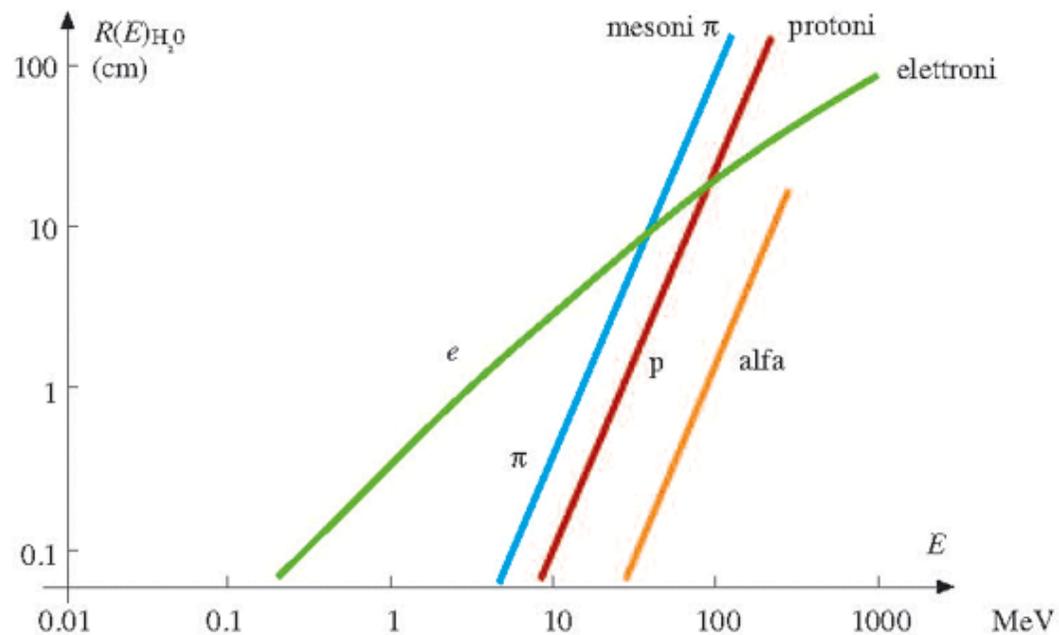
Figura 1. Profondità di penetrazione in acqua di elettroni, protoni e particelle alfa (densità  $1 \text{ g/cm}^3$ ).

range  $\times$  densità  
(g cm<sup>-2</sup>)



**Figura 21.3**

Curve range-energia di protoni in idrogeno e in carbonio. Il range, distanza media percorsa dalla particella nel materiale prima di arrestarsi, si ottiene dividendo il valore in ordinate per la densità del materiale attraversato.



**Figura 21.4**

Paragone fra i percorsi medi (range) di diverse particelle in acqua in funzione della loro energia. I mesoni  $\pi$  sono particelle instabili prodotte in processi nucleari ad alta energia e impiegate in radioterapia con scarso successo.

**FOTONI**

# FOTONI MONOENERGETICI, BUONA GEOMETRIA

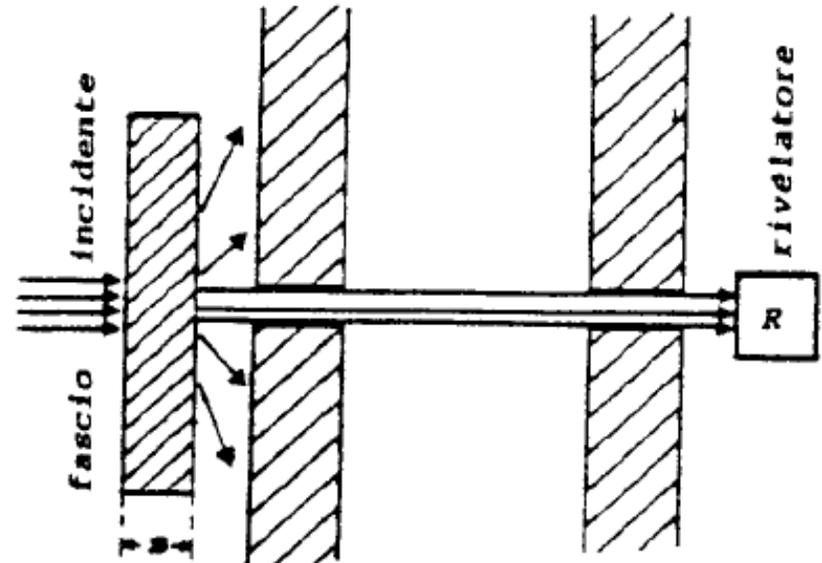
Attenuazione di fotoni monoenergetici in “buona geometria” (“narrow-beam”):  
Si può trascurare la probabilità che un fotone diffuso incida sul rivelatore/campione

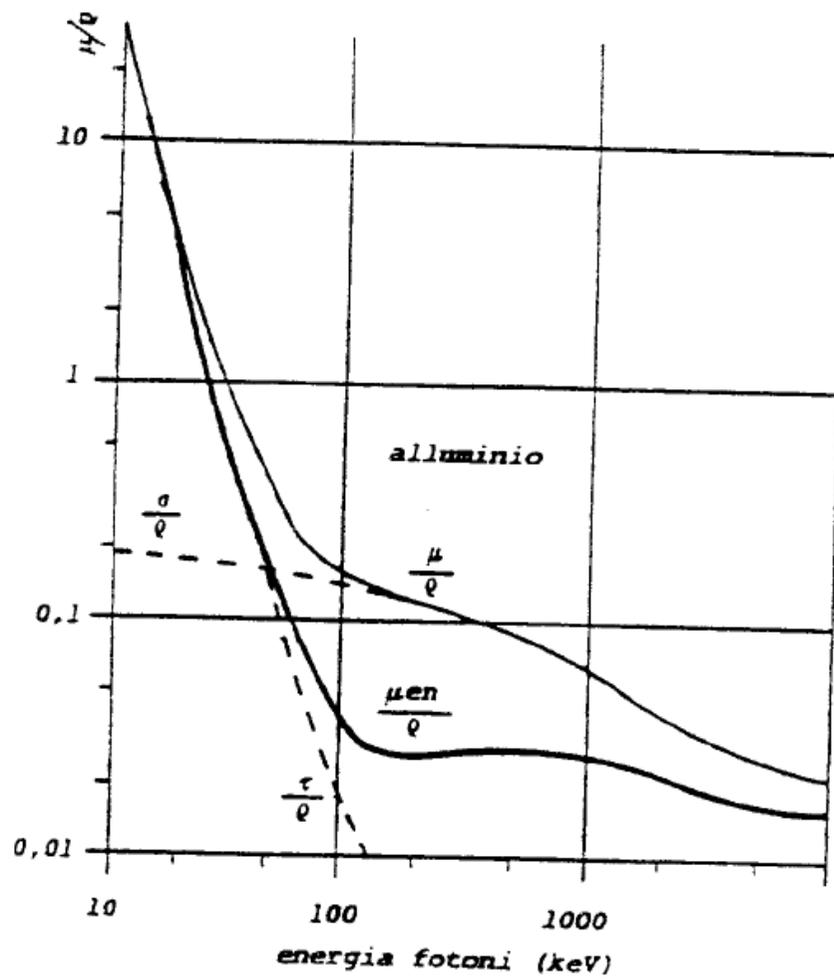
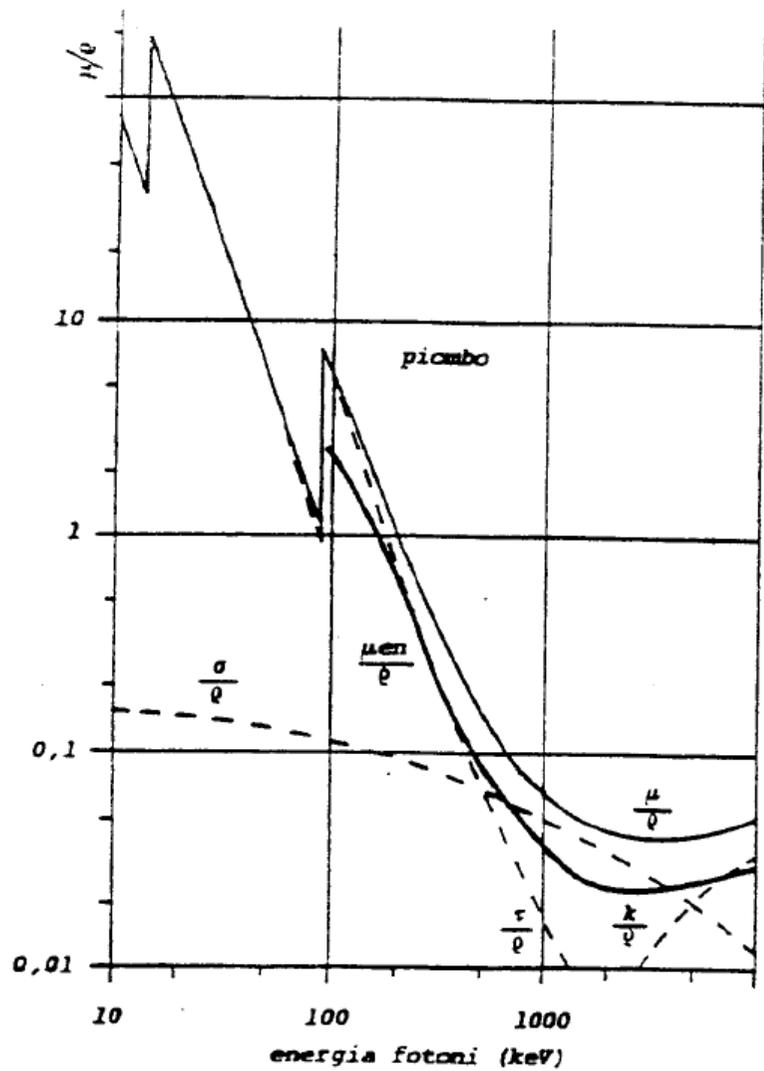
- $N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$
- Si può introdurre il concetto di SEV (strato emivalente):

$$N_0/2 = N_0 \exp(-\mu x_{1/2}) \text{ da cui: } x_{1/2} = \ln 2 / \mu$$

Un fascio che attraversa n SEV viene attenuato di un fattore  $2^n$

- Anche usato il concetto di spessore 1/10

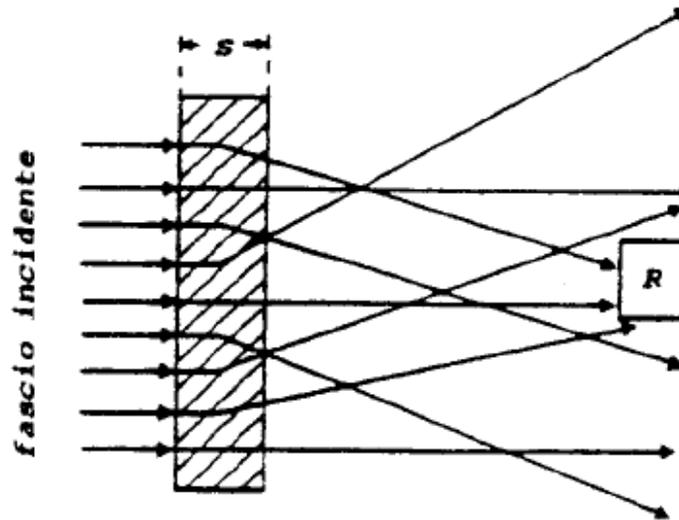




# FOTONI MONOENERGETICI, CATTIVA GEOMETRIA

Attenuazione di fotoni monoenergetici in “cattiva geometria” (“broad-beam”):

- Rilevanti il coeff. di trasferimento di energia  $\mu_{tr}$ ,  
e il coeff. di assorbimento dell'energia,  $\mu_{en}$
- Fluenza di energia:  $\Psi(x) = \Psi_0 \exp(-\mu_{en} x)$  (e analogamente per la dose)  
Assume che i coeff. di assorbimento relativi ai fotoni diffusi coincidano con quelli dei fotoni primari e si possa trascurare il cambiamento di direzione



# FOTONI MONOENERGETICI, CATTIVA GEOMETRIA

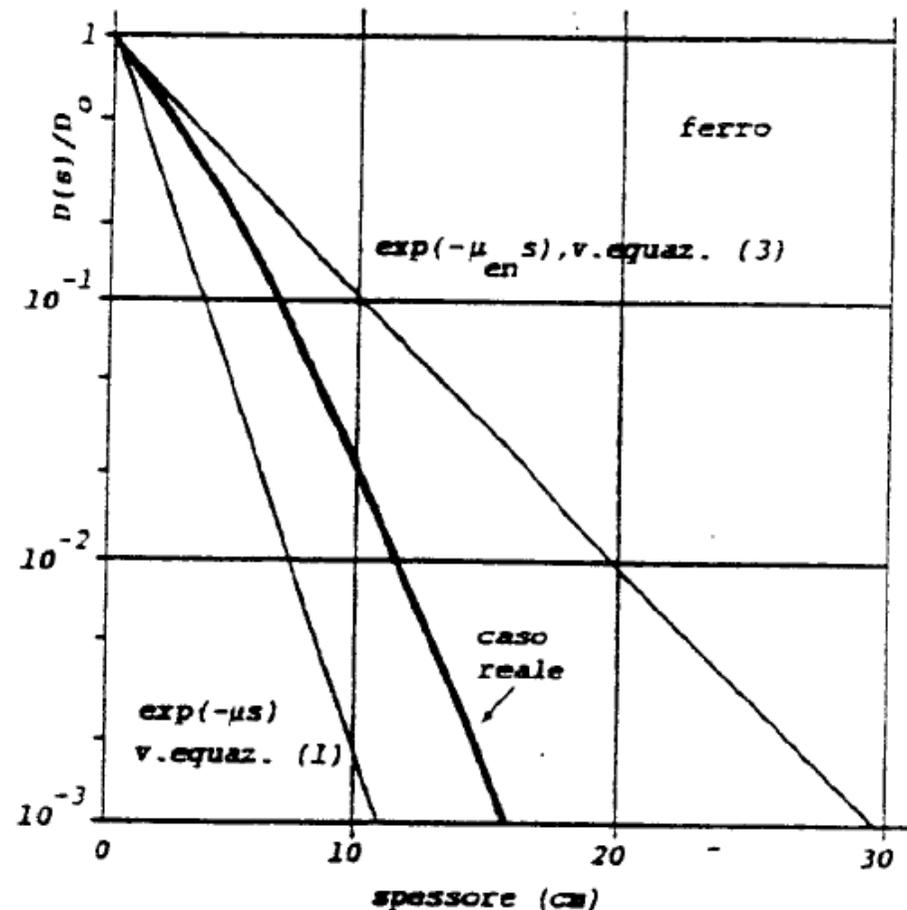


Figura 6. Attenuazione in ferro di fotoni da 500 keV: calcolo per condizioni di "buona" e "cattiva" geometria e riscontro con la situazione reale.

Il rapporto B tra la curva reale e quella che assume un assorbimento esponenziale in condizioni di buona geometria=fattore di accumulazione ("build up factor")

# FOTONI MONOENERGETICI, CATTIVA GEOMETRIA

Esempio:

E' necessario attenuare di un fattore 1000, in termini di dose, un fascio di fotoni monocromatici da 500 keV con uno schermo di Fe

Nel caso di buona geometria, sufficienti 11 cm.

Nel caso di cattiva geometria e della approssimazione con assorbimento esponenziale con coeff di assorbimento  $\mu_{en}$  lo spessore viene sovrastimato: 29 cm

Nel caso reale: 15 cm

NB a grandi profondita', la curva di assorbimento reale tende a diventare parallela a quella di buona geometria – ossia il fattore di build-up tende a diventare costante.

Tipico di materiali con Z medio-alto e fasci con energia minore di quella per cui si ha il minimo di  $\mu$

I fotoni primari sono piu' penetranti dei secondari, che vengono rapidamente assorbiti man mano che vengono prodotti

Se l' energia di primari e' superiore al valore corrisponente al minimo di  $\mu$ , parte dei secondari puo' essere piu' penetrante dei primari – situazione piu' complessa

# FOTONI NON MONOENERGETICI

Caso tipico in prossimità di tubi a raggi X, o macchine acceleratrici, o sorgenti beta.  
Si ricorre a dati sperimentali o modelli semi-empirici

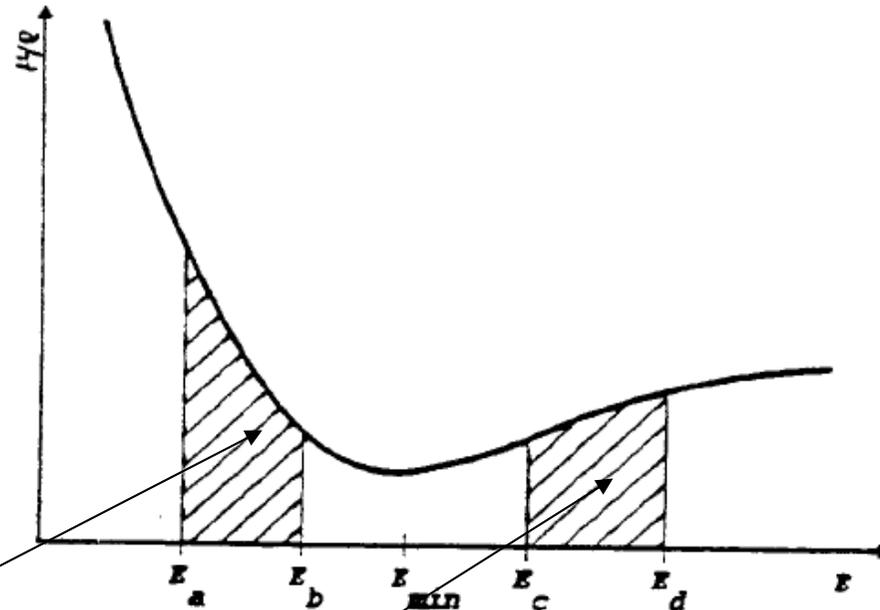


Figura 7. Andamento tipico del coefficiente d'attenuazione.

Raggi X più penetranti sono quelli di energia maggiore. Al crescere dello spessore lo spettro risulta indurito. A grandi profondità, andamento esponenziale dell'intensità con coeff di assorbimento legato al coeff di attenuazione a  $E_b$

Secondari più penetranti dei primari: la curva di assorbimento tenderà ad un andamento esponenziale con pendenza tipica del materiale e indipendente dallo spettro iniziale dei raggi X.

# FOTONI NON MONOENERGETICI

400 KeV

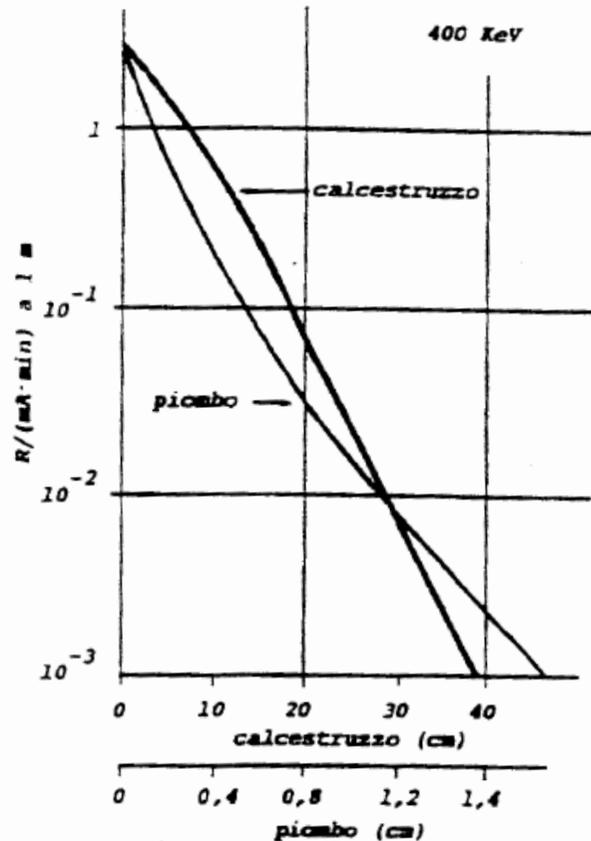


Figura 8. Curve di assorbimento in calcestruzzo e in piombo dei raggi X prodotti da elettroni da 400 keV (filtrati con 3 mm di rame).

2 MeV

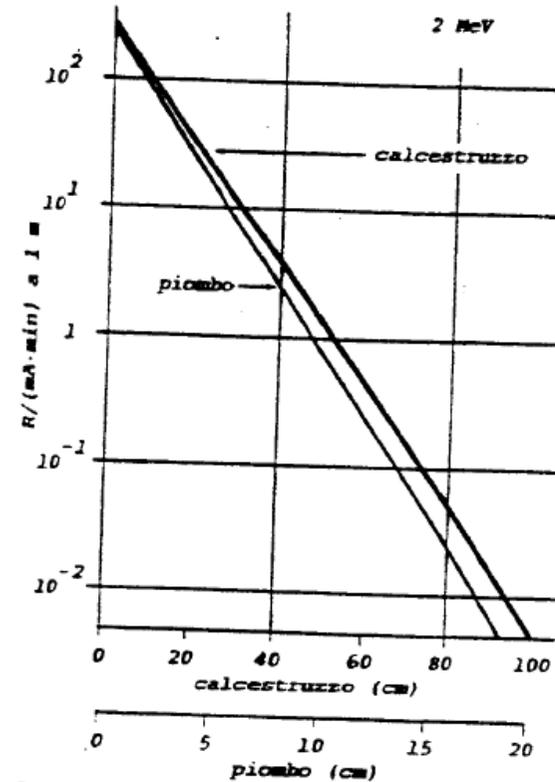


Figura 9. Curve di assorbimento in calcestruzzo ed in piombo dei raggi X prodotti da elettroni da 2 MeV (filtrati con 6,8 mm di piombo).

Possibile usare un modello di assorbimento esponenziale in caso di spettri continui

Possibile usare SEV e spessore 1/10

La prima parte della curva va trattata separatamente

**NEUTRONI**

# NEUTRONI

- Al di sotto di 2 MeV prevale la diffusione elastica su nuclei leggeri che causa il rallentamento fino a energie termiche

Una volta termalizzati i neutroni vengono assorbiti – cattura con emissione di gamma

- Per energie fino a una decina di MeV sono importanti diffusione elastica e inelastica/non-elastica che tendono a degradare lo spettro
- Al di sopra di 10-20 MeV, dominano reazioni nucleari, che possono portare anche a una moltiplicazione dei nuclei presenti – fino ad arrivare a energie elevate a una “cascata” o “sciame” adronico

Per schermature

- fondamentali materiali contenenti H: grande frazione di energia del n trasferita in media al p in collisioni elastiche
- Importanti anche le reazioni inelastiche/non-elastiche per la degradazione dello spettro d' energia per  $E > 10$  MeV

# NEUTRONI

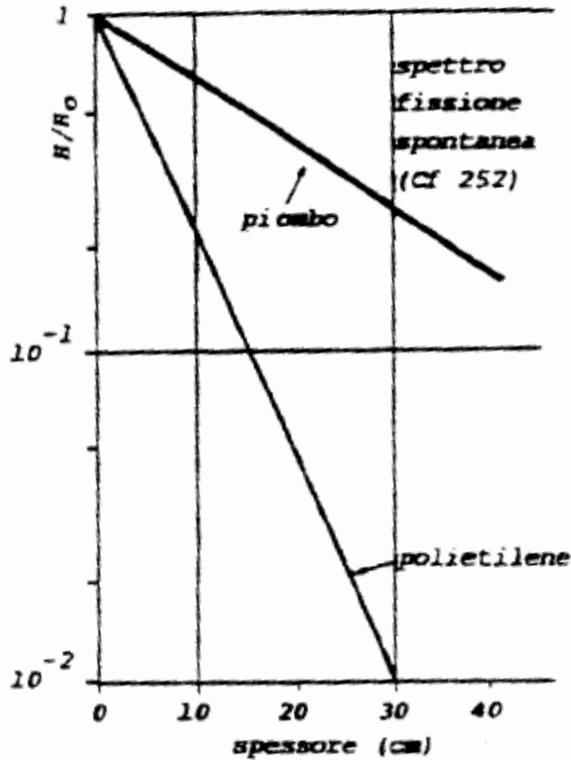


Figura 10. Attenuazione in termini di dose di fasci larghi di neutroni di fissione ( $^{252}\text{Cf}$ ) in vari assorbitori.

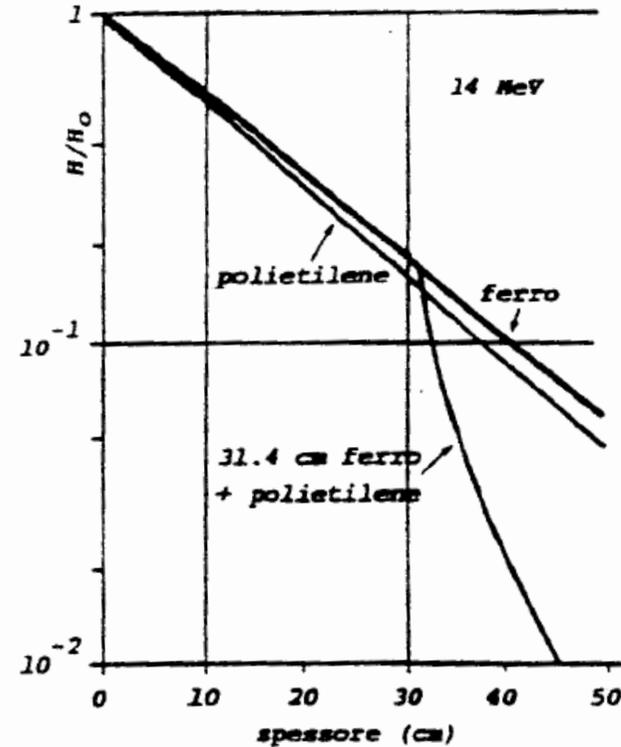


Figura 11. Attenuazione in termini di dose di fasci larghi di neutroni da 14 MeV in vari assorbitori.

$^{252}\text{Cf}$ : fissione spontanea

- Scarsa attitudine dei materiali a peso atomico medio o grande ad attenuare n di energia moderata come quelli emessi dal Cf o quelli rallentati nell' attraversamento del Fe

Efficacia schermante del polietilene elevata a basse energie diminuisce a alte energie (paragonabile a quella del Fe a parità' di spessore)

# SCELTA DEL MATERIALE SCHERMANTE

- Considerazioni di costo, peso, robustezza, tossicità, punto di fusione, resistenza alla radiazione... oltre alla capacità di attenuare il campo di radiazioni.
- Radiazioni elettromagnetiche:
  - elevato numero atomico (effetto fotoelettrico !) e densità, per es Pb (ma scarsa resistenza meccanica, basso punto di fusione, tossicità, costo...), U impoverito...
  - tra i materiali a peso atomico medio: Fe e acciaio (robustezza, costo, lavorabilità)
  - per acceleratori, impianti di  $^{60}\text{Co}$ : calcestruzzo (eventualmente 'caricato' con trucioli di ferro, barite, ilmenite (Ti, Fe))
- Radiazioni neutroniche:
  - materiali idrogenati, eventualmente associati a materiali con alta sezione d'urto di cattura per i neutroni termici, specie il Boro
  - quindi: paraffina (infiammabile, non resistente alle radiazioni, basso punto di fusione, polietilene  $(-\text{CH}_2-)_n$ , acqua
  - per energie  $>5-10$  MeV, importanti reazioni inelastiche – materiali di peso medio-alto
  - calcestruzzo (0.67% in peso di H), eventualmente caricato per i gamma

## EFFETTO CIELO (SKYSHINE)

Radiazioni inizialmente rivolte verso l'alto, successivamente diffuse dall'aria, che possono interessare zone apparentemente ben protette da schermature laterali

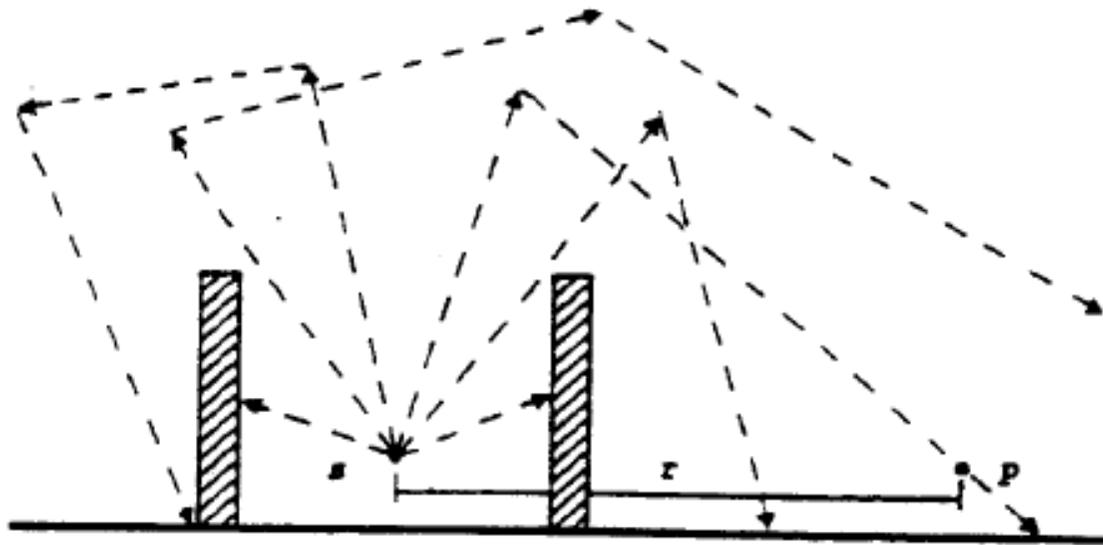


Figura 13. Illustrazione del meccanismo dell'effetto cielo.

## ESEMPI

Calcolare lo spessore delle schermature per un bunker in cui sia contenuta una sorgente di  $^{60}\text{Co}$  da 370 GBq (10 Ci). Il punto accessibile più vicino alla sorgente è in zona controllata a 3m dalla sorgente; lo schermo deve essere in calcestruzzo. Si vuole ottenere un'intensità di esposizione di 1 mR/h.

Per  $^{60}\text{Co}$ :  $\Gamma = 1.3 \text{ Rm}^2/(\text{Ci h}) = 1.3 \text{ Rm}^2/(37\text{GBq h})$

$\Gamma = (I^2/A) \Delta X/\Delta t$  dove  $l$  è la distanza dalla sorgente e  $X$  è l'esposizione e  $A$  l'attività

Nel punto più vicino alla sorgente si avrebbe  $\Delta X/\Delta t = 1.444 \text{ R/h}$

Si vuole ottenere un'intensità di esposizione di 1mR/h, necessaria attenuazione di un fattore 1444.

Per una valutazione grossolana, si può ricorrere ai valori di SEV e spessore 1/10, aggiungendo 1-2 SEV in più per precauzione.

$$I = I_0 2^{-x/\text{SEV}}$$

$X = 64 \text{ cm} + 2 \times 6.1 \text{ cm} = 76 \text{ cm}$  di calcestruzzo

Un calcolo più attendibile richiede la conoscenza del fattore di accumulazione

Tabella 2. Valori approssimativi dello spessore di dimezzamento e dello spessore 1/10 per fotoni di taluni radioisotopi, molto attenuati in condizioni di cattiva geometria

nuclide	materiale							
	uranio, cm		piombo, cm		acciaio, cm		calcestr.,cm	
	s 1/2	s 1/10	s 1/2	s 1/10	s 1/2	s 1/10	s 1/2	s 1/10
Na-24	0,9	3,0	1,7	5,6	-	-	-	-
Co-60	0,7	2,2	1,2	4,0	2,0	6,7	6,1	20,3
Sb-124	-	-	1,4	4,5	-	-	7,0	23,0
I-131	-	-	0,7	2,4	-	-	4,6	15,3
Cs-137	0,3	1,1	0,7	2,2	1,5	5,0	4,9	16,3
Ta-182	-	-	1,2	4,0	-	-	-	-
Ir-192	0,4	1,2	0,6	1,9	1,3	4,3	4,1	13,5
Au-198	-	-	1,1	3,6	-	-	4,1	13,5
Ra-226	-	-	1,3	4,4	2,1	7,1	7,0	23,3

## ESEMPI

Calcolare lo spessore delle schermature in Pb per una sorgente di  $^{137}\text{Cs}$  da 185 MBq (5 mCi). Rateo esposizione richiesto a 1 metro: 0.25 mR/h

Per  $^{137}\text{Cs}$ :  $\Gamma = 0.32 \text{ Rm}^2/(\text{Ci h}) = 0.32 \text{ mRm}^2/(37\text{MBq h})$

$\Gamma = (I^2/A) \Delta X/\Delta t$  dove  $I$  e' la distanza dalla sorgente e  $X$  e' l' esposizione e  $A$  l' attività

Per  $I=1$  m si avrebbe  $\Delta X/\Delta t = 1.6 \text{ mR/h}$

Necessaria attenuazione di un fattore 6.4

Per una valutazione grossolana, si puo' ricorrere ai valori di SEV e spessore 1/10, aggiungendo 1-2 SEV in piu'

$$I = I_0 2^{-x/\text{SEV}}$$

$$x = 1.87 \text{ cm} + 2 \times 0.7 \text{ cm} = 3.2 \text{ cm di Pb}$$