

## Schermature di fotoni

### Esercizio 1

Un fascio parallelo di raggi gamma di energia  $E_\gamma = 2 \text{ MeV}$  e di intensità  $\Phi_0 = 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  incide su uno schermo di piombo di spessore  $a = 10 \text{ cm}$ . Calcolare, al di là dello schermo:

- il numero di fotoni che non hanno interagito;
- l'intensità di esposizione.

Per  $E_\gamma = 2 \text{ MeV}$ , abbiamo:  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{Pb}} = 0.0457 \text{ cm}^2/\text{g}$ ;  $\rho_{\text{Pb}} = 11.34 \text{ g/cm}^3$ .

Pertanto  $\mu = 0.518 \text{ cm}^{-1}$  e  $\mu a = 5.18$

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \exp(-\mu a) = 5.63 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$B_m(5.18)$  si trova per interpolazione tra  $B_m(4)$  e  $B_m(7)$  e risulta:  $B_m(5.18) = 2.78$

Allora:

$$\dot{X} = \dot{X}_0 \cdot B_m(\mu a) \cdot e^{-\mu a} = 0.0659 \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{aria}} E_0 \Phi_0 \cdot B_m(\mu a) \cdot e^{-\mu a} = 48 \text{ mR/h}$$

### Esercizio 2

Una sorgente puntiforme emette  $10^8$  fotoni al secondo di energia  $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$  attorno alla sorgente vi è uno schermo sferico di ferro. Quale deve essere il raggio dello schermo per avere all'esterno una intensità di esposizione di  $1 \text{ mR/h}$ .

In un problema di questi tipo bisogna innanzi tutto calcolare il flusso di buildup che darà l'intensità di esposizione richiesta. Pertanto, da:

$$\dot{X} = C\Phi_b = 0.0659 \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{aria}} E_0 \Phi_b$$

$$\text{si ricava: } \Phi_b = \frac{\dot{X}}{C} = \frac{\dot{X}}{0.0659 \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{aria}} E_0}$$

essendo  $\dot{X} = 1 \text{ mR/h}$ ,  $E_0 = 1 \text{ MeV}$ ,  $\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{aria}} = 0.028 \text{ cm}^2/\text{g}$ , si ricava:

$$\Phi_b = 5.42 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}.$$

Poiché, nel caso di sorgenti puntiformi ed isotrope, abbiamo:

$$\Phi_b = \frac{S \cdot B_m(\mu R) \cdot \exp(-\mu R)}{4\pi R^2} \text{ con } S = 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}, \text{ possiamo scrivere:}$$

$$5.42 \cdot 10^2 = \frac{10^8 \cdot B_m(\mu R) \cdot \exp(-\mu R)}{4\pi R^2}, \text{ che può essere scritta come:}$$

$$1 = 1.47 \cdot 10^4 \frac{B_m(\mu R) \cdot \exp(-\mu R)}{4\pi R^2}$$

Questa equazione deve essere risolta per R. Questo può essere fatto riportando in grafico la parte destra dell'equazione in funzione di  $\mu R$ . Per questo, moltiplichiamo numeratore e denominatore per  $\mu^2$ .

$$\text{Si ottiene: } 1 = 1.47 \cdot 10^4 \frac{\mu^2 \cdot B_m(\mu R) \cdot \exp(-\mu R)}{4\pi (\mu R)^2}$$

Poiché per il Ferro ( $\rho = 7.86 \text{ g/cm}^3$ ) all'energia di 1 MeV abbiamo  $\mu/\rho = 0.0595 \text{ cm}^2/\text{g}$ , si ricava:

$$\mu = 0.468 \text{ cm}^{-1}, \text{ che sostituito nella formula fornisce:}$$

$$1 = 3.22 \cdot 10^3 \frac{B_m(\mu R) \cdot \exp(-\mu R)}{(\mu R)^2}$$

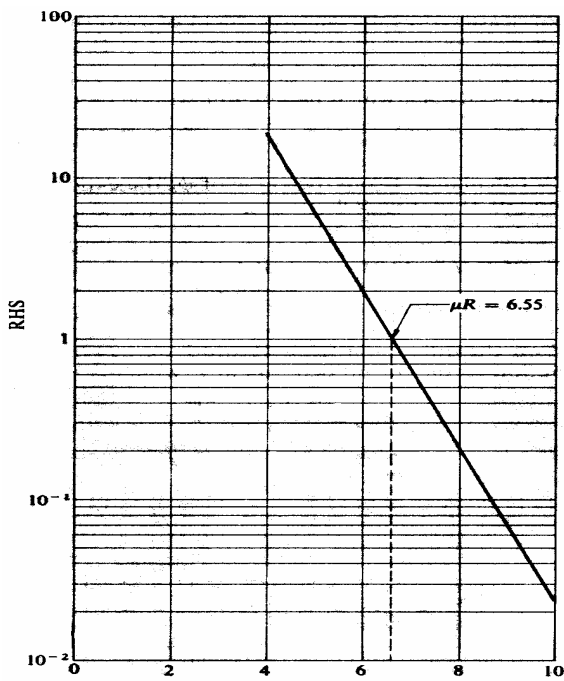


Fig. 19.7

Qui accanto è graficato l'andamento della funzione

$$f(x) = A \cdot \frac{1}{x^2} B_m(x) \cdot \exp(-x)$$

dove A è una costante numerica legata al particolare caso, e  $x = \mu \cdot R$

Il grafico di figura 19.7 è ottenuto riportando in carta semilogaritmica la parte destra dell'equazione precedente al variare di  $\mu R$  (bastano due punti, visto che

l'andamento è rettilineo). La funzione assume il valore unitario per  $\mu R = 6.55$ , valore che rappresenta la soluzione del problema.

Pertanto:  $R = 6.55/\mu = 6.55/0.468 = 14.0$  cm

The Mass Attenuation Coefficient ( $\mu/\rho$ ) for Several Materials, in  $\text{cm}^2/\text{g}$  \*

Material	Gamma-Ray Energy, MeV																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	.140	.126	.113	.103	.0876	.0691	.0579	.0502	.0446	.0371	.0321
Be	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0773	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0394	.0313	.0266	.0234	.0211	.0180	.0161
C	.149	.134	.122	.106	.0953	.0870	.0805	.0707	.0636	.0568	.0518	.0444	.0356	.0304	.0270	.0245	.0213	.0194
N	.150	.134	.123	.106	.0955	.0869	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0445	.0357	.0306	.0273	.0249	.0218	.0200
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.0870	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0445	.0359	.0309	.0276	.0254	.0224	.0206
Na	.151	.130	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0427	.0348	.0303	.0274	.0254	.0229	.0215
Mg	.160	.135	.122	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0442	.0360	.0315	.0286	.0266	.0242	.0228
Al	.161	.134	.120	.103	.0922	.0840	.0777	.0683	.0614	.0548	.0500	.0432	.0353	.0310	.0282	.0264	.0241	.0229
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0447	.0367	.0323	.0296	.0277	.0254	.0243
P	.174	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0436	.0358	.0316	.0290	.0273	.0252	.0242
S	.188	.144	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0448	.0371	.0328	.0302	.0284	.0266	.0255
Ar	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.0730	.0638	.0573	.0512	.0468	.0407	.0338	.0301	.0279	.0266	.0248	.0241
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0438	.0365	.0327	.0305	.0289	.0274	.0267
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0451	.0376	.0338	.0316	.0302	.0285	.0280
Fe	.344	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0424	.0361	.0330	.0313	.0304	.0295	.0294
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.0820	.0751	.0654	.0585	.0521	.0476	.0418	.0357	.0330	.0316	.0309	.0303	.0305
Mo	1.03	.389	.225	.130	.0998	.0851	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0414	.0365	.0349	.0344	.0344	.0349	.0359
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0501	.0459	.0408	.0367	.0355	.0355	.0358	.0368	.0383
I	1.83	.648	.339	.165	.114	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0409	.0370	.0360	.0361	.0365	.0377	.0394
W	4.21	1.44	.708	.293	.174	.125	.101	.0763	.0640	.0544	.0492	.0437	.0405	.0402	.0409	.0418	.0438	.0465
Pt	4.75	1.64	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	.0554	.0501	.0445	.0414	.0411	.0418	.0427	.0448	.0477
Tl	5.16	1.80	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0452	.0420	.0416	.0423	.0433	.0454	.0484
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0457	.0421	.0420	.0426	.0436	.0459	.0489
U	10.60	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0484	.0445	.0440	.0446	.0455	.0479	.0511
Air	.151	.134	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0655	.0567	.0517	.0445	.0357	.0307	.0274	.0250	.0220	.0202
NaI	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0412	.0367	.0351	.0347	.0347	.0354	.0366
H <sub>2</sub> O	.167	.149	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0493	.0396	.0339	.0301	.0275	.0240	.0219
Concrete	.169	.139	.124	.107	.0954	.0870	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0445	.0363	.0317	.0287	.0268	.0243	.0229
Fissile	.163	.144	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0478	.0384	.0329	.0292	.0267	.0233	.0212

Tab. 19.3 coefficiente di attenuazione massico  $\mu/\rho$  in diversi materiali

### Esercizio 3

Un fascio parallelo di fotoni di energia  $E_0 = 6$  MeV ed intensità  $\varphi_0 = 10^6$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  deve essere schermato con 100 cm di acqua e 8 cm di piombo. Calcolare l'intensità di esposizione con l'acqua posta prima (i), oppure dopo (ii) il piombo.

In entrambi i casi il flusso dei fotoni oltre la barriera è dato da:

$$\varphi_b = \varphi_0 B_m \cdot \exp[-(\mu_{pb} a_{pb} + \mu_w a_w)]$$

Dove  $B_m$  rappresenta l'appropriato coefficiente di buildup, e:

$$\mu_{pb} = 0.4944; \quad a_{pb} = 8 \text{ cm}; \quad \mu_{pb} a_{pb} = 3.96$$

$$\mu_w = 0.0275; \quad a_w = 100 \text{ cm}; \quad \mu_w a_w = 2.75$$

Nel caso (i) abbiamo quindi:  $B_m = B_{pb}(3.96) = 1.86$

Il valore è stato ottenuto interpolando opportunamente sulla tabella. Pertanto:

$$\varphi_b = \varphi_0 B_m \cdot \exp[-(\mu_{pb} a_{pb} + \mu_w a_w)] = 10^6 \cdot 1.86 \cdot e^{-(2.75+3.96)} = 2.27 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

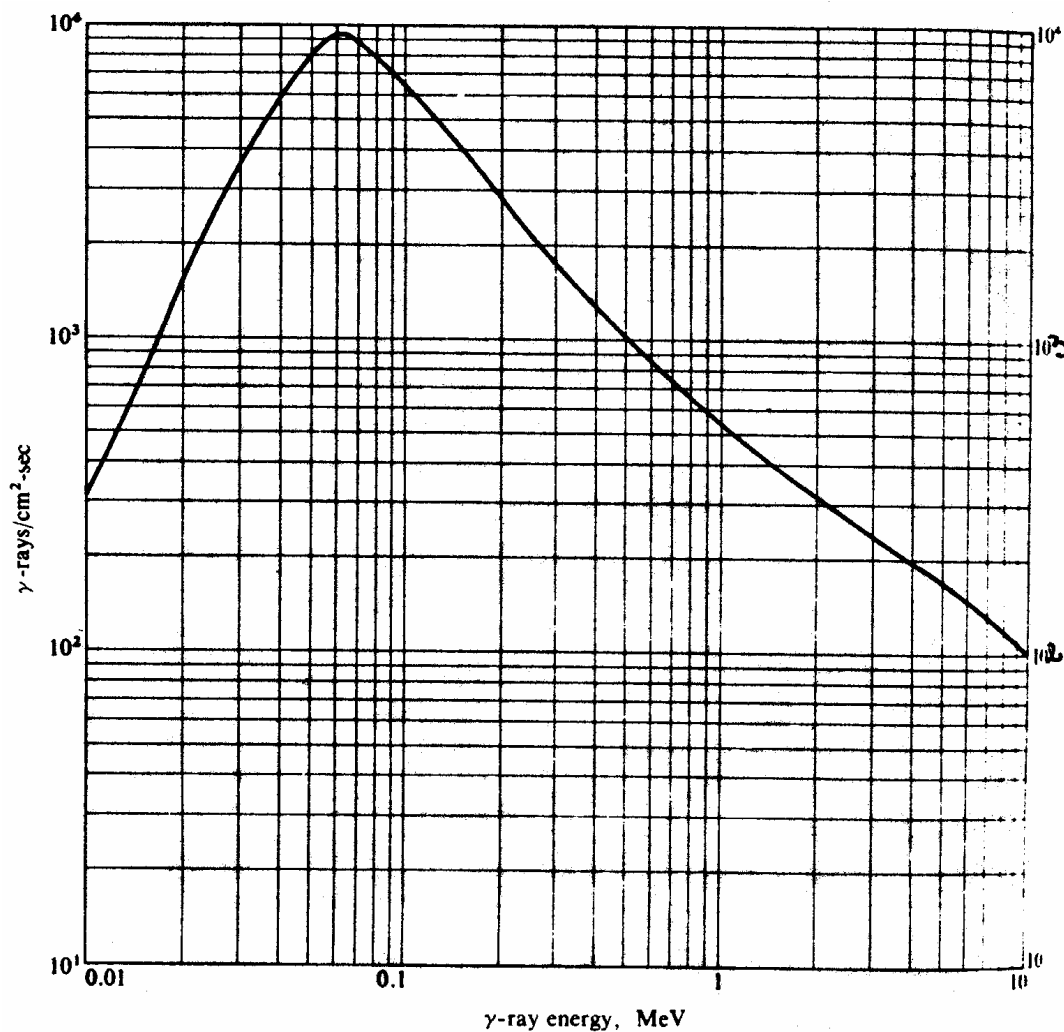


Fig. 19.8 intensità di fluena di fotoni ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) di energia  $E_\gamma$  corrispondente ad una intensità di Esposizione pari ad 1 mR/h

Utilizzando il solito grafico (fig. 19.8) si ricava:  $\dot{X} = \frac{2.27 \cdot 10^3}{150} \cdot 1 = 15.1 \text{ mR/h}$ .

Nel caso (ii)  $B_m$  è invece dato da:  $B_m = B_{pb}(3.96) \cdot B_w(2.75)$ , dove  $B_w(2.75)$  è valutato all'energia di 3.2 MeV, corrispondente al minimo dell'andamento di  $\mu_{pb}$ , e nuovamente  $B_{pb}(3.96) = 1.86$ . Pertanto:  $B_m = 1.86 \cdot 2.72 = 5.06$ .

il flusso di buildup allora vale:  $\varphi_b = 10^6 \cdot 5.06 \cdot e^{-(2.75+3.96)} = 6.17 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , che fornisce per l'intensità di esposizione il valore:  $\dot{X} = \frac{6.17 \cdot 10^3}{150} \cdot 1 = 41.1 \text{ mR/h}$ . Come

si vede l'intensità di esposizione risulta tre volte più bassa quando lo schermo d'acqua è messo prima del piombo.

#### Esercizio 4

Calcolare il flusso ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) di un fascio di fotoni di energia  $E = 0.5 \text{ MeV}$  massima tale da non superare una intensità di esposizione di  $2 \text{ mR/h}$ . Supposto il fascio parallelo, calcolare l'intensità di esposizione oltre una barriera di spessore  $a = 120 \text{ cm}$  di acqua.

Dal grafico di figura 19.8 si ricava che per  $E = 0.5 \text{ MeV}$  un flusso  $\Phi^* = 1.1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  corrisponde ad una intensità di esposizione  $\dot{X}^* = 1 \text{ mR/h}$ . Pertanto il flusso necessario per produrre una intensità di esposizione  $\dot{X}_0 = 2 \text{ mR/h}$  vale  $\Phi_0 = 2.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Inoltre, essendo il coefficiente di attenuazione di fotoni di energia  $E = 0.5 \text{ MeV}$  in acqua pari a:  $\mu = 0.0966 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  avremo:  $\mu a = 11.59$ . Dalla tabella del buildup per fasci paralleli si ricava:  $B_m(11.59) = 48.4$ . Pertanto:

$$\dot{X} = \dot{X}_0 \cdot B_m(\mu a) \cdot e^{-\mu a} = 2 \cdot 48.4 \cdot \exp(-11.59) = 9.7 \cdot 10^{-4} \text{ mR/h}$$

## Schermature di neutroni

#### Esercizio 5

Un generatore produce neutroni da  $14 \text{ MeV}$  distribuiti isotropicamente con una intensità  $I = 10^9$  neutroni al secondo attraverso la reazione:  ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow \text{n} + {}^4\text{He}$

Calcolare lo spessore di una schermatura di cemento affinché a tre metri di distanza dalla sorgente l'equivalente di dose sia pari a  $10 \mu\text{Sv/h}$ . (ossia  $1 \text{ mrem/h}$ )

In assenza di schermature, a tre metri di distanza il flusso di neutroni sarebbe:

$$\Phi = \frac{I}{4\pi d^2} = 885 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Ricordando la figura 18.16 qui riportata per chiarezza, questo flusso corrisponderebbe ad un equivalente di dose  $\dot{H} = 885/6.8 = 130 \text{ mrem/h} = 1.3 \text{ mSv/h}$

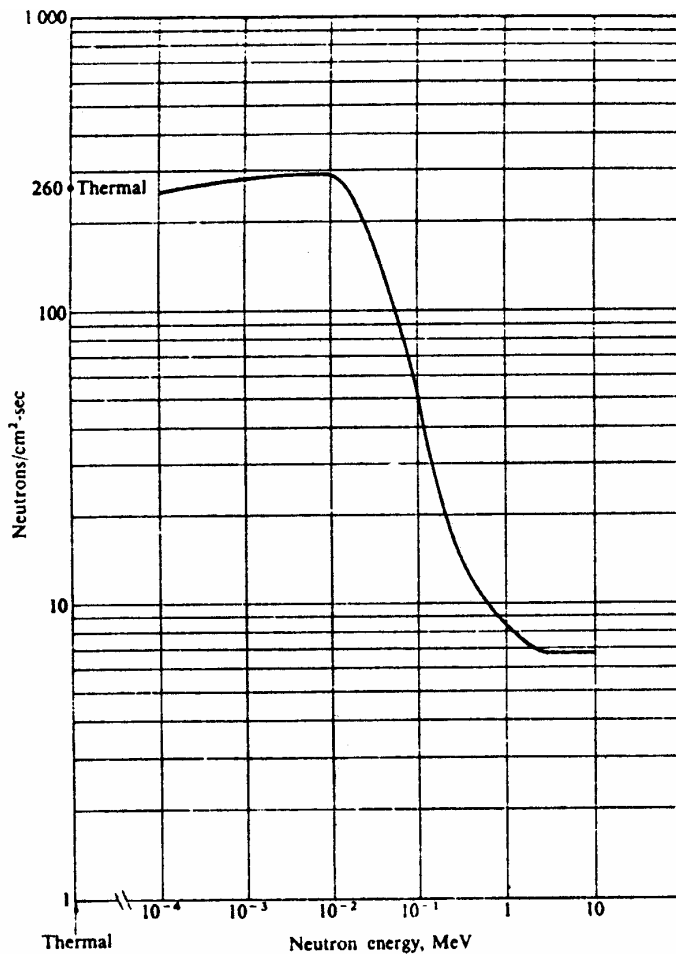


Fig. 19.15 Intensità di fluenza neutronica corrispondente ad  $\dot{H} = 1$  mrem/h

Utilizziamo ora il grafico relativo all'attenuazione dei neutroni da 14 MeV (figura 19.11). Poiché esso fornisce l'intensità di equivalente di dose  $\dot{H}_0$  relativa ad un flusso unitario, dobbiamo imporre che al di là della barriera valga la relazione:  $\dot{H} = 885 \cdot \dot{H}_0 = 1$  mrem/h. Ossia:  $\dot{H}_0 = \frac{1}{885} = 1.13 \cdot 10^{-3}$  mrem/h

Si vede che questo valore corrisponde ad uno spessore  $x = 70$  cm di calcestruzzo.

### Esercizio 6

Una sorgente puntiforme di neutroni di energia  $E = 2$  MeV ed intensità  $I = 10^9$  neutroni al secondo è collocata al centro di un locale quadrato di lato esterno  $L = 9$  metri. Quale deve essere lo spessore delle pareti di cemento della camera se l'intensità di equivalente di dose per neutroni non deve superare i  $25 \mu\text{Sv/h}$  ( $2.5$  mrem/h) in alcun punto esterno al locale.

Essendo la stanza quadrata, il flusso massimo si avrà nei punti di distanza minima dalla sorgente, corrispondenti alla distanza  $d$  pari alla metà del lato  $L$  ( $d = \frac{1}{2}L$ )

$$\varphi = \frac{I}{4\pi d^2} = 3.9 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Dobbiamo allora imporre che al di là della barriera valga la relazione:

$$\dot{H} = 3.9 \cdot 10^2 \cdot \dot{H}_0 = 2.5 \text{ mrem/h.} \quad \text{Ossia: } \dot{H}_0 = \frac{2.5}{3.9 \cdot 10^2} = 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ mrem/h}$$

Dal grafico di figura 19.10 relativo a neutroni da 2 MeV, si ricava che le pareti devono avere uno spessore di calcestruzzo pari a 33 cm.

### Utilizzo del kerma nei calcoli di schermature neutroniche

Abbiamo già visto nel capitolo 18 come si definisce il kerma per le particelle non direttamente ionizzanti, ed in particolare proprio per i neutroni.

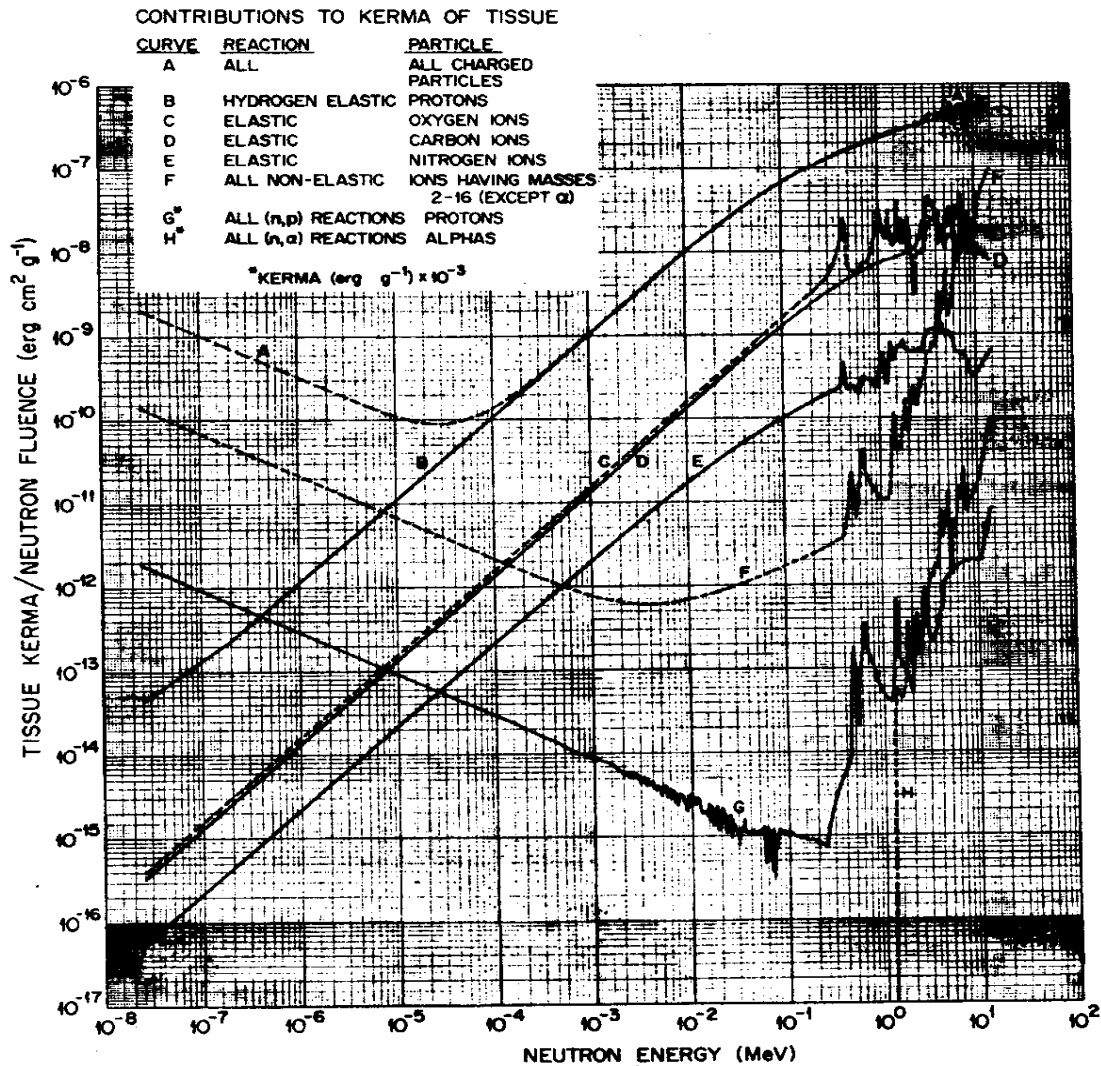
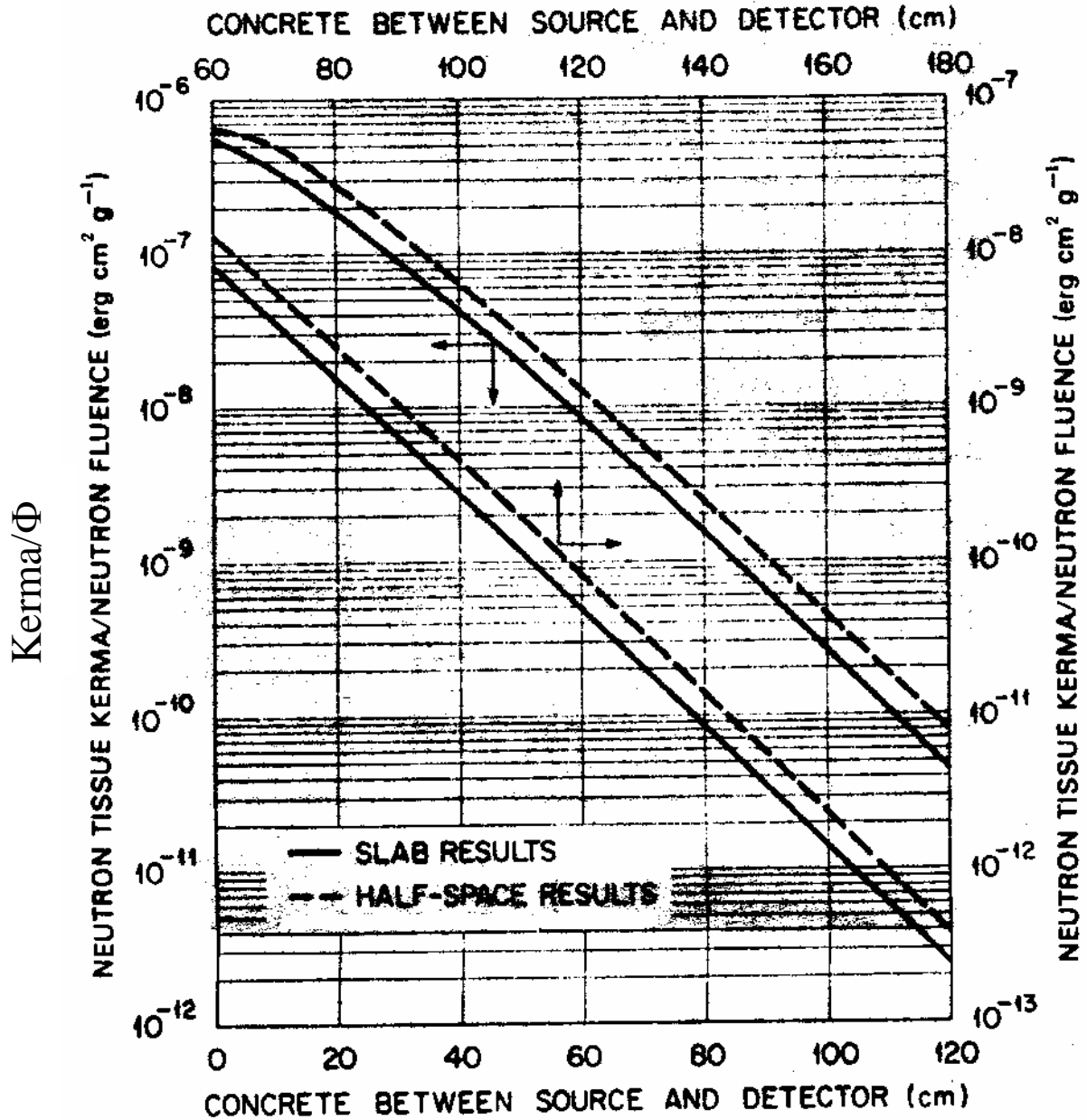


Fig. 19.16  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluensa neutronica

Nei grafici che seguono sono riportati i valori del kerma per flusso unitario  $\frac{k}{\Phi}$ , che numericamente coincide con il valore della intensità di kerma per intensità di flusso

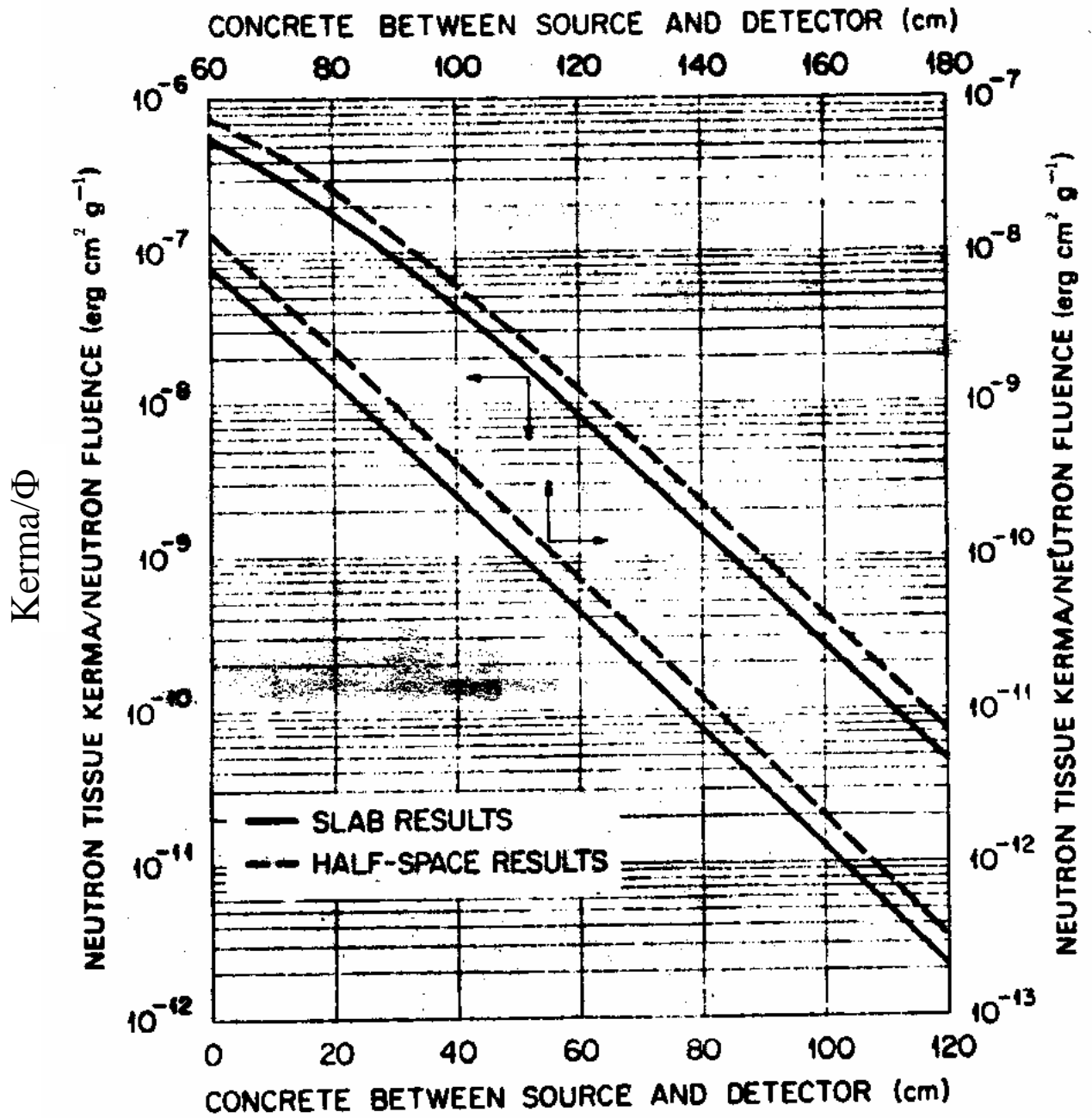
unitario, ossia la grandezza  $\frac{k}{\phi}$  espressa sempre in  $\text{erg}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$  (essendo  $\phi = \Phi$  il flusso di neutroni espresso in  $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). I grafici si riferiscono al calcestruzzo e sono relativi a varie energia di neutrone incidente.



Energia dei neutroni:  $E = 14 \text{ MeV}$

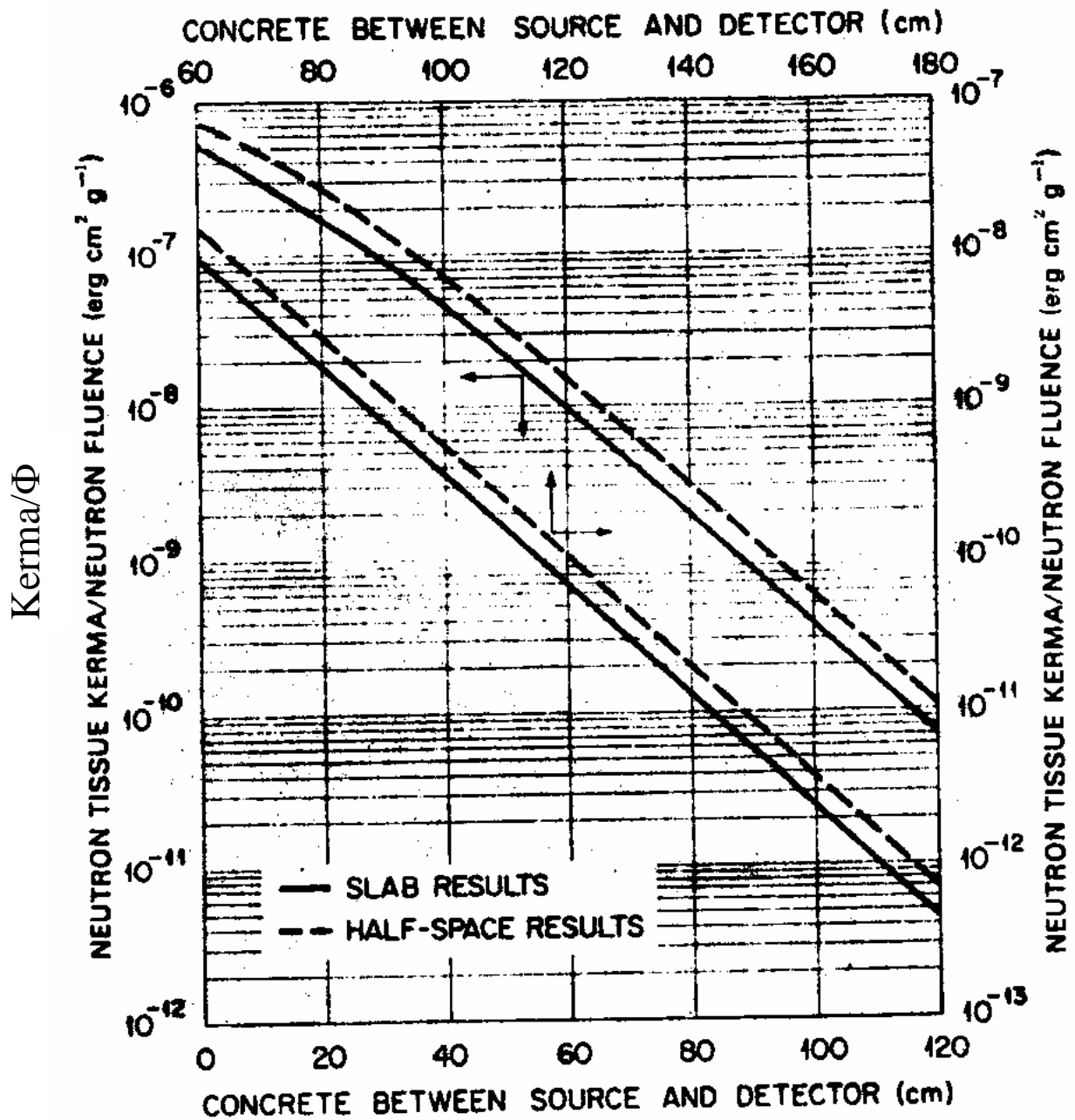
Fig. 19.17  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluena neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo





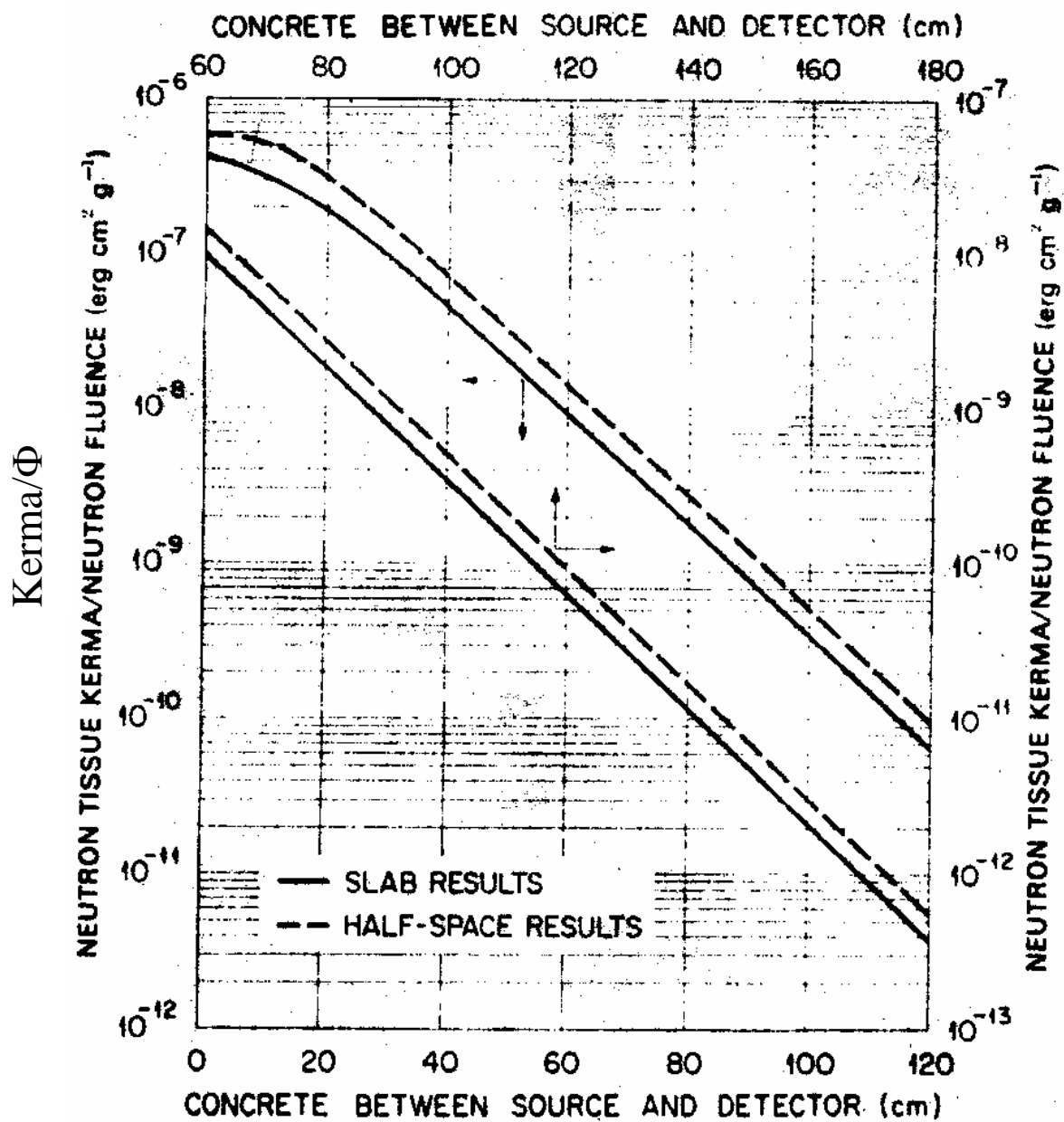
Energia dei neutroni:  $E = 12 \text{ MeV}$

Fig. 19.18  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluenza neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo



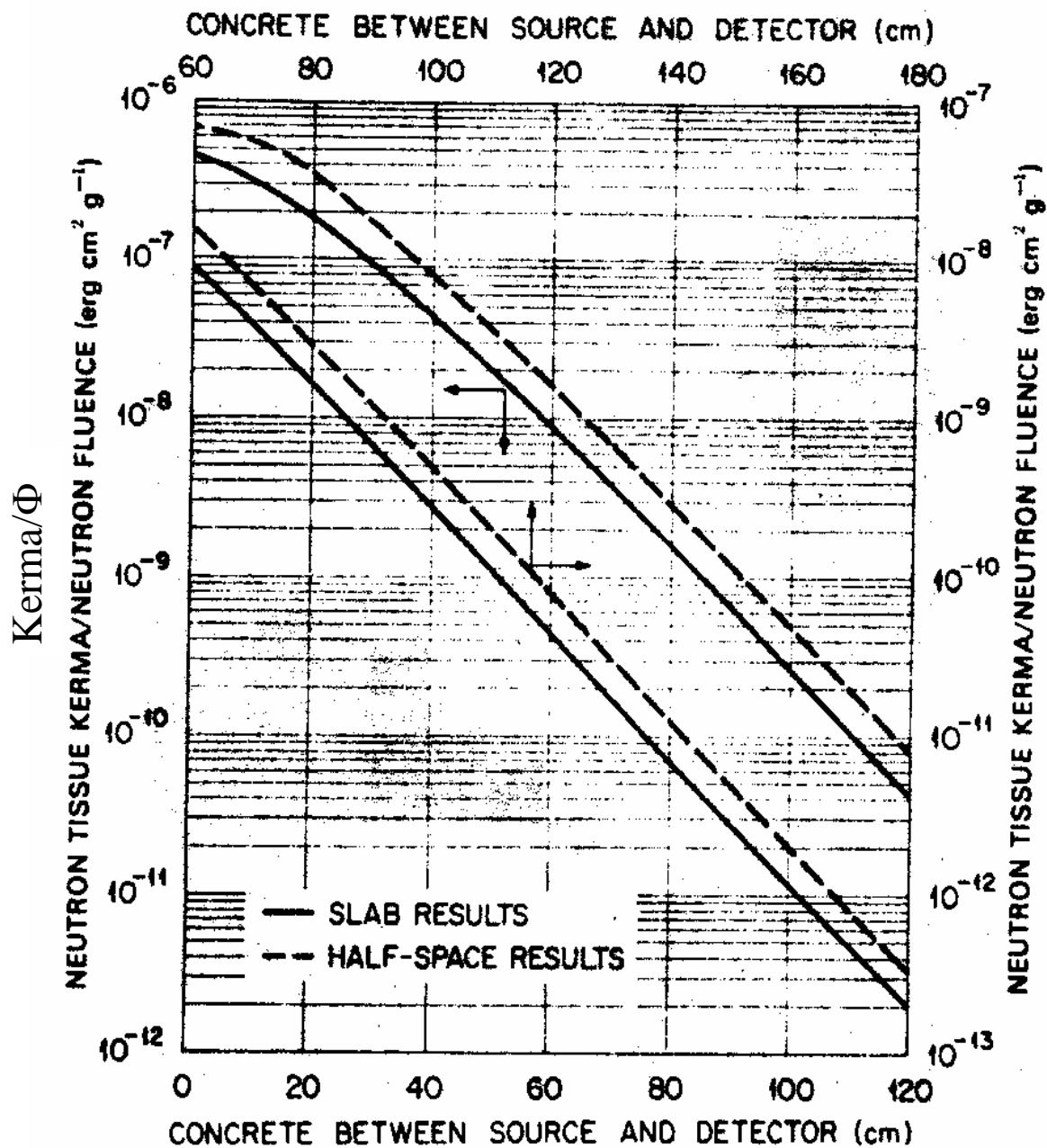
Energia dei neutroni:  $E = 10 \text{ MeV}$

Fig. 19.19  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluenza neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo



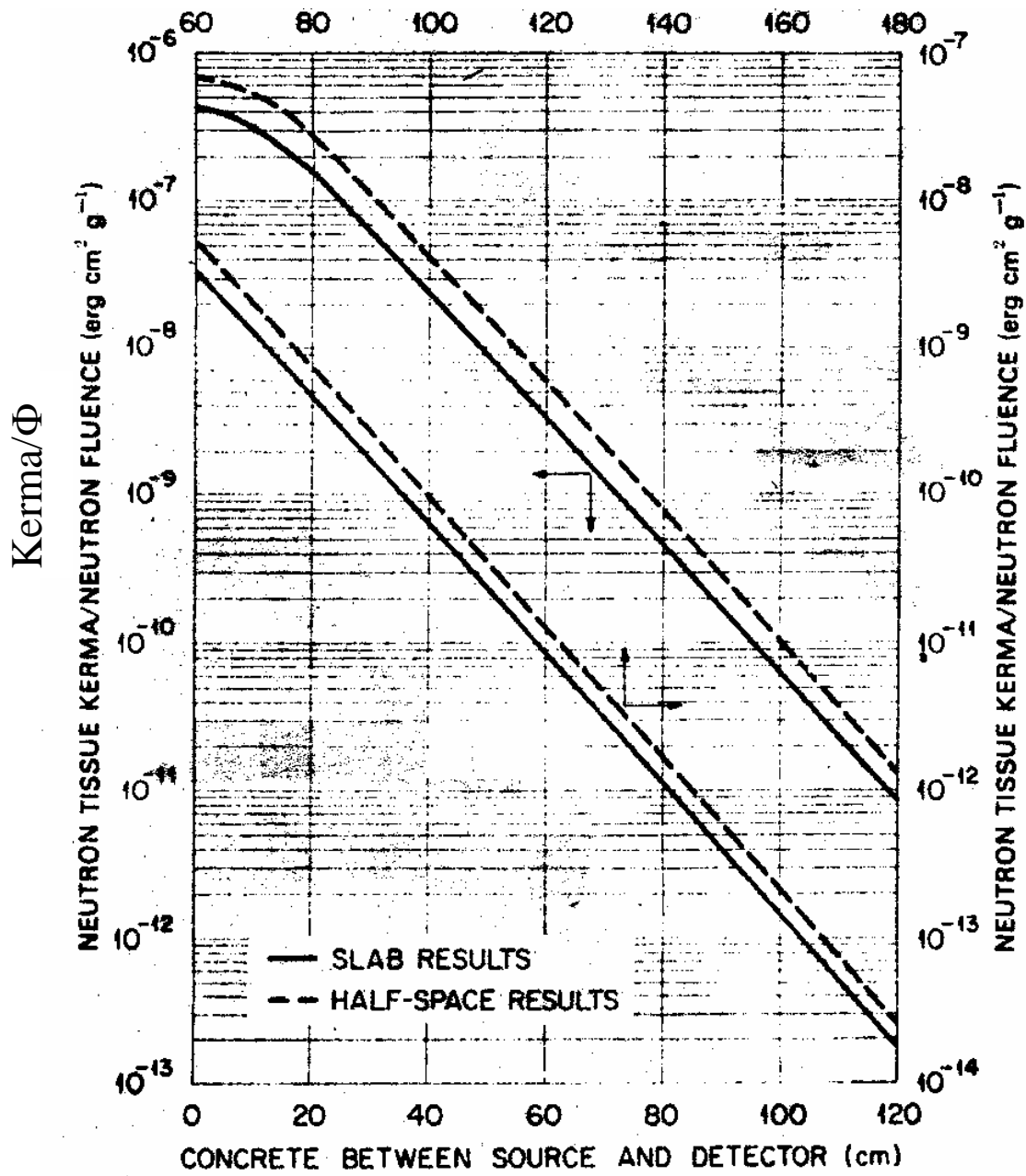
Energia dei neutroni:  $E = 8$

Fig. 19.20  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluensa neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo



Energia dei neutroni:  $E = 6$

Fig. 19.21  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluena neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo



Energia dei neutroni:  $E = 4 \text{ MeV}$

Fig. 19.22  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluenza neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo

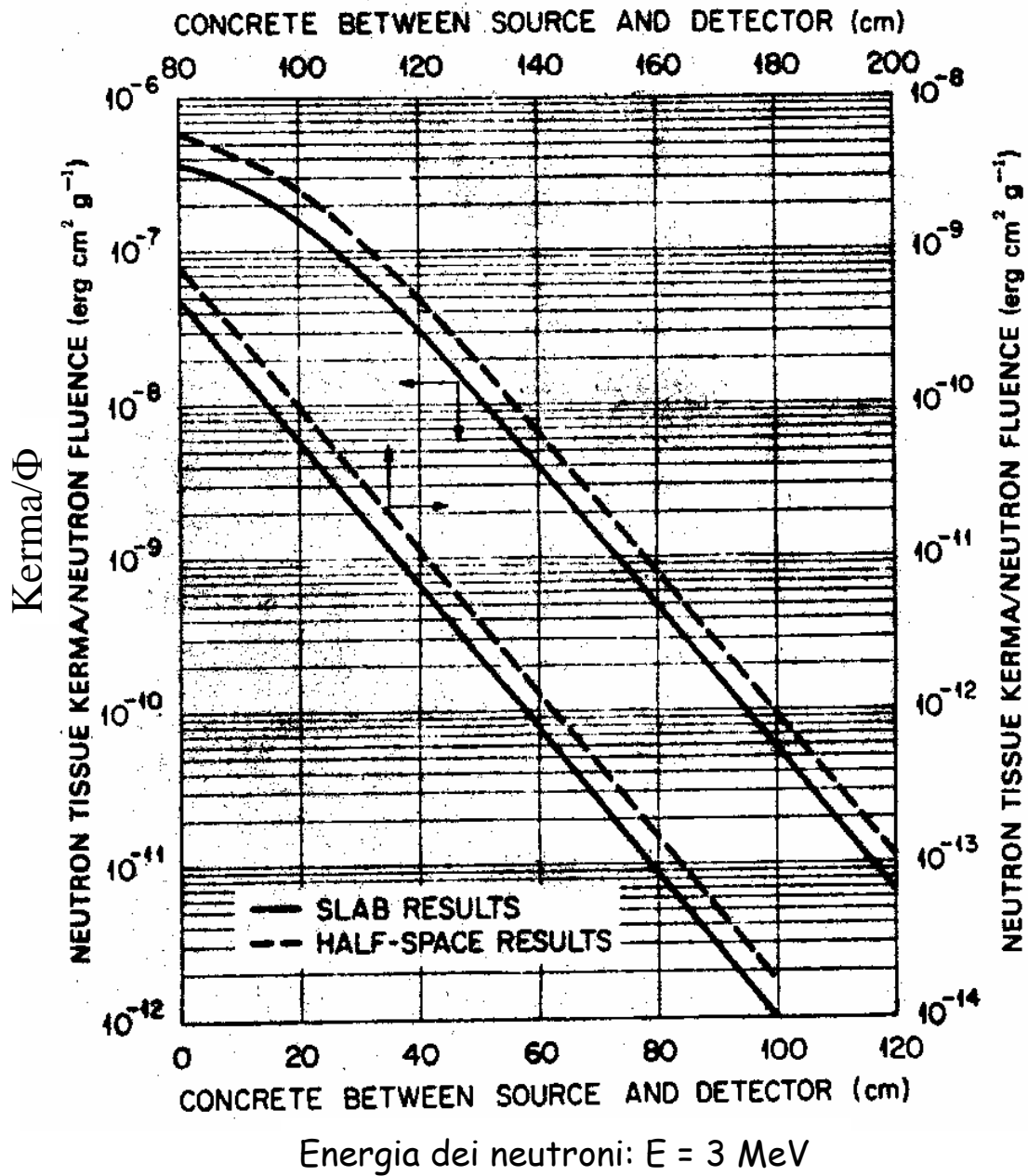
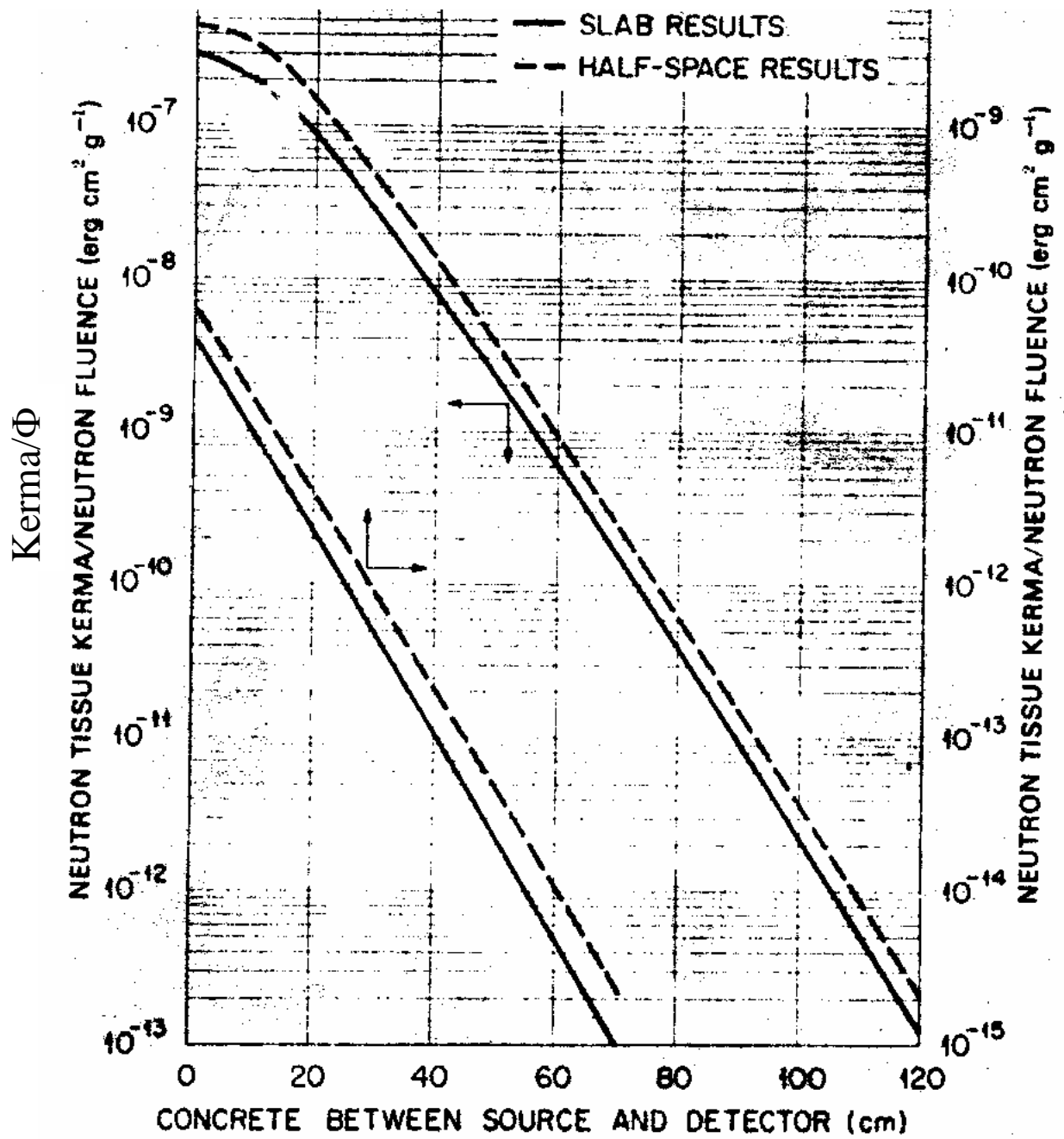
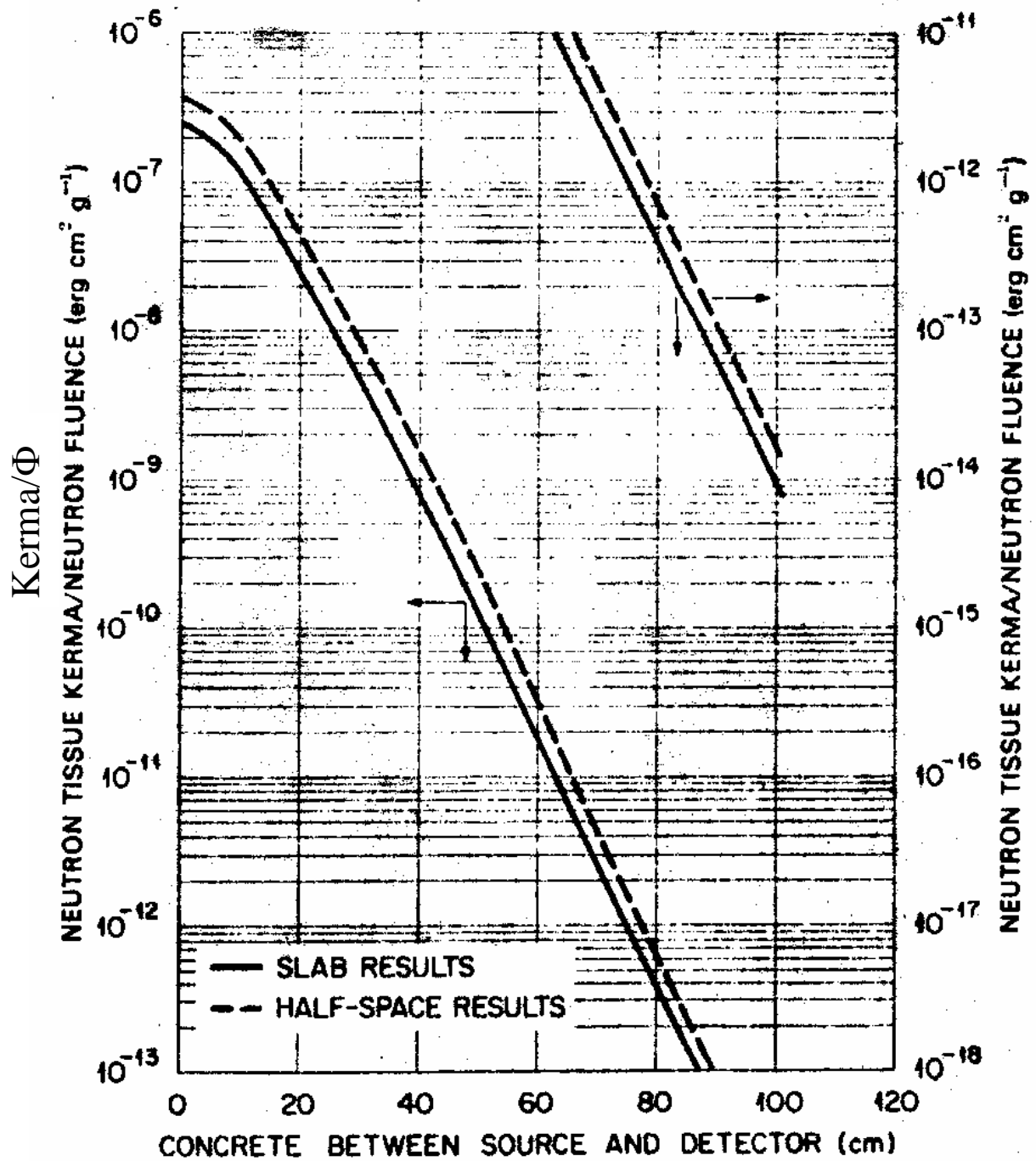


Fig. 19.23  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluenza neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo



Energia dei neutroni:  $E = 2 \text{ MeV}$

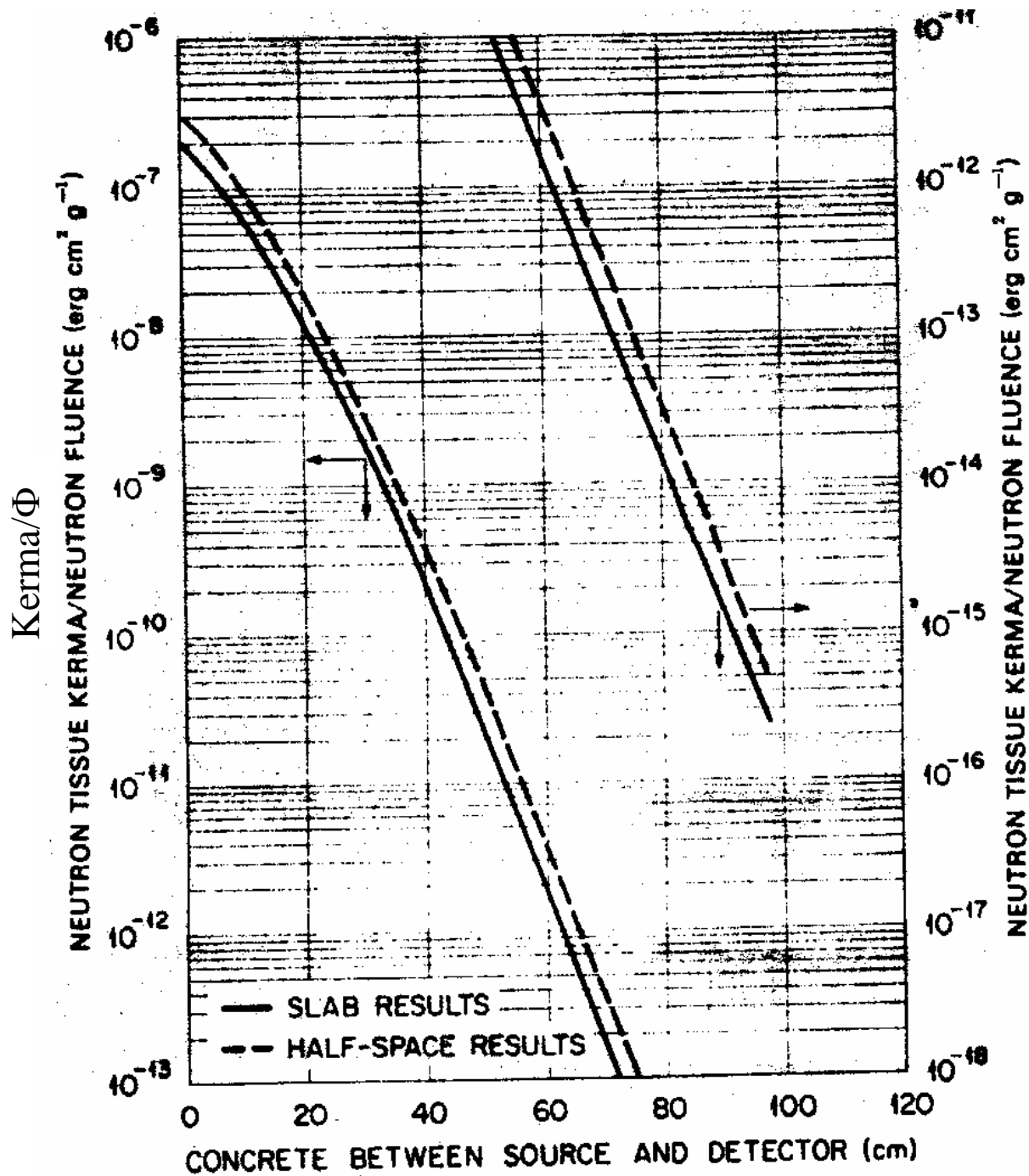
Fig. 19.24  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluena neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo



Energia dei neutroni:  $E = 1.3 \text{ MeV}$

Fig. 19.25  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluensa neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo





Energia dei neutroni:  $E = 0.7 \text{ MeV}$

Fig. 19.26  $k/\Phi$  kerma al tessuto per unità di fluensa neutronica in funzione dello spessore di barriera di calcestruzzo

### Esercizio 7

Risolvere l'esercizio 5 ricorrendo alle figure che forniscono il rapporto kerma-flusso in funzione dello spessore di cemento. Essendo  $\frac{\dot{k}}{\varphi} = \frac{k}{\Phi}$  espresso in  $\text{erg}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$

converrà esprimere tutte le grandezze nel sistema cgs. Pertanto abbiamo:

$$\varphi = 885 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \quad \text{e} \quad \dot{H} = 1 \text{ mrem/h} = 2.78 \cdot 10^{-7} \text{ rem/s}$$

Per neutroni da 14 MeV il fattore qualità vale:  $Q = 10$

$$\text{L'intensità di dose vale allora: } \dot{D} = \frac{\dot{H}}{Q} = 2.8 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s} = 2.8 \cdot 10^{-6} \text{ erg}\cdot\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}.$$

Supponendo di essere in condizioni di equilibrio delle particelle cariche scriviamo:

$$\dot{k} = \dot{D} = 2.8 \cdot 10^{-6} \text{ erg}\cdot\text{g}^{-1}\text{s}^{-1} \quad \text{e quindi: } \frac{\dot{k}}{\varphi} = \frac{2.8 \cdot 10^{-6}}{885} = 3.2 \cdot 10^{-9} \text{ erg}\cdot\text{cm}^2\text{g}^{-1}$$

Dal grafico per neutroni da 14 MeV si ricava che lo spessore di calcestruzzo deve valere  $d = 73 \text{ cm}$ .

### Esercizio 8

Risolvere l'esercizio 4 ricorrendo alle figure che forniscono il rapporto kerma-flusso in funzione dello spessore di cemento.

In questo caso abbiamo:  $\dot{H} = 2.5 \text{ mrem/h} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ rem/s}$

$$\dot{D} = \frac{\dot{H}}{Q} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ erg}\cdot\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}. \quad \text{Essendo inoltre: } \Phi = 3.9 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}, \text{ si}$$

ricava:

$$\frac{\dot{k}}{\varphi} = \frac{7 \cdot 10^{-6}}{2.9 \cdot 10^2} = 1.8 \cdot 10^{-9} \text{ erg}\cdot\text{cm}^2\text{g}^{-1}$$

Dal grafico relativo a neutroni da 2 MeV si ricava che lo spessore di calcestruzzo deve valere  $d = 32 \text{ cm}$ .

### Esercizio 8

Risolvere l'esercizio 4 ricorrendo alle figure che forniscono il rapporto kerma-flusso in funzione dello spessore di cemento.

In questo caso abbiamo:  $\dot{H} = 2.5 \text{ mrem/h} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ rem/s}$

$$\dot{D} = \frac{\dot{H}}{Q} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ erg}\cdot\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}. \quad \text{Essendo inoltre: } \Phi = 3.9 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}, \text{ si}$$

ricava:

$$\frac{\dot{k}}{\varphi} = \frac{7 \cdot 10^{-6}}{2.9 \cdot 10^2} = 1.8 \cdot 10^{-9} \text{ erg}\cdot\text{cm}^2\text{g}^{-1}$$

Dal grafico relativo a neutroni da 2 MeV si ricava che lo spessore di calcestruzzo deve valere  $d = 32 \text{ cm}$ .