

Esercizio 1

Si abbia un fascio parallelo di elettroni monoenergetici. L'energia cinetica degli elettroni è pari a $E_c = 0.4 \text{ MeV}$ ed il flusso vale $\Phi = 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. calcolare \dot{D} e \dot{H} in acqua.

Dal grafico di figura 18.13 si ricava che per $E_c = 0.4 \text{ MeV}$ un flusso di elettroni $\Phi^* = 20 \text{ elettroni cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ corrisponde ad un valore $\dot{H}^* = 2.5 \text{ mrem/h}$. Pertanto:

$$\dot{H} = \dot{H}^* \frac{\Phi}{\Phi^*} = 1.25 \cdot 10^7 \text{ mrem/h} = 1.25 \cdot 10^4 \text{ rem/h} = 1.25 \cdot 10^2 \text{ Sv/h} = 35 \text{ mSv/s.}$$

Naturalmente, poiché per elettroni da 0.4 MeV $Q=1$ di ha: $\dot{D} = \dot{H} = 35 \text{ mGy/s}$.

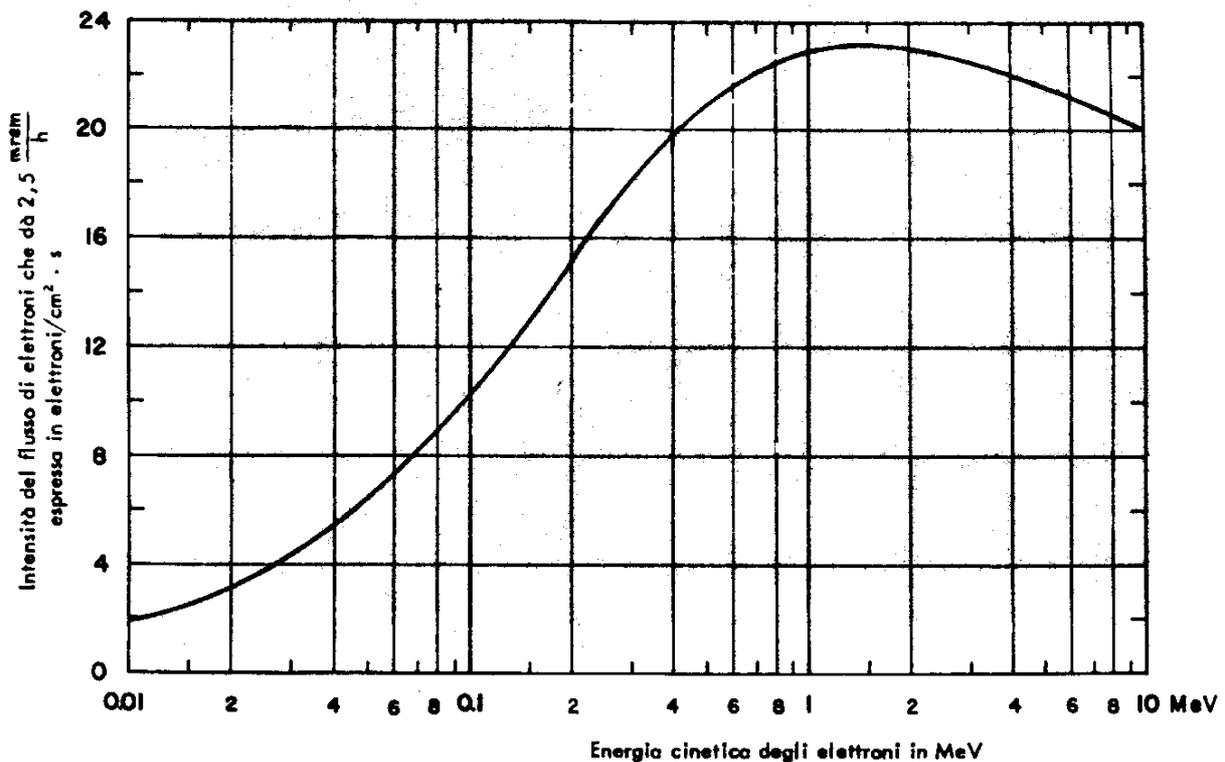


Fig. 18.13 intensità di fluenza di elettroni corrispondente a 2.5 mrem/h

Esercizio 2

Calcolare \dot{D} e \dot{H} in aria, acqua e tessuto per un fascio di fotoni monoenergetico di energia $E_\gamma = 3 \text{ MeV}$ e intensità di flusso $\Phi = 10^7 \text{ fotoni cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Ricordando la figura 18.3 che riportiamo qui sotto, si ricava che, per $E_\gamma = 3 \text{ MeV}$, $240 \text{ fotoni cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ contribuiscono ad una intensità di esposizione di 1 mR/h

Pertanto, nel nostro caso, avremo:

$$\dot{X} = \frac{10^7}{2.4 \cdot 10^2} = 4.2 \cdot 10^4 \text{ mR/h}$$

Ricordiamo che per un materiale M qualsiasi possiamo scrivere la relazione

$$\dot{D}_M \text{ (mrad/h)} = \frac{\mu_{en}(M)}{\mu_{en}(\text{aria})} \cdot \dot{D}_{\text{aria}} \text{ (mR/h)} = 0.874 \cdot \frac{\mu_{en}(M)}{\mu_{en}(\text{aria})} \cdot \dot{X} \text{ (mR/h)}$$

che possiamo riscrivere come:

$$\dot{D}_M \text{ (mrad/h)} = f_M \cdot \dot{X} \text{ (mR/h)}$$

dove $f_M = 0.874 \cdot \frac{\mu_{en}(M)}{\mu_{en}(\text{aria})}$ contiene tutta la dipendenza dal materiale.

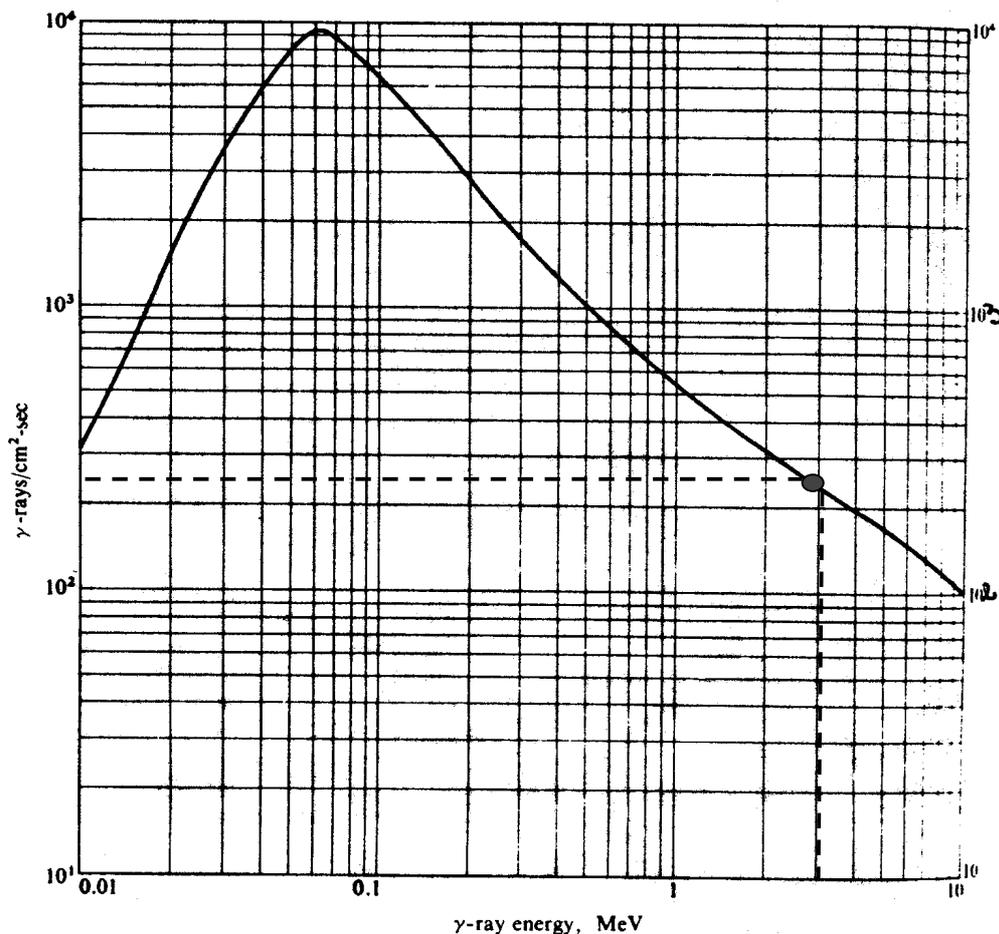


Fig. 18.14 intensità di fluenza di fotoni ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) di energia E_γ corrispondente ad una intensità di Esposizione pari ad 1 mR/h

Nella tabella 18.6 sono riportati i valori del coefficiente f nel caso di acqua, osso e muscolo in funzione dell'energia dei fotoni.

Pertanto risulta:

$$\dot{D}_{\text{aria}} = 0.87 \cdot 4.2 \cdot 10^4 \text{ mrad/h} = 36.5 \text{ rad/h} = 0.1 \text{ mGy/s}$$

$$\dot{D}_{\text{tessuto}} = 0.96 \cdot 4.2 \cdot 10^4 \text{ mrad/h} = 40 \text{ rad/h} = 0.111 \text{ mGy/s}$$

$$\dot{D}_{\text{acqua}} = 0.97 \cdot 4.2 \cdot 10^4 \text{ mrad/h} = 41 \text{ rad/h} = 0.114 \text{ mGy/s}$$

Esercizio 3

Una sorgente di fotoni di energia $E_\gamma = 0.04 \text{ MeV}$ ha una attività $a = 100 \text{ Ci}$. Calcolare l'intensità di esposizione e l'intensità di dose in aria, muscolo e grasso ad un metro di distanza dalla sorgente. Ricordiamo la relazione:

$\dot{X} = 0.0659 \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) E_\gamma \phi_\gamma$, dove \dot{X} è espresso in mR/h quando l'energia è data in MeV, il coefficiente di assorbimento massico in cm^2/g ed il flusso in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

$$\phi_\gamma = \frac{a}{4\pi d^2} = 2.94 \cdot 10^7 \text{ fotoni cm}^{-2}\text{s}^{-1}.$$

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\text{aria}} = 6.83 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g} \text{ per fotoni di } 40 \text{ keV}.$$

$$\text{Sostituendo: } \dot{X} = 0.0659 \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) E_\gamma \phi_\gamma = 5.29 \cdot 10^3 \text{ mR/h} = 5.29 \text{ R/h}$$

E_γ (MeV)	f_{acqua}	f_{osso}	f_{muscolo}
0.010	0.92	3.68	0.93
0.015	0.89	4.00	0.92
0.020	0.93	4.27	0.92
0.030	0.87	4.43	0.91
0.040	0.88	4.13	0.92
0.050	0.99	3.61	0.93
0.060	0.91	2.94	0.93
0.080	0.94	1.93	0.94
0.10	0.95	1.47	0.95
0.15	0.97	1.08	0.96
0.2	0.98	0.93	0.97
0.3	0.97	0.94	0.96
0.4	0.97	0.93	0.96
0.5	0.97	0.93	0.96
0.6	0.97	0.93	0.96
0.8	0.97	0.92	0.96
1.0	0.97	0.92	0.96
1.5	0.97	0.92	0.96
2.0	0.97	0.92	0.96
3.0	0.97	0.92	0.96

Tab. 18.6

Dal grafico di figura 18.4 qui sopra riportato, si ricava immediatamente:

$$\dot{D}_{\text{aria}} = 0.87 \cdot \dot{X}_{\text{aria}} \text{ (mR/h)} = 4.63 \text{ rad/h} = 46.3 \text{ mGy/h}$$

$$\dot{D}_{\text{tessuto}} = 0.90 \cdot \dot{X}_{\text{aria}} \text{ (mR/h)} = 4.77 \text{ rad/h} = 47.7 \text{ mGy/s}$$

$$\dot{D}_{\text{grasso}} = 0.45 \cdot \dot{X}_{\text{aria}} \text{ (mR/h)} = 2.38 \text{ rad/h} = 23.8 \text{ mGy/s}$$

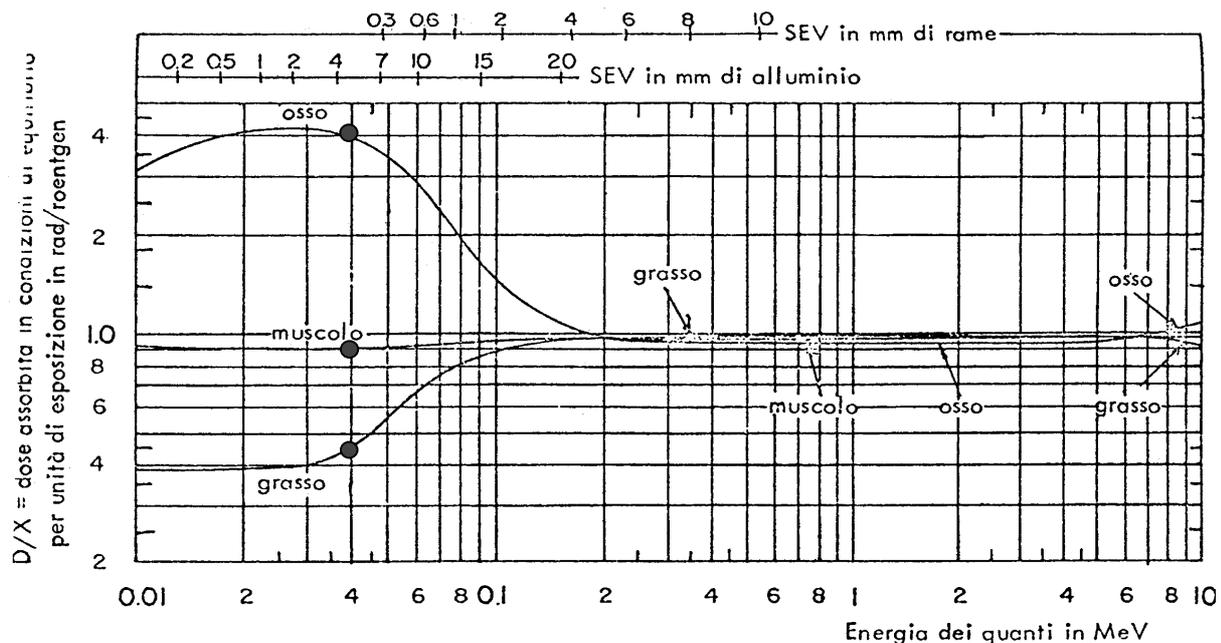


Fig. 18.15 Andamento di f_M per i principali tessuti organici in funzione

Esercizio 4

Si abbia una sorgente di ^{60}Co di attivit  a = 1 Ci. Calcolare \dot{X} a d = 5 m di distanza. Calcolare inoltre, alla stessa distanza, \dot{D} in aria, acqua e osso. Occorre tener conto della \dot{D} prodotta dagli elettroni del decadimento beta del ^{60}Co ?

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot a}{d^2}$$

La costante gamma specifica del ^{60}Co vale: $\Gamma = 1.30 \frac{\text{Rm}^2}{\text{hCi}}$

Sostituendo si ricava: $\dot{X} = 52 \text{ mR/h}$

Pertanto:

$$\dot{D}_{\text{aria}} = 0.87 \cdot \dot{X}_{\text{aria}} \text{ (mR/h)} = 45.2 \text{ mrad/h} = 0.452 \text{ mGy/h}$$

$$\dot{D}_{\text{acqua}} = 0.97 \cdot \dot{X}_{\text{aria}} \text{ (mR/h)} = 50.4 \text{ mrad/h} = 0.504 \text{ mGy/h}$$

$$\dot{D}_{\text{osso}} = 0.92 \cdot \dot{X}_{\text{aria}} \text{ (mR/h)} = 47.8 \text{ mrad/h} = 0.478 \text{ mGy/h}$$

Invece di usare la costante Γ avremmo potuto far eil calcolo per esteso. Attenzione in questo caso: il ^{60}Co emette due fotoni per decadimento di energie

rispettivamente 1.17 e 1.33 MeV. Nel calcolo del flusso bisogna quindi moltiplicare per due l'attività della sorgente. Quanto all'energia, si può considerare che i due fotoni abbiano entrambi la stessa energia media, ossia 1.25 MeV.

Per quanto riguarda la dose dovuta agli elettroni, questi ultimi vengono assorbiti lungo il tragitto: sono infatti elettroni con $E_{\max} = 0.32$ MeV che hanno un range in aria pari a $2.6 \cdot 10^{-3}$ g/cm² (pari a 2 centimetri). Essi non contribuiscono pertanto alla dose.

Esercizio 5

Una sorgente di neutroni ha una energia $E_1 = 0.1$ MeV ed una intensità $I = 10^7$ neutroni al secondo. Calcolare l'intensità di kerma a 1 metro, l'intensità di dose assorbita in condizioni di equilibrio e l'intensità di equivalente di dose in tessuto biologico. Ripetere il calcolo per neutroni di energia $E_2 = 0.7$ MeV.

Dal grafico di figura 18.8 ricaviamo:

$$\text{per } E_1 = 0.1 \text{ MeV: } \text{kerma}/\Phi = 6 \cdot 10^{-8} \text{ erg cm}^2 \text{ g}^{-1} = 6 \cdot 10^{-10} \text{ rad cm}^2$$

$$\text{per } E_2 = 0.7 \text{ MeV: } \text{kerma}/\Phi = 2 \cdot 10^{-7} \text{ erg cm}^2 \text{ g}^{-1} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ rad cm}^2$$

Il flusso ad un metro dalla sorgente di neutroni vale:

$$\Phi = \frac{I}{4\pi d^2} = 79.6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Il kerma allora vale:

$$\text{kerma} = \Phi \cdot 6 \cdot 10^{-10} \text{ rad/s} = 4.8 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s} = 0.17 \text{ mrad/h} = 47.2 \text{ } \mu\text{Gy/s} \quad (E_1 = 0.1 \text{ MeV})$$

$$\text{kerma} = \Phi \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ rad/s} = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ rad/s} = 0.58 \text{ mrad/h} = 161 \text{ } \mu\text{Gy/s} \quad (E_2 = 0.7 \text{ MeV})$$

In condizioni di equilibrio elettronico si ha che $\dot{D} \equiv \text{kerma}$

Quanto all'intensità di equivalente di dose, sappiamo che: $\dot{H} = \dot{D}Q$

Dove Q è il fattore qualità e vale in questo caso 10.

$$\dot{H} = \dot{D}Q = 1.7 \text{ mrem/h} = 472 \text{ } \mu\text{Sv/s} \quad (E_1 = 0.1 \text{ MeV})$$

$$\dot{H} = \dot{D}Q = 5.8 \text{ mrem/h} = 1610 \text{ } \mu\text{Sv/s} \quad (E_2 = 0.7 \text{ MeV})$$

Esercizio 6

Un uomo viene investito da un flusso di 10^8 neutroni cm⁻² di energia compresi tra 5 e 10 MeV. Calcolare la dose ricevuta.

Ricordando il grafico di figura 18.9 (riportato qui sotto) si vede che un flusso di 6.8 neutroni cm⁻²s⁻¹ di energia tra 5 e 10 MeV corrisponde ad un equivalente di dose di 1 mrem/h, corrispondenti a $2.78 \cdot 10^{-7}$ rem/s.

Eliminando il tempo, un flusso integrato $\Phi^* = 6.8$ neutroni cm⁻² produce un equivalente di dose $H^* = 2.78 \cdot 10^{-7}$ rem. Nel nostro caso:

$$H = H^* \frac{\Phi}{\Phi^*} = 2.78 \cdot 10^{-7} \frac{10^8}{6.8} = 4.1 \text{ rem} = 41 \text{ mSv}$$

Analogo risultato si sarebbe ottenuto ragionando in termini di kerma ed utilizzando la figura 18.8.

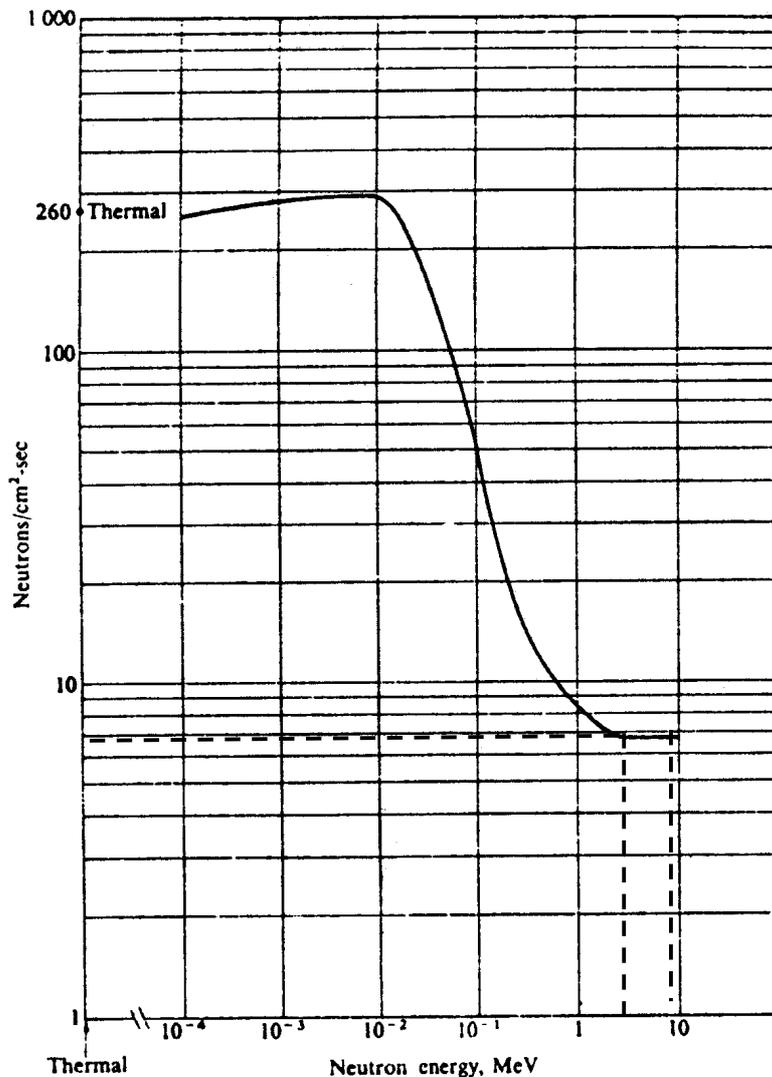


Fig. 18.16 Intensità di fluena neutronica corrispondente ad $\dot{H} = 1 \text{ mrem/h}$

Esercizio 7

Una sorgente da 1 Curie di $^{226}\text{Ra-Be}$ produce 10^8 neutroni al secondo dalla reazione:
 $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$

L'energia dei neutroni è compresa tra 1 e 13 MeV. La sorgente mette anche raggi gamma di energia media pari ad un MeV ed il numero medio di fotoni per neutrone prodotto vale 350. Un lavoratore per spostare la sorgente usa un'asta così da mantenere la sorgente ad una distanza media $d = 2.5 \text{ m}$ dal corpo. Sapendo che

l'operazione di spostamento dura un minuto, valutare l'equivalente di dose assorbita dal lavoratore.

Dobbiamo calcolare: $H_{\text{tot}} = (H_{\gamma} + H_n) \Delta t$

Le intensità di flusso di neutroni e fotoni sono le seguenti:

$$\varphi_n = \frac{10^8}{4\pi 250^2} = 130 \frac{n}{\text{cm}^2 \text{ s}} \quad \varphi_{\gamma} = 350 \cdot \varphi_n = 4.5 \cdot 10^4 \frac{\gamma}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

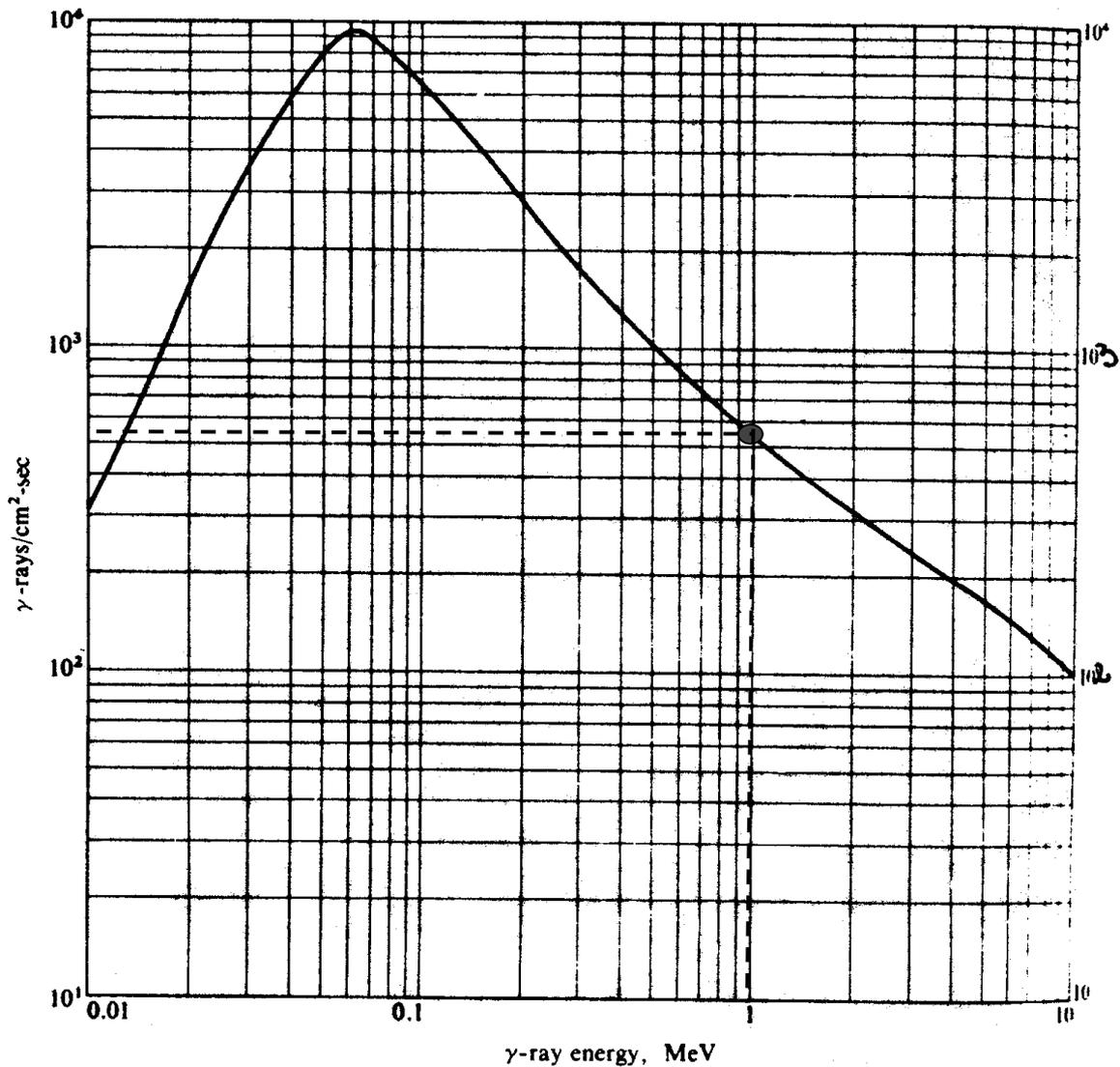


Fig. 18.17 intensità di fluenza di fotoni ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) di energia E_{γ} corrispondente ad una intensità di Esposizione pari ad 1 mR/h

Dal grafico di figura 18.17 si deduce che $\dot{X}^* = 1 \text{ mR/h}$ è prodotto da $\varphi_{\gamma}^* = 550$ fotoni $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ da 1 MeV. Pertanto l'intensità di esposizione nel nostro caso è:

$$\dot{X} = \dot{X}^* \frac{\phi_\gamma}{\phi_\gamma^*} = 80 \text{ mR/h} \quad \dot{D}_\gamma = 0.874 \cdot \dot{X} = 70 \text{ mrad/h} \quad \dot{H}_\gamma = \dot{D}_\gamma \cdot Q = 70 \text{ mrem/h}$$

$$H_\gamma = \dot{H}_\gamma \cdot \Delta t = 70/60 = 1.165 \text{ mrem}$$

Per quanto riguarda la dose da neutroni, si procede come segue:

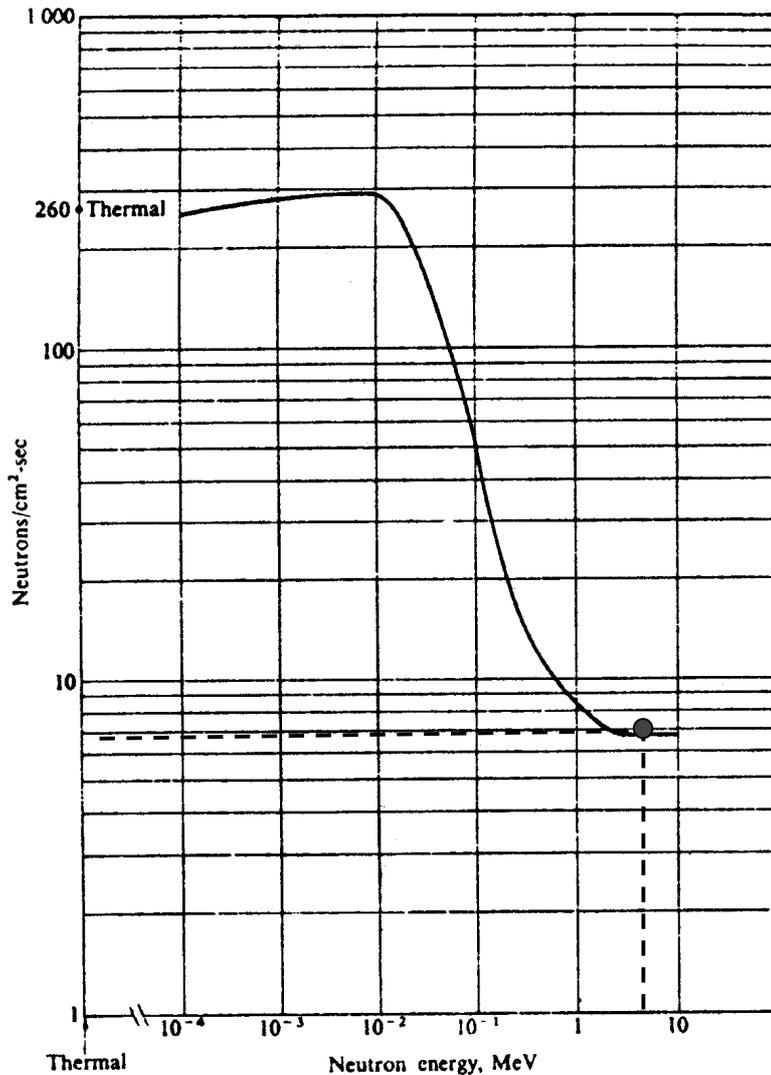


Fig. 18.18 Intensità di fluensa neutronica corrispondente ad $\dot{H} = 1 \text{ mrem/h}$

Dal grafico di figura 18.18 si ricava che un flusso di 6.8 neutroni $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ di energia 5 MeV corrisponde ad un equivalente di dose di 1 mrem/h, Nel nostro caso specifico l'intensità di equivalente di dose si ricava dalla solita relazione:

$$\dot{H}_n = \dot{H}_n^* \frac{\phi_n}{\phi_n^*} = 1 \frac{130}{6.8} = 19 \text{ mrem/h}$$

$$H_n = \dot{H}_n \cdot \Delta t = 19/60 = 0.32 \text{ mrem}$$

L'equivalente di dose totale risulta :

$$H_{\text{tot}} = H_{\gamma} + H_n = (1.16 + 0.32) \text{ mrem} = 1.48 \text{ mrem} = 0.0148 \text{ mSv}$$

Anche in questo caso si può verificare che si ottiene lo stesso risultato utilizzando il grafico del kerma.

Esercizio 8

Calcolare \dot{D} e \dot{H} dell'esercizio 1 usando la formula analitica dell'intensità di dose per particelle cariche:

$$\dot{D} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \cdot \varphi$$

e confrontare i risultati con i due metodi.

Per elettroni in acqua si ricava che: $\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)_{\text{acqua}} = 2.1 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1} = 3.36 \cdot 10^{-14} \text{ J m}^2$

kg^{-1} .

Quanto al flusso:

$$\varphi = 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{12} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Pertanto:

$$\dot{D} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \cdot \varphi = 3.36 \cdot 10^{-2} \text{ J kg}^{-1}/\text{s} = 3.36 \cdot 10^{-2} \text{ Gy/s} = 33.6 \text{ mGy/s}$$

$$\dot{H} = \dot{D} Q = 33.6 \text{ mSv/s}$$

da confrontare con il valore di 35 mSv/s ottenuto graficamente nell'esercizio 1.