



BIOFIZYKA RADIACYJNA

wykład #4

Krzysztof Wojciech Fornalski



Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

**NA NASTĘPNYM WYKŁADZIE
(TJ. 8.11) ODBĘDZIE SIĘ
KOŁOKWIUM NR 1
OD GODZ. 8:25**

**TYDZIEŃ WCZEŚNIEJ (1.11)
I PÓŹNIEJ (15.11) NIE MA
WYKŁADU**



PRZYPOMNIENIE Z POPRZEDNIEGO WYKŁADU

Współczynnik osłabienia promieniowania

- ◆ Kluczowa wielkość przy problematyce osłon przeciwradiacyjnych
- ◆ Zależy wprost od przekroju czynnego:

$$\mu = \sigma N$$

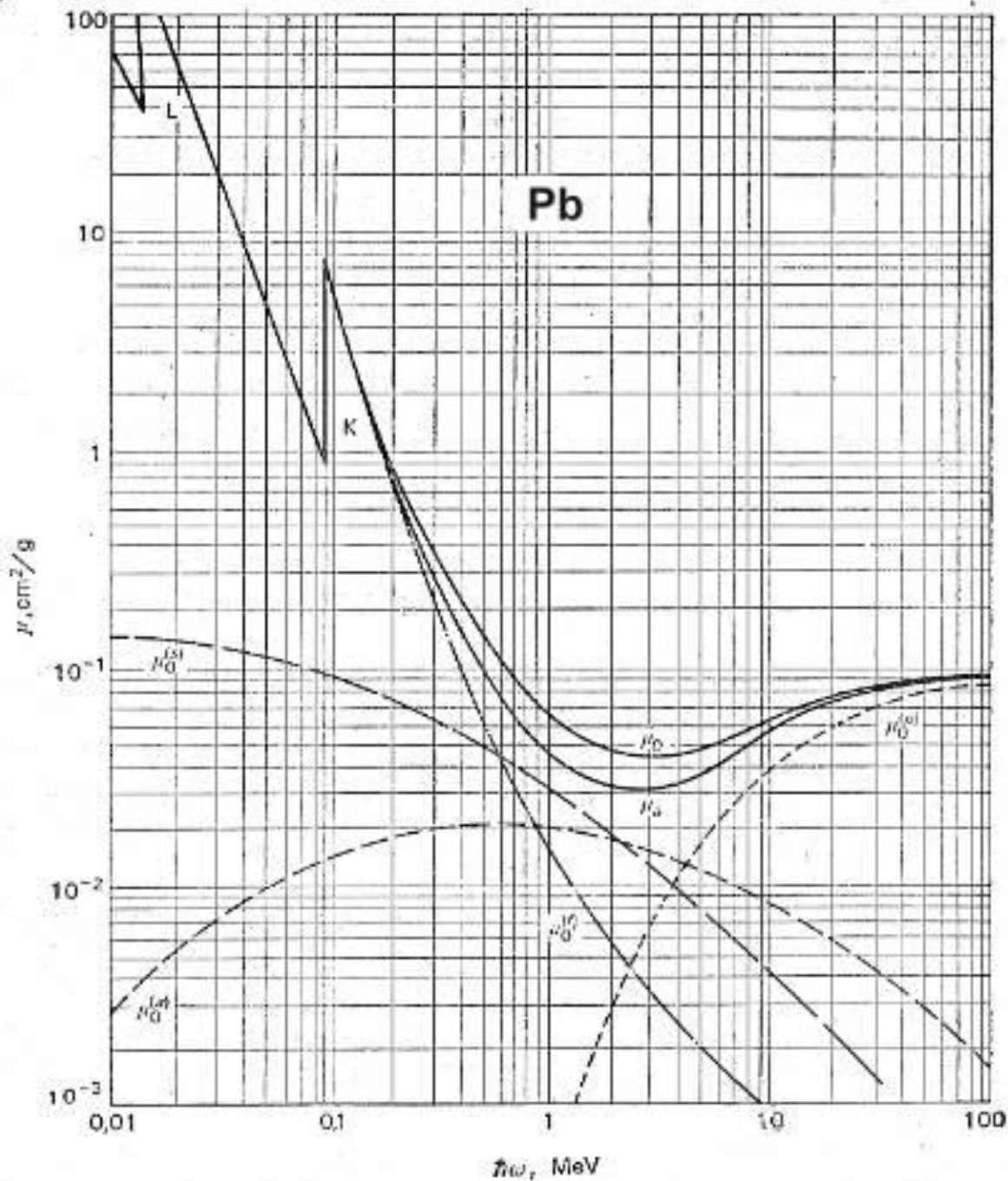
- ◆ Wykres jest identyczny (co do kształtu) jak dla przekrojów czynnych
- ◆ Masowy współczynnik osłabienia:

$$\mu_d = \mu / \rho$$

Linijowe współczynniki osłabienia [wyrażone w cm^{-1}] dla wody, betonu i ołowiu w przedziale energii promieniowania gamma od 0,1 do 10 MeV

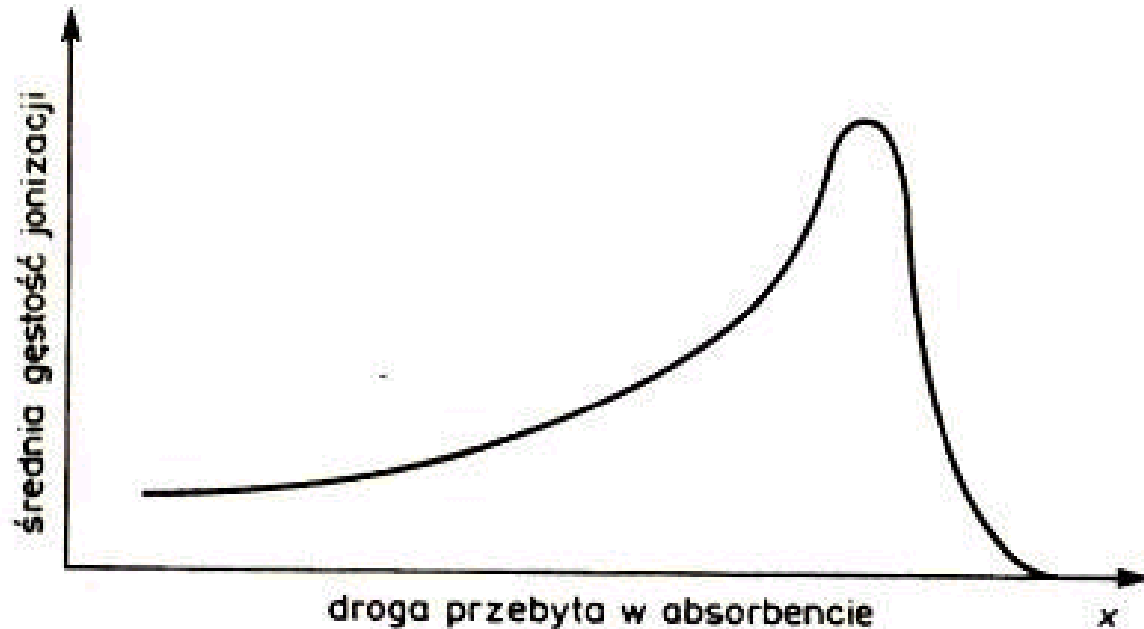
Energia promieniowania [MeV]	Ołów ($11,34 \text{ g/cm}^3$)	Beton ($2,3 \text{ g/cm}^3$)	Woda ($1,0 \text{ g/cm}^3$)
0,1	60,0	0,378	0,171
0,2	11,8	0,275	0,137
0,3	4,76	0,236	0,119
0,5	1,72	0,194	0,097
0,7	1,12	0,167	0,0885
1,0	0,79	0,141	0,0706
2,0	0,51	0,100	0,0493
3,0	0,46	0,080	0,0396
5,0	0,49	0,064	0,0302
7,0	0,53	0,060	0,0256
10,0	0,60	0,053	0,0221

Masowy
współczynnik
osłabienia
promieniowania dla
ołowiu
(wykres analogiczny
do przekroju
czynnego!)



Krzywa Bragga

Rys. 2.5. Gęstość jonizacji wywołanej przez cząstkę naładowaną w zależności od jej drogi w absorbencie (krzywa Bragga)



Na początkowym odcinku toru straty są stosunkowo niewielkie, następnie rosną w pobliżu końca toru cząstki w materii. Natychmiast nasuwa się możliwość zastosowania tej zależności dla celów radioterapii.



OSŁONY PRZECIWRADIACYJNE WARSTWA PÓŁCHŁONNA

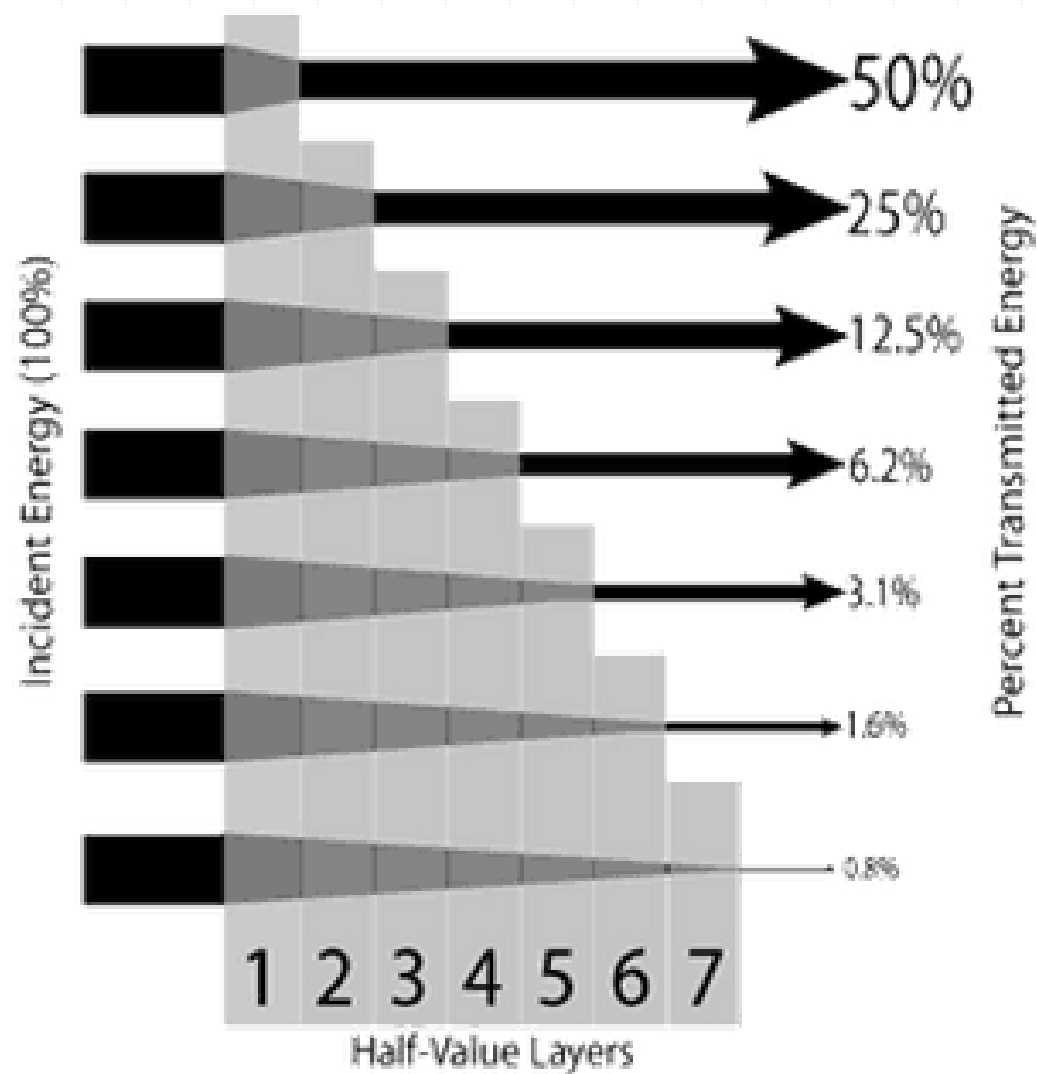
Warstwa półchłonna HVL

- ◆ Warstwa półchłonna (*half-value layer*, **HVL**), inaczej **grubość połówkowa** lub **warstwa połowiąca** – oznacza grubość danego materiału, który osłabia o połowę natężenie przechodzącego promieniowania
- ◆ Wartości HVL dla różnych materiałów i energii fotonów (napięć na lampie) są różne
- ◆ Ogólnie: $HVL = \ln 2 / \mu$; μ – współcz. osłabienia
- ◆ Analogicznie istnieje warstwa dziesięciochłonna (TVL) osłabiająca natężenie 10 razy

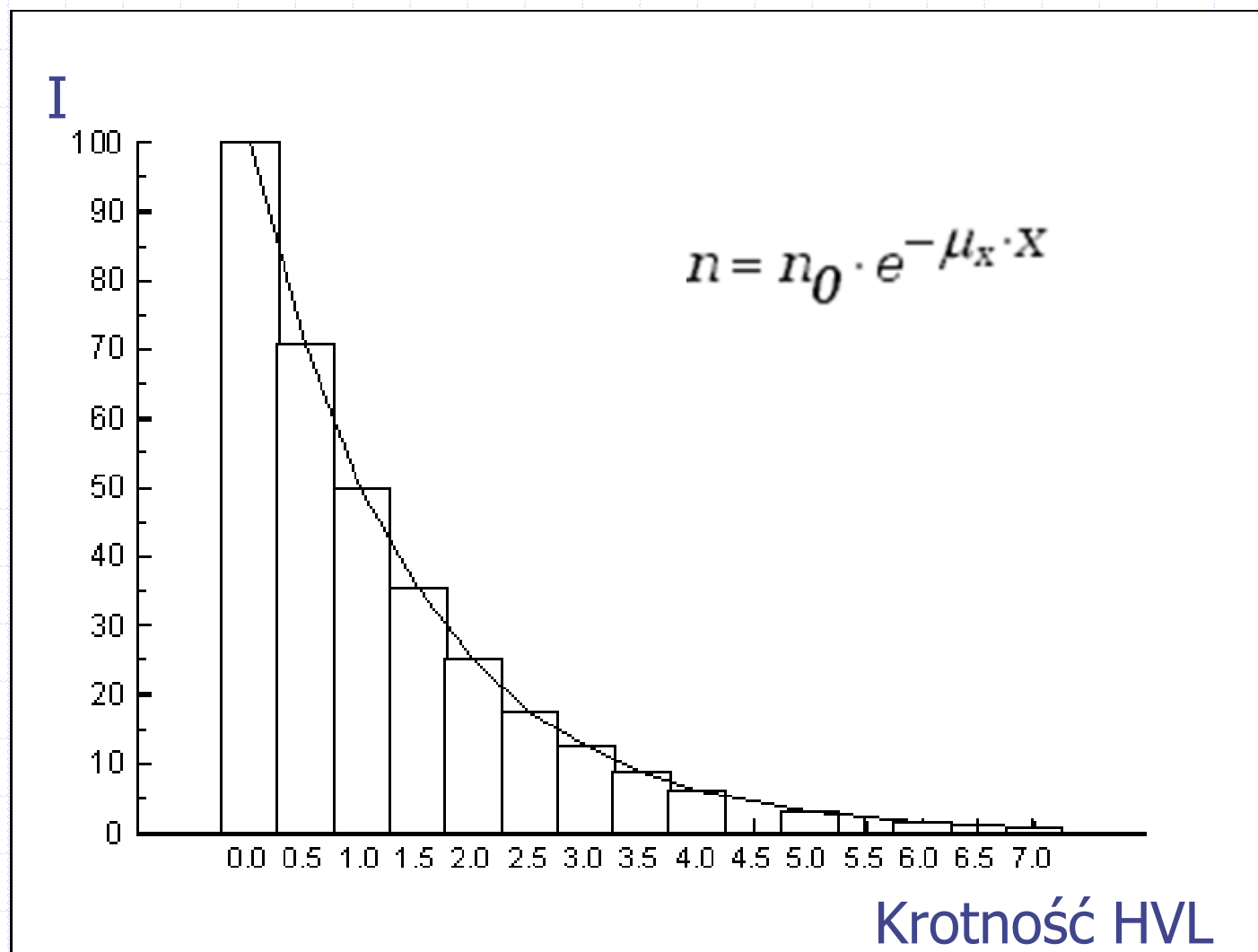
HVL

- ◆ W wyniku zastosowania warstw pochłaniających zmienia się widmo promieniowania, gdyż pochłaniane są głównie fotony niskoenergetyczne (prom. miękkie)
- ◆ Widmo po przejściu HVL zawiera więcej tzw. twardego promieniowania X, przez co ewentualna druga warstwa półchłonna musi być grubsza od pierwszej, trzecia od drugiej etc.
- ◆ **Współczynnik jednorodności promieniowania**
$$J = HVL1/HVL2$$

HVL



HVL



Odwrotność masowego współczynnika pochłaniania

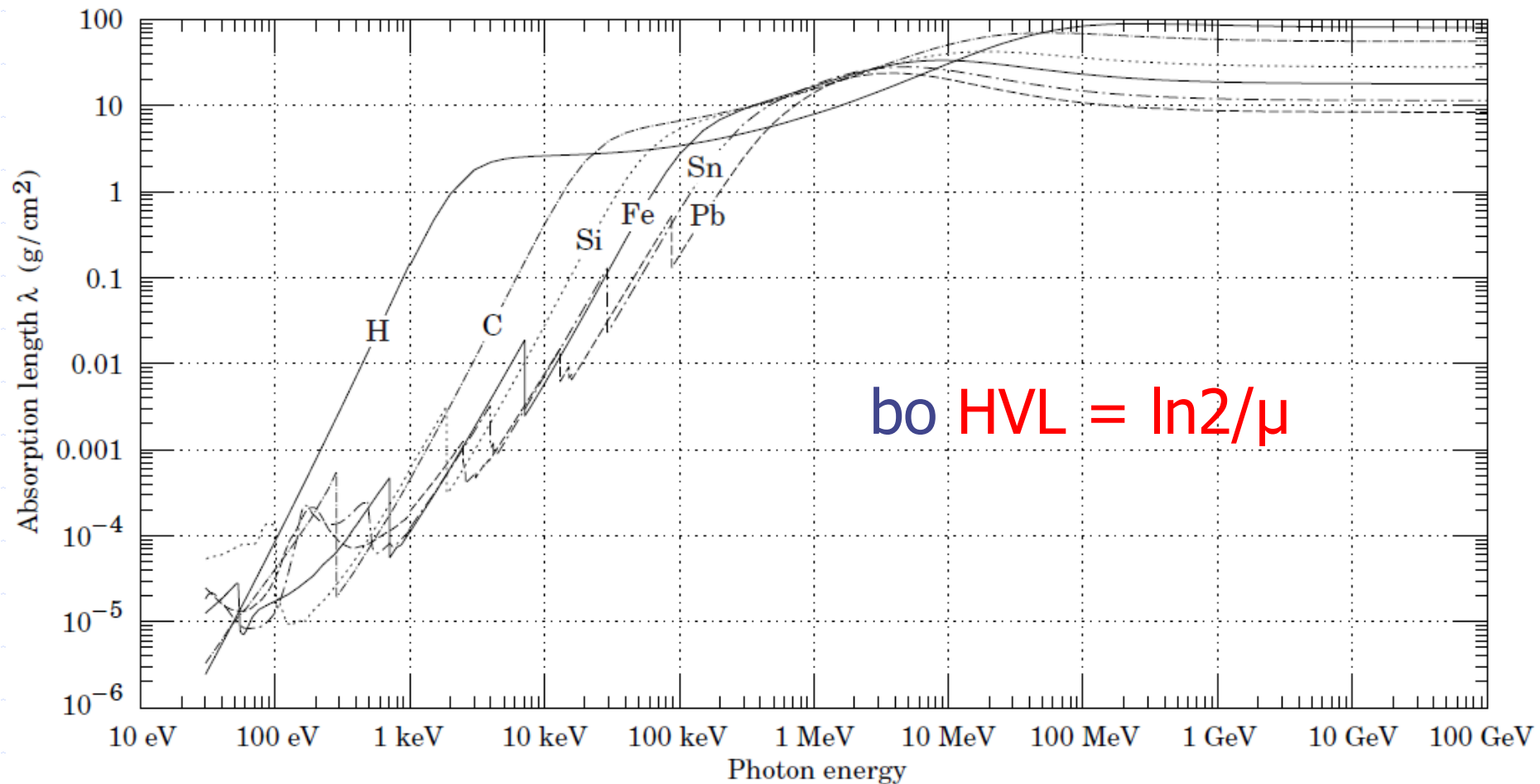


Figure 33.18: The photon mass attenuation length (or mean free path) $\lambda = 1/(\mu/\rho)$ for various elemental absorbers as a function of photon energy. The mass attenuation coefficient is μ/ρ , where ρ is the density.

Przykładowe zadania obliczeniowe

(z egzaminów na uprawnienia inspektora ochrony radiologicznej typu R)

- 1) Wiązka monoenergetycznych fotonów uległa pochłonięciu $k=8$ krotnie na materiale o grubości 6 mm. Ile wynosi HVL dla tego przypadku?
- 2) Urządzenie pomiarowe rejestruje 1000 zliczeń fotonów na sekundę od źródła za osłoną o grubości 1 cm. Wiedząc, że $HVL=2$ mm oblicz liczbę zliczeń dla osłony 0,4 cm.



DOZYMETRIA

AKTYWNOŚĆ, STĘŻENIE, FLUENCJA

Aktywność

- ◆ A = ilość rozpadów (przemian) promieniotwórczych w jednostce czasu
- ◆ Aktywność A mierzymy w bekerelach [Bq] (od H. Becquerela – odkrywcy promieniotwórczości)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$$

Aktywność – c.d.

- ◆ Historycznie pierwszą jednostką aktywności był kiur [Ci] (od M. Skłodowskiej-Curie), równy aktywności 1 grama radu-226

$$1 \text{ Ci} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

- ◆ kiur jest jednostką bardzo dużą, bekerel małą

Aktywność – c.d.

- ◆ **Aktywność właściwa** – jest to aktywność w stosunku do masy, objętości lub powierzchni emitującej cząstki
- ◆ Aktywność właściwa jest wygodna przy porównaniu aktywności różnych substancji przy np. różnych masach czy gabarytach
- ◆ Np. dla radu-226 aktywność właściwa wynosi $37 \text{ GBq/g} = 1 \text{ Ci/g}$

Stężenie

- ◆ Stężenie aktywności źródła jest to aktywność właściwa w masie:

$$a = S = A / m$$

Stosuje się tej wielkości do obliczania ekspozycji od np. chmury radioaktywnej czy bezwzględnemu porównaniu źródeł

Aktywność w czasie

- ◆ Na podstawie prawa rozpadu można zapisać bardziej ogólną formułę na aktywność źródła po czasie t :

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

gdzie λ to stała rozpadu, a A_0 to aktywność początkowa

Aktywność w czasie

- ◆ Pamiętając, że $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ można zapisać:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

- ◆ W przypadku skażeń wewnętrznych mówimy o aktywności wnिकniętej po czasie t:

$$A_w = \frac{A_z}{f_R(t) e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}}$$

- ◆ A_z – aktywność obecna; f – krzywa retencji (funkcja charakteryzująca usuwanie z organizmu danego izotopu)

Aktywności przykładowych źródeł promieniowania

Źródło	Aktywność [Bq]
„Człowiek umowny”	$8 \cdot 10^3$
1 kg kawy	$1 \cdot 10^3$
1 kg nawozu superfosfatowego	$5 \cdot 10^3$
Radon w powietrzu w pomieszczeniu o powierzchni 100 m ²	$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$
Czujka dymu	$3 \cdot 10^4$
Radiofarmaceutyk dla diagnostyki medycznej	$7 \cdot 10^7$
Źródło izotopowe dla terapii	$1 \cdot 10^{14}$
1 kg 50-letniego, zeszkłonego wysokoaktywnego promieniotwórczego odpadu	$1 \cdot 10^{13}$
Świetlny znak wyjścia (z lat 1970.)	$1 \cdot 10^{12}$
1 kg uranu	$25 \cdot 10^6$
1 kg kanadyjskiej rudy uranowej	$25 \cdot 10^6$
1 kg australijskiej rudy uranowej	$0,5 \cdot 10^6$
1 kg niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych	$1 \cdot 10^6$
1 kg popiołu po spaleniu węgla	$2 \cdot 10^3$
1 kg granitu	$1 \cdot 10^3$

FLUENCJA CZĄSTEK (Φ)

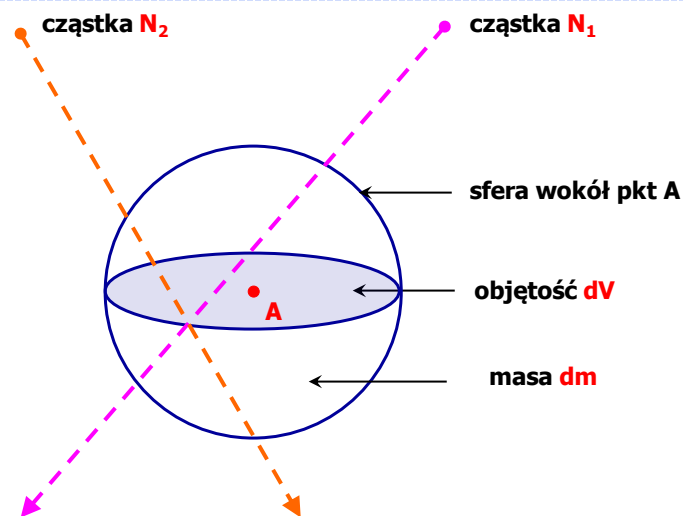
ang. fluence; particle fluence

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

gdzie dN jest liczbą cząstek, które weszły do kuli o polu wielkiego koła da Jednostka: [m^{-2}]

Jeżeli do punktu A dochodzą dwie wiązki promieniowania od źródeł S_1 i S_2 , to wynikowa fluencja Φ w punkcie A jest równa sumie fluencji Φ_1 i Φ_2 promieniowania odpowiednich źródeł.

Taka reguła otrzymywania wynikowej fluencji w pewnym punkcie przestrzeni ma zastosowanie dla dowolnej liczby wiązek promieniowania dochodzących do tego punktu z różnych kierunków.



GĘSTOŚĆ STRUMIENIA CZĄSTEK (φ)

ang. particle flux density

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt}$$

Działanie $d\Phi$ po dt , gdzie $d\Phi$ jest przyrostem fluencji cząstek w przedziale czasu dt

Jednostka: $[m^{-2} s^{-1}]$

ENERGIA PRZEKAZANA (ϵ)

ang. energy imparted to matter

Jest to energia przekazana przez promieniowanie jonizujące materii w danej objętości

$$\epsilon = \sum R_{\text{in}} - \sum R_{\text{out}} + \sum Q$$

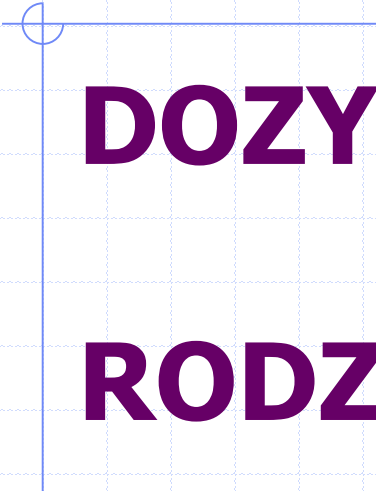
Jednostka: [J]

gdzie:

$\sum R_{\text{in}}$ – suma energii, z wyjątkiem energii spoczynkowej cząstek jonizujących, które weszły do danego obszaru;

$\sum R_{\text{out}}$ – suma energii, z wyjątkiem energii spoczynkowej cząstek jonizujących, które wyszły z danego obszaru;

$\sum Q$ – różnica energii uwolnionej w przemianach jąder i cząstek elementarnych, jakie dokonały się w danym obszarze i energii zużytej na wywołanie tych przemian.



DOZYMETRIA

RODZAJE DAWEK

Najważniejsze definicje są trzy

- ◆ **Dawka pochłonięta**, D – energia zdeponowana w masie, mierzymy w Grejach [Gy]
- ◆ **Dawka równoważna**, H – to dawka pochłonięta z uwzględnieniem czynnika wagowego biologicznej skuteczności promieniowania, mierzymy ją w Siwertach [Sv] i odnosimy do konkretnego narządu/części ciała
- ◆ **Dawka skuteczna (efektywna)**, E – to dawka równoważna z uwzględnieniem współczynnika wagowego dla narządu, odnosi się do narażenia na całe ciało; mierzymy ją także w [Sv]
- ◆ Ale omówmy wszystko po kolei...

Dawka ekspozycyjna

(jednostka historyczna)

◆ inaczej **ekspozycja**: ładunek jonów
wytworzonych przez promieniowanie X
lub gamma w jednostce masy
powietrza:

$$X = Q / m \quad [C / kg] \quad [C = \text{kulomb}]$$

Dawka ekspozycyjna

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

- ◆ Jednostką historyczną jest rentgen [R]
- ◆ 1 R jest równy dawce ekspozycyjnej od fotonów wytwarzających w 1 cm³ powietrza (0,0013 g) jedną jednostkę elektrostatyczną jonów każdego znaku
- ◆ Innymi słowy ekspozycja to miara jonizacji powietrza

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg powietrza}$$

Dawka ekspozycyjna

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

- ◆ Ekspozycję można przeliczyć na kermę w powietrzu (będzie o tym mowa):

$$1R = 8,77 \text{ mGy}$$

- ◆ Stąd właśnie wywodzi się używany powszechnie przy obliczaniu dawek przelicznik z powietrza na tkankę:

$$1 \text{ Gy}_{\text{tkanka}} = 0,87 \text{ Gy}_{\text{powietrze}}$$

$$1 \text{ Gy}_{\text{powietrze}} = 1,15 \text{ Gy}_{\text{tkanka}}$$

Uzasadnienie

Do kermy jest wliczana cała energia wtórnych cząstek naładowanych (elektronów), natomiast wkład do dawki ekspozycyjnej daje tylko ta część energii, która jest tracona na jonizację.

Przy przeliczeniach **kerma w powietrzu** $\Rightarrow$ **ekspozycja** trzeba więc odjąć „straty” energii na promieniowanie hamowania.

$$\frac{X}{K_a} = (1-g) \frac{Q}{E_{tr}} = (1-g) \frac{n \cdot e}{n \cdot W} = (1-g) \frac{e}{W} = \frac{(1-g)}{W/e}$$

Gdzie **W** - średnia energia tracona przez elektron na wytworzenie pary jonów w powietrzu

e - ładunek elektronu

n - liczba wytworzonych jonów.

Dla prędkich elektronów w suchym powietrzu $W = 33,97$ eV, czyli:

$$W/e = 33,97 \text{ J C}^{-1}$$

Ponieważ $1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$, więc

$$\frac{X[R]}{K_a [\text{mGy}]} = \frac{(1-g) \cdot 10^{-4}}{33,97 \cdot 2,58 \cdot 10^3} = \frac{(1-g)}{8,76}$$

Praktycznie, przy zastosowaniach medycznych czynnik **g** ma niewielkie znaczenie, gdyż dla fotonów do energii ok. 1,5 MeV przyjmuje się

$$(1-g)=1.$$

Dawka pochłonięta

- ◆ Jest to energia promieniowania zdeponowana w jednostce masy napromienionej substancji:

$$D = d\varepsilon / dm$$

Uwaga! ε już wcześniej zdefiniowaliśmy!

- ◆ Jednostka: **grej** [Gy] $\rightarrow 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
- ◆ Jest to najbardziej fizyczne pojęcie dawki

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

Dawka pochłonięta

- ◆ Historyczną jednostką dawki pochłoniętej jest **rad** (*radiation absorbed dose*):

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg} / \text{g} = 0,01 \text{ Gy} = 1 \text{ cGy}$$

- ◆ Dla promieniowania gamma/X w powietrzu: $1 \text{ R} = 0,00876 \text{ Gy}$

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

Dawka pochłonięta

- ◆ Dawkę pochłoniętą możemy odnosić do całego ciała, jednakże najczęściej spotykamy pojęcie dawki pochłoniętej w konkretnym narządzie/tkance (D_T)
- ◆ W rentgenodiagnostyce spotyka się także pojęcie dawki powierzchniowej, oznaczającej dawkę pochłoniętą w powietrzu, tuż przed skórą, w polu o zadanej powierzchni

KERMA

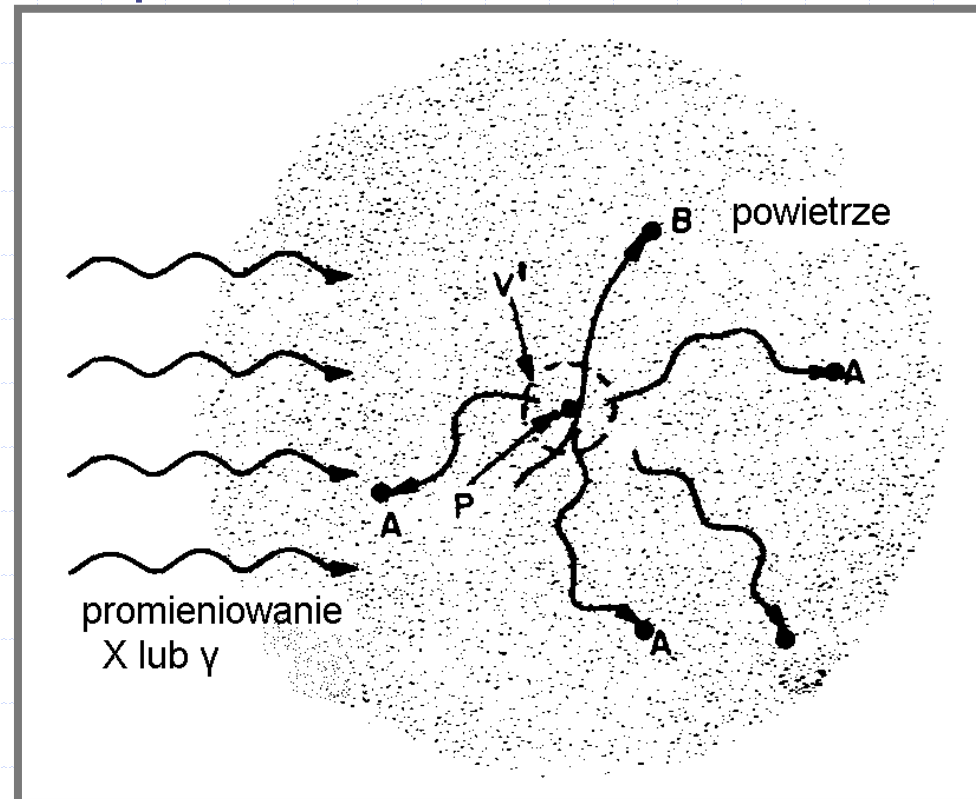
◆ KERMA = Kinetic Energy Released in Unit Mass:

$$K = dE_{\text{kin}} / dm \text{ [Gy]}$$

gdzie dE_{kin} to suma początkowych energii kinetycznych cząstek naładowanych wytworzonych w elemencie materii przez promieniowanie jonizujące pośrednio (a więc np. fotony i neutrony). Najczęściej używamy pojęcia kermy w powietrzu.

KERMA

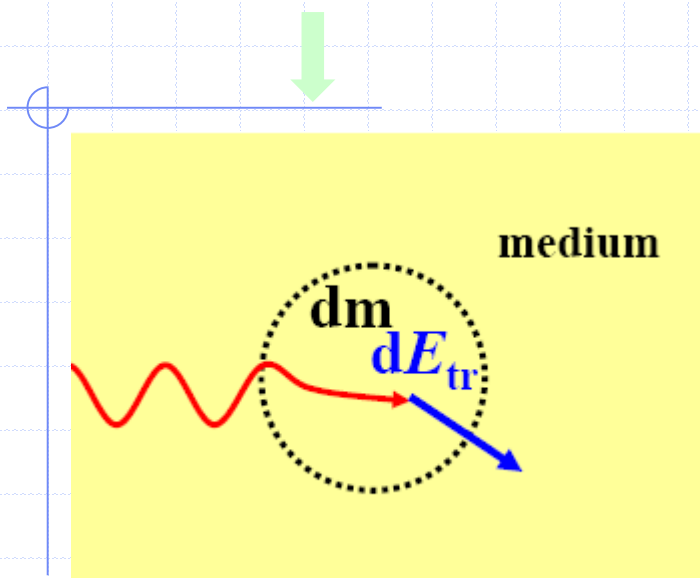
- ◆ Suma energii kinetycznej wszystkich cząstek naładowanych uwolnionych przez promieniowanie w masie dm danej substancji, czyli np. suma energii kinetycznych elektronów dla promieniowania fotonowego
- ◆ Jednostką kermy jest grej (analogicznie jak dawki pochłoniętej)



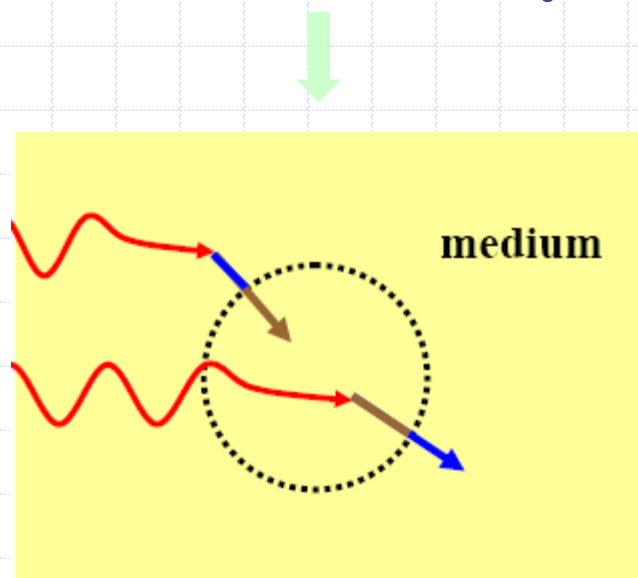
KERMA

a

DAWKĄ POCHŁONIĘTĄ



Do kermy wliczamy całkowitą energię cząstek naładowanych wygenerowanych w masie dm (oznaczoną niebieską strzałką)



Do dawki pochłoniętej wliczamy energię cząstek naładowanych pozostawioną w masie dm (oznaczone brązowym kolorem)

Dawka równoważna (na narząd)

- ◆ Dawka równoważna to dawka pochłonięta D_T w narządzie/tkance, uwzględniająca efektywność biologiczną różnych typów promieniowania:

$$H = w_R D_{T,R} \text{ [Sv]}$$

gdzie w_R to współczynnik wagowy biologicznej efektywności promieniowania

W_R
w zależności
od typu
promieniowania

Rodzaj i zakres energii promieniowania	W_R
Fotony gamma o dowolnej energii	1
Elektrony i miony o dowolnej energii	1
Neutrony o energiach:	
< 10 keV	5
10 – 100 keV	10
0,1 – 2 MeV	20
2 – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protony o energii > 2 MeV (bez protonów odrzutu)	5
Cząstki α , ciężkie jony, fragmenty rozszczepienia	20

Nowe zalecenia ICRP

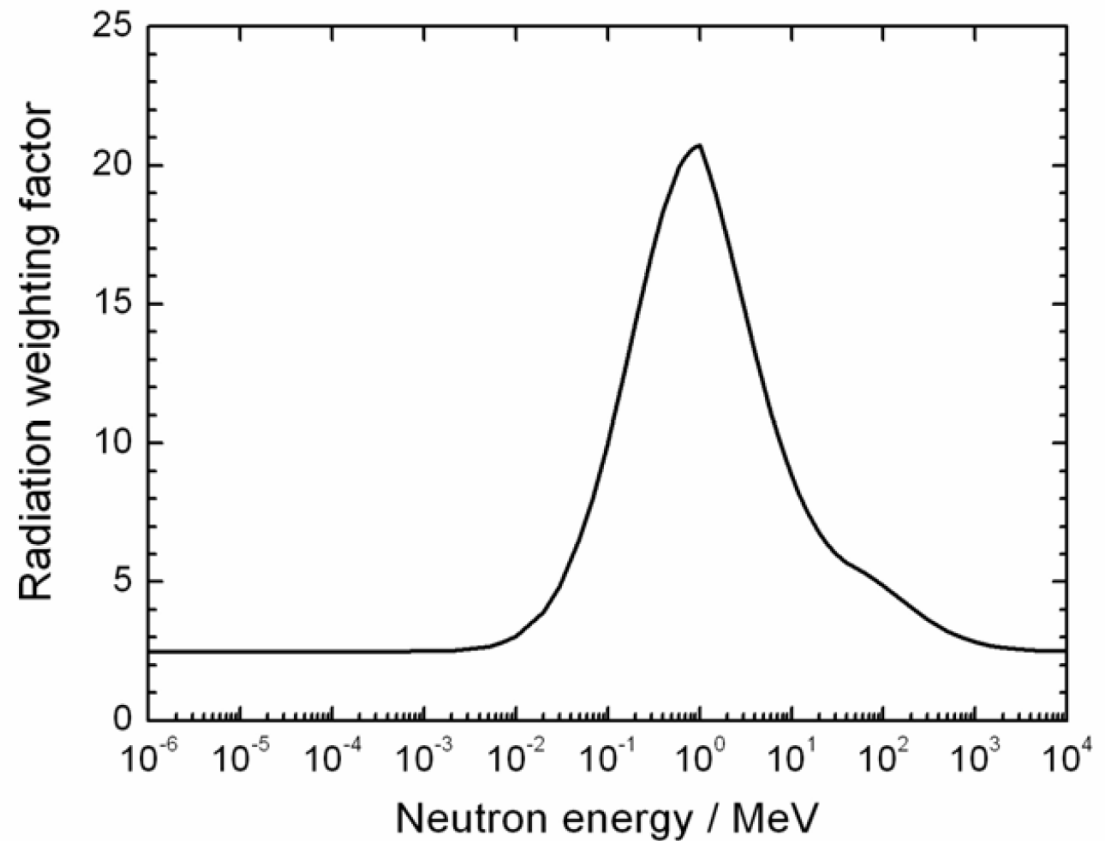
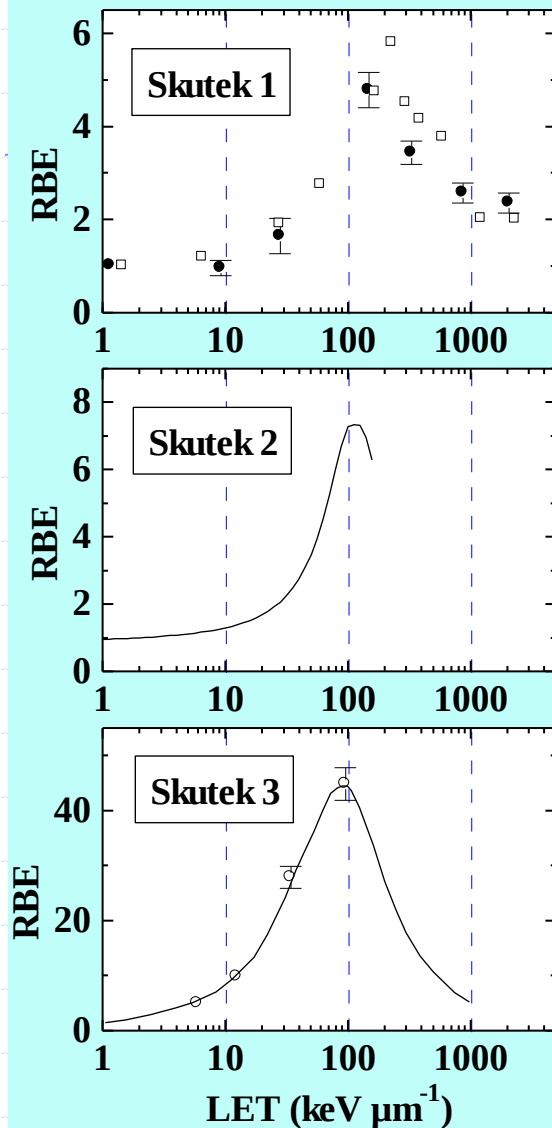
(International Commission of Radiological Protection) – jeszcze w Polsce nie obowiązują

Tabela 3. Wartości czynnika wagowego promieniowania w_R wg. zaleceń ICRP[3]

Rodzaj promieniowania	Czynnik wagowy promieniowania w_R
Fotony, elektrony i miony	1
Protony i naładowane piony	2
Cząstki alfa, fragmenty rozszczepienia, ciężkie jony	20
Neutrony	Ciągła funkcja energii

Neutrony $E < 1 \text{ MeV}$	$2,5 + 18,2 e^{-[\ln(E)]^2/6}$
Neutrony $1 \text{ MeV} \leq E \leq 50 \text{ MeV}$	$5 + 17 e^{-[\ln(2E)]^2/6}$
Neutrony $E > 50 \text{ MeV}$	$2,5 + 3,25 e^{-[\ln(0,04E)]^2/6}$

uzasadnienie



$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2 e^{-[\ln(E_n)]^2 / 6} & , \quad E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0 e^{-[\ln(2 E_n)]^2 / 6} & , \quad 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25 e^{-[\ln(0.04 E_n)]^2 / 6} & , \quad E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

Dawka równoważna – c.d.

- ◆ Dla odróżnienia dawki równoważnej od pochłoniętej wprowadzono nową jednostkę **siwert** [Sv] (niefizyczna!)
- ◆ Stara jednostka: **rem** (*radiation equivalent man*) $\rightarrow 1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} = 1 \text{ cSv}$

UWAGA!

- ◆ Dla promieniowania gamma oraz beta:
 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv} \quad !! \text{ (w tkance) bo } w_R = 1$
- ◆ Dla promieniowania alfa: $1 \text{ Gy} = 20 \text{ Sv}$

Dawka równoważna – c.d.

- ◆ Jeżeli pole promieniowania składa się z różnych rodzajów promieniowania o różnych wartościach w_R , to całkowita dawka pochłonięta musi być podzielona na odpowiednie składowe, z których każda jest związana z konkretną wartością w_R :

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Dawka skuteczna (efektywna)

- ◆ Odnosi się do skutku biologicznego na całe ciało
- ◆ Radioczułość (promieniowrażliwość) poszczególnych tkanek i narządów jest inna
- ◆ Dawka skuteczna jest równa dawce równoważnej mnożonej przez czynnik wagowy dla narządu:

$$E = \sum w_T H_T = \sum w_T \sum w_R D_{T,R} [Sv]$$

Dawka skuteczna (efektywna)

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

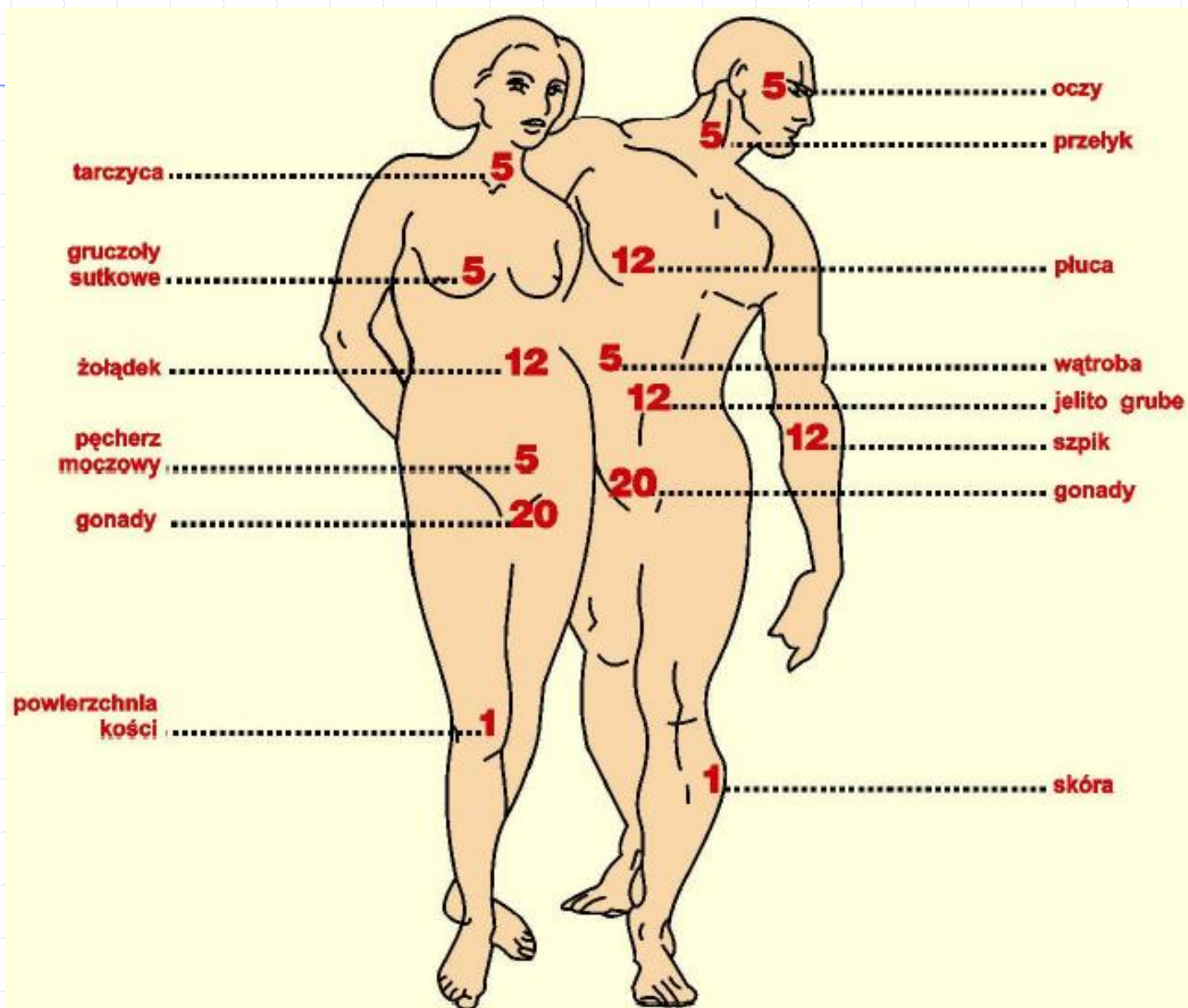
- ◆ Dawka efektywna jest podstawową wielkością stosowaną do oceny ryzyka przy napromienieniu całego ciała oraz w przepisach prawnych limitujących narażenie na promieniowanie
- ◆ Jednostka: także siwert [Sv]

Obowiązujące
współczynniki w_T w
zależności od typu
narządu.

Uwaga: dla całego
ciała $w_T = 1$
→ dawka skuteczna
równa jest dawce
równoważnej

Narząd lub tkanka	w_T
Gruczoły płciowe (gonady)	0,20
Czerwony szpik kostny	0,12
Jelito grube	0,12
Płuca	0,12
Żołądek	0,12
Pęcherz moczowy	0,05
Gruczoły sutkowe	0,05
Wątroba	0,05
Przelyk	0,05
Tarczycyca	0,05
Skóra	0,01
Powierzchnia kości	0,01
Pozostałe	0,05
!!!!!! Całe ciało	1,00

w_T w procentach



Współczynniki w_T wg zaleceń ICRP z 2007 r.

Narząd lub tkanka	w_T	Σw_T
Szpik (czerwony), jelito grube, płuca, żołądek, pierś, pozostałe tkanki	0,12	0,72
Gonady	0,08	0,08
Pęcherz, trzustka, wątroba, tarczyca	0,04	0,16
Powierzchnia kości, mózg, ślinianki, skóra	0,01	0,04

Przykład obliczeń:

- ◆ Pacjent otrzymał dawkę równoważną na płuca równą 2 mSv
- ◆ W związku z tym dawka skuteczna (na całe ciało) pochodząca od tego narażenia wynosi:

$$E = w_T H = 0,12 * 2 \text{ mSv} = \mathbf{0,24 \text{ mSv}}$$

Inny przykład obliczeń:

- ◆ Człowiek wchłonał opary substancji alfa-promieniotwórczej, co przełożyło się na dawkę pochłoniętą **w** płucach równą $D = 5$ mGy
- ◆ Z racji tego, iż jest to promieniowanie alfa, otrzymał on dawkę równoważną **na** płuca równą $H = w_R D = 20 * 5 \text{ mGy} = 100 \text{ mSv}$
- ◆ W związku z tym dawka skuteczna (na całe ciało) pochodząca od tego narażenia wynosi:
 $E = w_T H = 0,12 * 100 \text{ mSv} = \mathbf{12 \text{ mSv}}$

Podsumowanie

**DAWKA
POCHŁONIĘTA**

**CZYNNIK WAGOWY
PROMIENIOWANIA**
 w_R

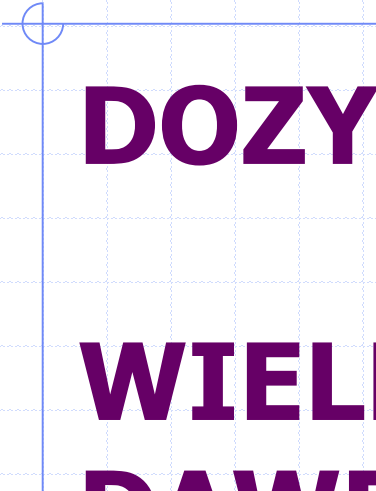
**DAWKA
RÓWNOWAŻNA**

**CZYNNIK WAGOWY
TKANKI w_T**

**DAWKA
SKUTECZNA
(EFEKTYWNA)**

Stare jednostki - zestawienie

	Jedn. dawniej stosowana	Jednostka współczesna	przelicznik
aktywność	kiur [Ci]	bekerel [Bq]	$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$
dawka ekspozycyjna	rentgen [R]	kulomb/kg [C/kg]	$1 \text{ R} = 0,258 \text{ mC/kg}$ $1 \text{ R} = 0,00876 \text{ Gy}$ $1 \text{ nA/kg} = 0,1224 \text{ mGy/h}$
dawka pochłonięta	rad [rad]	grej [Gy]	$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$
dawka równoważna lub skuteczna	rem [rem]	siwert [Sv]	$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$ $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$ dla prom. γ na całe ciało



DOZYMETRIA

WIELKOŚCI OPERACYJNE DAWEK

Czym są wielkości operacyjne?

- ◆ Podane wcześniej definicje dawki równoważnej i skutecznej są wielkościami obliczeniowymi – tzn. do obliczenia tych dawek zakładamy np. jednorodność pola promieniowania w danym narzędzie
- ◆ **W praktyce mierzy się dawki punktowe** (wyniki pomiarów dozymetrów!), a następnie zakłada się, że dawka zmierzona w danym punkcie odnosi się do narządu / całego ciała
- ◆ Innymi słowy: wielkości operacyjne dawek (tzw. równoważniki) są wynikami pomiarów dozymetrycznych w konkretnym ustalonym punkcie

Równoważnik dawki

- ◆ Na przykład: w praktyce dawka równoważna jest wielkością obliczaną na podstawie pomiaru równoważnika dawki
- ◆ Innymi słowy: to co mierzymy za pomocą przyrządów nazywa się **równoważnikiem dawki** w danym punkcie; z tego dopiero obliczamy **dawkę równoważną** w całym narzędzie
- ◆ W praktyce najczęściej przyjmuje się, iż **dawka równoważna = równoważnik dawki**

Równoważnik dawki – c.d.

- ◆ Dla określenia indywidualnego (osobowego) równoważnika dawki stosuje się symbol $H_p(d)$, gdzie „d” określa głębokość punktu w tkance
- ◆ Dla określenia narażenia na całe ciało dozymetry osobiste mierzą **skuteczny równoważnik dawki – $H_p(10)$**
- ◆ W praktyce najczęściej przyjmuje się, że **skuteczny równoważnik dawki równy jest dawce skutecznej (efektywnej)**

**DAWKA
POCHŁONIĘTA**

**WSPÓŁCZYNNIK
JAKOŚCI
PROMIENIOWANIA**
Q

**RÓWNOWAŻNIK
DAWKI**



WIELKOŚCI OPERACYJNE

Dla dozymetrów środowiskowych (promieniowanie przenikliwe, np. gamma/X)

Dla promieniowania słaboprzenikliwego (np. alfa, beta)

Dla dozymetrów osobistych (promieniowanie przenikliwe)

- przestrzenny równoważnik dawki $H^*(d)$
- kierunkowy równoważnik dawki $H'(d, \Omega)$
- indywidualny równoważnik dawki $H_p(d)$

I szczególny przypadek: **skuteczny równoważnik dawki** $H_p(10)$ dla szacowania dawki skutecznej

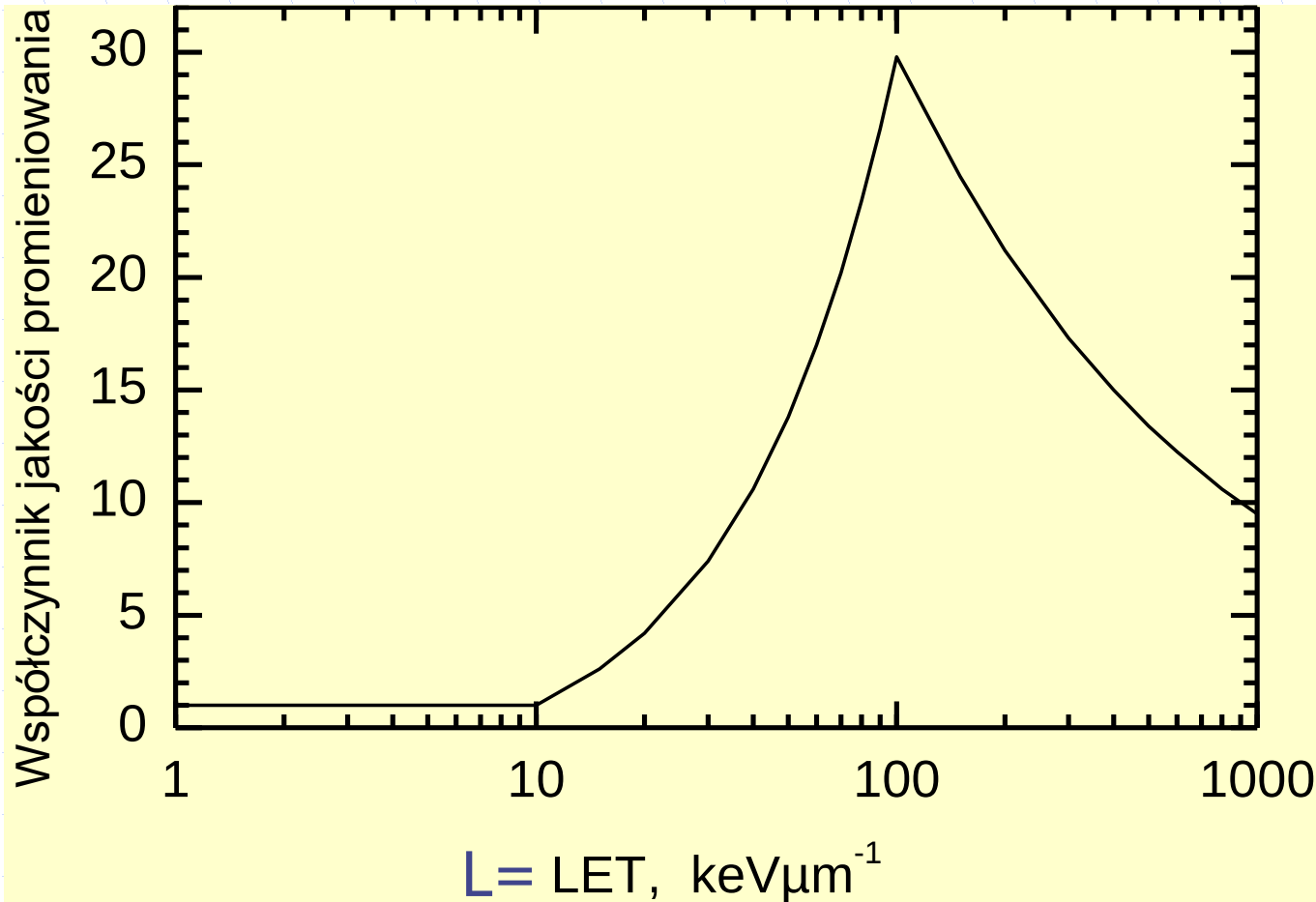
Równoważniki dawek – c.d.

- ◆ Na podstawie czysto fizycznej dawki pochłoniętej (D) możemy obliczyć równoważnik dawki jako:

$$H = Q \cdot D$$

- ◆ gdzie Q oznacza współczynnik jakości promieniowania (to na jego podstawie wyznaczono parametry w_R)
- ◆ Q szacuje się na podstawie LET oraz (pośrednio) także RBE (będą omówione)

Q – współczynnik jakości promieniowania



$$Q(L) = 1$$

$$\text{dla } L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$$

$$Q(L) = 0.32L - 2.2$$

$$\text{dla } 10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m}$$

$$Q(L) = 300 / \sqrt{L}$$

$$\text{dla } L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m}$$

LET (linear energy transfer)

- ◆ Inaczej liniowy przekaz energii, czyli ilość energii zdeponowana na jednostkę przebytej drogi przez cząstkę jonizującą

$$L_{\Delta} = \frac{dE_{\Delta}}{dx}$$

- ◆ Przykładowo: fotony posiadają niskie LET (stąd $w_R=1$), zaś cząstki alfa wysokie LET (stąd $w_R=20$)

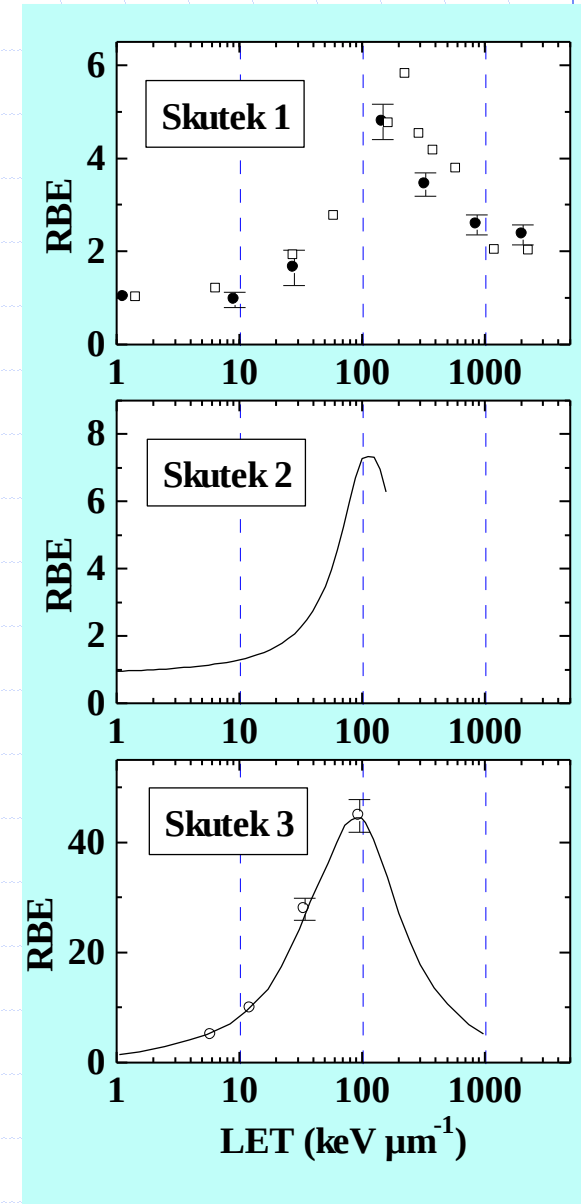
Przykładowe wartości LET

Promieniowanie	Energia	LET [keV/mm]
Prom. X/gamma	250 keV	3,0
	3 MeV	0,3
Co-60	1,17 i 1,33 MeV	0,3
β^-	10 keV	2,3
Neutrony	1 MeV	0,25
	2,5 MeV	20
	19 MeV	7
Protony	2 MeV	16
α	5 MeV	100
Fragm. rozsz.	wysoka	5000

RBE (relative biological effectiveness)

Wartości względnej skuteczności biologicznej - RBE (relative biological effectiveness) zostały określone jako stosunek dawek pochłoniętych dwóch rodzajów promieniowania, jeśli w identycznych warunkach napromienienia, dawki te powodują ten sam, określony efekt biologiczny.

Innymi słowy, jest to wartość dawki promieniowania referencyjnego (dla którego przyjęto $RBE=1$) podzielona przez odpowiednią wartość dawki promieniowania rozpatrywanego, powodująca ten sam skutek.

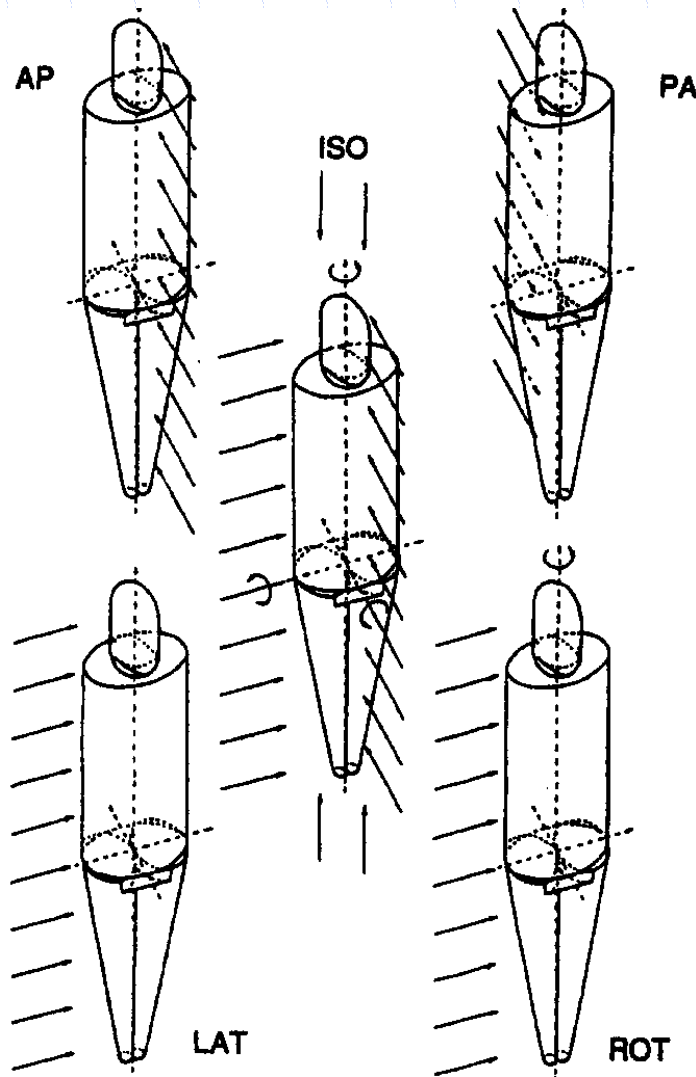


Równoważniki dawek – c.d.

- ◆ Ostatecznie dawkę równoważną na dany narząd szacuje się w oparciu o pomiar odpowiedniego indywidualnego równoważnika dawki $H_p(d)$, gdzie d oznacza głębokość w tkance, np. dla soczewek oczu $d=3$ mm, dla skóry $d=0,07$ mm a dla całego ciała $d=10$ mm
- ◆ Stąd w praktyce dokonujemy pomiarów: $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ czy $H_p(3)$
- ◆ Dla dozymetru środowiskowego (w powietrzu, nie na ciele człowieka) mamy przestrzenny równoważnik dawki (skutecznej): $H^*(10)$
- ◆ Pomiarów dokonuje się na podstawie odczytów z dawkomierzy wykalibrowanych w odniesieniu do odpowiedniego H

KIERUNKI NAPROMIENIENIA

(istotne w przypadku kierunkowego równoważnika dawki H')



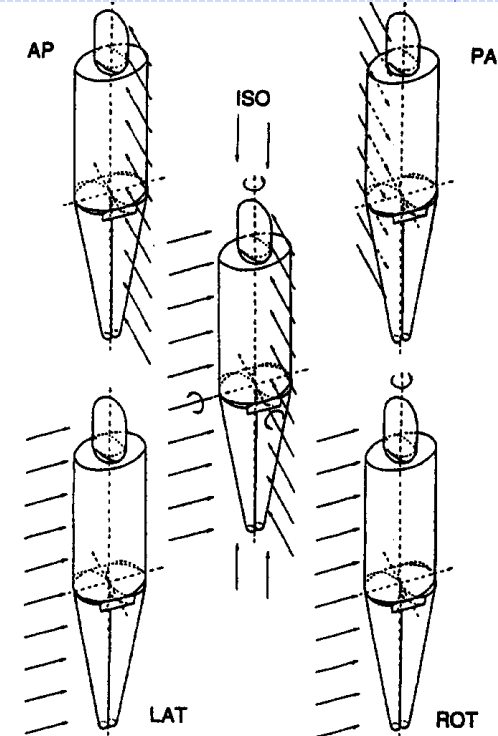
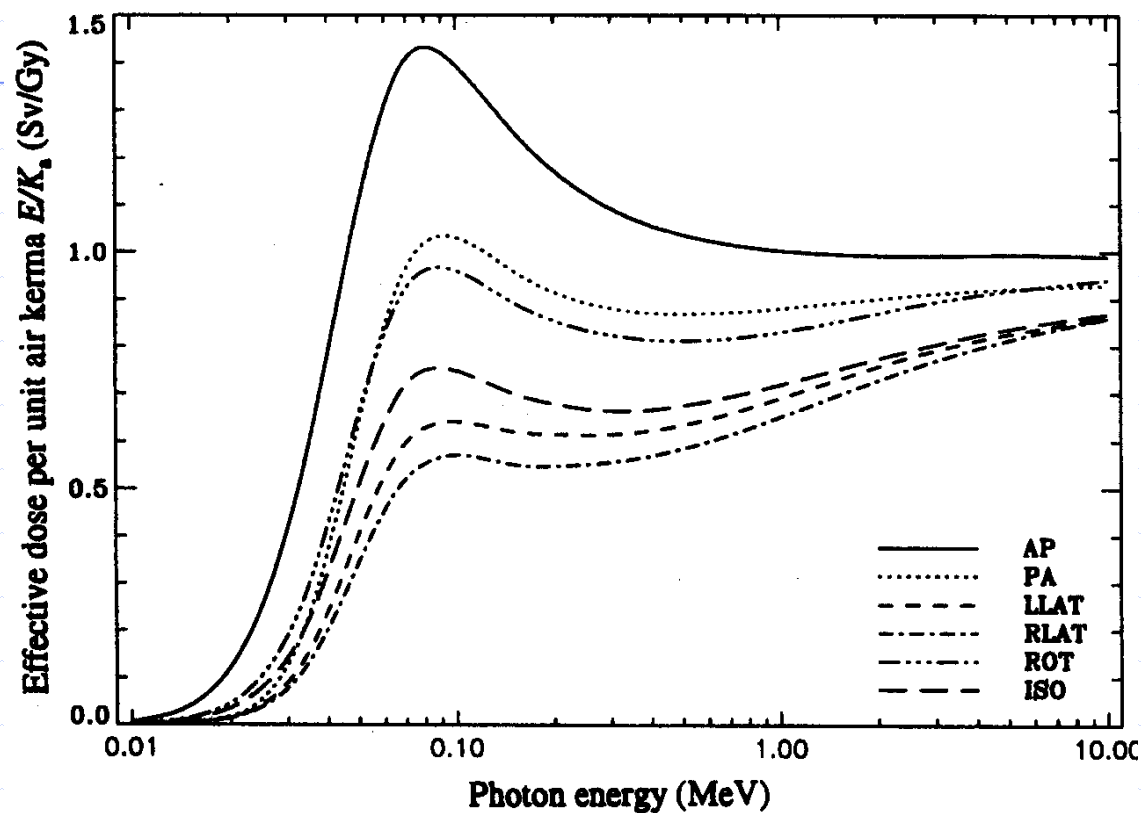
AP – napromienienie od przodu, prostopadłe do pionowej osi ciała

PA – napromienienie od tyłu

LAT – napromienienie z boku

ROT – ciało obraca się w polu skierowanym prostopadłe do osi pionowej

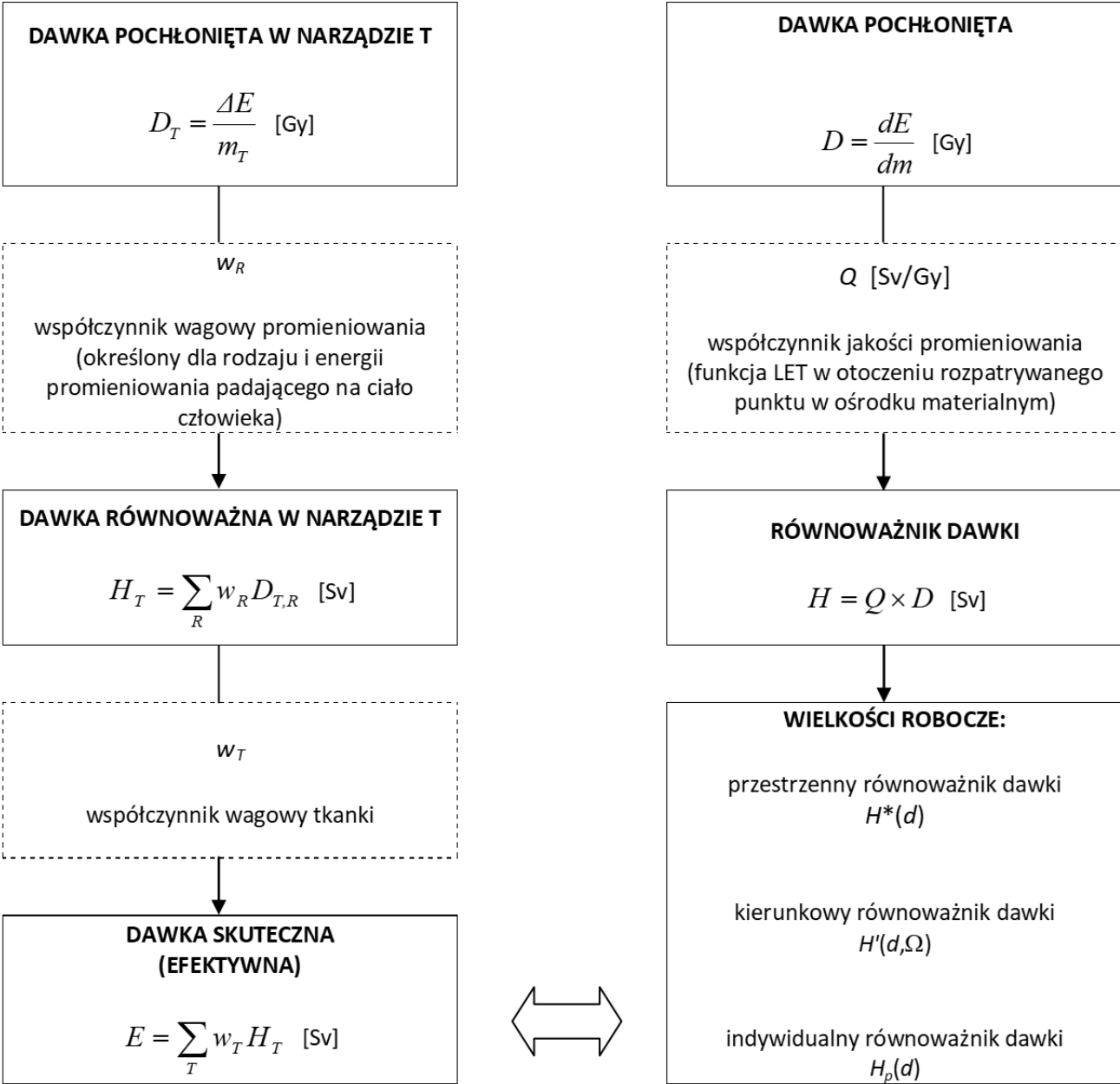
ISO – pole jest izotropowe



Dawka efektywna na jednostkę kermę w powietrzu dla różnych energii fotonów i różnych geometrii napromienienia (obliczona dla fantomu antropomorficznego).

Podsumowanie

Tab. 1. System wielkości dozymetrycznych. Lewa kolumna przedstawia wielkości stosowane w ochronie radiologicznej do oceny ryzyka związanego z napromienieniem zewnętrznym. Prawa kolumna przedstawia system mierzalnych wielkości roboczych, stosowanych przy pomiarach dawek indywidualnych i monitorowaniu środowiska.



8 slajdów dla dociekliwych

- suplement do wykładu

FANTOM DO MONITOROWANIA ŚRODOWISKA PRACY

Zarówno przestrzenny, jak i kierunkowy równoważnik dawki zdefiniowane są dla fantomu zwanego **kulą ICRU**. Jest to kula o średnicy 30 cm i gęstości 1 g cm^{-3} , wykonana z materiału równoważnego tkance o składzie masowym: 76,2% tlenu, 11,1% węgla, 10,1% wodoru i 2,6% azotu. W kuli tej określa się punkt odniesienia, a następnie definiuje się pewną sytuację modelową, zakładającą że w całej kuli panują warunki pola rozciągłego i zorientowanego, czyli pola gdzie fluencja i jej rozkład energetyczny są takie same jak wartości dla pola rzeczywistego w punkcie odniesienia, ale pole jest równoległe o wyróżnionym kierunku.

* *ICRU = International Commission for Radiological Units*

Pole zorientowane i rozciągle

Pole zorientowane

PN-92/J-01003/02:

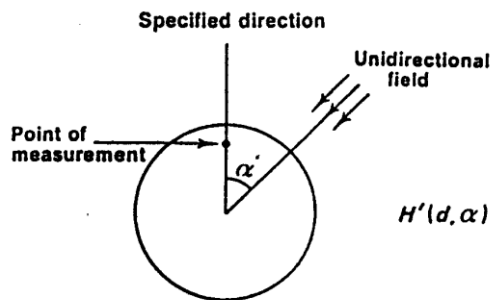
Hipotetyczne pole promieniowania, w którym wszystkie cząstki poruszają się w jednym kierunku.

Pole rozciągle

PN 92/J-01003/02:

Hipotetyczne pole promieniowania, w którym fluencja cząstek, ich rozkład energii oraz ich rozkład kątowy wewnątrz określonej objętości pomiarowej są takie same jak w rzeczywistym polu promieniowania w rozpatrywanym punkcie.

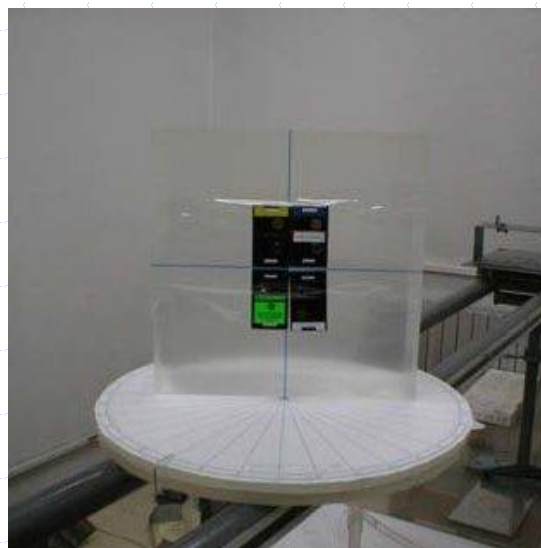
Przestrzenny równoważnik dawki $H^*(d)$ w pewnym punkcie pola promieniowania jest to taki równoważnik dawki, który byłby wytworzony przez odpowiednie pole rozciągle i zorientowane w kuli ICRU na głębokości d wzdłuż promienia ustawionego w kierunku przeciwnym do kierunku pola, natomiast **kierunkowy równoważnik dawki $H'(d, \Omega)$** jest zdefiniowany w ten sam sposób, ale wyznaczany wzdłuż promienia wyznaczającego określony kierunek Ω .



Definicja kąta α dla $H'(d, \alpha)$

Praktycznie pomiary wielkości roboczych wykonuje się za pomocą powszechnie stosowanych przyrządów dozymetrycznych, po ich właściwym wzorcowaniu w polach kalibracyjnych o znanych wartościach odpowiednich wielkości roboczych.

Z kolei do kontroli indywidualnej stosuje się **indywidualny równoważnik dawki $H_p(d)$** , zdefiniowany jako równoważnik dawki pochłoniętej w tkankach miękkich na głębokości d poniżej określonego punktu ciała (a więc już nie w kuli ICRU). Zalecane wartości głębokości d są takie same, jak w przypadku monitorowania pól zewnętrznych, a pomiarów dokonuje się za pomocą odpowiednio wzorcowanych dawkomierzy indywidualnych.



Operacyjne wielkości dla monitorowania indywidualnego (osób narażonych) $H_p(d)$

Stosuje się analogiczne $d=10$ i 0.07 mm, odpowiednio dla promieniowania przenikliwego (X, γ , n) i mało przenikliwego (np. beta, promieniowanie X o b. niskich energiach).

Ta wielkość ma za zadanie ocenę dawki efektywnej z marginesem bezpieczeństwa w praktycznie wszystkich warunkach. Dozymetr osobniczy (filmowy, TLD, komora jonizacyjna) musi być noszony na ciele w taki sposób, który byłby reprezentatywny dla ekspozycji.

Dozymetr $H_p(10)$ noszony na przedniej powierzchni ciała dostarcza takich danych dla E od promieniowania padającego z przodu, z boku i izotropowo. Przy ekspozycji wyłącznie od tyłu tułowia dozymetr noszony na przedniej powierzchni ciała nie spełnia powyższych wymagań w stosunku do E . Dotyczy to również napromienienia wybranej części ciała (np. dłoni i przedramion) lub noszenia dozymetru na fartuchu ochronnym w narażeniu na promieniowanie X (medyczna).

Roczne wnikięcie graniczne (ALI)

ang. Annual Limit on Intake

IAEA BSS/96

International Basic Safety Standards

IAEA Safety Series No 115. 1996:

Wnikięcie danego nuklidu promieniotwórczego w ciągu roku drogą pokarmową, oddechową lub przez skórę u człowieka umownego powodujące dawkę obciążającą równą odpowiedniej dawce granicznej. ALI wyrażone jest w jednostkach aktywności.

Pochodne stężenie radionuklidu w powietrzu (DAC)

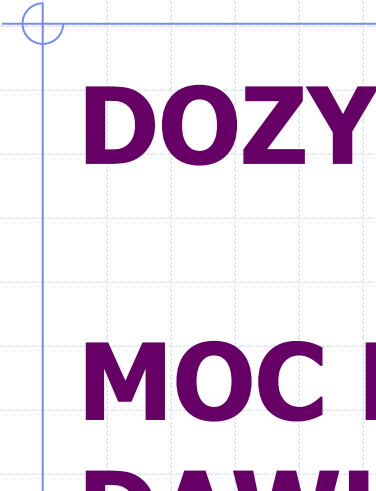
ang. Derived Air Concentration

**Podane w przepisach stężenie (w Bq na metr sześcienny)
substancji promieniotwórczych w powietrzu
odpowiadające rocznemu wchłonięciu granicznemu ALI
przy 40 godzinnym tygodniu pracy.**

Współczynniki przeliczeniowe

dla ^{137}Cs			
kerma w powietrzu / dawka ekspozycyjna	K_{air} / X		8,77 mGy/R (1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg)
przestrzenny równoważnik dawki / dawka ekspozycyjna	$H^*(10) / X$		10,5 mSv/R
przestrzenny równoważnik dawki / kerma w powietrzu	$H^*(10) / K_{\text{air}}$		1,20 Sv/Gy
indywidualny równoważnik dawki / kerma w powietrzu	$H_p(10) / K_{\text{air}}$		1,21 Sv/Gy
dla ^{60}Co			
kerma w powietrzu / dawka ekspozycyjna	K_{air} / X		8,77 mGy/R
przestrzenny równoważnik dawki / dawka ekspozycyjna	$H^*(10) / X$		10,2 mSv/R
przestrzenny równoważnik dawki / kerma w powietrzu	$H^*(10) / K_{\text{air}}$		1,16 Sv/Gy
indywidualny równoważnik dawki / kerma w powietrzu	$H_p(10) / K_{\text{air}}$		1,15 Sv/Gy
dla ^{241}Am			
kerma w powietrzu / dawka ekspozycyjna	K_{air} / X		8,77 mGy/R
przestrzenny równoważnik dawki / dawka ekspozycyjna	$H^*(10) / X$		15,3 mSv/R
przestrzenny równoważnik dawki / kerma w powietrzu	$H^*(10) / K_{\text{air}}$		1,74 Sv/Gy
indywidualny równoważnik dawki / kerma w powietrzu	$H_p(10) / K_{\text{air}}$		1,89 Sv/Gy

Współczynniki przeliczeniowe podane są z niepewnością standardową nieprzekraczającą 2%



DOZYMETRIA

MOC DAWKI, DAWKI OBCIĄŻAJĄCE, SKAŻENIE WEWNĘTRZNE

Moc dawki

- ◆ W ochronie radiologicznej najczęściej spotyka się pojęcie mocy dawki, czyli średniej dawki zdeponowanej w określonym czasie
- ◆ Najczęściej używa się $\mu\text{Sv/h}$ lub mSv/rok (względnie $\mu\text{Gy/h}$, mGy/rok)

$$\dot{D} = dD/dt$$

Moc dawki

- ◆ Moc dawki ma niekiedy kluczowe znaczenie. Czym innym jest 1 Gy podany w ciągu sekundy, a czym innym w ciągu całego roku
- ◆ Standardowo w pomiarach promieniowania tła używa się $\mu\text{Sv/h}$
- ◆ W normach ochrony radiologicznej najczęściej używa się mSv/rok

Moce dawek

- ◆ Moc dawki ekspozycyjnej
- ◆ Moc dawki pochłoniętej
- ◆ Moc dawki równoważnej
- ◆ Moc dawki skutecznej
- ◆ Równoważnik mocy dawki
- ◆ Równoważnik mocy dawki skutecznej
- ◆ ...

Dawka obciążająca

- ◆ **Dawka obciążająca** – jest to dawka otrzymana w wyniku wchłonięcia radioizotopu do organizmu (np. w wyniku skażenia wewnętrznego)
- ◆ W związku z tym mówimy o **obciążającej dawce skutecznej** lub **obciążającej dawce równoważnej**
- ◆ Zasadniczo oblicza się ją dla długości trwania życia (50 lat dla dorosłych i 70 lat dla dzieci)
- ◆ Analogicznie istnieją wielkości operacyjne: równoważnik obciążającej dawki (skutecznej) czy też odnośnie mocy dawki np. *równoważnik obciążającej mocy dawki skutecznej*

Obciążająca dawka równoważna $H_T(\tau)$

Jeżeli znana jest dawka równoważna pochodząca od narażenia wewnętrznego w tkance lub narządzie, otrzymana w jednostce czasu, czyli pochodna H_T tej dawki względem czasu, wtedy obciążającą dawkę równoważną otrzymaną w czasie τ określa wzór:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T dt$$

gdzie:

t_0 – oznacza moment wniknięcia nuklidu; jeżeli wartość τ jest nieokreślona, jako czas całkowania należy przyjąć okres 50 lat
(lub – w przypadku dzieci – czas od momentu wniknięcia do osiągnięcia przez nie wieku 70 lat)

Obciążająca dawka skuteczna (efektywna)

- ◆ Stosuje się jako składnik całkowitej dawki skutecznej (od wszystkich dróg narażenia)

Dawka skuteczna (E) związana z narażeniem (zewnętrznym lub wewnętrznym) na promieniowanie jonizujące dla osób w grupie wiekowej g

$$E = E_Z + \sum_j e(g)_{j,p} J_{j,p} + \sum_j e(g)_{j,o} J_{j,o}$$

gdzie:

E_Z – dawka skuteczna od narażenia zewnętrznego;

$e(g)_{j,p}$ i $e(g)_{j,o}$ – oznaczają jednostkowe obciążające dawki skuteczne dla osób w grupie wiekowej g, to znaczy obciążające dawki skuteczne (w Sv), jakie otrzymują w wyniku wnikięcia do ich organizmu drogą pokarmową (indeks p) lub drogą oddechową (indeks o) jednostkowej aktywności (1Bq) nuklidu j;

$J_{j,p}$ i $J_{j,o}$ – oznaczają aktywność (w Bq) nuklidu j, który wniknął do organizmu drogą pokarmową (indeks p) lub drogą oddechową (indeks o).

Usuwanie skażeń z organizmu – efektywny okres półtrwania T_{eff}

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{1/2} \cdot T_b}{T_{1/2} + T_b}$$

gdzie:

- T_b – biologiczny czas usuwania z organizmu połowy wchłoniętej aktywności izotopu – czas w którym z przyczyn metabolicznych połowa ilości izotopu przebywającego w ustroju zostaje przez ustrój samorzutnie usunięta
- $T_{1/2}$ – fizyczny (promieniotwórczy) okres półrozpadu danego izotopu

Dawki wew/zew - zestawienie

Dawka jedynie od źródeł wewnętrznych	DAWKA OD ŹRÓDEŁ ZEWNĘTRZNYCH I WEWNĘTRZNYCH	Dawka w czasie
Obciążająca dawka pochłonięta, $D(t)$ ↓ Obciążająca dawka równoważna (równoważna dawka obciążająca), $H(t)$ ↓ Obciążająca dawka skuteczna (efektywna), $E(t)$	Dawka pochłonięta, D , [Gy] = energia zdeponowana w masie ↓ Dawka równoważna, H , [Sv] = uwzględnia typ promieniowania, podawana na konkretny narząd ↓ Dawka skuteczna (efektywna), E , [Sv] = uwzględnia radioczułość narządu, podawana na całe ciało	Moc dawki pochłoniętej, $\dot{D}$ ↓ Moc dawki równoważnej, $\dot{H}$ ↓ Moc dawki skutecznej (efektywnej), $\dot{E}$



OBLICZENIA OSŁON PRZECIWRADIACYJNYCH DLA LAMP RTG

Trochę przepisów prawnych

- ◆ Ustawa Prawo atomowe + kilkanaście rozporządzeń – w sumie kilkaset stron przepisów
- ◆ M.in. dokładne zasady pracy ze źródłami, w tym z lampami RTG
- ◆ My się nie będziemy tym zajmować – jest to jednak zakres kursu na inspektora ochrony radiologicznej

Trochę przepisów prawnych

- ◆ Zasada optymalizacji (tzw. zasada ALARA – *as low as reasonably achievable*) – czyli redukować ryzyko/narażenie do poziomu tak niskiego jak to jest rozsądnie możliwe
- ◆ Zasada pesymizacji – przy szacowaniu dawek bierzemy pod uwagę najbardziej skrajne (negatywne) warunki narażenia

Dawki graniczne - przepisy

dla źródeł sztucznych pozamedycznych

Dawka graniczna [mSv/rok]	Pracownicy		Uczniowie, studenci i praktykanci w wieku 16-18 lat	Osoby z ogółu ludności
	Kategoria A	Kategoria B		
Dawka efektywna (całe ciało)	20 ^a	6	6	1 ^b
Dawka równoważna dla soczewek oczu	150	45 ^c	50	15
Dawka równoważna dla skóry	500	150	150	50
Dawka równoważna dla dłoni, przedramion, stóp i podudzi	500	150	150	nie zdefiniowano

a – dawka może być w danym roku kalendarzowym przekroczona do wartości 50 mSv pod warunkiem, że w ciągu kolejnych 5 lat jej sumaryczna wartość nie przekroczy 100 mSv

b – dawka może być w danym roku kalendarzowym przekroczona pod warunkiem, że w ciągu kolejnych 5 lat jej sumaryczna wartość nie przekroczy 5 mSv

c – w praktyce przyjmuje się wartość 50 mSv/rok

Przykładowe proste zadania z egzaminu na inspektora ochrony radiologicznej w medycynie (tzw. uprawnienia R)

- 1) Moc dawki promieniowania rentgenowskiego na stanowisku osoby obsługującej aparat RTG wynosi 2 mSv/h. Osoba obsługująca aparat wykonuje tygodniowo 100 ekspozycji. Maksymalny czas jednej ekspozycji wynosi 0,5 s. Oceń warunki pracy w oparciu o obowiązujące przepisy. Zakwalifikuj pracownika do odpowiedniej kategorii narażenia
- 2) Wyniki kwartalnej kontroli narażenia lekarza stomatologa na promieniowanie jonizujące wynoszą 0,261 mGy (w każdym kwartale, każdy wynik kontroli narażenia jest taki sam). Oceń warunki pracy w oparciu o obowiązujące przepisy. Zakwalifikuj pracownika do odpowiedniej kategorii narażenia.

(Podpowiedź: przeliczenie z dawki pochłoniętej w powietrzu na dawkę skuteczną (w tkance): $1 \text{ Gy} = 1,15 \text{ Sv}$)

Szczegółowe obliczenia osłon

- ◆ Wzór na obliczenie mocy dawki pochłoniętej od lampy rentgenowskiej:

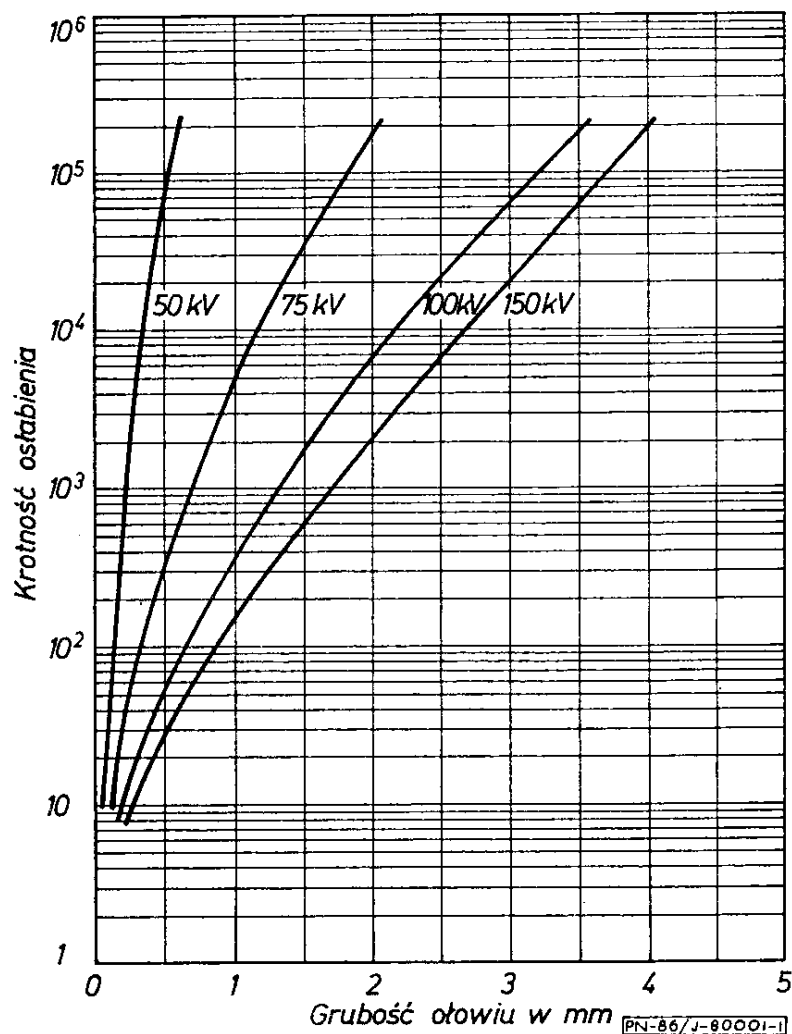
$$\frac{D}{t} = \dot{D} = \frac{60 \cdot I \cdot W_x}{k \cdot L^2} \left[\frac{\text{cGy}}{h} \right]$$

- ◆ Wartość dawki otrzymujemy mnożąc przez czas t [h]
- ◆ Dawka skuteczna: **$E = 11,5 [\text{mSv/cGy}] * D$**
(objaśnienie tego przelicznika zostało podane wcześniej)

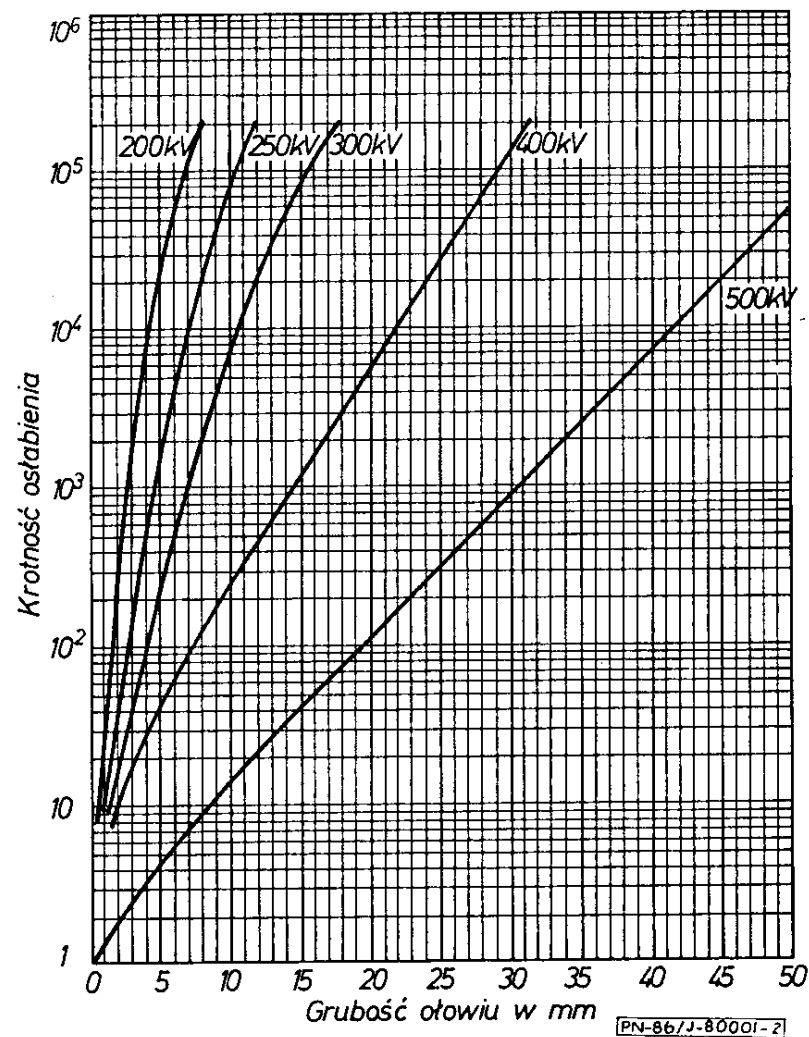
OBLICZENIA – c.d.

$$\frac{D}{t} = \dot{D} = \frac{60 \cdot I \cdot W_x}{k \cdot L^2} \left[\frac{\text{cGy}}{\text{h}} \right]$$

- ◆ W_x [cGy m² / min mA] – wydajność lampy
- ◆ L [m] – odległość od ogniska
- ◆ I [mA] – średni prąd anodowy
- ◆ 60 [min/h] – przelicznik minut na godziny
- ◆ k – krotność osłabienia (**$k=1$ dla powietrza**)



Rys. 1. Zależność krotności osłabienia promieniowania X od grubości warstwy ołowiu (napięcie stałe, filtracja własna, 1 mm szkła lub 0,07 mm miedzi, szeroka wiązka); $\rho = 11,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$



Rys. 2. Zależność krotności osłabienia promieniowania X od grubości warstwy ołowiu dla różnych stałych napięć (szeroka wiązka); $\rho = 11,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Krotność osłabienia **k**

- ◆ Zazwyczaj odczytuje się z wykresów
- ◆ Można też obliczyć ze wzoru:

$$\mathbf{k = \exp (\mu a)}$$

- ◆ gdzie:
 - μ - liniowy współczynnik osłabienia [1/cm]
 - a – grubość materiału [cm]
- ◆ Rozumując w drugą stronę: **znając dawkę obliczamy k, czyli obliczamy grubość osłony**

OBLICZENIA – c.d.

- ◆ Pamiętajmy, że w praktyce posługujemy się **dawką skuteczną E [mSv]**

$$E = 11,5 \cdot \frac{60 \cdot I \cdot W_x \cdot t}{k \cdot L^2} [mSv]$$

- ◆ najczęściej w odniesieniu całorocznym [mSv/rok] przyjmując 50 tygodni pracy w roku oraz 40 h tydzień pracy

OBLICZENIA – c.d.

- ◆ Czyli przyjmujemy roczny czas narażenia w godzinach: $t = 40 * 50 = 2000 \text{ h}$
- ◆ Na podstawie informacji o dawkach granicznych (np. 20 mSv/rok) możemy obliczyć jakie jest potrzebne osłabienie k , aby przy czasie $t = 2000 \text{ h}$ nie przekroczyć danej dawki
- ◆ Innymi słowy jest to algorytm obliczania grubości osłon/ścian

OBLICZENIA OSŁON PRZECIWRADIACYJNYCH DLA PROMIENIOWANIA GAMMA ZE ŹRÓDEŁ

Obliczenia osłon - gamma

- ◆ Algorytm obliczeń jest identyczny jak dla lampy RTG
- ◆ Z dawki pochłoniętej obliczamy skuteczną dawkę roczną, z uwzględnieniem czasu narażenia, odległości oraz krotności osłabienia osłony
- ◆ Różnica polega na tym, iż inaczej jest liczona dawka pochłonięta

Dawka pochłonięta w powietrzu

$$D = \frac{\Gamma_{\gamma} A t}{k l^2} \Rightarrow \dot{D} = \frac{\Gamma_{\gamma} A}{k l^2}$$

- ◆ Γ_{γ} – stała ekspozycyjna dla danego izotopu [cGy·m²/(h·Bq)]
- ◆ A – aktywność [Bq]
- ◆ l – odległość źródło-człowiek [m]
- ◆ t – czas ekspozycji [h]
- ◆ k – krotność osłabienia [-]

◆ Przelicznik na dawkę skuteczną lub równoważną: H [mSv] = 11,5 D [cGy]

Dane wybranych izotopów gamma promieniotwórczych

Izotop	$T_{1/2}$	Energia prom. gamma [MeV]	Wydajność kwantowa [%]	Energia prom. gamma przyjmowana do obliczeń	Równoważna wartość stałej ekspozycyjnej [cGyh ⁻¹ GBq ⁻¹ m ²]
--------	-----------	---------------------------	------------------------	---	--

²² Na	2,6 lat	1,27	99,9	[MeV]	
⁵⁶ Mn	2,6 godz.	1,8	27	1,3	29,6 x 10 ⁻³
		2,1	14	2,0	19,7 x 10 ⁻³
⁶⁰ Co	5,3 lat	1,17	99,9	1,3	30,8 x 10 ⁻³
		1,33	100		
^{99m} Tc	6 godz.	0,14	87,2	0,1	1,4 x 10 ⁻³
¹³⁷ Cs	30 lat	0,66	85,2	0,7	8,0 x 10 ⁻³
		0,29	28,3		
¹⁹² Ir	73,8 dni	0,31	29,3		
		0,32	83,0		
		0,47	47,7	0,6	10,9 x 10 ⁻³
		0,60	8,3		
		0,61	5,3		
		0,19	3,3		
²²⁶ Ra i pochodne	1600 lat	0,29	20,1		
		0,35	39,3		
		0,61	48,4	1,7	21,4 x 10 ⁻³
		1,12	16,0		
		1,76	16,6		
		2,20	5,3		

Fe59 44,5d

16 · 10⁻³

Jeszcze o krotności osłabienia

- ◆ Dla wiązki skolimowanej: **$k = \exp(\mu a)$**
- ◆ Gdy znamy k dla materiału A oraz gęstości materiału A oraz B, to możemy obliczyć k dla materiału B jako:

$$k_B = \frac{\rho_A}{\rho_B} k_A$$

- ◆ Analogicznie gdy znamy energie fotonów

$$k_B = \frac{E_A}{E_B} k_A$$

Przykładowe zadania

Laboratorium stosuje źródło promieniowania gamma ^{60}Co o aktywności początkowej $A_0 = 2 \text{ GBq}$ określonej na dzień 01-04-2008 r. Jaką dawkę otrzymałby pracownik kategorii A pracujący rutynowo obecnie w odległości 1,5 m od tego źródła przez 20 godz. tygodniowo. Czy można systematycznie pracować w takich warunkach, a jeżeli nie zaproponuj osłonę wykonaną z ołowiu?

W pracowni radiologicznej znajduje się źródło ^{226}Ra o aktywności 100 GBq. Źródło znajduje się w odległości 2 m od ściany betonowej. Jaka musi być grubość tej ściany aby pracownicy sterowni zatrudnieni w kat. A mogli w niej przebywać, wiedząc że tygodniowy czas pracy źródła wynosi 15 godz.

Zadanie na skażenie wewnętrzne

16 kwietnia na pomiar aktywności jodu zgromadzonego w tarczycy zgłosił się pracownik, u którego podczas poprzedniego pomiaru wykonanego 3 kwietnia, zmierzono aktywność jodu ^{131}I $A_1=2450$ Bq. Wniknięcie miało miejsce 1 kwietnia, a wyznaczona aktywność wniknięta wyniosła $A_{w1}=9060,31$ Bq.

W wyniku pomiaru wykonanego 16 kwietnia zmierzono aktywność jodu ^{131}I w tarczycy $A_2=1200$ Bq. Pracownik, kierownik oraz inspektor ochrony radiologicznej nie potrafili określić kiedy nastąpiło skażenie.

Jaką skuteczną dawkę obciążającą otrzymał pracownik od wniknięcia pomiędzy poprzednim, a bieżącym pomiarem? W obu przypadkach przyjmujemy, że skażenie nastąpiło drogą oddechową

OBLICZENIA OSŁON PRZECIWRADIACYJNYCH DLA POZOSTAŁYCH ŹRÓDEŁ

Dla promieniowania beta

- ◆ Minimalna grubość osłony dla promieniowania beta:

$$a_{min} = \frac{R_{max}}{\rho}$$

- ◆ gdzie R_{max} to maksymalny zasięg w materiale [g/cm²], zaś ρ to gęstość materiału

Dane wybranych izotopów beta promieniotwórczych

Izotop	$T_{1/2}$	Energia max [MeV] udział %	Energia średnia [MeV]	Zasięg max $R_{\max}$ [mg/cm ²]
³ H	12,3 lat	0,019	0,006	0,62
¹⁴ C	5730 lat	0,155	0,053	34
³² P	14,5 dni	1,708	0,68	$8,0 \times 10^2$
⁶⁰ Co	5,3 lat	0,306	0,098	80
⁹⁰ Sr	28,4 lat	0,61	0,20	$2,1 \times 10^2$
⁹⁰ Y	2,7 dni	2,18	0,89	$1,1 \times 10^3$
¹³¹ I	8,1 dni	0,250 2,8%	0,070	59
		0,335 9,3%	0,097	90
		0,608 87,2%	0,19	$2,1 \times 10^2$
		0,812 0,7%	0,27	$3,1 \times 10^2$
¹³⁷ Cs	30 lat	0,523 92%	0,16	$1,7 \times 10^2$
		1,18 8%	0,40	$4,8 \times 10^2$

⁵²Mn

5,7 dn

$2 \cdot 10^2$

Dla promieniowania neutronowego

- ◆ Dawka równoważna od neutronów:

$$H_n = \frac{k_n W_n A t}{4\pi l^2}$$

- ◆ W_n – wydajność źródła [1/(s·Bq)]

- ◆ k_n – współczynnik konwersji
[mSv·cm²·s/h]

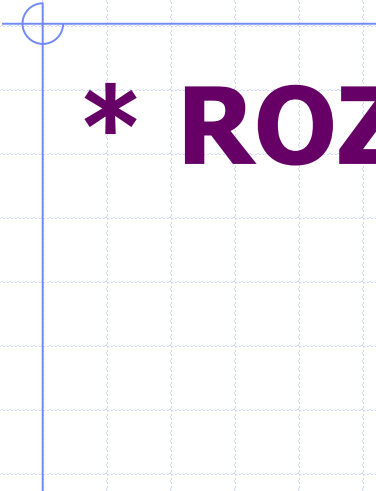
- ◆ l – odległość [cm]

- ◆ t – czas [t]

- ◆ A – aktywność [Bq]

Dane wybranych źródeł neutronowych opartych na reakcji α , n i izotopów podlegających samorzutnemu rozszczepieniu

Źródło	Reakcja	Wydajność W_n [s ⁻¹ GBq ⁻¹]	Współczynnik konwersji k_n [mSvh ⁻¹ cm ² s]
²¹⁰ Po-Be	α , n	$6,8 \times 10^4$	$1,4 \times 10^{-3}$
²²⁶ Ra-Be	α , n	$3,5 \times 10^5$	$1,4 \times 10^{-3}$
²³⁹ Pu-Be	α , n	$5,9 \times 10^4$	$1,4 \times 10^{-3}$
²⁴¹ Am-Be	α , n	$5,9 \times 10^4$	$1,4 \times 10^{-3}$
²⁵² Cf	rozszczerpie samorzutne	$1,2 \times 10^8$	$1,3 \times 10^{-3}$



*** ROZWIĄZANIA ZADAŃ**

Rozwiązanie zadań domowych 😊

1) Wiązka monoenergetycznych fotonów uległa pochłonięciu $k=8$ krotnie na materiale o grubości 6 mm. Ile wynosi HVL dla tego przypadku?

$k=8$, czyli pozostało 12,5% pierwotnej wiązki ($100\%/2/2/2$). To oznacza, że osłona równa jest $3 \times \text{HVL}$, czyli $\text{HVL} = 2$ mm

Rozwiązanie zadań domowych 😊

2) Urządzenie pomiarowe rejestruje 1000 zliczeń fotonów na sekundę od źródła za osłoną o grubości 1 cm. Wiedząc, że $HVL=2$ mm oblicz liczbę zliczeń dla osłony 0,4 cm.

1 cm to $5 \times HVL$, czyli przepuszcza $1/2^5 = 1/32$ pierwotnej wiązki (x). Czyli $x=32000$ zliczeń. Zaś $0,4$ cm = $2 \times HVL$, czyli $x/4 = 8000$ zliczeń

Rozwiązanie zadań domowych ☺

Moc dawki promieniowania rentgenowskiego na stanowisku osoby obsługującej aparat RTG wynosi 2 mSv/h. Osoba obsługująca aparat wykonuje tygodniowo 100 ekspozycji. Maksymalny czas jednej ekspozycji wynosi 0,5 s. Oceń warunki pracy w oparciu o obowiązujące przepisy. Zakwalifikuj pracownika do odpowiedniej kategorii narażenia

- ◆ $100 \text{ ekspozycji /tydz.} \times 0,5 \text{ sek. na każdą ekspozycję} = 50 \text{ sek./tydz.} \times 52 \text{ tygodnie /rok} = 2600 \text{ sek./rok} = 0,72 \text{ h/rok}$
- ◆ $D = 0,72 \text{ h/rok} \times 2 \text{ mSv/h} = 1,4 \text{ mSv /rok}$
- ◆ 1,44 mSv /rok. Dawka OK (nie została przekroczona dawka graniczna 20 mSv/rok dla osób zawodowo narażonych, nie została przekroczona dawka 6 mSv/rok dla kategorii „A”), – pracownika należy zaliczyć do kategorii „B” narażenia na promieniowanie.
- ◆ dla 50 tygodni /rok wynik = 1,38 mSv /rok

Rozwiązanie zadań domowych ☺

Wyniki kwartalnej kontroli narażenia lekarza stomatologa na promieniowanie jonizujące wynoszą 0,261 mGy (w każdym kwartale, każdy wynik kontroli narażenia jest taki sam). Oceń warunki pracy w oparciu o obowiązujące przepisy. Zakwalifikuj pracownika do odpowiedniej kategorii narażenia.

- ◆ $1 \text{ mGy} = 1,15 \text{ mSv} \rightarrow 0,261 \text{ mGy} = 0,3 \text{ mSv}$
- ◆ $0,3 \text{ mSv/kwartał} \times 4 \text{ kwartały /rok} = 1,2 \text{ mSv/rok}$
- ◆ 1,2 mSv /rok. Dawka OK (nie została przekroczona dawka graniczna 20 mSv/rok dla osób zawodowo narażonych, nie została przekroczona dawka 6 mSv/rok dla kategorii „A”), – pracownika należy zaliczyć do kategorii „B” narażenia na promieniowanie.

Rozwiązanie zadań domowych ☺

Laboratorium stosuje źródło promieniowania gamma ^{60}Co o aktywności początkowej $A_0 = 2 \text{ GBq}$ określonej na dzień 01-04-2008 r. Jaką dawkę otrzymałby pracownik kategorii A pracujący rutynowo obecnie w odległości 1,5 m od tego źródła przez 20 godz. tygodniowo. Czy można systematycznie pracować w takich warunkach, a jeżeli nie zaproponuj osłonę wykonaną z ołowiu?

Rozwiązanie:

Pierwszym krokiem jest obliczenie aktywności źródła na dzień bieżący. Z tab. 2 odczytujemy okres połowicznego rozpadu ^{60}Co który wynosi 5,3 lat. Następnie obliczamy odstęp czasu od daty wyznaczenia aktywności początkowej do dnia dzisiejszego (np. 01-04-2010)

$$(01-04-2008) - (01-04-2010) = 2 \text{ lata}$$

obliczamy bieżącą aktywność

$$A(t) = A_0 e^{\frac{-0,693 \cdot t}{T_{1/2}}} = 2 \cdot e^{\frac{-0,693 \cdot 2}{5,3}} = 2 \cdot e^{-0,262} = 2 \cdot 0,77 = 1,44 \text{ GBq}$$

Celem obliczenia tygodniowej dawki pochłoniętej w powietrzu w odległości 1,5 m od źródła posługujemy się wyrażeniem [9]. W tym celu z tab. 2 odczytujemy wartość stałej ekspozycyjnej dla ^{60}Co ($30,8 \times 10^{-3} \text{ cGy h}^{-1} \text{ GBq}^{-1} \text{ m}^2$).

$$D = \frac{\Gamma_\gamma \cdot A \cdot t}{l^2} = \frac{30,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,44 \cdot 20}{1,5^2} = 0,394 \left[\frac{\text{cGy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{GBq}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{GBq} \cdot \text{h}}{\text{m}^2} \right] \cong 0,4 \text{ [cGy]}$$

Korzystamy z wyrażenia [10] do obliczenia tygodniowej dawki równoważnej

$$H \text{ [mSv]} = 11,5 \times D \text{ [cGy]} = 11,5 \times 0,4 = 4,6 \text{ [mSv]}$$

Dla pracowników kat. A zgodnie z prawem graniczna dawka roczna wynosi 20 mSv. Pracownik z zadania otrzymałby tygodniowo 4,6 mSv czyli rocznie 230 mSv (50 tygodni po 4,6 mSv) zatem praca w takich warunkach jest niedopuszczalna. Aby ograniczyć dawkę do maksimum 20 mSv w skali roku należy pomiędzy źródłem a pracownikiem wstawić osłonę, która osłabi promieniowanie minimum 11,5 krotnie.

W tym celu posługujemy się lewym wykresem z rys. 2. Dla osłony ołowianej i energii promieniowania izotopu ^{60}Co minimalna grubość zapewniająca 11,5 krotne osłabienie wynosi 5 cm.

Rozwiązanie zadań domowych ☺

W pracowni radiologicznej znajduje się źródło ^{226}Ra o aktywności 100 GBq. Źródło znajduje się w odległości 2 m od ściany betonowej. Jaka musi być grubość tej ściany aby pracownicy sterowni zatrudnieni w kat. A mogli w niej przebywać, wiedząc że tygodniowy czas pracy źródła wynosi 15 godz.

Tygodniowa dawka równoważna dla pracownika kat. A wynosi 20 mSv rocznie czyli 0,4 mSv/tydzień. Z zależności [10] wyznaczamy tygodniową dawkę pochłoniętą w powietrzu

$$D = \frac{H}{11,5} = \frac{0,4}{11,5} \cong 0,035 \text{ [cGy]}$$

Więc minimalna krotność osłabienia ściany betonowej wynosi (z tab. 2 odczytujemy wartość stałej ekspozycyjnej dla ^{226}Ra ($21,4 \times 10^{-3} \text{ cGyh}^{-1}\text{GBq}^{-1}\text{m}^2$))

$$k = \frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{D \cdot l^2} = \frac{21,4 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 15}{0,035 \cdot 2^2} \cong 229$$

*Następnie korzystając z prawego wykresu na rys. 2 wyznaczamy grubość ściany betonowej, dla krotności osłabienia 229, wynosi ona minimum **57 cm**.*

16 kwietnia na pomiar aktywności jodu zgromadzonego w tarczycy zgłosił się pracownik, u którego podczas poprzedniego pomiaru wykonanego 3 kwietnia, zmierzono aktywność jodu ^{131}I $A_1=2450\text{ Bq}$. Wniknięcie miało miejsce 1 kwietnia, a wyznaczona aktywność wniknięta wyniosła $A_{w1}=9060,31\text{ Bq}$.

W wyniku pomiaru wykonanego 16 kwietnia zmierzono aktywność jodu ^{131}I w tarczycy $A_2=1200\text{ Bq}$. Pracownik, kierownik oraz inspektor ochrony radiologicznej nie potrafili określić, kiedy nastąpiło skażenie.

Jaką skuteczną dawkę obciążającą otrzymał pracownik od wniknięcia pomiędzy poprzednim, a bieżącym pomiarem? W obu przypadkach przyjmujemy, że skażenie nastąpiło drogą oddechową

Przyjmujemy szybką absorpcję jodu z płuc (ICRP-54 typ F)

Wzór krzywej retencji jodu ^{131}I dla tarczycy, po wniknięciu drogą oddechową:

$$f_R(t) = -0,33 \cdot e^{-\frac{0,693\Delta t}{0,24}} + 0,018 \cdot e^{-\frac{0,693\Delta t}{11}} + 0,31 \cdot e^{-\frac{0,693\Delta t}{120}}$$

Okres połowicznego rozpadu fizycznego dla kobałtu ^{131}I – 8,04 dni.

Obliczamy pozostałość aktywności zmierzonej podczas poprzedniego pomiaru A_1 na dzień bieżącego pomiaru (dzień 16, między pierwszym wniknięciem, a drugim pomiarem upłynęło 15 dni):

Δt

$$A_p = A_{w1} \cdot f_R(t) \cdot e^{-\frac{0,69315}{8,04}} = 724,33\text{ Bq}$$

Obliczamy aktywność pozostałą po drugim wniknięciu na dzień bieżącego pomiaru:

$$A_B = A_2 - A_p = 1200 - 724,33 = 457,67\text{ Bq}$$

Zgodnie z zalecenia Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, w przypadku gdy data wniknięcia nie jest znana, należy przyjąć, że nastąpiło ono w połowie okresu między pomiarami. W tym przypadku przyjmujemy, że wniknięcie nastąpiło 10 dnia, 6 dni przed wykonaniem pomiaru. Aktywność wniknięta pomiędzy pomiarami wynosi więc:

$$A_{w2} = \frac{A_B}{f_R(t) \cdot e^{-\frac{0,6936}{8,04}}} = 2558,94\text{ Bq}$$

Obliczanie obciążającej dawki efektywnej:

$$D = A_{w2} \cdot e(g)$$

$e(g)$ – współczynnik przeliczeniowy aktywności wnikniętej na skuteczną dawkę obciążającą, w przypadku wniknięcia ^{131}I drogą oddechową przez osobę dorosłą wynosi $7,6 \cdot 10^{-9}$.

$$D = A_{w2} \cdot e(g) = 1,94 \cdot 10^{-5}\text{ Sv} = 1,94 \cdot 10^{-2}\text{ mSv}$$

Odpowiedź: Pracownik na skutek skażenia izotopem promieniotwórczym kobałtu ^{131}I otrzymał obciążającą dawkę efektywną $1,94 \cdot 10^{-2}\text{ mSv}$.

Wzrost: 10 kwietnia
(2 wniknięcia)