



BIOFIZYKA RADIACYJNA

wykład #5

Krzysztof Wojciech Fornalski



Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska



PRZYPOMNIENIE Z POPZEDNIEGO WYKŁADU

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.

Dawka pochłonięta, **D**

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

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

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

Dawka pochłonięta, równoważna i skuteczna

**DAWKA
POCHŁONIĘTA**

**CZYNNIK WAGOWY
PROMIENIOWANIA**
 w_R

**DAWKA
RÓWNOWAŻNA**

**CZYNNIK WAGOWY
TKANKI w_T**

**DAWKA
SKUTECZNA
(EFEKTYWNA)**

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

**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



WIELKOŚCI OPERACYJNE DAWEK – CIĄG DALSZY

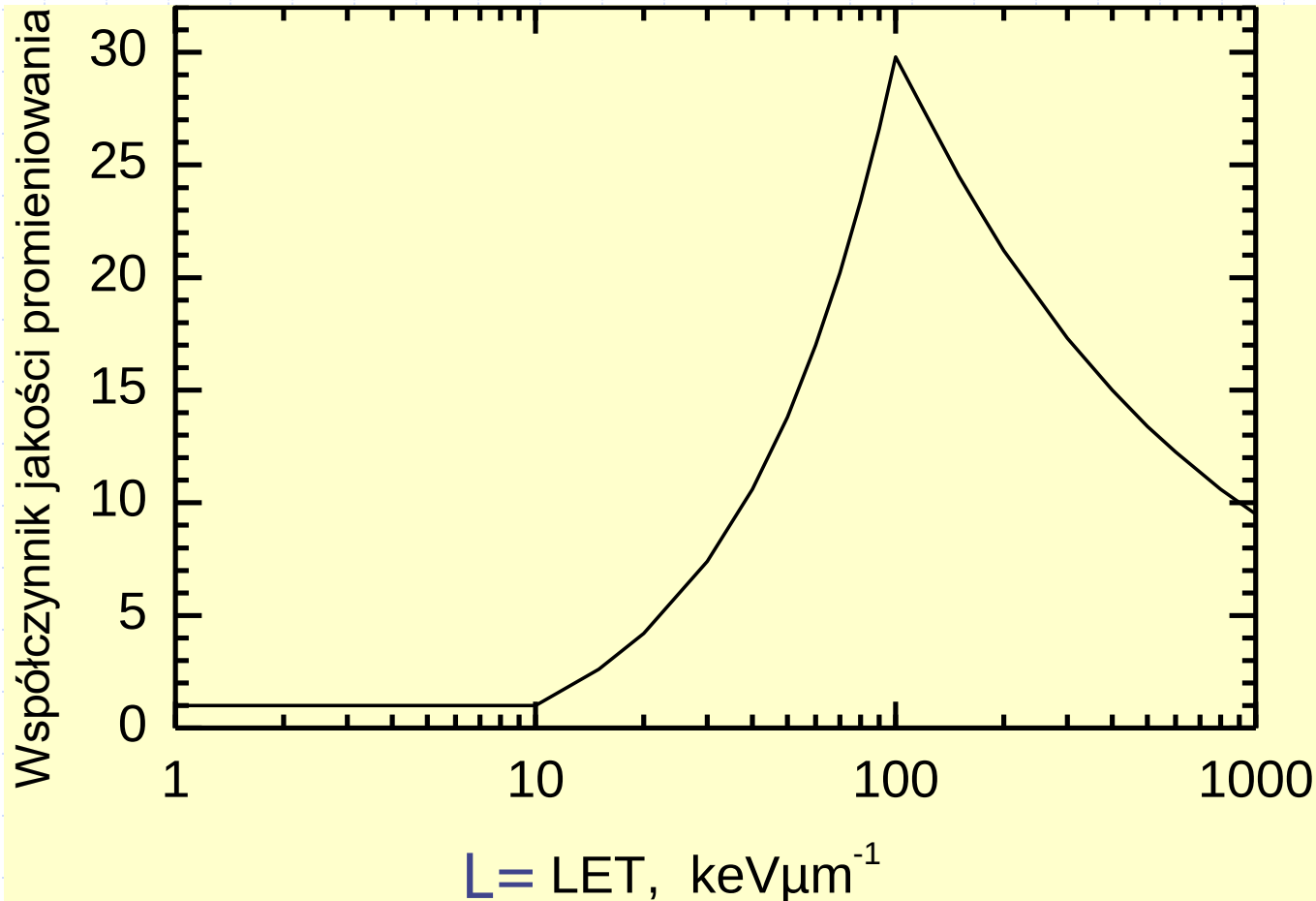
Równoważniki dawek – c.d.

- ◆ 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)

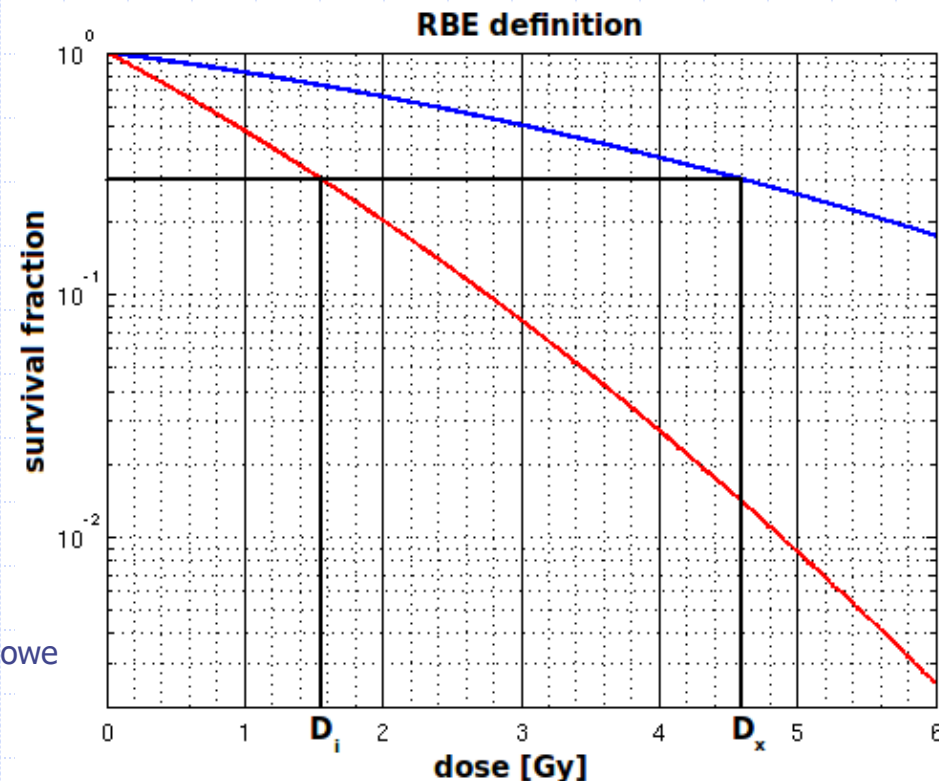
- ◆ RBE, czyli względną skuteczność biologiczną, definiujemy jako iloraz dawki referencyjnej D_X i dawki promieniowania testowego D_T dającego ten sam efekt biologiczny:

$$RBE = \frac{D_X}{D_T}$$

- ◆ Różne RBE związane są z różnicami w oddziaływaniu poszczególnych typów promieniowania z materiążywioną (np. różna struktura śladu cząstek)

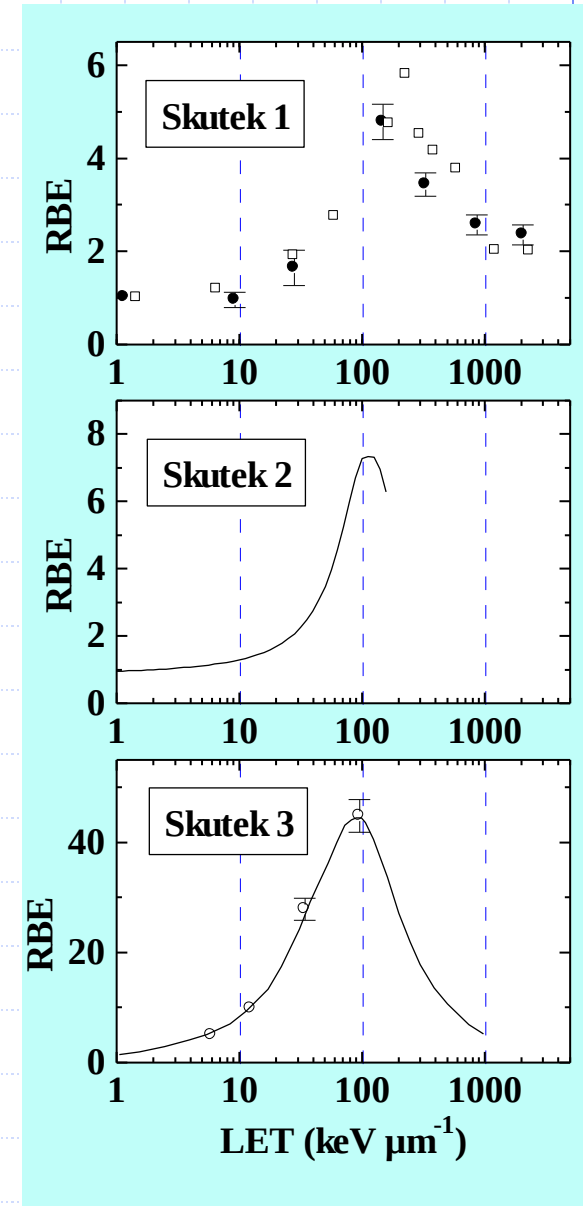
→ współczynnik Q

Na rysunku: Krzywe przeżywalności komórkowej oraz przykładowe dawki - referencyjna (D_X) i testowa (D_i) - dla promieniowania fotonowego (niebieskie) i jonów węgla (czerwone)



RBE (relative biological effectiveness)

- Wartości względnej skuteczności biologicznej - RBE - zostały określone jako stosunek dawek pochłoniętych dwóch rodzajów promieniowania, jeśli w identycznych warunkach napromienienia, dawki te powodują ten sam określony efekt biologiczny. RBE służy więc m.in. do określania współczynnika jakości promieniowania Q . Innymi słowy, RBE jest to wartość dawki promieniowania referencyjnego (najczęściej prom. X) podzielona przez odpowiednią wartość dawki promieniowania rozpatrywanego, powodująca ten sam skutek dla tkanki.

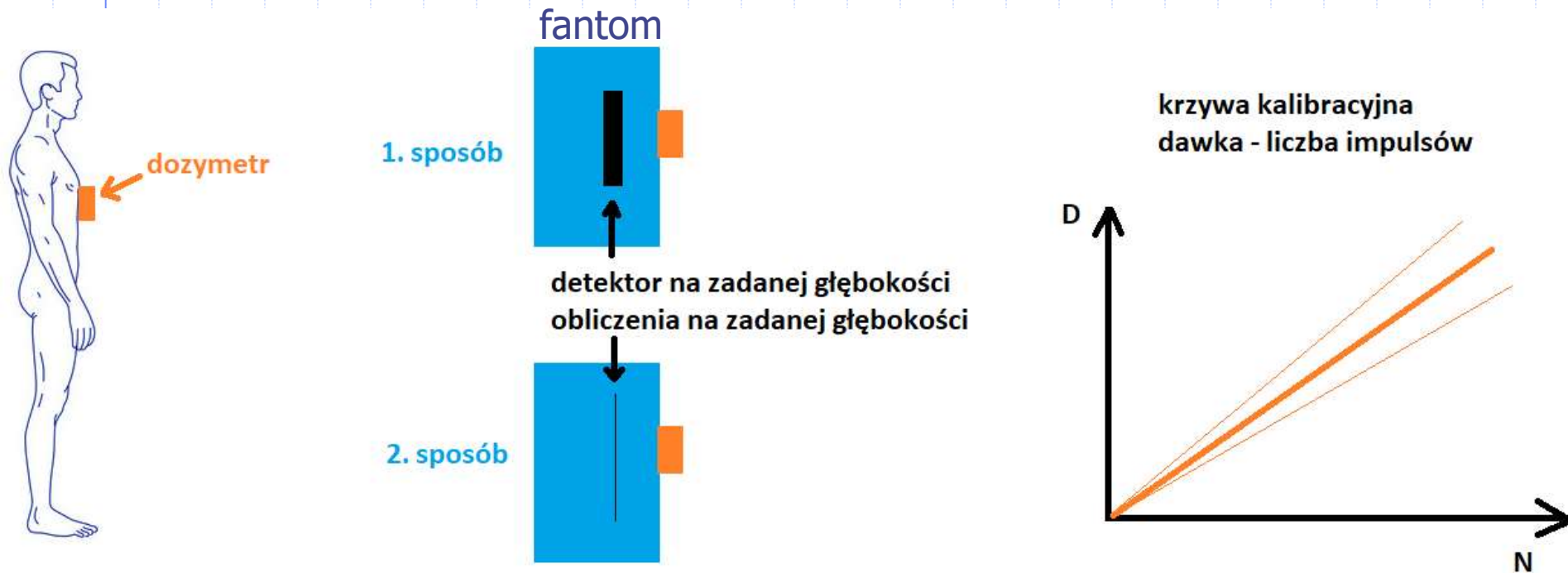


Równoważniki dawek – c.d.

- ◆ 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

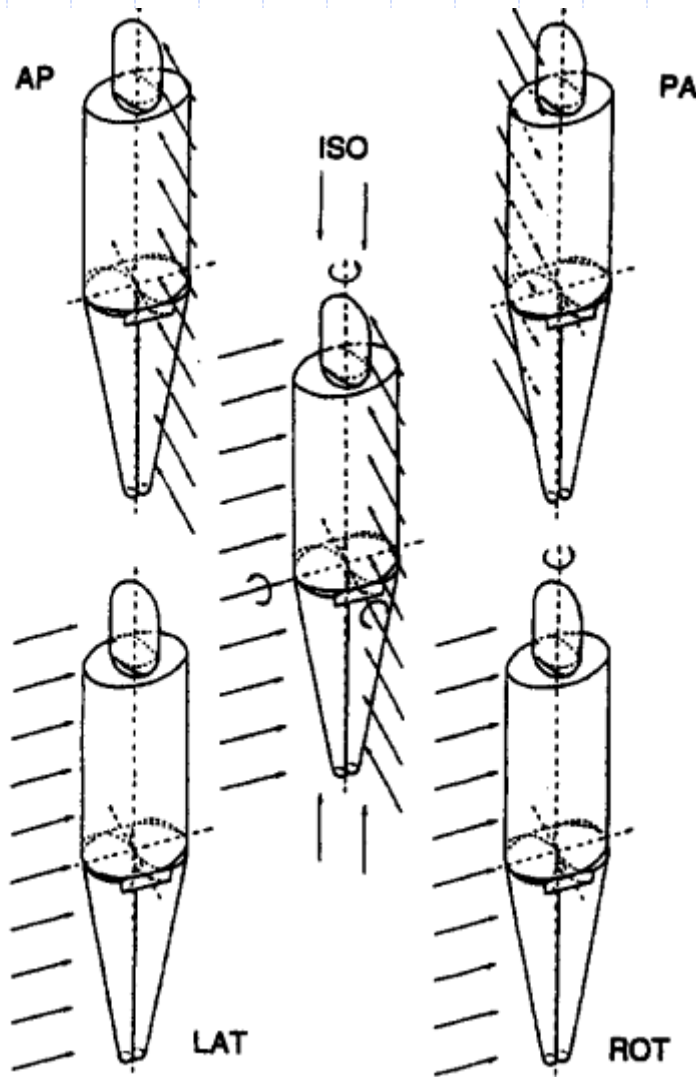
Jak w praktyce zmierzyć dawkę na zadanej głębokości?

są 2 sposoby (drugi jest powszechniejszy):



KIERUNKI NAPROMIENIENIA

(istotne w przypadku kierunkowego równoważnika dawki H')



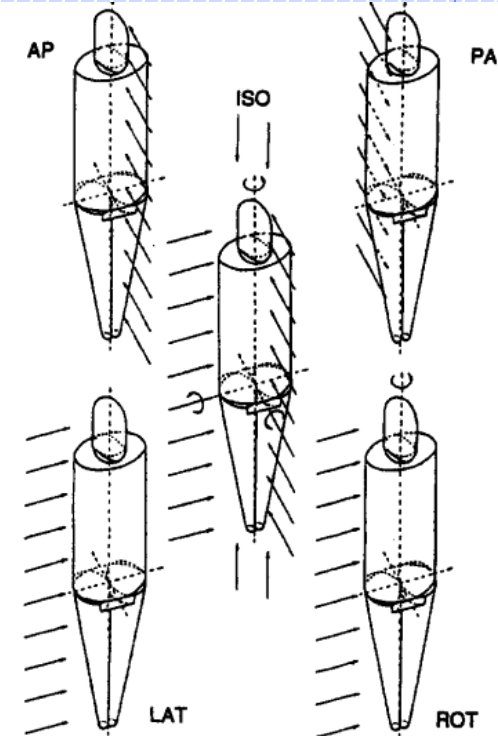
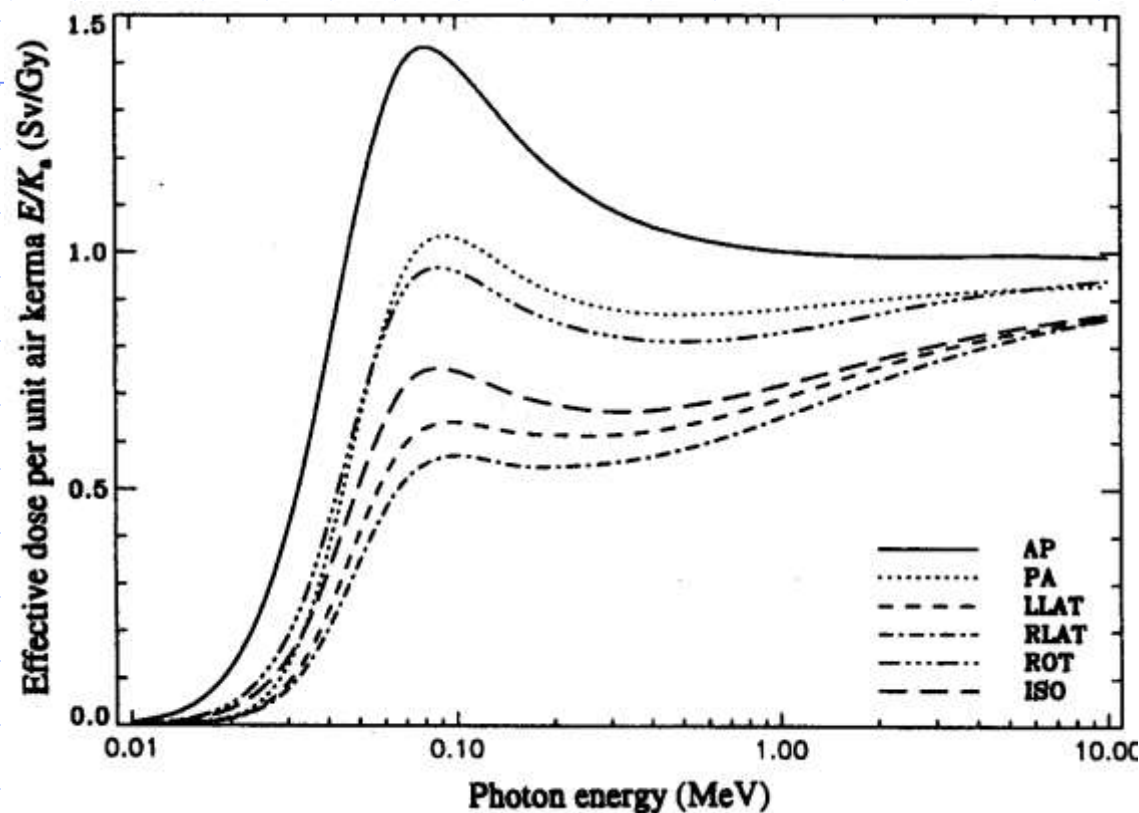
AP – napromienienie od przodu, prostopadłe do pionowej osi ciała

PA – napromienienie od tyłu

LAT – napromienienie z boku

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

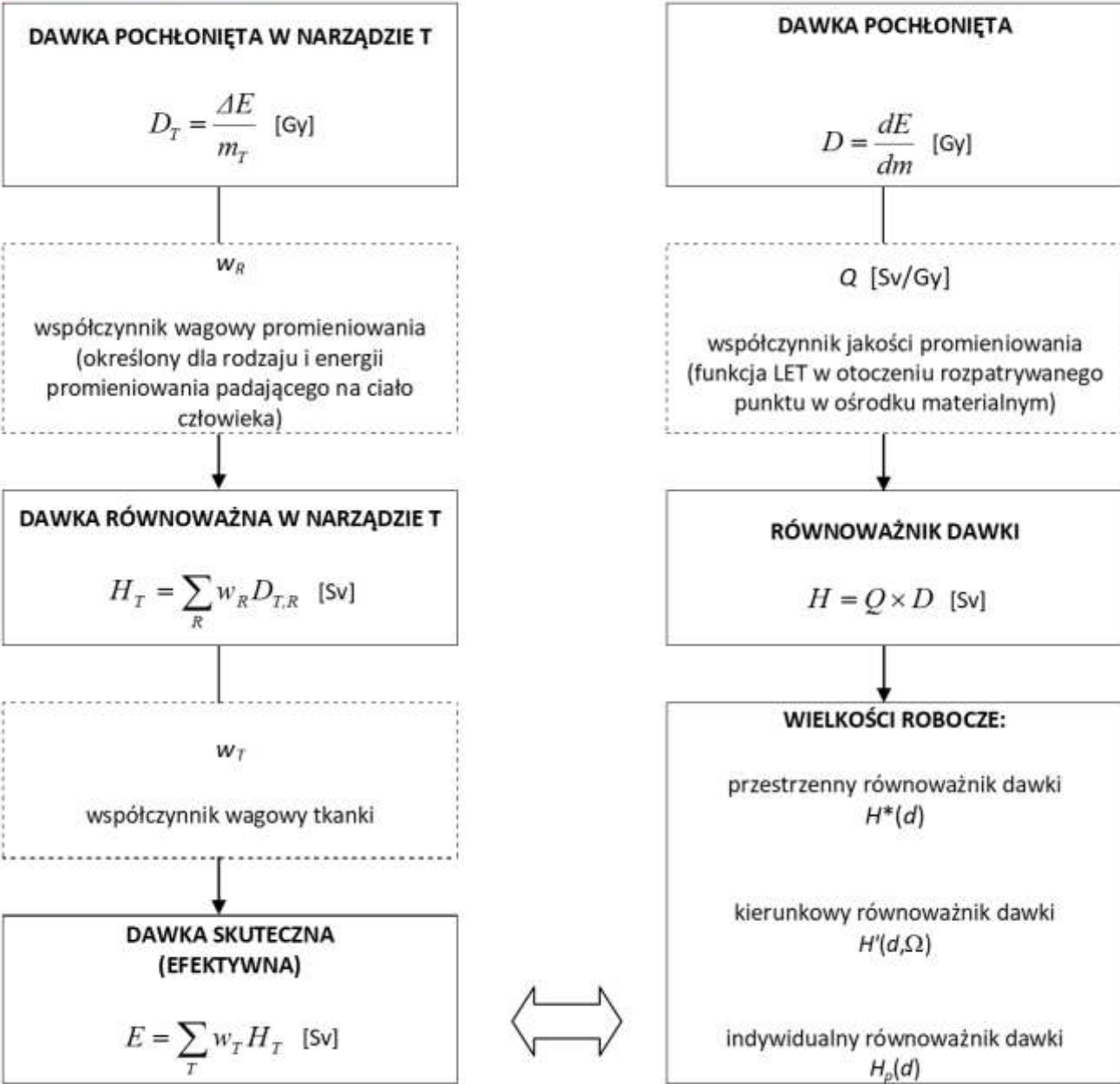
ISO – pole jest izotropowe

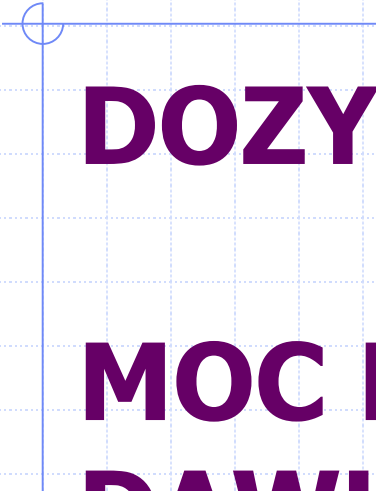


Dawka efektywna na jednostkę kermę w powietrzu dla różnych energii fotonów i różnych geometrii napromienienia (obliczona dla fantomu antropomorficznego).

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.





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), $\dot{E}$

8 slajdów dla dociekliwych

- dodatkowe wielkości dozymetryczne

- 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 rozciągniętego 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:

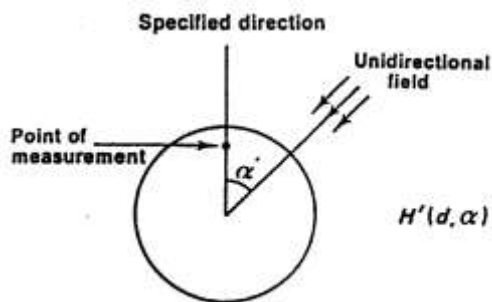
Hipotetyczne pole promieniowania, w którym wszystkie cząstki poruszają się w jednym kierunku.

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.

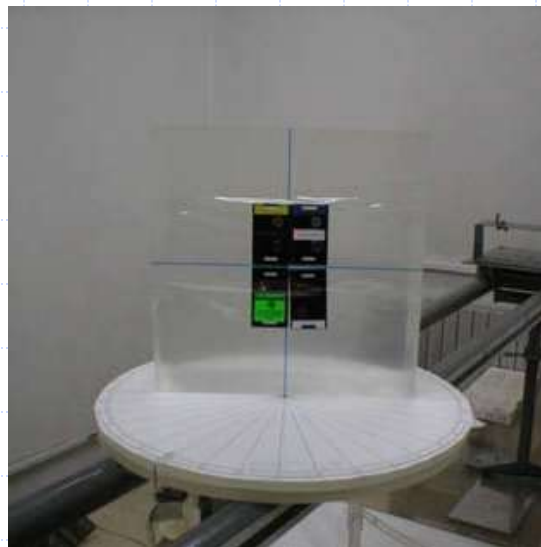
Przestrzenny równoważnik dawki $H^*(d)$ w pewnym punkcie pola promieniowania jest to taki równoważnik dawki, który byłby wytworzony przez odpowiednie pole rozciągle i zorientowane w kuli ICRU na głębokości d wzdłuż promienia ustawionego w kierunku przeciwnym do kierunku pola, natomiast **kierunkowy równoważnik 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 wniknięcie graniczne (ALI)

ang. Annual Limit on Intake

IAEA BSS/96

International Basic Safety Standards

IAEA Safety Series No 115. 1996:

Wniknięcie 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%



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
Dawka równoważna dla soczewek oczu	20 ^a	15	15	15
Dawka równoważna dla skóry (na cm ²)	500	150	150	50
Dawka równoważna dla dłoni, przedramion, stóp i kostek	500	150	150	nie zdefiniowano

a – dawka może być w danym roku kalendarzowym przekroczona do wartości 50 mSv pod warunkiem uzyskania zgody PAA/GIS, oraz średnia dawka roczna w ciągu 5 lat nie przekroczy 20 mSv

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:

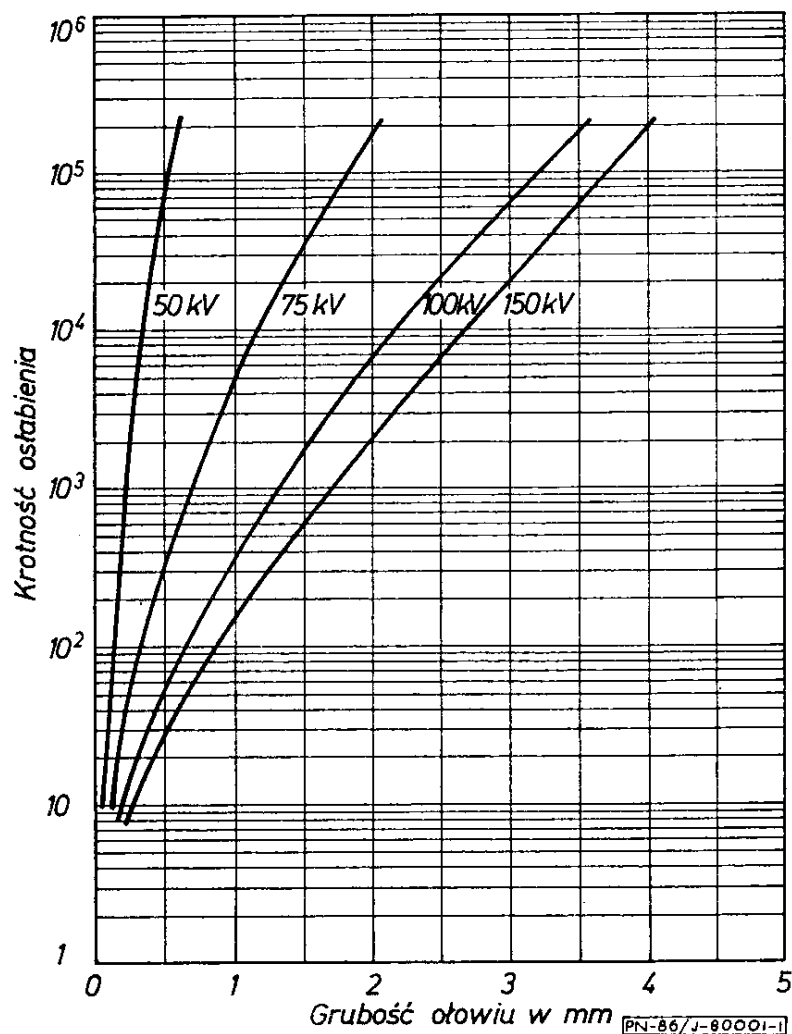
$$\frac{D}{t} = \dot{D} = \frac{60 \cdot I \cdot W_x}{k \cdot L^2} \left[\frac{\text{cGy}}{h} \right]$$

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

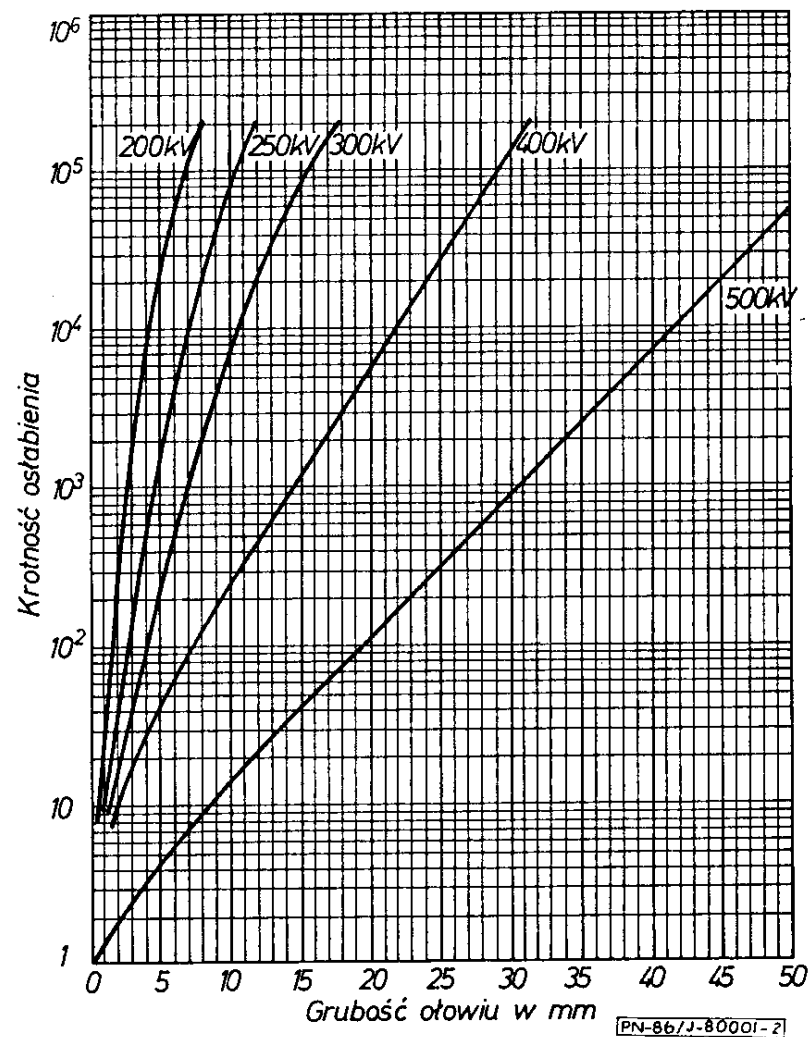
OBLICZENIA – c.d.

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

- ◆ 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:

$$k = \exp(\mu a)$$

- ◆ 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
¹⁹² Ir	73,8 dni	0,29	28,3	0,6	10,9 x 10 ⁻³
		0,31	29,3		
		0,32	83,0		
		0,47	47,7		
		0,60	8,3		
		0,61	5,3		
²²⁶ Ra i pochodne	1600 lat	0,19	3,3	1,7	21,4 x 10 ⁻³
		0,29	20,1		
		0,35	39,3		
		0,61	48,4		
		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 wnikięta 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	$4,8 \times 10^2$

52 Mn

5,7 dni

$2 \cdot 10^2$

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	rozszczerpieenie samorzutne	$1,2 \times 10^8$	$1,3 \times 10^{-3}$

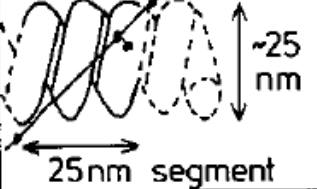
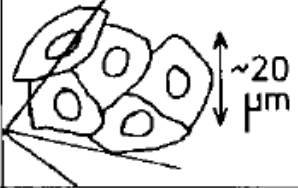
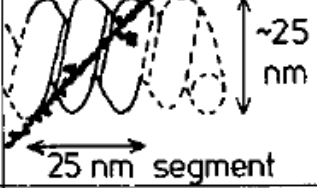
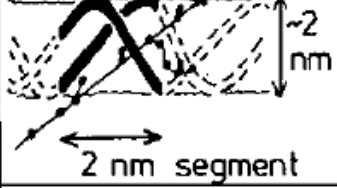
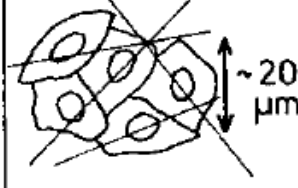
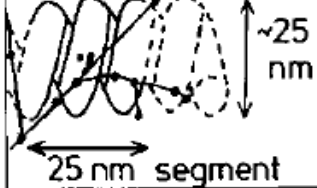


ELEMENTY MIKRODOZYMETRII

Czym jest mikrodozymetria

- ◆ Mikrodozymetria bada przestrzenny i czasowy rozkład energii pochłoniętej w napromienionej materii. W przeciwieństwie do dozymetrii, skupiającej się na makroskopowych wartościach takich jak dawka pochłonięta, mikrodozymetria zajmuje się analizą fizycznych właściwości promieniowania jonizującego, jego oddziaływaniem z materią oraz sposobem deponowania energii, ze szczególnym naciskiem na niejednorodności i stochastyczną naturę oddziaływań promieniowania z materią.

MICROSCOPIC CONSEQUENCES OF 1 cGy ABSORBED DOSE

	Whole tissue	Individual cells	Chromatin fibre (total ~5 cm per cell)	DNA (total ~2 m per cell)	Mean number lethal lesions per cell
<u>External</u> <u>γ-rays</u>		 ~20 μm	 ~25 nm 25 nm segment	 ~2 nm 2 nm segment	~0.001
Dose uniformity	Uniform Dose = 1 cGy	~ Uniform Dose $\approx$ 1 cGy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^3$ Gy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^6$ Gy	
Mean number of tracks	10^9 gram^{-1}	~ 50 cell^{-1} No cells unirradiated	$\sim 10^{-6} \text{ segment}^{-1}$ ~20 segments hit cell^{-1}	$\sim 10^{-8} \text{ segment}^{-1}$ ~10 segments hit cell^{-1}	
<u>Internal</u> <u>^{220}Rn</u> <u>(3 α's)</u>		 ~20 μm	 ~25 nm 25 nm segment	 ~2 nm 2 nm segment	~0.01
Dose uniformity	Variable Doses = 0 to ~2 cGy	Large fluctuations Doses = 0 to ~30 cGy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^4$ Gy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 2 \times 10^6$ Gy	
Mean number of tracks	$\sim 10^7 \text{ gram}^{-1}$	~ 0.1 cell^{-1} ~90% of cells unirrad.	$\sim 6 \times 10^{-7} \text{ segment}^{-1}$ ~1 segment hit cell^{-1}	$\sim 10^{-8} \text{ segment}^{-1}$ ~10 segments hit cell^{-1}	
<u>External</u> <u>10 MeV</u> <u>neutrons</u>		 ~20 μm	 ~25 nm 25 nm segment	 ~2 nm 2 nm segment	~0.005
Dose uniformity	Uniform Dose = 1 cGy	Large fluctuations Doses = 0 to ~5 cGy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 5 \times 10^3$ Gy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^6$ Gy	
Mean number of tracks	$\sim 10^7 \text{ gram}^{-1}$	~ 1 cell^{-1} ~37% of cells unirrad.	$\sim 4 \times 10^{-6} \text{ segment}^{-1}$ ~8 segments hit cell^{-1}	$\sim 10^{-8} \text{ segment}^{-1}$ ~10 segments hit cell^{-1}	

Istotne jest pojęcie toru cząstki (traku)

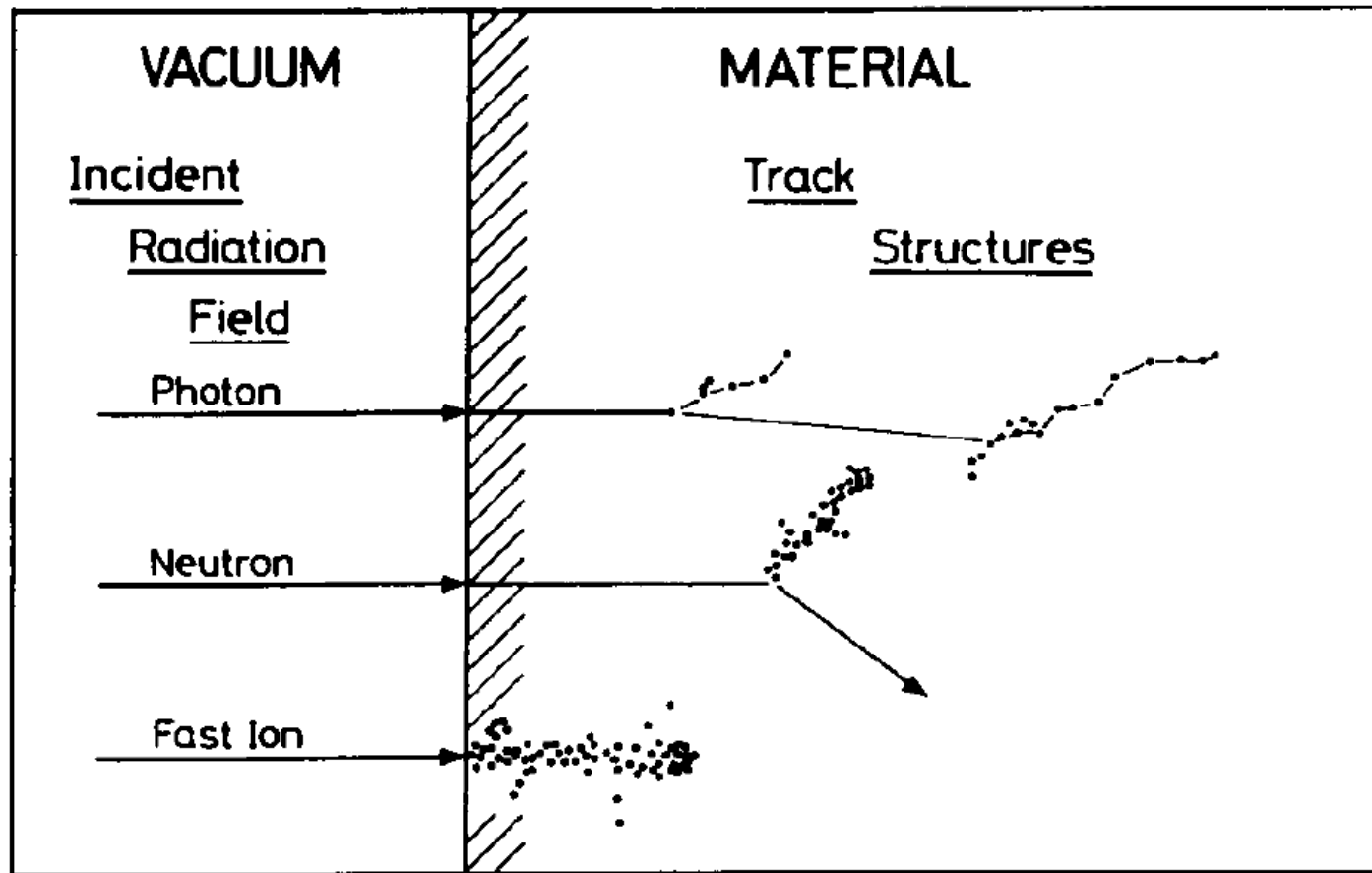
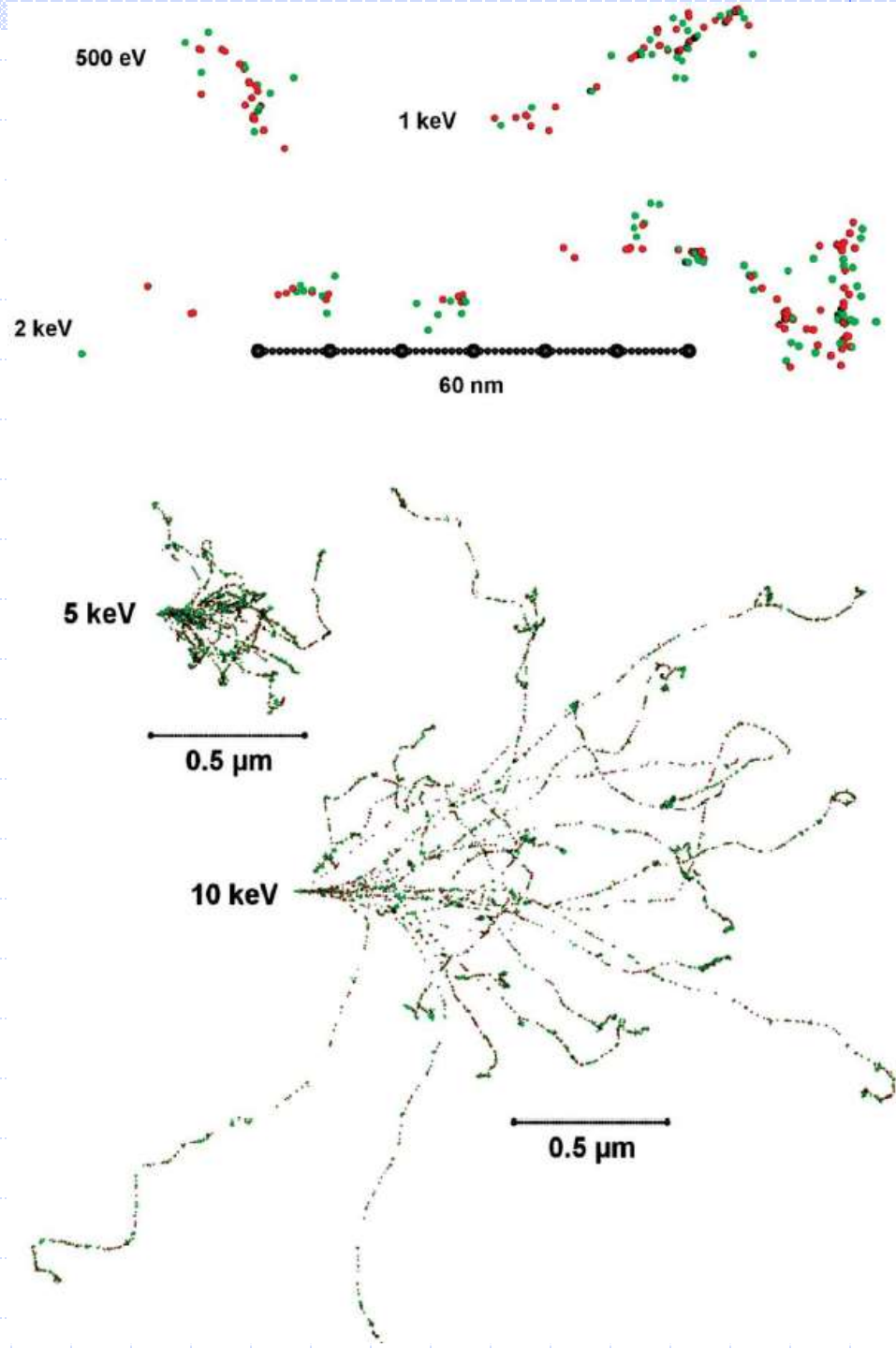
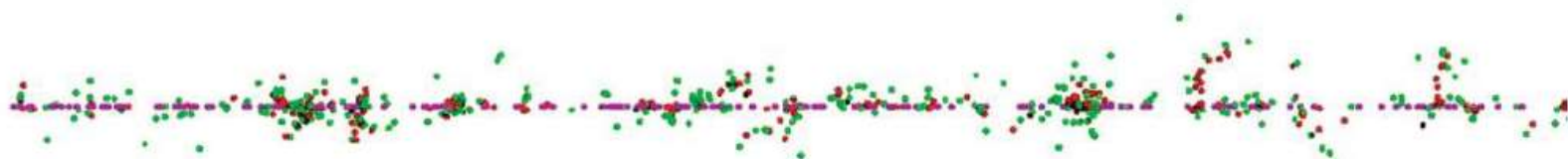


FIG. 2. Diagrammatic illustration of the production of tracks of charged particles in material irradiation with neutral particles (photons, neutrons) or heavier ions such as α particles or accelerated heavy ions. (Reproduced with permission from Paretzke, 1987.)

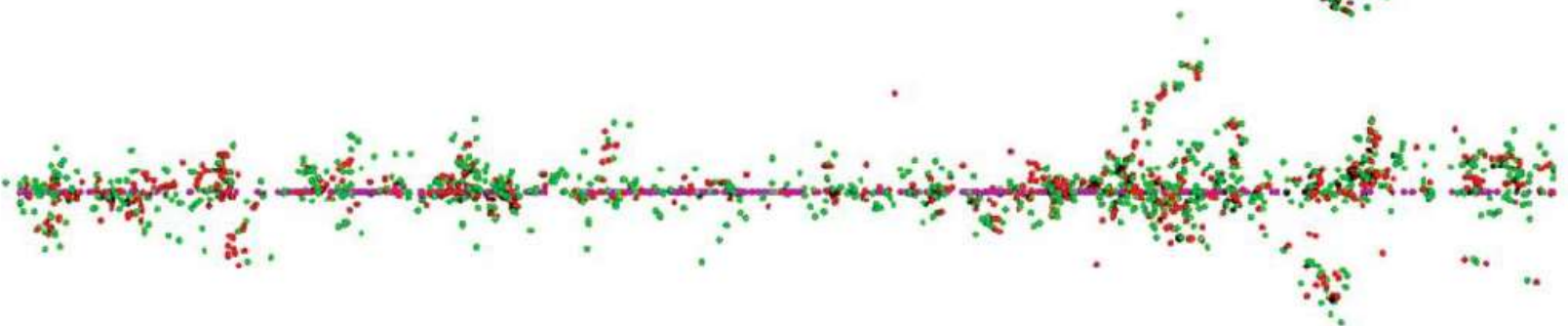
Rys. 1.1. Wyniki symulacji Monte-Carlo oddziaływania elektronów w wodzie. Założono, iż elektrony o zadanej energii biegną od lewej do prawej strony rysunku (przy dwóch różnych skalach długości). Punkty czerwone oznaczają akty jonizacji, a zielone – wzbudzenia. Na podstawie (ICRU, 2011).



0.5 MeV



3 MeV



60 nm

Rys. 1.2. Wyniki symulacji Monte-Carlo oddziaływania protonów (górny tor) oraz cząstek alfa (dolny tor) w wodzie. Założono, iż cząstki o zadanej energii biegną od lewej do prawej strony rysunku. Punkty czerwone oznaczają akty jonizacji, a zielone – wzbudzenia. Na podstawie (ICRU, 2011).

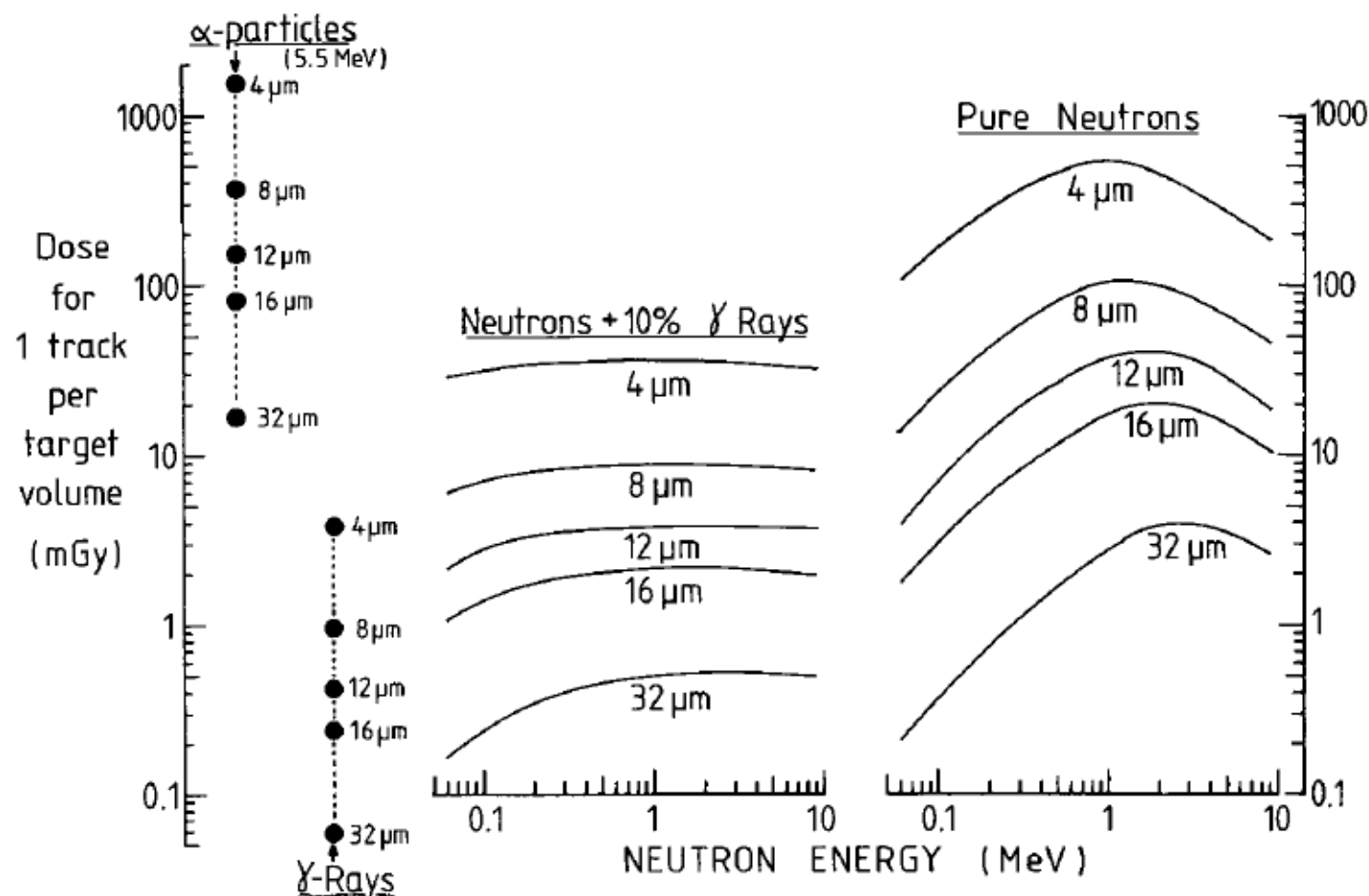


FIG. 5. Absorbed doses that correspond to a mean of 1 track per spherical target volume (representing cells or cell nuclei) randomly distributed throughout medium uniformly irradiated with 5.5-MeV α particles (as from ^{222}Rn), ~ 1 -MeV γ rays, or monoenergetic neutrons (with or without a 10% absorbed dose contribution from γ rays). At these doses individual target spheres will receive 0, 1, 2, etc., tracks with probabilities following a Poisson distribution with a mean of 1. [In all cases the evaluation has included the entire tracks, including those which stop or start in a target sphere. They are based on microdosimetric data computed for pure monoenergetic neutrons with no accompanying γ -ray contamination (Caswell and Coyne, 1976) or α particles (D. T. Goodhead, unpublished calculation) or experimentally measured for γ rays (Booz, 1976).]

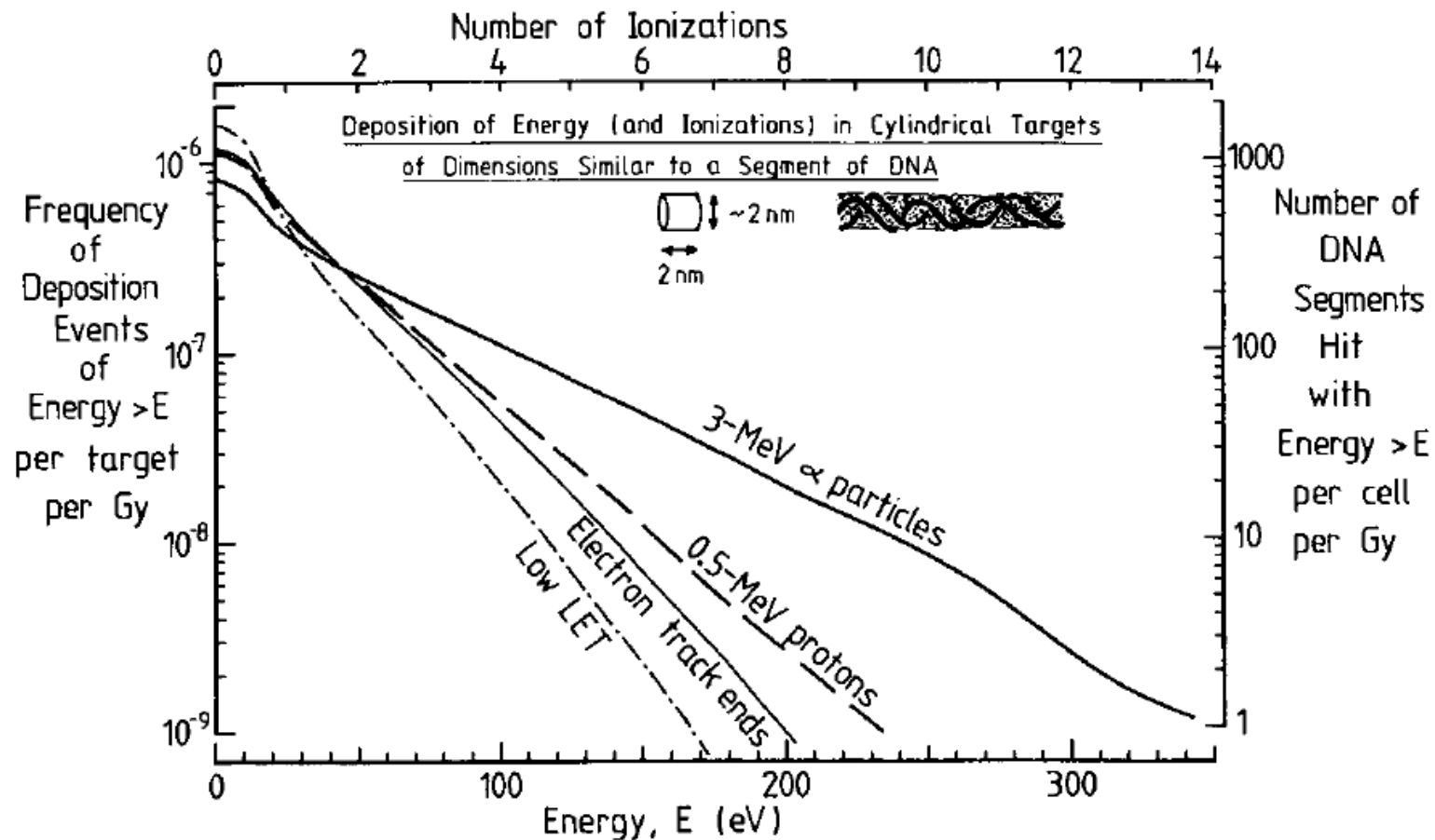
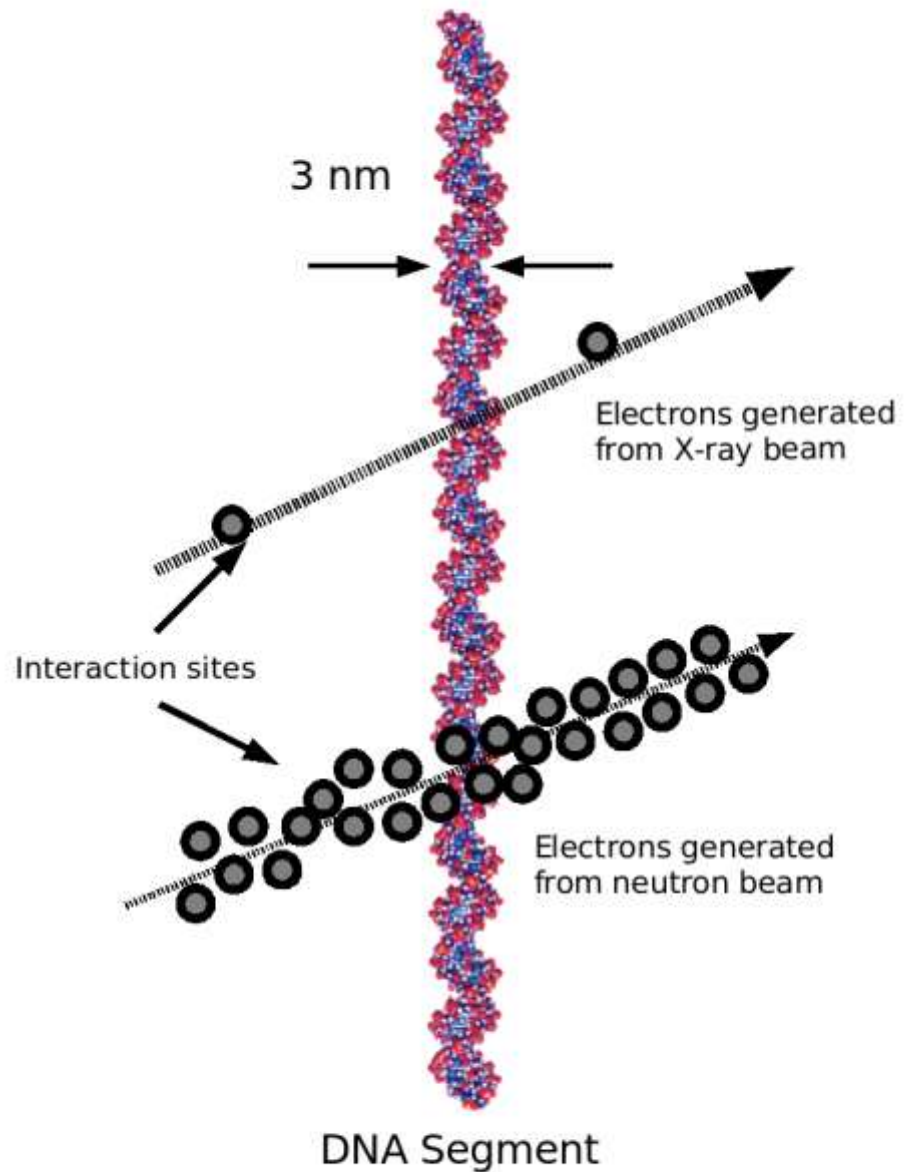


FIG. 6. Absolute frequencies of energy deposition, and numbers of ionizations, in a small (2×2 nm) cylindrical target volume randomly positioned in water irradiated with a selection of radiations. If these targets are identified as DNA then the right-hand axis shows the average number of such depositions in a single cell. The selected radiations are track segments of 3-MeV α particles (such as occur along the tracks of a α -emitting radionuclides, including radon) and 0.5-MeV protons (as along the recoil tracks from fission neutrons) and full slowing-down tracks of 100-keV electrons (giving results typical of conventional low-LET radiations) and 1-keV electrons (as an illustration of low-energy electron "track ends"). [Data as described in Nikjoo *et al.* (1989) and Goodhead and Nikjoo (1989).]

Podstawowe wielkości

- ◆ LET (już definiowaliśmy)
- ◆ **Gęstość jonizacji** – liczba wytworzonych ładunków na jednostkę drogi przebytej przez cząstkę jonizującą



By employing these non-stochastic quantities it is possible to derive the expected energy absorbed per unit mass at a point in the object which is the *absorbed dose*, D . In general D varies in space and time, but because it is a non-stochastic quantity, it can be defined as a point function in differential form:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1.4)$$

where $d\bar{\epsilon}$ is the mean energy absorbed in dm ; and its temporal variations is expressed by the *absorbed dose rate*, $\dot{D}$, as:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = \frac{d^2\bar{\epsilon}}{dm dt} \quad (1.5)$$

In a volume V surrounding the point at which the absorbed dose is equal to D the corresponding stochastic quantity *specific energy*, z , is defined by

$$z = \frac{\epsilon}{\rho V} = \frac{\epsilon}{m}, \quad (1.6)$$

where ρ is the density. $\bar{D}$, the mean value of the absorbed dose D in V is equal to $\bar{z}$, the mean value of the probability distribution $f(z)$ in V .

Mikrodozymetria - wielkości

Stąd popularnie używane wielkości:

- energia właściwa [$\text{Gy} = \text{J/kg}$]: $z = \frac{\epsilon}{m}$

(co odpowiada dawce pochłoniętej)

- energia liniowa [J m^{-1}]: $y = \frac{\epsilon}{l}$

(co jednak nie odpowiada LET, bo tutaj „ l ” dotyczy promienia objętości, w której deponowana jest energia ϵ , a nie drogi, na której jest tracona. Dlatego parametr „ y ” ma odniesienie geometryczne)



*** ROZWIĄZANIA ZADAŃ**

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. Jaka 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 ($30,8 \times 10^{-3} \text{ cGy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{GBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$).

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

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 $A_{w1} = 9080,31 \text{ Bq}$.

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):

11
at

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

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 $7,6 \cdot 10^{-2}$.

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

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

Wadele:
10 kwietnia
↗ (2 wniknięcia)