

# PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ, JEJ ZASTOSOWANIA I ELEMENTY OCHRONY RADIOLOGICZNEJ

Ludwik Dobrzyński

Wydział Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku  
oraz Instytut Problemów Jądrowych im. A.Soltana w Świerku

## I. PODSTAWOWE CHARAKTERYSTYKI ŹRÓDEŁ PROMIENIOTWÓRCZYCH. ELEMENTY DOZYMETRII I OCHRONY RADIOLOGICZNEJ

### 1.1 Aktywność

Pracując ze źródłami promieniotwórczymi musimy ustalić sposób ich charakteryzacji. Dotyczy ona izotopu lub izotopów, które zawiera źródło promieniowania, aktywności źródła, okresu połowicznego zaniku i rodzaju promieniowania wysyłanego przez źródło. Dane te są niezbędne do oceny skutków działania promieniowania na organizmy, w tym przede wszystkim na człowieka. Zdefiniujemy niżej te pojęcia, gdyż bez ich znajomości trudno się poruszać w świecie promieniotwórczości.

#### *Aktywność źródła*

Aktywność, zdefiniowana już w poprzednim rozdziale, jest liczbą rozpadów promieniotwórczych w źródle, zachodzących w jednostce czasu. Jednostką aktywności jest *bekerelel* (od Henri Becquerela – odkrywcy promieniotwórczości naturalnej):

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

Jednostka historyczna – *kiur* jest w przybliżeniu aktywnością 1g radu-226:

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

## ***Aktywność właściwa***

Jest to aktywność jednostki masy, objętości lub powierzchni emitujących promieniowanie. 1 Ci jest w przybliżeniu aktywnością właściwą radu (ściśle wynosi ona 36,6 GBq/g)

## **1.2 Zanik promieniotwórczy**

Jeśli w chwili początkowej  $t = 0$  liczba jąder promieniotwórczych wynosiła  $N_0$ , to po czasie  $t$  wynosi ona:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.1)$$

gdzie  $\lambda$  jest stałą rozpadu, związaną z okresem połowicznego zaniku ( $T_{1/2}$ ) relacją:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (1.2)$$

Z definicji aktywności wynika, że

$$A = -\frac{dN}{dt} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

W ciele człowieka każda substancja ma charakterystyczny, biologiczny czas połowkowy związany z wydalaniem. Jeśli więc w chwili zero dostarczymy do organizmu człowieka specyfik w ilości  $M_0$ , po czasie  $t$  będzie go

$$M = M_0 e^{-\lambda_{\text{Bio}} t} \quad (1.4)$$

Zdarza się także, że wydalanie substancji zachodzi wg bardziej złożonej formuły:

$$M = M_0 \left( A_1 e^{-\lambda_{\text{bio}}^{(1)} t} + A_2 e^{-\lambda_{\text{bio}}^{(2)} t} + \dots \right) \quad (1.5)$$

W ocenie wpływu wchłonięcia substancji promieniotwórczej interesuje nas zarówno tempo zaniku aktywności tej substancji, jak i tempo jej wydalania. Istotnym parametrem staje się wtedy efektywna stała zaniku:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_{\text{Bio}} \quad (1.6)$$

Odpowiedni efektywny okres (czas) połowicznego zaniku:

$$\frac{1}{T_{1/2}(\text{eff})} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_{1/2}(\text{Bio})} \quad (1.7)$$

Przy bardziej złożonych zależnościach dla wydalania substancji otrzymamy także bardziej złożone zależności na czasy efektywne, z reguły różne dla różnych narządów lub zespołów biologicznych.

Przykład: Biologiczny czas połowicznego zaniku jodu w tarczycy wynosi 64 dni. Czas połowicznego zaniku izotopu  $^{131}\text{I}$  wynosi 8 dni. Efektywny czas połowkowy wynosi więc ok. 7,1 dnia. W wypadku  $^{123}\text{I}$   $T_{1/2} = 13$  godz.,  $T_{1/2}(\text{Bio}) = 26$  godz, a zatem  $T_{1/2}(\text{eff}) = 8,7$  godz.

### 1.3 Dawka

*Dawka ekspozycyjna*, to ładunek jonów wytworzonych przez fotony w jednostce masy napromienionej substancji:

$$X = \frac{Q}{m} \quad (1.8)$$

Jednostką dawki ekspozycyjnej jest 1 C/kg.

Jednostką historyczną dawki ekspozycyjnej jest *rentgen* (1 R), czyli dawka od fotonów, wytwarzająca w 1cm<sup>3</sup> powietrza w warunkach normalnych (0,001293 g) 1 jednostkę elektrostatyczną jonów każdego znaku.

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

**Średnia dawka pochłonięta** D, to energia promieniowania zdeponowana w jednostce masy napromienionej substancji:

$$D = \frac{E}{m} \quad (1.9)$$

Jednostką dawki pochłoniętej jest *grej*:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} \quad (1.10)$$

Jednostką historyczną tej dawki jest *rad*:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 0,01 \text{ Gy} = 1 \text{ cGy} \quad (1.11)$$

1 R jest równoważny 0,00876 Gy = 8,76 mGy.

#### 1.4 KERMA (*Kinetic Energy Released in Unit Mass*)

**Kerma** jest to iloraz sumy początkowych energii kinetycznej cząstek naładowanych, wytworzonych w elemencie materii przez promieniowanie jonizujące pośrednio (a więc np. fotony i neutrony), i masy tego elementu

$$K = \frac{dE_{kin}}{dm} \quad (1.12)$$

Jednostką kermy jest grej (Gy).

## 1.5 Dawka równoważna (równoważnik dawki)

Aby uwzględnić biologiczną skuteczność dawki, wprowadza się pojęcie *dawki równoważnej*. Z definicji jest to dawka pochłonięta (D) pomnożona przez pewien współczynnik  $w_R$  biologicznej efektywności promieniowania:

$$H = w_R \cdot D \quad (1.13)$$

Choć współczynnik ten nie jest mianowany, nazwa jednostki zmienia się z greja na *siwert* (Sv) – od nazwiska uczonego szwedzkiego Rolfa Sieverta. Współczynniki  $w_R$  dla promieniowania różnego rodzaju podaje Tabela 1.1

Tabela 1.1 pokazuje współczynniki wagowe wg zaleceń Międzynarodowej Komisji Ochrony radiologicznej (ICRP) z roku 2007.

**Tabela 1.1 Współczynniki jakości promieniowania dla różnych rodzajów 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 $\alpha$ , ciężkie jony, fragmenty rozszczepienia	20

## 1.6 Dawka skuteczna

Radioczułość poszczególnych tkanek i narządów jest różna, w związku z czym wprowadza się także pewien współczynnik  $w_T$ , który pokazuje względną radioczułość narządów, tj. część dawki równoważnej, którą naświetlono całe ciało. **Dawkę skuteczną** (efektywną) obliczamy wtedy jako

$$E = \sum w_T \cdot H_T, \quad (1.14)$$

gdzie  $H_T$  jest dawką równoważną otrzymaną przez organ (narząd). Z definicji

$$\sum w_T = 1 \quad (1.15)$$

Tabela 1.2 podaje wartości współczynników wagowych  $w_T$ , zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej z 2007 r.

**Tab. 1.2 Współczynniki  $w_T$  wg zaleceń ICRP z 2007 r.**

Narząd lub tkanka	$w_T$	$\sum w_T$
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

Przy obliczaniu dawki dostarczonej do konkretnego narządu należy obliczyć **dawkę skumulowaną**, tj. łączną dawkę dostarczoną do narządu w czasie przebywania izotopu

promieniotwórczego w narządzie (całkę po czasie z funkcji  $A(t)$ ) i pomnożyć ją przez pewien czynnik poprawkowy, który charakteryzuje konkretny radionuklid w konkretnym narządzie. Jeśli efektywny okres połowicznego zaniku wynosi  $T_{1/2}(\text{eff})$ , to taka skumulowana aktywność wynosi

$$A_s = 1.44 \cdot T_{1/2}(\text{eff}) \cdot A_0, \quad (1.16)$$

gdzie  $A_0$  jest aktywnością początkową. Ze względu na cel niniejszego wykładu, nie będziemy omawiać wspomnianych wyżej czynników poprawkowych.

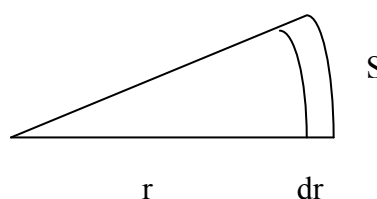
## 1.7 Moc dawki

Z punktu widzenia działania promieniowania na organizmy nie tylko ważna jest znajomość dawki. Istotną rzeczą jest także wiedza o czasie, w którym dawka była deponowana w organizmie. Dlatego też w ochronie radiologicznej i medycynie ważną wielkością jest tzw. moc dawki, tj. dawka pochłonięta w jednostce czasu:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (1.17)$$

Jednostkami mocy dawki mogą być: 1 Gy/rok, 1 mGy/h itp.

W odległości  $r$  od źródła punktowego gamma o aktywności  $A$  na powierzchnię  $S$  pada w ciągu jednej sekundy  $AS/4\pi r^2$  fotonów. W warstwie o grubości  $dr$ , a zatem w objętości  $Sdr$  i elemencie masy  $\rho Sdr$ , gdzie  $\rho$  – gęstość materiału, pochłaniana energia wynosi



$(AS/4\pi r^2)E_\gamma \mu dr, \quad (1.18)$

gdzie  $\mu$  jest liniowym współczynnikiem absorpcji (patrz paragraf 2.2), a  $E_\gamma$  - energią fotonów. Moc dawki (liczona w Gy/s) wynosi więc

$$(AS/4\pi r^2)E_\gamma\mu dr/Sdr\rho=(A/4\pi r^2)E_\gamma(\mu/\rho) \quad (1.19)$$

Moc dawki jest więc proporcjonalna do masowego współczynnika absorpcji ( $\mu/\rho$ ). Po odrobinie przekształceń algebraicznych otrzymamy:

$$\dot{D}_\gamma[\text{Gy/h}] = 4,589 \cdot 10^{-9} \frac{A[\text{kBq}]}{(r[\text{m}])^2} E_\gamma[\text{MeV}] \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right] \quad (1.20)$$

### 1.7.1 Moce dawek od jednorodnych źródeł wewnętrznych

W medycynie nuklearnej wprowadzamy preparaty promieniotwórcze (radiofarmaceutyki) do wnętrza organizmu i w związku z tym narządy, w których się one znajdują będą stanowiły źródła promieniowania dla innych organów, nie wspominając o tym, że same będą narażone na działanie promieniowania i należy zatem umieć obliczyć dawki na te narządy. Jest rzeczą oczywistą, że istotną rolę będzie tu odgrywał rodzaj emitera promieniowania i dlatego też należy rozpatrywać dawki i moce dawek oddzielnie dla każdego emitera.

#### *Emiter $\alpha$*

Dla emitera o stężeniu aktywności  $a_m$  na jednostkę masy moc dawki wynosi

$$\dot{D}_\alpha = a_m \bar{E}_\alpha \quad (1.21)$$

$$\dot{D}_\alpha \left[ \frac{\text{Gy}}{\text{h}} \right] = 5,767 \cdot 10^{-4} a_m \left[ \frac{\text{kBq}}{\text{g}} \right] \bar{E}_\alpha [\text{MeV}] \quad (1.22)$$

#### *Emiter $\beta$*

$$\dot{D}_\beta = a_m \bar{E}_\beta \quad (1.23)$$



$$\dot{D}_\beta \left[ \frac{\text{Gy}}{\text{h}} \right] = 5,767 \cdot 10^{-4} a_m \left[ \frac{\text{kBq}}{\text{g}} \right] \bar{E}_\beta [\text{MeV}] \quad (1.24)$$

### ***Emiter $\gamma$***

Jeśli promieniotwórczy izotop jest równomiernie rozmieszczony w kuli o promieniu R znacznie mniejszym niż średnia droga swobodna (ok. 25 cm w tkance miękkiej dla fotonów o energii 1 MeV):

$$\dot{D}_\gamma = a_v \bar{E}_\gamma \frac{\mu_a}{\rho} R \quad (1.25)$$

gdzie  $a_v$  – aktywność jednostki objętości kuli.

$$\dot{D}_\gamma \left[ \frac{\text{Gy}}{\text{h}} \right] = 5,767 \cdot 10^{-4} a_v \left[ \frac{\text{kBq}}{\text{cm}^3} \right] \bar{E}_\gamma [\text{MeV}] \frac{\mu_a}{\rho} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right] R [\text{cm}] \quad (1.26)$$

W odległości  $r$  od środka kuli:

$$\dot{D}_\gamma(r) = L(r) \dot{D}_\gamma(0) \quad (1.27)$$

gdzie

$$L(r) = 0,5 + \frac{1-s^2}{4s} \ln \frac{1+s}{|1-s|} \quad (1.28)$$

gdzie

$$s=r/R \quad (1.29)$$

Średnia moc dawki w kuli wynosi

$$0.75 \dot{D}_\gamma(0) \quad (1.30)$$

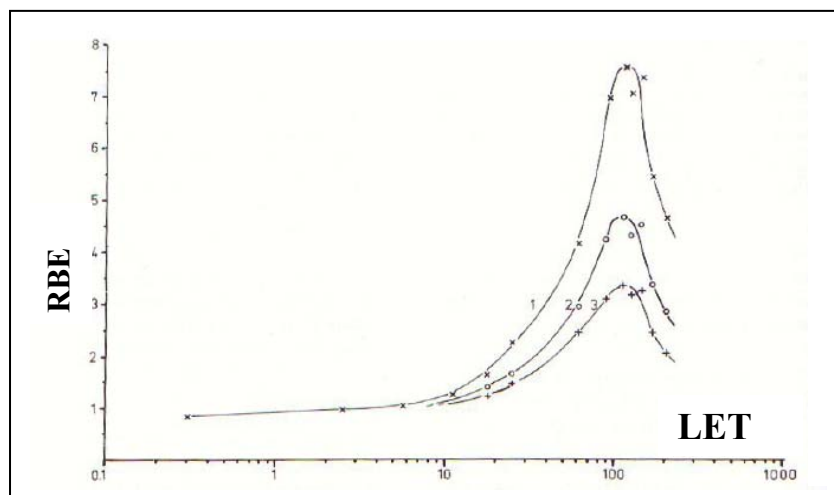
## 1.8 Względna skuteczność biologiczna

Czynnik wagowy wskazujący na „jakość” promieniowania jest niewątpliwie związany z biologiczną skutecznością promieniowania. Ta zależy zarówno od rodzaju promieniowania, jak i jego energii. Do opisu tych zależności wprowadza się czynnik, który nazywamy **względną skutecznością biologiczną** RBE (z ang. *Relative Biological Effectiveness*). Czynnik ten definiujemy jako

$$RBE = D_{250}/D_R, \quad (1.31)$$

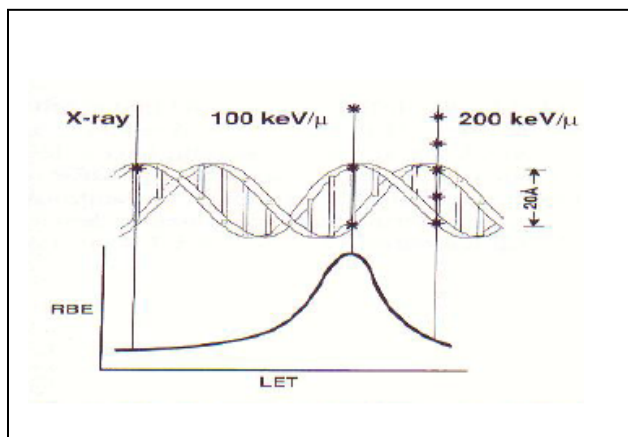
gdzie  $D_{250}$  oznacza dawkę pochłoniętą promieniowania X (250 kVp), która wywołuje dany skutek biologiczny, a  $D_R$  – dawkę pochłoniętą innego rodzaju promieniowania, wywołującą taki sam skutek biologiczny.

Na rysunkach 1.1-1.4 pokazujemy cechy RBE dla różnych rodzajów promieniowania i dawek.

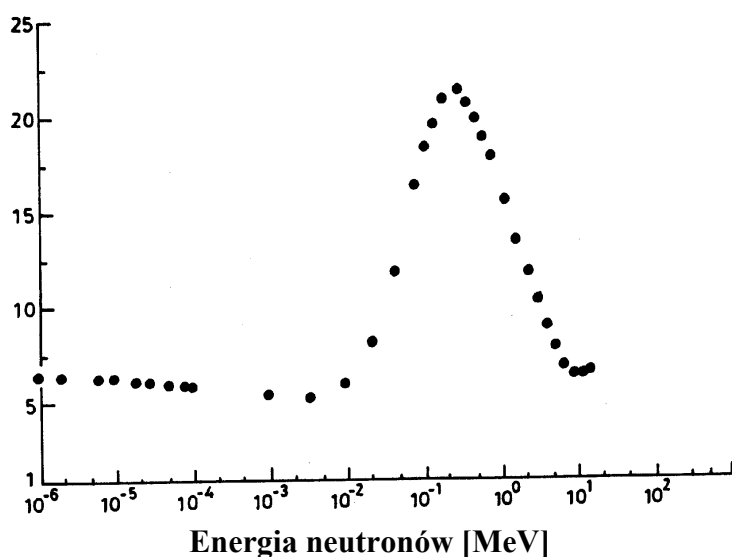


**Rys. 1.1 RBE w funkcji LET [keV/mm] dla ustalonej przeżywalności komórek ludzkich. Krzywe 1, 2 i 3 odpowiadają przeżywalności komórek odpowiednio 0,8 0,1 i 0,01. Wartość RBE zależy zatem od stopnia uszkodzeń biologicznych, a więc dawki<sup>1</sup>**

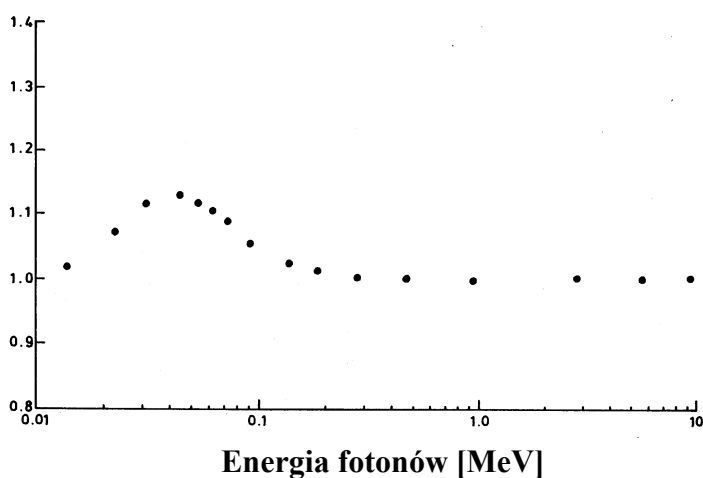
<sup>1</sup> E.J.Hall (2000). LET (ang. *Linear Energy Transfer*) jest stratą energii promieniowania na jednostkę przebytej drogi, patrz wzór (2.17)



Rys. 1.2 Rysunek ilustrujący, dlaczego promieniowanie o LET około 100 keV/μm wykazuje największą względną efektywność biologiczną ze względu na uśmiercanie komórek i tworzenie komórek nowotworowych. Dla tej wartości LET średnia odległość centrów jonizacji odpowiada średnicy podwójnej helisy DNA, a więc może powstać pęknięcie obu nici DNA



Rys. 1.3 Zależność RBE od energii neutronów



Rys. 1.4 Zależność RBE od energii fotonów

Z punktu widzenia ochrony radiologicznej, różnica między RBE i współczynnikami  $w_R$  jest nieistotna i współczynniki te utożsamia się. Różnice między nimi pokazuje Tabela 1.3.

**Tab. 1.3 Względna skuteczność biologiczna i czynniki  $w_R$**

<i>Rodzaj promieniowania</i>	<i>RBE</i>	<i><math>w_R</math></i>
X (200 kVp)	1	1
X lub $\gamma$ (różne energie)	0,7-1,2	1
Cząstki $\beta$ (różne energie)	1,0-1,7	1
Neutrony (różne energie)	1-15	5-20
Protony (różne energie)	5-10	20
Cząstki $\alpha$ (różne energie)	5-20	20
Ciężkie jony i jądra (różne energie)	10-20	20

## 1.9 Ilość materiału promieniotwórczego

Wprowadzona wcześniej aktywność  $A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$  mówi o liczbie rozpadów zachodzących w jednostce czasu w danej próbce. Nie jest ona tożsama z ilością materiału promieniotwórczego w próbce, tj. liczbą  $N$  jąder promieniotwórczych w próbce. W przybliżeniu,

$$N(t) = 1.44A(t)T_{1/2} \quad (1.32)$$

Tak więc, przy odpowiednio krótszym okresie połowicznego zaniku, mała ilość materiału promieniotwórczego może mieć taką samą aktywność, jak duża.

### 1.9.1 Aktywność skumulowana

Łatwo zauważyć, że  $N(0)$  pokrywa się z aktywnością skumulowaną  $A_s$ , patrz (1.16), jeśli do wzoru (1.32) podstawimy efektywny okres połowicznego zaniku. Przez aktywność skumulowaną rozumiemy zatem początkową ilość materiału promieniotwórczego

$$N = 1.44 A_0 T_{1/2} \quad (1.33)$$

### 1.10 Równowaga promieniotwórcza

Jaka jest relacja pomiędzy aktywnością, ilością materiału promieniotwórczego i czasem w trakcie tworzenia materiału promieniotwórczego? Pytanie takie jest w pełni zasadne, gdyż materiał promieniotwórczy tworzy się, ale w tym samym czasie także się rozpada.

W miarę upływu czasu aktywność rośnie, ale też ilość promieniotwórczego izotopu ubywa ze względu na jego rozpad promieniotwórczy. Po pewnym czasie następuje równowaga: tyle samo materiału przybywa ile ubywa.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + Q(t), \quad (1.34)$$

gdzie  $Q(t)$  oznacza tempo produkcji izotopu. Stąd

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} + \int_0^t dt' Q(t') e^{-\lambda(t-t')} \quad (1.35)$$

Jeśli  $Q = Q_0 = \text{const}$ :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} + \frac{Q_0}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (1.36)$$

Gdy tworzącym się materiałem promieniotwórczym są jądra pochodne (w języku angielskim są one nazywane *daughter nuclei*) wyjściowego materiału promieniotwórczego, zależność aktywności od czasu będzie funkcją obu okresów połowicznego zaniku: jąder macierzystych i pochodnych. Np.  $^{90}_{38}\text{Sr}$  rozpada się (okres połowicznego zaniku 29,1 lat) do  $^{90}_{39}\text{Y}$ , ten zaś do stabilnego  $^{90}_{40}\text{Zn}$  z półokresem 64 h. Równania określające więc całość procesu będą następujące:

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1(t) \\ \frac{dN_2}{dt} &= -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(t) \\ \frac{dN_3}{dt} &= \lambda_2 N_2(t)\end{aligned}\tag{1.37}$$

gdzie  $N_1$  oznacza liczbę jąder strontu,  $N_2$  – itru, a  $N_3$  – cynku. A zatem:

$$\begin{aligned}N_1(t) &= N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) &= N_2(0)e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \\ N_3(t) &= N_3(0) + N_2(0)[1 - e^{-\lambda_2 t}] + \frac{N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} [\lambda_2(1 - e^{-\lambda_1 t}) - \lambda_1(1 - e^{-\lambda_2 t})]\end{aligned}\tag{1.38}$$

Jeśli jądro pochodne rozpada się szybciej niż macierzyste, to asymptotyczna aktywność (zakładamy  $A_2(0) = 0$ )

$$A_2(t) \rightarrow A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t}\tag{1.39}$$

Zatem: aktywność jądra pochodnego dyktowana jest przez tempo rozpadu jądra macierzystego. Tę sytuację nazywamy *równowagą przejściową* (*transient equilibrium*). Ze wzoru (1.39) wynika, że w wypadku, gdy jądro macierzyste rozpada się w całości do jednego jądra pochodnego, aktywność jądra pochodnego będzie wtedy zawsze większa od aktywności

jądra macierzystego, natomiast tempo zaniku (oczywiście po pewnym wstępnym okresie formowania się jąder pochodnych) będzie takie samo jak jądra macierzystego. Przykładem tego rodzaju procesu jest tworzenie się aktywności  $^{99m}\text{Tc}$  ( $\lambda = 0.116$ ) z rozpadu  $^{99}\text{Mo}$  ( $\lambda = 0.010$ ). W tym przykładzie należy pamiętać, że obliczaną na podstawie wzoru (1.39) aktywność trzeba zmniejszyć o 14%, gdyż jedynie tylko 86%  $^{99}\text{Mo}$  rozpada się do  $^{99m}\text{Tc}$ . Tak więc aktywność technetu będzie zawsze nieco niższa od aktywności molibdenu. W granicznym przypadku  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  aktywność materiału pochodnego zbliża się do aktywności materiału macierzystego. Mówimy wtedy o **równowadze wiekowej** (*secular equilibrium*).

Jeśli jądro pochodne rozpada się wolniej, w granicy długich czasów i przy założeniu, że  $A_2(0) = 0$ ,

$$A_2(t) \cong A_1(0) \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t}, \quad (1.40)$$

tj. materiał pochodny rozpada się w swoim charakterystycznym tempie.

**Przykład:**

Jaki jest potrzebny czas, aby w źródle z początkowo czystego  $^{90}\text{Sr}$  otrzymać  $^{90}\text{Y}$  o aktywności wynoszącej 5% aktywności jąder strontu?

Dane:  $T_{1/2}(^{90}\text{Sr})=29,12$  lat;  $T_{1/2}(^{90}\text{Y})=64$  h;  $A_2(0)=0$

Poszukujemy czasu, po którym  $[A_1(t)-A_2(t)]/A_1(t)=0.05$ .

$$\frac{A_1(t) - A_2(t)}{A_1(t)} = 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}], \quad (1.41)$$

skąd

$$t \approx \frac{\ln 0.05}{\lambda_2} = 11,52 \text{ dnia} \quad (1.42)$$

Obecnie najbardziej rozpowszechnionym źródłem metastabilnego technetu ( $^{99m}\text{Tc}$ ;  $T_{1/2}=6,01$  h), izotopu szczególnie silnie eksploatowanego w medycynie nuklearnej, jest generator  $^{99}\text{Mo}$  ( $T_{1/2}=65,5$  h). Rozpad molibdenu do metastabilnego technetu omawialiśmy już w wykładzie „Elementy fizyki jądrowej”.

## 1.11 Zasady ochrony radiologicznej

Z podanych wyżej relacji można łatwo wysnuć następujące, proste zasady ochrony radiologicznej:

1. im jesteśmy bliżej źródła, tym narażenie jest większe (moc dawki maleje z kwadratem odległości od źródła);
2. im dłużej przebywamy w polu promieniowania jonizującego, tym narażenie jest proporcjonalnie większe;
3. przed promieniowaniem można się osłonić, jeśli zastosuje się odpowiednie osłony. Aby jednak wiedzieć, jakie to mają być osłony, musimy zrozumieć, w jaki sposób promieniowanie penetruje materię i tym właśnie zagadnieniem zajmiemy się w kolejnym rozdziale.

Innym problemem jest kwestia szkodliwości promieniowania jonizującego. Zalecenia Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej każą chronić ludność nie narażoną zawodowo przez dawką 1 mSv rocznie. Ponieważ jest to zaledwie 1/3 dawki promieniowania naturalnego, które dostaje każdy człowiek, warto dowiedzieć się, czy rzeczywiście taki niski próg ochrony jest niezbędny. Z tego względu, w rozdziale V omawiamy wpływ promieniowania jonizującego na organizm.