

# Zadanie121: RADON W POWIETRZU

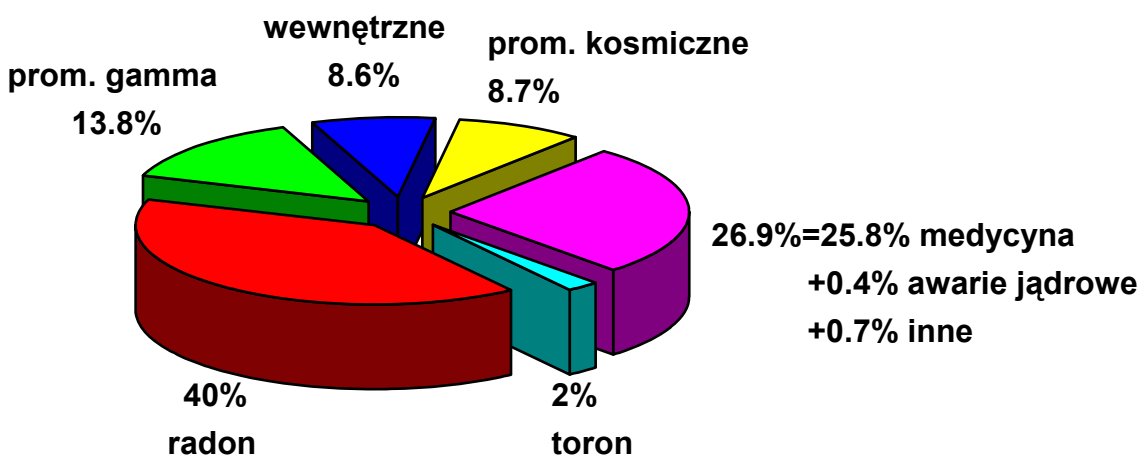
## CEL ZADANIA:

- 1) Pomiar stężenia  $^{222}\text{Rn}$  i produktów jego rozpadu w powietrzu (w zamkniętych pomieszczeniach).
- 2) Ocena energii cząstek  $\alpha$  produktów rozpadu radonu.
- 3) Zapoznanie się z detektorem scyntylicyjnym cząstek  $\alpha$ .

## 1. WSTĘP

Człowiek w środowisku spotyka się z różnego rodzaju promieniowaniem jonizującym, którego źródła są następujące:

- 1) naturalne promieniowanie środowiska związane np. z obecnością uranu czy  $^{40}\text{Ca}$  w skorupie ziemskiej
- 2) promieniowanie kosmiczne i wytwarzane przez nie w atmosferze lub na powierzchni Ziemi izotopy promieniotwórcze
- 3) źródła sztuczne np. związane z diagnostyką medyczną.



Rys.1. Wkład do dawki od promieniowania jonizującego od różnych źródeł. Zwróćmy uwagę na duży udział radonu (40%) oraz diagnostyki medycznej (ok. 26%). "Wewnętrzne"- oznacza wkład od pierwiastków promieniotwórczych obecnych w naszym ciele np. od  $^{40}\text{K}$ . "toron"- wkład od  $^{220}\text{Rn}$  i produktów jego rozpadu. "radon"- wkład od  $^{222}\text{Rn}$  i produktów jego rozpadu. "prom. gamma"- promieniowanie od gruntu i budynków (materiały budowlane). Dane dotyczą sytuacji w Polsce w 1998r [1].

Rys.1 pokazuje, że najbardziej istotnym źródłem promieniowania jonizującego jest radon i promieniotwórcze produkty jego rozpadu. Dalej zajmiemy się jedynie izotopem  $^{222}\text{Rn}$  i jego krótkożyciowymi produktami rozpadu ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ , i  $^{214}\text{Po}$  - patrz rys.2), gdyż ich wkład do dawki pochodzącej od radonu jest największy. Wymienione powyżej nuklidy promieniotwórcze obecne są w powietrzu, którym oddychamy.

## RADON

Radon-symbol Rn,  $Z=86$ , gaz szlachetny, bezbarwny, bezwonny. Wszystkie izotopy radonu są promieniotwórcze. Izotop  $^{222}\text{Rn}$  jest produktem rozpadu  $\alpha$  izotopu  $^{226}\text{Ra}$  (rad-226), który z kolei powstaje w "łańcuchu" rozpadów  $^{238}\text{U}$  (uran-238) zawartego w skorupie ziemskiej. Rozpad  $^{222}\text{Rn}$  pokazany jest na rys.2.

### Radon w naszym środowisku

W skorupie ziemskiej znajduje się m.in. promieniotwórczy uran-238 wytworzony w procesie nukleosyntezy wiele miliardów lat temu. Przetrwał on do dnia dzisiejszego dzięki długiemu czasowi połowicznego rozpadu (patrz rozdz. 3), który wynosi  $T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$  lat, co jest porównywalne z wiekiem Układu Słonecznego. Rozpad  $^{238}\text{U}$  (po 4 rozpadach  $\alpha$  i 2 rozpadach  $\beta$  [2]) prowadzi do promieniotwórczego izotopu  $^{222}\text{Rn}$ , który będąc gazem dyfunduje poprzez glebę i miesza się z powietrzem. Dalsze rozpady  $^{222}\text{Rn}$  (patrz rys.2) prowadzą do powstania krótkożyjących izotopów promieniotwórczych  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$ . Te produkty rozpadu  $^{222}\text{Rn}$  "przyklepiają się" do unoszących się w powietrzu aerozoli (patrz dalej - tekst w ramce). Radon i produkty jego rozpadu wdychamy z powietrzem do płuc. Rozpadające się jądra emitują cząstki  $\alpha$  i  $\beta$  oraz kwanty  $\gamma$ . Wiemy, że promieniowanie  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  przechodząc przez materię powoduje jonizację. W przypadku wdychania radonu i produktów jego rozpadu jonizacja może spowodować uszkodzenie komórek płuc, co może prowadzić do zmian w komórkach i zwiększenia prawdopodobieństwa choroby nowotworowej.

Koncentracja radonu w zamkniętych pomieszczeniach jest na ogół większa od koncentracji na otwartej przestrzeni (patrz tabela poniżej).

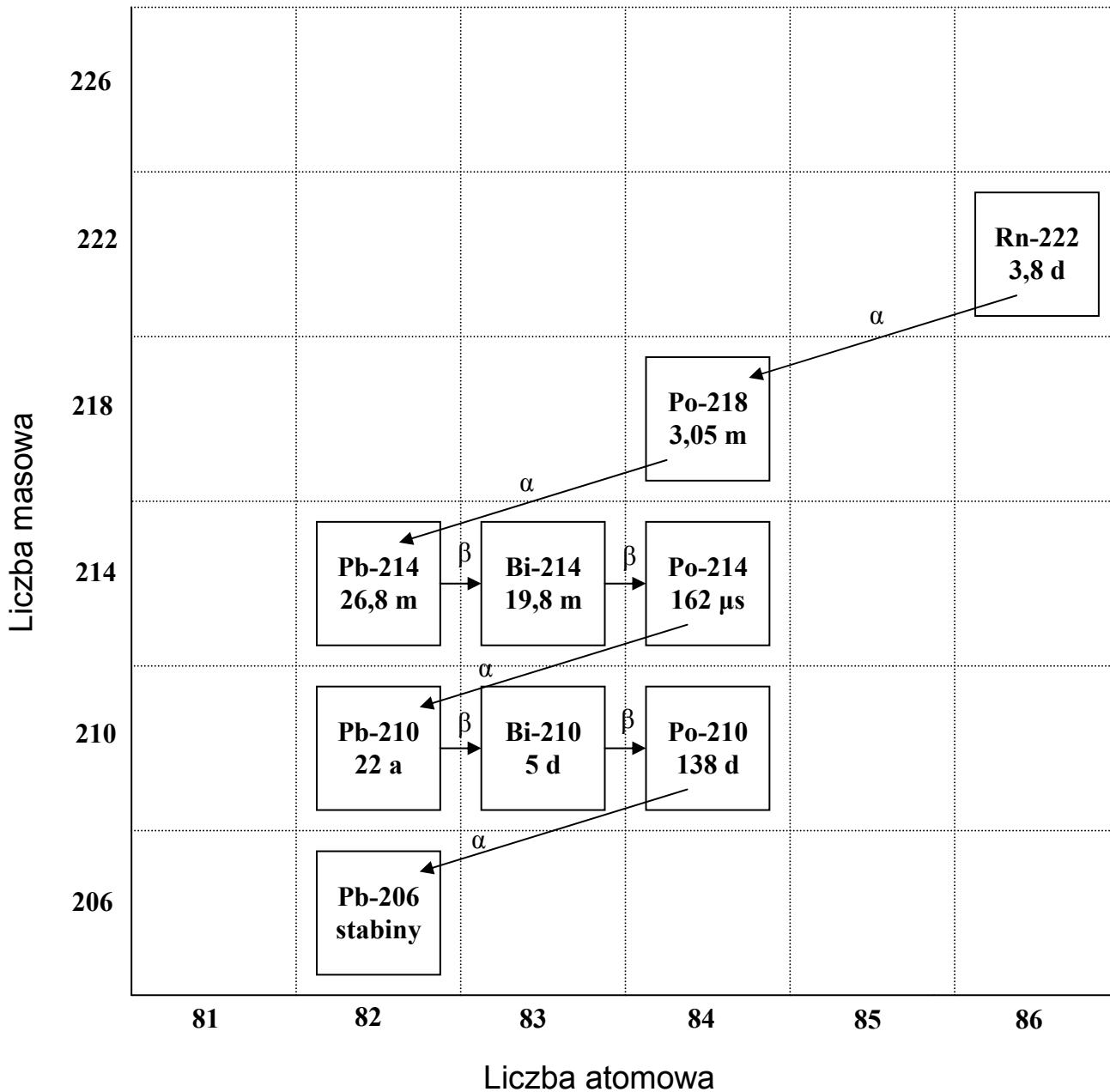
Aktywność radonu (w jedn.  $\text{Bq/m}^3$ ) w naszym otoczeniu - dane orientacyjne [3].

Miejsce pomiaru	Aktywność [ $\text{Bq/m}^3$ ]
powietrze przy gruncie	10
wietrzony pokój	40
pokój zamknięty	80
piwnica	400
pieczara	10000

Do pomieszczeń radon przenika z gleby poprzez nieszczelności w fundamentach. Stąd szczególnie duże stężenie Rn możemy spotkać w piwnicach. Drugim Źródłem Rn w pomieszczeniach mogą być materiały budowlane, z których dyfunduje radon. Występuje to, jeśli użyte materiały budowlane zawierają rad, uran lub tor. Takim materiałem jest np. granit lub bloki produkowane w oparciu o żużle i popioły powstałe ze spalania węgla kamiennego. Stężenie radonu w pomieszczeniach zależy więc od rodzaju gruntu na którym stoi budynek, jego konstrukcji i szczelności, użytych materiałów budowlanych oraz od intensywności z jaką pomieszczenia są wentylowane. Stężenie radonu w polskich mieszkaniach wynosi średnio ok.  $50 \text{ Bq/m}^3$ . Największe stężenia w Polsce zarejestrowano w budynkach w okolicy Jeleniej Góry. Wg. polskich norm nie powinno ono przekraczać **200  $\text{Bq/m}^3$**  w budynkach oddawanych do użytku po 01.01.1998 r. Wietrzenie pomieszczeń redukuje stężenie radonu (patrz tabela powyżej). Sprawa szkodliwości niewielkich stężeń radonu w powietrzu jest wciąż przedmiotem dyskusji - patrz [4].

Aktywność źródeł promieniotwórczych = liczba rozpadów jąder w jednostce czasu .  
W układzie SI mierzona jest w bekerelach (**Bq**).  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$

Aerozole atmosferyczne- ciała stałe lub ciecze rozproszone w powietrzu. Średnica cząstek aerozoli jest rzędu  $10^{-9}$  -  $10^{-5}\text{m}$ . Przykłady aerozoli - dymy, mgły. Więcej informacji - patrz Encyklopedia Fizyki PWN.



Rys.2. Uproszczony schemat rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ . Pokazany jest jedynie fragment istotny w naszym zadaniu. W kwadratach podana jest dawna, tradycyjna nazwa, niekiedy jeszcze używana przy omawianiu naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. Korzystając z opisu osi x i y łatwo odczytać, że np. RaA to wg. współczesnej nomenklatury  $^{218}\text{Po}$ . W kwadratach podany jest także okres połowicznego rozpadu. Strzałki poziome oznaczają rozpad  $\beta^-$ , zaś ukośne rozpad  $\alpha$ .

Rn – Radon  
Pb – Ołów

Po – Polon

Bi – Bizmut

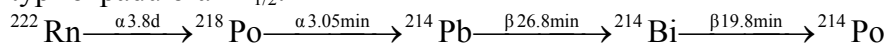
m – minuty

d – dni

a - lata

## 2. POMIARY

W zadaniu rejestrować będziemy cząstki  $\alpha$  pochodzące od produktów rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ . Pozwoli nam to określić aktywność promieniowania  $\alpha$  produktów rozpadu radonu. Skomplikowany rozpad  $^{222}\text{Rn}$  (rys.2) zastąpimy następującym szeregiem, uzupełniając podaną informację o typ rozpadu oraz  $T_{1/2}$ :



Wyjaśnienia:

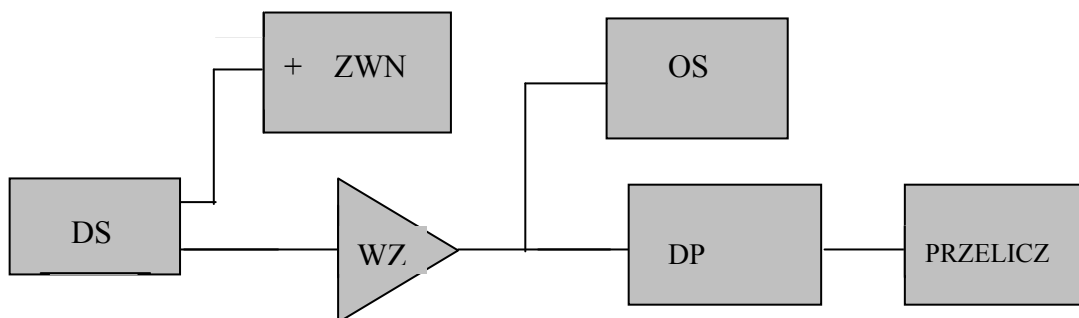
1) Rozpad  $^{214}\text{Bi}$  do  $^{214}\text{Po}$ , patrz rys. 2, zachodzi z  $T_{1/2}=19.8$  min.  $^{214}\text{Po}$  rozpada się do  $^{210}\text{Pb}$  z bardzo krótkim  $T_{1/2}=162$   $\mu\text{s}$ . Widzimy, że rozpad ten zachodzi "natychmiast" po rozpadzie  $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$ . Możemy więc złożony rozpad  $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$  potraktować jako jeden proces zachodzący z efektywnym półokresem rozpadu  $T_{1/2}=19.8$  min.

2) Długi okres półrozpadu  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2}=22$  lata) powoduje, że izotop ten i dalsze nie występuje w śladowych ilościach w pomieszczeniach. Oznacza to że śladowe ilości  $^{210}\text{Po}$  występują wszędzie w naszym otoczeniu. Przyczyną tego jest naturalna wymiana powietrza w pomieszczeniach, która nie dopuszcza do gromadzenia się izotopów o długich okresach połowicznego zaniku.

### 2.1. APARATURA POMIAROWA

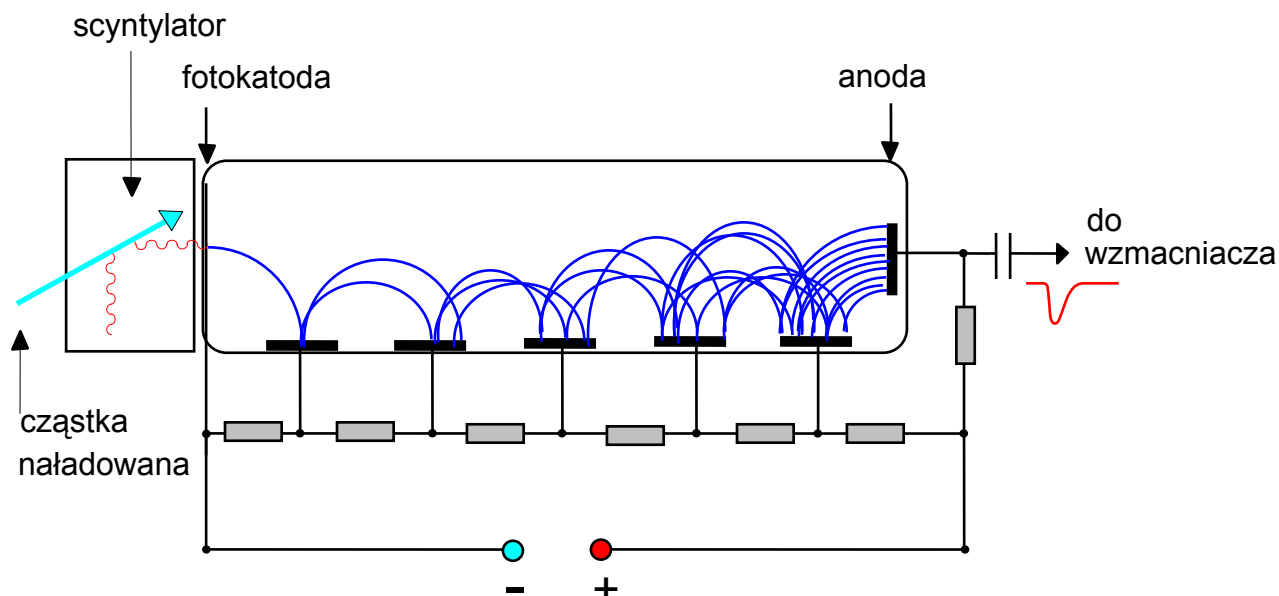
Układ pomiarowy przedstawiony na rys.3 składa się z:

- 1) detektora scyntylicyjnego (DS)
- 2) zasilacza wysokiego napięcia (ZWN) zasilającego dzielnik napięcia fotopowielacza (patrz dalej tekst)
- 3) wzmacniacza (WZ) sygnałów z fotopowielacza
- 4) dyskryminatora progowego (DP). Dyskryminator progowy generuje impuls, jeśli na jego wejściu pojawi się sygnał, którego amplituda przekracza poziom zadany przez eksperymentatora
- 5) przelicznika
- 6) oscyloskop (OS)
- 7) odkurzacza



Rys.3. Schemat blokowy aparatury współpracującej z detektorem scyntylicyjnym.

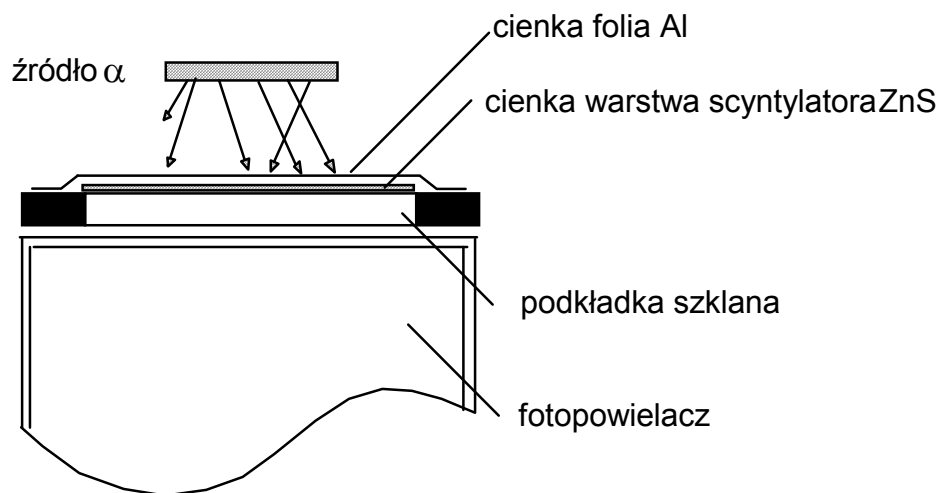
Zasadniczym elementem układu jest detektor scyntylicyjny, który składa się ze scyntylatora i fotopowielacza (rys.4).



Rys.4. Fotopowielacz wraz ze scyntlatorem.

### Zasada rejestracji cząstek naładowanych.

Cząstki naładowane (np. cząstki  $\alpha$ ) wpadając do scyntylatora (rys.4) jonizują i wzbudzają atomy lub cząsteczki scyntylatora. Wzbudzone atomy lub cząsteczki emitują następnie fotony, które rejestrowane są za pomocą fotopowielacza.



Rys.5. Budowa scyntylatora ZnS

### Scyntylatory

Znany obecnie bardzo wiele różnych scyntylatorów. Na I Pracowni Fizycznej do detekcji promieniowania  $\gamma$  używamy jednego z najbardziej popularnych scyntylatorów, a mianowicie kryształu jodku sodu (NaI). Do detekcji cząstek  $\alpha$  wykorzystujemy siarczki cynku (ZnS) w postaci cienkiej polikrystalicznej warstwy osadzonej na płytce szklanej przez którą błyski

światła ze scyntylatora przechodzą do fotopowielacza (rys. 5). Warstwa scyntylatora przykryta jest bardzo cienką folią Al (ok. 4  $\mu\text{m}$ ), która osłania fotopowielacz od światła zewnętrznego oraz odbija wytworzone w scyntylatorze fotony w kierunku fotopowielacza. Grubość folii Al jest tak dobrana aby badane cząstki  $\alpha$  mogły przez nią przejść i dotrzeć do scyntylatora.

### Fotopowielacze

Fotopowielacz (patrz rys.4) jest lampą elektronową składającą się z fotokatody, dynod i anody. Fotony ze scyntylatora padając na fotokatodę mogą z niej wybić w wyniku zjawiska fotoelektrycznego elektrony. Elektrony te przyśpieszane są w polu elektrycznym wytworzonym przez napięcie (z zasilacza wysokonapięciowego) przyłożone między fotokatodą a 1-szą dynodą. Padając na powierzchnię dynody, w wyniku emisji wtórnej, wyrzucają z niej kilka elektronów. Z kolei te elektrony przyśpieszane w polu elektrycznym wytworzonym pomiędzy 1-szą a 2-gą dynodą padając na powierzchnię dynody wybijają następne elektrony. Proces ten powtarza się na kolejnych dynodach. Mamy do czynienia z procesem lawinowego narastania (postęp geometryczny) liczby elektronów. Jeden elektron wybity z fotokatody może w drodze do anody zostać powielony o czynnik  $10^5 - 10^9$ . Pojawiający się na anodzie ładunek powoduje powstanie impulsu napięciowego. Impuls napięciowy po wzmożeniu może być zarejestrowany przelicznikiem.

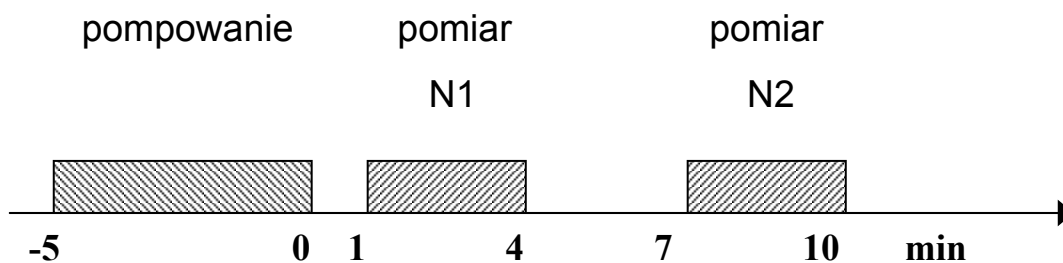
## 2.2. PROPOZYCJE POMIARÓW WRAZ Z OPISEM METODY

W oparciu o zaproponowane poniżej tematy należy w porozumieniu z asystentem ustalić zakres badań:

- 1) Kontrola działania detektora cząstek  $\alpha$ . Wykorzystać Źródło  $\alpha$ -promieniotwórcze. Impulsy wyjściowe ze wzmacniacza można obserwować używając oscyloskopu OS - rys.3.
- 2) Pomiar aktywności RaA( $^{218}\text{Po}$ ) zawartego w powietrzu. Wyznaczamy aktywność 1  $\text{m}^3$  powietrza. Wykorzystamy metodę Markova przedstawioną w [5] i często stosowaną w praktyce dozymetrycznej ze względu na jej prostotę i szybkość uzyskiwania informacji.

W tym celu:

- a) pompujemy przez 5 min powietrze przez specjalną tkaninę będącą filtrem, na którym osadzają się aerozole z "przyklepionymi" do nich promieniotwórczymi produktami rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ .
- b) filtr przenosimy pod detektor i wykonujemy dwa pomiary liczby cząstek  $\alpha$ . Każdy pomiar trwa 3 minuty. Cykl pomiarowy pokazany jest na rys.6. W wyniku pomiarów uzyskujemy liczby zliczeń N1 i N2.



Rys.6. Cykl pomiarowy w metodzie Markova.

Markov wykazał, że ten podział czasu na zbieranie aktywności (pompowanie powietrza przez filtr) i jej pomiary daje zadowalającą dokładność.

Analiza wzorów analogicznych do (7) - (10) z rozdziału 3 prowadzi do wniosku, że w cyklu pomiarowym jak na rys.6, aktywność RaA znajdującego się w 1 m<sup>3</sup> powietrzu wynosi:

$$C_A = \frac{7.3 \times 10^{-5} (N1 - N2)}{\varepsilon v \eta} \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \quad (1)$$

gdzie C<sub>A</sub>- stężenie RaA w powietrzu w jednostkach [Bq/m<sup>3</sup>]

ε- wydajność rejestracji cząstek α - ten czynnik trzeba uwzględnić w

obliczeniach, gdyż nie każda cząstka α wylatująca z filtra trafia do detektora

v- prędkość pompowania powietrza w jednostkach [m<sup>3</sup>/s]

η- efektywność zatrzymywania produktów rozpadu radonu na filtrze.

Nie wszystkie produkty rozpadu muszą być zatrzymane na filtrze.

Współczynnik liczbowy 7.3\* 10<sup>-5</sup> obliczony został dla cyklu pomiarowego z rys.6.

Aby korzystać ze wzoru (1) należy używać zalecanych powyżej jednostek dla C<sub>A</sub>, v.

Wielkość ε należy oszacować, zaś v i η wyznaczyć doświadczalnie.

3) Pomiar prędkości v pompowania powietrza przez filtr. Do pompowania powietrza użyć można odkurzacza. Do pomiaru objętości przepompowanego powietrza wykorzystaj duży worek plastikowy o objętości ok. 2 m<sup>3</sup>.

4) Pomiar efektywności η zatrzymywania produktów rozpadu radonu na filtrze. Zastanów się jak można w doświadczeniu wyznaczyć ile produktów rozpadu radonu zostaje w powietrzu po filtracji. Ewentualnie przyjmij η ≈ 1.

5) Pomiar tak jak w punkcie 2 wykonaj na Pracowni, w piwnicy lub na zewnątrz budynku. Porównaj wyniki. Może jesteś zainteresowany pomiarem stężenia radonu u siebie w domu?

6) Pomiar intensywności I<sub>α</sub> promieniowania α (czyli liczba zliczeń cząstek α na 1 sekundę) w funkcji czasu t. Każdy elementarny pomiar liczby zliczeń nie powinien być dłuższy od 1 min. Pozwoli to na obserwację rozpadu krótkożyciowego RaA o T<sub>1/2</sub> = 3.05 min. Uzyskana zależność I<sub>α</sub> vs t pozwala wyznaczyć stężenie RaA, RaB i RaC w powietrzu. Analiza problemu (patrz rozdz. 3) prowadzi do wniosku, że intensywność I<sub>α</sub> rejestrowanego promieniowania α będzie liniową superpozycją funkcji

$$\exp(-\lambda_A t), \exp(-\lambda_B t), \exp(-\lambda_C t)$$

określających rozpad RaA, RaB, RaC:

$$I_\alpha = \varepsilon v \eta [A \exp(-\lambda_A t) + B \exp(-\lambda_B t) + C \exp(-\lambda_C t)] \quad (2)$$

gdzie

I<sub>α</sub>-intensywność rejestrowanego promieniowania α [liczba zliczeń/s]

ε, v, η -parametry omówione w punkcie 2; zwróć uwagę na jednostki !!!

λ<sub>A</sub>, λ<sub>B</sub>, λ<sub>C</sub> - stałe rozpadu RaA, RaB, RaC; patrz rys.2

A, B, C- stałe, które należy wyznaczyć w wyniku dopasowania danych doświadczalnych do funkcji postaci (2). Swobodnymi parametrami dopasowania są wielkości A, B i C. W celu dopasowania wykorzystaj np. program Nicefit, ORIGIN, GNUPLOT.

Analiza podobna do tej wykonanej przez Markova i innych mówi, że:

$$A = 184 C_A$$

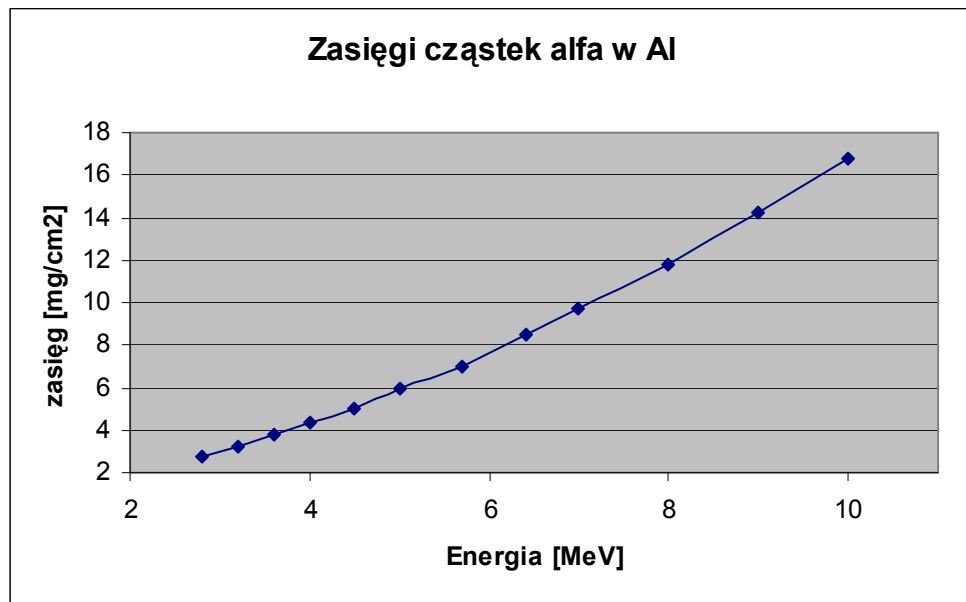
$$B = 139 C_A + 1084 C_B$$

$$C = -143 C_A - 1060 C_B + 275 C_C$$

(3)

gdzie C<sub>A</sub>, C<sub>B</sub>, C<sub>C</sub> stężenie RaA, RaB, RaC w powietrzu w jednostkach [Bq/m<sup>3</sup>]. Współczynniki liczbowe we wzorach (3) są obliczone przy założeniu, że czas pompowania wynosi 5 min.

7) Pomiar energii kinetycznej cząstek  $\alpha$  związanych z rozpadem radonu. Zmieniając odległość detektor -filtr zmierz liczbę zliczeń lub obserwuj impulsy z detektora na oscyloskopie. Z tych badań wyznacz maksymalny zasięg cząstek  $\alpha$  w powietrzu. Wykorzystaj krzywą zasięg - energia cząstek  $\alpha$  podaną na rys.7. W obliczeniach uwzględnij grubość folii Al przykrywającej scyntylator przyjmując, że  $1 \text{ mg/cm}^2$  Al odpowiada w przybliżeniu  $1 \text{ mg/cm}^2$  powietrza.



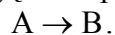
Rys.7. Zasięg cząstek  $\alpha$  w aluminium w funkcji energii  $E_\alpha$  wyrażonej w MeV. Warstwa  $1 \mu\text{m}$  Al odpowiada  $0,27 \text{ mg/cm}^2$ .

Tabela zasięgów cząstek w Al. w/g Northcliffe and Schilling Nucl. Data Tables A7,233(1970)

E(MeV)	2,8	3,2	3,6	4	4,5	5	5,7	6,4	7	8	9	10
zasięg [mg/cm <sup>2</sup> ]	2,74	3,24	3,77	4,34	5	5,92	7	8,46	9,7	11,83	14,2	16,74

### 3. PRAWO ROZPADU PROMIENIOTWÓRCZEGO

Rozpatrzmy rozpad jąder A prowadzący do powstania jąder B:



Niech w chwili  $t$  liczba jąder A wynosi  $N(t)$ . Prawo rozpadu promieniotwórczego mówi, że liczba  $dN$  jąder, które rozpadły się w czasie  $dt$  jest proporcjonalna do liczby  $N$  jąder rozpadających się, czyli:

$$dN(t) = -\lambda N(t) dt \quad \text{stąd} \quad dN(t)/dt = -\lambda N(t) \quad (4)$$

Znak minus w tym równaniu oznacza, że dla  $\lambda > 0$  (nasze założenie) liczba  $N(t)$  jąder A maleje dla rosnącego czasu. Rozwiązaniem tego równania różniczkowego jest:

$$N(t) = a \exp(-\lambda t) + b \quad (5)$$

Stałe  $a$  i  $b$  znajdujemy z warunków:

$$\begin{aligned} \text{dla } t=0 \text{ liczba jąder A wynosi } N(0), \\ \text{dla } t \rightarrow \infty \text{ liczba jąder } N \rightarrow 0 \end{aligned}$$

$$\text{wtedy} \quad N(t) = N(0) \exp(-\lambda t) \quad (6)$$

Wykres zależności  $N(t)$  vs  $t$  oraz  $\ln N(t)$  vs  $t$  przedstawia rys. 8.



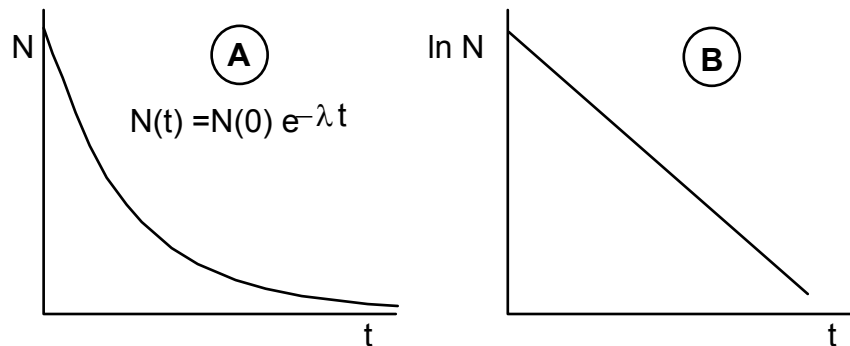
Wielkość  $\lambda$  ze wzoru (4) nazywa się stałą rozpadu - jest ona miarą prawdopodobieństwa rozpadu. Bardzo często używaną wielkością jest czas połowicznego rozpadu  $T_{1/2}$ , który definiujemy jako czas po którym rozpadnie się połowa jąder.

Z równania (6) mamy, że:

$$N(T_{1/2}) = N(0)/2 = N(0) \exp(-\lambda T_{1/2})$$

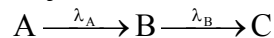
stąd

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$



Rys. 8. Rozpad promieniotwórczy przedstawiony w skali liniowej (A) i logarytmicznej (B).

Rozpatrzmy obecnie bardziej skomplikowany przypadek, kiedy jądra A rozpadają się do jąder B, które z kolei rozpadają się do jąder C, tzn.



Niech w chwili t liczby jąder A i B wynoszą odpowiednio:

$$N_A(t), \quad N_B(t).$$

Mamy następujące równania różniczkowe rządzące powyższym rozpadem:

$$dN_A = -\lambda_A N_A dt \quad \rightarrow \quad dN_A / dt = -\lambda_A N_A \quad (7)$$

$$dN_B = \lambda_A N_A dt - \lambda_B N_B dt \quad \rightarrow \quad dN_B / dt = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \quad (8)$$

Równanie (7) opisuje rozpad jąder A do B (patrz równanie (4)). Równanie (8) określa zmianę liczby jąder B w jednostce czasu.

Liczba jąder B:

powiększa się o  $\lambda_A N_A dt$  - jest to liczba jąder B, które powstały w czasie dt z rozpadu jąder  $A \rightarrow B$

pomniejsza się o  $\lambda_B N_B dt$  - jest to liczba jąder B, które rozpadły się w czasie dt do jąder C.

Zwróćmy tu uwagę, że zgodnie z równaniem (4) *liczba rozpadających się jąder B w czasie dt jest proporcjonalna do  $N_B$  i wynosi  $\lambda_B N_B dt$ . Nie jest to wielkość  $dN_B$ , która określa zgodnie ze wzorem (8) różnicę pomiędzy liczbą powstających jąder B a liczbą rozpadających się jąder.*

Rozwiązanie równania (7) jest już nam znane (patrz równanie (6)):

$$N_A(t) = N_A(0) \exp(-\lambda_A t). \quad (9)$$

Założyliśmy tu, że w chwili  $t=0$  liczba jąder A wynosi  $N_A(0)$ .

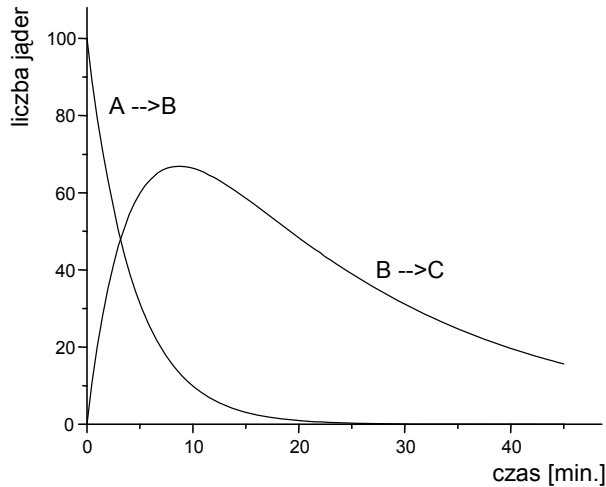
Rozwiązanie ogólne równania (8) ma postać:

$$N_B(t) = A_{21} \exp(-\lambda_A t) + A_{22} \exp(-\lambda_B t)$$

Wielkości  $A_{21}$  oraz  $A_{22}$  wyznaczamy korzystając z warunków początkowych. Założymy tu przykładowo, że w chwili  $t=0$  liczba jąder B równa była 0. Stąd mamy  $A_{21} = -A_{22}$ . Korzystając z równania (8) mamy ostatecznie:

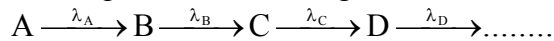
$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A(0) [\exp(-\lambda_A t) - \exp(-\lambda_B t)]. \quad (10)$$

Rys. 9 pokazują jak zmienia się liczba  $N_A$  jąder A oraz liczba  $N_B$  jąder B w czasie. Założono tu, że dla jąder A czas połowicznego rozpadu  $T_{1/2}(A)=3$  min zaś dla jąder B  $T_{1/2}(B)=15$  min. Widzimy, że liczba jąder A (zgodnie ze wzorem (9)) systematycznie maleje. Bardziej interesującym jest zachowanie się liczby jąder B. Liczba jąder B z początku narasta (zasilana rozpadem jąder A) aby dla dużych czasów zanikać zgodnie ze wzorem (10).



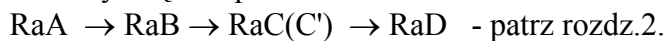
Rys.9. Rozpad jąder A i B przy założeniu, że: a)  $T_{1/2}(A) = 3$  min i  $T_{1/2}(B) = 15$  min b) dla  $t=0$  początkowa liczba jąder B równa była 0.

Ogólny przypadek rozpadu łańcucha promieniotwórczego



omówiony jest w podręczniku [2] -patrz str.83 i dalsze.

W naszych pomiarach badamy produkty rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ , które wraz z aerozolami zatrzymane zostały na filtrze. Badamy więc rozpad



Rozpad ten opisany jest przez równania różniczkowe analogiczne do wzorów (7),(8). Ogólnie mówiąc rozwiązanie tych równań będzie zbudowane z funkcji wykładniczych (porównaj z równaniem (10))

$$\exp(-\lambda_A t), \exp(-\lambda_B t), \exp(-\lambda_C t)$$

gdzie  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  są stałymi rozpadu odpowiednio  $\text{RaA}, \text{RaB}, \text{RaC}$ .

Warunki początkowe:

w chwili  $t=0$  (odpowiada to końcowi pompowania) mamy na filtrze  $N_A, N_B$  i  $N_C$  atomów  $\text{RaA}, \text{RaB}$  i  $\text{RaC}$ . Ich liczba zależy od stężenia nuklidów  $\text{RaA}, \text{RaB}$  i  $\text{RaC}$  w powietrzu, szybkości pompowania i czasu pompowania. Z liczby zarejestrowanych cząstek  $\alpha$  możemy uzyskać informację o stężeniach  $C_A, C_B$  i  $C_C$  produktów rozpadu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu. Wyprowadzenie odpowiednich wzorów jest łatwe ale jednocześnie b. pracochłonne i dlatego podajemy tu już wzory końcowe (1),(2),(3). Występujące w nich współczynniki liczbowe obliczone zostały dla czasu pompowania równego 5 min i wartości  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  odpowiednio dla  $\text{RaA}, \text{RaB}, \text{RaC}$ .

## LITERATURA

- [1] "Atomistyka oraz bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna w Polsce w 1998r." PAA, Warszawa 1999.
- [2] T. Mayer-Kuckuk, *Fizyka jądrowa*, PWN
- [3] L. Dobrzyński i E. Droste, Promieniotwórczość a życie: problem ryzyka związanego z promieniowaniem jonizującym, Raport Nr 12, Dział Szkolenia IPJ, Warszawa 1999
- [4] Z. Jaworowski, *Wiedza i Życie*, Nr 3 (1997)
- [5] K.P. Markov, N.W. Rijabov, K.N. Stas, *Atomnaja Energia* 12(1962) 315

**UWAGA 1:** Zagadnienia dot. zadania omówione są także w książce P.Jaracza "Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka", Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, 2001.

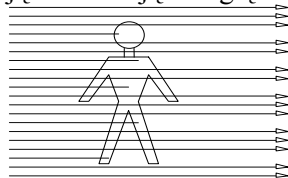
### UWAGA 2:

Nasze pomiary nie są pomiarami profesjonalnymi wykonanymi za pomocą atestowanej aparatury pomiarowej i w sposób profesjonalny. Między innymi w naszych pomiarach nie zostały uwzględnione wszystkie czynniki wpływające na wydajność rejestracji cząstek  $\alpha$ . Także badania zawartości radonu w powietrzu wymagają "całkowania po czasie", gdyż stężenie radonu zależne jest np. od pory dnia, od czasu który upłynął od wietrzenia pomieszczenia itd. Instytucją, która upoważniona jest w Polsce do wydawania orzeczeń na temat stężenia radonu (i nie tylko radonu) jest Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) i w przypadku jakichkolwiek wątpliwości odnośnie zagrożenia substancjami radioaktywnymi należy zwracać się do tej instytucji. Nasza aparatura pomiarowa nie ma odpowiedniego atestu. Poza tym trzygodzinne pomiary na I Pracowni Fizycznej nie czynią nas profesjonalistami w zakresie ochrony radiologicznej.

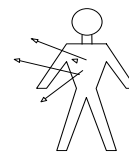
Na kolejnych stronach podane są wiadomości uzupełniające, które *nie są niezbędne* do zrozumienia zagadnień opisanych powyżej.

## UZUPEŁNIENIE 1

Promieniowanie jonizujące przechodząc przez jakiś obiekt np. ciało człowieka zostaje częściowo lub całkowicie pochłonięte oddając mu swoją energię.



napromieniowanie zewnętrzne



wewnętrzne

**Dawką pochłoniętą** nazywamy energię promieniowania pochłoniętą przez jednostkową masę. W układzie SI jednostką dawki pochłoniętej jest 1 Gy (grej). Mamy:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

**Moc dawki** mówi nam o pochłoniętej energii prom. jonizującego w jednostce masy i jednostce czasu. Stąd moc dawki pochłoniętej wyrażać możemy w jednostkach takich jak np. Gy/h.

Skutki biologiczne oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm ludzki zależą nie tylko od dawki pochłoniętej, ale także od:

- rodzaju promieniowania - na przykład promieniowanie  $\alpha$  jest znacznie bardziej szkodliwe od promieniowania  $\gamma$  przy tej samej pochłoniętej energii.
- rodzaju tkanki lub narządu - na przykład gonady (jądra i jajniki) są bardziej wrażliwe na napromienienie niż skóra. Uwaga: płód w łonie matki jest bardzo wrażliwy na napromienianie, stąd kobiety w ciąży powinny unikać naświetleń promieniowaniem jonizującym.

**Dawka skuteczna** - wielkość ta uwzględnia skutki biologiczne pochłoniętej dawki, a więc wzięte są pod uwagę dawka pochłonięta, rodzaj promieniowania i rodzaj tkanki lub narządu. Dawka skuteczna mierzona jest w siwertach (Sv). Więcej informacji na ten temat znaleźć można w [1],[3].

Statystyczny mieszkaniec Polski otrzymuje w ciągu roku dawkę ok. 2.4 mSv od naturalnych źródeł promieniowania, a dodatkowo ok.0.9 mSv od źródeł sztucznych (m.in. prześwietleń) [2]. Dawka od źródeł naturalnych zależy od miejsca na kuli ziemskiej. Są obszary o anomalnie wysokich wartościach promieniowania [1]. Na przykład w Brazylii, na wybrzeżu stanu Rio de Janeiro na plażach z piasku monazytowego (bogatego w tor) dawka przekracza 400 razy średnią wartość światową. Wkład od promieniowania kosmicznego rośnie z wysokością. Na wysokości 2000 m dawka od promieniowania kosmicznego jest 2.4 razy większa od dawki na poziomie morza. Zwiększony udział promieniowania kosmicznego do dawki dotyczy także podróży na dużych wysokościach -samoloty, statki kosmiczne.

Dla osób pracujących zawodowo w warunkach narażenia na promieniowanie zaleca się ograniczanie rocznej dawki skutecznej do 50 mSv.

Dawka 1 Gy lub 1 Sv jest bardzo dużą dawką - porównaj z dawką od promieniotwórczości środowiska oraz graniczną dawką 50 mSv dla pracowników. Powoduje ona wzrost prawdopodobieństwa zachorowania na śmiertelną chorobę nowotworową z 25% (naturalny wskaźnik zachorowań) do ok. 30%. Tak więc wzrost ryzyka spowodowanego dawką 1 Sv wynosi 5%.

[1] A.Hryniewicz, Postępy Fizyki 44 (1993) 439.

[2] "Atomistyka oraz bezpieczeństwo jądrowe a ochrona radiologiczna w Polsce w 1998 .", wyd. Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa 1999 .

[3] J. Draijer i J. Lakey, " Promieniowanie i ochrona przed promieniowaniem", wyd. Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa 1999 .

## UZUPEŁNIENIE 2.

a) W otaczającym nas środowisku występuje promieniowanie jonizujące. Największy wkład do dawki od źródeł naturalnych wnosi radon oraz promieniotwórczy izotop potasu,  $^{40}\text{K}$ . Do powierzchni Ziemi dociera promieniowanie kosmiczne. Jest ono źródłem napromienienia a także produkuje w atmosferze i na powierzchni Ziemi radionuklidy (np.  $^{14}\text{C}$ ). Tak więc żyjemy w środowisku promieniotwórczym. Jesteśmy bezpośrednio naświetlani a oddychając i spożywając pokarm wprowadzamy do organizmu pierwiastki promieniotwórcze. Odnośnie pochłoniętych dawek - patrz Uzupełnienie 1. Pracując ze źródłami promieniotwórczymi należy mierzyć dodatkową dawkę, jaką możemy otrzymać. Obecnie zaleca się aby dodatkowa dawka (ponad dawkę od źródeł naturalnych i medycyny) nie przekroczyła 1 mSv w ciągu roku dla osób nie pracujących zawodowo z promieniowaniem. Należy pamiętać, że obok osłon najlepszymi zabezpieczeniami przed promieniowaniem są duża odległość od źródła i możliwie krótki czas przebywania w polu promieniowania. Nasza wiedza o szkodliwości małych dawek wciąż nie jest kompletna. Trwa dyskusja nt. w jakim stopniu małe napromienienia są szkodliwe i czy w ogóle są one szkodliwe. Dopóki problem ten nie zostanie rozstrzygnięty, przestrzegajmy stale podanych powyżej zaleceń.

b) Izotop  $^{40}\text{K}$  jest naturalnym pierwiastkiem promieniotwórczym o czasie połowicznego rozpadu  $T_{1/2}=1.28 \cdot 10^9$  lat. Zawartość izotopu  $^{40}\text{K}$  w naturalnym potasie jest bardzo mała (0.012%). Niemniej jednak, wobec dużej ilości potasu w środowisku aktywność ta nie jest do pominięcia. Jako ciekawostkę można podać, że aktywność  $^{40}\text{K}$  w ciele dorosłego człowieka wynosi ok. 4000 Bq !

c) W celu zorientowania się, jaka jest naturalna aktywność produktów żywnościowych, podajemy przykładowo zawartość  $^{40}\text{K}$  w żywności. Aktywność produktów liczona dla masy 1 kg podana została w jednostkach Bq/kg.

produkt	aktywność [Bq/kg]
mleko (w płynie)	30-50
sery	15-35
cukier	0.05
mięso, wędliny	70-170
groch, fasola	250-350
ziemniaki	100-160
owoce	30-75

Warto zauważyć, że pierwiastki promieniotwórcze są nie tylko wchłaniane przez organizm ale także wydalane. Dlatego, oprócz czasu połowicznego rozpadu, ważny jest tzw. biologiczny czas połowkowy tj. czas po którym w wyniku procesów biologicznych pozostaje w organizmie średnio połowa pochłoniętego pierwiastka. Dla izotopu  $^{40}\text{K}$  czas biologiczny wynosi około 30 dni.

d) Największy wkład do dawki, jaką otrzymuje człowiek od naturalnych źródeł promieniotwórczych, wnosi  $^{222}\text{Rn}$  i produkty jego rozpadu. Radionuklid  $^{222}\text{Rn}$  powstaje z rozpadu  $^{238}\text{U}$ . Na odkrytych terenach aktywność właściwa radonu w przyziemnych warstwach powietrza wynosi 1 - 10 Bq/m<sup>3</sup>. W pomieszczeniach zamkniętych może być ona znacznie wyższa. Przepisy polskie mówią, że nie powinna ona przekroczyć 200 Bq/m<sup>3</sup> w budynkach przeznaczonych na stały pobyt ludzi i oddawanych do użytku po 01.01.1998 r. W większości budynków w Polsce stężenie radonu wynosi 20-60 Bq/m<sup>3</sup>.

## Uzupełnienie 3

### SPEKTROMETR SCYNTYLACYJNY - DODATKOWE INFORMACJE

1. Załóżmy, że elektron o energii 300 keV pada na scyntylator w którym traci swą energię kinetyczną. Jej część (ok. 10%) może zostać zamieniona w procesie scyntylacji na energię kwantów światła. Energia kwantu jest rzędu 3 eV.

Stąd liczba kwantów powstałych w procesie scyntylacji  $N \approx (300 \text{ keV} / 3 \text{ eV}) * 0.1 = 10^4$ .

2. W przybliżeniu co 10-ty foton wybija elektron z fotokatody. Stąd liczba elektronów wybitych z fotokatody wynosi ok.  $10^4 / 10 = 10^3$  elektronów.

3. Załóżmy, że każdy elektron padając na dynodę wybija z niej  $R \approx 3$  elektrony.

4. Załóżmy, że liczba dynod na których zachodzi "rozmnażanie" elektronów wynosi 12.

5. Wzmocnienie fotopowielacza wynosi więc  $R^{(\text{liczba dynod})} = 3^{12} \approx 5 * 10^5$ .

6. Liczba elektronów, które dotarły do anody wynosi:

(liczba elektronów z fotokatody) \* (wzmocnienie fotopowielacza)  $\approx (10^3) * (5 * 10^5) = 5 * 10^8$

7. Zebrany ładunek = (liczba elektronów, które dotarły do anody) \* (ładunek elektronu)  $\approx (5 * 10^8) * (1.6 * 10^{-19} \text{ C}) \approx 8 * 10^{-11} \text{ C}$

10. Przyjmując, że ładunek ten przepłynął przez opór  $R_A$  (opór połączony z anodą - patrz rysunek) w czasie rzędu  $1 \mu\text{s}$  mamy, że przepłynął prąd  $I = Q/t = 8 * 10^{-11} \text{ C} / 10^{-6} \text{ s} = 8 * 10^{-5} \text{ A}$ .

11. Jeżeli  $R_A = 1 \text{ k}\Omega$  wtedy sygnał napięciowy jest rzędu  $U = I * R = 8 * 10^{-5} \text{ A} * 10^4 \Omega = 0.8 \text{ V}$ . Oczekujemy więc impulsów rzędu 1 V.

