

# BADANIE RADIOAKTYWNOŚCI MATERIAŁÓW SPOŻYWCZYCH I OPAKOWANIOWYCH

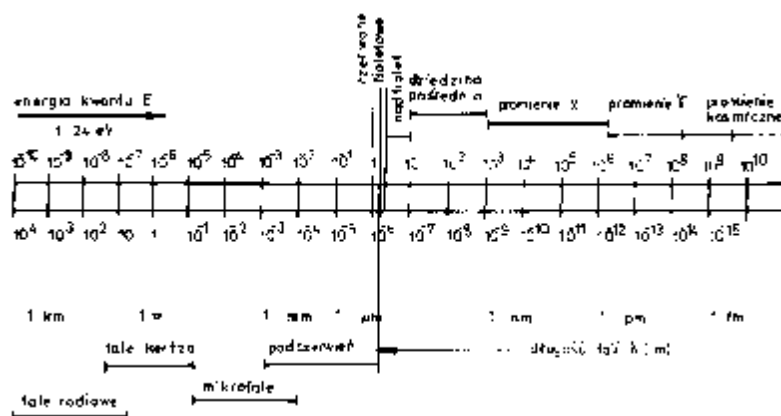
## 1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodą pomiaru Cezu 137 w materiałach spożywczych i opakowaniowych w urządzeniu do pomiaru małych aktywności.

## 2. Podstawy teoretyczne

### Własności promieniowania jonizującego

Promieniowanie - to termin oznaczający wysyłanie i przekazywanie energii. Na rysunku 32.1 przedstawiono różne rodzaje promieniowania elektromagnetycznego uszeregowane w zależności od długości fali, a co za tym idzie - energii. Jest to tzw. widmo promieniowania. Słońce stanowi źródło życiodajnego promieniowania świetlnego i ciepłego, a także ultrafioletowego (UV), czyli promieniowania elektromagnetycznego o różnych długościach fal. Kaloryfery są źródłem promieniowania ciepłego, czyli inaczej podczerwonego, a nadajniki radiowo-telewizyjne emitują fale radiowe, czyli promieniowanie elektromagnetyczne o dużej długości fali. Z kosmosu dociera na Ziemię promieniowanie zwane kosmicznym. Pamiętajmy przy tym, że im większa długość fali, tym mniejsza energia promieniowania.



**Rys. 32.1.** Widmo fal elektromagnetycznych - rodzaje promieniowania elektromagnetycznego

Jak sama nazwa wskazuje promieniowanie jonizujące, jest to promieniowanie wywołujące jonizację ośrodka, przez który przechodzi i w którym jest pochłaniane. Jak wynika z definicji jonizacja jest to zjawisko polegające na odrywaniu elektronów od obojętnych elektrycznie atomów, na skutek czego powstają pary jonów: jony dodatnie i ujemne naładowane elektrony.

Spośród przedstawionych na rys. 32.1 różnych rodzajów promieniowania elektromagnetycznego tylko promieniowanie X, g i kosmiczne jest promieniowaniem jonizującym. Jest to promieniowanie krótkofalowe, a więc niosące dużą energię. Zatem promieniowanie jonizujące to niektóre rodzaje fal elektromagnetycznych. Mogą być nim również strumienie cząstek i wówczas mówimy o promieniowaniu korpuskularnym.

Źródłem promieniowania jonizującego mogą być:

- substancje (pierwiastki lub ich chemiczne związki), które nazywamy promieniotwórczymi (lub radioaktywnymi), np. rad,
- urządzenia, np. aparaty rentgenowskie.

Źródła promieniowania możemy podzielić na:

- naturalne - występujące w przyrodzie,
- sztuczne - wytworzone przez człowieka.

Na ogół jesteśmy stale narażeni na działanie promieniowania jonizującego, gdyż w naszym otoczeniu znajdują się liczne jego źródła. Źródła naturalne, są to:

- substancje promieniotwórcze zawarte w skorupie ziemskiej, (uran, rad, tor), radon - gaz będący produktem rozpadu radu,
- promieniowanie kosmiczne,
- substancje promieniotwórcze znajdujące się w naszym organizmie i innych organizmach żywych, głównie potas-40 i inne naturalne pierwiastki promieniotwórcze.

Na całej kuli ziemskiej mamy do czynienia z działaniem pro-mieniowania jonizującego pochodzącego ze źródeł naturalnych i nazywanego **naturalnym tłem promieniowania**. Tło nie jest jednakowe na całej powierzchni Ziemi. Źródła sztuczne to:

- źródła używane w badaniach radiologicznych, np. kontrolne zdjęcia klatki piersiowej,
- opad promieniotwórczy - substancje promieniotwórcze powstałe w wyniku próbnych wybuchów jądrowych oraz podczas normalnej pracy i awarii elektrowni jądrowych krążą razem z wiatrem, a po pewnym czasie opadają na ziemię,
- odpady promieniotwórcze,
- niektóre przedmioty codziennego użytku, np. zegarki świecące i odbiorniki telewizyjne, w których powstaje niewielka ilość promieniowania X,
- zastosowania w przemyśle i gospodarce.

## **Napromieniowanie i skażenie**

Mówimy o **narażeniu zewnętrznym**, gdy źródło znajduje się poza organizmem i **narażeniu wewnętrznym**, gdy źródło znajduje się wewnątrz organizmu.

O osobach, które zostały poddane działaniu promieniowania, mówimy, że zostały **napromieniowane**. Tak samo mówimy o innych obiektach, np. o napromieniowaniu żywności. I podobnie jak poprzednio, jeżeli źródło promieniowania znajduje się na zewnątrz organizmu, mówimy o **napromieniowaniu zewnętrznym**, a jeżeli wewnątrz - o **napromieniowaniu wewnętrznym**.

Skażeniem promieniotwórczym nazywamy obecność rozproszonych substancji promieniotwórczych w jakimkolwiek miejscu poza źródłem promieniowania.

Ze względu na miejsce występowania rozróżniamy:

- skażenia środowiska naturalnego, a więc powietrza, gleby, wód, organizmów zwierzęcych i roślinnych,
- skażenia środowiska pracy - powierzchni podłóg, ścian, mebli, przyrządów,
- skażenie odzieży roboczej i osobistej,
- skażenie osobiste ludzi.

Skażenie powierzchni dzielimy na:

- niezwiązane, które dadzą się usunąć za pomocą prostych środków, np. zmywania,
- związane, których nie możemy usunąć bez zniszczenia lub uszkodzenia odkażanej powierzchni.

W praktyce często mamy do czynienia z przypadkami złożonymi: część substancji promieniotwórczych udaje się usunąć, część stanowi skażenie związane. Usuwanie skażeń nazywamy odkażaniem (dekontaminacją lub dezaktywacją).

Skażenia osobiste dzielimy na:

- zewnętrzne - występujące na zewnętrznych powierzchniach ciała,
- wewnętrzne - powstające wskutek przedostania się substancji promieniotwórczej do wnętrza or-

ganizmu przez drogi oddechowe, przewód pokarmowy lub uszkodzenia skóry.

## Dawki promieniowania jonizującego

Do oceny **narażenia** służy pojęcie dawki (ściślej - dawek) promieniowania jonizującego i mocy dawki. Pod pojęciem dawki należy rozróżnić trzy pojęcia:

- dawka ekspozycyjna,
- dawka pochłonięta,
- równoważnik dawki.

Dwa pierwsze wiążą się z fizycznym oddziaływaniem promieniowania z materią, trzeci uwzględnia również jego oddziaływanie na organizm żywy. Dawka ekspozycyjna jest miarą jonizacji, jaka zachodzi w powietrzu pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego X lub  $\gamma$ . Ilościowo określa się jonizację, ustalając:

- liczbę par jonów powstałych w jednostce masy (lub objętości) powietrza,
- ładunek elektryczny jonów jednego znaku powstający w jednostce masy (lub objętości) powietrza.

Przyjmujemy definicję wynikającą z drugiego sposobu. Jeżeli pod wpływem promieniowania X lub  $\gamma$  w elemencie objętości powietrza o masie  $\Delta m$  powstał ładunek o masie  $\Delta Q$  jonów jednego znaku, to dawką ekspozycyjną X nazwiemy stosunek:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}, \quad (32.1)$$

gdzie:

- $\Delta Q$  jest bezwzględną wartością sumy ładunków jonów jednego znaku wytworzonych w warunkach równowagi elektronowej, tzn. gdy wszystkie jony dodatnie i elektrony wytworzone w elemencie objętości o masie  $\Delta m$  w nim pozostają.

Jednostką dawki ekspozycyjnej w układzie SI jest kulomb na kilogram ( $Ckg^{-1}$ ). Do niedawna używano jednostki zwanej rentgenem (R). Dawka ekspozycyjna wynosi 1R, jeżeli w  $1\text{ cm}^3$  suchego powietrza powstaje  $2,08 \times 10^9$  par jonów.

Zależność między rentgenem (R), a obecnie używana jednostką jest następująca:

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} Ckg^{-1} \quad (32.2)$$

Coraz częściej używa się bardziej uniwersalnego pojęcia **dawki pochłoniętej**. Dawka pochłonięta jest miarą pochłaniania promieniowania przez różne materiały.

Promieniowanie to energia. Wędrując przez materię promieniowanie traci swoją energię, przekazując ją ośrodkowi, przez który przechodzi. Energia ta może być zużyta na jonizację, ale nie tylko. Mogą zachodzić jeszcze inne zjawiska fizyczne, różne w przypadku różnych rodzajów promieniowania jonizującego. Ściślej jest to energia jaką traci promieniowanie, a pochłaniania ośrodek, przez który ono przechodzi, na jednostkę masy tego ośrodka:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}, \quad (32.3)$$

gdzie  $\Delta E$  jest średnią energią promieniowania jonizującego przekazaną materii w elemencie objętości o masie  $\Delta m$ .

W układzie SI jednostką dawki pochłoniętej jest grej (Gy). Mówimy, że dawka pochłonięta wynosi 1 grej, gdy 1 kg materiału, przez który przechodzi promieniowanie, pochłania energię 1 dżula (J):

$$1\text{Gy} = 1\text{Jkg}^{-1} \quad (32.4)$$

Dawkę pochłoniętą wyraża się najczęściej w centygrejach (cGy). Dawniej mierzono ją w radach (**rd**):

$$1\text{rd} = 0,01\text{Gy} = 1\text{cGy} \quad (32.5)$$

Dawka pochłonięta jest najbardziej uniwersalnym z trzech pojęć, o których mówimy, gdyż ma sens dla każdego rodzaju promieniowania jonizującego i dla każdego ośrodka, w którym to promieniowanie rozchodzi się. Możemy ją określić np. dla ściany, podłogi i również dla ciała ludzkiego.

Mamy więc wielkość służącą do oceny napromieniowania różnych obiektów. Okazuje się jednak, że w przypadku organizmów żywych wielkość dawki pochłoniętej (a więc pochłoniętej energii) daje nam wprawdzie bardzo ważną, ale tylko częściową informację. I dawka ekspozycyjna, i dawka pochłonięta przedstawiają tylko opis zjawisk fizycznych, a w organizmach żywych zachodzą również zjawiska chemiczne i biologiczne.

Oprócz pojęcia „dawka” używa się również pojęcie „moc dawki”. Oznacza się je tym samym symbolem, umieszczając kropkę na górze. Zawsze chodzi tu o zmianę dawki w jednostce czasu. Jeżeli przyrost dawki ekspozycyjnej  $\Delta X$  nastąpi w czasie  $\Delta t$ , to stosunek  $\Delta X / \Delta t$  nazywamy **mocą dawki ekspozycyjnej**:

$$\dot{X} = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (32.6)$$

Jednostką mocy dawki ekspozycyjnej jest amper na kilogram ( $\text{Akg}^{-1}$ ); dawniej używano jednostki rentgen na godzinę ( $\text{Rh}^{-1}$ ).

$$1\text{pA/kg} \gg 14\text{ }\mu\text{R/h} \quad (32.7)$$

Moc dawki pochłoniętej jest to stosunek:

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad (32.8)$$

gdzie:  $\Delta D$  oznacza przyrost dawki pochłoniętej w czasie  $\Delta t$ .

Jednostką mocy dawki pochłoniętej w układzie SI jest grej na sekundę ( $\text{Gys}^{-1}$ ), dawniej stosowano rad na godzinę ( $\text{rdh}^{-1}$ ).

Chociaż - pomimo wprowadzenia układu SI - czas mierzymy w dalszym ciągu w godzinach (a nie w kilosekundach, megasekundach i innych jednostkach SI), używa się również jednostki grej na godzinę ( $\text{Gyh}^{-1}$ ) i centygrej na godzinę ( $\text{cGyh}^{-1}$ ).

Zauważmy jeszcze, że pojęć dawki i mocy dawki używamy zamiennie. Zwyczajowo przy mniejszych przedziałach czasu mówimy o mocach dawek, przy większych o dawkach. I tak mówimy: moc dawki pochłoniętej wynosi 0,2 cGy/h, ale używamy również terminów: dawka tygodniowa, roczna, choć formalnie rzecz biorąc, należałoby mówić o mocy dawki w ciągu tygodnia lub roku.

Jak już wspomniano, wymienione powyżej wielkości są bardzo przydatne przy określaniu wielkości napromieniowania i ewentualnych jego skutków fizycznych. Są także podstawą do przewidy-

wania skutków biologicznych. Skutek biologiczny zależy przede wszystkim od wielkości napromieniowania, czyli dawki pochłoniętej, ale decyduje o nim również:

- rodzaj promieniowania,
- wielkość napromieniowanego obszaru ciała,
- narząd lub rodzaj tkanki,
- wiek i ogólna kondycja napromieniowanego osobnika,
- czas, w jakim dawka została pochłonięta (moc dawki).

Dawka promieni  $\alpha$  wywołuje znacznie większy skutek biologiczny (pomimo małej przenikliwości) niż taka sama dawka promieni X czy  $\gamma$ . Przy narażeniu zewnętrznym większą uwagę zwraca się na promieniowanie bardziej przenikliwe, tj. X,  $\gamma$  oraz neutrony. Przy skażeniu wewnętrznym należy zwrócić uwagę przede wszystkim na promieniowanie o dużej zdolności do jonizacji, np. cząstki  $\alpha$ , gdyż to właśnie ono powoduje największe szkody. Ponadto w przypadku skażenia wewnętrznego różne izotopy promieniotwórcze mogą przechodzić do różnych tkanek i narządów nazywanych **narządami krytycznymi**. Na przykład jod zatrzymywany jest w tarczycy, a stront w kościach. Dlatego też pojęcie dawki pochłoniętej czy też mocy dawki nie pozwalają na ocenę skutków napromieniowania żywego organizmu biologicznego. W tym wypadku należy uwzględnić rodzaj napromieniowania. Do tego celu służy tzw. współczynnik jakości promieniowania Q (tabela 32.1).

**Tabela 32.1** Współczynnik jakości promieniowania Q

Rodzaj promieniowania	Wartość Q
X, $\gamma$ i $\beta$ o energii powyżej 30 keV	1
$\beta$ - trytu	2
neutrony	25
neutrony termiczne	4,5
$\alpha$	25

Znając współczynnik jakości promieniowania Q możemy obliczyć **równoważnik dawki H**:

$$H = Q D, \quad (32.9)$$

gdzie:

**D** - dawka pochłonięta w tkance lub narządzie.

Równoważnik dawki jest to dawka pochłonięta w danej tkance lub narządzie z uwzględnieniem skutków biologicznych wywołanych przez różne rodzaje promieniowania jonizującego.

Jeżeli mamy do czynienia z kilkoma rodzajami promieniowania naraz, np.  $\alpha$  i  $\gamma$ , musimy zsumować wszystkie dawki. Szkodliwe następstwa promieniowania zależą także od tego, czy napromieniowaniu poddane zostało całe ciało, czy konkretne narządy, stąd przy przewidywaniu skutków biologicznych musimy także uwzględnić tzw. współczynniki wagowe tkanki (tabela 32.2).

**Tabela 32.2** Współczynniki wagowe tkanki  $w_T$ 

Tkanka lub narząd	Wartość $w_T$
Gonady	0,25
Czerwony szpik kostny	0,12
Dwunastnica, żołądek, przewód pokarmowy	0,30
Płuca	0,12
Pęcherz	0,05
Gruczoły sutkowe	0,15
Tarczyca	0,03
Skóra	0,01
Powierzchnie kości	0,03

W ten sposób możemy obliczyć tzw. **efektywny równoważnik dawki (E)**. Jeżeli chcemy oszacować efektywny równoważnik dawki dla całego ciała, to wykonujemy obliczenia według następującego wzoru:

$$H_E = \sum w_T H \quad , \quad (32.10)$$

**Siwert (Sv)** jest obowiązującą w układzie SI jednostką równoważnika dawki i efektywnego równoważnika dawki. Siwert jest jednostką stosunkowo dużą, w związku z czym w użyciu są głównie pochodne *mili-* i *mikrosiwerty*.

Nadal używa się również starej jednostki o nazwie rem:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad , \quad (32.11)$$

Jeżeli chcemy oszacować statystyczne ryzyko szkodliwych skutków biologicznych dla całej populacji, musimy obliczyć zbiorowy efektywny równoważnik dawki jako sumę wszystkich równoważników dawek efektywnych pochłoniętych przez wszystkich osobników populacji.

Wiele izotopów promieniotwórczych, o długim okresie pół-rozpadu, pozostaje w organizmie człowieka przez całe życie. W związku z tym ważny jest nie tylko okres półrozpadu, ale także szybkość, z jaką dany izotop promieniotwórczy jest wydalany z organizmu, czyli tzw. biologiczny okres połowicznego wydalania. Określając ryzyko występującej w takim wypadku ciągłej ekspozycji, sumuje się efektywne równoważniki dawek w ciągu 50 lat (norma przyjęta przez ICRP<sup>1</sup>) i w ten sposób otrzymujemy **efektywny równoważnik dawki obciążającej**, wyrażany także w siwertach.

### Dawki graniczne i skażenia

Pierwsze ograniczenia zastosowano w 1925 roku, wprowadzając pojęcie tolerancyjnej dawki biologicznej. Nie brano wtedy pod uwagę możliwości skutków przypadkowych: genetycznych i późniejszych skutków biologicznych. Następnie zmniejszono stopniowo wielkość dawki tolerancyjnej. Od 1948 roku obowiązuje nowy termin: największa dawka dopuszczalna, a w 1956 r. zróżnicowano wartości dawek w zależności od napromienianego organu oraz kategorii narażenia osób (narażenie zawodowe, specjalnych grup ludności i całej populacji).

Dzisiaj limity dotyczą napromieniowania zewnętrznego i dawki od skażeń wewnętrznych. W ich skład nie wchodzi dawki otrzymywane przy wykonywaniu zabiegów medycznych i dawki od tła naturalnego. Obowiązujące dzisiaj w Polsce limity **dawek granicznych**, opublikowane w Monitorze Polskim nr 14/1988 są zgodne z zaleceniami Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej i

zostały zebrane w tabeli 32.3. Najnowsze opracowania ICRP sugerują obniżenie efektywnego równoważnika dawki przy narażeniu zawodowym do 20 mSv.

Przy ustalaniu dawek granicznych brano pod uwagę człowieka standardowego, czyli osobę dorosłą, o wadze 70 kg, wzroście 174 cm, pracującą 8 h dziennie przez 5 dni w tygodniu, spożywającą 1,5 kg żywności i 1,2 l płynów dziennie.

1 ICRP - Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej

**Tabela 32.3.** Dawki graniczne obowiązujące w Polsce

Warunki napromieniowania	Narażenie zawodowe	Narażenie ludności
Efektywny równoważnik dawki	50 mSv	1 mSv średnia na rok w okresie 5 lat
Równoważnik dawki w:		
- soczewkach oczu	150 mSv	
- skórze	500 mSv	15 mSv
- rękach i stopach	500 mSv	50 mSv

Wprowadzono jednocześnie limity dawek dopuszczalnych w okolicach elektrowni jądrowych, wychodząc z założenia, że wzrost dawki na granicy strefy ochronnej nie może przekraczać 1/3 tła naturalnego. W ten sposób ustalono w Stanach Zjednoczonych dawkę dopuszczalną na poziomie 0,05 mSv/rok, a w Polsce i na terenach byłego Związku Radzieckiego 0,25 mSv/rok. Jednocześnie trzeba zaznaczyć, że wartości te z reguły nie są osiągalne.

Dla przykładu dawki notowane w pobliżu typowej elektrowni jądrowej (w odległości 1 km) wynoszą ok. 0,01 mSv/rok, a w elektrowni w Nowoworoneżu mierzony wzrost dawki jest niższy niż 0,001 mSv/rok. Dawki graniczne nie obejmują dawek od tła naturalnego ani medycznego narażania pacjentów.

Dla oceny dawek w przypadku wchłonięć substancji promieniotwórczych drogą pokarmową lub oddechową wprowadzono tzw. **wskaźniki pochodne**:

- **ALI** - roczne wchłonięcie (w bekerelach) substancji promieniotwórczej drogą pokarmową lub oddechową odpowiadające wartościom dawek granicznych dla narażenia zawodowego (50, 150 i 500 mSv/rok). Nazwa pochodzi od skrótu angielskiego terminu „Annual Limit on Intake”. Dla przykładu - przy wchłonięciu drogą pokarmową promieniotwórczych izotopów cezu, wartości ALI wynoszą:  
dla  $^{134}\text{Cs}$  -  $3 \times 10^6$  Bq,  
dla  $^{137}\text{Cs}$  -  $4 \times 10^6$  Bq.
- **DAC** - stężenie (w bekerelach na metr sześcienny) substancji promieniotwórczych w powietrzu, odpowiadające rocznemu wchłonięciu ALI przy 40-godzinnym tygodniu pracy. Nazwa pochodzi od angielskiego skrótu terminu „Derived Air Concentration”.

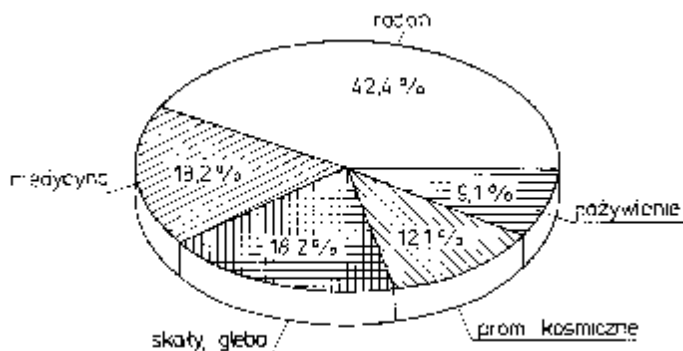
Składowe naturalnego promieniowania jonizującego są to: promieniowanie kosmiczne i promieniowanie emitowane przez naturalne pierwiastki promieniotwórcze.

Promieniowanie kosmiczne jest promieniowaniem korpuskularnym. I tak pierwotne promieniowanie kosmiczne składa się głównie z protonów (80%) i cząstek  $\alpha$  (20%). W wyniku oddziaływania z górnymi warstwami atmosfery zmieniają się jego składowe. Protony i cząstki  $\alpha$  są całkowicie pochłaniane, a na ich miejscu pojawia się wtórne promieniowanie kosmiczne: fotony, elektrony, neu-

trony i neutrino. Natężenie promieniowania kosmicznego zależy między innymi od aktywności Słońca, wysokości nad poziomem morza oraz położenia geograficznego. Jest ono także znacznie wyższe w okolicach podbiegunowych niż na równiku. Promieniowanie kosmiczne ma także swój udział w ciągłym powstawaniu pierwiastków (a dokładniej - izotopów) promieniotwórczych na Ziemi przez oddziaływanie z jądrami atomów powietrza, wody i gleby. Wśród powstających na tej drodze izotopów promieniotwórczych są także te, które mają swój udział w naturalnym napromieniowaniu człowieka: węgiel  $^{14}\text{C}$ , beryl  $^7\text{Be}$ , sód  $^{22}\text{Na}$  i tryt  $^3\text{H}$ .

Oszacowano, że przeciętny mieszkaniec Ziemi otrzymuje ze źródeł zewnętrznych 0,7 mSv/rok, a ze źródeł wewnętrznych 1,3 mSv/rok.

Wspomniano już, że promieniowanie kosmiczne nie jest jednakowe na całej kuli ziemskiej. Podobnie jest z promieniowaniem naturalnym pochodzącym z innych źródeł i różnice te mogą być bardzo duże. Znacznie większe dawki otrzymują ludzie mieszkający na dużych wysokościach - przeciętnie 40% wyższe na każde 1000 m wysokości, a także ci, którzy zamieszkują obszary o specyficznej budowie geologicznej, np. tereny skaliste o pochodzeniu wulkanicznym. Przebywając na Kasprowym Wierchu, otrzymujemy dawkę ok. 2,4 razy większą niż na plaży w Juracie. Ciekawy jest fakt, że niektóre grupy ludzi są narażone na większe napromieniowanie naturalne wewnętrzne, np. z przyczyn kulinarnych. Do takich grup zaliczają się mieszkańcy dalekiej północy, spożywający mięso reniferów. Porosty, stanowiące znaczącą część pożywienia tych zwierząt, gromadzą promieniotwórczy polon -  $^{210}\text{Po}$ . W zachodniej Australii ludzie odżywiający się mięsem owiec i kangurów otrzymują dodatkowe dawki promieniowania emitowanego przez ołów  $^{210}\text{Pb}$ , ponieważ zwierzęta te pasą się na terenach bogatych w uran. Rys. 32.2 przedstawia dawki promieniowania otrzymywane przez mieszkańców Polski.



**Rys. 32.2.** Dawki promieniowania otrzymywane przez mieszkańców Polski

Na wielkość dawki mają wpływ nawet takie czynniki, jak wiek i płeć człowieka. Np. średnie stężenie potasu  $^{40}\text{K}$  w organizmie (a więc i otrzymana dawka) rośnie z wiekiem do ok. 8-9 lat, a następnie maleje. U kobiet zmniejsza się stale, natomiast u chłopców spada po osiągnięciu wieku 12 lat, potem znów rośnie i osiąga maksimum w wieku 16 lat, a potem znów maleje.

Warto również wiedzieć, jakie dawki otrzymuje przeciętny człowiek w dzisiejszej dobie rozwoju cywilizacji. Okazuje się, że pasażer samolotu w czasie lotu nad Atlantykiem, np. z Paryża do

Nowego Jorku na wysokości 11 km, trwającego 7,4 h, otrzymuje równoważnik dawki ok. 16  $\mu\text{Sv}$ , a lecąc samolotem naddźwiękowym 12  $\mu\text{Sv}$  (leci się wprawdzie na wysokości 19 km, ale tylko 2,6 h). Biorąc pod uwagę źródła promieniowania jonizującego stosowane w medycynie, największy udział w napromieniowaniu przeciętnego pacjenta mają prześwietlenia rentgenowskie. W tabeli 32.4 podano średnie dawki, jakie otrzymuje pacjent przy niektórych prześwietleniach.



**Tabela 32.4.** Przeciętne dawki promieniowania przy niektórych badaniach radiologicznych

<b>Badanie</b>	<b>Równoważnik dawki w mSv</b>
zęba	0,02
klatki piersiowej - mały obrazek	0,2
żołądka	3,5
kręgosłupa	4,9
urografia	18,0

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyliczono, że średni efektywny równoważnik dawki dla jednego mieszkańca Polski wynosi 3,3 mSv na rok, z czego 2,8 mSv (82%) przypada na pierwiastki promieniotwórcze znajdujące się w środowisku, 0,6 mSv (17,6%) na diagnostykę medyczną i tylko 0,005 mSv (0,15%) na przedmioty powszechnego użytku.

Dla przykładu - przeciętny mieszkaniec Wysp Brytyjskich otrzymuje w ciągu roku 2,4 mSv, z czego: 1,9 mSv ze źródeł naturalnych, 0,50 mSv przy zabiegach medycznych i 0,03 mSv z innych źródeł. W Szwecji obywatele otrzymują dawkę 5 mSv, przy czym aż 4,3 mSv pochodzi ze środowiska, 0,6 mSv przypada na medycynę i 0,1 mSv na pozostałe źródła.

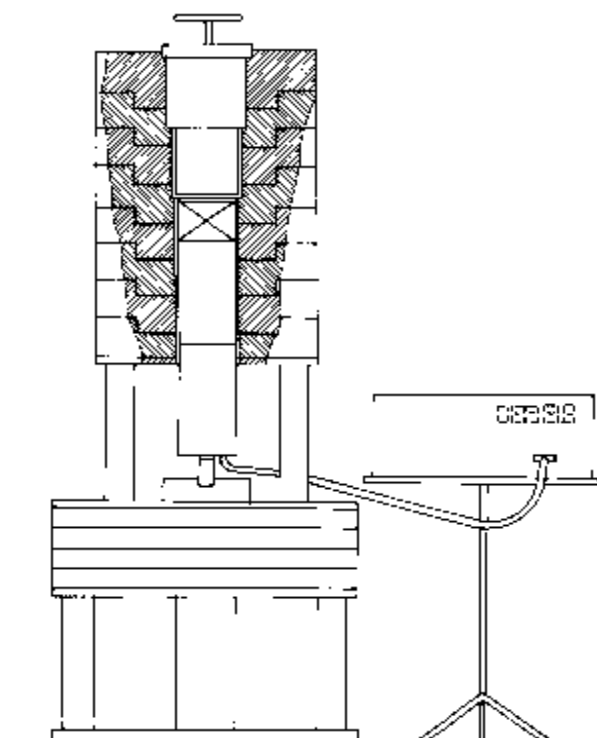
### **3. Opis stanowiska laboratoryjnego**

Opracowane przez bydgoski oddział ZBPP, urządzenie do pomiaru Cezu przeznaczone jest głównie dla placówek naukowo - badawczych, zajmujących się artykułami spożywczymi a przede wszystkim zbożem, mąką i pieczywem.

Wiąże się to z próbą oceny skutków wybuchów broni jądrowej i termojądrowej jak też awarii elektrowni jądrowej, które uwalniają olbrzymie ilości radioaktywnych izotopów, groźnych dla żywności i ludzi. Z wielu jednostek stosowanych do określania źródła promieniowania jonizującego są Bq (Bekerele) i Gy (Grej). Jednostka Bq określa aktywność źródła promieniowania, tzn. ilość aktów rozpadu jąder izotopu w danej próbce w ciągu jednej sekundy. Obecnie obowiązująca górna granica zawartości izotopów promieniotwórczych w żywności wynosi 350 Bq/kg.

Stwierdza się, że największe zagrożenie dla ludzi w wyniku rozszczepienia jąder uranu stanowi J-131 (czas rozpadu 8 dni), Sr-90 (czas rozpadu 27,7 lat) oraz Cs - 137 którego czas rozpadu wynosi 30 lat, co zmusza do stałej kontroli w tym zakresie.

Cez należy do rodziny litowców jako miękki srebrzysto-żółty metal. Jest on wybitnie aktywny chemicznie. W organizmie ludzkim osadza się równomiernie powodując zagrożenie życia przy większych dawkach.



**Rys. 32.3.** Urządzenie do określania Cezu 137

Metoda rejestracji promieniowania zakłada, że podczas rozpadu jądra Cs-137 powstaje promieniowanie o energii 662 KeV. Stąd do rejestracji tego typu promieniowania zastosowano detektory składające się z kryształu NaJ(TL) i fotopowielacza.

Takie detektory posiadają następujące zalety:

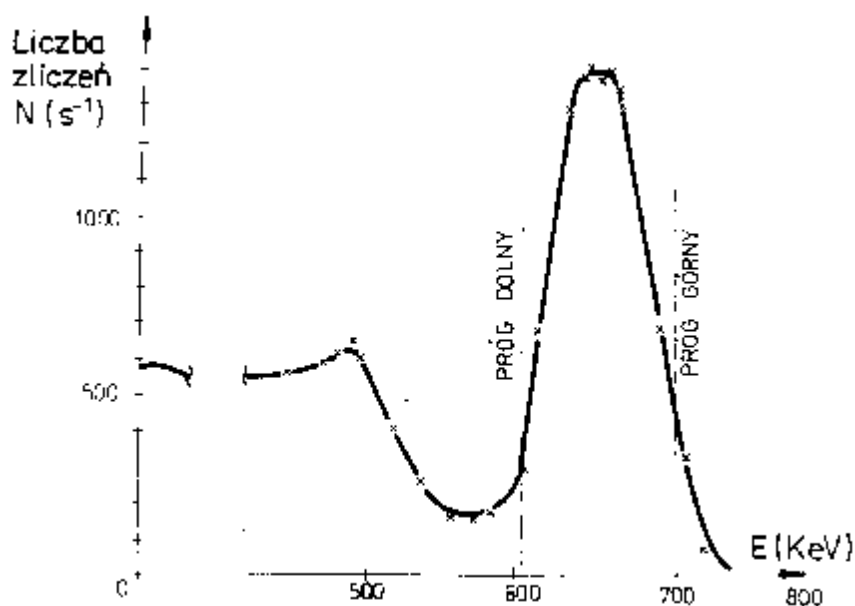
- wysoką wydajność rejestracji,
- szeroki zakres intensywności rejestracji promieniowania,
- możliwość określenia energii promieniowania z dokładnością 8 - 12%, co stwarza możliwość oznaczania izotopu w badanej próbie.

Urządzenie (rys. 32.3) wyskalowane jest za pomocą specjalnych fantomów hermetycznie zamkniętych ze źródłem promieniowania Cs-137 z dokładnie wyznaczoną aktywnością.

Zestaw składa się z: podstawy miernika, osłony sekcjonowanej, komory pomiarowej, pokrywy komory, kryształu NaJ(TL), powielacza, zasilacza WN ze wzmacniaczem, elektronicznego układu pomiarowego.

#### 4. Przebieg ćwiczenia

Podczas rozpadu jądra Cs-137 powstaje promieniowanie o energii 662 keV. Do rejestracji tego typu promieniowania powszechnie są stosowane detektory składające się z kryształu NaJ(TL) i fotopowielacza.



**Rys. 32.4.** Typowe widmo energetyczne radioaktywnego izotopu Cez-137

Tego typu detektory promieniowania znalazły szerokie zastosowanie dzięki następującym zaletom:

- wysoka wydajność rejestracji wynosząca ok. 40%;
- szeroki zakres intensywności rejestrowanego promieniowania;
- możliwość określenia energii promieniowania  $\gamma$  z dokładnością do ok. 8-12%, a tym samym stwarza się możliwość oznaczenia izotopu w badanej próbce.

Na rys. 32.4 jest przedstawione widmo promieniowania izotopu Cez-137 zarejestrowane przy pomocy detektora wchodzącego w skład zestawu pomiarowego.

Jak wynika z rys. 32.4 widmo Cezu-137 zajmuje na osi energii obszar od 0 KeV do ok. 740 KeV. Należy zaznaczyć, że obszar energii od 0 do ok. 14 KeV, przy pomocy tego typu detektora jest niemierzalny, ponieważ w tym zakresie energii fotopowielacz ma duże szумы własne. Szумы fotopowielacza w zakresie energii 0 - 14 KeV w znacznym stopniu zniekształcają wyniki pomiarów. Aby zapobiec rejestracji promieniowania w szerokim zakresie energii, które niekoniecznie musi być związane z rozpadem jąder Cezu-137 w urządzeniu zastosowano sposób rejestracji promieniowania  $\gamma$  w okienku energetycznym 600 do 700 KeV, ponieważ właśnie w tym obszarze energii znajduje się fotopik Cezu-137. Takie ograniczenie obszaru energii zarejestrowanych promieni  $\gamma$  skutecznie eliminuje zakłócenia pochodzące od innych źródeł promieniowania znajdujących się w otoczeniu detektora. Jednak nawet takie ograniczenia oraz stalowa osłona detektora nie eliminują całkowicie rejestracji promieniowania od promieni kosmicznych i innych źródeł znajdujących się w elementach konstrukcyjnych detektora i osłony stalowej. Podobnie zachowują się wszystkie ze znanych urządzeń do pomiaru małych aktywnych izotopów promieniotwórczych.

Stąd też jednym z ważnych parametrów urządzenia do pomiaru małych aktywności jest ilość zarejestrowanych zdarzeń w urządzeniu bez mierzonej próbki w komorze pomiarowej, którą przyjęto nazywać liczbą zliczeń tła.

Drugim bardzo ważnym parametrem urządzenia do pomiaru małych aktywności jest minimalnie mierzona aktywność. Wynik pomiaru każdej próbki składa się z dwóch części: z liczby zliczeń pochodzących od tła ( $N_t$ ) i liczby zliczeń pochodzących od badanej próbki ( $N_p$ ). Obie składowe pomiaru podczas badania tej samej próbki fluktuują niezależnie w pewnych granicach i to określa dokładność

pomiaru oraz minimalnie mierzalną aktywność badanej próbki. W normach międzynarodowych przyjęto, że minimalnie mierzalna aktywność próbki wynosi:

$$A_{\min} = 2,5 \sigma_t \quad (32.12)$$

gdzie:

$A_{\min}$  - minimalnie mierzalna aktywność próbki,

$\sigma_t$  - średniokwadratowe odchylenie tła przy określonym czasie pomiaru (błąd standardowy).

Niżej przedstawiony jest sposób wyznaczania  $A_{\min}$  dla omawianego urządzenia.

Podczas 10 pomiarów tła uzyskano wyniki, które zostały zapisane w tabelach 32.5 i 32.6. Sposób matematyczny obróbki tych wyników pomiaru, przedstawiony poniżej prowadzi do wyznaczenia  $A_{\min}$ . Należy zaznaczyć, że otrzymany wynik dla  $A_{\min}$  zależy od wielu czynników jak np. pora roku, usytuowanie urządzenia (na parterze, w piwnicy, na piętrze) itp.

**Tablica 32.5**

Nr pomiaru $n_i$	Wynik pomiaru $x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	87	0,7	0,49
2	85	2,7	7,29
3	90	2,3	5,29
4	84	3,7	13,69
5	89	1,3	1,69
6	90	2,3	5,29
7	85	2,7	7,29
8	88	0,3	0,09
9	89	1,3	1,69
10	90	2,3	5,29

$$\sum x_i = 877$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 48,1$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 87,7 = N_t \quad (32.13)$$

Obliczamy dyspersję (wariancję) dla otrzymania wyników:

$$D_{(x)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 4,81 \quad (32.14)$$

Dalej obliczamy średniokwadratowe odchylenie (błąd standardowy):

$$\sigma_t = \sqrt{D_{(x)}} = \sqrt{4,81} = 2,19 \quad (32.15)$$

Zgodnie z definicją minimalnie wykrywalna aktywność w tych warunkach wynosi:

$$A_{\min} = 2,5 \sigma_t = 5,5 B_q \quad (32.16)$$

Wyznaczona wartość  $A_{\min} = 5,5 \text{ Bq}$  zapewnia z dużym zapasem możliwość pomiaru aktywności próbek żywności zgodnie z wymaganiami norm.

Po określeniu  $N_t$  i  $\sigma_t$  można przystąpić do pomiaru aktywności próbek. Wyznaczenie  $N_t$  i  $\sigma_t$  należy przeprowadzać raz w ciągu miesiąca lub przed pomiarem po dłuższej przerwie. Jeśli podczas kolejnego wyznaczania  $N_t$  stwierdzi się jego znaczny wzrost, to należy dokładnie oczyścić komorę pomiarową.

## 5. Analiza wyników i wnioski

Przy pomiarze małych aktywności próbek, zazwyczaj tą samą próbkę mierzy się kilkakrotnie i wyniki pomiaru uśrednia się zgodnie z zasadami obróbki wyników pomiaru (patrz tabela 32.5).

Co się tyczy wyniku pojedynczego pomiaru próbki zawierającej substancję radioaktywną, to należy pamiętać, że wielkość mierzona (ilość zliczeń w ciągu określonego czasu) jest obciążona fluktuacjami. Fluktuacje te są istotą rozpadu radioaktywnego i matematycznie opisane są przez rozkład Poissona.

Sposób obróbki wyników pomiaru przedstawiony jest niżej.

Pomiary przeprowadzono dla fantomu Cs-137 o aktywności  $1000 \text{ Bq} \pm 2\%$ . Wyniki kolejnych pomiarów fantomu umieszczono w tablicy, tak samo jak dla przypadku wyznaczenia  $A_{\min}$ .

Jeśli pomiary przeprowadza się dla próbki żywności, to przed pomiarami należy z dokładnością  $\pm 1\%$  określić ciężar mierzonej próbki, ponieważ wynik pomiaru aktywności próbki należy podać w jednostkach Bq/kg.

**Tablica 32.6**

Nr pomiaru $n_i$	Wynik pomiaru $x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1081	1	1
2	1073	9	81
3	1100	18	324
4	1075	7	49
5	1085	3	9
6	1100	18	324
7	1080	2	4
8	1090	8	64
9	1060	22	484
10	1076	6	36

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = 1082 \quad (32.17)$$

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} = \frac{1376}{10} = 137,6 \quad (32.18)$$

$$\sqrt{D} = \sqrt{137,6} = 11,7 \quad (32.19)$$

Na podstawie danych tabel 32.5 i 32.6 oraz obliczeń można wyznaczyć aktywność fantomu lub

próbki oraz błędy statystyczne pomiaru. I tak z pomiarów i obliczeń wynika, że:

- $N_t = 87,7$  Bq i ma błąd standardowy  $\sigma_t = \pm 2,19$  Bq
- $N_p = 1082$  Bq błąd standardowy  $\sigma_p = \pm 11,7$  Bq

Stąd aktywność próbki można wyznaczyć w następujący sposób:

$$A_p = N_p - N_t \pm (\sigma_t + \sigma_p) = 994,3 \pm 13,89 \text{ Bq}$$

Względny błąd pomiaru w danym przykładzie będzie:

$$\Delta\% = \frac{\pm \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_p^2}}{A_p} \cdot 100 = \frac{11,9 \cdot 100}{994,3} = 1,2\% \quad (32.20)$$

Przy pominięciu wyżej opisanej procedury pomiarów, wyko-rzystując dla wyznaczenia aktywności pojedynczy pomiar tła np.  $x_i = 90$  oraz pojedynczy pomiar próbki (lub fantomu)  $x_i = 1100$  błąd pomiaru aktywności wynosiłby:

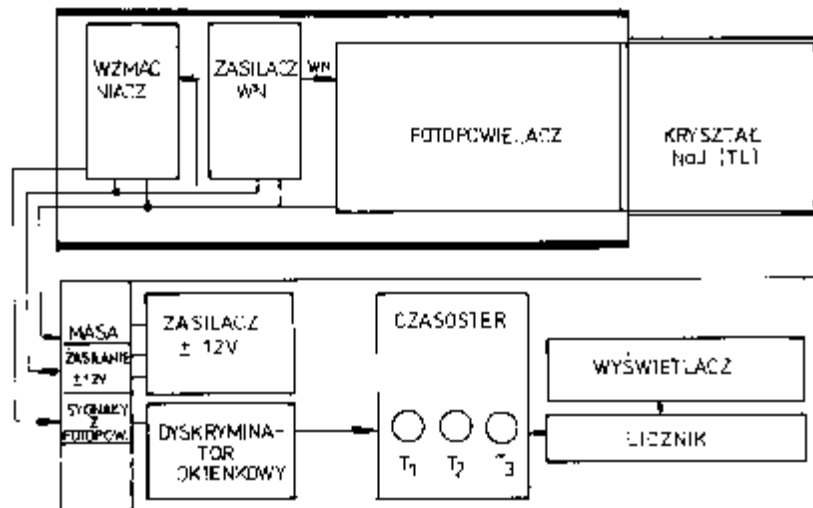
$$1000 - 20 - 90 = 890$$

$$\Delta_1\% = \frac{1020 - 890}{1100} \cdot 100 = \frac{130}{1100} \cdot 100 = 11,8\% \quad (32.21)$$

Obliczenia błędu dla pojedynczego pomiaru zostały wykonane dla najbardziej niekorzystnego przypadku co odpowiada ogólnie przyjętym zasadom wyznaczania błędów pomiaru. Stąd też przy pomiarach próbek zaleca się każdą próbkę mierzyć wielokrotnie ( $n_i \leq 10$  razy) i określać aktywność oraz błąd pomiaru zgodnie z przedstawioną wyżej procedurą.

### Skalowanie urządzenia

Przed przekazaniem urządzenia do eksploatacji powinno ono być wyskalowane. Schemat urządzenia pomiarowego przedstawia rys. 32.5.



Rys. 32.5. Schemat blokowy urządzenia do pomiaru małych aktywności cezu-137

Do skalowania urządzenia były użyte fantomy. Fantomem nazywamy hermetycznie zamknięte źródło promieniowania Cs-137 z dokładnie wyznaczoną aktywnością. Objętość źródła jest równa objętości naczynia pomiarowego. Fantomy były wykonane przez przedsiębiorstwo mające uprawnienia do wykonania takich źródeł. Dokładność wyznaczonej w fantomach aktywności wynosi  $\pm 2\%$ .

**Krótką instrukcją obsługi  
Urządzenia do pomiaru małych aktywności Cezu-137  
w próbkach żywności**

1. Podłączyć urządzenie do sieci 220 V  $\pm 10\%$ ; 50 Hz
2. Włączyć zasilanie. Oczyszczyć komorę pomiarową.
3. Po upływie 15 minut od momentu włączenia umieścić w komorze pomiarowej puste naczynie pomiarowe i sprawdzić poziom zliczeń tła. W tym celu:
  - wcisnąć przycisk T<sub>2</sub>
  - nacisnąć przycisk START
4. Po upływie ok. 100 s zestaw pomiarowy przestanie zliczać impulsy tłowe. Odczytać wynik pomiaru tła N<sub>t</sub> i zanotować wartość wskazań.
  - Wyjąć naczynie pomiarowe i napełnić mierzoną próbką.
  - Naczynie z próbką umieścić w komorze pomiarowej. Powtórzyć pomiar.
  - Odczytać wynik pomiaru próbki N<sub>p</sub> i zanotować wynik pomiaru.
  - Obliczyć różnicę N<sub>p</sub> - N<sub>t</sub>
  - Zważyć próbkę z dokładnością do  $\pm 1\%$
  - Obliczyć aktywność próbki w B<sub>q</sub>/kg
  - Po zakończeniu pomiarów oczyścić naczynie pomiarowe i komorę pomiarową.

Przed rozpoczęciem eksploatacji urządzenia zapoznać się z opisem „Urządzenie do pomiaru małych zawartości Cezu - 137 w próbkach żywności”.

**Literatura:**

- [32.1] Skłodowska A., Gostkowska B.: Promieniowanie jonizujące a człowiek i środowisko. Wydawnictwo Naukowe Scholar. Warszawa 1994
- [32.2] Siemiński M.: Fizyka zagrożeń środowiska. WNT PWN, Warszawa 1994.
- [32.3] Instrukcja obsługi urządzenia do pomiaru małych aktywności Cezu-137 w próbkach żywności. ZBMP Bydgoszcz.