

## PODSTAWY OCHRONY RADIOLOGICZNEJ.

Część ćwiczeń wykonywanych w Laboratorium Fizyki II wymaga pracy ze źródłami promieniowania jądrowego lub z promieniowaniem rentgenowskim. Promieniowanie jądrowe/rentgenowskie jest szczególnie niebezpieczne, ponieważ żaden z naszych zmysłów nie sygnalizuje nam jego obecności, a skutki napromieniowania mogą być groźne i długotrwałe.

Pierwszą informacją, jaką możemy uzyskać o źródle promieniowania jądrowego jest jego aktywność. Aktywność jądrowego preparatu promieniotwórczego określa nam liczba zachodzących w nich przemian jądrowych w jednostce czasu. Jednostką aktywności w układzie SI jest bekerel [Bq]:

$$1[\text{Bq}] = 1 \left[ \frac{\text{przemiana}}{\text{s}} \right]$$

Pozaukładową jednostką aktywności jest 1 kiur [Ci]:

$$1[\text{Ci}] = 3,7 \cdot 10^{10} [\text{przemian/sek}]$$

Przyjmując, że prawdopodobieństwo  $\lambda$  zajścia określonej przemiany promieniotwórczej w jednostce czasu jest dla danego izotopu stałe, to liczbę rozpadów  $dN$  w czasie  $t$  do  $t + dt$ , można obliczyć ze wzoru:

$$dN = -\lambda N dt ,$$

gdzie  $N$  - jest liczbą jąder w preparacie, które jeszcze w chwili czasu  $t$  nie rozpadły się. Korzystając z warunku początkowego, że w chwili czasu  $t = 0$  liczba jąder równała się  $N_0$ , otrzymujemy:

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

ponieważ aktywność  $A$  jest równa  $\frac{dN}{dt}$ , a  $\frac{dN}{dt}$  jest proporcjonalne do  $N$ , to możemy

to równanie zapisać w postaci:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Stała  $\lambda$  [ $s^{-1}$ ] nazywa się stałą rozpadu promieniotwórczego. W praktyce używa się pojęcia czasu połowicznego rozpadu  $T_{\frac{1}{2}}$ , określającego czas w ciągu którego aktywność spada do połowy swej początkowej wartości, to znaczy:

$$\frac{A}{A_0} = \exp\left(-\lambda T_{\frac{1}{2}}\right) = \frac{1}{2}$$

Z powyższej równości otrzymujemy zależność między  $T_{\frac{1}{2}}$  i  $\lambda$ :

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Jak dalece jednak informacja o aktywności źródła jest niewystarczająca do oceny jego szkodliwości biologicznej, przekonamy się gdy poznamy mechanizm działania promieniowania na komórki żywych organizmów.

Promieniowanie jądrowe (a także promieniowanie rentgenowskie) wywiera swój ujemny wpływ poprzez jonizację cząsteczek, z których składają się podstawowe jednostki organizmu – komórki. Jonizacja pociąga za sobą dalsze procesy fizykochemiczne prowadzące do zmiany składu chemicznego, przemian metabolicznych tkanki, zaburzenia syntezy białek i przemiany węglowodorowej. Nie wszystkie tkanki są jednakowo wrażliwe na promieniowanie. Wrażliwość komórek jest wprost proporcjonalna do szybkości ich rozmnażania i odwrotnie proporcjonalna do stopnia zróżnicowania. Z tego powodu, najbardziej wrażliwe na promieniowanie są gonady i szpik kostny, najmniej wrażliwe są ręce, przedramiona i stopy.

Z powyższego wynika, że o stopniu szkodliwości biologicznej promieniowania jądrowego będzie decydować jego zdolność do jonizacji, która zależy nie tylko od energii wysyłanych z jądra cząstek czy kwantów, ale również od rodzaju promieniowania.

### **Oddziaływanie promieniowania z materią.**

#### Promieniowanie alfa

Cząstki alfa (jądra helu) wysyłane w danym rozpadzie jądra atomowego są monoenergetyczne czyli mają jednakową energię. Ze względu na dużą zdolność jonizacji (około 30000 par jonów na drodze 1cm w powietrzu) prowadzącej do szybkiej utraty energii, zasięg ich jest bardzo mały. Maksymalny zasięg w powietrzu

cząstek alfa emitowanych przez  $^{212}\text{Po}$ , mających energię 10,53 MeV, wynosi około 11,5 cm. Ogólnie, zasięg w powietrzu cząstek alfa nie przekracza kilku centymetrów, a w tkance człowieka – kilku mikronów.

Z tego też powodu, promieniowanie alfa może być jedynie bardzo groźne przy bezpośrednim skażeniu ciała preparatem promieniotwórczym, szczególnie gdy dostanie się on do organizmu.

### Promieniowanie beta.

Cząstki beta (elektrony lub pozytony) emitowane z jąder atomowych nie są monoenergetyczne, lecz tworzą widmo ciągłe. Dlatego używa dla nich pojęcia energii średniej i maksymalnej. Energia maksymalna cząstek beta waha się od kilkunastu KeV do kilkunastu MeV. Zdolność jonizacji cząstek beta jest znacznie mniejsza niż cząstek alfa. Zasięg w powietrzu cząstek beta o energii maksymalnej 1MeV wynosi 3m, a o energii 10 MeV dochodzi do 39 m. Ponieważ wytworzenie jednej pary jonów w powietrzu potrzeba około 34 eV łatwo policzyć, że cząstki beta powodują powstawanie średnio tylko około 100 par jonów w powietrzu na 1cm drogi.

Jonizacja nie jest jedynym procesem w wyniku którego cząstki beta mogą tracić swoją energię. Zgodnie z klasyczną teorią elektromagnetyzmu ładunek elektryczny poruszający się ruchem niejednostajnym wysyła promieniowanie elektromagnetyczne o amplitudzie proporcjonalnej do przyspieszenia. W pobliżu jąder atomowych elektrony doznając zmian prędkości wskutek oddziaływania kulombowskiego, wysyłają rentgenowskie promieniowanie hamowania. Strata energii na jednostkę drogi związana z tym promieniowaniem jest proporcjonalna do iloczynu  $EZ^2$ , gdzie  $E$  jest energią elektronu, a  $Z$  - liczbą atomową absorbenta.

### Promieniowanie elektromagnetyczne.

Promieniowanie gamma podobnie jak promieniowanie rentgenowskie nie może bezpośrednio jonizować ośrodka przez które przechodzi. Głównymi mechanizmami oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią są:

- Efekt fotoelektryczny, w którym promieniowanie elektromagnetyczne ujawniając swoją naturę kwantową (fotonową) przekazuje całą energię elektronom z wewnętrznej powłoki atomowej.
- Efekt Comptona, polegający na rozproszeniu kwantu (fotonu) na swobodnym elektronie, przy czym elektrony związane na orbitach atomów możemy uważać za swobodne, gdy energia kwantu promieniowania znacznie przekracza energię wiązania elektronu. W

zjawisku Comptona, tylko część energii kwantu przekazywana jest elektronowi.

- Efekt tworzenia pary elektron – pozyton, gdy energia kwantu przekracza podwójną energię spoczynkową elektronu ( $1,02\text{MeV} = 2m_e c^2$ ).

Poszczególne kwanty może zjonizować tylko jeden atom, natomiast właściwą jonizację ośrodka powodują elektrony, którym kwanty przekazują energię w wyniku jednego z wyżej wymienionych procesów.

Promieniowanie elektromagnetyczne jest bardzo przenikliwe i nie możemy mówić o jakimś określonym jego zasięgu. Przy przechodzeniu przez ośrodek ulega ono jedynie osłabieniu w wyniku omówionych procesów. Ponieważ prawdopodobieństwo zajścia tych procesów rośnie szybko ze wzrostem liczby atomowej  $Z$  (wzrostem liczby elektronów w atomie), to osłabienie wiązki promieniowania będzie tym większe im cięższe pierwiastki będą wchodzić w skład materiału osłabiającego.

### Neutrony.

Innym rodzajem promieniowania jądrowego są neutrony, które wytwarzane są głównie w reaktorach atomowych. Jako cząstki obojętne nie wywołują bezpośredniej jonizacji i dlatego ich zasięg jest bardzo duży. Zderzając się z protonami (jądrami wodoru), przekazują im swą energię, a te z kolei wywołują silną jonizację ośrodka. Neutrony zatem odznaczają się znaczną szkodliwością biologiczną.

## **Dawki promieniowania jonizującego.**

Aby w sposób wymierny określić stopień zagrożenia ze strony źródeł promieniowania jonizującego należy wprowadzić odpowiednie jednostki pozwalające na ilościową ocenę skutków jonizacji. Ze względu na duże zróżnicowanie oddziaływania promieniowania z materią istnieje szereg definicji dawek promieniowania.

### Dawka ekspozycyjna.

Dawka ekspozycyjna jest specyficzną wielkością dozymetryczną wprowadzoną dla promieniowania elektromagnetycznego. Definicja dawki ekspozycyjnej opiera się na względnie łatwym pomiarze jonizacji powietrza i dlatego większość przyrządów dozymetrycznych wyskalowana jest właśnie w jednostkach dawki ekspozycyjnej.

Dawka ekspozycyjna jest równa sumie ładunków  $Q$  jednakowego znaku powstałych w powietrzu przy całkowitym zahamowaniu elektronów uwolnionych przez

promieniowanie elektromagnetyczne w jednostce masy powietrza. Jednostką dawki ekspozycyjnej w układzie SI jest  $\left[ \frac{\text{C}}{\text{kg}} \right]$ ,

Moc dawki ekspozycyjnej jest miarą przyrostu dawki ekspozycyjnej w jednostce czasu. Jednostką mocy dawki ekspozycyjnej jest  $\left[ \frac{\text{A}}{\text{kg}} \right]$  tj.  $\left[ \frac{\text{C}}{\text{kg}} \cdot \text{s} \right]$ .

### Dawka pochłonięta.

Ponieważ jednostki dawki ekspozycyjnej zostały zdefiniowane tylko dla promieniowania gamma i rentgenowskiego aby usunąć to ograniczenie wprowadzono pojęcie dawki pochłoniętej **D**, będącej miarą energii pochłoniętej przez jednostkę masy napromieniowanej substancji. Jednostką dawki pochłoniętej w układzie SI jest grej [Gy], przy czym:

$$1 \text{ [Gy]} = 1 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

### Równoważnik dawki

W przypadku napromieniowania żywych organizmów informacja o wielkości energii pochłoniętej przez materię okazuje się niewystarczająca. Istotna jest również informacja od jakiego promieniowania ta energia pochodzi. Największe szkody w komórkach organizmu żywego, wyrządza promieniowanie o dużej zdolności jonizacyjnej. Przypisano zatem poszczególnym rodzajom promieniowania tzw. współczynniki jakości **Q<sub>P</sub>** (Tabela 1), który opisuje skuteczność danego rodzaju promieniowania. Wprowadzona wielkość zwaną równoważnikiem dawki **H<sub>T</sub>** odnosi się do pojedynczej tkanki T. Jeśli dawkę pochłoniętą w tkance T, pochodzącą od tego samego rodzaju promieniowania P oznaczymy **D<sub>TP</sub>** to równoważnik dawki otrzymamy sumując dawki pochodzące od wszystkich rodzajów promieniowania:

$$\mathbf{H_T = \sum D_{TP} Q_P}$$

Równoważnik dawki mierzymy w siwertach (Sv) **1 Sv = 1J/kg**

**Tabela 1**

Wartości współczynników jakości Q<sub>p</sub>

Rodzaj promieniowania	Q <sub>p</sub>
Rentgenowskie, gamma, cząstki beta	1
Cząstki alfa, ciężkie jony	20
Neutrony termiczne	4,5

### Efektywny równoważnik dawki

Poszczególne narządy i tkanki, ze względu na różną promienioczułość w różny sposób reagują na tą samą dawkę danego promieniowania. Wartości współczynnika  $w_T$  opisującego wpływ promieniowania na daną tkankę podaje Tabela 2.

Efektywny równoważnik dawki  $H_E$  odnosi się do całego ciała lub kilku narządów i jest dawką zsumowana po rodzajach napromieniowanych tkanek, po pomnożeniu  $H_T$  przez współczynnik  $w_T$ :

$$H_E = \sum w_T H_T$$

Jednostką efektywnego równoważnika dawki jest 1 Sv.

**Tabela 2**

Wartości współczynników  $w_T$  tkanek/narządów

<b>Tkanka lub narząd</b>	<b><math>w_T</math></b>
Gonady	0,25
Gruzoły piersiowe	0,15
Czerwony szpik kostny	0,12
Płuca	0,12
pęcherz	0,05
Tarczycyca	0,03
Powierzchnie kości	0,03
Skóra	0,01
Przewód pokarmowy, żołądek	0,30

### **Dawki graniczne**

Według przyjmowanych hipotez twierdzi się, że prawdopodobieństwo wystąpienia zmian w tkankach organizmów żywych jest wprost proporcjonalne do otrzymanej dawki. Nie ma zatem progu poniżej którego otrzymane dawki byłyby z pewnością nieszkodliwe. Z punktu widzenia biologicznego nie ma więc dawki dopuszczalnej. Praktyka wymaga jednak ustalenia pewnych granic napromieniowania organizmu, które można akceptować ze względu na nieznaczące ryzyko zagrożenia zdrowia. Granice te przyjęto nazywać dawkami granicznymi, a każdą wartość niższą określa się jako dawkę dopuszczalną. W Tabeli 3 podane są roczne dawki graniczne przyjęte w Polsce. Obejmują one zarówno napromieniowanie zewnętrzne jak i wewnętrzne, a nie wliczane są do nich dawki otrzymywane przy wykonywaniu zabiegów medycznych oraz dawki od tła naturalnego.

**Tabela 3**

Roczne dawki graniczne

Kategoria osób narażonych na działanie prom. jon.	Równoważnik dawki <b>H</b> [mSv]		Efekt. równ. dawki <b>H<sub>E</sub></b> [mSv]
	oczy	inne tkanki / narz.	całe ciało
narażenie zawodowe*	150	500	50
ogół populacji	15	50	1**

\* dla kobiet w ciąży przyjmuje się dawki roczne jak dla ludności nie narażonej zawodowo

dla kobiet do 45 lat nie więcej niż 12 mSv w ciągu kolejnych 3 miesięcy

\*\* dopuszcza się 5 mSv/rok pod warunkiem, że zostanie zachowana średnia 1 mSv/rok

Typowe dawki w mSv przedstawia Tabela 4

**Tabela 4**

	[mSv]
Przelot Londyn-Nowy Jork-Londyn	0.1
Zdjęcie rentgenowskie klatki piersiowej	0.1
Tomografia komputerowa głowy	50
Dawka na guz nowotworowy	20 000-100 000
Roczna dawka od tła naturalnego	2-4

### **Aparatura dozymetryczna.**

Dawki promieniowania jonizującego mierzy się głównie za pomocą dawkomierzy fotometrycznych (dozymetrów) w których detektorem jest błona fotograficzna. Analizując stopień zaczernienia błony można określić dawkę pochłoniętego promieniowania. Zastosowanie odpowiednich filtrów przesłaniających częściowo powierzchnie błony umożliwia również określenie rodzaju promieniowania.

Do pomiaru mocy dawki stosuje się radiometry wyposażone najczęściej w liczniki Geigera-Müllera. Laboratorium Fizyki II p wyposażone jest w monitor skażeń radioaktywnych ECO-C umożliwiający pomiar mocy dawki w zakresie 0.01-100µSv/h (dawki gamma i rentgenowskie) oraz pomiar skażenia powierzchni w zakresie 0,1-

1000 Bq/cm<sup>2</sup>. Zakres energetyczny pomiaru fotonów gamma i rentgenowskich wynosi 30keV-1,5MeV, promieniowania beta – powyżej 100 keV, a promieniowania alfa powyżej 4 MeV. Stosowane są również radiometry RK-67 i ECO-D umożliwiające pomiar mocy dawki promieniowania elektromagnetycznego w zakresie energii 50keV—1,5 MeV oraz promieniowania beta o energii większej od 500 keV.

### **Ochrona przed promieniowaniem.**

Ochrona przez odległość jest podstawową zasadą ochrony radiologicznej. Wynika ona z faktu, że dawka promieniowania akumulowana w organizmie, jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości od źródła. Dlatego, nawet w przypadku korzystania ze słabych źródeł izotopowych nie należy ich brać bezpośrednio do ręki, gdyż moc dawki na powierzchni nawet słabego źródła jest bardzo duża. W celu przeprowadzenia jakichkolwiek manipulacji ze źródłami promieniowania należy posługiwać się manipulatorami lub szczypcami.

Ochrona przez osłony. Umieszczając między źródłem promieniowania, a eksperymentatorem odpowiednio grubą warstwę materiału osłabiającego możemy niemal w dowolnym stopniu zmniejszyć poziom promieniowania. Najłatwiej osłonić się przed promieniowaniem alfa, dla którego kartka papieru lub kilkunastocentymetrowa warstwa powietrza stanowi osłonę przed promieniowaniem (przykładowo cząsta alfa o energii 5 MeV, w powietrzu przebyć może około 4 cm).

W celu osłabienia promieniowania beta stosuje się osłony z materiałów o małej liczbie atomowej Z. Dzięki temu natężenie rentgenowskiego promieniowania hamowania powstającego w wyniku oddziaływania elektronów z osłoną jest małe (oddziaływanie elektronów z osłoną jest proporcjonalne do Z<sup>2</sup>). Powszechnie stosowane są osłony ze szkła organicznego i aluminium. Znając maksymalny zasięg cząstek beta  $R_{\max}$ , wyrażony w jednostkach masy powierzchniowej  $\frac{g}{cm^2}$  możemy łatwo obliczyć wymaganą grubość osłony pochłaniającej cząsteczki beta:

$$d = \frac{R_{\max}}{\rho}$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością materiału osłony. Wartości d w zależności od energii maksymalnej cząstek beta dla kilku absorbentów podane są w tabeli 4.

Tabela 4.



Grubość warstwy pochłaniającej promieniowanie beta  
w zależności od jego energii maksymalnej.

$E_{\max}$ [MeV]	absorbent		
	Aluminium [mm]	Woda [mm]	Powietrze [cm]
0.5	0.6	1.9	120
0.8	1.15	3.6	230
1.0	1.5	4.8	310
10.0	19	61	3900

Promieniowanie elektromagnetyczne ze względu na małą zdolność jonizacyjną jest promieniowaniem o dużym zasięgu. Przy przejściu przez materiał osłony promieniowanie to ulega osłabieniu zgodnie ze wzorem:

$$P = BP_0 e^{-\mu d}$$

gdzie  $P_0$  i  $P$  oznaczają moc dawki przed i za osłoną,  $d$  - grubość warstwy,  $\mu$  - współczynnik liniowego osłabienia o wymiarze  $1/\text{cm}$ . Czynniki  $B$ , zwany współczynnikiem wzrostu, uwzględnia oddziaływanie promieniowania z materiałem osłony. Przy niewielkich energiach promieniowania gamma i skolimowanej wiązce możemy przyjąć  $B=1$ . W ogólności jednak wartość współczynnika  $B$  może przyjmować wartości większe od 1.

Pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego polega na przekazywaniu jego energii głównie elektronom. Im więcej zatem elektronów w osłonie tym lepsze pochłanianie. Stosowanie osłon z materiałów o dużej liczbie atomowej jest zatem najbardziej efektywne. Tabele 5 i 6 podają odpowiednio grubości warstw żelaza i ołowiu dla kilku krotności osłabienia wiązki w zależności od energii promieniowania.

**Tabela 5**

Grubość w centymetrach warstw żelaza ( $\rho = 7,9 \text{ g/cm}^3$ ) dla różnych krotności osłabienia  $k$  promieniowania gamma

$k$	$E_\gamma = 0,5 \text{ MeV}$	$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$	$E_\gamma = 1,5 \text{ MeV}$
2	2,5	3,3	3,6
5	4,8	6,4	7,4
10	6,3	8,5	10

**Tabela 6**

Grubość w centymetrach warstw ołowiu ( $\rho = 11,3 \text{ g/cm}^3$ ) dla różnych krotności osłabienia  $k$  promieniowania gamma

<b>k</b>	<b><math>E_\gamma = 0,5 \text{ MeV}</math></b>	<b><math>E_\gamma = 1 \text{ MeV}</math></b>	<b><math>E_\gamma = 1,5 \text{ MeV}</math></b>
2	0,5	1,3	1,7
5	1,1	2,8	3,8
10	1,6	3,8	5,1

Ochrona przez odległość, ochrona przez stosowanie odpowiednich osłon oraz możliwie najkrótszy czas narażenia na promieniowanie to trzy czynniki, które stanowią podstawowe zasady ochrony radiologicznej. Można je przedstawić następująco:

- im dalej od źródła, tym bezpieczniej,
- im lepsze stosujemy osłony tym bezpieczniej,
- im krócej przebywamy w polu promieniowania, tym bezpieczniej.

#### **Literatura uzupełniająca.**

1. A. Skłodowska, B. Gostkowska, „Promieniowanie jonizujące, a człowiek i środowisko”, Scholar&Polon, W-wa 1994.
2. M. Siemiński, „Fizyka zagrożeń środowiska”, PWN, W-wa 1994.
3. B. Wahlström, „Promieniowanie, zdrowie i społeczeństwo”, PAA, W-wa 2005.
4. L.Dobrzyński, E. Droste, W. Trojanowski, R. Wołkiewicz, „Spotkanie z promieniotwórczością”, IPJ, Świerk 2005.