



Jacek Filipecki, Kordian Chamerski, Edmund Golis, Małgorzata Hyla
Akademia im. Jana Długosza
Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa, e-mail: j.filipecki@ajd.czyst.pl

APARATURA DOZYMetryczNA STOSOWANA W OCHRONIE RADIOlogiczNEJ PRZY PRACY Z PROMIENIOWANIEM JONIZACYJNYM

Streszczenie. Promieniowanie jonizacyjne, czyli promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie jądrowe, głównie typu gamma, alfa i beta, przechodząc przez materię, powoduje jej jonizację i w sposób destrukcyjny oddziałuje na organizmy żywe. Proces oceny ryzyka wynikający z zawodowego narażenia na promieniowanie jonizujące oparty jest na systemie ochrony radiologicznej. Ochrona radiologiczna to całokształt działań i przedsięwzięć zmierzających do zapobiegania narażeniu ludzi i środowiska na promieniowanie jonizujące. W tym celu wykorzystuje się zespół przyrządów przeznaczonych do wykrywania i pomiarów promieniowania jonizującego. W niniejszej pracy przedstawiamy powstawanie, charakterystykę i własności promieniowania jonizującego, a także istniejące ryzyko na stanowiskach pracy, gdzie występuje to promieniowanie, oraz budowę, zasady działania i wykorzystanie podstawowej aparatury dozymetrycznej stosowanej w ochronie radiologicznej.

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, radiologia, dozymetria.

Wstęp

Odkrycie w roku 1895 przez Röntgena promieni X oraz w 1896 roku przez Becquerela promieniotwórczości naturalnej dały nowe spojrzenie na budowę materii. Późniejsze prace Marii Curie-Skłodowskiej i wyodrębnienie pierwiastków promieniotwórczych, polonu i radu, rozpoczęły rozwój badań nad zjawiskiem promieniotwórczości, które umożliwiło lepsze poznanie struktury atomu i jądra atomowego [13]. Promienie wysyłane przez niestabilne jądra atomowe dostarczały informacji o budowie jądra atomowego, natomiast oddziaływanie tych promieni z materią, a przede wszystkim z powłoką elektronową, wskazywało na budowę całego atomu. Wraz z odkrywaniem właściwości promieniowania jonizującego zaczęto konstruować specjalne układy do wytwarza-

nia tego promieniowania, którymi były urządzenia przyspieszające cząstki naładowane. Akceleratory, bo o nich mowa, umożliwiły wytworzenie wiązek cząstek naładowanych lub jonów o wysokich energiach, co dawało z kolei możliwość przeprowadzania reakcji jądrowych. W wyniku przeprowadzanych reakcji otrzymywano coraz nowsze pierwiastki promieniotwórcze, a więc nastąpił rozwój promieniotwórczości sztucznej. Promieniowanie jonizujące oprócz nauki znalazło niedługo potem zastosowanie w takich dziedzinach, jak medycyna czy przemysł. Obecnie w terapii nowotworów duże znaczenie mają wiązki promieniowania rentgenowskiego oraz cząstek naładowanych. Te pierwsze znalazły również szerokie zastosowanie w diagnostyce, na przykład w rekonstrukcji tomograficznej. W celach terapeutycznych stosuje się również radionuklidy o dużej aktywności. W przemyśle promieniowanie rentgenowskie znalazło zastosowanie między innymi w obróbce radiacyjnej żywności. Za pomocą akceleratorów możliwe jest również badanie spójności różnych materiałów [10]. Duże znaczenie w wielu dziedzinach ma metoda atomów znaczonych, wykorzystująca izotopy promieniotwórcze. Za pomocą radionuklidów można sprawdzić szczelność rurociągu, czy zbadać przemiany metaboliczne zachodzące w organizmie żywym. Ze względu na duże siły, utrzymujące jądra atomowe jako jedną całość, możliwe jest uzyskanie bardzo dużej ilości energii w wyniku reakcji rozszczepienia jądra. Proces ten jest stosowany w energetyce, a jako pierwiastka poddawanej reakcjom używa się między innymi promieniotwórczego uranu. W związku z tym obok wysokiej energii uzyskiwanej w reakcji rozszczepienia powstaje także duża ilość promieniowania jonizującego. Jak więc można łatwo zauważyć, promieniowanie jonizujące towarzyszy wielu procesom i staje się nieodłącznym elementem wielu dziedzin życia. Z uwagi na swoje właściwości jonizujące promieniowanie tego typu jest traktowane jako niebezpieczne dla człowieka, dlatego też ważna jest kontrola jego podstawowych parametrów, takich jak dawka czy moc dawki promieniowania. Ponieważ za jonizujące można uznać różnego typu promieniowanie, więc do detekcji i pomiarów podstawowych wielkości go opisujących stosuje się różnego rodzaju układy oparte na oddziaływaniach poszczególnych typów promieniowania z materią.

Promieniowanie jonizujące i jego rodzaje

Poprzez jonizację ośrodka należy rozumieć wytworzenie z obojętnego atomu dodatniego jonu oraz swobodnego elektronu, który uprzednio był związany siłami atomowymi z powłoką atomu. Promieniowanie jonizujące ma tę właściwość, że dzięki swojej odpowiednio dużej energii może przekazać jej część elektronowi związanemu. Elektron, wykonując pracę wyjścia, staje się

cząstką swobodna, a jeśli uzyska energię wyższą od energii stanu, który zajmował w atomie, to również uzyska energię kinetyczną i oddali się od atomu.

Promieniowanie jonizujące przede wszystkim można podzielić na promieniowanie elektromagnetyczne i korpuskularne [3]. Podział ten jest istotny z punktu widzenia oddziaływania z materią. Za promieniowanie elektromagnetyczne uważa się promieniowanie fotonowe, czyli promienie γ oraz X. Pod względem oddziaływania z materią mają one takie same właściwości, jednak różnią się sposobem wytwarzania oraz długością fali. Promienie γ są promieniowaniem o wyższych częstotliwościach pochodzenia jądrowego, natomiast bardziej długofalowe promieniowanie X wytwarzane jest w wyniku przejść elektronów ze stanów wzbudzonych do stanów podstawowych na wewnętrznych powłokach elektronowych. Do promieniowania korpuskularnego zalicza się cząstki obdarzone masą spoczynkową. Są nimi zarówno wszelkiego rodzaju cząstki naładowane oraz jony, a także obojętne elektrycznie neutrony. Cząstki naładowane można wytwarzać w wyniku jonizacji atomów, jak ma to miejsce przy generowaniu wiązek elektronów lub jonów, a także w wyniku przemian jąder atomowych. Źródłem neutronów są jedynie przemiany jądrowe.

Przemiany jąder atomowych można podzielić na przemiany samorzutne, zwane rozpadami promieniotwórczymi, oraz na przemiany wymuszone, czyli reakcje jądrowe. W wyniku samorzutnej przemiany wzbudzone jądro atomowe, powracając do stanu podstawowego, emituje różnego rodzaju promieniowanie. Najbardziej charakterystyczne są przemiany, którym towarzyszy emisja cząstek α i β oraz kwantów γ . Możliwe jest także wysyłanie innych cząstek elementarnych w wyniku rozpadu promieniotwórczego [8]. Innym rodzajem przemiany jądrowej jest również wychwytywanie K. Można zaobserwować eksperymentalnie, że każde źródło promieniowania jądrowego wraz z upływającym czasem emituje promieniowanie o coraz mniejszym natężeniu, a zależność natężenia od czasu jest eksponencjalna. Jeżeli ubytek jąder promieniotwórczych z początkowej ilości jąder w próbce N oznaczy się jako dN , to można powiedzieć, że ubytek ten jest proporcjonalny do czasu, w którym doszło do rozpadów:

$$-dN = \lambda N dt \quad (1)$$

gdzie stała λ jest nazywana stałą rozpadu promieniotwórczego danego pierwiastka i oznacza prawdopodobieństwo rozpadu pojedynczego jądra atomowego w jednostce czasu. Powyższe równanie, zwane prawem rozpadu promieniotwórczego, można scałkować i wtedy przyjmuje ono postać:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Stałą rozpadu λ można także przedstawić jako odwrotność średniego czasu życia jądra atomowego τ , co daje następujące prawo rozpadu promieniotwórczego:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

W celu określenia czasu życia danego izotopu wprowadza się zamiast czasu τ wielkość $T_{1/2}$, która jest czasem połowicznego zaniku substancji promieniotwórczej. Po upływie tego czasu rozpadowi ulegnie połowa spośród wszystkich atomów promieniotwórczych próbki. Czas połowicznego rozpadu określa się jako:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \ln 2 \tau \quad (4)$$

i jest on wielkością charakteryzującą dany izotop promieniotwórczy.

W przemianie α jądro atomowe emituje cząstkę alfa, która jest jądrem atomu helu. Cząstki alfa charakteryzują się silną jonizacją ośrodka, a także słabą przenikliwością ośrodka. Można powiedzieć, że ich oddziaływanie z materią ma charakter zasięgowy. Zgodnie z regułą przesunięć Soddy'ego-Fajansa jądro, które wyemituje cząstkę alfa, ulega przemianie w jądro innego pierwiastka, przesuniętego w układzie okresowym dwa miejsca wstecz. Symbolicznie przemianę α można zapisać następująco:



W powyższej symbolice X oznacza jądro atomowe pierwiastka pierwotnego, Y jądro pierwiastka powstałego w wyniku rozpadu, a wielkości A oraz Z są odpowiednio liczbą masową i atomową danego pierwiastka.

W przemianie, której towarzyszy emisja cząstki β , powstające jądro jest przesunięte w układzie okresowym pierwiastków o jedno miejsce. Kierunek, w którym dojdzie do przesunięcia, zależy od tego, czy źródło emituje cząstki β^- czy β^+ . Pierwsze z cząstek są elektronami, natomiast drugie są ich antycząstkami, które nazywa się pozytonami. Promienie β są bardziej przenikliwe od cząstek α .

Ogólnie przemianę β^- można zapisać następująco:



Cząstka $\overline{\nu}_e$ jest obojętnym elektrycznie antyneutrinem elektronowym o zerowej masie spoczynkowej, które bardzo słabo oddziałuje z materią. Przemianę β^+ można zapisać jako:



gdzie ν_e jest neutrinem elektronowym o podobnych właściwościach co antyneutrino elektronowe.

Zarówno przemianie α , jak i β może towarzyszyć emisja kwantów γ [13], które będąc promieniowaniem elektromagnetycznym, wykazują się słabym oddziaływaniem z materią, przez co są bardzo przenikliwe.

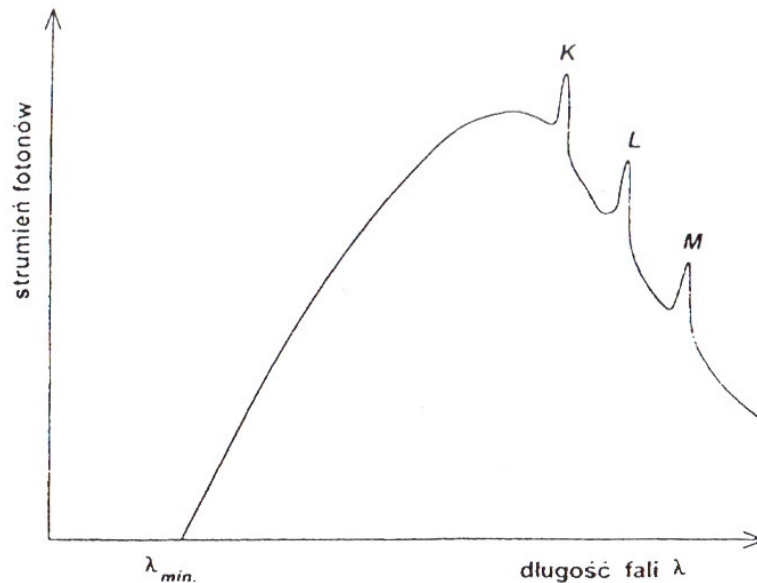
Właściwościami promieniowanie γ jest zbliżone do promieniowania rentgenowskiego, jednak większa częstotliwość promieni γ wskazuje na ich zwiększone własności kwantowe. Promienie gamma mają też właściwość tworzenia par elektron–pozyton. Jeżeli energia kwantów γ przekracza wartość równą podwójnej masie spoczynkowej elektronu, to możliwa jest konwersja tej energii na masę pary negaton–pozyton. Przemiana ta musi zachodzić w sąsiedztwie jądra atomowego, gdyż wymusza to zasada zachowania energii i pędu. Proces ten można zapisać następująco:

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_{ke} + E_{kp} \quad (8)$$

gdzie E_{ke} i E_{kp} , są odpowiednio energią kinetyczną elektronu i pozytonu. Zjawiskiem odwrotnym do powstawania pary jest anihilacja elektronu z pozytonem w wyniku czego z największym prawdopodobieństwem dochodzi do zamiany ich masy na dwa kwanty promieniowania γ o energiach 0,511 keV, które emitowane są współliniowo w przestrzeni.

Poza promieniowaniem jonizującym pochodzenia jądrowego można wyróżnić inne rodzaje promieniowania korpuskularnego oraz fotonowego. Promieniowanie korpuskularne można wytworzyć, jak już było wspomniane, przy pomocy akceleratorów cząstek naładowanych, które przyspiesza się przy pomocy dużej różnicy potencjałów. Promieniowanie fotonowe, czyli promieniowanie X, generuje się w wyniku przejść elektronów między wewnętrznymi powłokami atomu. W tym przypadku uzyskuje się fotony o charakterystycznych długościach fali. W przypadku, gdy wiązka przyspieszonych cząstek naładowanych, a najlepszym przykładem są tutaj elektrony, zostanie wyhamowana w materii na skutek oddziaływań z polami elektrycznymi w atomach, dochodzi do konwersji elektronów na promieniowanie rentgenowskie, którego widmo jest ciągłe. Promieniowanie tak powstałe nosi nazwę promieniowania hamowania [14].

Zamianę energii kinetycznej elektronu nazywa się *konwersją elektronu na promieniowanie X* [10]. Z nałożenia się widma ciągłego oraz widma charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego otrzymuje się widmo rzeczywiste, które przedstawiono na rys. 1 [9].



Rys. 1. Widmo rzeczywiste promieniowania rentgenowskiego z wyraźnie zaznaczonymi długościami fal dla linii emisyjnych K, L, M

Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią

Cząstki naładowane, przechodząc przez materię, zwaną absorbentem, tracą swoją energię w różnych procesach. Mówi się o absorpcji energii przez absorbent. Rozpatrując oddziaływanie cząstek z materią, należy wprowadzić pojęcie przekroju czynnego na dany proces oddziaływania, który określa nam prawdopodobieństwo zajścia procesu. Jeżeli wiązka promieniowania, składająca się z n cząstek, pada na absorbent o grubości dx , to w wyniku absorpcji usunięta zostanie z tej wiązki ilość cząstek dana zależnością:

$$dn = \sigma n N dx \quad (9)$$

W powyższym wzorze N jest ilością cząstek materii w 1 cm^3 , z którą oddziałują cząstki promieniowania, σ natomiast jest przekrojem czynnym i ma wymiar $[\text{cm}^2]$. Przekrój czynny jest niczym innym jak powierzchnią poprzeczną, która może stanąć na drodze promieniowania niczym przesłona. Całkując równanie (9) opisujące ilość cząstek usuwanych z wiązki, otrzymuje się zależność eksponencjalną ilości cząstek promieniowania, które przeszły przez absorbent, od grubości warstwy osłabiającej:

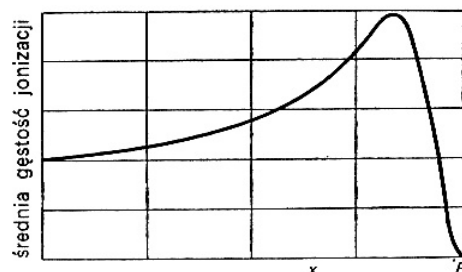
$$n = n_0 e^{-\sigma N dx} \quad (10)$$

Do ciężkich cząstek naładowanych zalicza się protony, deuterony, cząstki α , β ciężkie jony, czyli cząstki elementarne i zjonizowane atomy, posiadające ładunek dodatni. Zestawienie podstawowych własności cząstek naładowanych przedstawione zostało w tabeli 1. Jak wynika z tabeli, najlżejszą cząstką jest elektron. Pod tym względem zaraz za elektronem plasuje się proton. Ładunki obydwu cząstek są równe, co do bezwzględnej wartości, ładunkowi elementarnemu, jednak mają przeciwne znaki. W przybliżeniu dwa razy cięższy od protonu deutron jest zjonizowanym jądrem trwałego izotopu wodoru, zwanego deuterem. Najcięższą z zestawionych cząstek jest cząstka alfa, będąca dwukrotnie zjonizowanym atomem helu. Uzyskuje się ją na skutek rozpadów jądrowych, izotopów promieniotwórczych o dużej liczbie atomowej. Do ciężkich cząstek naładowanych można również zaliczyć ciężkie jony, które można określić jako posiadające liczbę atomową większą od 2 [3, 11].

Tab. 1. Zestawienie podstawowych własności cząstek naładowanych

| nazwa cząstki | masa spoczynkowa [kg] | masa spoczynkowa [MeV] | ładunek [10^{-19} C] |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| elektron | $9,110 \cdot 10^{-31}$ | 0,511 | - 1,607 |
| proton | $1,673 \cdot 10^{-27}$ | 938,3 | + 1,607 |
| deutron | $3,342 \cdot 10^{-27}$ | 1877 | + 1,607 |
| cząstka alfa | $6,644 \cdot 10^{-27}$ | 3733 | + 3,204 |

W swoim oddziaływaniu z powłoką elektronową, ciężka cząstka mająca, jak w przypadku protonu, przynajmniej około 2000 razy większą masę spoczynkową od elektronu, potrafi uwolnić go od wiązania z jądrem atomowym. Dzieje się tak na skutek pola elektrycznego wytwarzanego przez ciężką cząstkę, za pośrednictwem którego działa ona na elektron siłą przyciągania. Dodając do tego zwiększoną energię kinetyczną ciężkiej cząstki i zdecydowanie większą jej masę w porównaniu z elektronem, elektron zostaje wyciągnięty z powłoki elektronowej. Spełniona jest tutaj zasada zachowania energii i pędu, gdyż cząstka jonizująca traci energię na rzecz wyrwanego negatonu. Strata energii ciężkich cząstek naładowanych nie jest równomierna na całej drodze w materii i jest ściśle związana z zasięgiem cząstek w absorbencie. Bardzo dobrze obrazuje ten fakt zależność ilości zjonizowanych atomów od zasięgu ciężkich cząstek w materii (rys. 2). Z wykresu widać, że największa jonizacja ośrodka ze strony cząstki przypada na koniec jej drogi w absorbencie, czyli większa część energii cząstki zostaje zaabsorbowana na większej głębokości w materii.

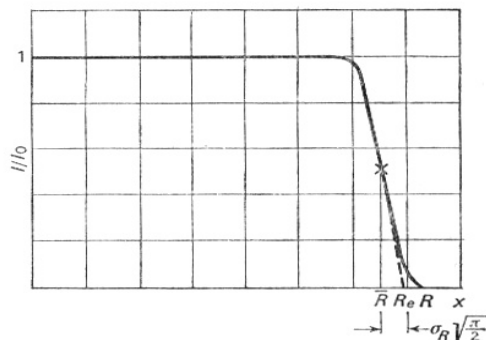


Rys. 2. Zależność średniej gęstości jonizacji ciężkiej cząstki naładowanej od grubości absorbentu

Aby wyznaczyć zasięg ciężkich cząstek w materii, mierzy się ich natężenie po przejściu przez różne grubości absorbentu i wyznacza krzywą transmisji, która jest zależnością stosunku natężenia wiązki cząstek po przejściu przez absorbent do natężenia wiązki początkowej od grubości absorbentu. Przykładowa krzywa przedstawiona jest na rys. 3. Zasięg nie jest punktem przecięcia osi odciętych na wykresie. Do uzyskania zasięgu stosuje się odchylenie od średniego zasięgu cząstek o tej samej energii σ_R , dzięki któremu otrzymuje się zasięg

ekstrapolowany równy $\bar{R} + \sigma_R \sqrt{\frac{\pi}{2}}$.

Z pomiaru zasięgu cząstek w absorbencie można wyznaczyć energię cząstek, obliczając energię straconą na skutek absorpcji na jednostkę drogi.



Rys. 3. Krzywa transmisji dla ciężkich cząstek naładowanych

Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że strata energii zależy od energii cząstki, mianowicie cząstki o niższej energii tracą więcej energii przy przejściu przez ośrodki. Oddziaływanie promieniowania fotonowego z materią jest bardzo skomplikowane ze względu na ilość procesów, w wyniku których dochodzi do absorpcji energii fotonów. Promieniowanie fotonowe może oddziaływać z powłokami elektronowymi oraz jądrem atomu. Na skutek tych oddziaływań

możliwa jest całkowita absorpcja energii fotonu lub jego rozproszenie elastyczne bądź nieelastyczne. Rozproszenie nieelastyczne polega na zmianie energii oraz kierunku przechodzenia fotonu przez absorbent przy jednoczesnym przekazaniu ubytku swojej energii cząstce odrzutu. Łącznie można wyznaczyć 12 rodzajów procesów, które prowadzą do absorpcji energii fotonu, jednak niektóre z nich zachodzą z małym prawdopodobieństwem, stąd najistotniejsze są trzy z nich. Są to całkowita absorpcja fotonu przez powłokę elektronową, nieelastyczne rozproszenie fotonu na elektronie oraz oddziaływanie fotonu z polem elektrycznym jądra atomowego [12]. Całkowita absorpcja energii fotonu przez powłokę elektronową ma miejsce w zjawisku zwanym zjawiskiem fotoelektrycznym. Foton elektromagnetycznego promieniowania jonizującego na skutek zderzenia z elektronem wewnętrznej powłoki elektronowej atomu przekazuje mu całą swoją energię. Jeżeli jest ona wystarczająca do wykonania przez elektron pracy wyjścia, umożliwiającą wyzwolenie się elektronu z wiązania atomowego, to elektron ten staje się elektronem swobodnym. Gdy energia fotonu padającego jest dużo większa od energii potrzebnej na wykonanie pracy wyjścia, to elektron uzyskuje również energię kinetyczną i ma dodatkowo zdolność jonizacji ośrodka. Elektrony takie są wtórnymi cząstkami promieniowania jonizującego [12]. Zjawisko przekazania energii fotonu elektronowi jest dane następującym wyrażeniem:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W \quad (11)$$

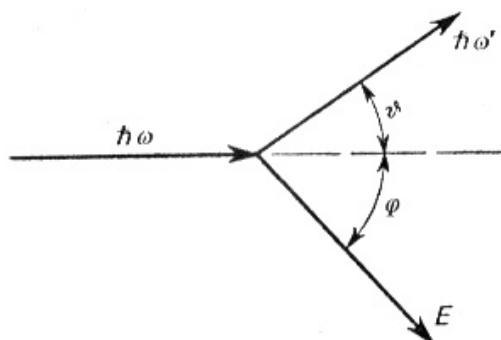
Nieelastyczne rozproszenie fotonu na elektronie nazywane jest zjawiskiem Comptona. Zachodzi ono dla fotonów o dużych energiach, przy których energia wiązania elektronu w atomie jest bardzo mała. Najczęściej dochodzi do zjawiska Comptona przy oddziaływaniu z elektronami zewnętrznych powłok elektronowych ze względu na ich najmniejszą energię wiązania z jądrem atomowym. Elektrony wybijanie przez foton można w tym przypadku uważać za elektrony swobodne. W oddziaływaniu tym spełnione są zasady zachowania energii oraz pędu układu foton–elektron, które można wyrazić następująco:

$$\hbar\omega = \hbar\omega' + \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (12)$$

$$\frac{\hbar\omega}{c} = \frac{\hbar\omega'}{c} \cos \Theta + p \cos \Phi, \quad (13)$$

$$0 = \hbar\omega' \sin \Theta - p \sin \Phi$$

Na rysunku 4 przedstawiony jest schemat zajścia zjawiska Comptona z wyszczególnionymi kątami rozpraszania fotonu i odrzutu elektronu [12].

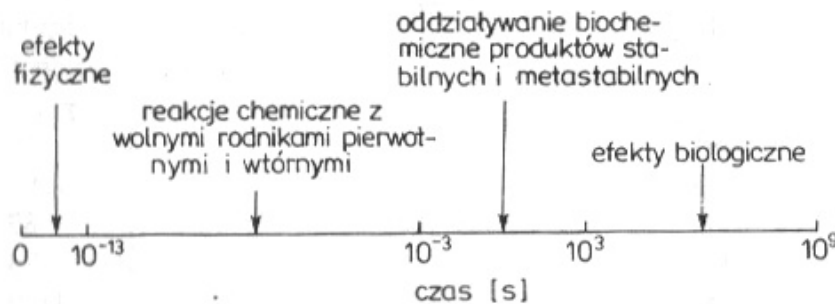


Rys. 4. Schemat zjawiska Comptona

Trzecim istotnym oddziaływaniem promieniowania fotonowego z materią jest zjawisko powstawania pary negaton–pozyton, które zostało omówione w poprzednim paragrafie.

Wpływ promieniowania jonizującego na materię ożywioną można rozpatrywać na poziomie molekularnym, komórkowym oraz organizmu żywego. Poziom molekularny dotyczy reakcji chemicznych, jakie zachodzą w wyniku oddziaływania promieniowania jonizującego, a dokładniej chodzi o zjawisko radiolizy wody, które ma wpływ na zmiany w strukturach DNA komórki. Poziom komórkowy dotyczy procesów przemian komórki organizmu, która została poddana napromienieniu. Poziom organizmu z kolei rozpatruje skutki, jakie wywołało w organizmie promieniowanie tuż po oddziaływaniu, jak i w dużym odstępie czasowym od napromienienia. Wszystkie powyższe oddziaływania i ich skutki mają miejsce w pewnych odstępach czasowych i następują w ściśle określonej kolejności po napromienieniu ośrodka, zaczynając od efektów fizycznych, a na efektach biologicznych kończąc. Schemat kolejności zachodzenia poszczególnych efektów jest przedstawiony na rysunku 5. Wśród skutków biologicznych występujących w wyniku napromienienia organizmu wyróżnia się skutki stochastyczne oraz deterministyczne. Pierwsze z nich zachodzą z pewnym prawdopodobieństwem, co oznacza, że nie muszą w ogóle występować. Prawdopodobieństwo ich wystąpienia zależy od wielkości dawki pochłoniętej w tkankach. Do skutków stochastycznych zalicza się choroby nowotworowe oraz dziedziczne zmiany genetyczne. Dodatkowo należy wspomnieć o braku progu otrzymania dawki, poniżej której skutki stochastyczne nie występują w ogóle. Skutki deterministyczne dotyczą chorób popromiennych, wypa-

dania włosów, zaćmy. W przeciwieństwie do skutków stochastycznych, w skutkach deterministycznych stopień nasilenia się objawów po napromienieniu jest proporcjonalny do dawki otrzymanej przez organizm. Skutki deterministyczne charakteryzują się brakiem ich dziedziczenia przez potomstwo osoby napromienionej.



Rys. 5. Sekwencja czasowa efektów zachodzących w wyniku pochłonięcia energii promieniowania

Taki sam efekt biologiczny mogą wytworzyć w organizmie różne rodzaje promieniowania jonizującego o różnych dawkach. Ma to ścisły związek z gęstością jonizacji ośrodka przez różne rodzaje promieniowania i liniowym przekazywaniem energii przez poszczególne wiązki na jednostkę długości drogi. W celu wyznaczenia różnic pomiędzy poszczególnymi rodzajami promieniowania, wywołującymi dany efekt biologiczny wprowadzono współczynnik zwany *względna skutecznością biologiczną*, która jest ilorazem dawki podanej przez źródło odniesienia (promieniowanie X lampy rentgenowskiej o napięciu 250 kV), wywołującej rozpatrywany efekt do dawki podanej przez źródło badane, które również wywoła ten sam efekt [3, 4].

$$WSB = \frac{\text{dawka promieniowania } X(250kV) \text{ wywołująca efekt } F}{\text{dawka innego promieniowania wywołująca efekt } F}$$

Wielkości i jednostki miary promieniowania jonizującego

Dla wszelkiego rodzaju promieniowania jonizującego oraz substancji pochłaniającej wielkością opisującą energię zaabsorbowaną w tej substancji jest dawka pochłonięta. Ścisłe definiuje się ją jako ilość średniej energii pochłoniętej przez dany element masy ośrodka, co można zapisać:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (14)$$

gdzie ΔE oznacza średnią energię zaabsorbowaną w masie Δm . Jednostką dawki pochłoniętej jest grej – 1 Gy. Często stosuje się jednak wielkość dwa rzędy wielkości mniejszą, czyli 1 cGy = 0,01 Gy. Inną jednostką dawki, pochłoniętej jest 1 rad, który równy jest dawce 1 cGy. Istnieje też pojęcie mocy dawki rozumiane jako rozkład dawki w czasie. Jednostką jest w tym przypadku 1 cGy/min. W celu opisanie skutków biologicznych promieniowania jonizującego stosuje się jednostkę zwaną siwertem, którą oznacza się 1 Sv.

Dla promieniowania jonizującego w sposób pośredni, czyli promieniowania fotonowego oraz neutronowego, stosuje się wielkość zwaną kerma, którą definiuje się jako sumę energii kinetycznych cząstek naładowanych wytworzonych w wyniku oddziaływania promieniowania jonizującego pośrednio z materią. Kerma można przedstawić za pomocą następującej zależności:

$$K = \frac{\Delta E_{tr}}{\Delta m} \quad (15)$$

gdzie ΔE_{tr} oznacza energię wszystkich cząstek naładowanych wytworzonych w jednostce masy ośrodka. Wielkością ściśle związaną z dawką pochłoniętą oraz kermą jest ekspozycja promieniowania. Dotyczy ona promieniowania fotonowego i oznacza ilość par jonów, jaka zostanie wytworzona w jednostce masy powietrza przez foton promieniowania jonizującego. Zjawisko to można przedstawić za pomocą równania:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad (16)$$

W powyższym równaniu ΔQ jest ilością jonów jednego znaku wytworzonych w elemencie masy powietrza. Jednostką ekspozycji jest 1 C/kg. W zastosowaniu jest również jednostka zwana rentgenem. Pomiędzy rentgenem a jednostką ekspozycji w SI zachodzi związek: $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$. Należy dodać, że ekspozycja dotyczy elektronów powstałych w wyniku oddziaływania fotonów z materią. Całkowita energia elektronów wtórnych zostaje pochłonięta w jednostce masy powietrza. Dawkę pochłoniętą można wyznaczyć dzięki określeniu liczby par jonów wytworzonych w jednostce masy powietrza, czyli ekspozycji. Na wytworzenie jednej pary jonów w powietrzu potrzebna jest następująca ilość energii przypadającej na jednostkowy ładunek: $W/e = 33.97 J/C$, gdzie W oznacza pracę wyjścia elektronu. Dzięki temu można wyznaczyć zależność między dawką pochłoniętą a ekspozycją, która wygląda następująco: $D_{pow} = X W/e$. Dla jednostkowej ekspozycji 1R dawka pochłonięta w powietrzu

wynosi: $D_{pow} = 0.876 \text{ CGy}$, więc dla dowolnej wartości ekspozycji oznaczonej N dawkę pochłoniętą w powietrzu można zapisać jako: $D_{powe} = 0.876N \text{ CGy}$. Dla promieniowania γ dawka pochłonięta w powietrzu maleje wraz z odległością od źródła promieniotwórczego: $D = \Gamma_{\gamma} A / l^2$, gdzie Γ_{γ} jest równoważną wartością stałej ekspozycyjnej, t czasem ekspozycji, l odległością od źródła, natomiast A oznacza aktywność źródła promieniotwórczego, którą definiuje się jako ilość rozpadów promieniotwórczych w jednostce czasu. Jednostką miary aktywności jest bekerel – 1 Bq [4,12,13].

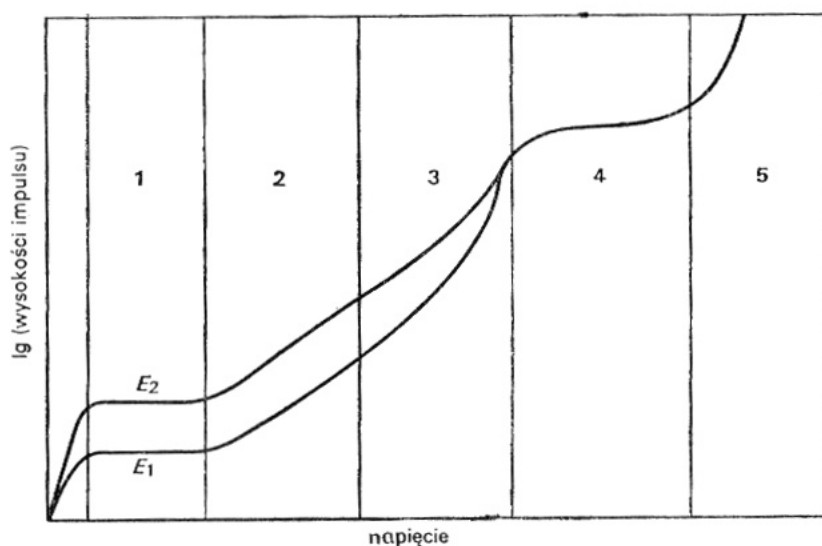
Detektory promieniowania jonizującego

W celu wykrycia obecności promieniowania jonizującego stosuje się różnego typu układy pomiarowe, których działanie oparte jest na oddziaływaniu promieniowania z materią. W dozymetrii promieniowania jonizującego wykorzystuje się kilka metod, wśród których największe znaczenie mają metody: jonizacyjna, fotograficzna oraz luminescencyjna. W metodzie jonizacyjnej dokonuje się pomiaru liczby jonów powstałych w wyniku działania promieniowania. Metoda fotograficzna, będąca jedną z pierwszych metod, stosuje pomiar zaczernienia błony fotograficznej, co umożliwia zbadanie gęstości promieniowania. Wreszcie metoda luminescencyjna umożliwia zachowanie i odtworzenie informacji o ilości energii promieniowania, jaką napromieniony został materiał wykorzystywany jako detektor.

Głównym podziałem detektorów promieniowania jonizującego jest podział na detektory śladowe oraz liczniki promieniowania. Detektory śladowe umożliwiają prześledzenie toru przelotu cząstki naładowanej przez układ i określenie rodzaju cząstki na podstawie rozmiarów i kształtu toru przelotu. Do detektorów śladowych zalicza się emulsje jądrowe, komory mgłowe, pęcherzykowe i komory iskrowe [12]. Liczniki promieniowania jonizującego są stosowane do określania stopnia zagrożenia promieniowaniem i wchodzi w skład urządzeń zwanych przyrządami dozymetrycznymi. W licznikach możliwe jest zarejestrowanie przejścia cząstki bez możliwości prześledzenia jej toru przelotu. Liczniki można podzielić na jonizacyjne, półprzewodnikowe oraz scyntylicyjne.

Liczniki jonizacyjne wykorzystują do detekcji właściwość jonizacji gazu umieszczonego między okładkami kondensatora. W wyniku przejścia cząstki promieniowania jonizującego przez licznik następuje wzrost napięcia na kondensatorze. Ponieważ jonizacja dotyczy pary jonów wytworzonej pomiędzy okładkami, zatem całkowity impuls napięcia jest sumą impulsów pochodzących od każdego z jonów. Na rys. 6 przedstawiony jest wykres zależności wysokości impulsu od przyłożonego napięcia [12]. Na wykresie przedstawione zostały poszczególne obszary pracy licznika jonizacyjnego, ponumerowane od 1 do 5.

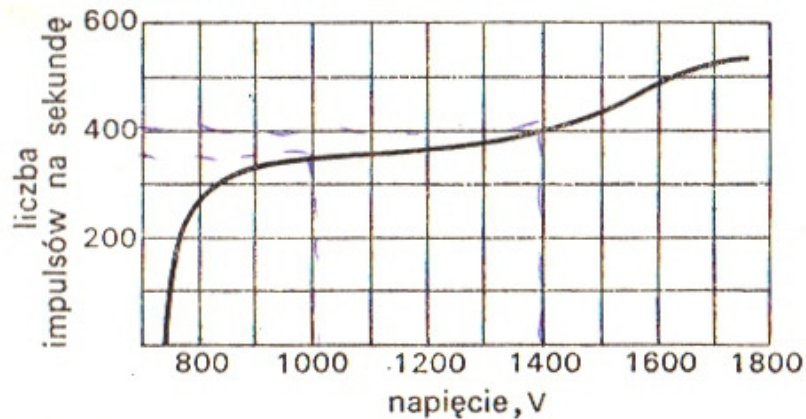
Obszar pierwszy jest obszarem pracy komory jonizacyjnej, która służy głównie do rejestracji cząstek silnie jonizujących. Drugi obszar dotyczy pracy licznika proporcjonalnego, w którym osiąga się dość duże impulsy napięcia ze względu na jonizację wtórną gazu pomiędzy okładkami przez elektrony wytworzone w wyniku przejścia cząstki.



Rys. 6. Zakres pracy licznika jonizacyjnego

Licznik proporcjonalny umożliwia detekcję cząstek naładowanych. W trzecim obszarze nie stosuje się żadnych detektorów, ponieważ wzmocnienie gazowe występujące w licznikach nie jest stałe, jak ma to miejsce w licznikach proporcjonalnych. Czwarty obszar dotyczy pracy licznika Geigera-Mullera, który jest najbardziej rozpowszechnionym rodzajem licznika jonizacyjnego. Konstruuje się je w postaci cylindrycznych baniek szklanych z cylindryczną katodą i anodą, którą stanowi cienki drucik, umieszczony w osi głównej cylindra. W liczniku tym wyładowanie wtórne powstaje w sposób lawinowy, więc wysokość wytworzonego impulsu nie zależy od energii cząstki. Wyładowanie powstające w liczniku Geigera-Mullera może trwać przez długi czas na skutek wtórnych aktów jonizacji, dlatego też stosuje się specjalne układy do wygaszania wyładowania jonizacyjnego. Do takich układów należą układy elektroniczne obniżające impuls napięcia na liczniku oraz domieszki gazów wieloatomowych dodawanych do głównego medium, jakim jest gaz szlachetny, które ograniczają ilość powstających jonów w liczniku. Charakterystycznym parametrem licznika Geigera-Mullera jest czas martwy, w trakcie którego licznik nie jest w stanie zarejestrować nowej cząstki przechodzącej przez licznik. Dzieje się tak na skutek powstawania wokół anody warstwy jonów, obniżającej natężenie pola elek-

trycznego poniżej wartości wywołującej akty jonizacji w gazie. Licznik ten obok detekcji cząstek naładowanych nadaje się również do rejestrowania promieniowania γ . Jako punkt pracy licznika Geigera-Mullera wybiera się obszar tak zwanego plateau geigerowskiego, który przedstawiony jest na rys. 7.



Rys.7. Obszar pracy licznika Geigera-Mullera

Piąty obszar jest obszarem wyładowania ciągłego i nie buduje się w tym zakresie napięć detektorów ze względu na możliwe uszkodzenia układu pomiarowego [12].

Liczniki scyntylacyjne są grupą detektorów promieniowania jonizującego, które wykorzystują do rejestracji cząstek zjawisko fluorescencji, mającego miejsce na skutek oddziaływania cząstek przechodzących przez scyntylator z powłokami elektronowymi materiału scyntylatora. W wyniku wzbudzenia scyntylatora następuje promieniste przejście elektronów do stanu podstawowego. Czas trwania scyntylacji jest dość krótki, a foton w ten sposób powstały zawiera informacje o energii cząstki i przenosi ją na układ przetwarzający tę informację na impuls elektryczny. Układ ten, zwany fotopowielaczem, składa się z szeregu elektrod zwanych dynodami, pomiędzy którymi dochodzi do wzmocnienia impulsu napięciowego. Na skutek fotoelektrycznego efektu oddziaływania fotonu z katodą fotopowielacza, ma miejsce generacja elektronu swobodnego, który następnie zostaje powielony na kolejnych dynodach. Końcowy impuls na wyjściu fotopowielacza jest jeszcze odpowiednio wzmacniany przez układy elektroniczne. Schemat budowy spektrometru scyntylacyjnego pokazano na rys. 8. Licznik scyntylacyjny nadaje się do detekcji zarówno promieniowania fotonowego, jak i cząstek naładowanych i rodzaj rejestrowanego promieniowania zależy od rodzaju zastosowanego materiału scyntylatora [12, 13].



Rys. 8. Schemat blokowy licznika scyntylacyjnego

Przykłady przyrządów dozymetrycznych

Wszystkie urządzenia oparte na detektorach promieniowania jonizującego, które służą do wykrywania i pomiaru jego parametrów nazywa się ogółem przyrządami dozymetrycznymi. Przyrządy dozymetryczne mogą być zarówno pasywne, jak i aktywne. Pasywne przyrządy nie mają możliwości wykrycia obecności promieniowania jonizującego, natomiast przyrządy aktywne mogą zarówno zasygnalizować obecność cząstek jonizujących, jak i zmierzyć, ile energii przekazują otoczeniu. Większość dozymetrów aktywnych jest wyposażona w liczniki Geigera-Mullera oraz liczniki scyntylacyjne, chociaż zdarzają się również liczniki oparte na komorze jonizacyjnej.

Firma Polon-Ekolab produkuje dozymetry w dużej mierze oparte na licznikach Geigera-Mullera. Przykładowym wykorzystaniem licznika G-M jest Monitor Skażeń Radioaktywnych EKO-C [5] przedstawiony na rys. 9. Przyrząd ten służy, jak sama nazwa wskazuje, do wykrywania skażeń radioaktywnych i pomiaru ich aktywności powierzchniowej. Za pomocą przyrządu można wykryć źródła α , β , γ i X promieniotwórcze. Przyrząd mierzy moc dawki γ i X w zakresie 0,01–1000 $\mu\text{S/h}$, skażenia powierzchniowe emiterami α w zakresie 0,1–10 000 Bq/cm^2 oraz podaje ilość zliczeń α , β w zakresie 0,1 do 10 000 cps.



Rys. 9. Monitor Skażeń Radioaktywnych EKO-C produkcji Polon-Ekolab

Zakres energetyczny mierzonego promieniowania jonizującego jest różny dla różnych rodzajów promieniowania i wynosi dla promieniowania α powyżej 4 MeV, dla promieniowania β powyżej 100 keV oraz dla promieni fotonowych X i γ od 50 keV do 1,5 MeV. Pomiar przy użyciu EKO-C jest obarczony błędem podstawowym, który wynosi dla promieniowania α i β mniej niż $\pm 50\%$, natomiast dla promieniowania X i γ $\pm 15\%$. Jak podaje producent przyrządu, EKO-C może być stosowany do kontroli osłon przed promieniowaniem X i γ , a także do kontroli powierzchniowych skażeń radioaktywnych nuklidami α , β , γ . Zestaw może być rozszerzony o sondę scyntylacyjną SSA-1p, która umożliwia 10-krotnie dokładniejszy pomiar promieni α .

Innym zastosowaniem licznika G-M jest Radiometr Cyfrowy EKO-D [6], który służy jako przyrząd umożliwiający wykrycie oraz pomiar dawki i mocy dawki promieniowania (rys.10). Dodatkową funkcją przyrządu jest możliwość ustawienia progu dawki i mocy dawki, po przekroczeniu którego uruchomiony zostaje alarm. Radiometr służy do pomiaru parametrów promieniowania X i γ w zakresie energetycznym od 50 keV do 1,5 MeV. Zakres dla pomiaru dawki wynosi 0,1–9999 mrem $\pm 10\%$ oraz 0,01–99,99 mSv $\pm 10\%$. Zakres dla pomiaru mocy dawki zawiera się w przedziale 0,01–999,9 $\mu\text{Sv/h}$ $\pm 20\%$ oraz 0,001–99,99 mR/h. Radiometr EKO-D jest przyrządem kontrolno-pomiarowym i może służyć do wstępnego szacowania dawki ekspozycyjnej w miejscu pomiaru. Urządzenie ma możliwość podłączenia do komputera.



Rys. 10. Radiometr Cyfrowy EKO-D produkcji Polon-Ekolab

Dawkomierzem, w którym zastosowano funkcję sygnalizacji przekroczonego progu dawki jest również Dawkomierz Osobisty EKO-OD. Urządzenie służy zarówno do pomiaru mocy dawki, jak i stanowi sygnalizator przekroczenia dopuszczalnej dawki. Stosuje się go jako przyrząd do urzytku indywidualnego. Detektorem promieniowania jonizującego jest w tym przypadku licznik G-M przystosowany do pomiaru w zakresie energetycznym 0,06–1,5 MeV. Przy pomocy przyrządu można mierzyć indywidualny równoważnik dawki w zakresie 1–999 μSv z dokładnością $\pm 30\%$ oraz indywidualny równoważnik mocy dawki w zakresie 1–999 $\mu\text{Sv/h}$ również z dokładnością $\pm 30\%$. Dawkomierz jest zasilany ogniwem litowym o napięciu 3 V i może pracować przez okres 1 roku bez wymiany ogniwa. Dodatkowym atrybutem dawkomierza jest możliwość podłączenia do komputera, co umożliwia prowadzenie statystyk napromienienia pracowników. Przyrząd może znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie dochodzi do narażenia pracowników na działanie promieniowania jonizującego.

Jako dozymetr osobisty mogą być także stosowane produkty firmy Polimaster oznaczone numerami PM1703–MO1 oraz PM1703–MO2. Urządzenia są wyposażone w dwa rodzaje detektorów – licznik G-M oraz licznik scyntylicyjny ze scyntylatorem CsI(Tl). Dozymetr PM1703 został przedstawiony na rys. 11.



Rys. 11. Dozymetr elektroniczny PM1703 produkcji Polimaster

Dzięki takiemu rozwiązaniu przyrząd może mierzyć dawkę i moc dawki zarówno promieniowania korpuskularnego, jak i promieniowania gamma w przedziale energetycznym 0,033–3 MeV. Urządzenie mierzy moc dawki w zakresach 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ – 10 Sv/h (dawkomierz MO-1) oraz 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ – 0,01 mSv/h (MO-2). Podany przez producenta zakres mierzonych dawek dla produktu MO-1 wynosi 0,01 μSv – 9,99 Sv.

Przyrządami pomiarowymi opartymi na licznikach scyntylacyjnych są urządzenia produkowane przez Polon-Alfa [7]. Przyrządy tego producenta są zaopatrzone w sondy scyntylacyjne zewnętrzne i wewnętrzne. Radiometr RK-100 przedstawiony na rys.12 jest detektorem skażeń powierzchniowych nuklidami α , β , γ oraz przyrządem mierzącym wartość przestrzennego równoważnika dawki i mocy dawki promieniowania γ i X. Zakres pomiarowy mocy dawki pochłoniętej w powietrzu dla sondy wewnętrznej sięga 50 $\mu\text{Gy/h}$, natomiast mocy przestrzennego równoważnika dawki 50 μSv . Dawkę pochłoniętą w powietrzu można oszacować w zakresie 0,1 μGy – 10 Gy, a przestrzenny równoważnik dawki w zakresie 0,1 μSv – 10 Sv. Przy pomocy sondy zewnętrznej da się wyznaczyć skażenie powierzchniowe sięgające 10^4 Bq.



Rys. 12. Radiometr RK-100 z sondą zewnętrzną produkcji Polon-Alfa

Radiometr RK-100 może być stosowany między innymi do kontroli skuteczności osłon przed promieniowaniem jonizującym, sprawdzania szczelności źródeł promieniotwórczych czy wyznaczania granic terenu nadzorowanego, terenu kontrolowanego i stref awaryjnych.

Innym interesującym rozwiązaniem wprowadzonym przez Polon-Alfa jest monitor wielofunkcyjny PM1401K [6]. Przyrząd ten, przedstawiony na rys. 13, składa się z ręcznego monitora promieniowania oraz kieszonkowego komputera iPAQ. Zestaw ten jest przeznaczony do wykrywania i rozpoznawania źródeł promieniotwórczych na podstawie przetworzonych przez komputer

widm scyntylacyjnych promieniowania gamma. Dodatkowo przyrząd ten umożliwia pomiar skażenia powierzchni radionuklidami α , β . Możliwy jest także pomiar promieniowania neutronowego.



Rys. 13. Monitor wielofunkcyjny PM1401K produkcji Polon-Alfa

Jak podaje producent, urządzenie może być z powodzeniem stosowane przez służby Straży Granicznej w celu lokalizowania radioizotopów. Przyrząd składa się z trzech bloków, które charakteryzują się różnymi zakresami pomiarowymi. Blok BDG posiada trzy zakresy pomiarowe, odpowiednio dla promieniowania α , β i γ . Zakres przestrzennego równoważnika dawki promieniowania fotonowego wynosi $0,1-10^5 \mu\text{Sv/h}$. Dla promieniowania α , β są realizowane w tym bloku pomiary skażenia powierzchniowego w zakresach $15-10^5 \text{ min}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ dla promieniowania α oraz $6-10^5 \text{ min}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ dla promieniowania β . W bloku BDS rejestrowane jest promieniowanie fotonowe w zakresie energetycznym $0,06-3 \text{ MeV}$. Blok BDN służy do pomiaru emisji neutronów i charakteryzuje się częstością wskazywania impulsów w zakresie $0,04-999 \text{ s}^{-1}$.

Podsumowanie

Odkrycie i poznanie właściwości promieniowania jonizującego umożliwiło człowiekowi wykorzystanie źródła promieniowania i radioizotopów w wielu dziedzinach i gałęziach przemysłu, nauki i medycyny. Prowadzenie takiej działalności wymaga od użytkownika szczególnego dbania o ochronę środowiska naturalnego i zdrowia pracowników. Ustalone dawki graniczne i limity muszą być przestrzegane na każdym etapie pracy. Przy narażeniu zewnętrznym cele te mogą być realizowane poprzez następujące działania:

1. Zachowanie odpowiedniej odległości od źródła promieniowania. Jest to najprostsza metoda ograniczenia dawek otrzymywanych przez pracowników. Istotne jest tu również wykorzystywanie manipulatorów do przenoszenia źródeł.

2. Skracanie czasu przebywania w pobliżu źródła. Aby zachować tę zasadę, należy odpowiednio zorganizować czas pracy ze źródłami.
3. Stosowanie odpowiednich osłon; grubość i rodzaj materiału wykorzystanego na osłony zależy od rodzaju, natężenia i energii promieniowania jonizującego.

Przy narażeniu wewnętrznym stosujemy następujące zasady ochrony radiologicznej:

1. W pracy z otwartymi źródłami promieniotwórczymi kontrola eliminacji skażeń promieniotwórczych.
2. Stosowanie odzieży roboczej i środków ochrony osobistej. Bardzo istotnym elementem jest także przestrzeganie zasad BHP i regulaminów zakładów, pracowni, laboratoriów, w których stosowane są źródła promieniotwórcze.
3. Kontrola dozymetryczna dawek promieniowania i kontrola skażeń osobistych.

Analizując powyższe zasady, można stwierdzić, że ograniczanie narażenia od promieniowania jonizującego polega na: unikaniu zbędnych źródeł promieniowania, kontrolowaniu prowadzonej działalności związanej z narażeniem, planowaniu pracy pracowników w taki sposób, aby uzasadniały otrzymane dawki, oraz na przestrzeganiu przepisów dotyczących tzw. dawek granicznych. Ustalone dawki graniczne i limity muszą być przestrzegane na każdym etapie prac, począwszy od wytworzenia, transportu, użytkowania, powstania odpadów i postępowania z nimi. Ustanowione prawo ściśle określa warunki, w jakich odpady promieniotwórcze powinny być przechowywane w celu dalszego ich przerobu lub też składowane w specjalnie do tego przystosowanych jednostkach. W przypadku zużytych źródeł promieniotwórczych w postępowaniu z nimi preferuje się jak największe odzyskanie materiałów do ponownego użycia w celu zmniejszenia ilości odpadów. Ostatecznie jednak długożyciowe izotopy wymusiły opracowanie technik ich składowania w sposób zapewniający skuteczne odizolowanie od środowiska naturalnego i ludzi.

Literatura

- [1] Bøtter-Jensen L., McKeever S.W.S., Wintle A.G., *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*, Elsevier, Amsterdam, 2003.
- [2] Griffiths D.J., *Podstawy elektrodynamiki*, PWN, Warszawa, 2001.
- [3] Grodzieński D.E., *Radiobiologia*, PWN, Warszawa 1969.
- [4] Hrynkiewicz A., *Człowiek i promieniowanie jonizujące*, PWN, Warszawa 2001.
- [5] <http://www.polon-ekolab.com.pl/>.
- [6] <http://www.polon-alfa.pl/produkty/aparatura-dozymetryczna>.

- [7] http://WWW.emedcom.pl/dowland/oferta/dozymetry_elektroniczne/Folder%20DOZYMRTRY.pdf
- [8] Jaworski B., Dietłał A., Kurs fizyki, tom III, PWN, Warszawa, 1984.
- [9] Łobodziec W., Dozymetria promieniowania jonizującego w radioterapii, WUŚ, Katowice 1999.
- [10] Scharf W., Akceleratory cząstek naładowanych, PWN, Warszawa 1989.
- [11] Scharf W., Akceleratory biomedyczne, PWN, Warszawa 1994.
- [12] Strzałkowski A., Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN, Warszawa 1979.
- [13] Szczeniowski S., Fizyka doświadczalna, część VI, PWN, Warszawa 1974.
- [14] Szczeniowski S., Fizyka doświadczalna, część V, PWN, Warszawa 1973.

Jacek Filipecki, Kordian Chamerski, Edmund Golis, Małgorzata Hyla
Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie

DOSIMETRY APPARATUS USED IN RADIATION PROTECTION AT WORK WITH IONIZING RADIATION

Abstract

Ionizing radiation or X-rays and nuclear radiation, particularly gamma, alpha and beta, passing through matter causes the ionization and a devastating effects on living organisms. The risk assessment process resulting from occupational exposure to ionizing radiation, based on the system of radiological protection.

Radiation protection encompasses all activities and measures aimed at the prevention of human and environmental exposure to ionizing radiation. For this purpose, a system of instruments for detection and measurements of ionizing radiation is used. In this paper, we present the formation, characteristics and properties of ionizing radiation. Also describes the potential risks in workplaces where there is radiation and the construction, operation, and utilization of basic dosimetric equipment used in radiological protection.

Keywords: ionizing radiation, radiology, dosimetry.