

Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki

**Dozymetria i ochrona przed
promieniowaniem jonizującym: aspekty
fizyczne, techniczne, prawne i społeczne**

mgr inż. Filip A. Sala

Opracowanie zaliczeniowe z przedmiotu

"Metody i Technologie Jądrowe"

Uczelniana Oferta Dydaktyczna PW

Prowadzący: prof.dr hab. Jan Pluta

Warszawa, 10 stycznia 2009

Spis treści

1	Podstawowe informacje z dziedziny dozymetrii	5
1.1	Rodzaje promieniowania jonizującego	5
1.2	Zamknięte i otwarte źródła promieniowania	8
1.3	Wielkości dozymetryczne i ich jednostki	9
1.3.1	Aktywność źródła promieniotwórczego	9
1.3.2	Średnia dawka pochłonięta (ang. <i>Absorbed dose</i>)	9
1.3.3	Moc dawki	9
1.3.4	Dawka równoważna/Ekwiwalent dawki pochłoniętej (ang. <i>Dose equivalent</i>)	10
1.3.5	Naświetlenie/Ekspozycja (ang. <i>Exposure</i>)	10
1.3.6	Ekwiwalent dawki efektywnej (ang. <i>Effective dose equivalent</i>)	11
2	Ochrona przed promieniowaniem jonizującym	11
2.1	ALARA	11
2.2	Zwiększenie odległości	12
2.3	Ograniczenie czasu	14
2.4	Ostony	14
2.5	Źródła otwarte	15
3	Różne rodzaje pomiarów promieniowania jonizującego	16
3.1	Liczniki wypełnione gazem	16
3.1.1	Licznik Geigera-Müllera	17
3.1.2	Licznik proporcjonalny	18
3.1.3	Komora jonizacyjna	18
3.2	Liczniki scyntylacyjne	18
3.3	Liczniki półprzewodnikowe	19
4	Oddziaływanie promieniowania jonizacyjnego na organizmy żywe	20
5	Promieniowanie jonizujące a prawo polskie	22
A	Dodatek	23
A.1	Źródła promieniowania jonizującego	23

Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie przedstawia podstawowe zagadnienia z dziedziny dozymetrii oraz ochrony przed promieniowaniem jonizującym. Zaprezentowane zostały różne rodzaje promieniowania jonizującego, ich właściwości, a także wpływ na organizmy żywe. Opracowanie zawiera także omówienie różnych rodzajów pomiarów promieniowania jonizującego. Przedstawione zostały także najważniejsze polskie akty prawne dotyczące promieniowania jonizującego.

1 Podstawowe informacje z dziedziny dozymetrii

1.1 Rodzaje promieniowania jonizującego

Promieniowaniem jonizującym nazywa się ten rodzaj promieniowania, który może doprowadzić do wybicia elektronu bądź cząsteczki z materii i spowodować jej zjonizowanie. Wyróżniamy cztery rodzaje promieniowania jonizującego:

- promieniowanie alfa
- promieniowanie beta
- promieniowanie rentgenowskie i gamma
- promieniowanie neutronowe

Każdy rodzaj promieniowania ma inny charakter oraz inne właściwości.

Promieniowanie alfa (α) jest to promieniowanie powstałe w wyniku emisji jąder atomu helu (${}^4_2\text{He}$). Ogólny schemat tzw. rozpadu alfa wygląda następująco:

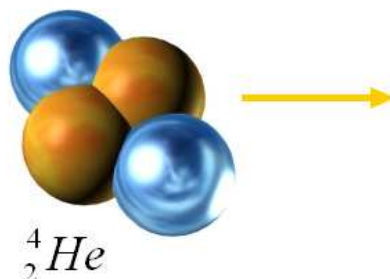


gdzie A - liczba masowa, Z - liczba atomowa. X - pierwiastek rozpadający się na drodze rozpadu alfa, Y - produkt rozpadu. Przykładem może być następujący rozpad:



Promieniowanie alfa jest słabo przenikliwe. Do jego zatrzymania wystarcza kilka kartek papieru.

promieniowanie alfa



Rysunek 1: Poglądowe przedstawienie promieniowania alfa

Promieniowanie beta (β) jest to promieniowanie powstałe w wyniku emisji elektronów (lub pozytonów czyli elektronów z ładunkiem dodatnim). Dlatego też rozróżniamy dwa rodzaje rozpadu beta:

- beta minus (β^-) polegający na zamianie neutronu w proton z jednoczesną emisją elektronu oraz antyneutrino elektronowego:



- beta plus (β^+) polegający na zamianie protonu w neutron z jednoczesną emisją pozytonu oraz neutrino elektronowego:



Promieniowanie beta jest nieco bardziej przenikliwe od promieniowania alfa, jednak do jego zatrzymania wystarczy na przykład stosunkowo cienki kawałek blachy aluminiowej.

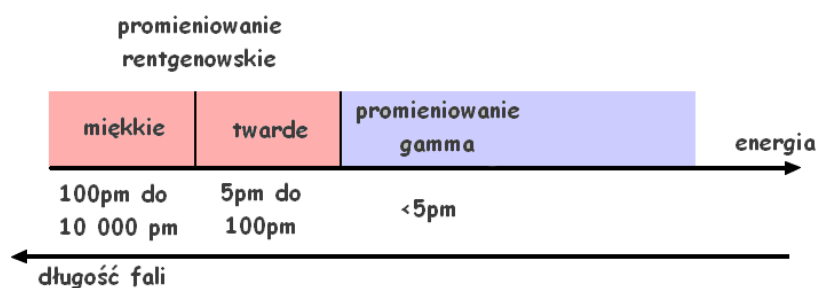
promieniowanie beta



Rysunek 2: Poglądowe przedstawienie promieniowania beta

Promieniowanie rentgenowskie i gamma Jest to wysokoenergetyczne promieniowanie elektromagnetyczne. W zależności od energii (długości fali) mówimy o miękkim bądź twardym promieniowaniu rentgenowskim, a dla jeszcze wyższych energii o promieniowaniu gamma (γ).

- promieniowanie gamma - poniżej 5pm
- twarde promieniowanie rentgenowskie - 5pm do 100pm
- miękkie promieniowanie rentgenowskie - 100pm do 10000 pm (10nm)



Rysunek 3: Podział promieniowania elektromagnetycznego ze względu na długość fali

Promieniowanie to jest bardzo przenikliwe, a do jego zatrzymania potrzebne są bardzo grube materiały, np. płyty ołowiane.

promieniowanie gamma



Rysunek 4: Poglądowe przedstawienie promieniowania elektromagnetycznego

Promieniowanie neutronowe to rozpędzone swobodne neutrony. Rozróżnia się neutrony:

- natychmiastowe - emitowane w wyniku spontanicznego rozszczepienia pierwiastków
- opóźnione - emitowane w wyniku zaindukowanego rozpadu promieniotwórczego.

Jest to promieniowanie bardzo przenikliwe. Do jego zatrzymania stosuje się grube warstwy betonu bądź bloków wodnych.

promieniowanie neutronowe

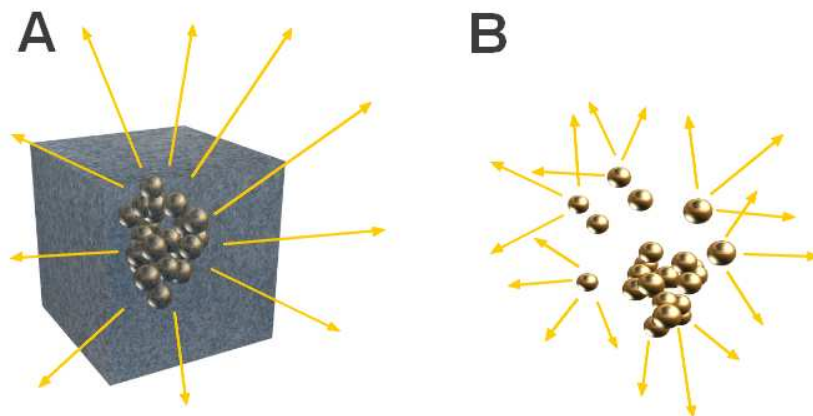


Rysunek 5: Poglądowe przedstawienie promieniowania neutronowego

1.2 Zamknięte i otwarte źródła promieniowania

Jeśli chodzi o źródła promieniowania to można je podzielić na źródła:

- zamknięte - gdy materiał promieniotwórczy jest zamknięty w materii niepromieniującej i nie może przedostać się do otoczenia.
- otwarte - gdy materiał promieniotwórczy (jego cząsteczki/atomy) mogą przedostać się do otoczenia.



Rysunek 6: Poglądowe przedstawienie źródła zamkniętego (A) oraz źródła otwartego (B)

Z punktu widzenia bezpieczeństwa dużo korzystniejsze jest wykorzystanie źródeł zamkniętych. Promieniowanie bowiem dociera do nas jedynie w momencie bezpośredniego kontaktu ze źródłem oraz co najważniejsze nie ma możliwości przedostania się materiału promieniotwórczego do organizmu.

1.3 Wielkości dozymetryczne i ich jednostki

1.3.1 Aktywność źródła promieniotwórczego

Aktywność źródła promieniotwórczego jest to ilość rozpadów zachodzących w jednostce czasu. W układzie SI jednostką aktywności jest **bekerelel (Bq)**:

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

Starszą używaną jednostką jest 1 **kiur (Ci)** i zdefiniowana jest jako:

$$1\text{Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \frac{\text{rozpadów}}{\text{s}}$$

Zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego aktywność źródła promieniotwórczego z czasem maleje i można opisać ją jako:

$$A = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

gdzie A - aktywność, N_0 - początkowa ilość atomów, λ - stała rozpadu promieniotwórczego.

1.3.2 Średnia dawka pochłonięta (ang. *Absorbed dose*)

Ilość energii pochłonięta przez napromieniowaną tkankę jest bardzo ważnym czynnikiem w ocenie ryzyka napromieniowania. Dawka pochłonięta określana jest jako ilość energii pochłoniętej przez daną masę tkanki. Tradycyjną jednostką jest **rad**:

$$1\text{rad} = \frac{100\text{erg}}{\text{g}}$$

Jednostka ta została zastąpiona w 1953 roku przez nowszą nazwaną **Gray (Gy)** uznaną za podstawową jednostkę w układzie SI:

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

Jednocześnie można zapisać:

$$1\text{Gy} = 100\text{rad}$$

1.3.3 Moc dawki

Moc dawki określona jest jako dawka pochłonięta w jednostce czasu.

$$\hat{P} = \frac{dD}{dt} \quad \left[\frac{\text{Gy}}{\text{s}}\right]$$

gdzie D - dawka pochłonięta

1.3.4 Dawka równoważna/Ekwiwalent dawki pochłoniętej (ang. *Dose equivalent*)

Różny rodzaj promieniowania (alfa, beta, gamma, promieniowanie rentgenowskie oraz neutrony) przy tych samych dawkach na jednostkę masy wywołują różne uszkodzenia tkanki. Dlatego też należy wprowadzić dawkę równoważną aby zniwelować te różnice. Podstawową jednostką jest 1 **rem** (ang. *Roentgen equivalent in man*) zdefiniowany jako:

$$1\text{rem} = 1\text{rad} \cdot Q$$

gdzie Q - czynnik skalujący zależny od rodzaju promieniowania (ang. *Quality factor*).

Rodzaj promieniowania	Q
Alfa	20
Neutrony	5-20 [2], 2-10 [1], 2.3-10 [3]
Beta	1
Gamma, rentgenowskie	1

Tabela 1: Czynnik skalujący Q [2]

Czynnik skalujący dla fotonów, elektronów oraz pozytonów przyjmuje się na poziomie 1, natomiast dla jąder helu 20. W przypadku neutronów w różnych źródłach podawane są różne informacje. Współczynnik Q dla neutronu silnie zależy od jego energii. Jednostką w układzie SI jest 1 **siwert (Sv)**:

$$1\text{Sv} = 1\text{Gy} \cdot Q$$

1.3.5 Naświetlenie/Ekspozycja (ang. *Exposure*)

Większość używanych do badania promieniowania jonizującego urządzeń nie mierzy dawki pochłoniętej przez tkankę tylko ilość par jonów wytworzonych w określonej objętości gazu. Jednostką określającą jonizację w gazie jest 1 **rentgen (R)** zdefiniowany jako:

$$1\text{R} = 2.58 \cdot 10^4 \frac{C}{\text{kg powietrza}}$$

Naświetlenie o wartości 1 rentgena odpowiada dawce pochłoniętej przez tkankę na poziomie 0.97 rad.

1.3.6 Ekwiwalent dawki efektywnej (ang. *Effective dose equivalent*)

Różne organy oraz tkanki różnie reagują na promieniowanie. Na przykład skóra jest dużo mniej czuła na promieniowanie niż jelita czy gonady. Dlatego też, w przypadku gdy ciało zostało naświetlone nierównomiernie wprowadza się ekwiwalent dawki efektywnej zdefiniowany jako:

$$H = \sum_i D_i \cdot w_i \quad (1.6)$$

gdzie H - ekwiwalent dawki efektywnej, D_i - ekwiwalent dawki pochłoniętej przez i -ty organ, w_i - współczynnik zależny od rodzaju napromieniowanego organu.

Tkanka	Współczynnik w_i
Gonady	0.25
Pierś	0.15
Czerwony szpik kostny	0.12
Płuco	0.12
Tarczyca	0.03
Powierzchnia skóry	0.03
Pozostałe	0.30
Całe ciało	1.00

Tabela 2: Współczynnik w_i [3]

2 Ochrona przed promieniowaniem jonizującym

Metody ochrony przed promieniowaniem jonizującym różnią się w zależności od rodzaju promieniowania oraz źródła. Istnieją jednak pewne podstawowe zasady dotyczące wszystkich rodzajów źródeł oraz rodzajów promieniowania. Bez względu na to czy źródło jest otwarte czy zamknięte i czy emituje promieniowanie alfa, beta, gamma czy neutronowe należy stosować poniższe zasady.

2.1 ALARA

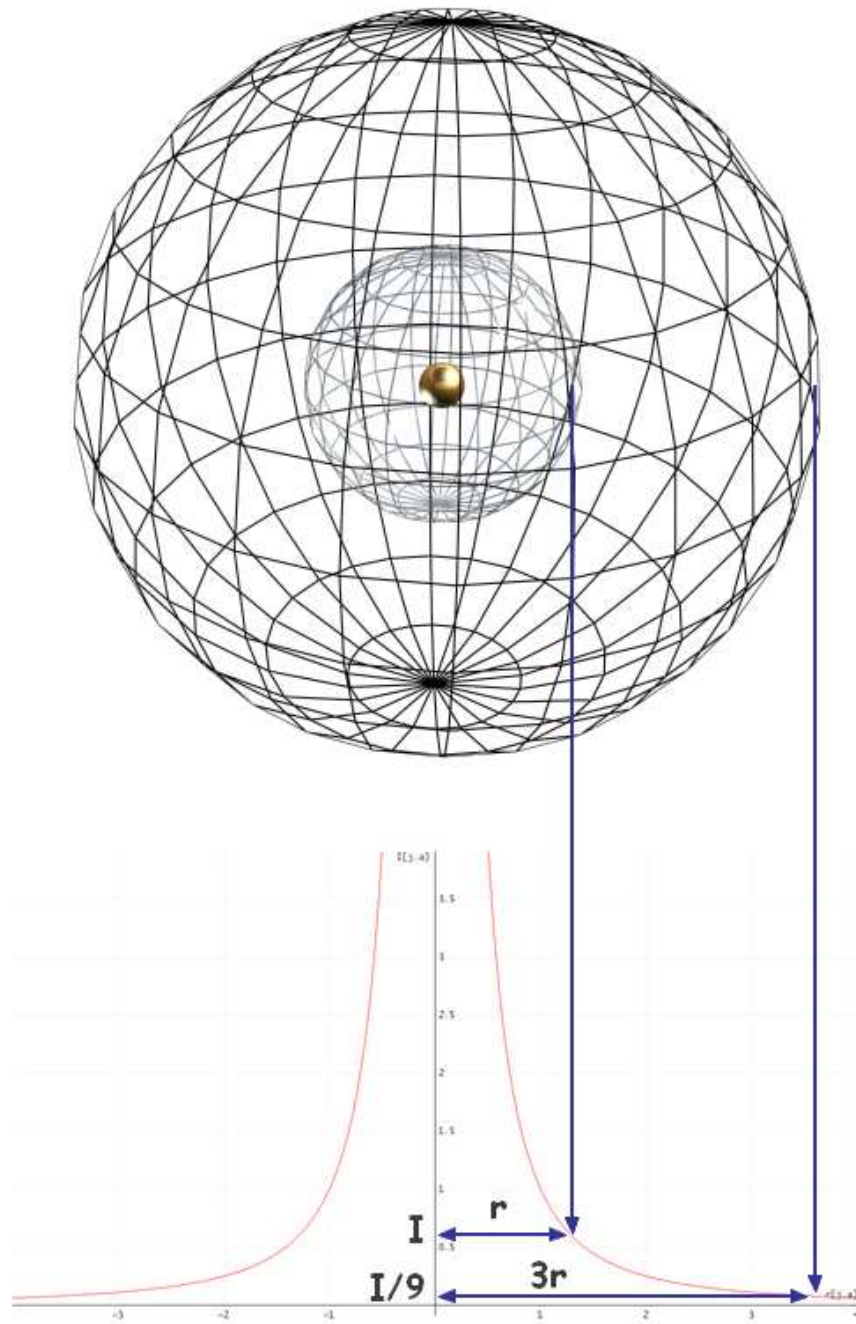
Podstawową zasadą jest ALARA (ang. *As Low As Reasonably Achievable*) oznacza, że wszystkie działania mają na celu ograniczenie kontaktu z materiałami promieniotwórczymi na tyle na ile tylko jest racjonalnie osiągalne.

As
Low
As
Reasonably
Achievable

Rysunek 7: ALARA

2.2 Zwiększenie odległości

Bez względu na to z jakim promieniowaniem mamy do czynienia, to zawsze jego moc maleje wraz z kwadratem odległości. Oznacza to, że jeżeli w odległości 1cm promieniowanie ma moc P to w odległości 100cm = 1m będzie ono miało moc $\frac{P}{10000}$. Zatem zachowanie odpowiednio dużej odległości jest bardzo dobrym sposobem ochrony przed promieniowaniem.



Rysunek 8: Moc dawki maleje wraz z kwadratem odległości od źródła

2.3 Ograniczenie czasu

Kolejną metodą ograniczenia otrzymanej dawki promieniowania jest ograniczenie czasu przebywania w pobliżu materiału promieniotwórczego.

$$D = \hat{P} \cdot t \quad (2.1)$$

gdzie D - dawka otrzymana, \hat{P} - moc dawki, t - czas

2.4 Osłony

Powyższe zasady dotyczyły wszystkich rodzajów promieniowanie, bez względu na ich charakter. Kolejną metodą ochrony przed promieniowaniem jonizującym jest stosowanie osłon. Jednak każdy rodzaj promieniowania wymaga dobrania odpowiedniej osłony, tak aby była ona najbardziej efektywna. W przypadku promieniowania alfa (α) wystarczy kilka kartek papieru, a przypadku beta (β) stosunkowo cienka płyta aluminiowa. Promieniowanie to bardzo łatwo zatrzymać. Inna sytuacja dotyczy promieniowania gamma (γ). Jest ono bardzo przenikliwe dlatego też do jego zatrzymania używa się osłon ołowionych. Wprowadza się parametr HVL (ang. *Half Value Layer*) który określa grubość warstwy (np. ołowiu) powodującej obniżenie energii promieniowania o połowę.

Energia [MeV]	grubość [cm]
0.3	0.160
0.5	0.396
1.0	0.816
1.5	1.174
2.0	1.358
2.5	1.443

Tabela 3: Wartości HVL dla ołowiu [1]

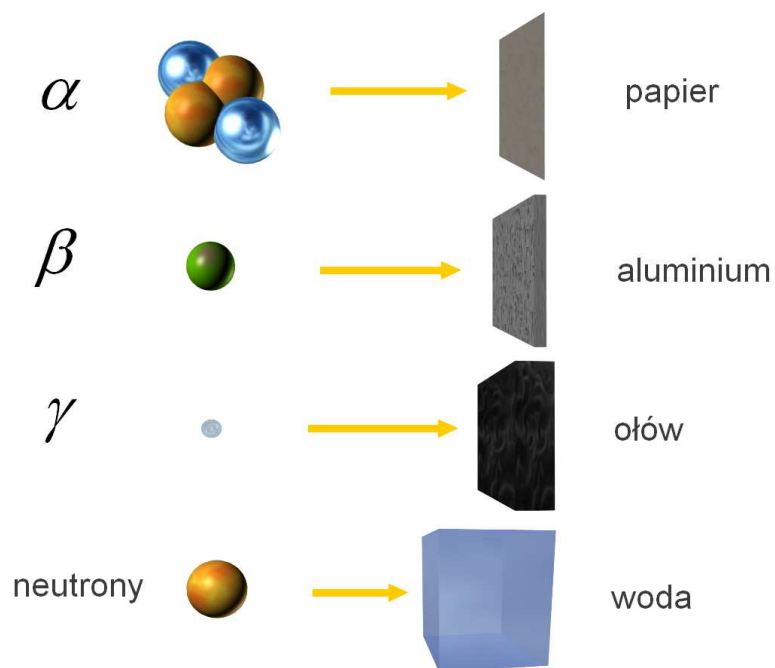
Można także wprowadzić współczynnik tłumienia (AF - ang. *Attenuation factor*) jako:

$$A_f = 0.5^{\frac{d}{HVL}} \quad (2.2)$$

gdzie d - grubość osłony, A_f - określa jaki ułamek promieniowanie pozostaje po przejściu przez osłonę. Jeżeli chcemy zatem ograniczyć promieniowanie do poziomu określonego przez A_f musimy umieścić następującą ilość warstw HVL danego materiału:

$$N_{HFL} = \frac{\log \frac{1}{A_f}}{\log 2} \quad (2.3)$$

Osłony ołowiowe nadają się zarówno do zatrzymywania promieniowania gamma, jak i alfa oraz beta. Jednak nie można stosować ich do zatrzymywania neutronów ponieważ neutron zderzający się z ciężkim jądrem osłony powoduje powstanie izotopów promieniotwórczych. Dlatego też do zatrzymania promieniowania neutronowego wykorzystuje się bloki wodne, parafinę bądź bloki betonowe. Neutrony zatrzymywane są na lekkich jądrach wodoru. W efekcie powstaje promieniowanie gamma, które trzeba zatrzymać dodatkowymi osłonami.



Rysunek 9: Różne rodzaje promieniowania oraz rodzaje osłon zdolnych je zatrzymać

2.5 Źródła otwarte

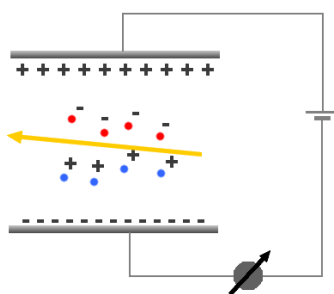
Kolejnym ważnym elementem ochrony przed promieniowaniem jonizującym w przypadku wykorzystanie źródeł w medycynie, przemyśle etc. jest zadbanie o ich szczelność. Promieniowanie alfa oraz beta jest słabo przenikliwe jednak w przypadku przedostania się do przewodu pokarmowego bądź dróg oddechowych może wywołać bardzo poważne uszkodzenia. Dlatego też należy zadbać o to aby wykorzystywane źródła były źródłami zamkniętymi.

3 Różne rodzaje pomiarów promieniowania jonizującego

Większość detektorów promieniowania jonizującego opiera się na bardzo prostej zasadzie. Promieniowanie jonizujące oddziałując z materiałem, z którego wykonany jest detektor, powoduje powstanie pary elektron-jon, która ulega separacji w polu elektrycznym. Następnie ilość ładunków jest zliczana i na jej podstawie określa się moc promieniowania jonizującego, które spowodowało jonizację ośrodka. Takie rozwiązanie ma jednak swoje pewne wady. Efektywność kwantowa (czyli zdolność detektora do rejestracji promieniowania jonizującego) nie jest nigdy równa 100%. Istnieją zawsze kwanty (bądź też elektrony czy jądra jak w przypadku promieniowania alfa) które przechodząc przed ośrodkiem nie spowodują w nim jonizacji przez co dla detektora pozostaną niezauważone. Kolejnym problemem jest detekcja promieniowania alfa, które jest na tyle słabo przenikliwe, że układ detekcyjny zamknięty wewnątrz obudowy (nawet plastikowej) nie jest w stanie go zarejestrować. Dlatego też stosuje się tzw. detektory okienkowe, w których występuje bezpośredni dostęp do samego detektora.

3.1 Liczniki wypełnione gazem

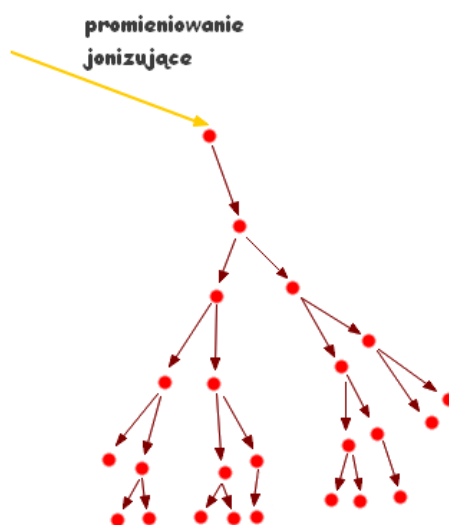
Bardzo powszechnym rodzajem detektora są liczniki wypełnione gazem. To właśnie gaz stanowi ośrodek, w którym zachodzi detekcja promieniowania jonizującego. Pole elektryczne przyłożone do elektrod powoduje rozsuniecie pary elektron-jon. Przyspieszony elektron oraz jon trafiają na przeciwległe elektrody. Odpowiedni układ mierzy powstały prąd elektryczny (mówimy wtedy o komorze prądowej (ang. *current chamber*) bądź komorze całkującej (ang. *integrating chamber*)) lub też zlicza poszczególne impulsy (ang. *pulse chamber*).



Rysunek 10: Poglądowe przedstawienie licznika gazowego. Na żółto oznaczono promieniowanie jonizujące, na czerwono elektrony, a na niebiesko dodatnie jony.

W przypadku gdy do elektrod podłączone jest stosunkowo niewielkie napięcie w ośrodku

następuje tylko jonizacja pierwotna. To znaczy promieniowanie jonizujące powoduje powstanie pary elektron-jon jednak energia kinetyczna powstałych produktów jest na tyle mała, że nie może spowodować kolejnej jonizacji. Produkty wędrują w stronę elektrod gdzie są zliczane. W przypadku większych napięć przyłożonych do elektrod może dojść do tzw. jonizacji wtórnej kiedy to elektron powstały w wyniku jonizacji gazu ma energię kinetyczną na tyle dużą aby spowodować kolejną jonizację gazu. Gdy proces taki powtarza się wielokrotnie dochodzi do powielenia elektronów zwanego wzmocnieniem gazowym (ang. *gas amplification*) bądź też lawiną Townsenda (ang. *Townsend avalanche*).



Rysunek 11: Poglądowe przedstawienie powielenia elektronów - lawina Townsenda

Do liczników wypełnionych gazem należą między innymi: licznik Geigera-Müllera, licznik proporcjonalny oraz komora jonizacyjna. Cechy charakterystyczne dla tych liczników zostały podane poniżej:

3.1.1 Licznik Geigera-Müllera

- liczba elektronów jest niezależna od napięcia na elektrodach
- identyfikacja rodzaju promieniowania jest niemożliwa
- dostarcza informacji jedynie o ilości cząstek
- dodatkowo jony gromadzące się przy jednej z elektrod powodują spadek napięcia (a tym samym natężenia pola)

- ograniczony czas działania z uwagi na degradację gazu
- duża czułość, możliwość detekcji słabego promieniowania
- prosty układ zliczający

3.1.2 Licznik proporcjonalny

- detekcja dowolnego rodzaju promieniowania (α, β, γ) oraz jego energii.
- wykorzystywanym gazem jest hel lub argon (α, β, γ) bądź trójfluorek boru (detekcja neutronów)
- powstawanie swobodnych elektronów na drodze jonizacji wtórnej, interakcji fotoelektrycznych oraz bombardowania elektrody przed dodatnio naładowane jony
- możliwość detekcji cząstek o niskich energiach ($<10\text{keV}$)
- ograniczony czas działania - degradacja gazu

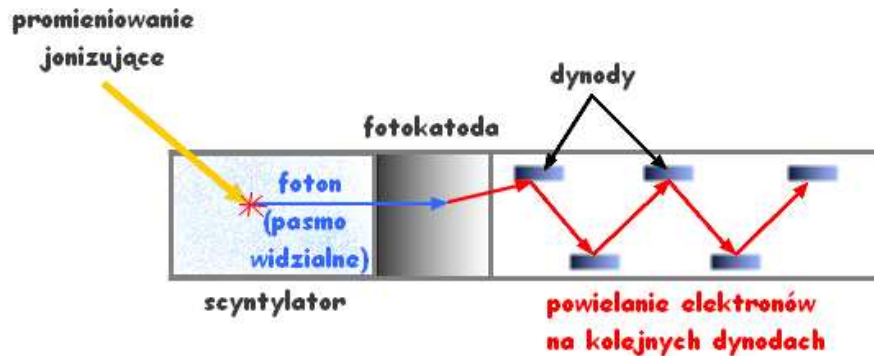
3.1.3 Komora jonizacyjna

- sygnał wyjściowy proporcjonalny do energii cząstki (identyfikacja energii oraz rodzaju cząstki)
- detekcja silnego promieniowania $>10\text{keV}$
- okienko dla cząstek alfa oraz beta
- wykorzystywanym ośrodkiem jest powietrze
- skonstruowana z równoległych płyt bądź z cylindra i umieszczonej wewnątrz elektrody
- możliwość detekcji neutronów

3.2 Liczniki scyntylicyjne

Licznik scyntylicyjny ze względu na budowę można podzielić na trzy części. Pierwszą z nich jest scyntylator, w którym padające promieniowanie jonizujące powoduje przejście elektronów do stanu wyższego, a następnie przy przejściu elektronów do stanu niższego następuje emisja fotonu z pasma światła widzialnego. Następnie foton ten trafia na fotokatodę powodując powstanie elektronów. Te zaś przyspieszane polem elektrycznym trafiają na kolejne dynody.

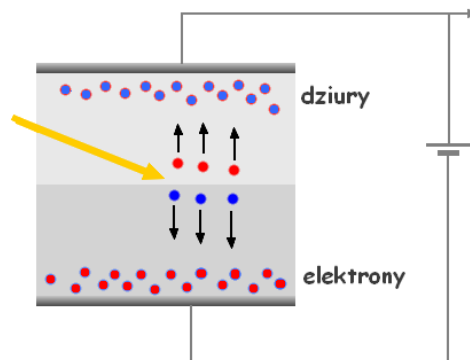
Na każdej z dynod następuje powielenie elektronów. Typowy układ składa się z 15 dynod. Wzmocnienie sygnału dochodzić do 10^6 razy (lub nawet więcej). Różnica potencjałów pomiędzy kolejnymi dynodami wynosi od 80 do 120 V.



Rysunek 12: Poglądowe przedstawienie licznika scyntylacyjnego

3.3 Liczniki półprzewodnikowe

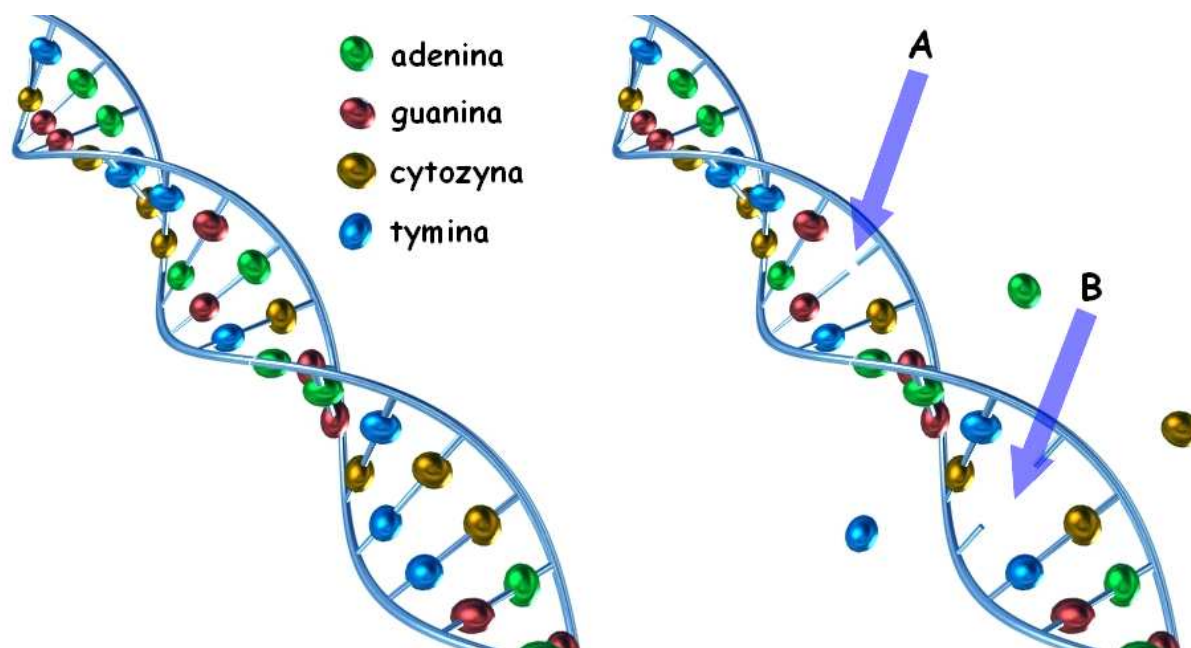
Liczniki półprzewodnikowe w swoim działaniu przypominają komory jonizacyjne. Różnica polega na tym, że nie powstają w nich pary elektron-jon, lecz pary elektron-dziura. Dużą zaletą liczników półprzewodnikowych jest ich duża dokładność oraz rozdzielczość energetyczna. Dzięki temu możliwe jest bardzo dokładne rozróżnienie energii cząstek.



Rysunek 13: Poglądowe przedstawienie licznika półprzewodnikowego

4 Oddziaływanie promieniowania jonizacyjnego na organizmy żywe

Na wstępie należy zwrócić uwagę na fakt iż każde promieniowanie, o czym była mowa już wcześniej, jest szkodliwe w innym stopniu. Promieniowanie alfa oraz beta ze względu na niewielką przenikliwość jest dużo mniej groźne niż promieniowanie gamma czy neutronowe. Należy jednak pamiętać, że przedostanie się do organizmu materiałów promieniotwórczych emitujących promieniowanie alfa bądź beta jest niebezpieczne dla zdrowia. Promieniowanie jonizujące w ogólności może oddziaływać na organizmy żywe bądź to bezpośrednio przez uszkodzanie komórek, bądź też przez tworzenie wolnych rodników np. H^+ oraz OH^- a następnie HO_2 oraz H_2O_2 , które to uszkodzają komórkę. Zarówno tkanki jak i narządy mogą funkcjonować po stracie nawet dużej ilości komórek. Uszkodzenie komórki, sprowadza się do uszkodzenia jej łańcucha DNA (kwasu dezoksyrybonukleinowego) zawartego w chromosomach. DNA składa się z dwóch nici skręconych w prawoskrętną helisę oraz zasad azotowych: adeniny (A) łączącej się zawsze z guaniną (G), oraz cytozyny (C) łączącej się z tyminą (T). Uszkodzenia wywołane promieniowaniem jonizującym mogą być różne. W ogólności może dojść do przerwania łańcucha bądź też wybicia jednej bądź dwóch naprzeciwległych zasad. Komórka może utracić zdolność do rozmnażania i zginąć, może jednak równie dobrze rozmnażać się z powstałym defektem co może doprowadzić do powstania nowotworu. Organizm ludzki ma jednak dobrze rozwinięty mechanizm naprawczy łańcucha DNA. Dziennie w naturalny sposób każda komórka doznaje blisko 1000 do 1000000 uszkodzeń, a mimo to nie stanowi to zagrożenia dla organizmu. Uszkodzone fragmenty DNA naprawiane są na podstawie drugiej (komplementarnej) nici bądź też na podstawie chromatydy. Naprawa jednak nie zawsze musi być poprawna. Problem pojawia się na przykład gdy uszkodzeń jest wiele (jak w przypadku oddziaływania silnego promieniowania) i ilość enzymów naprawczych jest niewystarczająca bądź też naprawa musi następować bardzo szybko. Zwiększa się wtedy prawdopodobieństwo wystąpienia błędu podczas naprawy. Kolejny problem pojawia się gdy uszkodzone zostają naprzeciw siebie obie nici DNA. W przypadku uszkodzenia jednej zasady możliwe jest dołączenie zasady komplementarnej na podstawie drugiej nici, jako że guanina zawsze łączy się z adeniną, a cytozyna z tyminą. W przypadku uszkodzenia obu zasad naprawa może prowadzić do błędów. W miejscach ubytków może dojść do insercji (czyli dodania przypadkowego łańcucha DNA), delecji (usunięcia fragmentu łańcucha DNA) bądź substytucji (podstawienia błędnej pary zasad azotowych).



Rysunek 14: Po lewej fragment nieuszkodzonego łańcucha DNA. Po prawej łańcuch DNA z uszkodzeniami. (A) ubytek pojedynczej zasady (mniej groźny) (B) ubytek obu zasad (groźniejszy)

Bardzo groźne jest naświetlenie organów, w których następuje szybkie rozmnażanie komórek jak w gonadach czy w jelitach (wyściółka jelit). Gdy dojdzie do uszkodzenia, komórki bardzo szybko powielają defekt. Największą natomiast wrażliwość na promieniowanie ma układ krwiotwórczy oraz szpik kostny. Dawki na poziomie 0.5 do 1.0 Sv powodują ich uszkodzenie. Pomimo wieloletnich często szeroko zakrojonych badań nie udało się ustalić jednoznacznie dawki bezpiecznej promieniowania. Swojego czasu przyjęto model liniowy, w którym ustalono, że każda dawka jest szkodliwa, a szkodliwość jedynie narasta liniowo wraz z przyjętą dawką. Przeprowadzane jednak badania nie wykazały bezpośrednio szkodliwości niskich dawek promieniowania. Badania porównawcze pomiędzy ludnością zamieszkującą obszary o przeciętnym oraz podwyższonym promieniowaniu tła nie dały jednoznacznych rezultatów. Przyjmuje się jednak, że najmniejsza dawka przy, której zauważalne dla zdrowia stają się skutki napromieniowania wynosi 200mSv. Choroby popromienne zaczynają występować przy dawkach 1000mSv (1Sv), natomiast dawka śmiertelna to 5Sv (jeżeli zostaje przyjęta w krótkim czasie - do godziny). Jednocześnie przyjmuje się, że taka sama dawka przyjęta w dłuższym okresie czasu jest mniej szkodliwa.

5 Promieniowanie jonizujące a prawo polskie

W prawie polskim o promieniowaniu jonizującym traktują między innymi następujące akty prawne:

- Rozporządzenie Ministra Zdrowia, z dnia 25 sierpnia 2005r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej. Dziennik Ustaw Nr 194, Poz. 1625
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 czerwca 1968r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy stosowaniu promieniowania jonizującego.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego.

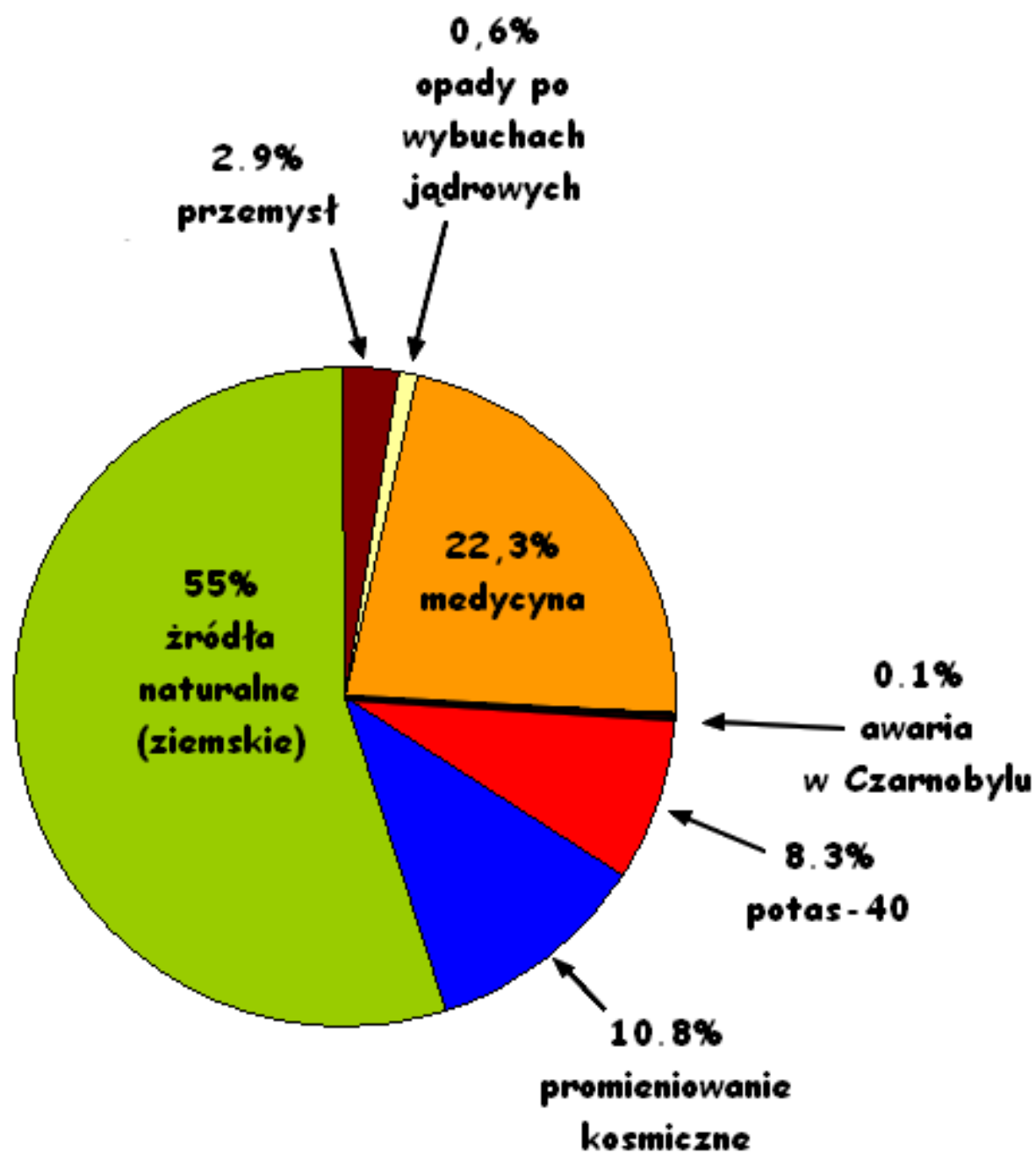
Z punktu widzenia ogółu ludności najistotniejsze wydaje się *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego*. Dawki graniczne jakie zostały ustalone są następujące:

- 1mSv/rok dla ogółu ludności
- 6mSv/rok dla uczniów, studentów i praktykantów w wieku od 16 do 18 lat
- 20mSv/rok dla pracowników oraz uczniów, studentów i praktykantów w wieku 18 lat i powyżej

Jednocześnie dawka promieniowania dla pracowników może zostać rozszerzona do 50mSv/rok pod warunkiem, że sumaryczna dawka promieniowania w ciągu następnych 5 lat nie przekroczy 100mSv. Tak samo dawka promieniowania dla ogółu ludności może zostać przekroczona pod warunkiem, że sumaryczna dawka promieniowania w ciągu następnych 5 lat nie przekroczy 5mSv. Ponadto kobieta od momentu powiadomienia kierownika jednostki organizacyjnej o ciąży nie może być zatrudniona na stanowisku gdzie mające się narodzić dziecko mogłoby przyjąć dawkę większą niż 1mSv. Wszystkie dawki podawane są z pominięciem promieniowania tła. Jeżeli promieniowanie tła jest nieznanne przyjmuje się je na poziomie 2.4mSv.

A Dodatek

A.1 Źródła promieniowania jonizującego



Rysunek 15: Rozkład dawki promieniowania w Polsce [13]

Źródła promieniowania	Dawka [mSv]	%
Naturalne źródła promieniowania:		
Radon z szeregu U	1,420	40,50
Radon z szeregu Th	0,080	2,30
Gleby i skały		
potas 40K	0,120	3,40
szereg uranowy U	0,130	3,70
szereg torowy Th	0,210	6,00
Ciało ludzkie:		
potas 40K	0,170	4,85
szereg uranowy U	0,055	1,57
szereg torowy Th	0,007	0,20
Inne	0,015	0,43
Pierwotne promieniowanie kosmiczne	0,380	10,84
Izotopy wytworzone przez promieniowanie kosmiczne	0,010	0,29
Źródła wytworzone przez człowieka :		
Badania radiologiczne	0,700	20,00
Medycyna jądrowa	0,080	2,30
Wyroby przemysłowe	0,100	2,90
Odpady promieniotwórcze	0,020	0,60
Awaria w Czarnobylu	0,005	0,14
Energetyka jądrowa	0,002	0,06
RAZEM	3,504	100,0

Tabela 4: Średnia dawka dla Polski w 1996 roku [13]

Miejsce pomiaru	Aktywność [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
Powietrze przy gruncie	10
Wietrzony pokój	40
Pokój zamknięty	80
Piwnica	400
Pieczara	10000
Odwierły o wysokiej aktywności	100000

Tabela 5: Aktywność radonu [14]

Źródło promieniowania	Średnia dawka roczna [mSv]
Naturalne źródła	2.4
Radon	1.2
Gamma	0.5
Kosmiczne	0.4
Wewnętrzne	0.3
Sztuczne źródła	0.4
Medyczne	0.4
Próby jądrowe	0.005
Czarnobyl	0.002
Energetyka jądrowa	0.0002
Wszystkie źródła	2.8

Tabela 6: Źródła promieniowanie [2]

Literatura

- [1] J. Bullock Radiation safety, Department of Environmental Health and Safety Materials, <http://www.safety.queensu.ca/> (2001)
- [2] E. B. Holmes, G. L. White Jr, D. K. Gaffney, Ionizing Radiation Exposure, *Medical Imaging eMedicine*, (Nov 13, 2008)
- [3] Arizona State University Office of Radiation Safety http://www.asu.edu/radiationsafety/x-ray/chap_4.html
- [4] M. Miglierini, Detectors of radiation, E. Wigner Course on Reactor Physics Experiments, (April 27 - May 15, 2004)
- [5] G. Charpak, R.L. Garwin *Błędne ogniki i grzyby atomowe*, WNT, Warszawa (1999)
- [6] pod redakcją K. Janickiego, Domowy poradnik medyczny, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa (2008)
- [7] Lodish H, Berk A, Matsudaira P, Kaiser CA, Krieger M, Scott MP, Zipursky SL, Darnell J., *Molecular Biology of the Cell*, p963. *WH Freeman*: New York, NY. 5th ed. (2004).
- [8] <http://www.if.pw.edu.pl/pluta/pl/dyd/mtj/wyklad/w4/segment1/main.htm>
- [9] Rozporządzenie Ministra Zdrowia, z dnia 25 sierpnia 2005r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej.
- [10] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 czerwca 1968r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy stosowaniu promieniowania jonizującego.
- [11] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego.
- [12] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego.
- [13] <http://www.ipj.gov.pl/pl/szkolenia/matedu/podstawy.htm>
- [14] G.Marx, *Atoms in our hands*, *Roland Eötvös Physical Society*, Budapest (1995), str. 51