

Dozymetria promieniowania X

Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego z dozymetrii dla studentów
specjalności Fizyka Medyczna i pokrewnych, WFiTJ AGH

Spis treści

1. Wprowadzenie	4
Wytwarzanie promieniowania X w lampach rentgenowskich	4
Widmo promieniowania X	6
Filtracja	7
Oddziaływanie promieniowania X z materią	8
Osłabianie promieniowania - warstwa półchłonna	9
Osłabianie promieniowania - osłony	9
Promieniowanie pierwotne, rozproszone, uboczne	11
Praktyczne obliczanie dawek - normy	11
Pomiary dawek promieniowania X	13
Literatura	13
2. Ćwiczenie część A, pomiary pierwotnego promieniowania X	14
3. Ćwiczenie część B, pomiary rozproszonego promieniowania X	16
4. Aparatura	19
4.1. Aparat rentgenowski	19
Zasady bezpiecznej pracy	21
4.2. Radiometr	22

Instrukcję opracowali i zmodyfikowali:

Paweł Jodłowski

Jerzy Ostachowicz

Tekst uaktualniony

KRAKÓW 1997

Uaktualniono ponownie w 2006 r (Jerzy Ostachowicz)

Dozymetria promieniowania X

Spis treści

1. Wprowadzenie	4
Wytwarzanie promieniowania X w lampach rentgenowskich	4
Widmo promieniowania X	6
Filtracja	7
Oddziaływanie promieniowania X z materia	8
Osłabianie promieniowania - warstwa półchłonna	9
Osłabianie promieniowania - osłony	8
Promieniowanie pierwotne, rozproszone, uboczne	11
Praktyczne obliczanie dawek - normy	11
Pomiary dawek promieniowania X	13
Literatura	13
2. Ćwiczenie część A, pomiary pierwotnego promieniowania X	14
3. Ćwiczenie część B, pomiary rozproszonego promieniowania X	16
4. Aparatura	19
4.1. Aparat rentgenowski	19
Zasady bezpiecznej pracy	21
4.2. Radiometr	22

Od autorów:

W oparciu o kilkuletnie doświadczenia dydaktyczne, zwłaszcza zaobserwowane trudności interpretacji wyników pomiarów przez ćwiczących, prowadzący zajęcia postanowił nieco rozszerzyć treść punktów 2 i 3 niniejszej instrukcji w porównaniu do wersji instrukcji do ćwiczenia obowiązującej w latach 1997-2004 i wersji dostępnej w sieci Wydziału w latach 2004-2006.

Jerzy Ostachowicz

1. WPROWADZENIE

Promieniowanie X odkryte w 1896 roku przez W.C.Roentgena znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, techniki i w medycynie. Może ono pochodzić bądź ze źródeł izotopowych (zastosowania techniczne), bądź z akceleratorów liniowych (terapia megawoltowa w medycynie), bądź z lamp rentgenowskich, które są najczęściej stosowanym źródłem promieniowania X. LAMPY są stosowane zarówno w technice (dyfraktometria, fluorescencja rentgenowska) jak i w medycynie (diagnostyka, terapia).

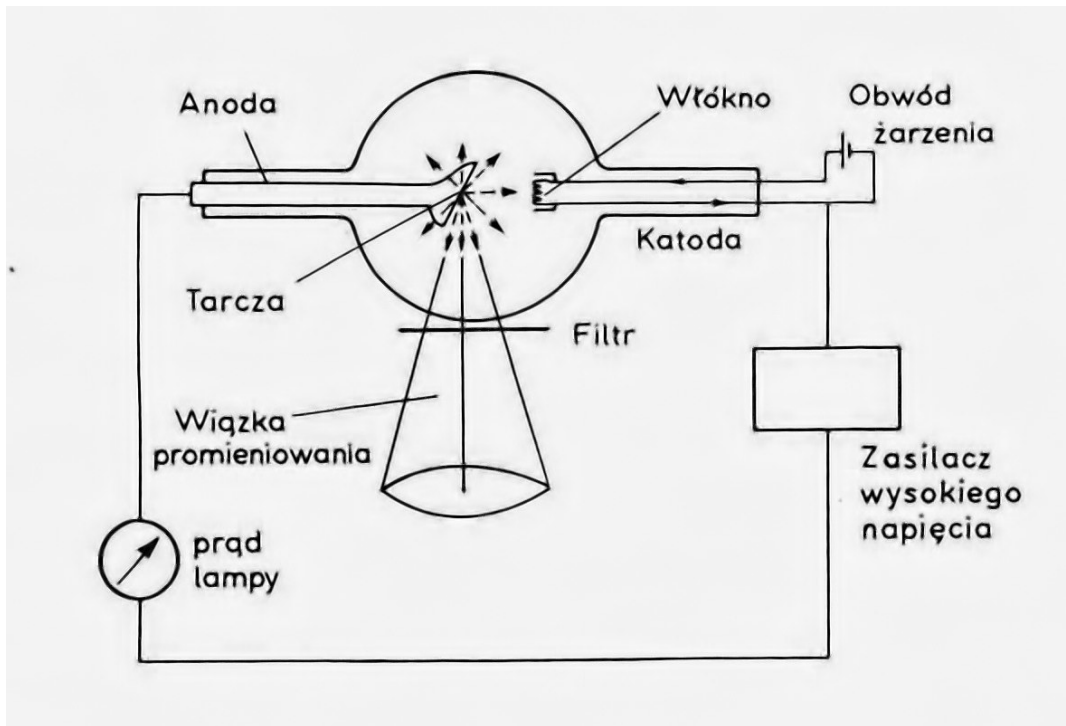
Wytwarzanie promieniowania X w lampach rentgenowskich

Promieniowanie X powstaje w czasie bombardowania tarczy przez wiązkę rozpędzonych elektronów. Klasyczna lampa rentgenowska składa się z katody i anody umieszczonych w szklanej obudowie, w której wytworzono próżnię (rys. 1). Elektrony wytworzone w procesie termoemisji przez rozżarzone do białości włókno katody są przyspieszane przez panującą w lampie różnicę potencjałów do energii od kilku do kilkuset keV a następnie uderzają w anodę-tarczę. W wyniku tego procesu następuje emisja promieniowania X oraz wydzielenie pewnych ilości ciepła.

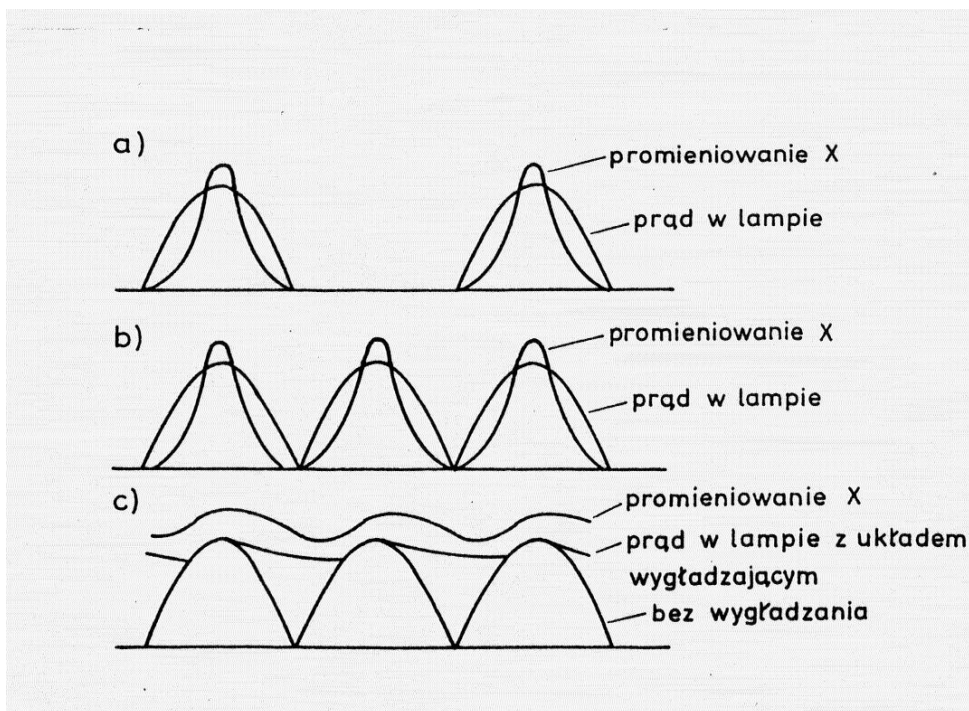
Aparaty rentgenowskie stosowane w medycynie [7] są zazwyczaj zasilane pochodzącym z transformatorów napięciem zmiennym o przebiegu sinusoidalnym i częstotliwości 50 Hz. W zależności od kształtu napięcia zasilającego natężenie promieniowania X może być pulsujące lub stałe. Rozróżniamy układy (rys. 2):

- półfalowe - lampa zasilana jest jedynie przez połowę okresu zmienności napięcia,
- pełnofalowe - dzięki prostowaniu dwupołówkowemu lampa zasilana jest w obu połówkach okresu zmienności napięcia,
- zasilane ze stabilizowanych zasilaczy stałego wysokiego napięcia - natężenie promieniowania X jest wówczas stałe w czasie.

Najbardziej rozpowszechnione w medycynie są lampy zasilane z zasilacza pełnofalowego, z wolframową anodą (energia promieniowania charakterystycznego K_{α} 59 keV), pracujące na napięciach zasilających do 200 kV.



Rys. 1. Lampa rentgenowska - schemat budowy [7].



Rys. 2. Prąd lampy i natężenie promieniowania X emitowanego z lampy dla różnych układów zasilania lamp rtg [7]:

a) układ półfalowy, b) układ pełnofalowy, c) układ pełnofalowy z wygładzaniem.

Widmo promieniowania X

Elektrony uderzając w anodę wytwarzają dwa rodzaje promieniowania:

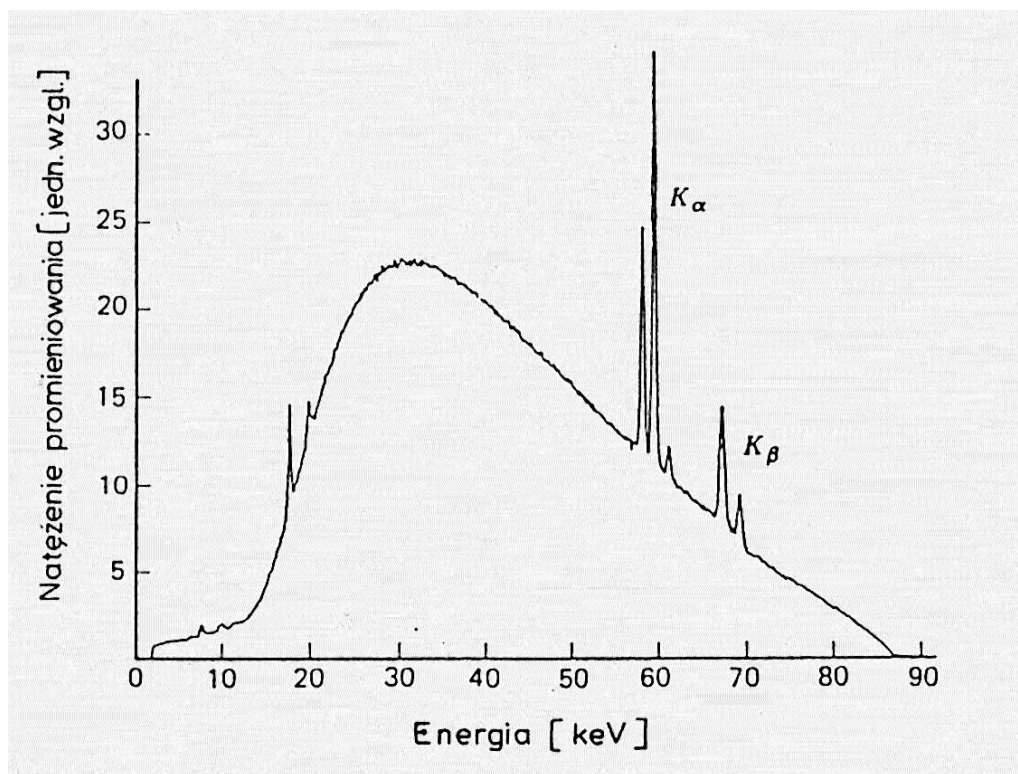
- promieniowanie hamowania (bremsstrahlung), emitowane przez elektrony hamowane w polu elektrostatycznym jądra i elektronów atomu; kwanty tego promieniowania mają różne energie, od bliskich zera aż do odpowiadających największej energii elektronu;
- promieniowanie charakterystyczne tarczy wytwarzane w wyniku emisji kwantów przez atomy anody wzbudzone poprzez rozprężone elektrony.

W efekcie widmo energetyczne promieniowania X lampy jest praktycznie widmem promieniowania hamowania (widmo ciągłe) z nałożonymi liniami charakterystycznymi tarczy (rys. 3).

Maksymalna energia kwantów X w widmie odpowiada wartości maksymalnej stosowanego napięcia znanej jako kVp (kilovoltage peak). Natomiast całkowite natężenie I [kwanty/s] emitowanego promieniowania jest zależne od wielu czynników, co można w przybliżeniu opisać wzorem

$$I \cong A \cdot Z \cdot i \cdot U^2$$

gdzie: A - stała zależna od konstrukcji lampy,
 Z - liczba atomowa materiału anody,
 i - prąd anodowy płynący przez lampę,
 U - napięcie na lampie.

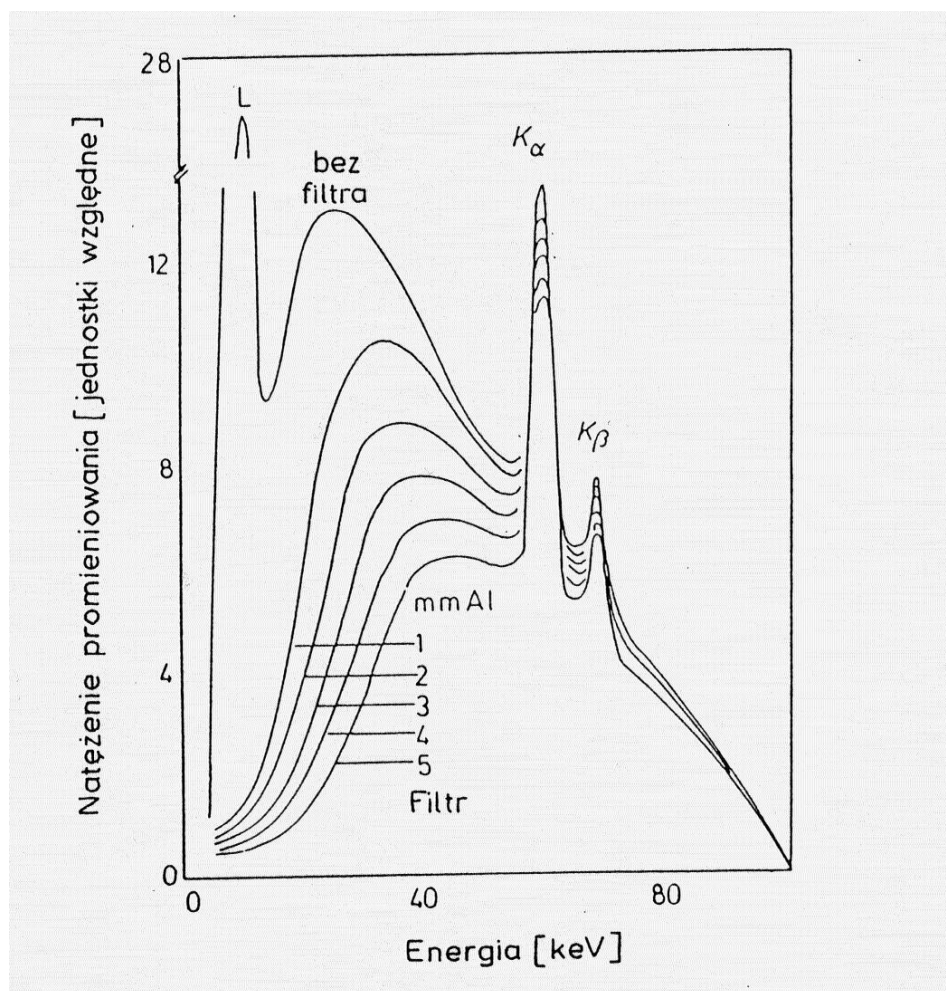


Rys. 3. Widmo promieniowania X emitowanego z lampy z anodą wolframową dla napięcia zasilającego 87 kVp. Praktycznie wszystkie kwanty o energii poniżej 12 keV oraz niektóre o energii pomiędzy 12 a 30 keV są absorbowane w szklanym okienku lampy (filtracja własna) [1].

Filtracja

Promieniowanie opuszcza lampę przez szklane lub berylowe okienko, które selektywnie osłabia składowe wiązki o najniższej energii, około kilku keV (tzw. filtracja własna lampy). Pomimo tego (por. rys. 3) znaczna część kwantów emitowanych przez lampę to kwanty o stosunkowo niskiej energii, które w zastosowaniach medycznych są najczęściej bezużyteczne a zwiększają dawkę otrzymywaną przez pacjenta. Te składowe widma mogą być selektywnie redukowane przez dodanie cienkiego filtra z materiału o małej liczbie atomowej np. z miedzi lub aluminium (filtracja pierwotna). Wpływ filtrów aluminiowych o różnych grubościach na kształt widma ilustruje rys. 4. W zastosowaniach medycznych typowa zalecana grubość filtra wynosi, w zależności od napięcia na lampie, od 0.5 do 5 mm Al [5,9].

Natężenie i dawka promieniowania X opuszczającego lampę maleje z kwadratem odległości od jej ogniska.



Rys. 4. Widmo promieniowania X z lampy rtg z anodą wolframową dla filtrów aluminiowych o różnych grubościach. Napięcie 100 kV, filtracja własna 1 mm Be [3].

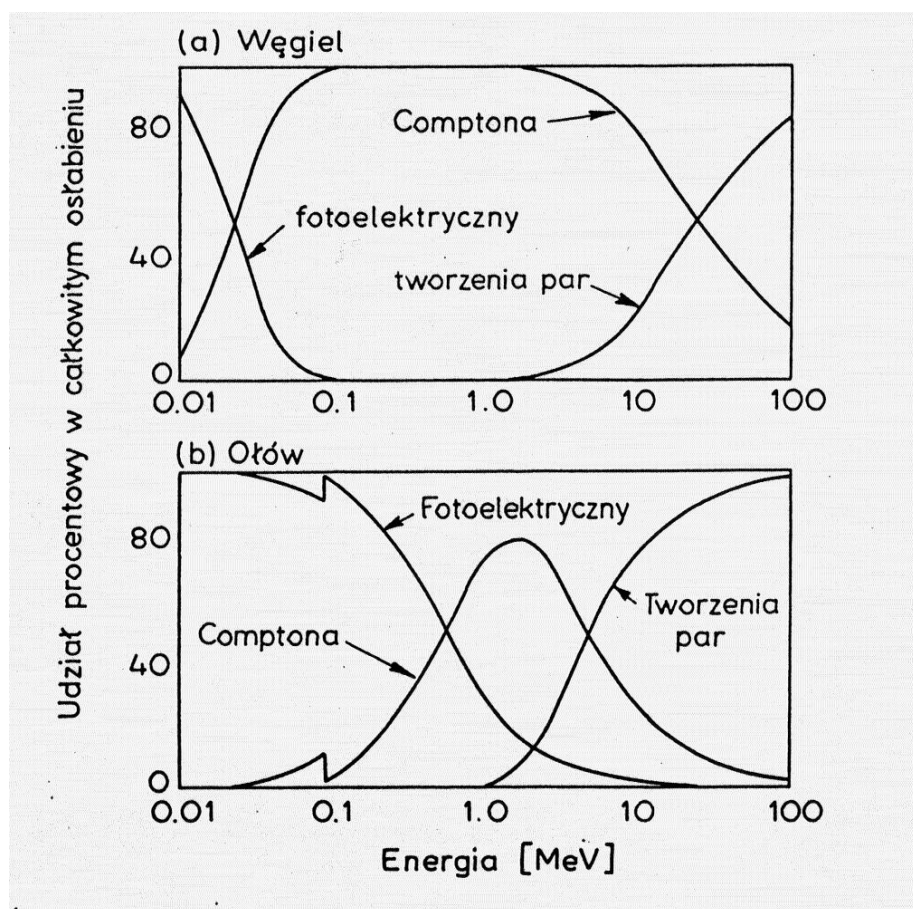
Oddziaływanie promieniowania X z materią

Wśród trzech podstawowych procesów oddziaływania fotonów z materią dla promieniowania X z lamp rtg praktyczne znaczenie mają tylko efekt fotoelektryczny i efekt Comptona. Udział tych procesów w osłabieniu promieniowania zależy między innymi od energii kwantów oraz liczby atomowej Z materiału. Rys. 5 ilustruje względne prawdopodobieństwo zajścia poszczególnych procesów dla materiału lekkiego (węgiel) i ciężkiego (ołów).

Widać, że dla materiałów o niskim Z efekt Comptona dominuje w zakresie od kilkudziesięciu keV do kilkudziesięciu MeV, a więc w praktyce w całym zakresie energii stosowanych w medycynie. Dla ołowiu natomiast do kilkuset keV dominuje efekt fotoelektryczny.

Rozpraszanie padających kwantów następuje przede wszystkim w wyniku efektu Comptona. Dla energii do kilkuset keV proces ten jest znacznie bardziej wydajny dla materiałów o niskim Z (por. rys. 5), stąd takie materiały (ciało ludzkie, aluminium) rozpraszają padające promieniowanie w większym stopniu niż materiały ciężkie (ołów).

Znając naturę procesów oddziaływania promieniowania X z materią i wartości odpowiednich współczynników osłabienia można wyznaczyć widmo i natężenie



Rys. 5. Względne prawdopodobieństwo zajścia różnych procesów oddziaływania promieniowania X z materią a) węgiel b) ołów [3].

promieniowania rozproszonego i promieniowania po przejściu przez absorbent. Wymaga to jednak, w szczególności dla promieniowania z lamp rentgenowskich skomplikowanych i żmudnych obliczeń. Wobec tego w praktyce dozymetrycznej stosuje się wielkości, które charakteryzują widmo, osłabienie i rozproszenie promieniowania X w materii w sposób przybliżony, ale umożliwiają szybkie obliczenia praktyczne.

Oslabianie promieniowania - warstwa półchlonna

W przypadku promieniowania monoenergetycznego osłabienie wiązki skolimowanej ma charakter eksponencjalny: $I = I_0 \exp(-\mu x)$, gdzie I_0 , I - natężenie promieniowania odpowiednio przed i po przejściu przez warstwę materiału o grubości x , μ - liniowy współczynnik absorpcji materiału.

Natomiast w widmie emitowanym z lampy składowe niskoenergetyczne są osłabiane znacznie silniej niż wysokoenergetyczne (wynika to z faktu, że współczynnik absorpcji μ jest funkcją energii). Tak więc eksponencjalne prawo osłabienia oraz współczynnik absorpcji nie są przydatne przy opisie osłabienia promieniowania z lampy.

Opisując osłabienie tego promieniowania posługujemy się pojęciem warstwy półchlonnej (half-value layer HVL); jest to grubość danego materiału, która osłabia do połowy pierwotne natężenie przechodzącego przez nią promieniowania. Wartości warstw półchlonych dla różnych napięć na lampie są stabilizowane, podobnie jak wartości wielkości pokrewnej - warstwy dziesięciochlonnej (ten-value layer TVL) [5]. Należy jednak pamiętać, że po przejściu przez materię zmienia się widmo promieniowania; ściślej, zwiększa się udział w wiązce kwantów o wyższej energii, zaś maleje udział kwantów o energii niższej (por. rys. 4) - mówimy wtedy skrótowo, że zwiększa się "twardość" promieniowania. Wraz ze wzrostem "twardości" zwiększa się warstwa półchlonna, a więc druga warstwa HVL2 jest grubsza od pierwszej HVL1, trzecia od drugiej itd. Znajomość dwóch pierwszych warstw półchlonych pozwala określić współczynnik jednorodności promieniowania $J = HVL1/HVL2$, którego wartość dla promieniowania X z lamp jest zawsze mniejsza od 1. Oczywiście dla promieniowania monoenergetycznego grubość kolejnych warstw półchlonych jest równa i wynosi $0.693/\mu$, zaś współczynnik jednorodności $J = 1$.

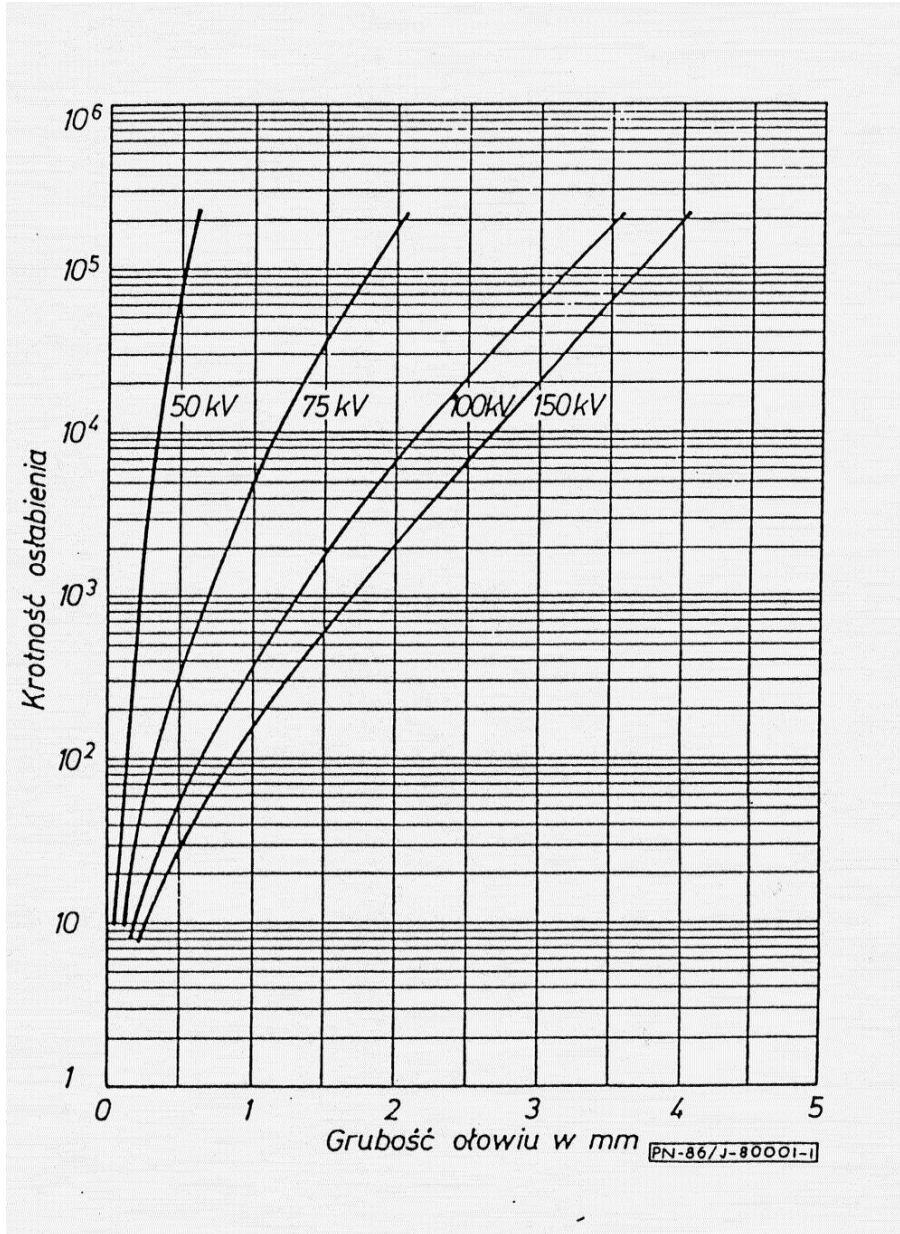
Pojęcie warstwy półchlonnej charakteryzuje "twardość" promieniowania i w połączeniu z wartością napięcia na lampie daje pewną informację o widmie promieniowania. W praktyce w medycynie promieniowanie X charakteryzuje się podając napięcie i filtrację, np. 50 kV i 1 mm Al.

Oslabianie promieniowania - osłony

Inną formą ilustracji procesu osłabienia promieniowania X w materii są tzw. krzywe osłabienia (przejścia), które dla różnych napięć na lampie przedstawiają zależność osłabienia (odpowiednio przejścia) promieniowania w funkcji grubości osłony, zwykle ołowianej (rys. 6). Jako miarę osłabienia promieniowania w osłonie stosuje się bądź krotność osłabienia promieniowania, bądź ułamkowe przejście promieniowania.

Na podstawie krzywych osłabienia określa się, dla konkretnej sytuacji wymaganą grubość osłony ołowianej. Aby zaprojektować osłonę z innego materiału należy znać wartości tzw. równoważnika ołowiu (lead-equivalence LE). Jest to grubość danego materiału, która daje - w takich samych warunkach pomiarowych (napięcie, filtracja, geometria) - taką samą osłonność jak zadana grubość ołowiu.

Wartości równoważnika ołowiu są stabilizowane dla różnych napięć na lampie i najczęściej stosowanych materiałów osłonowych [5,6].



Rys. 6. Zależność krotności osłabienia promieniowania X od grubości absorbenta ołowianego, dla różnych napięć zasilających lampę (napięcie stałe, filtracja własna 1 mm szkła lub 0.07 mm Cu, szeroka wiązka) [6].

Należy pamiętać, że zależność między grubością materiału osłaniającego a grubością ołowiu nie jest liniowa; np. równoważnik ołowiu dla mosiądku wynosi dla 2 mm mosiądku - 0.48 mm, dla 4 mm mosiądku - 1.12 mm.

Jest to spowodowane opisanym już zjawiskiem " utwardzania" się promieniowania X po przejściu przez osłonę. Tak więc nie ma prostej formuły, która pozwalałaby na podstawie znajomości równoważnika ołowiu dla danej osłony wyznaczyć jego wartość dla innej osłony, choćby z tego samego materiału; każdorazowo trzeba korzystać z tablic, czyli z danych eksperymentalnych.

W typowych zastosowaniach promieniowania X pochodzącego z lamp rentgenowskich preferowanym materiałem osłonowym jest ołów. Aby osłabić 1000-krotnie promieniowanie o energii maksymalnej do 75 keV wystarczy 1 mm Pb, zaś o energii do 150 keV 2 mm Pb. Ekrany umożliwiające bezpośrednią obserwację pomiaru wykonuje się ze szkła ołowiowego; do ochrony pracowników stosuje się fartuchy i rękawice z gumy ołowiowej. Inne stosowane materiały osłonne to żelazo, beton, cegła; dla energii maksymalnych do 200 keV wystarczającą osłonę zapewniają zwykle ściany z cegieł [5].

Promieniowanie pierwotne, rozproszone, uboczne

W pracy z lampami rentgenowskimi spotykamy się z zagrożeniem spowodowanym przez promieniowanie pierwotne, rozproszone i tzw. promieniowanie uboczne.

Promieniowanie uboczne jest to promieniowanie przenikające przez obudowę lampy a więc bezużyteczne, a niosące zagrożenie radiologiczne.

Moc dawki promieniowania pierwotnego w wiązce opuszczającej lampę jest bardzo wysoka (od kilku do kilkudziesięciu Gy/h w odległości 1 m) ; przebywanie w obszarze tej wiązki niesie więc ryzyko otrzymania znaczących dawek.

Promieniowanie pierwotne padając na badany obiekt, ściany czy osłony ulega rozproszeniu; dlatego zagrożenie radiologiczne występuje nie tylko w obszarze wiązki głównej, ale również w otoczeniu przedmiotu rozpraszającego. Natężenie promieniowania rozproszonego jest zależne m.in.:

- od rozmiarów przedmiotu rozpraszającego - im większy obiekt tym więcej kwantów z wiązki pierwotnej może być rozproszonych; oczywiście jeśli przedmiot rozpraszający obejmuje całą wiązkę, zwiększanie jego rozmiarów nie zwiększa rozproszenia;

- od materiału, z którego wykonany jest przedmiot rozpraszający; materiały lekkie (woda, ciało, ściany) rozpraszają w większym stopniu niż materiały ciężkie (ołów), z których zwykle zbudowane są osłony (por. akapit "Oddziaływanie promieniowania X z materią").

Należy pamiętać, że widmo promieniowania rozproszonego różni się od widma promieniowania pierwotnego.

Praktyczne obliczanie dawek i osłon - normy.

W praktyce dawki od promieniowania X i osłony przed tym promieniowaniem oblicza się korzystając z informacji zawartych w specjalistycznych poradnikach i normach. W Polsce problemy te reguluje Polska Norma PN-86/J-80001 "Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma - Obliczanie osłon

stałych". Norma ta dotyczy dawek i osłon dla typowych medycznych aparatów rentgenowskich, o stałym napięciu zasilania i zapewne anodzie wolframowej.

1. Moc dawki w miejscu projektowanej osłony przyjmuje się na podstawie dokumentacji urządzenia lub bezpośredniego pomiaru. Na wypadek, gdyby było to niemożliwe w normie zawarte są wartości mocy dawki w odległości 1 m od ogniska lampy rtg dla jednostkowego prądu lampy, różnych napięć i różnych filtracji. Na tej podstawie można wyliczyć moc dawki w żądanej odległości od lampy.

2. Osłonę projektuje się tak, by dawka otrzymywana za osłoną w ciągu tygodnia pracy nie przekraczała tygodniowej dawki granicznej. Znając moc dawki w miejscu planowanej osłony, dawkę graniczną, czas pracy w miejscu osłanianym i inne parametry narażenia wylicza się wymaganą krotność k osłabienia mocy dawki przez osłonę.

3. Znając wartość k można - korzystając z wykresu osłabienia promieniowania w ośrodku (por. rys. 6) - wyznaczyć wymaganą grubość osłony z ołowiu. Chcąc korzystać z innych materiałów osłonnych ich grubość wyznacza się z tabel zawierających wartości równoważnika ołowiu dla różnych materiałów.

4. Norma zawiera również czysto empiryczną formułę umożliwiającą zaprojektowanie osłon przed promieniowaniem rozproszonym przez różne materiały. Wielkością pomocną w tych obliczeniach jest tzw. zredukowana moc dawki w miejscu planowanej osłony. Wartość tę można wyliczyć wstawiając do wzoru wartości dawki granicznej, czasu narażenia, dane dotyczące lokalizacji osłanianego miejsca i warunków rozpraszania. W normie znajdują się wykresy zależności dawki zredukowanej od wymaganej grubości osłony ołowianej. Zawarte w normie współczynniki przeliczeniowe pozwalają przeliczyć tak wyznaczone osłony ołowiane na osłony z innych materiałów; współczynniki te uwzględniają zmianę widma promieniowania X po rozproszeniu.

5. W przypadku występowania znaczącego poziomu promieniowania ubocznego (ponad 20 $\mu\text{Gy/h}$ lub ponad 10% dawki od promieniowania rozproszonego) w normie opisana jest procedura obliczania dodatkowych osłon przed promieniowaniem ubocznym. Zakłada ona, że widmo tego promieniowania jest podobne do widma promieniowania pierwotnego.

6. Korzystając z normy należy pamiętać, że zawarte w niej informacje dotyczące tzw. dawek dopuszczalnych są już nieaktualne. Według Zarządzenia Prezesa PAA z 20 maja 2002 [8] graniczny efektywny równoważnik dawki dla osób narażonych zawodowo na kontakt z promieniowaniem wynosi 20 mSv rocznie, zaś dla pozostałych osób 1 mSv rocznie. Szczegółowe regulacje zawiera wspomniane Zarządzenie Prezesa PAA.

Dawce 20 mSv rocznie dla osób narażonych zawodowo odpowiada 0.4 mSv tygodniowo. Ta wartość dla promieniowania X odpowiada dawce pochłoniętej w organizmie 0.4 mGy. W pomiarze wyznacza się jednak dawkę pochłoniętą w powietrzu, a nie w tkance. W normie przyjmuje się, że te dwie wartości są w przybliżeniu równe, a stąd wynika, że graniczna pochłonięta dawka tygodniowa w powietrzu w miejscu pracy wynosi 0.4 mGy.

Przyjmując to wygodne w praktycznych obliczeniach założenie należy pamiętać, że w rzeczywistości stosunek dawki pochłoniętej w tkance miękkiej do dawki pochłoniętej w powietrzu wynosi [4]:

- dla energii fotonów 10 keV ÷ 100 keV 1.05 ÷ 1.10,
- dla energii fotonów 100 keV ÷ 10 MeV 1.10 ± 2%.

Pomiary dawek promieniowania X

W pomiarach promieniowania X pochodzącego z lamp rtg, szczególnie pracujących na niskich napięciach, kluczowe znaczenie ma wybór radiometru. Energia fotonów jest wtedy niska (poniżej 100 keV) i wiele radiometrów wykazuje w tym zakresie silną zależność energetyczną; stosowanie takich radiometrów prowadzi do powstawania bardzo dużych błędów pomiaru. W praktyce przy pomiarach dawek wokół lamp rtg stosuje się komory jonizacyjne o ściankach zbudowanych z materiałów o małym Z (równoważnych tkance lub powietrzu); komory takie mierzą kwanty już od kilku bądź kilkunastu keV.

Literatura.

1. Cameron J.R., Skofronick J.G., Medical Physics, John Wiley & Sons, Inc., New York 1978.
2. Gostkowska B., Wielkości, jednostki i obliczenia stosowane w ochronie radiologicznej, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa 1991.
3. Greening J.R., Fundamentals of Radiation Dosimetry, Medical Physics Handbooks 15, Adam Hilger Ltd., Bristol 1985.
4. Kathren R.L., Radiation Protection, Medical Physics Handbooks 16, Adam Hilger Ltd., Bristol 1985.
5. Mould R.F., Radiation Protection in Hospitals, Medical Physics Series, Adam Hilger Ltd., Bristol 1985.
6. Polska Norma PN-86/J-80001, Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma - Obliczanie osłon stałych.
7. Toth Z. (red.), Radioterapia i diagnostyka radioizotopowa, PZWL, Warszawa 1976.
8. Zarządzenie Prezesa PAA z 20.05.2002 w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego i wskaźników pochodnych określających zagrożenie promieniowaniem jonizującym.
9. Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z 18.11.1988 w sprawie warunków, jakie powinny spełniać pracownie rentgenowskie oraz zasad pracy związanej z posługiwaniem się aparatami rentgenowskimi, M.P. Nr 32 poz. 295.

2. ĆWICZENIE - CZĘŚĆ A

2.1. Cel ćwiczenia

Określenie zależności mocy dawki promieniowania X od napięcia i prądu lampy, zależności od odległości od lampy rentgenowskiej oraz badanie osłabiania promieniowania X przez różne materiały.

2.2. Aparatura

Dyfrakcyjna lampa rentgenowska, radiometr VA-J-15A.

2.3. Wykonanie ćwiczenia

1. Przygotowania

- Przygotować radiometr VA-J-15A do pracy:
- regulacja położenia "zera" przyrządu (przełącznik w pozycji N),
 - ustawienie radiometru na pomiar mocy dawki (przełącznik w pozycji mR/h lub R/h).
- Sprawdzić czy położenie stołu pomiarowego zapewnia pomiar mocy dawki w osi wiązki promieniowania X z lampy (patrz niżej, rys.9.a)
- Założyć filtr aluminiowy i absorbent stalowy na wyjście nr 3 wiązki promieniowania z lampy (patrz niżej, pkt 4, rys.7 i rys.8))

1.a. Sprawdzenie zależności mocy dawki od napięcia i prądu lampy

- Ustawić radiometr w odległości rzędu 50 cm od ogniska lampy,
- Uruchomić lampę rentgenowską $U=10$ kV, $I=10$ mA i wyprowadzić wiązkę promieniowania X oraz wykonać pomiar mocy dawki
- Powtórzyć pomiary podnosząc napięcie na lampie co 5 kV aż do momentu gdy moc dawki przekroczy dopuszczalną wartość 300 mR/h
- Obniżyć napięcie na lampie wg wskazań prowadzącego i powtórzyć pomiary zmieniając prąd lampy od 10 mA, co 5 mA aż do mocy dawki 300 mR/h.

1.b. Sprawdzenie wstępne poziomu zagrożenia

- Uruchomić lampę rentgenowską [$U=(40 - 50)$ kV, $I=10$ mA],
- Wyprowadzić wiązkę promieniowania X i zmierzyć moc dawki w miejscach przebywania wykonujących pomiary wskazanych przez prowadzącego asystenta,
- Oszacować maksymalną dawkę, na którą mogą być narażeni wykonujący ćwiczenie

1.c. Określenie kąta rozwarcia wiązki promieniowania pierwotnego w poziomie

Ustawić radiometr w odległości 40-50 cm od ogniska lampy i wykonać pomiary mocy dawki zmieniając położenie radiometru co 2 cm w linii poprzecznej do osi wiązki. Ustalić doświadczalne położenie osi wiązki promieniowania oraz kąt rozwarcia wiązki w poziomie.

2. Określenie zależności mocy dawki od odległości

Wyznaczyć moc dawki w wiązce promieniowania pierwotnego w odległościach od ogniska lampy l : od minimalnej, około 0.3 m ÷ 1.2 m co 0.2 m (rys. 7).

3. Wyznaczenie osłabienia mocy dawki przez osłonę ołowianą i stalową

Wyznaczyć osłabienie mocy dawki w wiązce głównej przez:

- osłony ołowiane o grubościach: 0.12 ÷ 0.6 mm co 0.06 mm oraz 1.0 mm i 1.2 mm,
- osłony stalowe o grubościach: 0.6 ÷ 4 mm co 0.2 mm oraz 8 mm i 10 mm.

Pomiary przeprowadzić dla odległości od ogniska lampy $l = 0.6$ m lub zaleconej przez prowadzącego.

4. Pomiary końcowe

- Wyznaczyć moc dawki promieniowania ubocznego na obudowie lampy od strony korytarza budynku C-2,
- wyznaczyć moc dawki promieniowania rozproszonego i ubocznego na stanowisku pomiarowym w czasie pomiarów zależności mocy dawki od odległości.

2.4. Opracowanie wyników

Ad.2.3.1a

Sporządzić krzywą zależności mocy dawki od napięcia na lampie rentgenowskiej i ocenić zgodność danych doświadczalnych z wzorem ze str. 7

Ad.2.3.1.c

Sporządzić krzywą zależności mocy dawki od zmiany położenia radiometru w osi prostopadłej do kierunku wiązki promieniowania. Zinterpretować uzyskany wynik.

Określić doświadczalny kąt rozwarcia wiązki w poziomie.

Ad 2.3.2

a. Sporządzić krzywą zależności mocy dawki promieniowania pierwotnego od odległości l od ogniska lampy. Nanieść na wykres krzywą $1/l^2$ normalizując ją do mocy dawki dla $l = 1$ m. Porównać otrzymane krzywe i zinterpretować relację między nimi. Uwzględnić informacje o kącie rozwarcia wiązki w poziomie.

b. Korzystając z tablic zawartych w PN-86/J-80001 "Obliczanie osłon stałych" obliczyć moc dawki w odległości $l = 1$ m od ogniska lampy. Przyjąć, że absorbent stalowy 1.8 mm Fe osłabia przefiltrowaną (przez 1.2 mm Al) wiązkę 600 razy. Jeżeli pomiary wykonywano dla innej niż 1.8 mm grubości absorbenta stalowego, to skorygować krotność osłabienia $k=600$ w oparciu o krzywą absorpcji dla osłon stalowych (pkt.2.3.3). Porównać otrzymaną wartość z wartością zmierzoną i zinterpretować relację między nimi.

Ad 3.

a. Sporządzić krzywe zależności osłabienia mocy dawki badanego promieniowania pierwotnego od grubości osłony (por. rys. 6). Wykres sporządzić dla osłony ołowianej i stalowej.

b. Wyznaczyć - dla badanego promieniowania - grubość pierwszej i drugiej warstwy pochłonnej oraz współczynnik jednorodności J .

c. Korzystając z wyznaczonej w pkt. a krzywej osłabienia określić grubości osłon ze stali równoważne osłonom 0.2 mm Pb, 0.3 mm Pb, 0.5 mm Pb oraz równoważnik ołowiu dla 1.8 mm stali.

d. Korzystając z PN-86/J-80001 obliczyć wymaganą grubość ołowianej osłony przed promieniowaniem pierwotnym w odległości 3 m od ogniska lampy. Przyjąć, że osoba narażona będzie przebywać w osłanianym miejscu 8 godzin dziennie. Skorzystać z wyznaczonej w punkcie 2.3.2 zależności mocy dawki od odległości oraz z wyznaczonej w punkcie 2.3.3 krzywej osłabienia. (Dla odległości 3 m wiązka promieniowania jest na tyle szeroka, że można, nie popełniając dużego błędu, przyjąć, że zostało napromieniowane całe ciało osoby narażonej).

e. Obliczyć jaką grubość będą miały osłony z innych materiałów (stal, beton, cegła) równoważne osłonie z ołowiu. W przypadku braku odpowiednich danych w PN podać wartości tablicowe dla warunków najbardziej zbliżonych do eksperymentalnych.

f. Nanieść na wykres i porównać krzywe osłabienia dla ołowiu: doświadczalną i literaturową (PN). Wyjaśnić relacje między krzywymi. Aby móc porównywać te krzywe, dane doświadczalne należy przeliczyć dla sytuacji, gdy promieniowanie jest filtrowane jedynie przez 1.2 mm Al. Należy pamiętać, że dane doświadczalne

uzyskano dla promieniowania osłabianego dodatkowo np. przez absorbent 1.8 mm Fe, trzeba więc uwzględnić jego wpływ (krotność osłabienia 600, LE = 0.29 mm Pb). Jeżeli stosowano absorbent Fe o innej grubości, to należy odpowiednio skorygować dane.

Ad 4.

a. Określić moc dawki:

- na obudowie lampy,
- na stanowisku pomiarowym w czasie pomiarów.

b. Na podstawie pomiarów mocy dawki oszacować dawkę jaką otrzymali wykonujący ćwiczenie.

UWAGA: Przy sporządzaniu wykresów należy pamiętać o nanoszeniu również błędów pomiaru.

3. ĆWICZENIE - CZĘŚĆ B

3.1. Cel ćwiczenia

Badanie rozproszonego promieniowania X.

3.2. Aparatura

Dyfrakcyjna lampa rentgenowska, radiometr VA-J-15A.

3.3. Wykonanie ćwiczenia

1. Przygotowania

- Przygotować radiometr VA-J-15A do pracy:
 - regulacja położenia "zera" przyrządu (przełącznik w pozycji N),
 - ustawienie radiometru na pomiar mocy dawki (przełącznik w pozycji mR/h)
 - założyć absorbent Pb na pobocznicy komory jonizacyjnej dozymetru dla ograniczenia tła pomiaru pochodzącego od pierwotnej wiązki promieniowania X
- Sprawdzić czy położenie stołu pomiarowego zapewnia pomiar mocy dawki w osi wiązki promieniowania X z lampy (patrz niżej, rys.9.a)
 - Założyć filtr aluminiowy i absorbent stalowy na wyjście nr 3 wiązki promieniowania z lampy (patrz niżej, pkt 4, rys.7 i rys.8))
- Ustawić ekran z rozpraszaczem z pleksiglasu w odległości 1.0 m od ogniska lampy, prostopadle do osi wiązki
- Uruchomić lampę rentgenowską [$U=(40 - 50)$ kV, $I=10$ mA],
 - Wyprowadzić wiązkę promieniowania X i zmierzyć moc dawki w miejscach przebywania wykonujących pomiary wskazanych przez prowadzącego asystenta,
 - Oszacować maksymalną dawkę, na którą mogą być narażeni wykonujący ćwiczenie

2. Określenie mocy dawki promieniowania rozproszonego

- a. • Wyznaczyć moc dawki promieniowania rozproszonego przez :
- ekran z pleksiglasu o rozmiarach 400 x 420 mm,

- ekran z ołowiu o rozmiarach 400 x 420 mm,
- krążek z pleksiglasu o średnicy 200 mm.
- Pomiar wykonywać pod kątem 135° do kierunku padania wiązki ; odległości punktów pomiaru od przedmiotu rozpraszającego l : $0.2 \text{ m} \div 1.0 \text{ m}$ co 0.2 m (rys. 7). Odległość przedmiotu rozpraszającego od ogniska lampy $f = 1.2 \text{ m}$.
- Kończąc pomiary dla tej odległości zmierzyć moc dawki promieniowania rozproszonego przez ścianę i okno od strony podwórza: ustawić detektor w odległości $l = 1 \text{ m}$ od ekranu a następnie usunąć ekran i zmierzyć moc dawki.
- b. Wyznaczyć moc dawki promieniowania rozproszonego przez
 - ekran z pleksiglasu o rozmiarach 400 x 420 mm.
 - Odległość przedmiotu rozpraszającego od ogniska lampy $f = 0.7 \text{ m}$. Warunki pomiaru jak w punkcie a.

3. Pomiary końcowe

- wyznaczyć moc dawki promieniowania ubocznego na obudowie lampy od strony korytarza budynku C-2,
- wyznaczyć moc dawki od promieniowania rozproszonego i ubocznego na stanowisku pomiarowym w czasie pomiarów promieniowania rozproszonego.

3.4. Opracowanie wyników

Ad 3.3.2.

- a. Sporządzić krzywe zależności mocy dawki promieniowania rozproszonego, od odległości l od przedmiotu rozpraszającego.

Wykresy sporządzić:

- dla ekranu z pleksiglasu, dla różnych odległości f przedmiotu rozpraszającego od lampy,
- dla $f = 1.2 \text{ m}$ dla różnych przedmiotów rozpraszających z pleksiglasu,
- dla $f = 1.2 \text{ m}$ dla różnych materiałów rozpraszających.

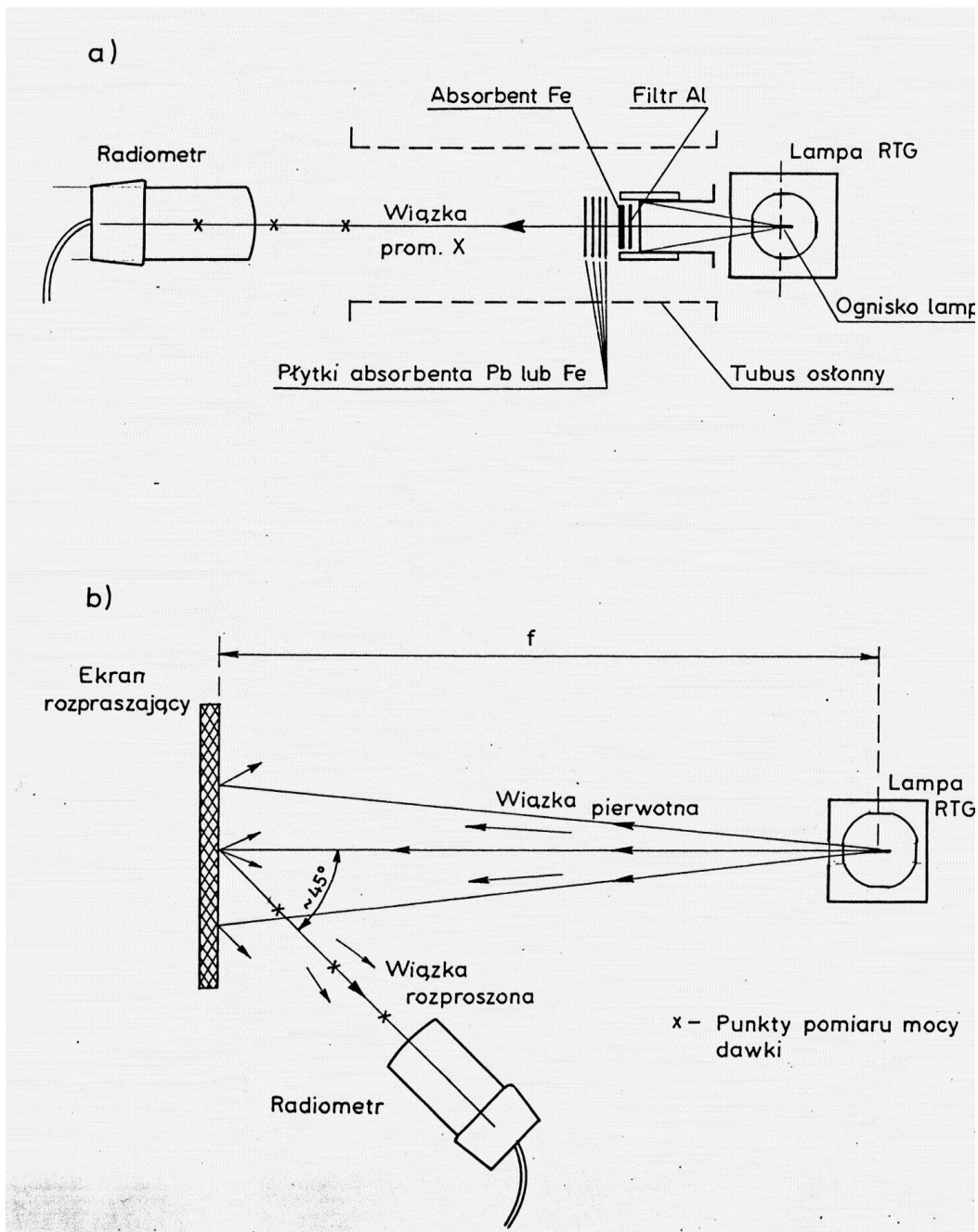
Wy tłumaczyć otrzymane zależności. Pamiętać o istnieniu "tła" (promieniowanie rozproszone przez ścianę i okno od strony podwórza); zostało ono oszacowane w punkcie 2a.

- b. Zaprojektować i opisać eksperyment z użyciem radiometru, umożliwiającą wyznaczenie osłony przed promieniowaniem rozproszonym pochodzącym od ekranu z pleksiglasu, ustawionego 1.2 m od lampy. Przyjąć, że osoba narażona na to promieniowanie będzie przebywała w odległości 0.4 m od ekranu 8 godzin dziennie.

Ad 3.3.3.

- a. Określić moc dawki:
 - na obudowie lampy,
 - na stanowisku pomiarowym w czasie pomiarów.
- b. Na podstawie pomiarów mocy dawek oszacować dawkę jaką otrzymali wykonujący ćwiczenie.

UWAGA: Przy sporządzaniu wykresów należy pamiętać o nanoszeniu również błędów pomiaru.

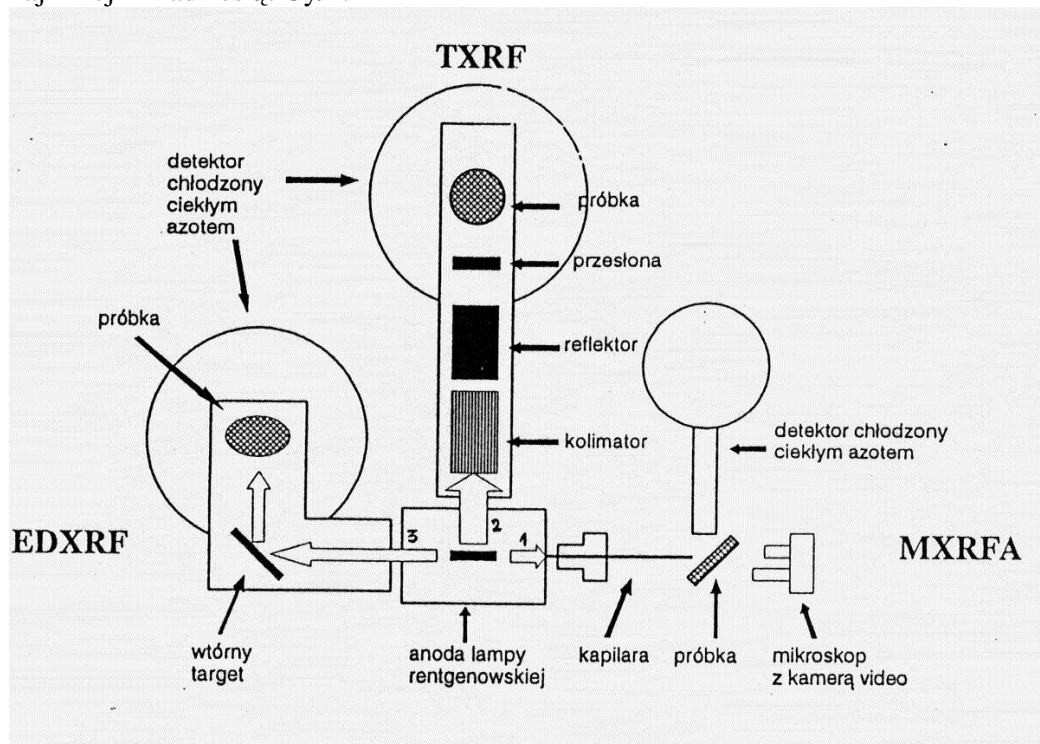


Rys. 7. Geometria pomiaru : a) osłabienie mocy dawki w wiązce pierwotnej, b) moc dawki promieniowania rozproszonego.

4. APARATURA

4.1. Aparat rentgenowski

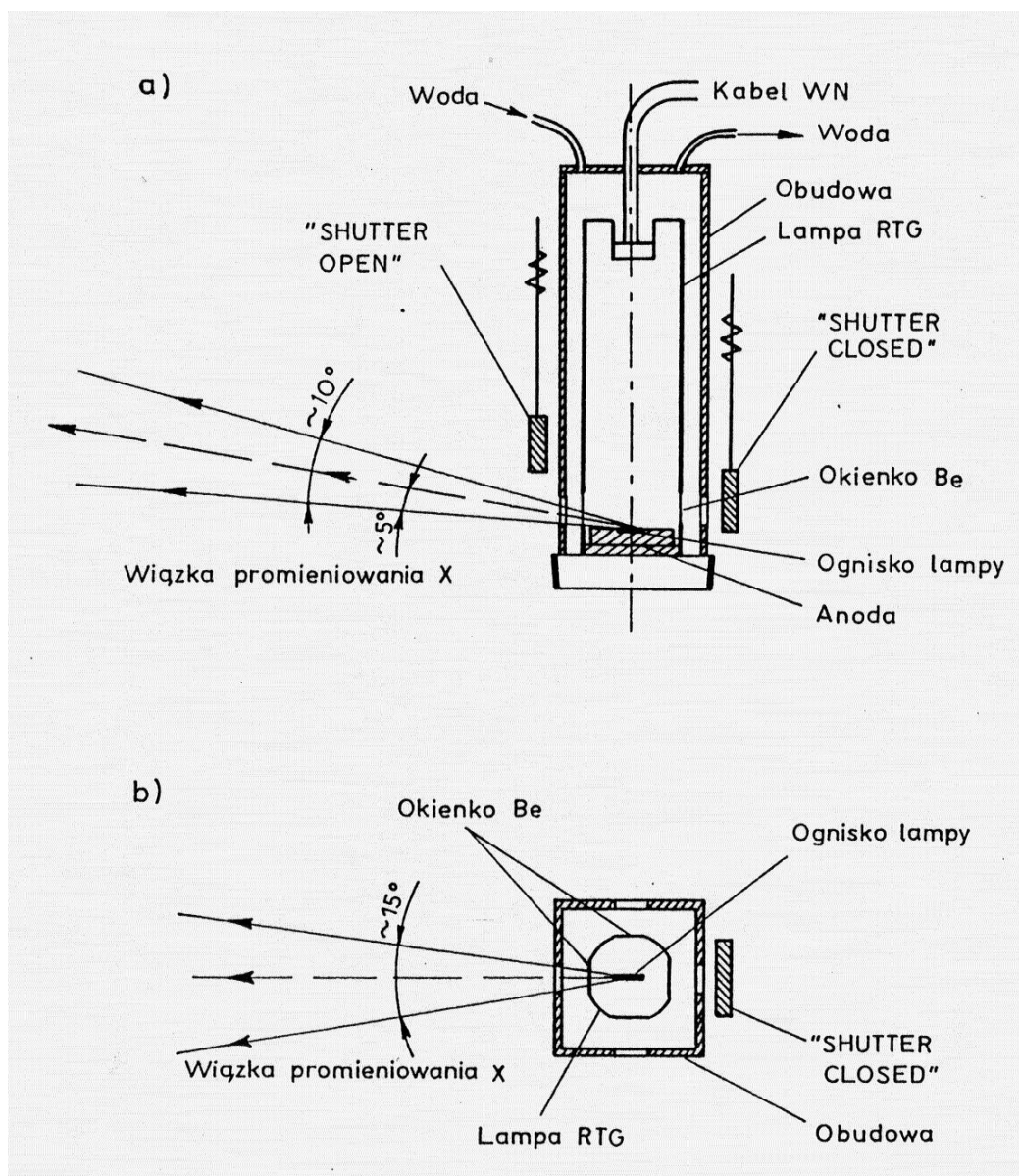
Aparat rentgenowski będący przedmiotem ćwiczenia jest specjalistycznym urządzeniem naukowym, służącym do przeprowadzania analiz materiałów metodą fluorescencji rentgenowskiej (rys. 8). Urządzenie pracuje przy napięciu od 10 do 60 kV, prądzie od 10 do 50 mA i jest zasilane nie z zasilacza zmiennego napięcia lecz z wysokostabilnego zasilacza stałego napięcia. Wytwarza wiązkę promieniowania X o bardzo dużym natężeniu - moc dawki w odległości 0.5 m od lampy wynosi co najmniej kilkadziesiąt Gy/h.



Rys. 8. Wielofunkcyjne stanowisko, z dyfrakcyjną lampą rentgenowską, do analiz metodą fluorescencji rentgenowskiej (widok z góry). EDXRF, TXRF, MXRFA - przystawki umożliwiające stosowanie różnych technik fluorescencji rentgenowskiej. W ćwiczeniu wykorzystuje się wyjście nr 3 lampy po wymontowaniu przystawki EDXRF.

Zastosowana w urządzeniu tzw. dyfrakcyjna lampa rentgenowska ma anodę molibdenową (linia charakterystyczna K_{α} 17 keV) i jest tak skonstruowana by

uzyskać jak największy stosunek natężenia promieniowania charakterystycznego do natężenia promieniowania hamowania. Lampa ma 4 okienka, przez które może być równocześnie emitowane promieniowanie (rys. 9). Kąt rozwarcia wiązki (wynikający z rozmiarów okienek) wynosi około 10° w pionie i około 15° w poziomie.



Rys. 9. Dyfrakcyjna lampa rentgenowska - szkic budowy :
 a) rzut z boku, b) rzut z góry (przekrój na poziomie okienek lampy).

Do celów ćwiczenia urządzenie zostało odpowiednio przystosowane.

- a. Wykorzystywane jest wyłącznie okienko skierowane w kierunku okien pokoju pomiarowego (wyjście lampy nr 3).
- b. Na okienko lampy założono (por. rys. 7)
 - filtr aluminiowy o grubości 1.2 mm Al,
 - absorbent stalowy o grubości 1.8 mm (LE 0.29 mm Pb), którego zadaniem jest osłabienie wiązki do bezpiecznego poziomu około 5 mGy/h w odległości 0.5 m.
- c. Na odcinku do około 0.5 m od ogniska lampy wiązka promieniowania jest węższa od komory jonizacyjnej radiometru VA-J-15A. Należy o tym pamiętać przy opracowaniu wyników pomiaru i ich interpretacji. Ponadto z uwagi na dość znaczne natężenie promieniowania X w tym obszarze należy zachować szczególną ostrożność i wszelkie manipulacje tam wykonywać tylko gdy nie jest wyprowadzona wiązka.
- d. W czasie ćwiczenia aparat pracuje przy napięciu (40-50) kV i natężeniu prądu lampy 10 mA.

Jak wynika z opisu, stosowana w ćwiczeniu lampa znacząco różni się od typowych rozwiązań stosowanych w medycynie; m.in: konstrukcją, materiałem anody, energią promieniowania charakterystycznego, jego udziałem w promieniowaniu emitowanym, kształtem napięcia zasilającego.

W trakcie ćwiczenia kilkakrotnie będzie się wyznaczać pewne wielkości dozymetryczne (dawki, osłony) zarówno na podstawie bezpośrednich pomiarów na lampie jak i według PN-86/J-80001. Należy pamiętać, że otrzymane każdą z tych metod wartości w rzeczywistości opisują nieco inne aparaty rentgenowskie : PN-86/J-80001 - typowy rentgenowski aparat medyczny, zaś pomiar - specjalistyczny aparat naukowy wyposażony w lampę dyfrakcyjną. Wyznaczone tymi metodami wartości mogą się więc znacznie różnić. Celem ćwiczenia nie jest więc "mechaniczne" zestawianie i porównywanie tych - często znacznie się różniących - wartości , ale przypomnienie, że wielkości dozymetryczne dla lamp można wyznaczać zarówno na podstawie norm jak i wprost z eksperymentu.

Zasady bezpiecznej pracy

Mimo znacznego osłabienia promieniowania przez absorbent stalowy, moc dawki w wiązce głównej jest wysoka. Należy więc ściśle przestrzegać programu ćwiczenia. Szczególną ostrożność należy zachować w czasie, gdy wiązka wyprowadzana jest z lampy (przysłona podniesiona -"shutter" w pozycji OPEN). Wówczas:

- pod żadnym pozorem nie wolno przekraczać barierek oddzielającej stanowisko pomiarowe od wiązki głównej;
- nie należy trzymać rąk w polu wiązki głównej; pomiar mocy dawki należy wykonywać przez pozostawienie detektora w pozycji pomiarowej - trzymanie detektora w obszarze wiązki rękami jest niedopuszczalne;
- nie wolno wykonywać w obszarze wiązki żadnych czynności, które nie są opisane w instrukcji ćwiczenia; wszelkie takie czynności można wykonywać dopiero po zasłonięciu okienka płytką ołowianą ("shutter CLOSE").

Przestrzeganie tych zasad gwarantuje, że ćwiczenie jest całkowicie bezpieczne - moc dawki na stanowisku pomiarowym nie przekracza 0.01 mGy/h. Ponadto wykonujący

ćwiczenia wyposażeni są w dozymetry indywidualne pozwalające określić dawkę otrzymaną w czasie zajęć.

4.2. Radiometr

W ćwiczeniu stosowany jest radiometr VA-J-15A wyposażony w sondę z komorą jonizacyjną o średnicy 100 mm.. Radiometr mierzy kwanty promieniowania elektromagnetycznego od 20 keV do 2 MeV z nierównomiernością charakterystyki energetycznej poniżej 10%. Radiometr umożliwia:

- pomiar dawki (zakres pomiarowy od 0.1 mR do 300 mR, położenie przełącznika mR),
- pomiar mocy dawki (zakres pomiarowy od 0.1 mR/h do 300 R/h, położenia przełącznika mR/h, R/h).

Błąd pomiaru nie przekracza 15%. Czas odpowiedzi radiometru dla poszczególnych zakresów wynosi odpowiednio: dla zakresu 1 mR/h - 40 s, 3 mR/h - 20 s, zakresy powyżej 3 mR/h - 8 s.

Radiometr jest wyskalowany w pozaukładowych jednostkach ekspozycji (dawki ekspozycyjnej) R. W pomiarach należy używać tych jednostek - przeliczenie na jednostki układu SI należy wykonać prezentując wyniki. Przeliczając należy pamiętać, że ekspozycja X i dawka pochłonięta D to dwie różne wielkości fizyczne i przeliczenie R na Gy nie jest prostą zmianą jednostek, ale przeliczeniem jednej wielkości fizycznej na drugą. Przyjmuje się, że w powietrzu 1R odpowiada $0.0087 \text{ Gy} = 8.7 \text{ mGy}$.