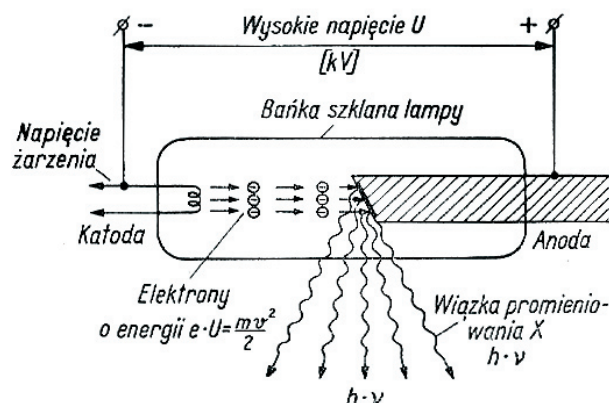


# Wzorzec jednostki miary kermy promieniowania rentgenowskiego

## Promieniowanie X (rentgenowskie)

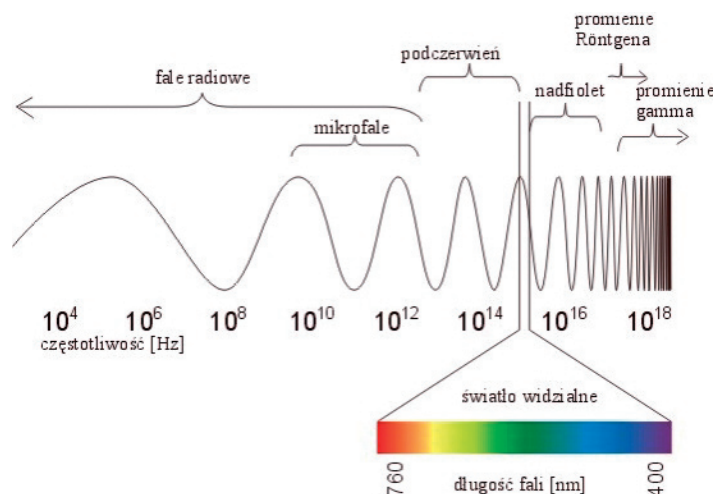
Niemiecki fizyk Wilhelm Conrad Röntgen dokonał w 1895 roku odkrycia promieniowania X (nazywanego również od nazwiska odkrywcy promieniowaniem rentgenowskim) i zbadał jego główne właściwości. Promieniowanie X powstaje w chwili, gdy swobodne elektrony poruszające się z dużą prędkością zostają gwałtownie zahamowane. Jednym ze źródeł promieniowania X jest lampa rentgenowska składająca się z bańki szklanej, w której panują warunki zbliżone do próżni, oraz wtopionych w nią elektrod: anody i katody. Anoda służy do hamowania elektronów, zaś rozżarzona katoda jest źródłem elektronów. Wytwarzane przez katodę elektrony pozostają w jej bezpośrednim sąsiedztwie i tworzą wokół niej chmurę. Dla wprowadzenia elektronów w ruch ku anodzie konieczne jest wytworzenie w lampie pola elektrycznego. Powstaje ono pod wpływem przyłożonego do elektrod lampy wysokiego napięcia. Polaryzacja lampy powinna być taka, aby katoda miała znak ujemny, a anoda znak dodatni. Przy tak spolaryzowanej lampie elektrony mające ładunek ujemny będą poruszać się ku dodatnio naładowanej anodzie. Prędkość elektronów, a zarazem ich energia, zależna jest od wielkości napięcia przyłożonego do elektrod lampy.



Otrzymywanie promieniowania X

Rozpędzone elektrony uderzają o anodę, a ich prędkość maleje do zera. W chwili tej energia kinetyczna elektronów przechodzi w energię promieniowania elektromagnetycznego, tzn. energia kinetyczna elektronu ulega przemianom na foton promieniowania X.

Duża częstotliwość promieniowania X, a co się z tym wiąże duża ilość energii przenoszonej i krótka długość fali (długość fali od 10 pm do 10 nm) sprawiają, że jest ono bardzo przenikliwe. Promieniowanie to przenika przez wszystkie ciała, niezależnie od stanu ich skupienia. Przy przechodzeniu przez materię część padającego promieniowania zostaje zatrzymana, przez co wiązka doznaje osłabienia natężenia. Stopień osłabienia zależy od cech fizycznych pochłaniającego ciała oraz od długości fali promieniowania. Krótkofalowe promieniowanie wykazuje większą przenikliwość niż długofalowe. Przejęciu promieniowania



Umieszczenie promieniowania X w skali fal elektromagnetycznych

X przez materię towarzyszy zawsze powstanie promieniowania wtórnego elektronowego (fotolektrony) i wtórnego falowego (promieniowanie rozproszone). Promieniowanie X rozchodzi się w przestrzeni prostoliniowo, podobnie jak światło i z szybkością równą prędkości światła. Jak każde promieniowanie, które wychodzi z jednego punktu lub z ograniczonego obszaru, tak i promieniowanie rentgenowskie doznaje straty natężenia w miarę wzrastania odległości od źródła. Wiadomo, że promieniowanie X nie ugina się w polu magnetycznym ani w polu elektrycznym. Ze względu na wyżej wymienione cechy promieniowanie rentgenowskie posiada zdolność wywoływania zjawisk, które obejmujemy ogólnym mianem fizycznego, chemicznego i biologicznego oddziaływania promieniowania X.

Oddziaływanie fizyczne promieniowania X przejawia się w postaci jonizacji gazów. Powietrze i inne gazy są w normalnych warunkach obojętne elektrycznie. Pod wpływem promieniowania rentgenowskiego ulegają jonizacji i w polu elektrycznym stają się przewodnikami. Na wykorzystaniu tego zjawiska oparte jest miernictwo promieniowania rentgenowskiego. Z innych zjawisk, o mniejszym znaczeniu, należy wymienić wzrost temperatury ciał naświetlanych oraz zmianę barwy, jaką wykazują niektóre związki chemiczne poddane promieniowaniu X.

Do oddziaływania chemicznego należy zaliczyć działanie promieniowania rentgenowskiego na emulsję fotograficzną. Podobnie jak światło, promieniowanie X powoduje zaczernienie tej emulsji. Inną właściwością jest pobudzanie niektórych substancji do świecenia. Właściwości te wykorzystuje się w ocenie dawek promieniowania oraz diagnostyce medycznej i przemysłowej. Biologiczne oddziaływanie promieniowania X przejawia się w uszkodzeniu komórek, które może doprowadzić, w przypadku otrzymania przez organizm dużej dawki, do choroby popromiennej czy nawet do śmierci organizmu. Ma też działanie mutagenne i rakotwórcze. Jednak nie należy zapominać, że to samo promieniowanie w małych dawkach wykorzystywane jest w diagnostyce medycznej (zdjęcia rentgenowskie i komputerowa tomografia rentgenowska), a w dużych dawkach odpowiednio zaaplikowanych do leczenia chorób nowotworowych (radioterapia).

## Pomiar i rejestracja promieniowania X

Konieczność dokonywania pomiarów promieniowania X wynika nie tylko z ich użyteczności w medycynie, nauce, przemyśle czy wojskowości, lecz przede wszystkim z ich

szkodliwości dla zdrowia i życia człowieka. Wiemy, że promieniowanie X przechodząc przez ośrodek materialny dokonuje jego jonizacji. Zjawisko jonizacji jest wykorzystywane do pomiaru i rejestracji promieniowania. Do pomiarów promieniowania jonizującego służą przyrządy nazywane dawkomierzami. Złożone są z dwóch zasadniczych części: detektora promieniowania (np. komora jonizacyjna, licznik proporcjonalny, licznik scyntylicyjny, detektor półprzewodnikowy) i układu elektronicznego mierzącego wielkość jonizacji (np. w postaci: impulsu elektrycznego, ładunku jonizacyjnego, prądu jonizacyjnego), która miała miejsce w detektorze promieniowania. W zastosowaniach metrologicznych najdokładniejszym detektorem jest prądowa komora jonizacyjna. Jest to swego rodzaju kondensator wypełniony powietrzem, do którego elektrod przyłożone jest wysokie napięcie. W powietrzu wypełniającym taką komorę w wyniku promieniowania powstają jony dodatnie oraz uwolnione elektrony, które pod wpływem pola elektrycznego wędrują do odpowiednich elektrod tworząc prąd jonizacyjny. Zakres prądów jonizacyjnych rozciąga się od  $10^{-8}$  A do  $10^{-16}$  A. Do pomiaru tych prądów wykorzystuje się urządzenia nazywane elektrometrami, pracującymi w trybie pomiaru prądu lub ładunku elektrycznego. Na podstawie tych pomiarów można wyznaczyć wartość dawki promieniowania, np. dawki ekspozycyjnej, kermy, dawki pochłoniętej, dawki równoważnej, dawki efektywnej (skutecznej) oraz mocy poszczególnych dawek. Wszystkie one służą do oceny narażenia na promieniowanie, a jest ich tyle dlatego, że nie umiemy do końca opisać od strony matematycznej wszystkich zjawisk zachodzących przy napromieniowaniu żywego organizmu.

## Jednostka miary dawki ekspozycyjnej w polu promieniowania X

Dawka ekspozycyjna X jest miarą jonizacji powietrza pod wpływem promieniowania X lub  $\gamma$  i służy wyłącznie do oceny narażenia na to promieniowanie. Definiowana jest jako iloraz  $dQ$  przez  $dm$ , gdzie  $dQ$  jest wartością bezwzględną sumy ładunków jonów jednego znaku wytworzonych przez fotony w suchym powietrzu, gdy wszystkie elektrony uwolnione w powietrzu o masie  $dm$  są całkowicie zahamowane. Jednostką dawki ekspozycyjnej w układzie SI jest kulomb na kilogram (C/kg). Dawniej jednostką dawki ekspozycyjnej był rentgen (R). Określał on ilość promieniowania rentgenowskiego lub promieniowania gamma wytwarzającą przez jonizację ładunek elektryczny  $2,58 \cdot 10^{-4}$  kulombów w kilogramie czystego, suchego powietrza w warunkach normalnych – temperatura 273,15 K i ciśnienie 1013,25 hPa. Pierwotnie jednostka ta odnosiła się tylko do promieniowania rentgenowskiego. W roku 1928 na Kongresie Radiologii w Sztokholmie uzgodniono, że jest to dawka, która wytwarza jedną jednostkę elektrostatyczną ładunku elektrycznego w jednym centymetrze sześciennym standardowego suchego powietrza. W roku 1937 z czysto praktycznych powodów objętość jednego centymetra sześciennego powietrza zastąpiła w definicji masa 1,293 mg. Decyzją CIPM z roku 1978 dopuszcza się używania rentgena wraz z jednostkami SI. Obecnie rentgen jest jednostką spoza układu SI dopuszczoną w Polsce warunkowo, ze względu na dużą liczbę dawkomierzy wyskalowanych w tej jednostce.

## Jednostka miary kermy w powietrzu w polu promieniowania X

Strumień fotonów promieniowania X to strumień cząstek nienaładowanych, które oddziałują elektromagnetycznie z elektronami, wybijając je z atomów i tworząc w ten spo-

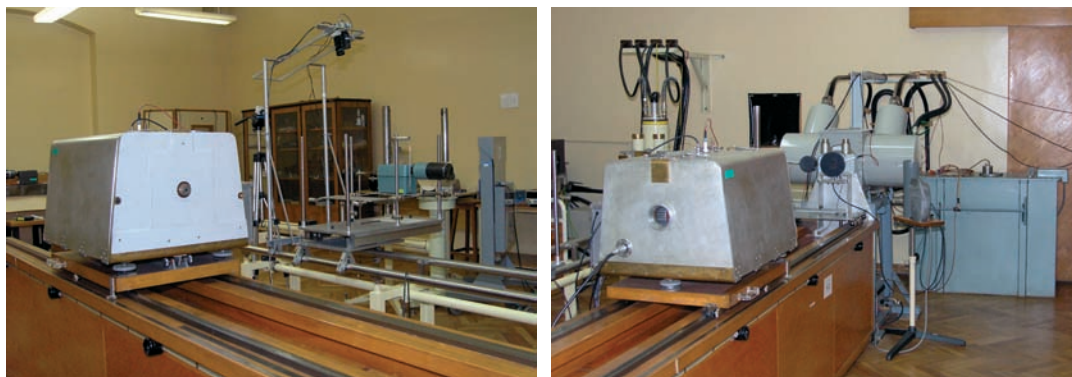
sób jony, a wybite elektrony są źródłem wtórnej jonizacji. Uwzględnienie wtórnej jonizacji w obliczeniach dawek pochłoniętych wymaga znajomości wielkości fizycznej zwanej kerma. Kerma (Kinetic Energy Released in MATter – Energia kinetyczna uwolniona w materii) jest sumą początkowych energii kinetycznych  $dE$  wszystkich naładowanych cząstek jonizujących uwolnionych przez nienaładowane cząstki w materiale o masie  $dm$

$$K = \frac{dE}{dm}$$

Jednostką tej wielkości fizycznej wprowadzoną decyzją CIPM w roku 1975 w układzie SI jest grej (Gy), czyli jeden dżul na kilogram (J/kg). Jednostka miary kermy w powietrzu jest o wiele bardziej użyteczna od jednostki miary dawki ekspozycyjnej i obecnie ją zastąpiła. Wielkość jonizacji jest proporcjonalna do energii. Zatem w komorach jonizacyjnych mierzona jest wartość kermy w powietrzu. Jednostka miary kermy w powietrzu stała się podstawową jednostką miary, z której poprzez przeliczenia uzyskuje się wartości innych jednostek miary stosowanych w dozymetrii, takich jak dawka pochłonięta, dawka równoważna czy dawka efektywna.

### Stanowisko wzorcowe do odtwarzania i przekazywania jednostki miary kermy w powietrzu w polu promieniowania X

W 1955 roku, w następstwie powołania do życia Instytutu Badań Jądrowych, Prezes Rady Ministrów zobowiązał Prezesa ówczesnego GUM do zorganizowania placówki wzorcowania preparatów promieniotwórczych i przyrządów do pomiaru promieniotwórczości (Zarządzenie Nr 179 Prezesa RM z dnia 18 lipca 1955 r.). Na mocy tego zarządzenia w latach 1956 – 1960 powstawała Pracownia Radiologiczna w zaadoptowanych do tego celu pomieszczeniach GUM. W momencie utworzenia Pracowni brak było w kraju jakichkolwiek wzorców odniesienia w tej dziedzinie i prace metrologiczne należało zaczynać od zera. Wszystkie stanowiska pomiarowe zostały zaprojektowane i wykonane w GUM. W latach 1961 – 1965 zbudowane zostały w laboratorium pomiarów promieniowania jonizującego wzorce definicyjne (pierwotne) dawki ekspozycyjnej promieniowania X i gamma. Wzorce te należą do nielicznej grupy urządzeń tego typu istniejących na świecie. Powyższe wzorce były porównywane z wzorcami BIPM. Porównania odbyły się dwukrotnie w latach sześćdziesiątych

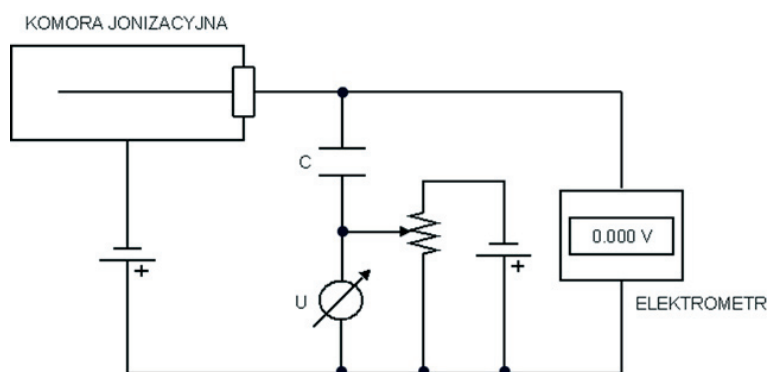


Wzorzec pierwotny Głównego Urzędu Miar – komora jonizacyjna o ściankach powietrznych dla napięcia lampy rentgenowskiej od 60 kV do 300kV

i w 1996 r. W latach 1975 – 1990 laboratorium brało udział w porównaniach państw Europy Wschodniej (RWPG).

Stanowisko wzorcowe służy do odtwarzania i przekazywania jednostki miary dawki ekspozycyjnej, jednostki miary mocy dawki ekspozycyjnej, jednostki miary kermy w powietrzu i jednostki miary mocy kermy w powietrzu promieniowania X w zakresie energii fotonów 7 keV – 250 keV. W tym zakresie energii fotonów wzorcem pierwotnym jednostki miary jest zespół trzech komór jonizacyjnych, o ściankach powietrznych pokrywających zakres energetyczny promieniowania X w trzech zakresach napięcia rentgenowskiego: 8 – 20 kV, 20 – 50 kV, 60 – 300 kV.

Stanowisko wzorcowe składa się z dwóch stanowisk pomiarowych. W skład każdego stanowiska wchodzi komora jonizacyjna (wzorec pierwotny), połączona ze źródłem napięcia polaryzacji i urządzeniem do pomiaru ładunków jonizacyjnych i komora monitorowa z układem pomiarowym. Urządzenie do pomiaru ładunków jonizacyjnych komory wzorcowej i układ pomiarowy komory monitorowej jest wspólny dla obu stanowisk.



Schemat układu do pomiaru ładunków jonizacyjnych oparty na metodzie kompensacji Townsenda

Uzupełnieniem są urządzenia do pomiaru ciśnienia, temperatury i wilgotności powietrza. Jako urządzenia pomocnicze stosuje się aparaty rentgenowskie będące źródłami promieniowania, ławy ze stanowiskiem kołpaka lampy rentgenowskiej z wyposażeniem (przesłona wiązki, filtry), katetometr do precyzyjnego ustawienia komór w wiązce promieniowania, zasilacze i zestaw telewizji przemysłowej do obserwacji i odczytu wskazań przyrządów w wiązce promieniowania.

Wzorec pierwotny bierze udział w porównaniach międzynarodowych w BIPM. Za pomocą wzorca pierwotnego wzorcowane są wzorce niższego rzędu.

## Odtwarzanie jednostki miary kermy w powietrzu w polu promieniowania X

Poprawną wartość kermy w powietrzu uzyskuje się przy użyciu wzorca pierwotnego (komory jonizacyjnej), odczytując wartość zebranego ładunku elektrycznego i wyliczając poprawną wartość kermy w powietrzu przy użyciu następującego wzoru

$$K = \frac{Q}{m} \cdot \frac{W}{e} \cdot \frac{1}{1 - \bar{g}} \cdot \Pi k_i$$

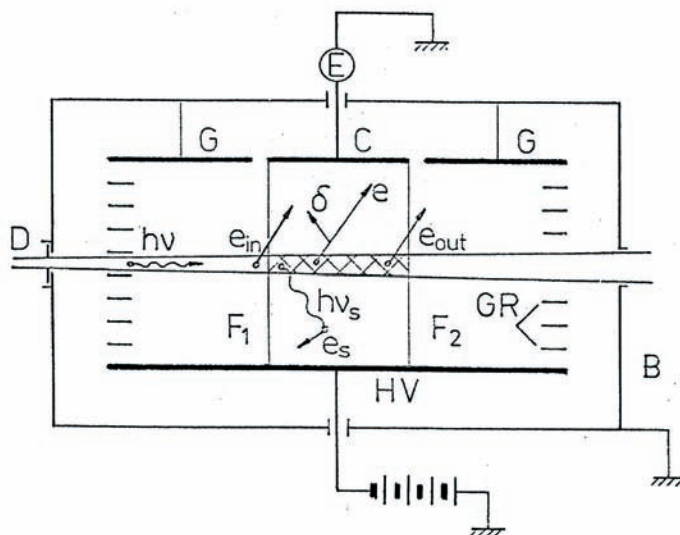
gdzie

$Q/m$  – mierzony ładunek prądu jonizacyjnego na jednostkę masy powietrza w komorze wzorcowej,

$W/e$  – średnia energia zużyta przez elektron o ładunku  $e$  na wytworzenie pary jonów,

$\bar{g}$  – stosunek energii wtórnych cząstek naładowanych, zużytej na wytworzenie promieniowania hamowania, do sumy energii tych cząstek,

$\Pi k_i$  – iloczyn współczynników korekcyjnych użytych do określenia kermy w powietrzu.



Schemat budowy komory jonizacyjnej płasko-równoległej o ściankach powietrznych

Wyniki pomiarów korygowane są do warunków odniesienia, gdyż w przypadku komory jonizacyjnej substancją napromieniowywaną jest powietrze zawarte wewnątrz komory. Znając dokładnie długość elektrod (C) i średnice diaphragmy (D) można obliczyć objętość pomiarową komory jonizacyjnej. Znając objętość pomiarową komory jonizacyjnej i gęstość powietrza można obliczyć jego masę. Powietrze może swobodnie przepływać do, jak i z komory jonizacyjnej. Zatem gęstość powietrza będzie zależała od temperatury i ciśnienia. Na podstawie odczytu wartości temperatury i ciśnienia wyliczany jest współczynnik poprawkowy wyrażony wzorem

$$k_D = \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0}$$

gdzie

$p_0$  – ciśnienie odniesienia równe 1013,25 hPa,

$p$  – ciśnienie atmosferyczne w trakcie realizacji pomiarów wyrażone w hPa,

$T$  – temperatura powietrza w trakcie realizacji pomiarów równa  $273,15 + t$ , gdzie  $t$  temperatura wyrażona w °C,

$T_0$  – temperatura odniesienia równa 293,15 K.

Na stanowisku wzorcowym laboratorium odtwarza jednostkę miary kermy w powietrzu z niepewnością standardową 0,26 %.

## Przekazywanie jednostki miary kerry promieniowania X w powietrzu

Wzorcowanie dawkomierzy wykonuje się metodą podstawienia komór jonizacyjnych w polu promieniowania X, polegającą na kolejnym pomiarze komorą wzorcową (E), a następnie komorą wzorcowaną. Środki czynne komór muszą być umieszczone w tym samym, dowolnie wybranym, ustalonym punkcie pomiarowym.



Schemat stanowiska pomiarowego do wzorcowania w polu promieniowania X

Przy pomiarach musi być zapewniona powtarzalność dawki promieniowania X i innych parametrów radiacyjnych. Powtarzalność dawki uzyskuje się poprzez urządzenie monitorowe (komora monitorowa) w postaci przelotowej komory jonizacyjnej (KM) wraz z sprzężonym z nią układem migawki, który stanowią przesłony ołowiane odcinające promieniowanie (M).

## Podsumowanie

Opisane stanowisko wzorcowe jest jedynym tego typu w kraju. W momencie powstania w latach 1961 – 1965 wzorce jednostki miary na tym stanowisku były wzorcami najwyższej klasy i należały do nielicznej grupy urządzeń tego typu istniejących na świecie. Stanowisko to było przez szereg lat wzorcem państwowym jednostki miary dawki ekspozycyjnej w polu promieniowania X.

Laboratorium Promieniowania Jonizującego przekazuje jednostkę miary do Krajowych Laboratoriów Wzorcujących (akredytowanych) oraz wzorcuje przyrządy pomiarowe stosowane w nauce, przemyśle i ochronie radiologicznej. Obecnie czynione są próby modernizacji stanowiska w zakresie elektroniki i metody pomiaru małych ładunków jonizacyjnych oraz automatyzacji procesu pomiarowego. Planowane jest również rozszerzenie stanowiska o możliwość wzorcowania urządzeń służących do określania napięcia na lampie rentgenowskiej (kilowoltomierze) oraz urządzeń do określania wielkości ogniska aparatów rentgenowskich. Planowane jest również przystosowanie stanowiska do wykorzystania dla potrzeb brachyterapii (igła fotonowa). Czynione są również starania o przywrócenie wzorców pierwotnych jednostki miary na tym stanowisku do rangi państwowych wzorców jednostki miary.

Godnym podkreślenia również jest fakt członkostwa, od 1970 roku, byłego Kierownika Laboratorium Pana dr. inż. Zbigniewa Referowskiego w Komitecie Doradczym Wzorców Promieniowania Jonizującego (CCERI), co stanowiło nie tylko uznanie dla jego osobistego autorytetu, ale także świadczyło o randze stanowiska pomiarowego i laboratorium.

*Ewa Kaczorowska i Adrian Knyziak  
Zakład Promieniowania i Wielkości Wpływających*