

BIOFIZYKA RADIACYJNA

wykład #1

Krzysztof Wojciech Fornalski

Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska





INFORMACJE ORGANIZACYJNE

Semestralny plan wykładu

- ◆ Podstawy fizyki radiacyjnej
- ◆ Pochłanianie promieniowania
- ◆ Podstawy dozymetrii i mikrodozymetrii ← Kolokwium 1
- ◆ Biofizyczne zjawiska w napromienionej komórce
- ◆ Biodozymetria
- ◆ Elementy biofizyki nowotworzenia
- ◆ Przykłady modelowania ← Kolokwium 2
- ◆ Elementy ochrony radiologicznej
- ◆ Dane epidemiologiczne, niskie dawki

LITERATURA #1

◆ Edward L. Alpen „Radiation Biophysics”, (2nd edition) Academic Press 1998

- Podstawowe definicje i przypomnienia
- Oddziaływanie promieniowania z materią
- Podstawy chemii radiacyjnej wody
- Modele przeżywalności komórkowych, krzywe przeżywalności
- Radiobiologia i procesy nowotworzenia
- Efekty stochastyczne, efekty późne, efekty genetyczne
- Biologia skażeń wewnętrznych
- Źródła narażenia na promieniowanie

LITERATURA #2

- ◆ Frank H. Attix „Introduction to radiological physics and radiation dosimetry”, Wiley-Vch 2004
 - Kompleksowy wstęp do fizyki radiacyjnej i dozymetrii
 - Książka polecana jako literatura do pierwszych kilku wykładów

LITERATURA #3

◆ C.S. Sureka, C. Armpilia, „Radiation biology for medical physicists”, Taylor&Francis, 2017

- Kompleksowy wstęp do radiobiologii
- Biologia komórki i nowotworu
- Zjawiska radiobiologiczne w komórce
- Odpowiedź biologiczna komórki na promieniowanie
- Podstawy radioterapii
- Biodozymetria

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- ◆ L. Dobrzyński (ed), „Zarys nukleoniki”, PWN, 2017 – *podstawy podstaw fizyki radiacyjnej, w internecie istnieje starsza wersja książki (jako skrypt), pod nazwą „Podstawy nukleoniki”*
- ◆ G. Saha, „Physics and radiobiology of nuclear medicine”, (4th ed), Springer, 2013 – *w zasadzie tę książkę można dać jako literaturę główną*
- ◆ Gaccia, „Radiobiology for the radiologist”, Wolters Kluwer, 2011
- ◆ W. Heitler, „The quantum theory of radiation”, Oxford 1954 – *fizyka radiacyjna dla zaawansowanych*
- ◆ A. Kaul (ed.), „Medical Radiological Physics”, Springer, 2012
- ◆ H. Rossi, M. Zaider, „Microdosimetry and its applications”, Springer 1996 – *szczegółowo o mikrodozymetrii*
- ◆ A. Rubin, „Compendium of biophysics”, Wiley, 2017 – *biofizyka jako taka*
- ◆ C. Porta, S. Zapperi, „The physics of cancer”, Cambridge University Press, 2017
- ◆ Ch. Sanders, „Radiation hormesis and the linear-no threshold assumption”, Springer 2010 – *tematyka łamania liniowości dla małych dawek, zestawienie wielu danych epidemiologicznych*
- ◆ Ch. Sanders, „Radiobiology and radiation hormesis”, Springer 2017 – *j.w. w ujęciu radiobiologicznym*
- ◆ D. Sivia, J. Skilling, „Data analysis – a Bayesian tutorial”, (2nd ed.), Oxford 2006 – *podręcznik do bayesowskiej analizy danych*

Informacje organizacyjne #1

◆ Warunki zaliczenia wykładu

- Maksymalna liczba punktów: 100
- 2 kolokwia (po 20 punktów)
- Egzamin pisemny (50 punktów)
- Egzamin ustny (10 punktów)

◆ Możliwe dodatkowe punkty:

- Obecność na wykładzie: 0,5 pkt
- Dodatkowe prace - do ustalenia

Informacje organizacyjne #2

◆ Ocena końcowa

- 51-60 pkt – 3
- 61-70 pkt – 3,5
- 71-80 pkt – 4
- 81-90 pkt – 4,5
- 91-100 pkt - 5

Informacje organizacyjne #3

◆ Konsultacje

- Po uprzednim umówieniu się z prowadzącym, preferowane czwartki ok. 17
- E-mail: krzysztof.fornalski@gmail.com

◆ Poprawki kolokwii

- Na egzaminie ustnym

Uwaga ogólna

- ◆ We wszelkich sprawach, tych miłych i tych mniej miłych, niejasnościach, pytaniach etc. proszę do mnie śmiało pisać:

krzysztof.fornalski@gmail.com

krzysztof.fornalski@gkpge.pl

krzysztof.fornalski@fuw.edu.pl



PRZYPOMNIENIE PODSTAWOWYCH INFORMACJI, KTÓRE KAŻDY STUDENT WIEDZIEĆ POWINIEN

Biofizyka radiacyjna

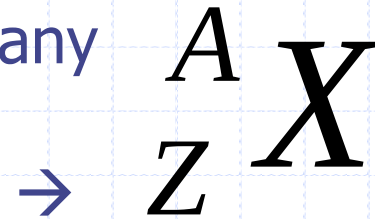
- ◆ Biofizyka – opis zjawisk biologicznych za pomocą aparatu matematycznego
- ◆ Fizyka radiacyjna – dział fizyki jądrowej zajmujący się promieniowaniem, w szczególności promieniowaniem jonizującym, jego powstawaniem i oddziaływaniem z materią

Podstawowe informacje

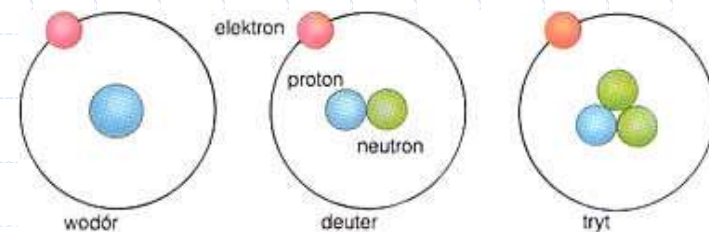
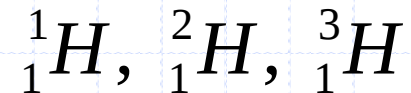
- ◆ Na potrzeby wykładu zakłada się, iż Słuchacz zna podstawowe pojęcia: zjawisko promieniotwórczości, pojęcie izotopu, definicja czasu połowicznego zaniku, zjawisko jonizacji, budowa atomu i jądra atomowego, model powłokowy jądra atomowego, rodzaje promieniowania jonizującego, podział promieniowania (jonizujące/niejonizujące, jądrowe/niejądrowe, elektromagnetyczne/korpuskularne etc), przemiana alfa, beta, gamma, powstawanie promieniowania X, podstawowa budowa komórki, DNA

Terminologia - przypomnienie

- ◆ **Nuklid** – atom scharakteryzowany liczbą atomową Z oraz liczbą masową A



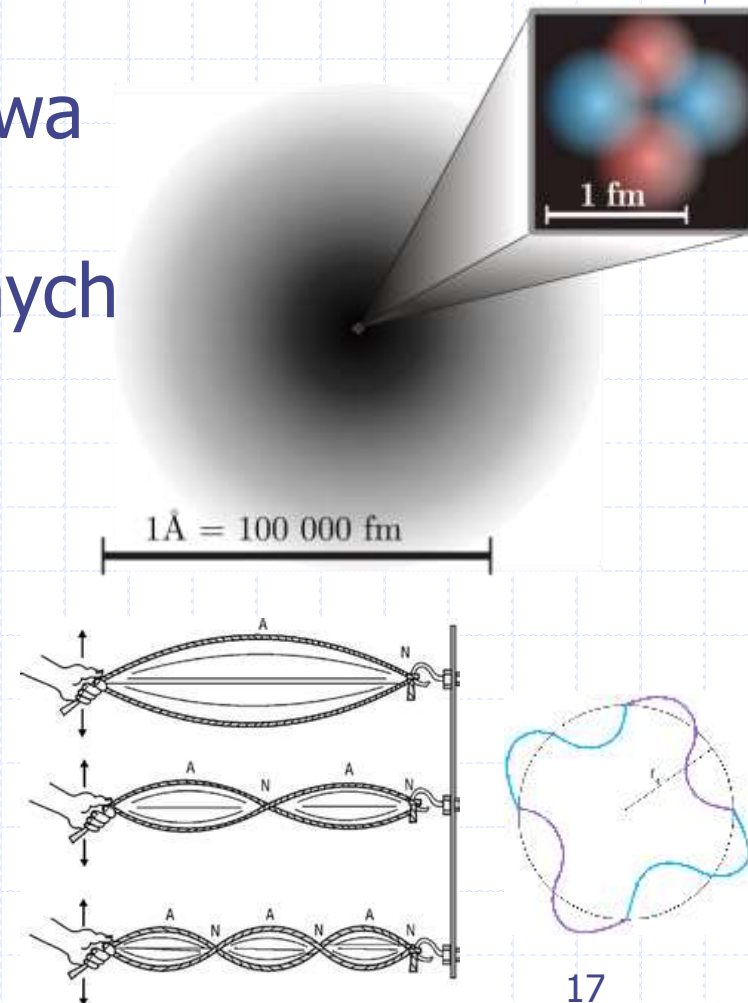
- ◆ Z oznacza sumę protonów, a A sumę nukleonów (protonów+neutronów) w jądrze
- ◆ **Izotop** – pierwiastek o danej liczbie protonów $Z=\text{const}$ oraz zmiennej liczbie neutronów; np. izotopy wodoru:



-



- ◆ rozmyta chmura elektronów
- ◆ maksima prawdopodobieństwa znalezienia elektronów przypadają w ściśle określonych odległościach od jądra
- ◆ fale stojące elektronów
- ◆ jądro posiada wewnętrzną strukturę (powłoki jądrowe)
→ model powłokowy jądra

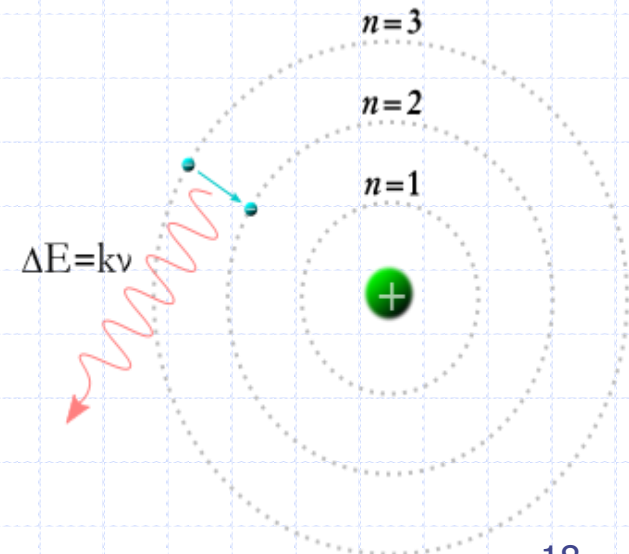


Emisja promieniowania



◆ Jak ma się to do emisji promieniowania???

- elektrony na powłokach elektronowych (skala atomowa) a nukleony na powłokach jądrowych (skala jądrowa) mogą zmieniać swój **poziom energetyczny**
- dodatnia różnica w energii między poziomami musi być oddana do otoczenia
- emisja promieniowania jako fala elektromagnetyczna (foton)
- Niekiedy jako cząstka (niestabilność jądra)



Promieniowanie – różne definicje

◆ 2 popularne definicje:

- strumień cząstek (lub fal elektromagnetycznych)
- przenoszenie energii na odległość

◆ Powstawanie promieniowania

- przemiany w obrębie całego atomu
- przemiany wewnątrz jądra atomowego

◆ Podziały promieniowania

- jonizujące / niejonizujące
- korpuskularne / falowe

◆ **My będziemy zajmować się promieniowaniem jonizującym, przede wszystkim elektromagnetycznym**

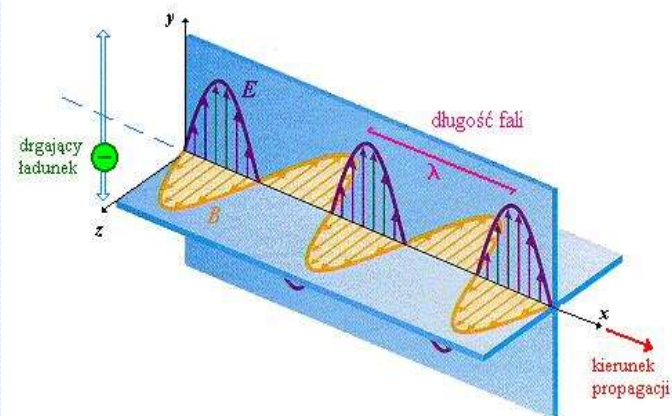
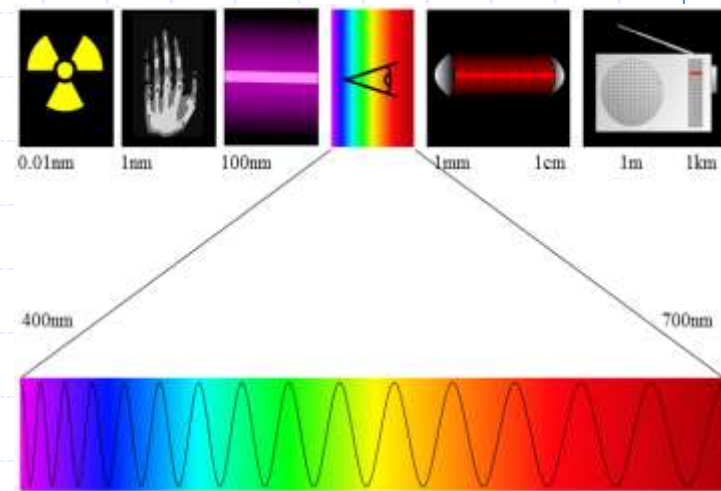
Fala elektromagnetyczna

◆ Foton

- cząstka czy fala?
- energia a długość fali

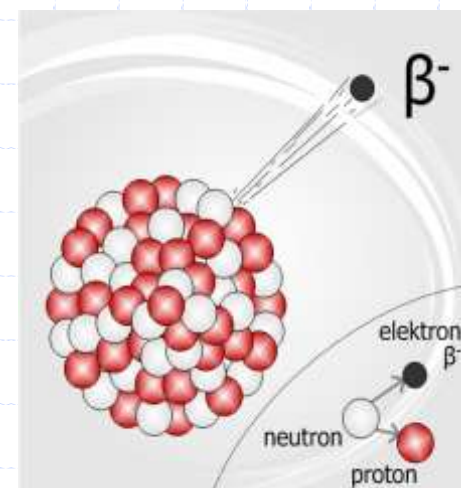
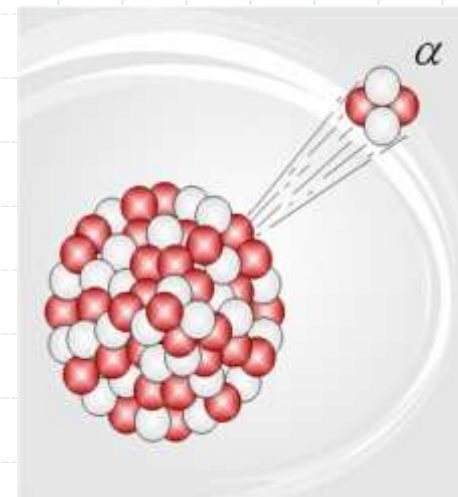
◆ Nas interesuje promieniowanie:

- **X** (rentgenowskie) – powstaje m.in. w wyniku przeskoku elektronu na powłoce atomowej
- **gamma** (γ) – powstaje w wyniku przeskoków nukleonów wewnątrz jądra (przez co prom. gamma ma większą energię)



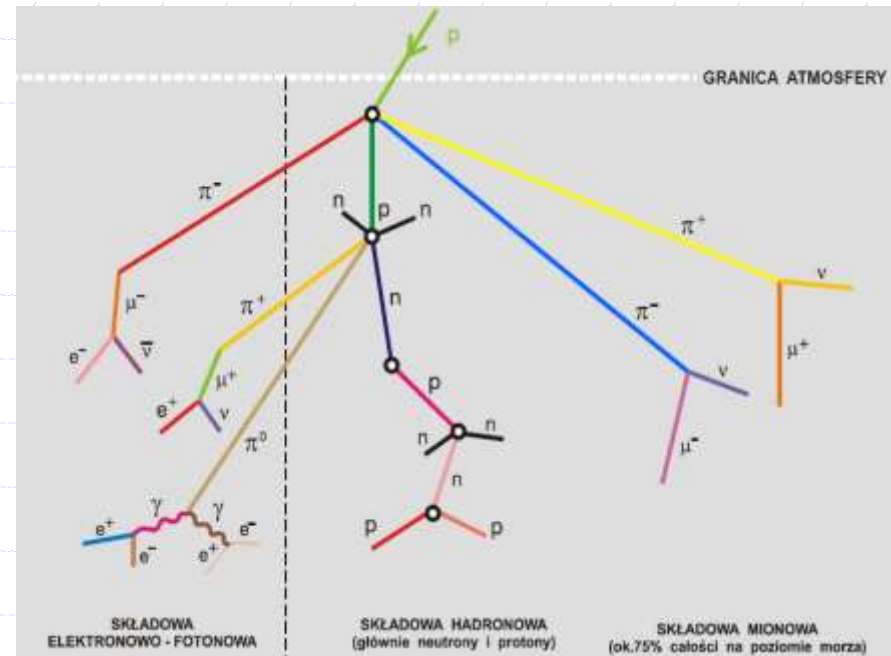
Promieniowanie korpuskularne

- ◆ Promieniowanie alfa (α)
 - strumień jąder helu-4 ($2p$ i $2n$)
 - bardzo krótkozasięgowe (kilka cm), silnie jonizujące
 - po rozpadzie α pojawia się zazwyczaj rozpad γ
- ◆ Promieniowanie beta (β)
 - strumień elektronów (β^-) lub pozytonów (β^+)
 - krótkozasięgowe (kilkadziesiąt cm), słabo przenikliwe
 - skutek oddziaływania zbliżony do prom. γ
- ◆ Powyższe dwa typy są przykładem promieniowania jonizującego
 - jonizacja – oddzielanie elektronów od jąder

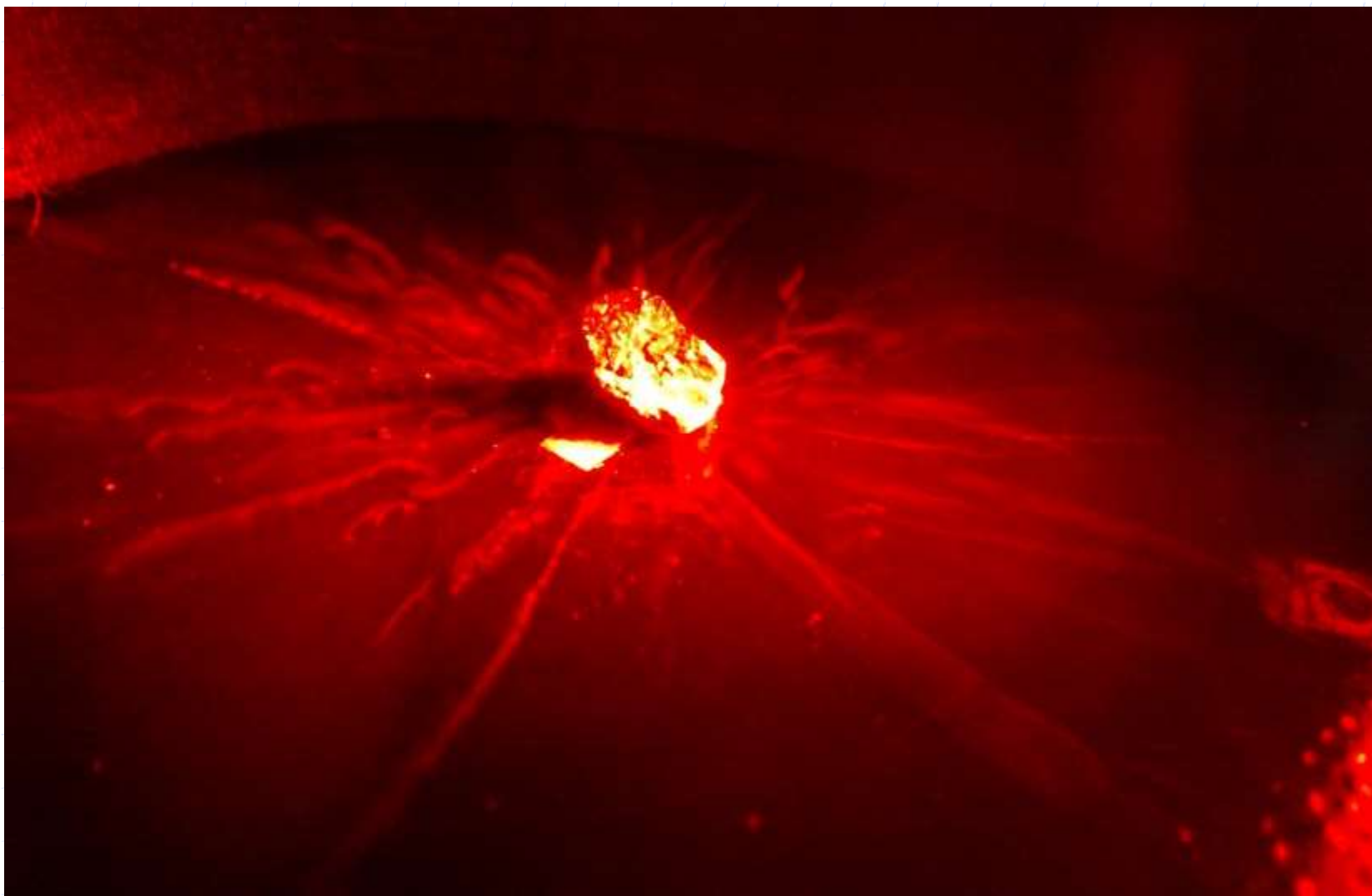


Promieniowanie korpuskularne – pozostałe typy

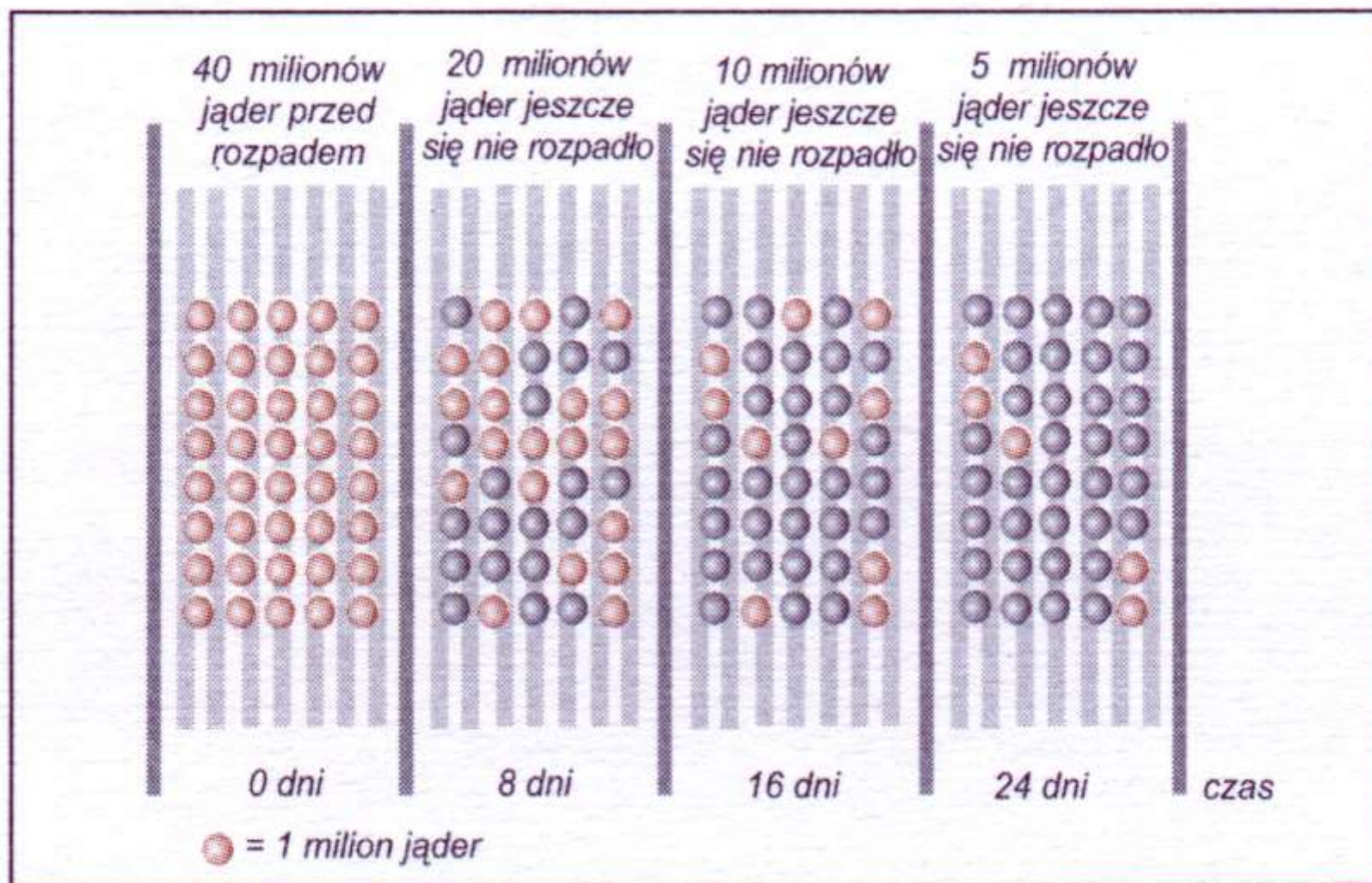
- ◆ Promieniowanie neutronowe
 - strumień obojętnych elektrycznie neutronów → jonizacja nie wprost
 - **promieniowanie to występuje m.in. we wnętrzu reaktorów jądrowych**
 - skomplikowana osłona: wodór, ale nie ołów!
- ◆ Promieniowanie protonowe
- ◆ Promieniowanie jonowe
 - np. w akceleratorach
- ◆ Promieniowanie mionowe
 - powstaje w górnych warstwach atmosfery
- ◆ Promieniowanie neutrinowe
 - praktycznie całkowicie przenikliwe



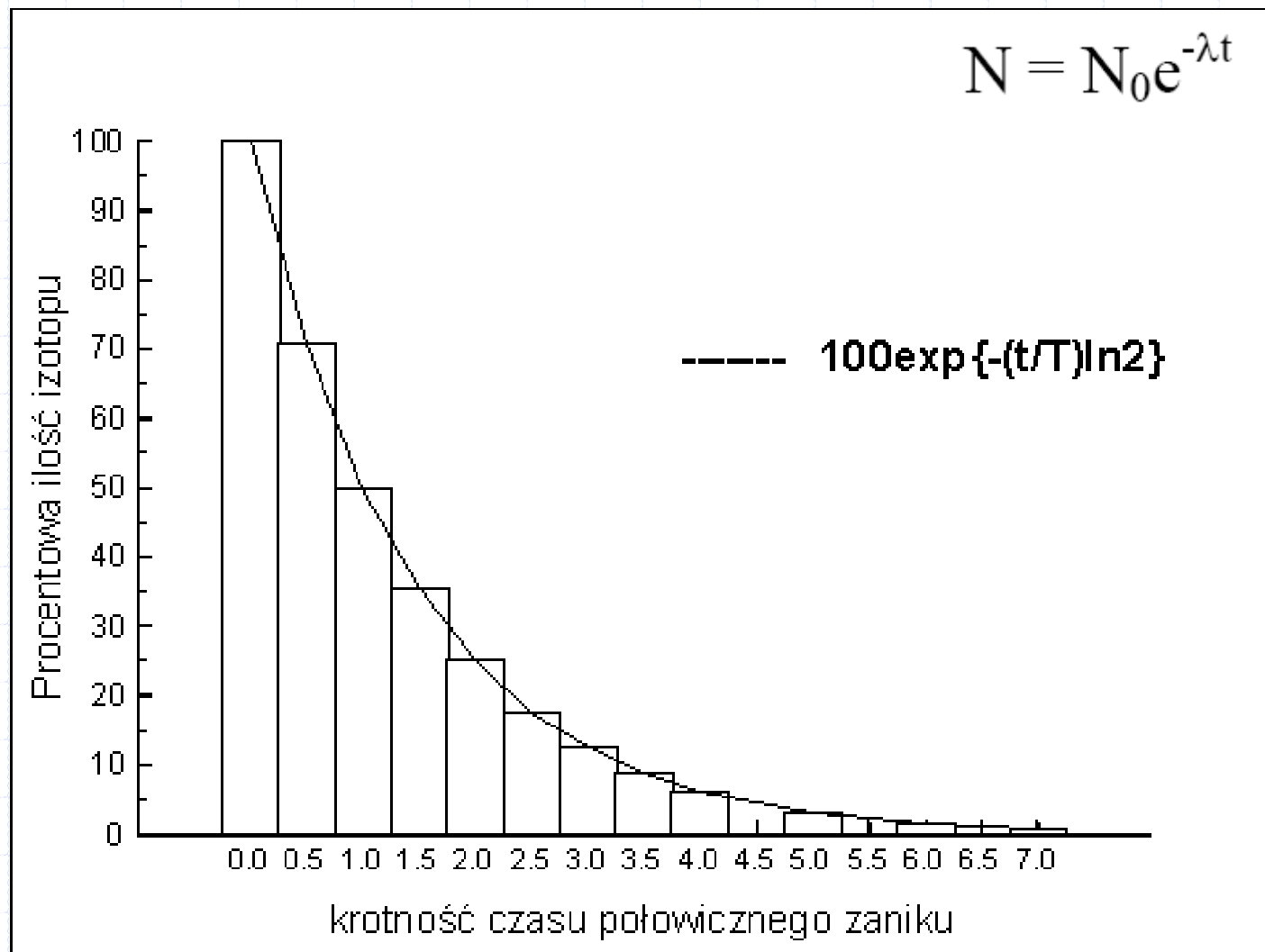
Jonizacja – na przykładzie komory mgłowej Wilsona



Prawo rozpadu promieniotwórczego - przypomnienie



Krzywa rozpadu promieniotwórczego





POWSTAWANIE PROMIENIOWANIA GAMMA/X LAMPY RENTGENOWSKA

Powstawanie promieniowania gamma

- ◆ Reakcja jądrowa – jądra atomowe izotopów promieniotwórczych po rozpadzie (przemianie promieniotwórczej) znajdują się w stanie wzbudzonym. Powrót do stanu podstawowego, o niższej energii, powoduje emisję fotonu gamma.
- ◆ Nukleosynteza – dwa jądra atomowe zderzają się, tworząc nowe jądro w stanie wzbudzonym. Jego przejściu do stanu podstawowego może towarzyszyć emisja jednego lub wielu kwantów gamma.
- ◆ Anihilacja – zderzenie cząstki i antycząstki, np. elektronu i pozytonu, powoduje zniknięcie obu tych cząstek i emisję co najmniej dwóch fotonów gamma.
- ◆ Rozpady cząstek elementarnych – fotony gamma mogą być produktami rozpadu wielu nietrwałych cząstek elementarnych, np. neutralny pion rozpada się najczęściej na dwa fotony.
- ◆ Promieniowanie hamowania i promieniowanie synchrotronowe – wysokoenergetyczne cząstki naładowane (najczęściej elektrony) poruszające się w silnym polu elektrycznym, np. jąder atomowych, lub polu magnetycznym mogą emitować fotony promieniowania gamma.
- ◆ Odwrotne rozpraszanie Comptona – wysokoenergetyczne elektrony mogą zderzać się z niskoenergetycznymi fotonami (np. promieniowania tła) i przekazywać im energię, zmieniając je w kwanty gamma.

Powstawanie promieniowania gamma i X

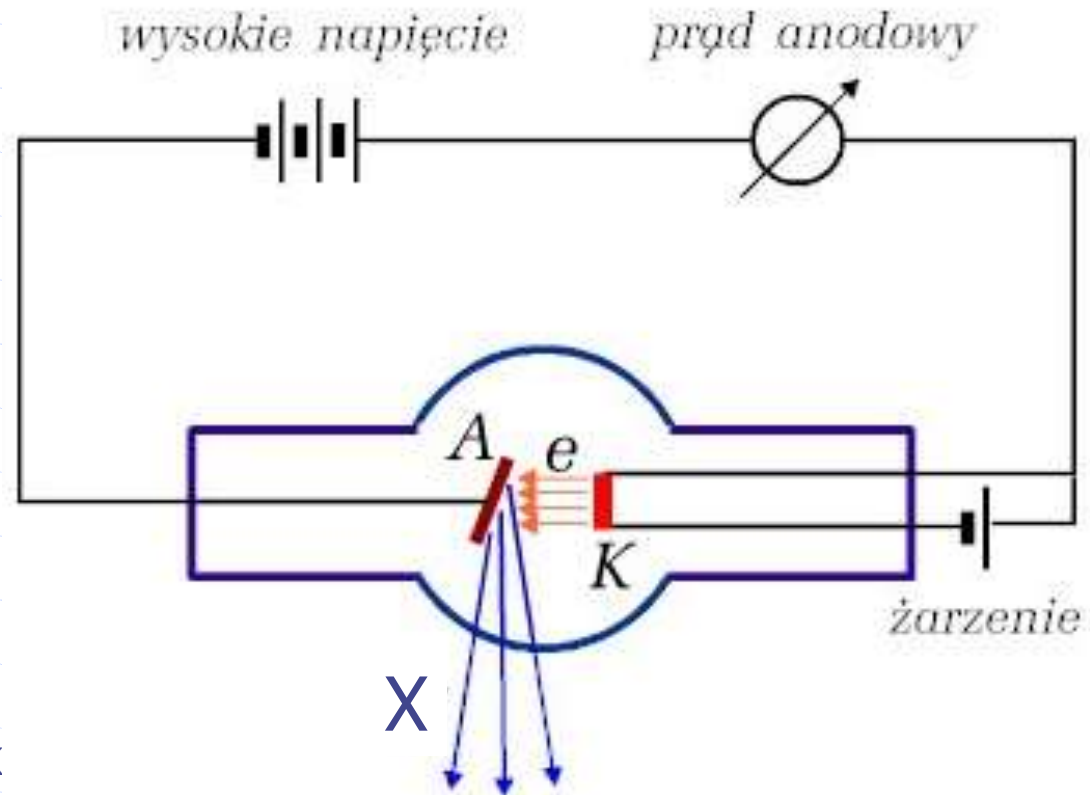
- ◆ Jednak najczęściej promieniowanie gamma powstaje w wyniku przemian wewnątrz jądra atomowego (jest to więc przykład promieniowania jądrowego)
- ◆ Promieniowanie X powstaje w wyniku przemian w skali atomowej (powłoki elektronowe – jest to więc przykład promieniowania atomowego)
- ◆ Promieniowanie X różni się od gamma tylko energią i pewnymi właściwościami, jednakże granica między nimi jest umowna (~ 50 keV) i bardzo płynna
- ◆ To, czy mamy do czynienia z promieniowaniem gamma czy X decyduje sposób powstania

Cechy promieniowania X

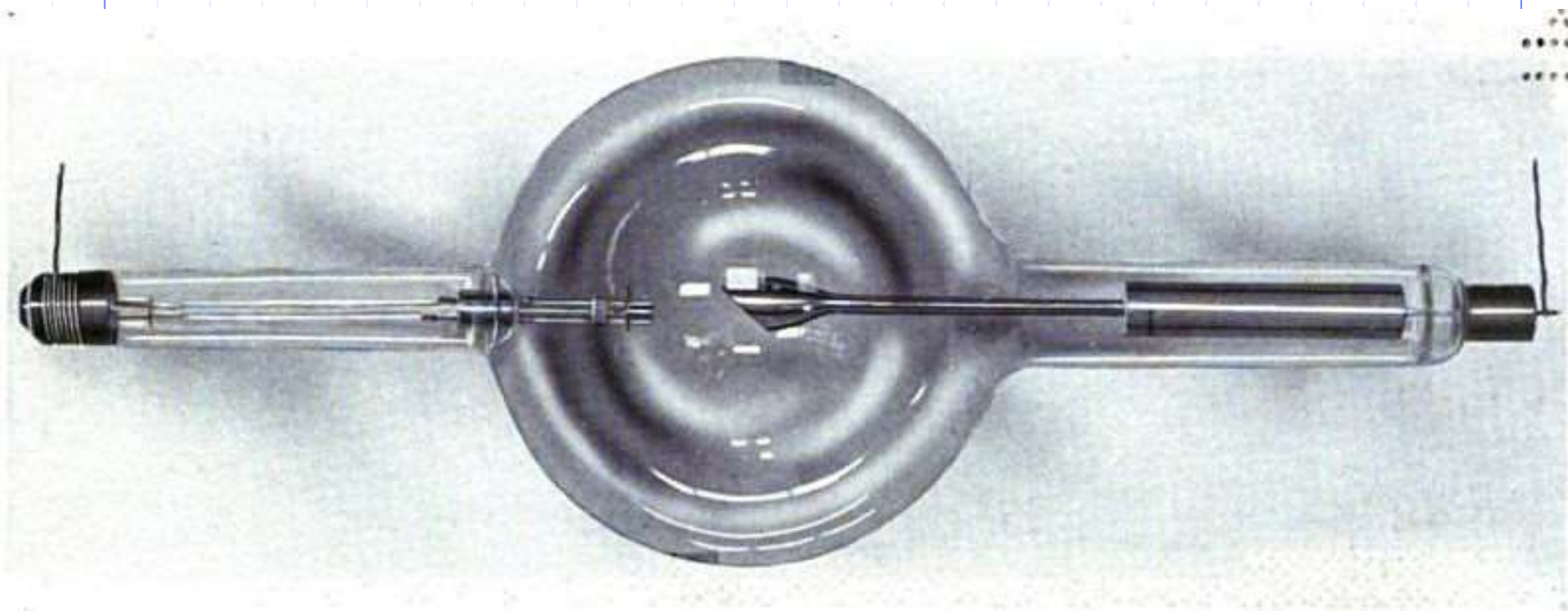
- ◆ Zbliżone do promieniowania gamma, lecz posiadające niższą energię
- ◆ Różne nazwy: rentgenowskie, X, RTG
- ◆ W zależności od długości fali (czyli energii) wyróżniamy dwa typy promieni X:
 - Od 5 do 100 pm – twarde prom. X
 - Od 0,1 do 10 nm – miękkie prom. X

Lampa rentgenowska

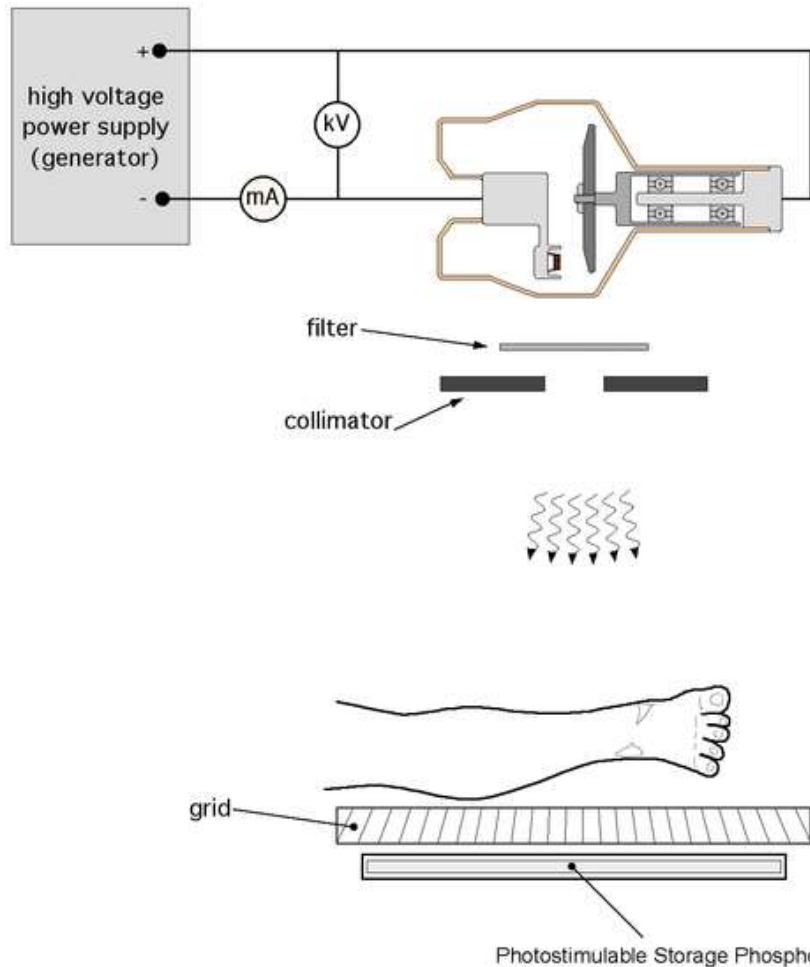
- A – anoda (+); K – katoda (-)
- Pod wpływem dużego napięcia istnieje różnica potencjałów między A oraz K
- Dodatkowo żarzenie K ułatwia uwalnianie elektronów, które biegną do A, gdzie emitują promieniowanie X



Lampa rentgenowska - anoda nieruchoma



Lampa rentgenowska - anoda obrotowa

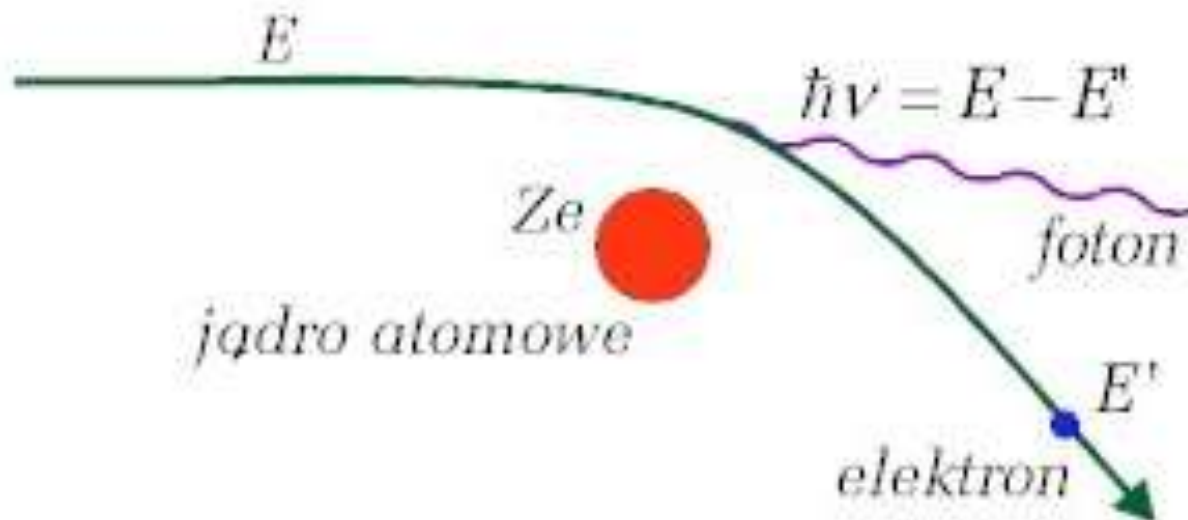


Lampa rentgenowska

- ◆ Lampa rentgenowska emituje promieniowanie X na dwa sposoby:
- ◆ tzw. promieniowanie hamowania
- ◆ tzw. promieniowanie charakterystyczne
- ◆ Oba zjawiska zostaną szczegółowo omówione przy okazji tematu oddziaływania promieniowania beta z materią. Teraz zostaną tylko wspomniane

Promieniowanie hamowania

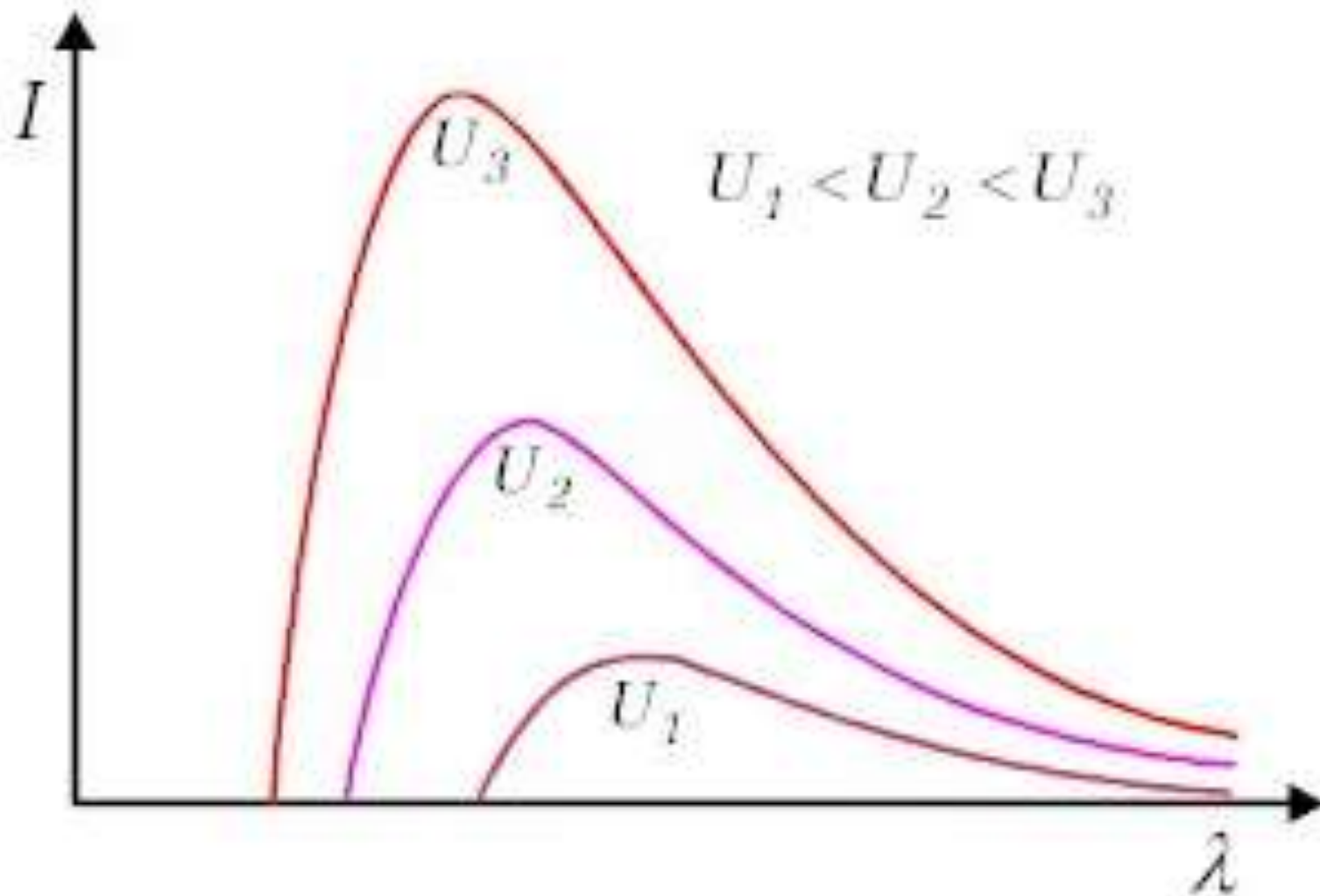
- ◆ Niem. Bremsstrahlung
- ◆ Powstaje w wyniku hamowania rozpędzonej naładowanej cząstki (np. elektronu) w polu jądra atomowego



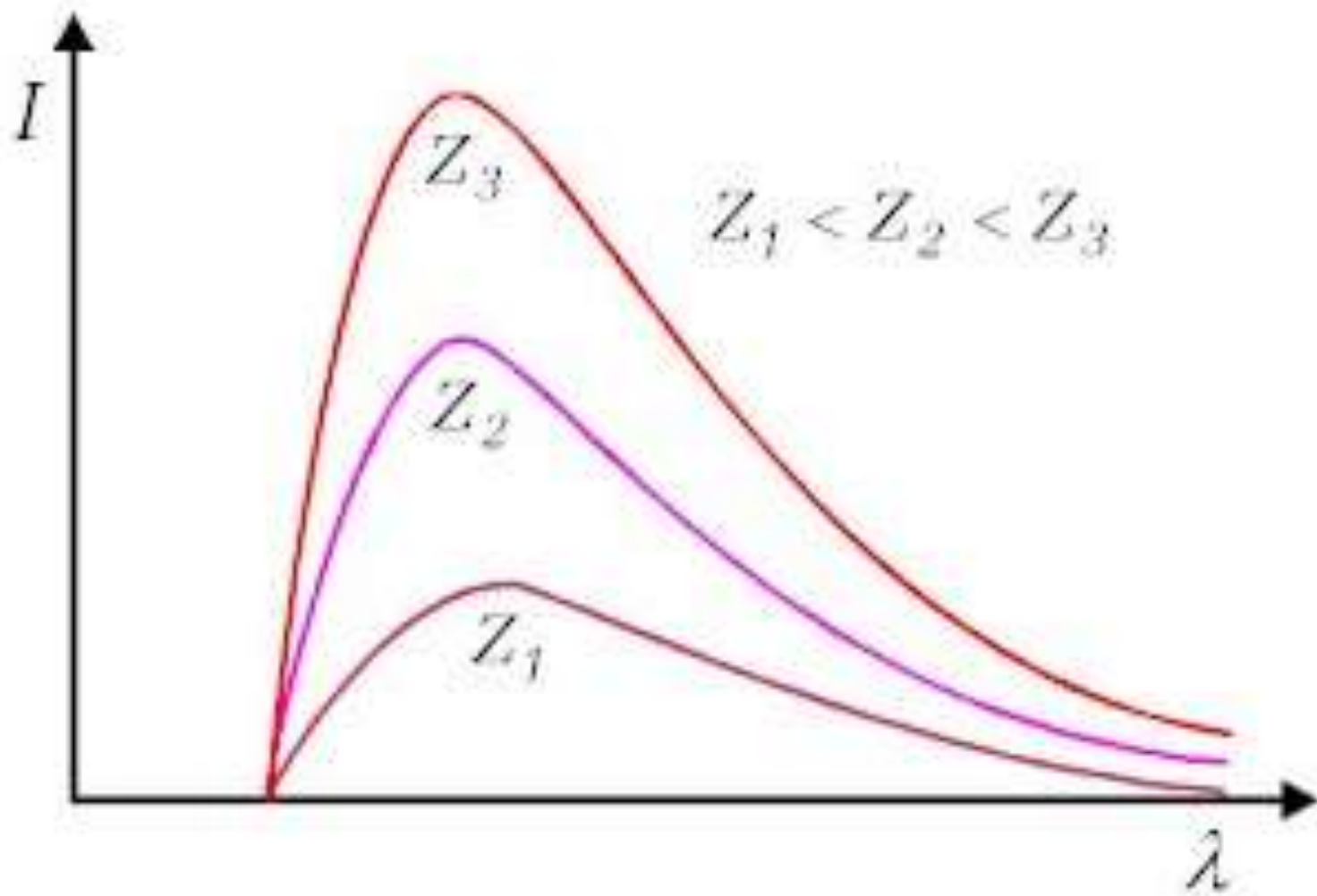
Promieniowanie hamowania

- ◆ W lampie rentgenowskiej powstaje w wyniku oddziaływania elektronów z anodą
- ◆ Jest głównym źródłem promieniowania X w aparatach RTG
- ◆ Posiada ciągły rozkład energii emitowanych fotonów
- ◆ Promienie X mają tym większą energię, im większą energię mają hamowane elektrony
- ◆ Więcej na temat fizycznego zjawiska emisji promieniowania hamowania powiemy przy okazji omawiania oddziaływania promieniowania beta z materią

Widmo energetyczne strumienia fotonów w zależności od napięcia



Widmo energetyczne strumienia fotonów w zależności od liczby atomowej anody

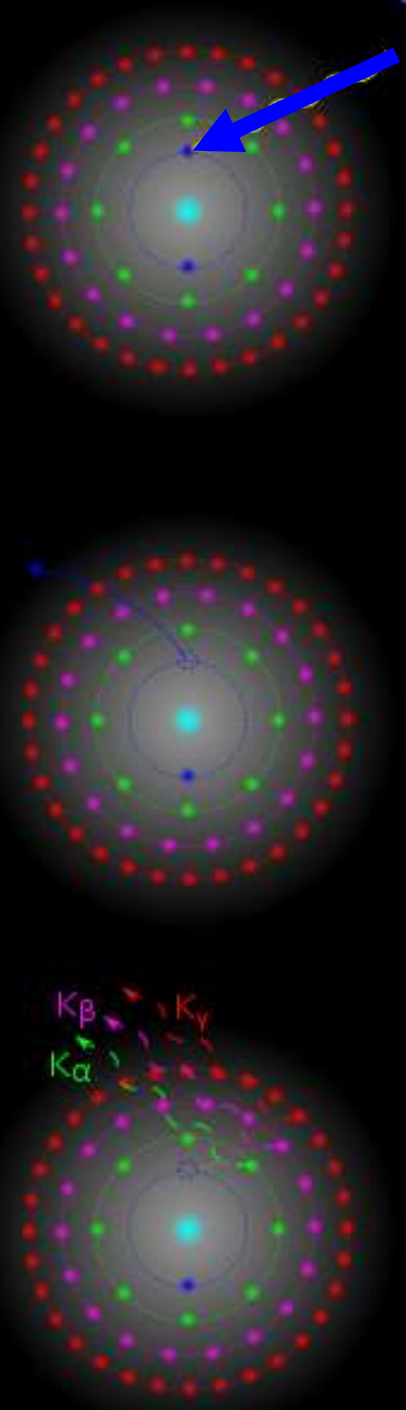


Promieniowanie charakterystyczne

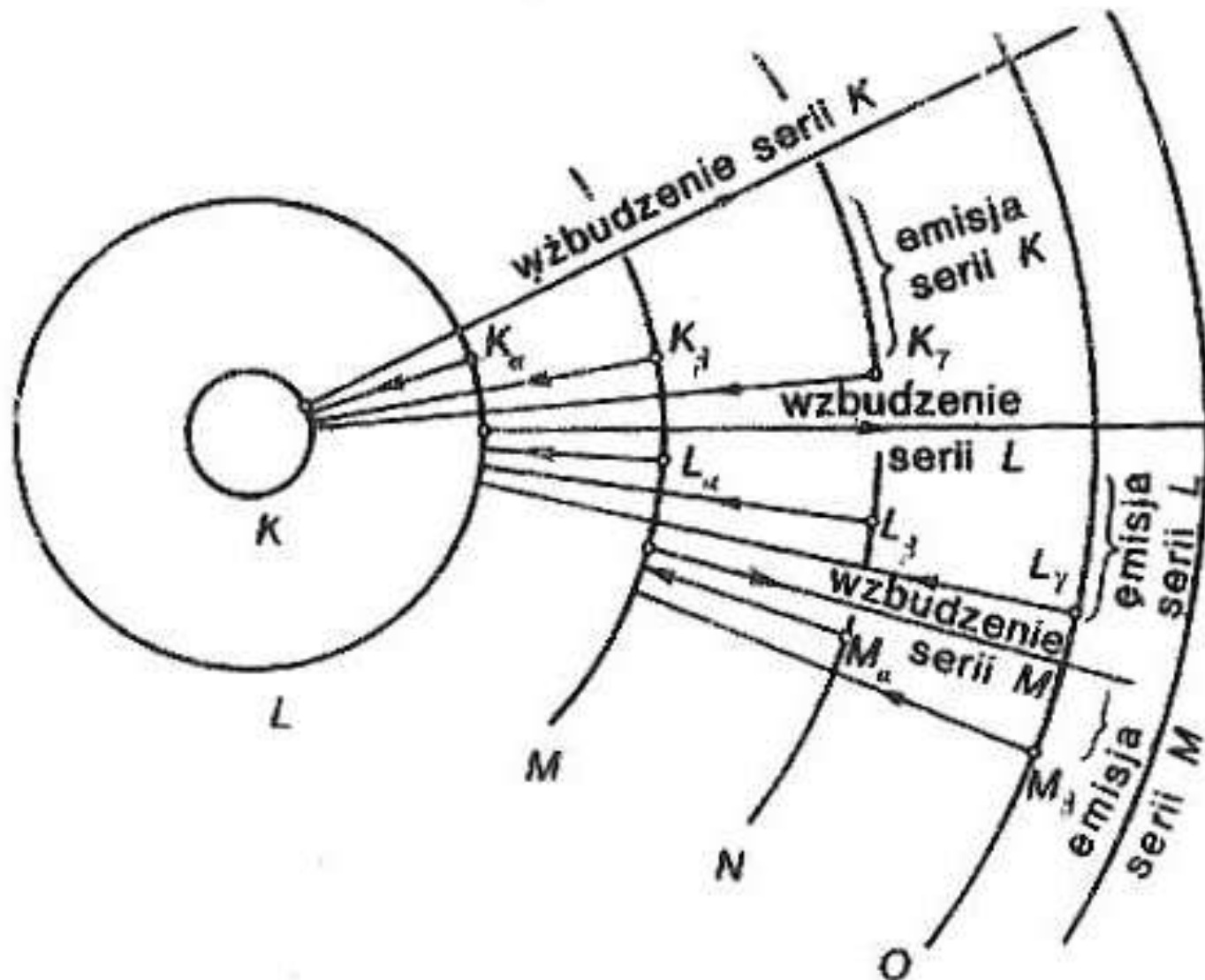
- ◆ Drugi sposób powstawania prom. X
- ◆ Fotony X emitowane są na skutek przejścia elektronu z wyższej powłoki atomowej na niższą, skąd był wcześniej wybity
- ◆ Widmo jest dyskretne, emitowane fotony posiadają ściśle określone energie
- ◆ Więcej na temat fizycznego zjawiska emisji promieniowania charakterystycznego powiemy przy okazji omawiania oddziaływania promieniowania beta z materią

Promieniowanie charakterystyczne

- ◆ 1 krok – następuje wzbudzenie atomu anody (przekazanie energii) np. przez padający elektron z katody
- ◆ 2 krok – z atomu może być wybity elektron z jednej z niskich powłok
- ◆ 3 krok – na puste miejsce przechodzą elektrony z wyższych powłok (o wyższych energiach) emitując nadmiar energii w postaci fotonu (promieniowania X)

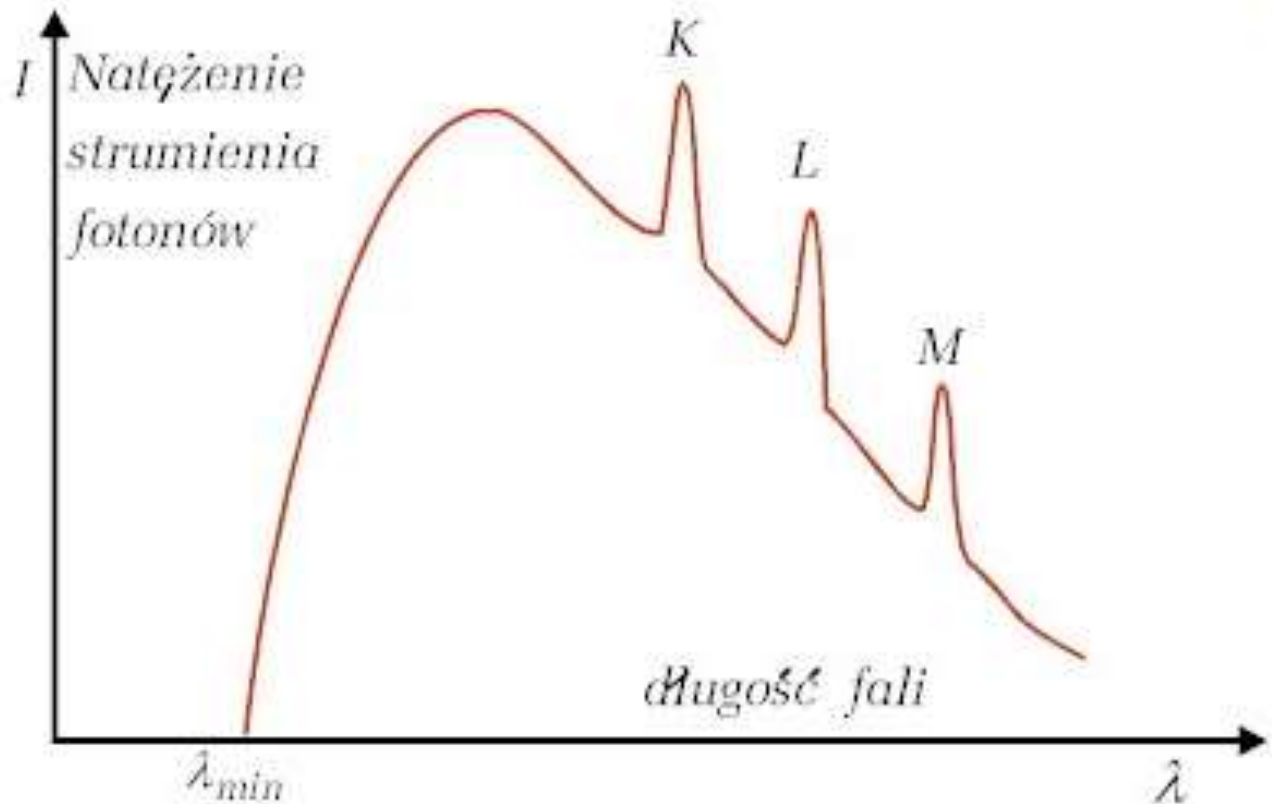


Serie widmowe

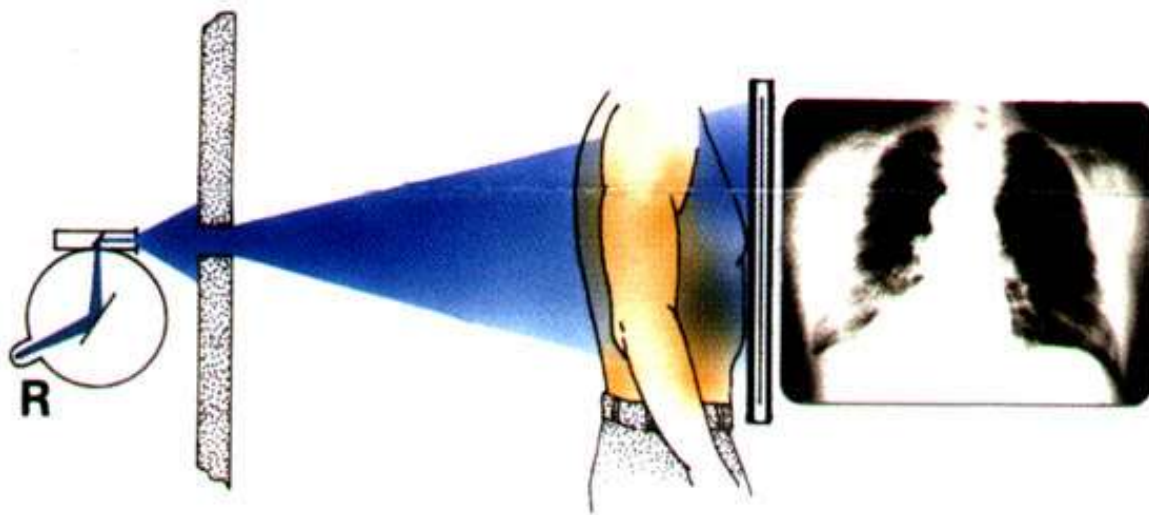


Widmo promieniowania X

- ◆ Ostateczne widmo promieni X pochodzące z lampy rentgenowskiej jest sumą widma promieniowania hamowania (ciągłe) i charakterystycznego (dyskretne piki)



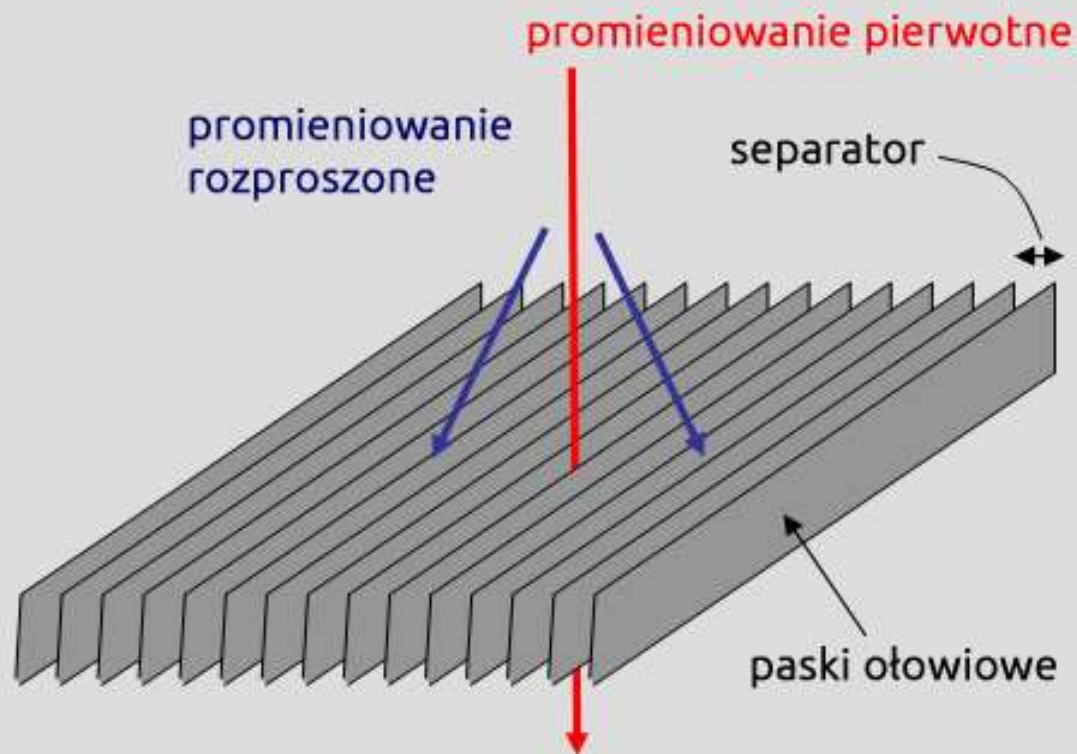
Powstawanie obrazu na kliszy



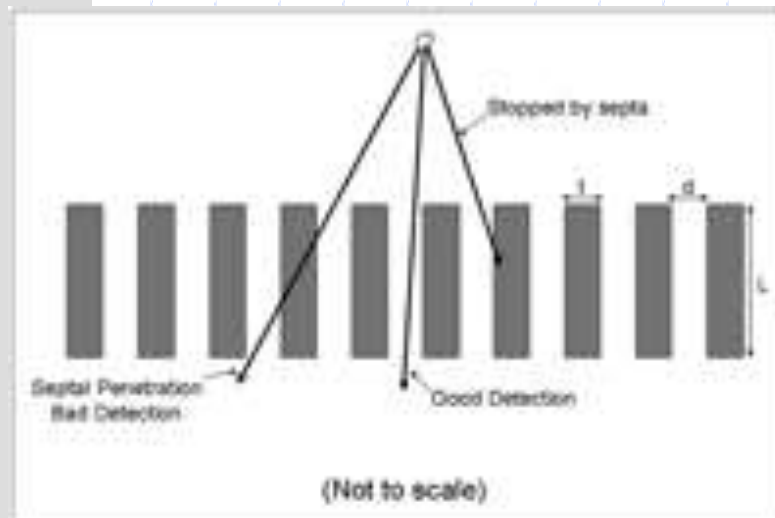


Kratka przeciwrozproszeniowa

Budowa kratki przeciwrozproszeniowej



Kratka przeciwrozproszeniowa – minimalizuje dawkę dla personelu

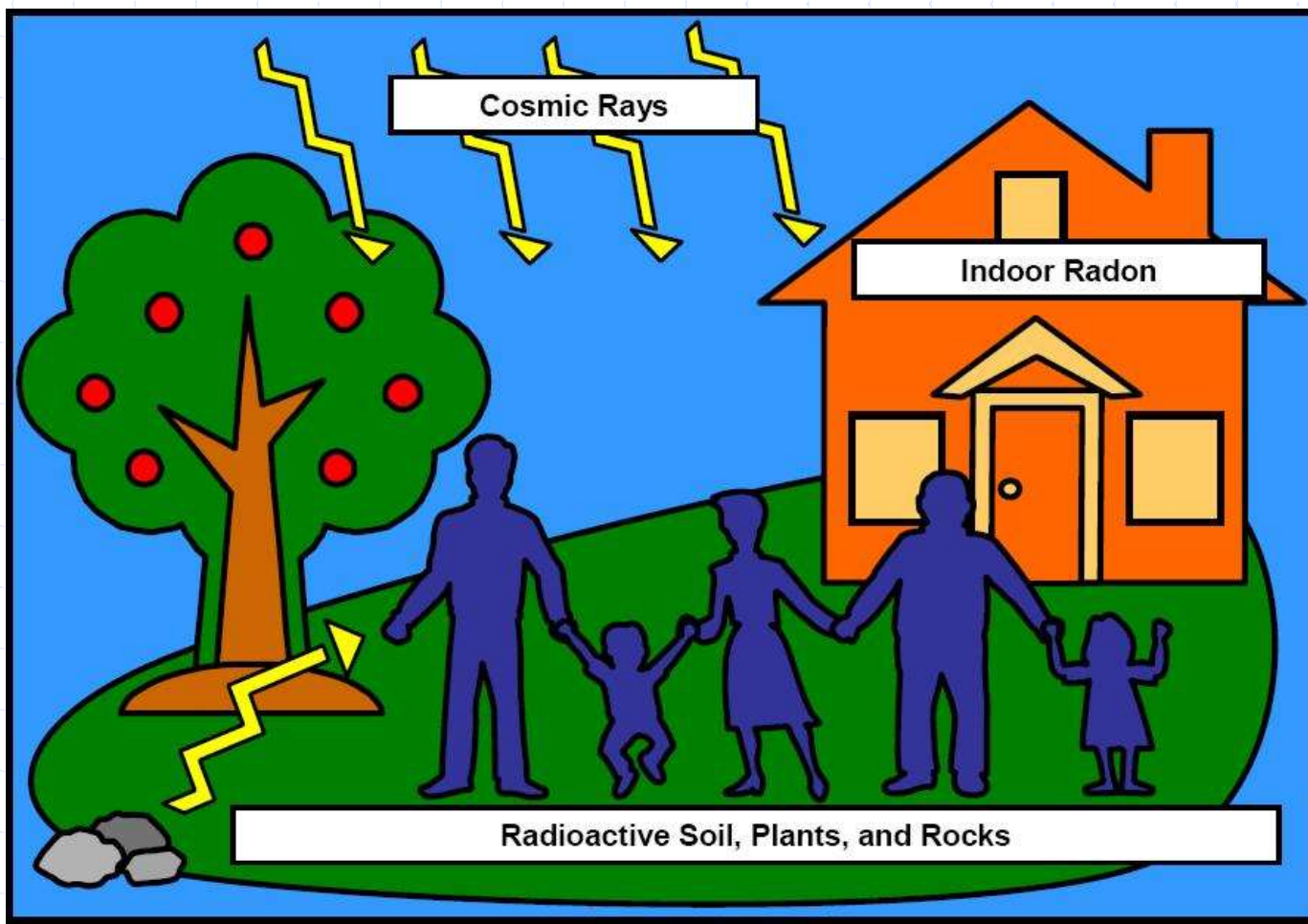




NATURALNE TŁO PROMIENIOWANIA

Naturalne tło promieniowania

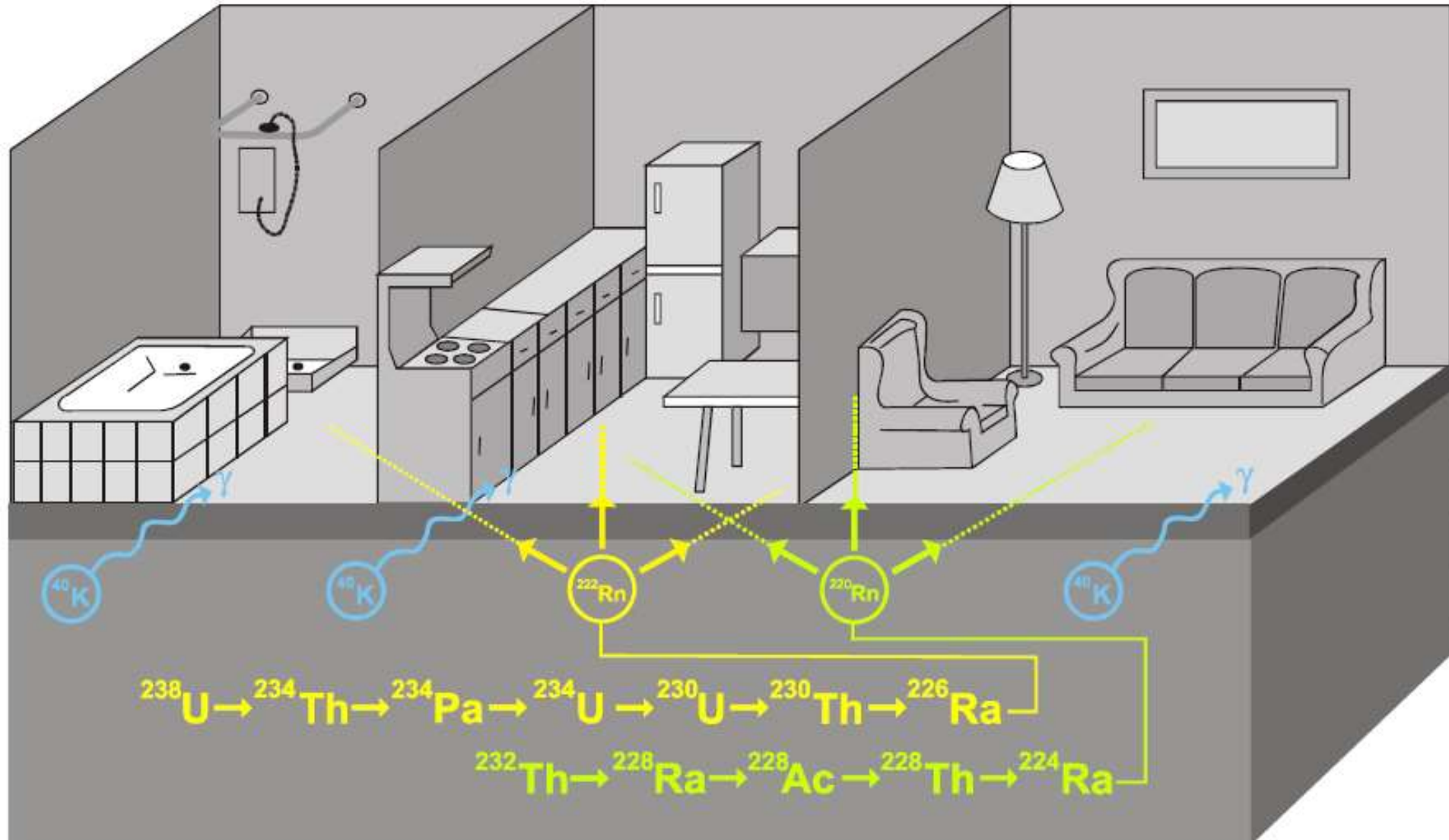
- Życie na Ziemi zawsze było, jest i będzie skąpane w morzu promieniowania



Od czego pochodzi?

- ◆ Największą roczną dawkę promieniowania ze źródeł naturalnych otrzymujemy od **radonu** – alfa-promieniotwórczego gazu (i jego pochodnych)
- ◆ Radon obecny jest w atmosferze, pochodzi ze skorupy ziemskiej
- ◆ Gromadzi się przede wszystkim w domach, głównie w piwnicach poprzez nieszczelności w podłodze
- ◆ Wdychany wraz z powietrzem do płuc

Radon



Szereg radonowy, pochodne radonu

	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92
238												4,5e+9 lat
234										24,1 dni	1,18 min	2,5e+5 lat
230										8,0e+4 lat		
226								1,6e+3 lat				
222						3,82 dni						
218				3,05 min	2 s							
214		26,8 min	19,7 min	1,6e-4 s								
210	1,31 min	21 lat	5 dni	138,4 dni								
206		trwały										

Legenda

← emisja cząstki alfa

→ emisja cząstki beta

podane czasy to okresy połowicznego rozpadu

Radon – przykładowe stężenia

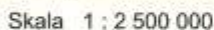
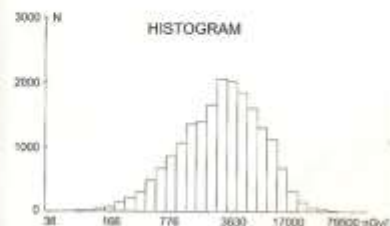
Aktywności radonu w naszym otoczeniu

Miejsce pomiaru	Aktywność [Bq/m ³]
Powietrze przy gruncie	10
Wietrzony pokój	40
Pokój zamknięty	80
Piwnica	400
Pieczara	10000
Odwierty o wysokiej aktywności	100000

Naturalne promieniowanie gamma

- ◆ Pochodzi z kosmosu oraz otaczającej nas materii organicznej i nieorganicznej
- ◆ W gruncie i skałach po których stąpamy jest bardzo wiele promieniotwórczych pierwiastków (np. potas-40), zazwyczaj średnio i długożyciowych
- ◆ Promieniowanie kosmiczne zawiera wysokoenergetyczne prom. gamma

Tło promieniowania gamma w Polsce

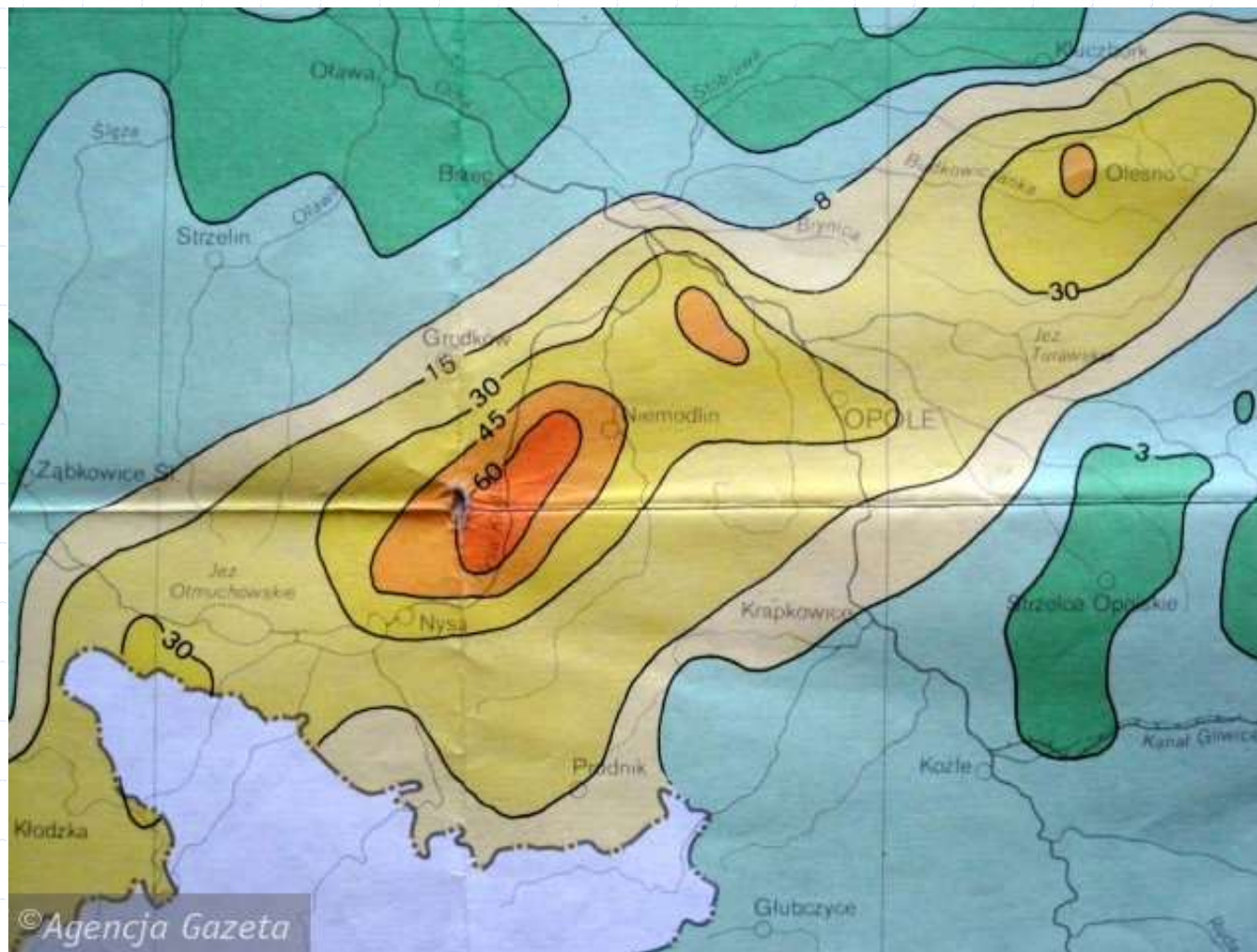


MIATA	proving 500-1000	granite porphy
MIATA	100 000 - 120 000	dark
MIATA	140 000 - 160 000	hardy
MIATA	180 000 - 200 000	dark

© PAŃSTWOWY INSTYTUT GEOLOGICZNY — copyright 2006

Stężenie cezu-137 na Opolszczyźnie

- prof. M. Tukiendorf, 2011



Warszawa Dolny Mokotów



Warszawa przed Pałacem Kultury

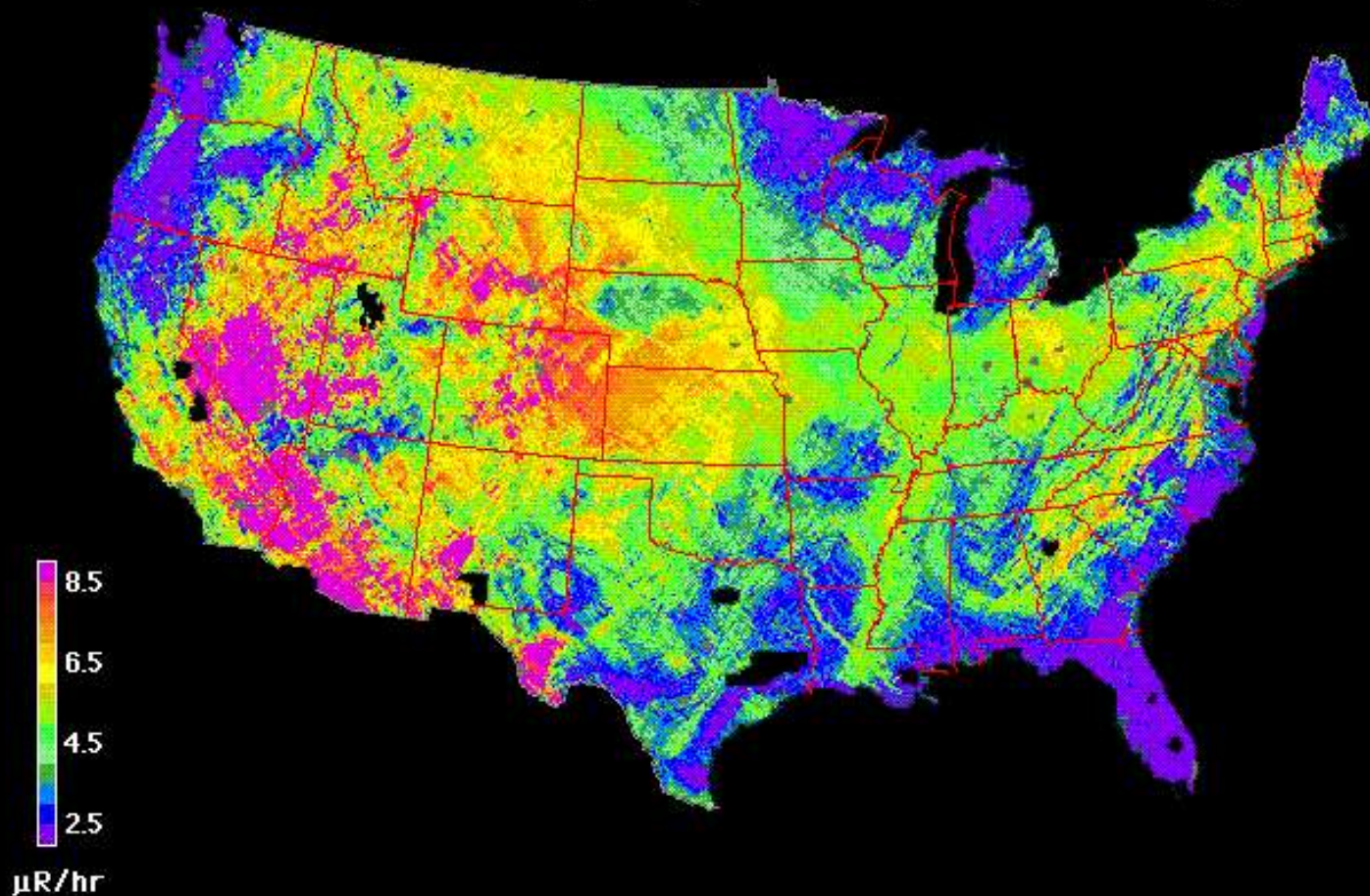


W samolocie



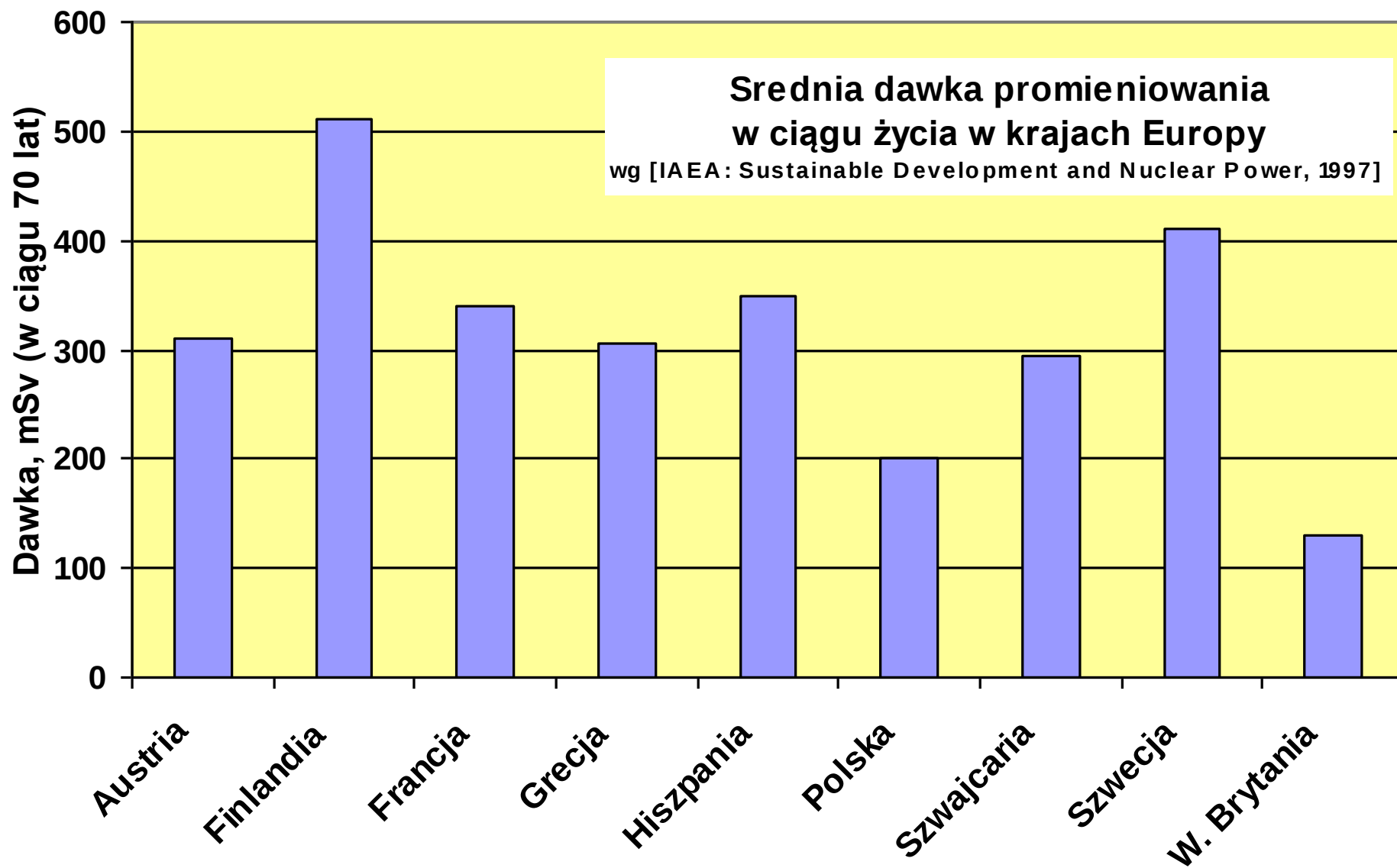
Promieniowanie gamma w USA

Terrestrial Gamma-Ray Exposure at 1m above ground



Source of data: U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-9, 1993

Średnie dawki życiowe w różnych krajach



Naturalne tło promieniowania

- ◆ W Polsce średnio mamy $0,2 \mu\text{Sv/h}$
- ◆ W polskich Sudetach ok. $0,5 \mu\text{Sv/h}$
- ◆ W Finlandii ok. $1 \mu\text{Sv/h}$
- ◆ Kerala (Indie) ok. $15 \mu\text{Sv/h}$
- ◆ Guarapari (Brazylia) ok. $50 \mu\text{Sv/h}$
- ◆ Ramsar (Iran) ok. $100 \mu\text{Sv/h}$
- ◆ Lot transatlantycki ok. $0,6 \mu\text{Sv/h}$

- ◆ Limit ewakuacyjny z Czarnobyla z 1986 r. ok. $0,4 \mu\text{Sv/h}$

- ◆ Centrum miasta Czarnobyl dzisiaj: ok. $0,15 \mu\text{Sv/h}$

Obszary o podwyższonym tle promieniowania

- ◆ Na Ziemi występują obszary, gdzie naturalne tło promieniowania jest wyższe nawet kilkaset razy od średniej światowej
- ◆ Nigdzie w tych miejscach nie zaobserwowano wzrostu zachorowalności na jakiegokolwiek schorzenia
- ◆ Nie zaobserwowano jakichkolwiek anomalii także w świecie przyrody

Guarapari (Brazilia) – 27 $\mu\text{Sv/h}$



Ramsar (Iran) – 126 $\mu\text{Sv/h}$



Czarnobyl

- przed sarkofagiem IV reaktora

W odległości około
200 metrów od
sarkofagu moc dawki
wynosi około
5-6 $\mu\text{Sv/h}$





Problem niskich dawek

- ◆ Brak wzrostu jakiegokolwiek ryzyka wraz z podwyższonym tłem promieniowania stanowi obszar wnikliwych badań
- ◆ Wyniki wielu badań wskazują na istnienie progu dawki, powyżej którego pojawia się ryzyko
- ◆ Jest to tzw. problem niskich dawek i zostanie omówiony później

Promieniotwórczość ludzkiego ciała

Nuklidy promieniotwórcze zawarte w ciele ludzkim [dane dla tzw. "umownego człowieka"*] oraz podstawowe charakterystyki emitowanego promieniowania

Izotop	Liczba atomów	Liczba rozpadów [Bq]	Przemiana	Energia rozpadu [keV]	Energia średnia $\langle E_{\beta} \rangle$ [keV]	Orientacyjny zasięg w tkance dla $\langle E_{\beta} \rangle$ [μm]
^3H	$4,2 \times 10^{10}$	75	β	19	5,7	0,5
^{14}C	7×10^{14}	2690	β	156	49,5	39
^{40}K	$2,5 \times 10^{20}$	4340	β	β 1312 γ 1461	455	1600
^{87}Rb	$1,4 \times 10^{21}$	625	β	274	82	95

Porównanie z innymi źródłami

Aktywności typowych promieniotwórczych źródeł naturalnych

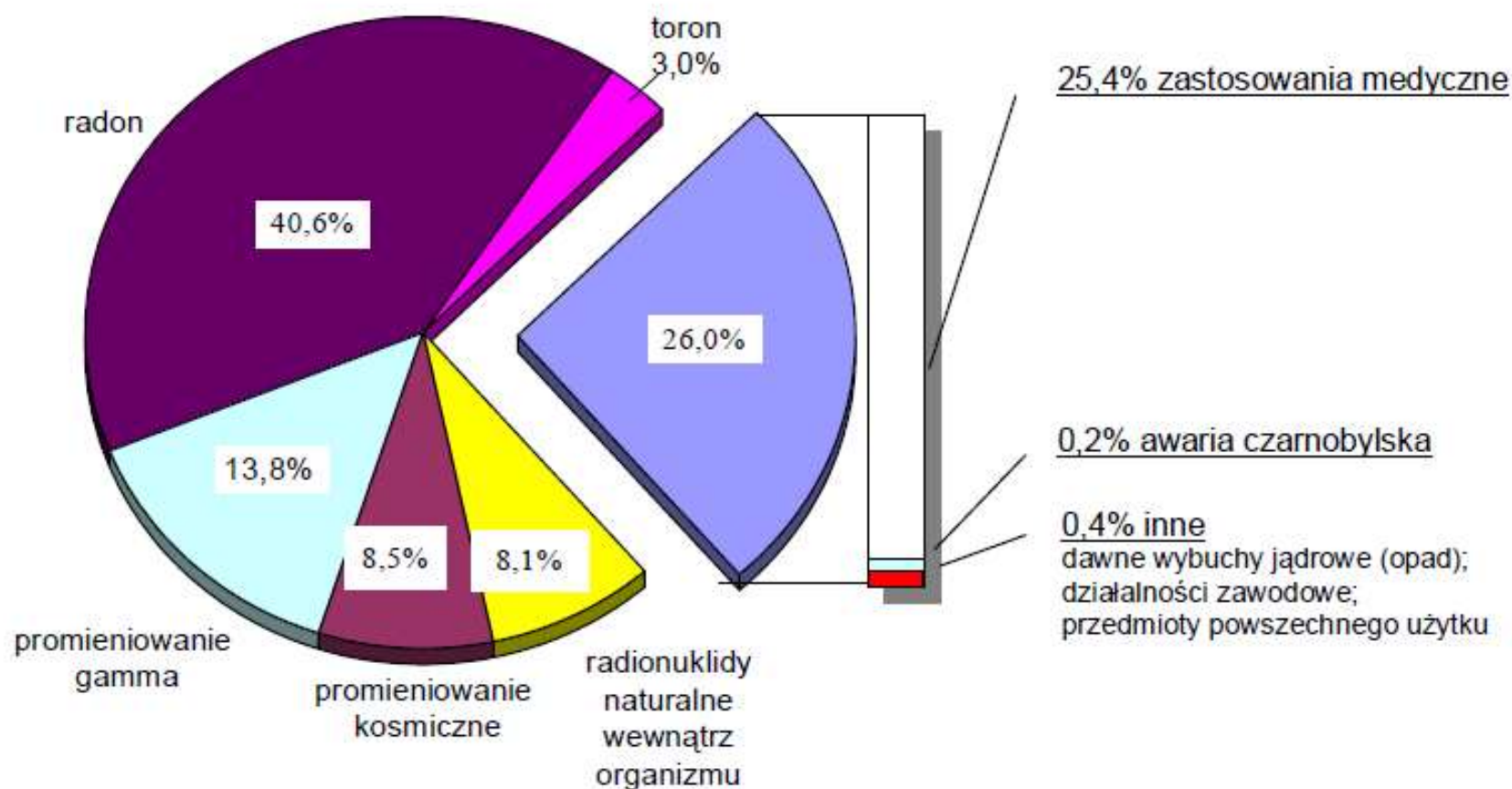
Źródło	Aktywność [Bq]
„Człowiek umowny”	$8 \cdot 10^3$
1 kg kawy	$1 \cdot 10^3$
1 kg nawozu superfosfatowego	$5 \cdot 10^3$
Radon w powietrzu w pomieszczeniu o powierzchni 100 m ²	$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$
Czujka dymu	$3 \cdot 10^4$
Radiofarmaceutyk dla diagnostyki medycznej	$7 \cdot 10^7$
Źródło izotopowe dla terapii	$1 \cdot 10^{14}$
1 kg 50 - letniego, zeszkłonego wysoaktywnego odpadu promieniotwórczego	$1 \cdot 10^{13}$
Świetlny znak wyjścia (z lat 1970.)	$1 \cdot 10^{12}$
1 kg metalicznego uranu	$25 \cdot 10^6$
1 kg kanadyjskiej rudy uranowej	$25 \cdot 10^6$
1 kg australijskiej rudy uranowej	$0,5 \cdot 10^6$
1 kg niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych	$1 \cdot 10^6$
1 kg popiołu po spaleniu węgla	$2 \cdot 10^3$
1 kg granitu	$1 \cdot 10^3$

Łącznie, od źródeł naturalnych (75%) i sztucznych (25%), roczna średnia dawka promieniowania jonizującego przypadającego na jednego mieszkańca Polski wynosi **3,35 mSv/rok**

Rozkład rocznej dawki w Polsce

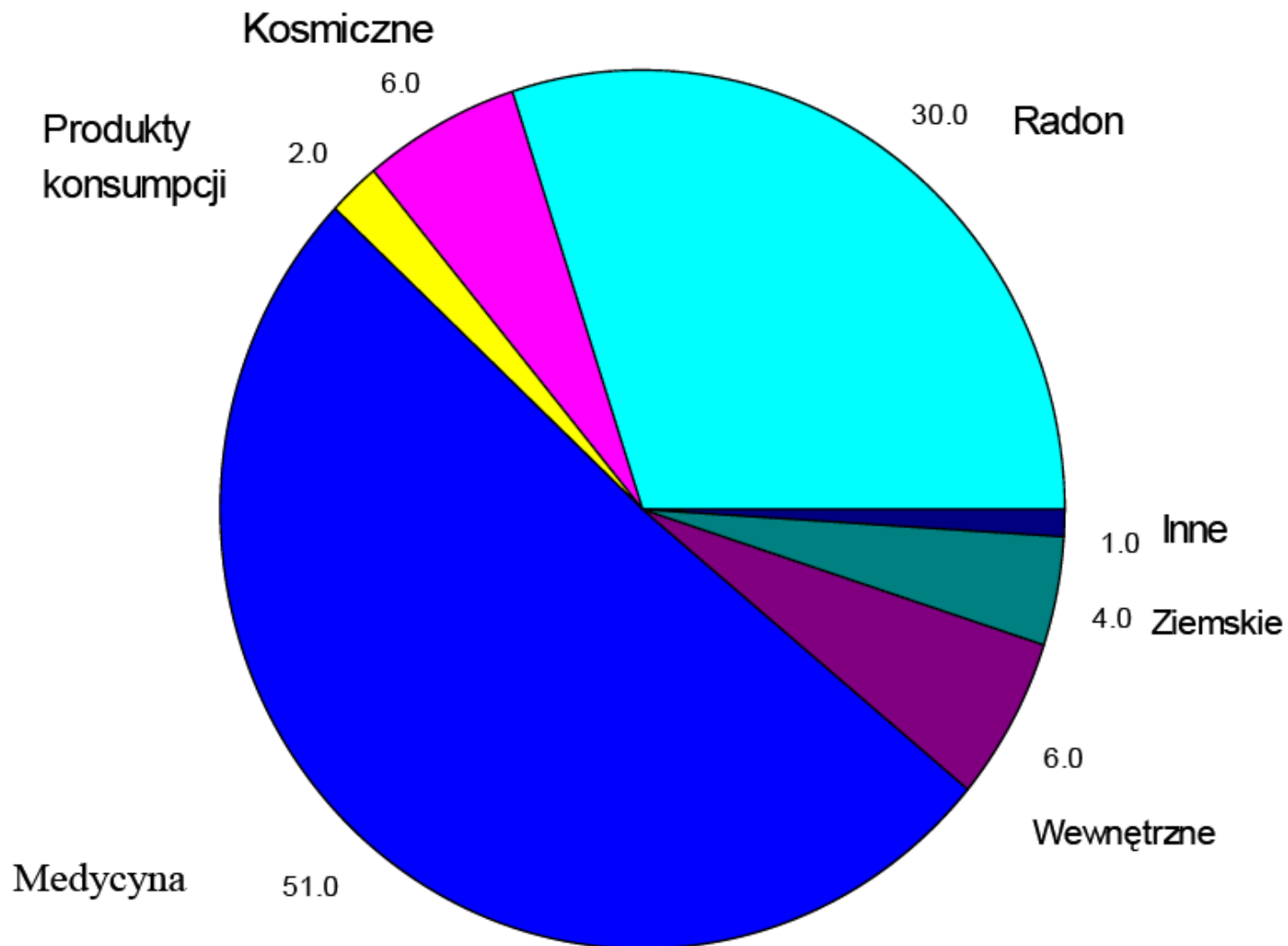
ŹRÓDŁA NATURALNE 74,0% (2,480 mSv)

PROMIENIOWANIE OD ŹRÓDEŁ SZTUCZNYCH
(w tym w MEDYCYNIE) 26,0% (0,866 mSv)



w USA

Wkład do dawki rocznej (6,27 mSv) w USA, rok 2006





PRZEKRÓJ CZYNNY

Przekrój czynny na reakcję - σ

- ◆ Określa prawdopodobieństwo zajścia jakiejś reakcji w świecie mikroskopowym
- ◆ Pojęcie spotykane najczęściej w fizyce jądra i cząstek elementarnych, także w fizyce radiacyjnej
- ◆ Przekrój czynny zdefiniowany jest jako pole powierzchni umownej tarczy prostopadłej do toru ruchu pocisku
- ◆ Jednostką jest barn [b] równy 10^{-28} m^2

Przekrój czynny – c.d.

- ◆ Pojęcia przekroju czynnego używamy też w odniesieniu do konkretnej reakcji, np. przekrój czynny na rozproszenie cząstki, przekrój czynny na kreację konkretnej cząstki, na pochłonięcie, na rozproszenie etc.
- ◆ Różniczkowy przekrój czynny – na rozproszenie cząstki pod pewnym kątem
- ◆ Zależność między przekrojem czynnym a prawdopodobieństwem zajścia zdarzenia:

$$P = \frac{\sigma n}{S} = \sigma \rho d$$

gdzie n – liczba centrów oddziaływania, S – powierzchnia tarczy (całej), ρ – gęstość centrów oddziaływania, d – grubość tarczy (mała)

Przekrój czynny – c.d.

- ◆ W dalszej części wykładu będziemy posługiwać się pojęciem przekroju czynnego w odniesieniu do promieniowania jonizującego oddziałującego z materią (żywą lub nieożywioną), w kontekście powstawania aktu jonizacji