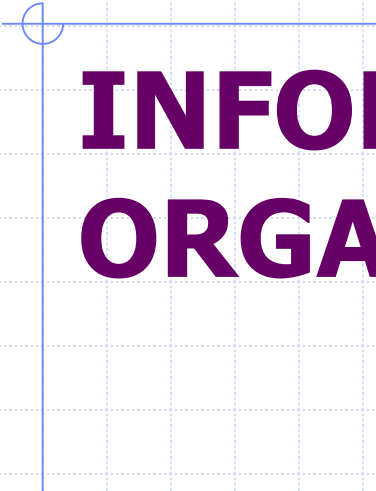


BIOFIZYKA RADIACYJNA

wykład #1

Krzysztof Wojciech Fornalski

Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska



INFORMACJE ORGANIZACYJNE

O prowadzącym

◆ Krzysztof FORNALSKI

- Absolwent Wydziału Fizyki PW z 2007 r.
- Doktorat z wyróżnieniem w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) – 2012 r.
- Po doktoracie praca w przemyśle i biznesie, jednakże równolegle niezmiennie praca naukowa z zamiłowania i pasji (współpraca m.in. z CLOR, WIHE, WF PW, NCBJ)
- Od 10 lat praca przy projekcie budowy elektrowni jądrowej w Polsce (Polskie Elektrownie Jądrowe sp. z o.o.)
- Przez 5 lat własne prywatne akredytowane laboratorium dozymetryczne
- Główna afiliacja naukowa: NCBJ

Semestralny plan wykładu

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

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
- Egzamin pisemny (50 punktów)
- 100% obecność (50 punktów)
- Dla chętnych: egzamin ustny

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
- E-mail: krzysztof.fornalski@ncbj.gov.pl

◆ Poprawka egzaminu

- Na egzaminie ustnym

Uwaga ogólna

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

krzysztof.fornalski@ncbj.gov.pl

krzysztof.fornalski@gmail.com

krzysztof.fornalski@fuw.edu.pl



**PRZYPOMNIENIE
PODSTAWOWYCH
INFORMACJI, KTÓRE KAŻDY
STUDENT WIEDZIEĆ
POWINIEN**

Biofizyka radiacyjna

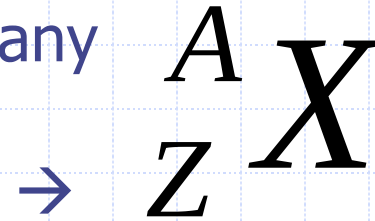
- ◆ Biofizyka – opis zjawisk biologicznych za pomocą aparatu matematycznego
- ◆ Fizyka radiacyjna – dział fizyki jądrowej zajmujący się promieniowaniem, w szczególności promieniowaniem jonizującym, jego powstawaniem i oddziaływaniem z materią

Podstawowe informacje

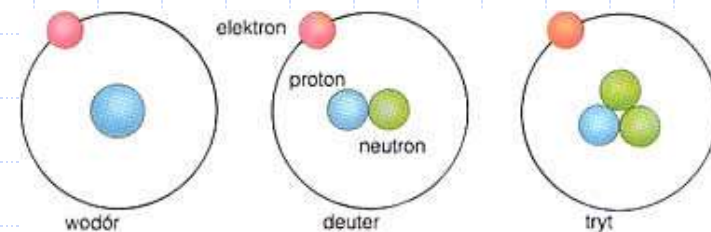
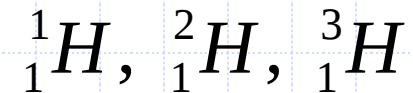
- ◆ Na potrzeby wykładu zakłada się, iż Słuchacz zna podstawowe pojęcia: zjawisko promieniotwórczości, pojęcie izotopu, definicja czasu połowicznego zaniku, zjawisko jonizacji, budowa atomu i jądra atomowego, model powłokowy jądra atomowego, rodzaje promieniowania jonizującego, podział promieniowania (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:

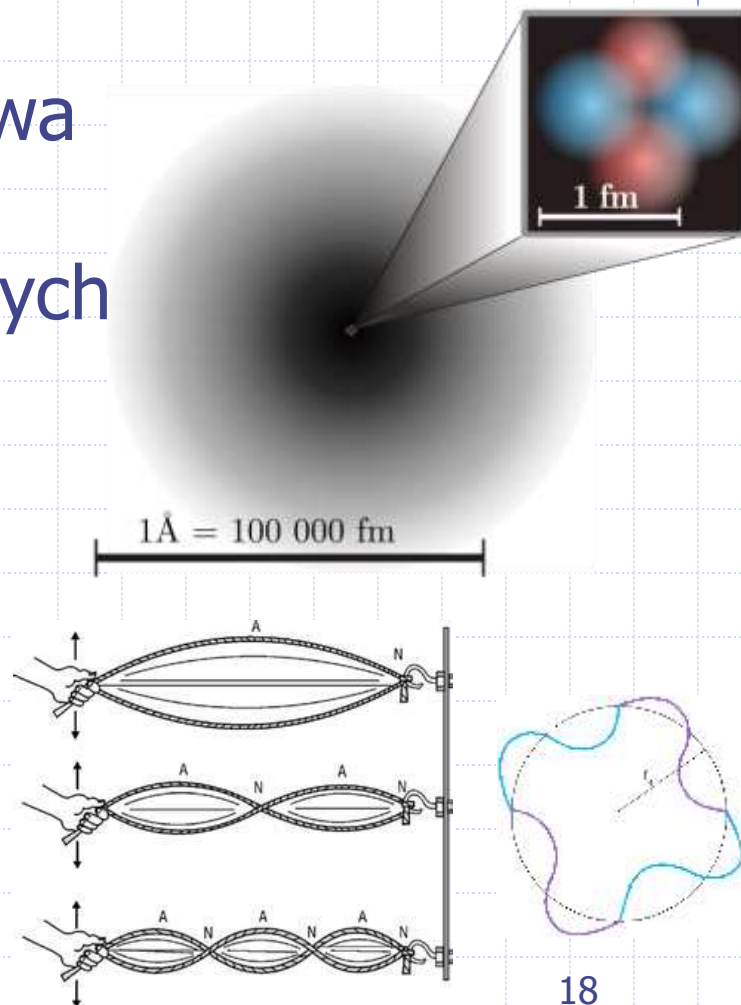
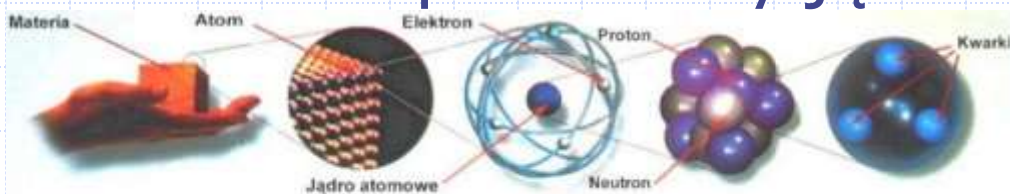


-



Budowa atomu - przypomnienie

- ◆ 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

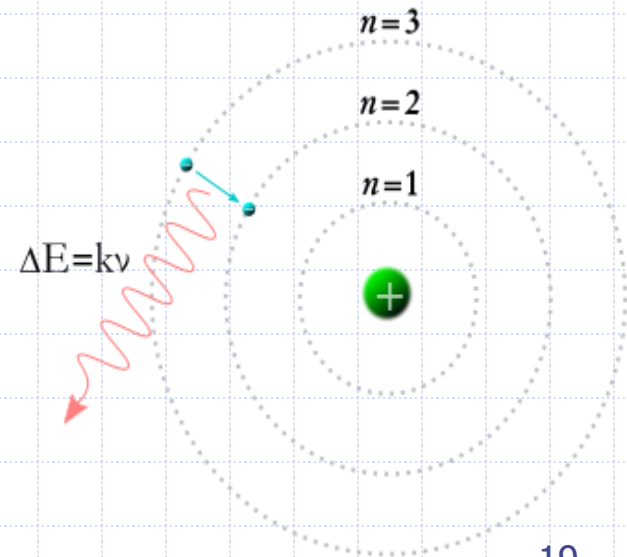


Emisja promieniowania



◆ 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**

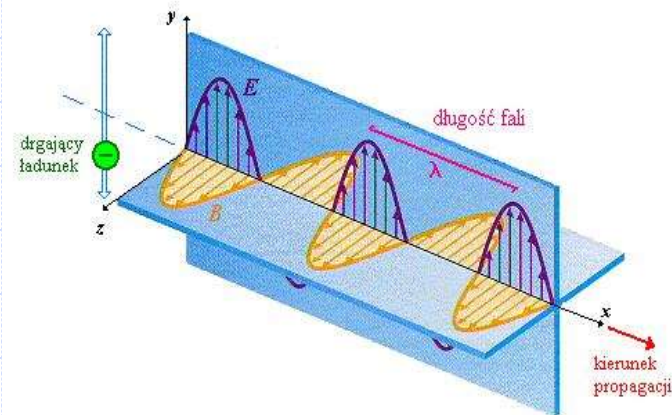
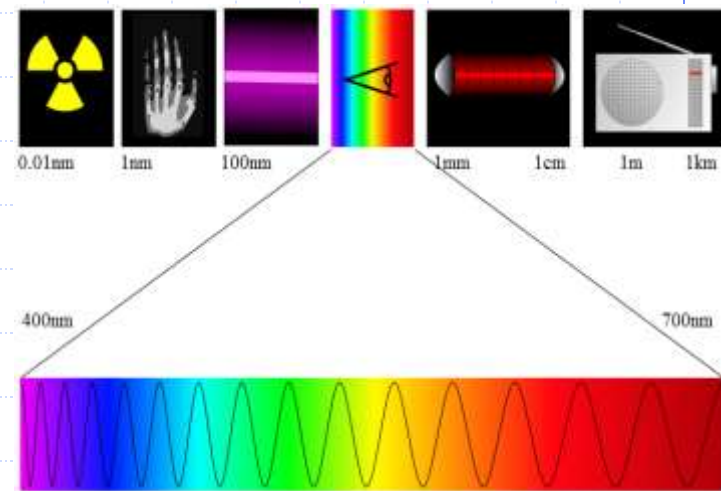
Fala elektromagnetyczna

◆ Foton

- cząstka czy fala?
- energia a długość fali

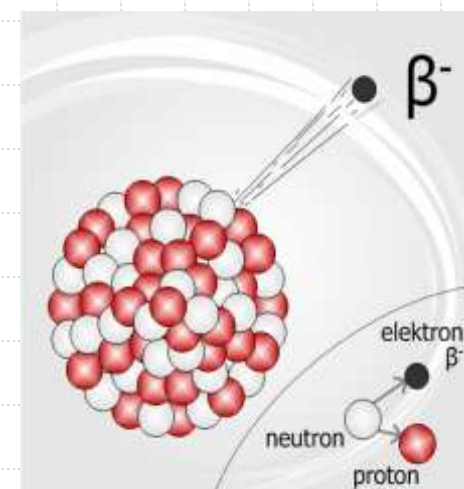
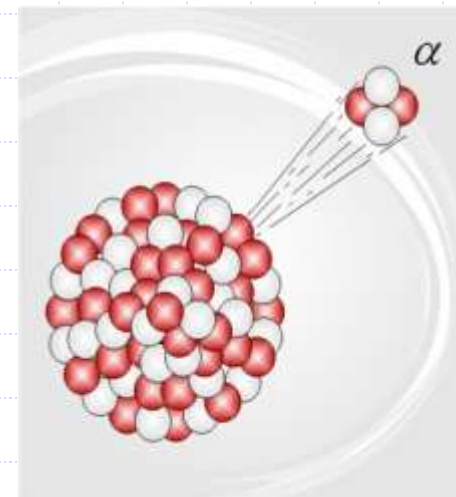
◆ Nas interesuje promieniowanie:

- **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)



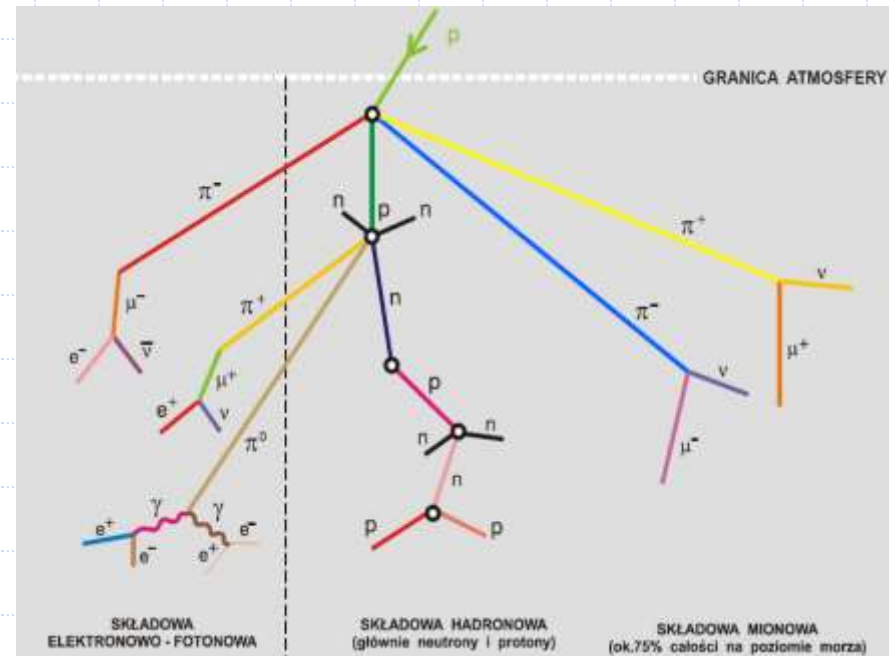
Promieniowanie korpuskularne

- ◆ 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

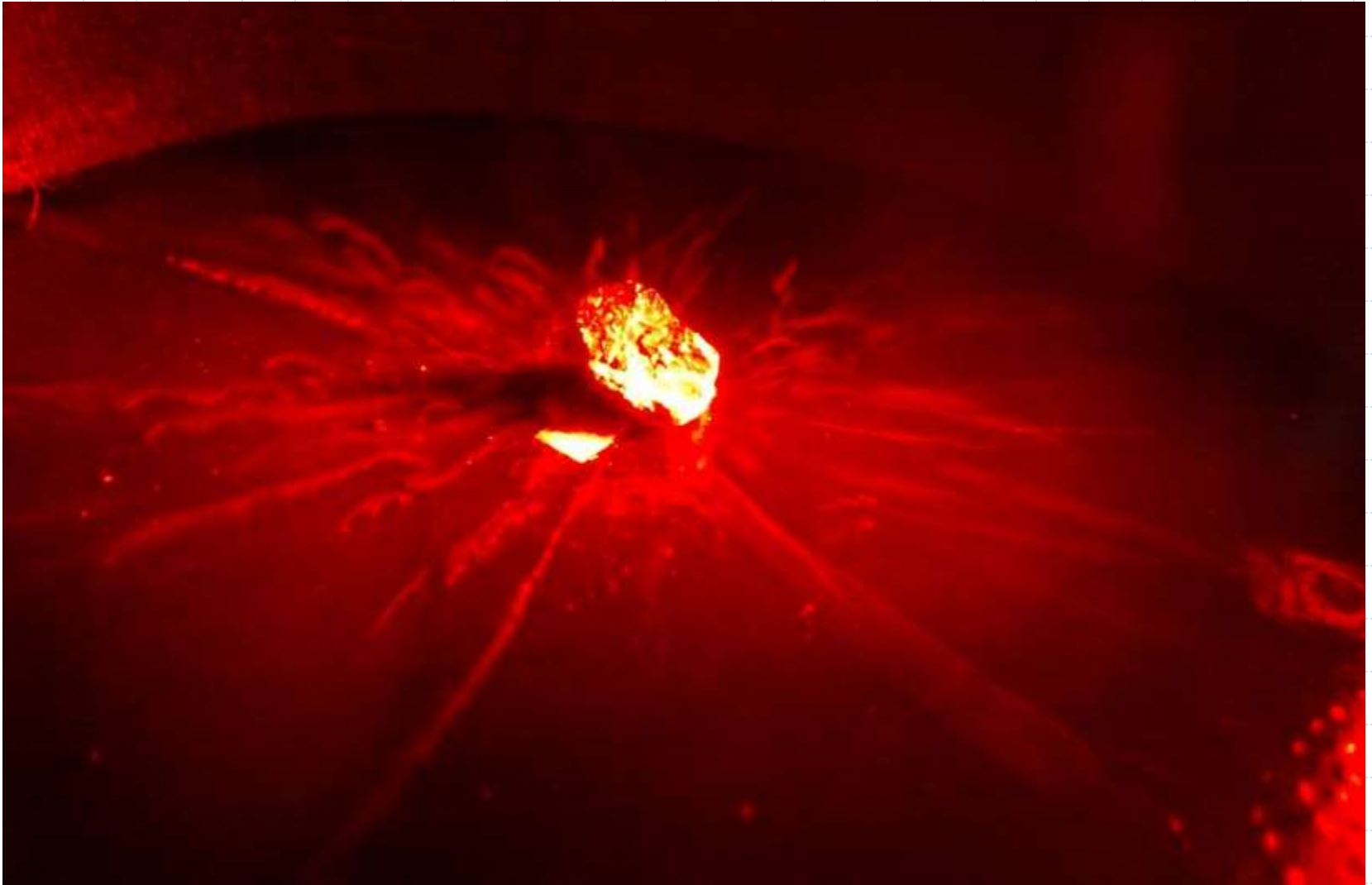


Promieniowanie korpuskularne – pozostałe typy

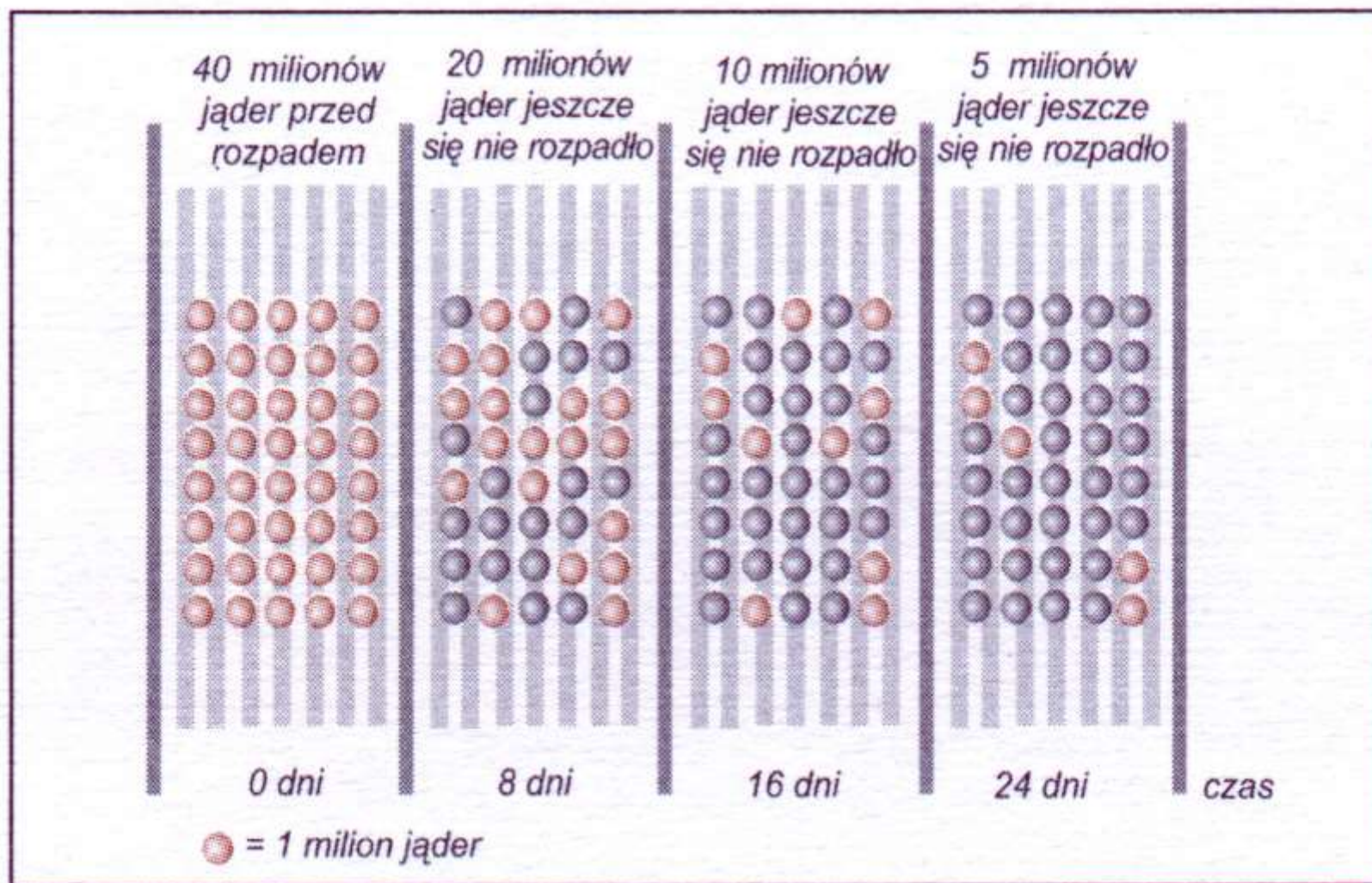
- ◆ Promieniowanie neutronowe
 - strumień obojętnych elektrycznie neutronów → jonizacja nie wprost
 - promieniowanie to występuje m.in. we wnętrzu reaktorów jądrowych
 - skomplikowana osłona: wodór, ale nie ołów!
- ◆ Promieniowanie protonowe
- ◆ Promieniowanie jonowe
 - np. w akceleratorach
- ◆ Promieniowanie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



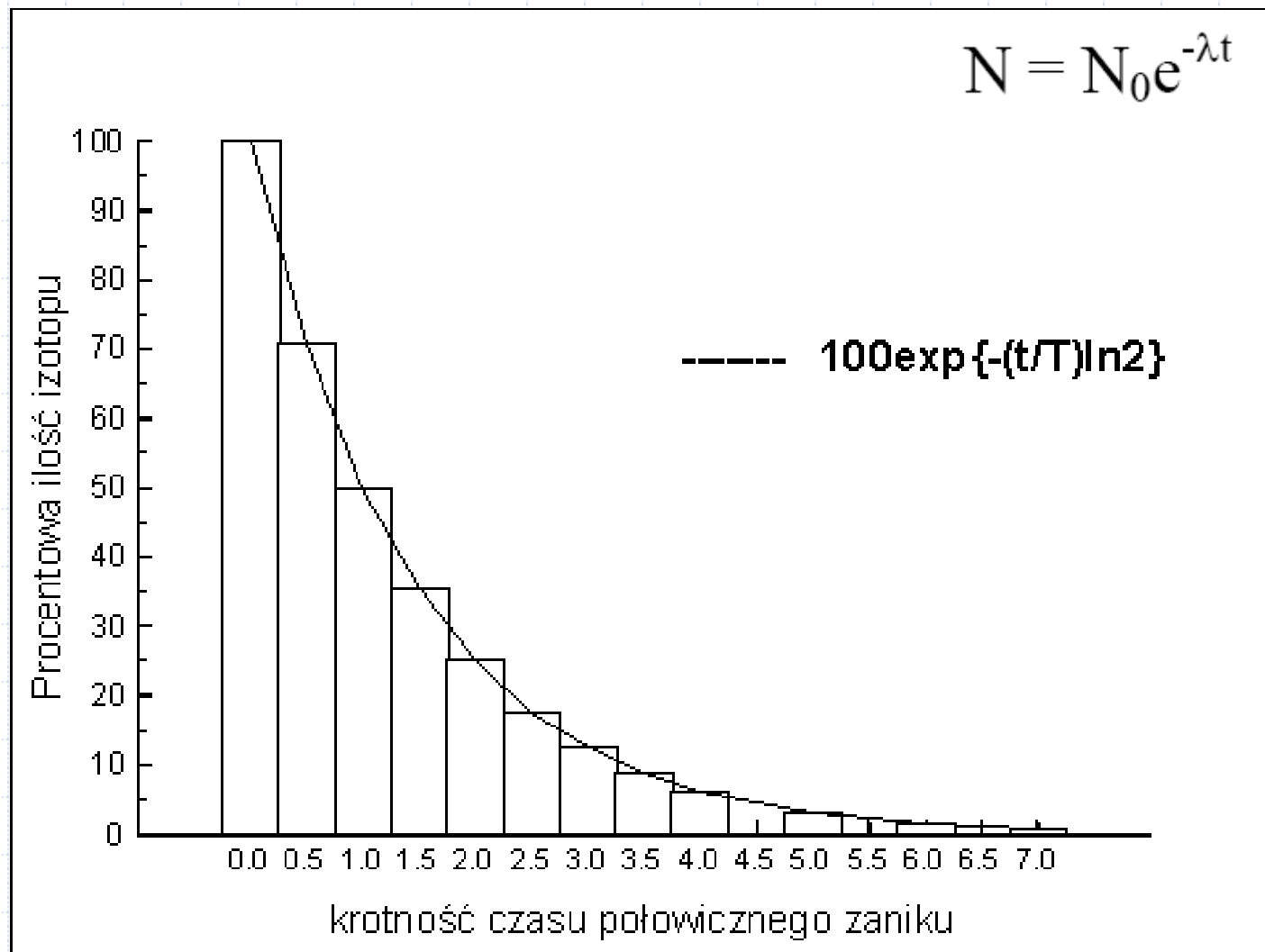
Jonizacja – na przykładzie komory mgłowej Wilsona

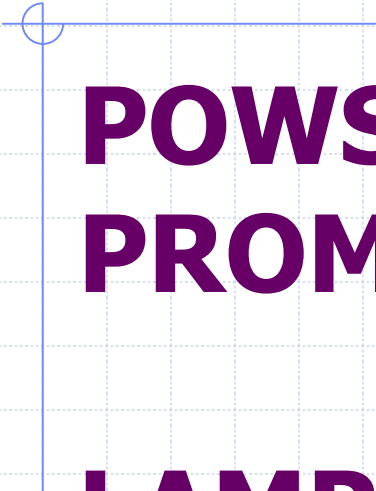


Prawo rozpadu promieniotwórczego - przypomnienie



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

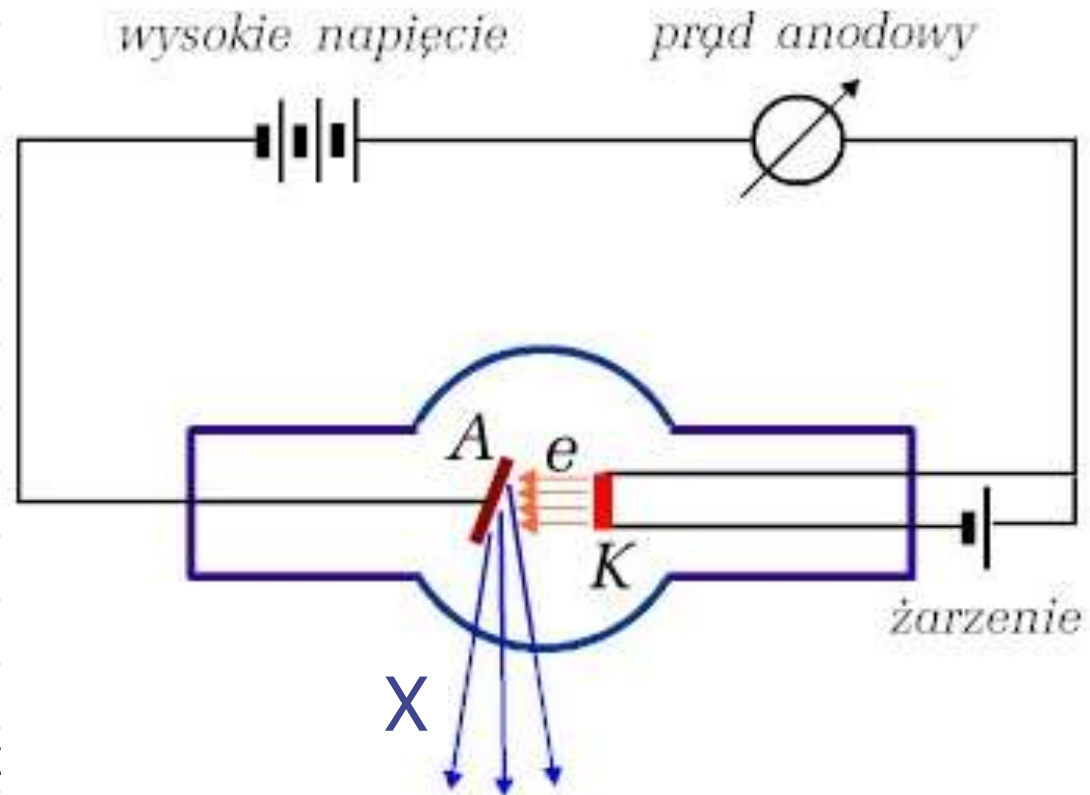
- ◆ Jednak najczęściej promieniowanie gamma powstaje w wyniku przemian wewnątrz jądra atomowego (jest to więc przykład promieniowania jądrowego)
- ◆ Promieniowanie X powstaje w wyniku przemian w skali atomowej (powłoki elektronowe – jest to więc przykład promieniowania atomowego)
- ◆ Promieniowanie X 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

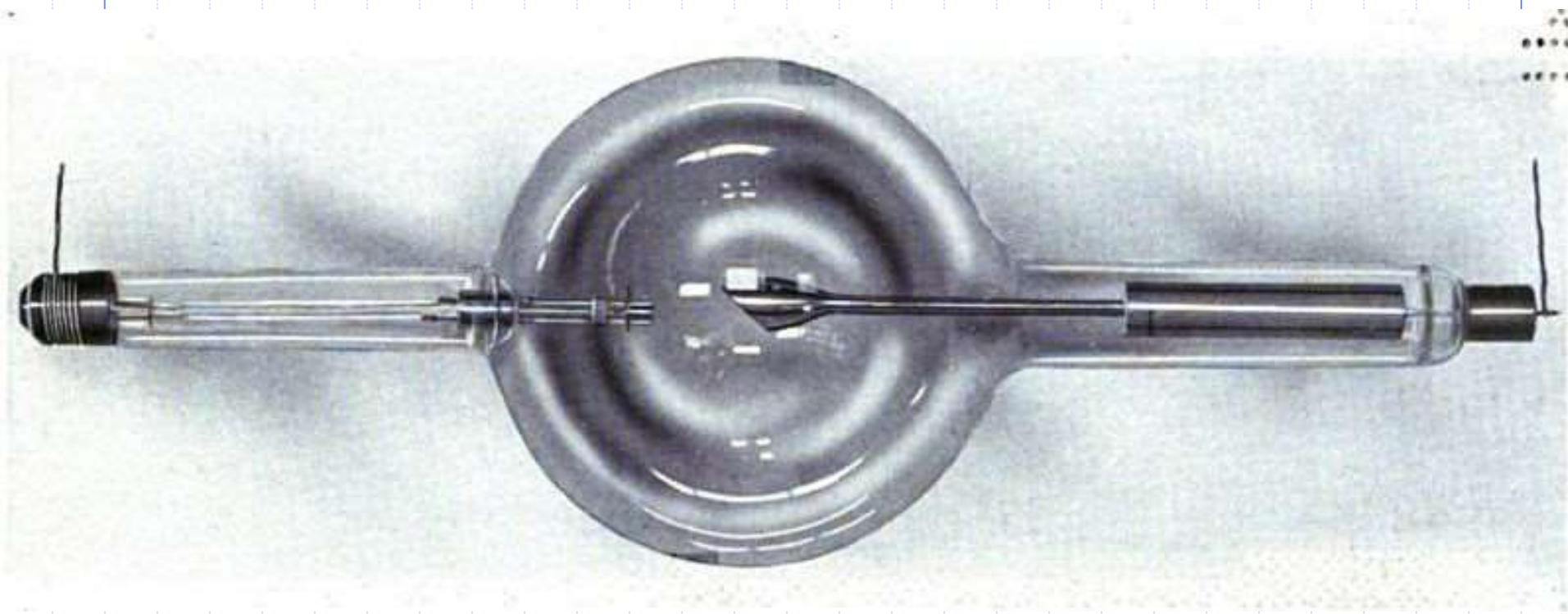
- ◆ Zbliżone do promieniowania gamma, lecz posiadające niższą energię
- ◆ Różne nazwy: rentgenowskie, X, RTG
- ◆ W zależności od długości fali (czyli energii) wyróżniamy dwa typy promieni X:
 - Od 5 do 100 pm – twarde prom. X
 - Od 0,1 do 10 nm – miękkie prom. X

Lampa rentgenowska

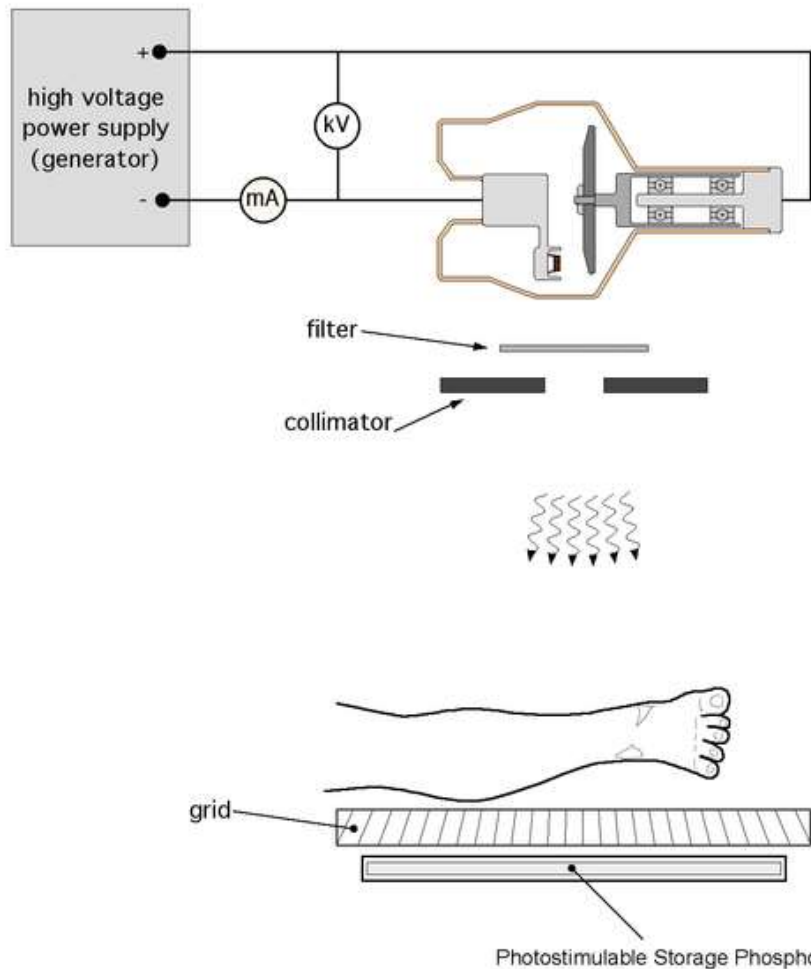
- A – anoda (+); K – katoda (-)
- Pod wpływem dużego napięcia istnieje różnica potencjałów między A oraz K
- Dodatkowo żarzenie K ułatwia uwalnianie elektronów, które biegną do A, gdzie emitują promieniowanie X



Lampa rentgenowska - anoda nieruchoma



Lampa rentgenowska - anoda obrotowa

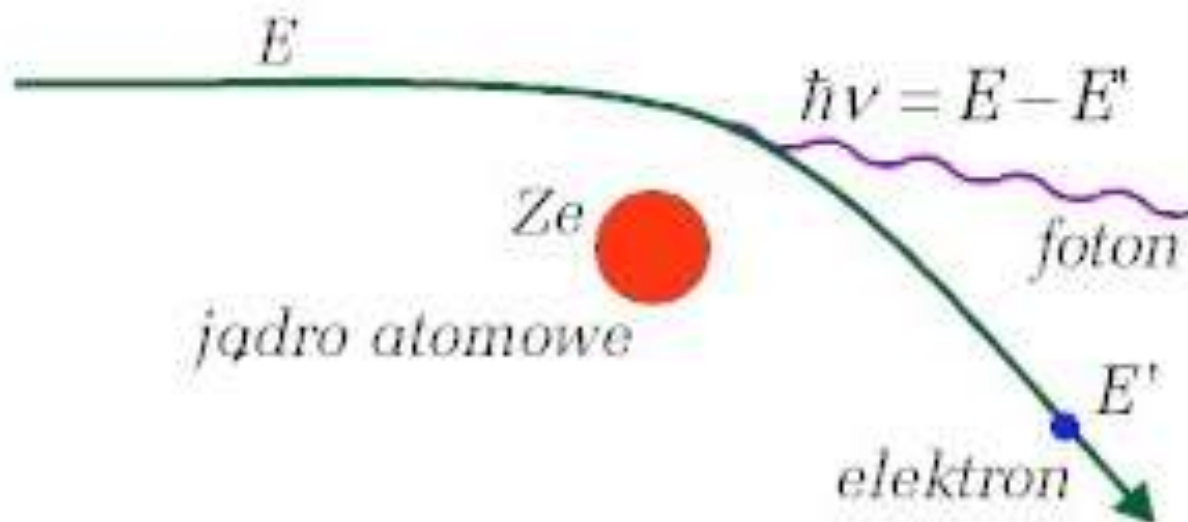


Lampa rentgenowska

- ◆ 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

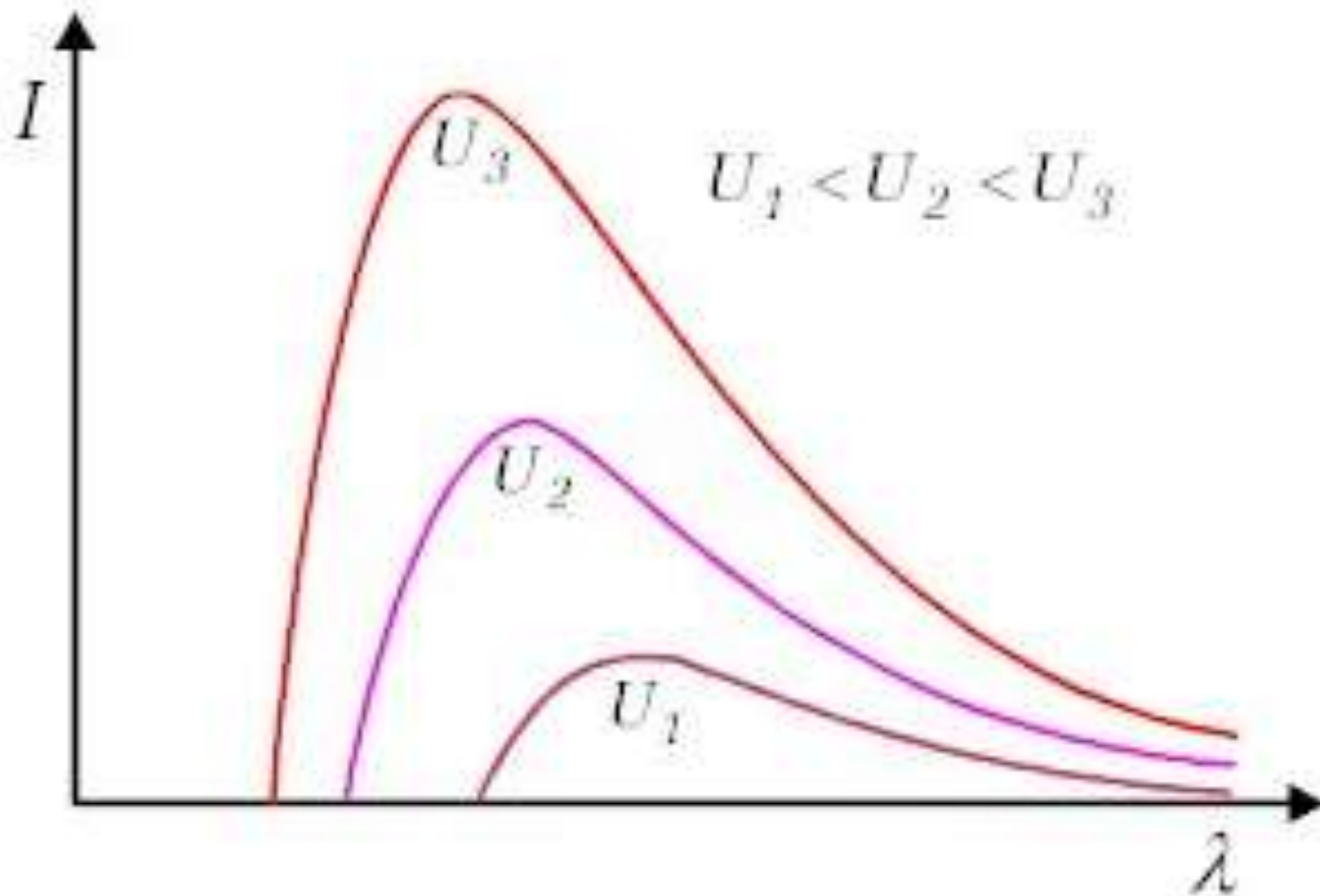
- ◆ Niem. Bremsstrahlung
- ◆ Powstaje w wyniku hamowania rozpędzonej naładowanej cząstki (np. elektronu) w polu jądra atomowego



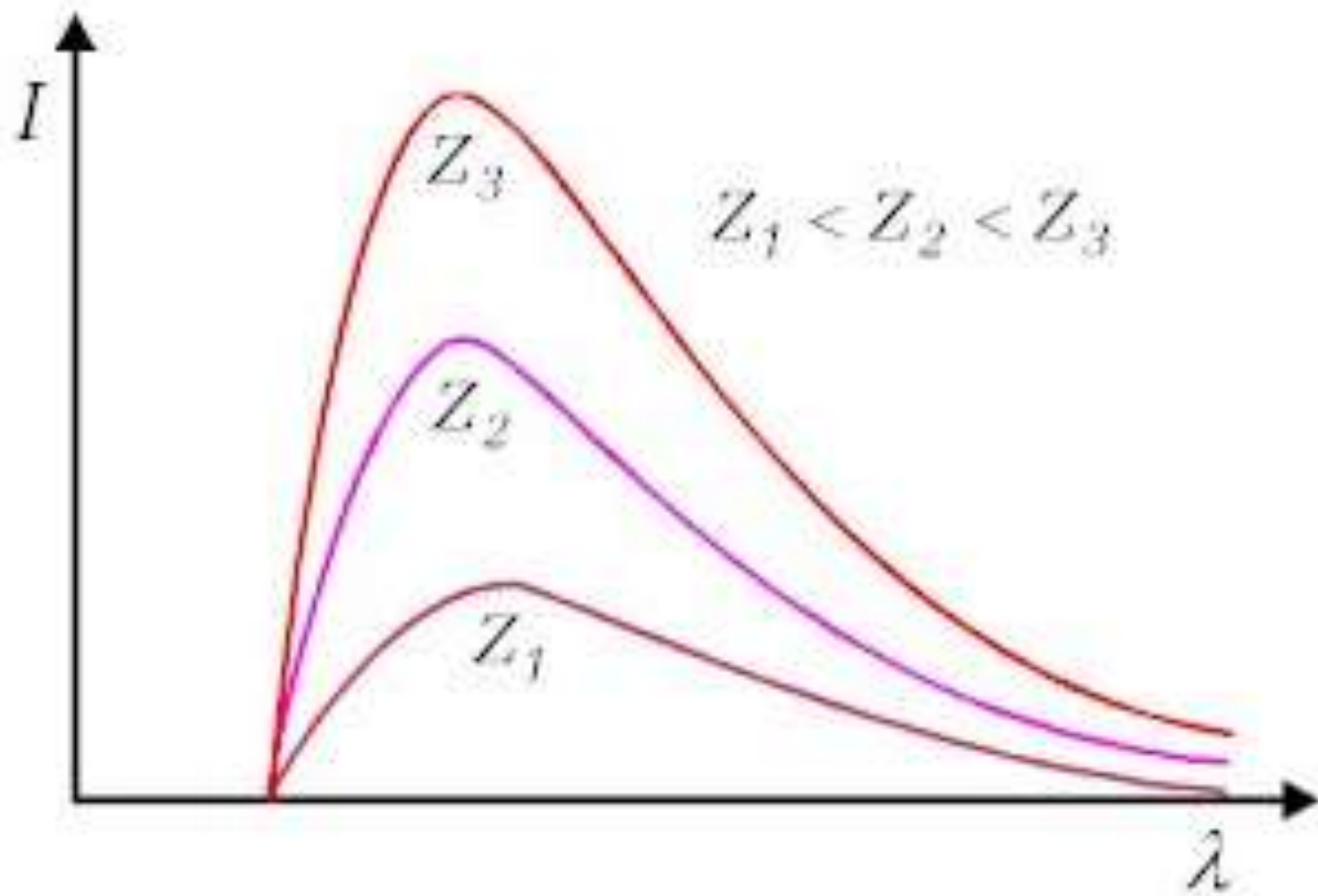
Promieniowanie hamowania

- ◆ 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

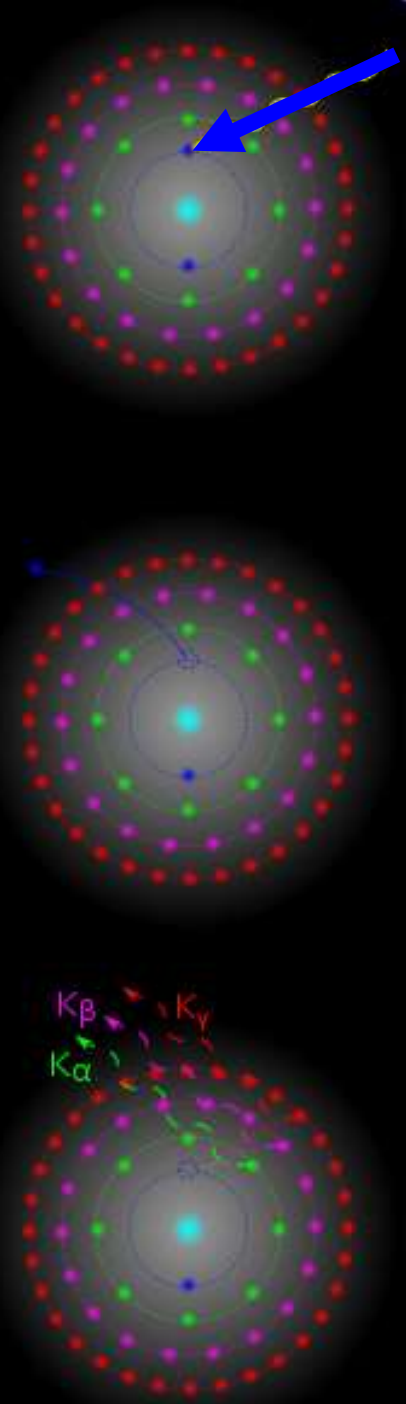


Promieniowanie charakterystyczne

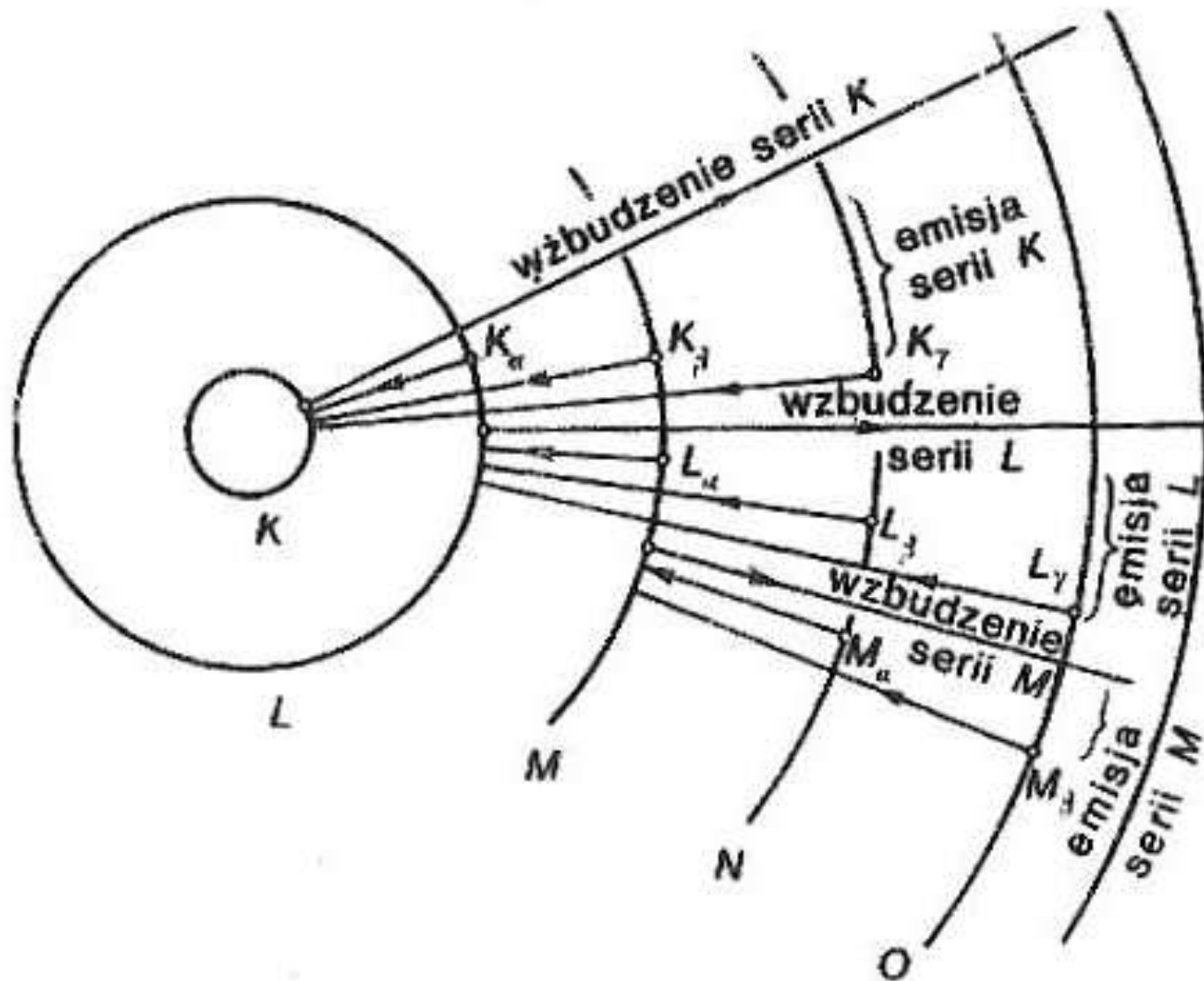
- ◆ Drugi sposób powstawania prom. X
- ◆ Fotony X emitowane są na skutek przejścia elektronu z wyższej powłoki atomowej na niższą, skąd był wcześniej wybity
- ◆ Widmo jest dyskretne, emitowane fotony posiadają ściśle określone energie
- ◆ Więcej na temat fizycznego zjawiska emisji promieniowania charakterystycznego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

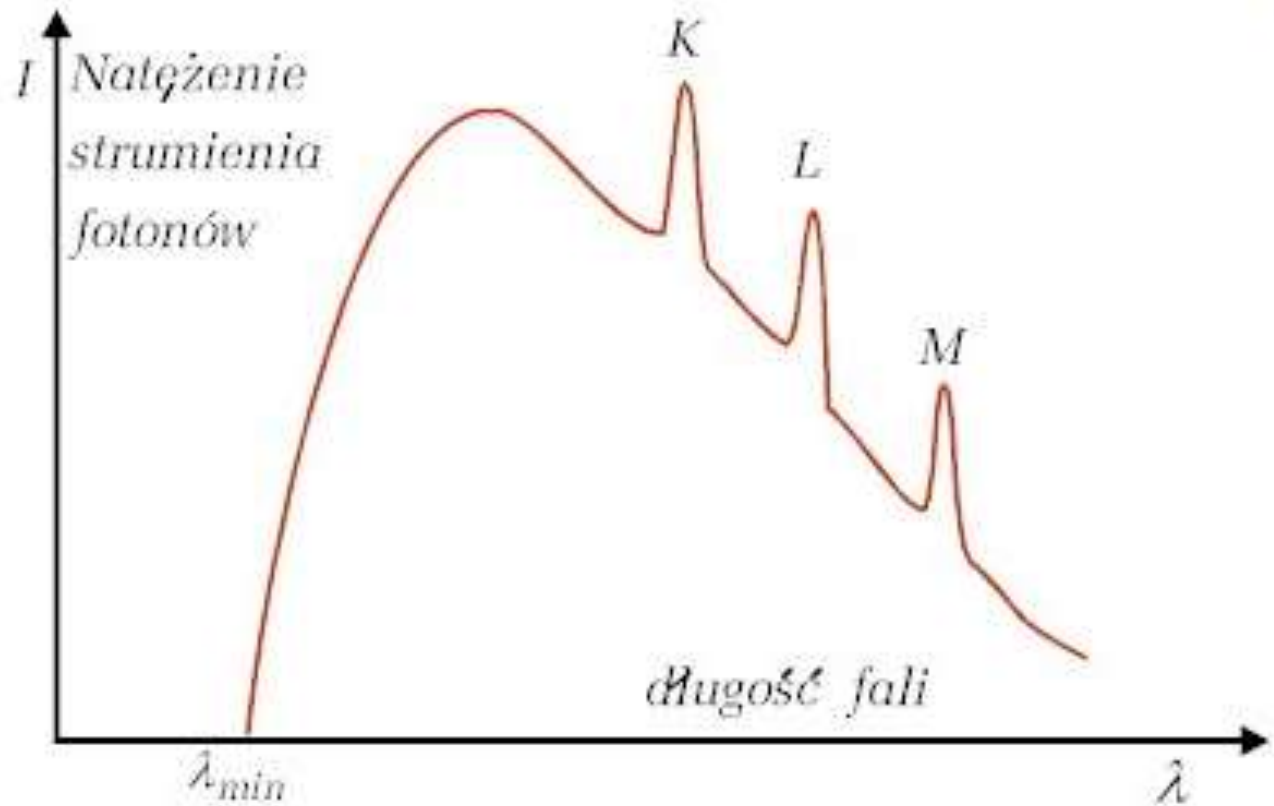


Serie widmowe

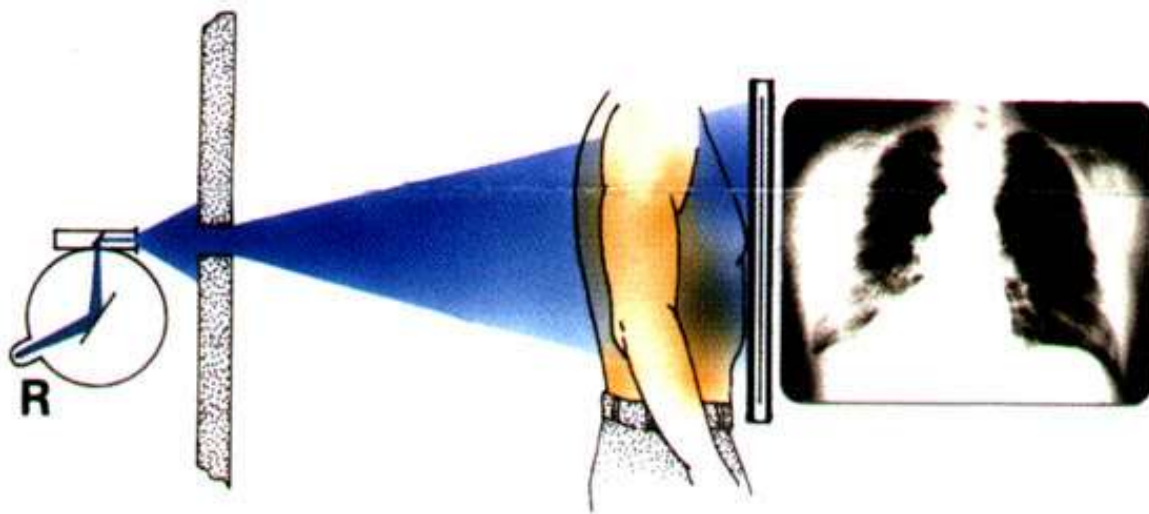


Widmo promieniowania X

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



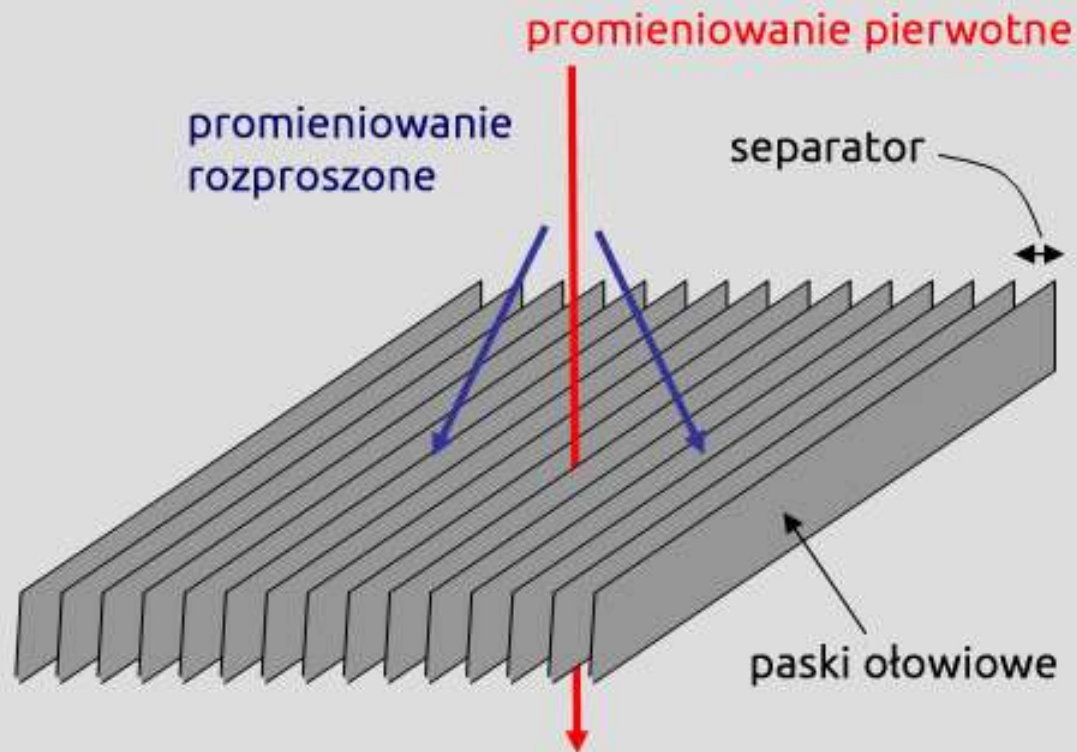
Powstawanie obrazu na kliszy



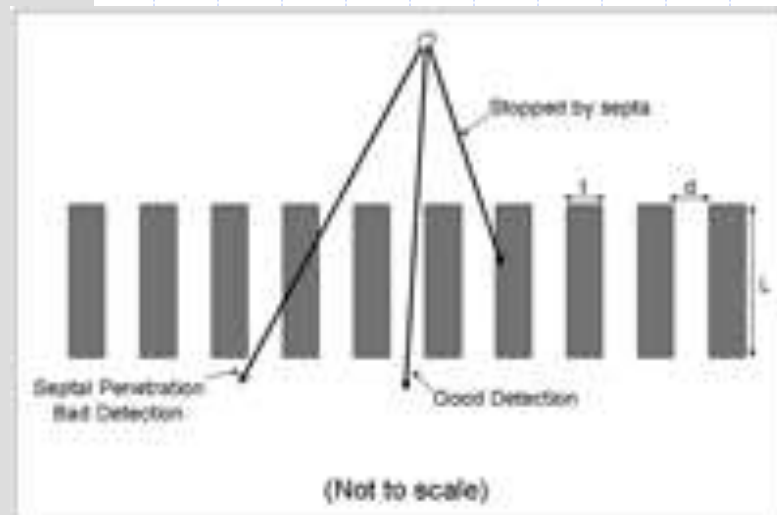


Kratka przeciwrozproszeniowa

Budowa kratki przeciwrozproszeniowej



Kratka przeciwrozproszeniowa – minimalizuje dawkę dla personelu

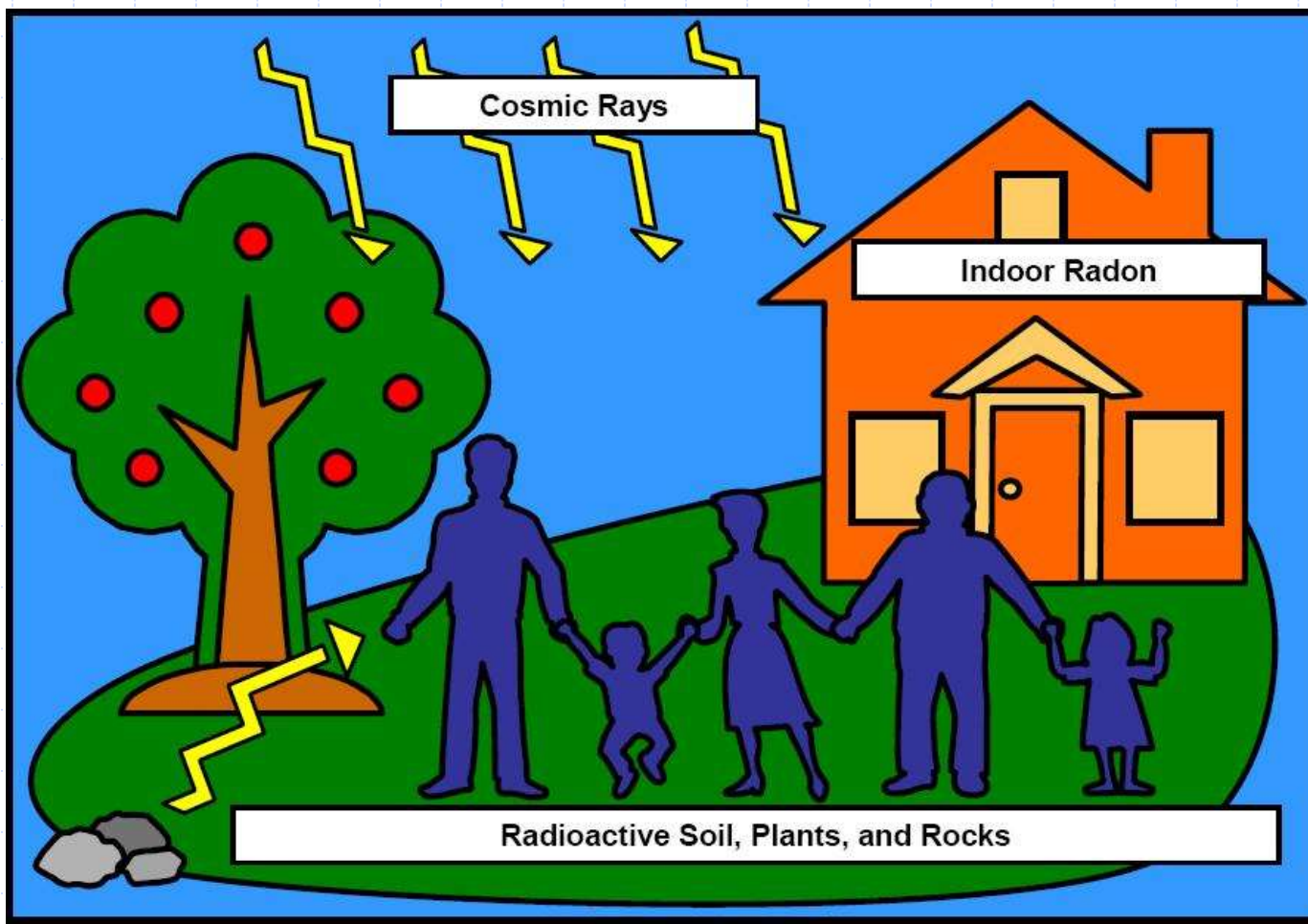




(NATURALNE) TŁO PROMIENIOWANIA

Naturalne tło promieniowania

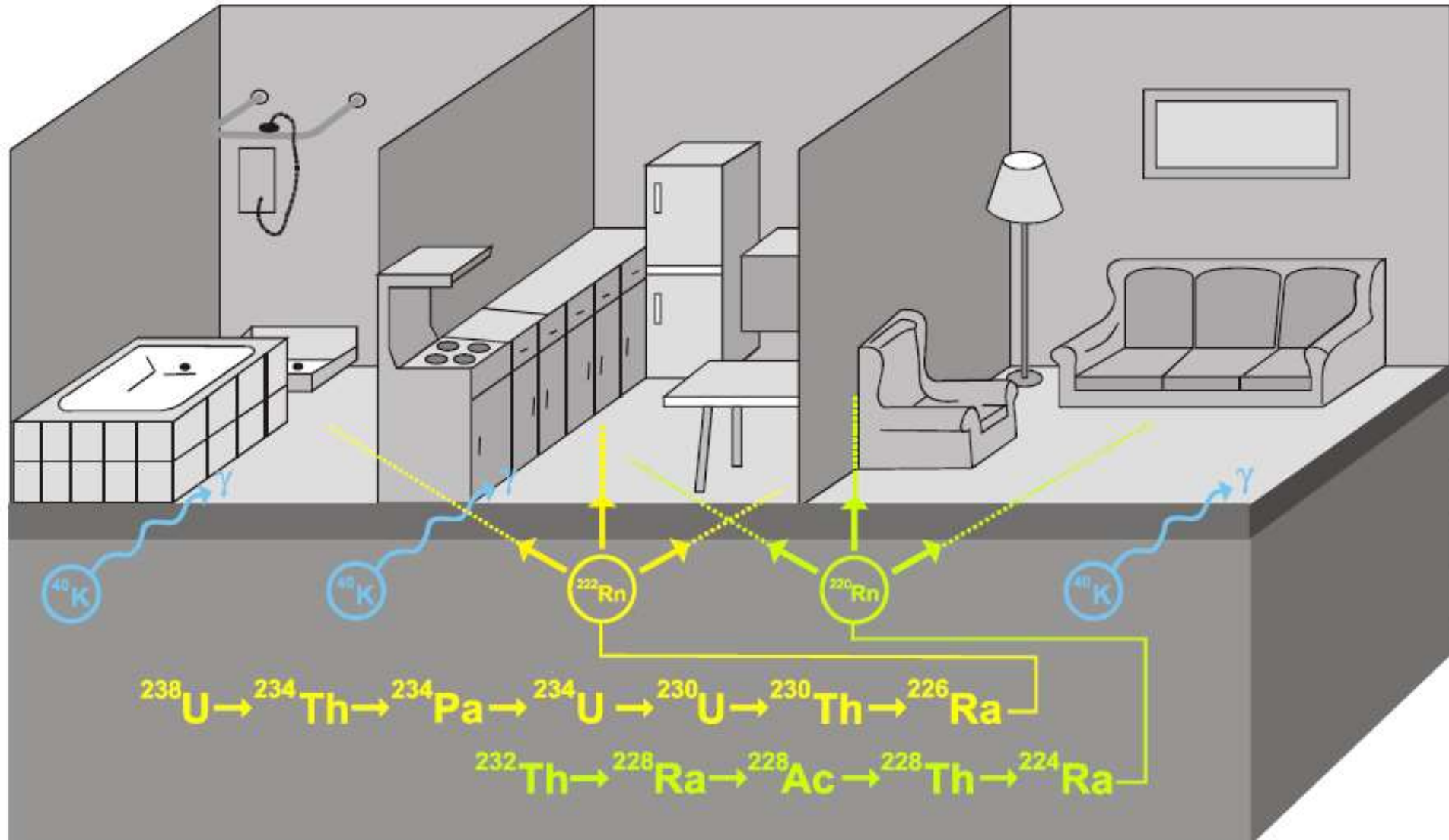
- ◆ Życie na Ziemi zawsze było, jest i będzie skąpane w morzu promieniowania



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

Ryzyko radonowe

- ◆ Ustawa Prawo atomowe określiła dopuszczalne limity średniorocznych stężeń radonu w Polsce (budynki przeznaczone do przebywania ludzi) na 300 Bq/m^3
- ◆ Związane jest to z tzw. ryzykiem radonowym (ryzykiem wystąpienia nowotworu płuc skorelowanego z radonem)
- ◆ Jednakże badania naukowe nie potwierdziły jednoznacznej korelacji dla tak niskich stężeń radonu – będzie to omówione na jednym z kolejnych wykładów

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, zazwyczaj średnio i długożyciowych
- ◆ Promieniowanie kosmiczne zawiera wysokoenergetyczne prom. gamma

Wzrost mocy dawki promieniowania gamma wraz z wysokością n.p.m.

- ◆ Równanie na moc dawki skutecznej:

$$\dot{E} \left[\frac{nSv}{h} \right] = 37 e^{0.38 X}$$

gdzie X to wysokość w [km]

- ◆ Źródło: Bundesamt fuer Gesundheitswesen FSAS. Environmental radioactivity and radiation exposure in Switzerland 1993. Switzerland; 1994. Report No.: INIS-MF--14472.

Tło promieniowania gamma w Polsce w 1995 r. od gruntu

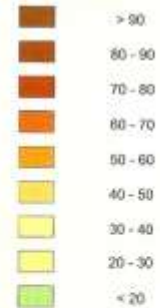
TABLICA
PLATE 72

RADIOMETRIA
RADIOMETRY

DAWKA PROMIENIOWANIA
GAMMA

GAMMA DOSE RATE

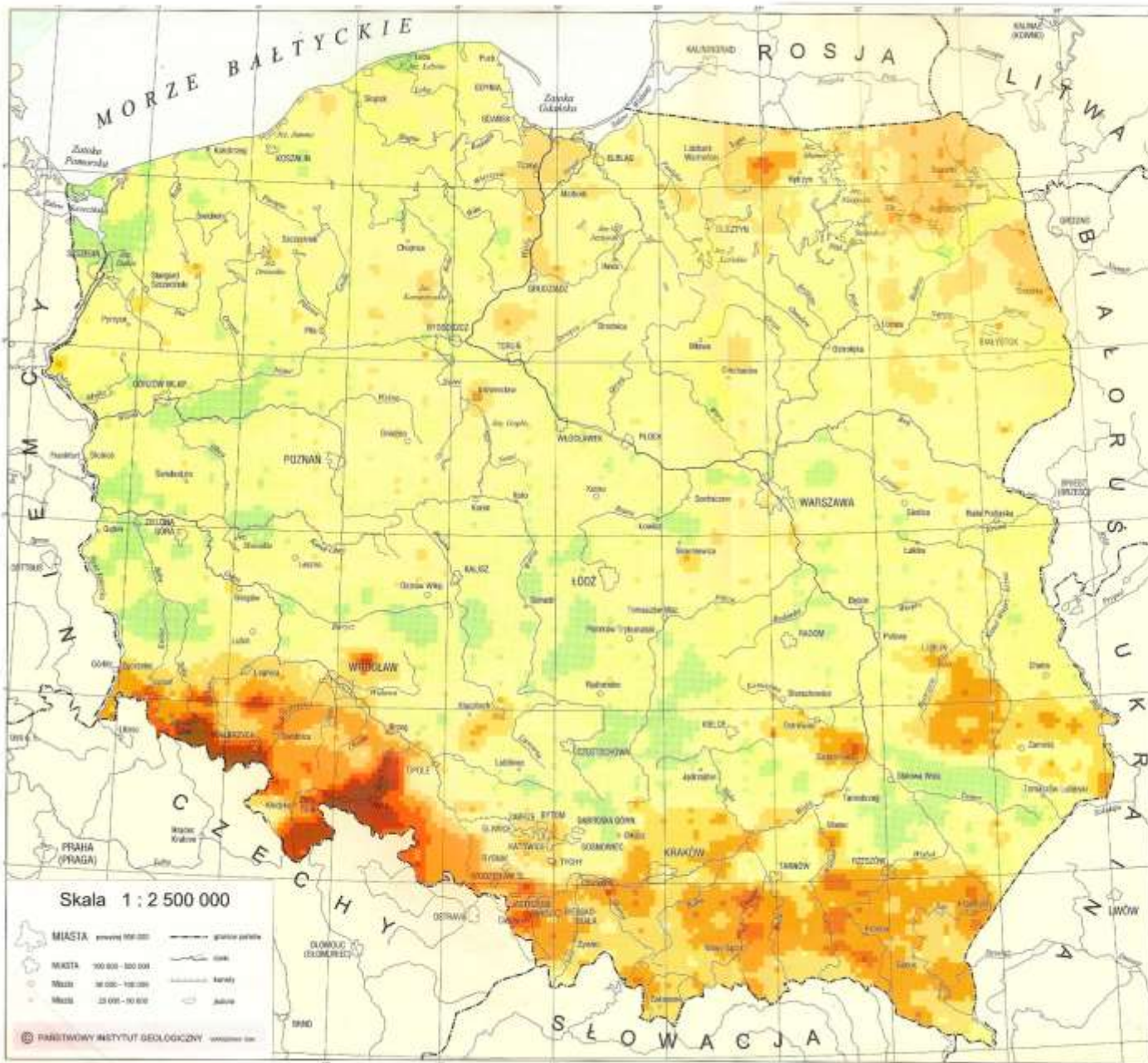
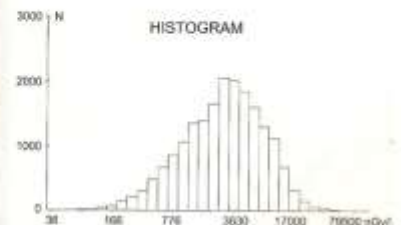
γ-ray dose rate
contents in nGy/h



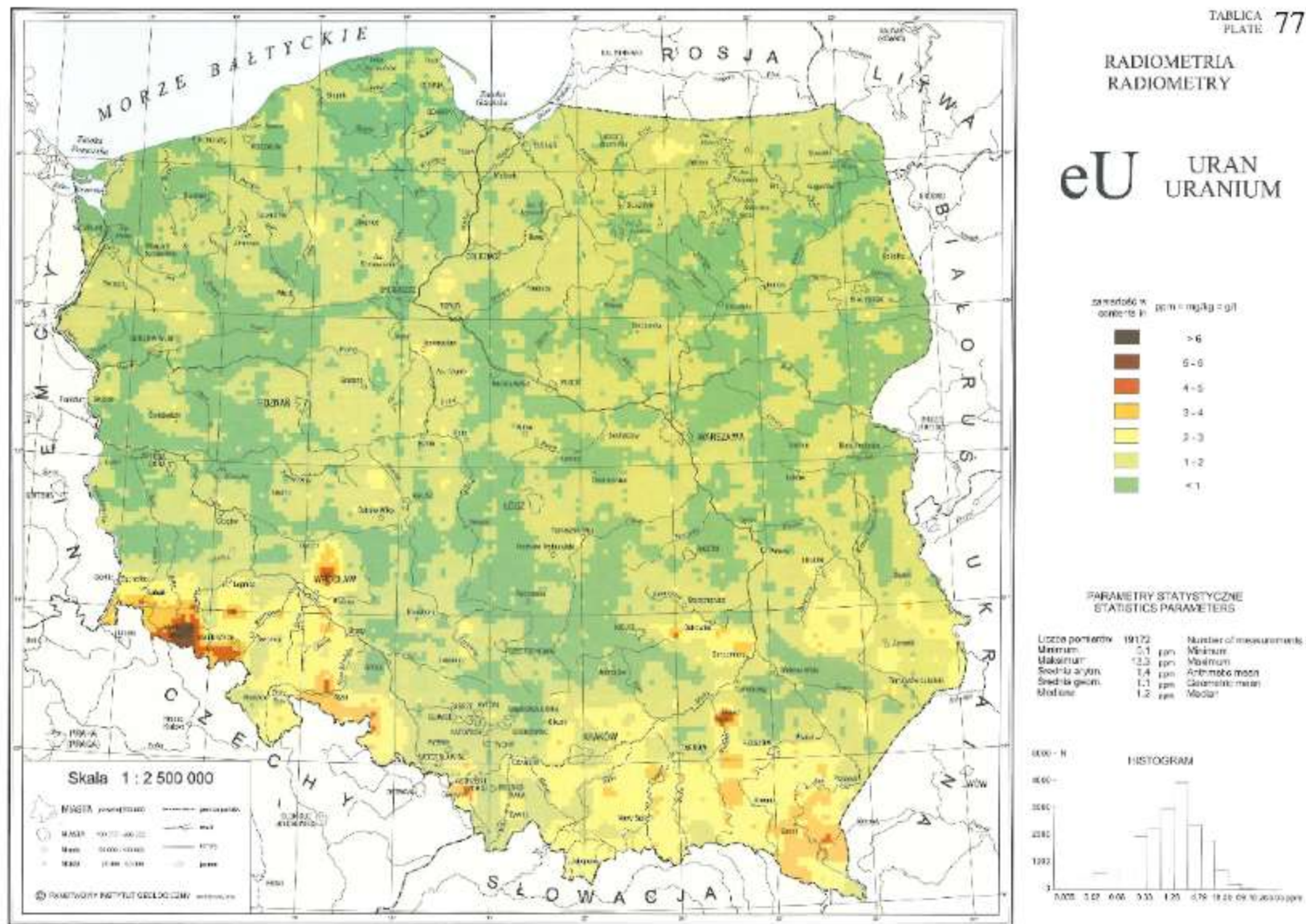
PARAMETRY STATYSTYCZNE
STATISTICS PARAMETERS

Liczba pomiarów	19528	Number of measurements
Minimum	2.3 nGy/h	Minimum
Maksimum	140.6 nGy/h	Maximum
Średnia arytm.	34.1 nGy/h	Arithmetic mean
Średnia geom.	30.9 nGy/h	Geometric mean
Mediana	32.2 nGy/h	Median

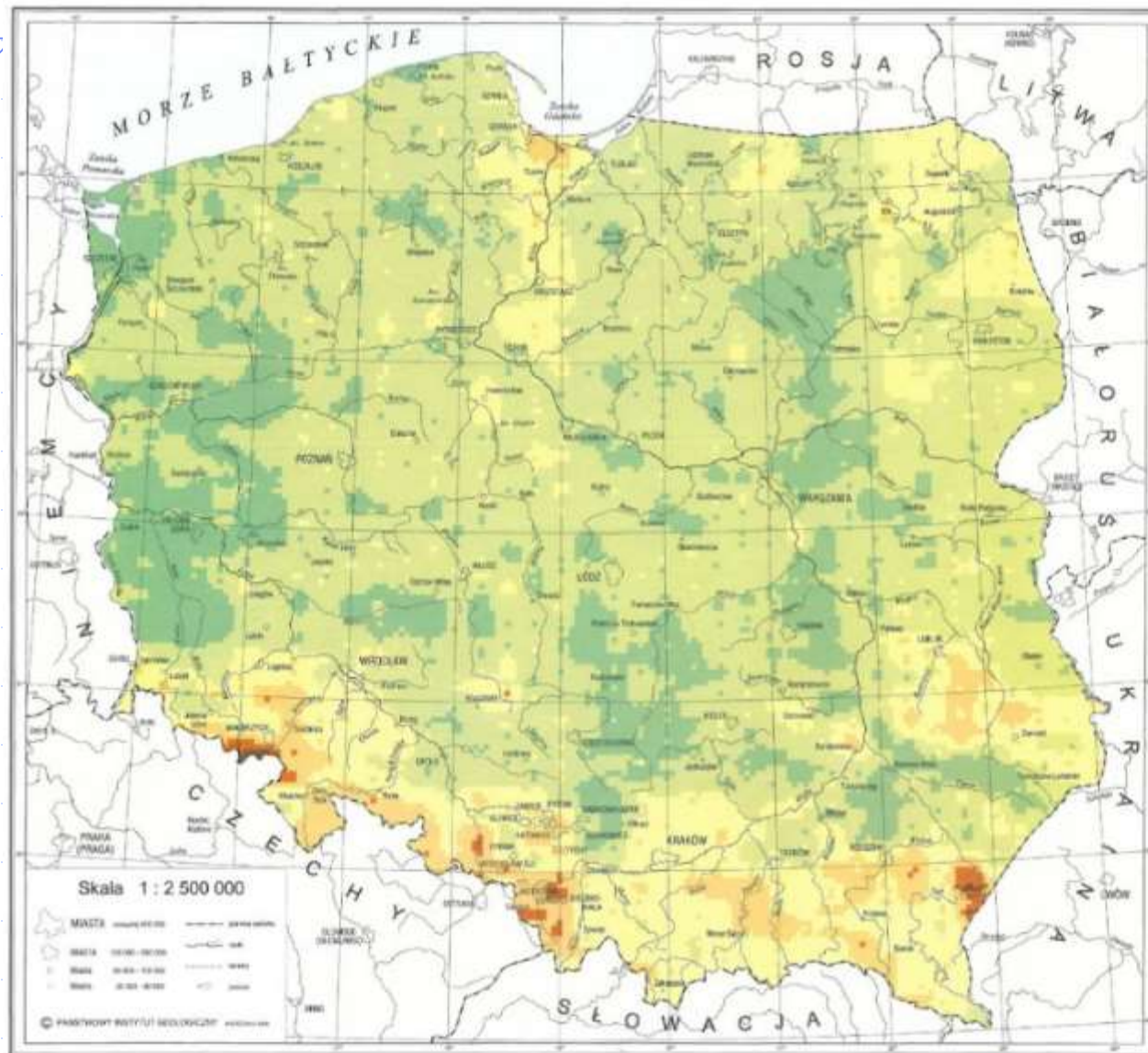
HISTOGRAM



Występowanie uranu (1995 r.)



Występowanie toru



TABLICA 76
PLATE

RADIOMETRIA
RADIOMETRY

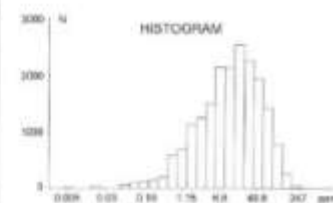
eTh TOR
THORIUM

zawartość w ppm = mg/kg = g/t
contents in

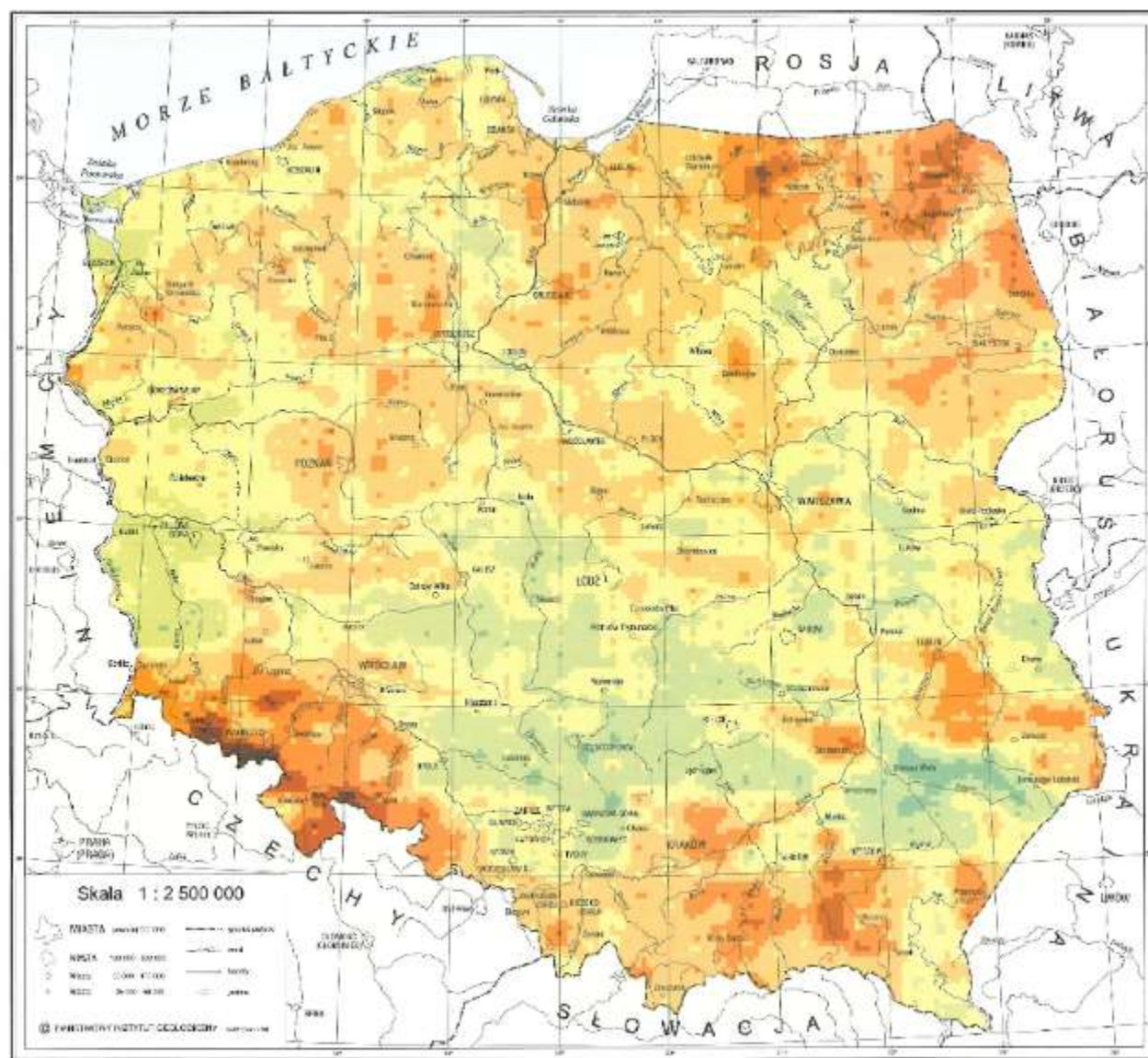


PARAMETRY STATYSTYCZNE
STATISTICS PARAMETERS

Parametr	1958	Number of measurements
Minimum	0.1 ppm	Minimum
Maximum	17.5 ppm	Maximum
Drobia arytm.	3.3 ppm	Arithmetic mean
Średnia geom.	2.2 ppm	Geometric mean
Mediana	3.6 ppm	Median



Występowanie K-40

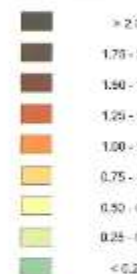


TABLICA PLATE 75

RADIOMETRIA
RADIOMETRY

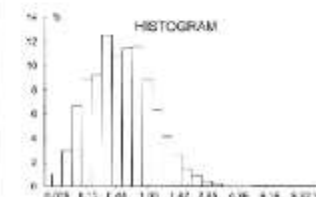
⁴⁰K POTAS
POTASSIUM

zawartość w
contents in %

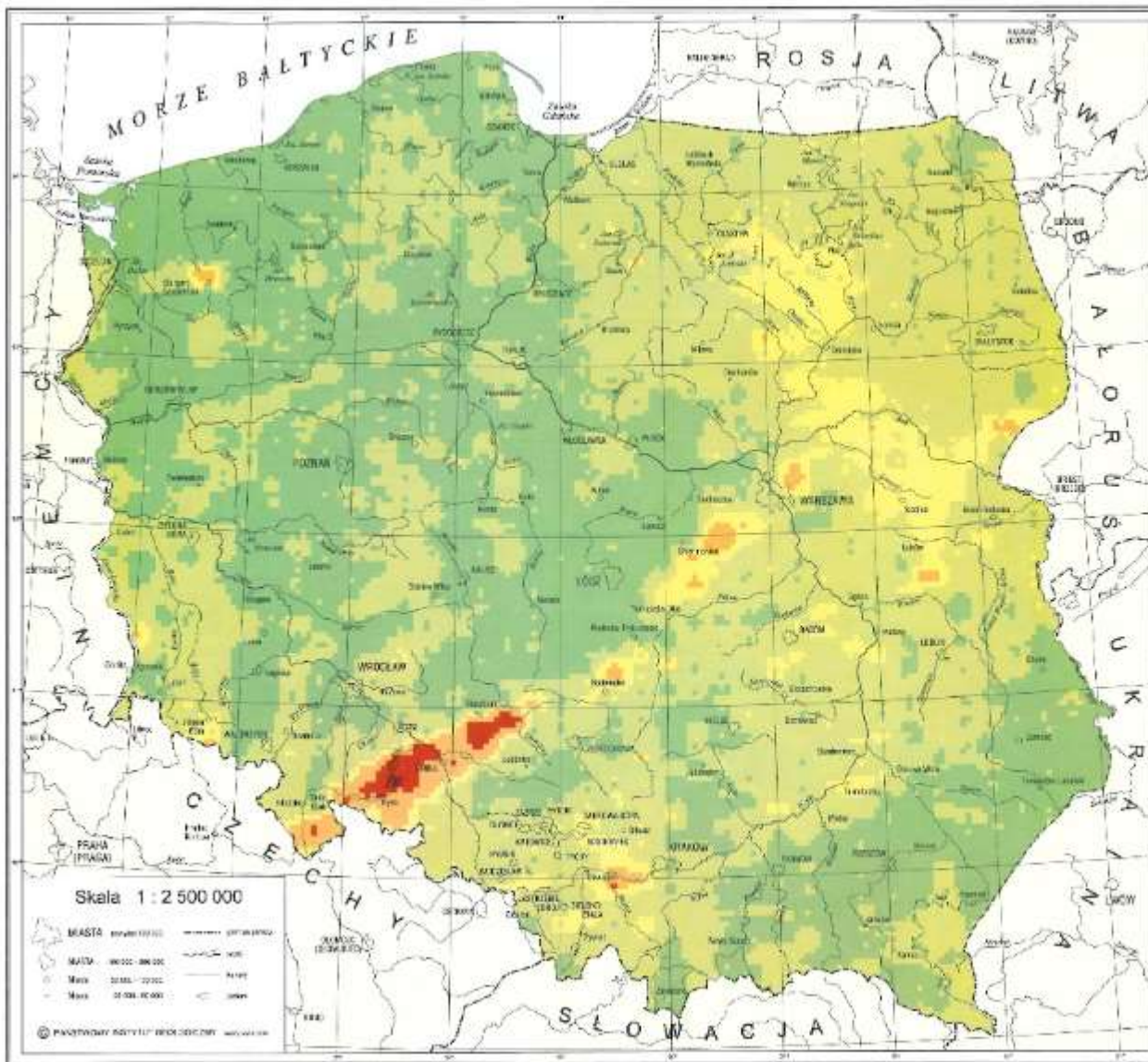


PARAMETRY STATYSTYCZNE
STATISTICS PARAMETERS

Liczba pomiarów	15486	Number of measurements
Minimum	0.10 %	Minimum
Maksimum	2.80 %	Maximum
Średnia arytmetyczna	0.74 %	Arithmetic mean
Średnia geometryczna	0.68 %	Geometric mean
Mediana	0.70 %	Median



Występowanie cezu (Czarnobyl!)

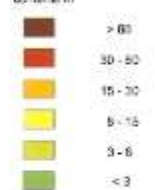


TABLICA
PLATE 74

RADIOMETRIA
RADIOMETRY

$^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$ CEZ
CESIUM

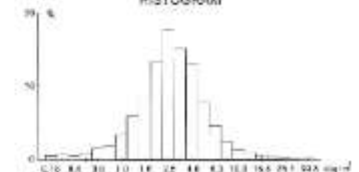
zawartość w
contenit in



PARAMETRY STATYSTYCZNE
STATISTICS PARAMETERS

Liczba pomiarów: 10025	Number of measurements
Minimum: 0.1 Bq/m²	Minimum
Maksimum: 56 Bq/m²	Maximum
Średnia arytm.: 2.5 Bq/m²	Arithmetic mean
Średnia geom.: 2.5 Bq/m²	Geometric mean
Mediana: 3.5 Bq/m²	Median

HISTOGRAM



Stężenie cezu-137 na Opolszczyźnie

- prof. M. Tukiendorf, 2011

