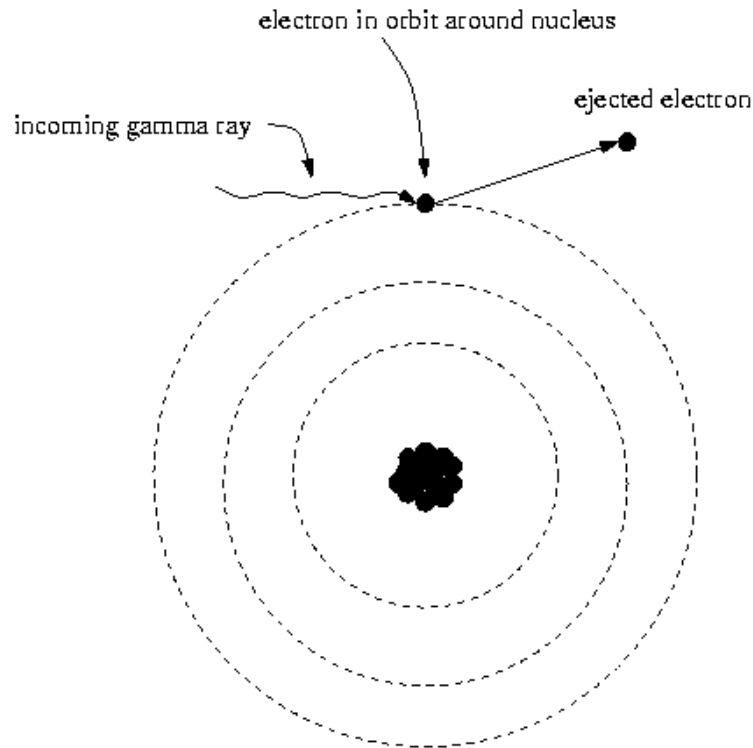


Techniki Jądrowe w Diagnostyce i Terapii Medycznej

Wykład 3 - 15 marca 2022

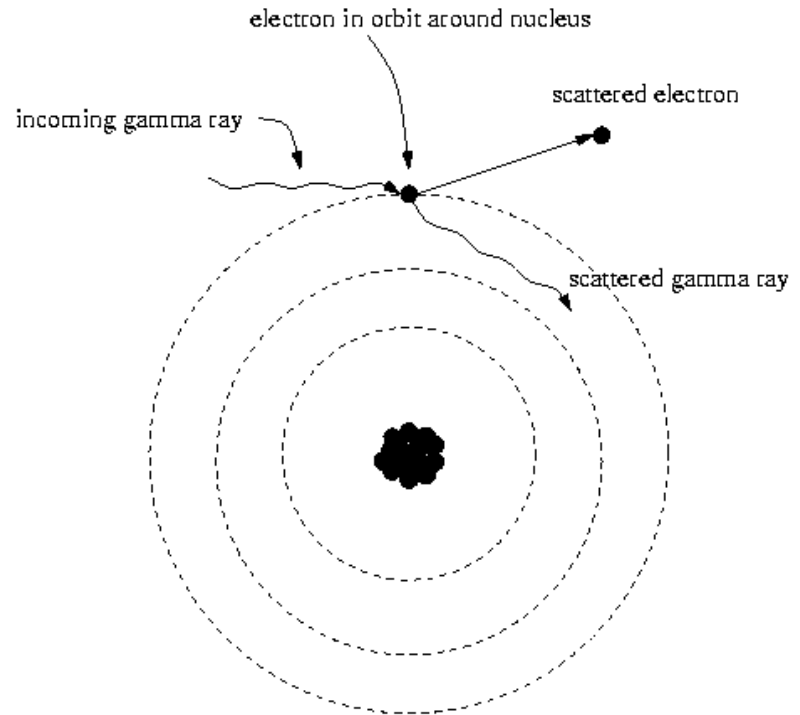
Zygmunt Szefliński
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów
szef@fuw.edu.pl
<http://www.fuw.edu.pl/~szef/>

Oddziaływanie γ z materia



The Photoelectric Effect:

The incoming gamma ray is completely absorbed by the atom and the energy absorbed is used to eject an electron from the atom.

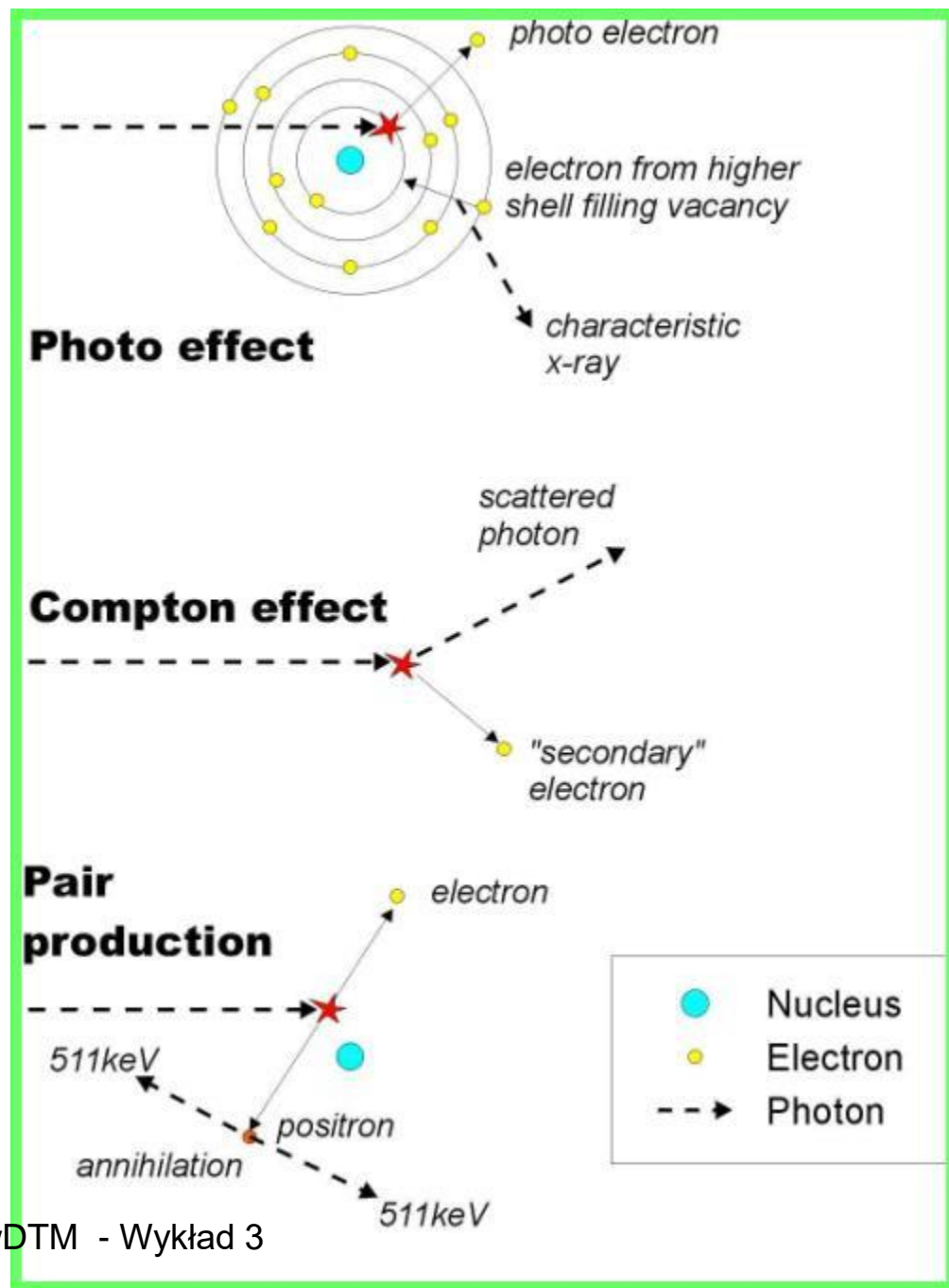


Compton Scattering:

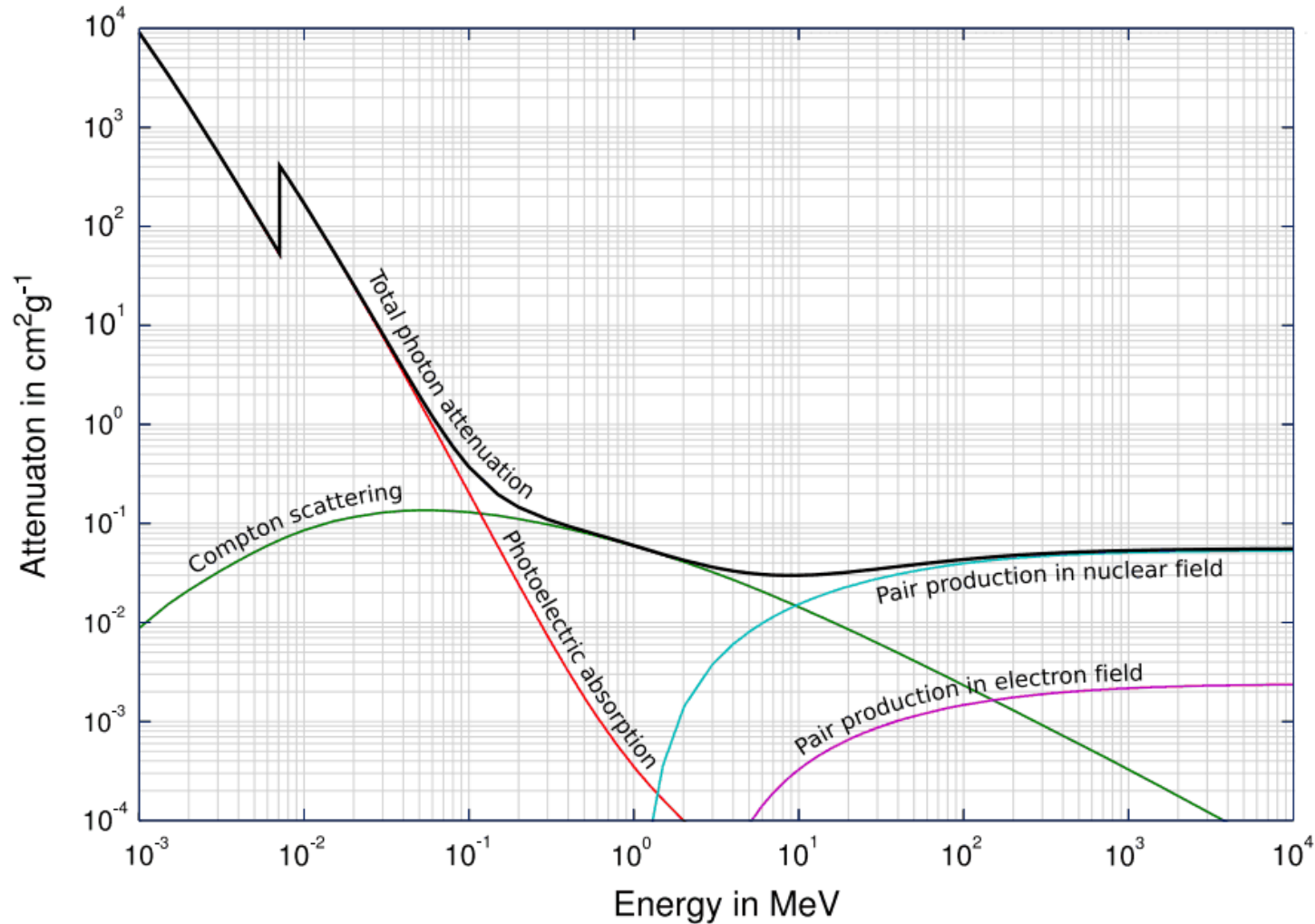
The energy of an incoming gamma ray is partially absorbed by the atom, ejecting an electron from the atom and scattering the photon.

Oddziaływania fotonów

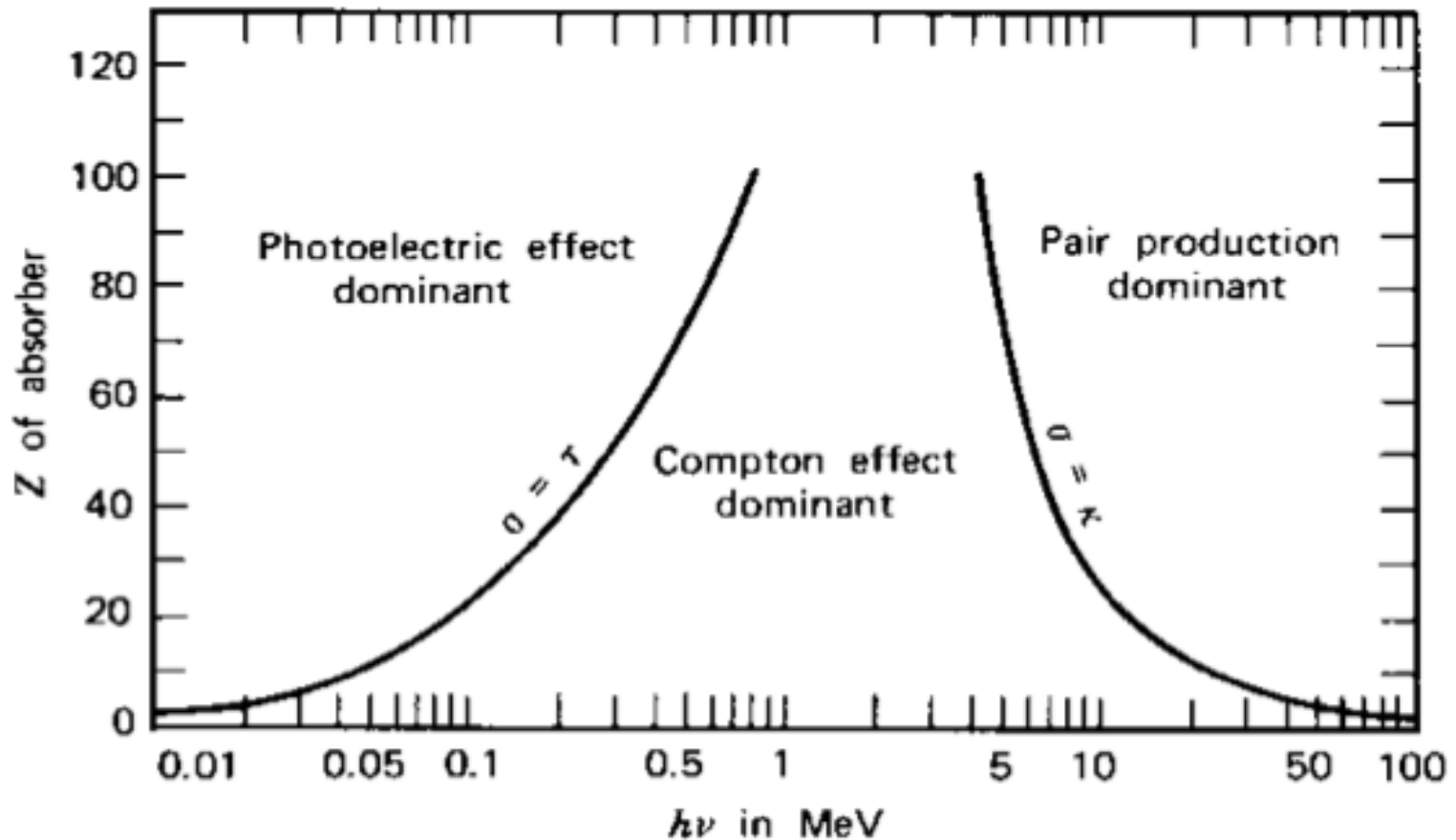
Zawsze produkowany jest w oddziaływaniu elektron, który jest obiektem jonizującym bezpośrednio. Fotony komptonowskie lub anihilacyjne mogą oddziaływać w kolejnych procesach



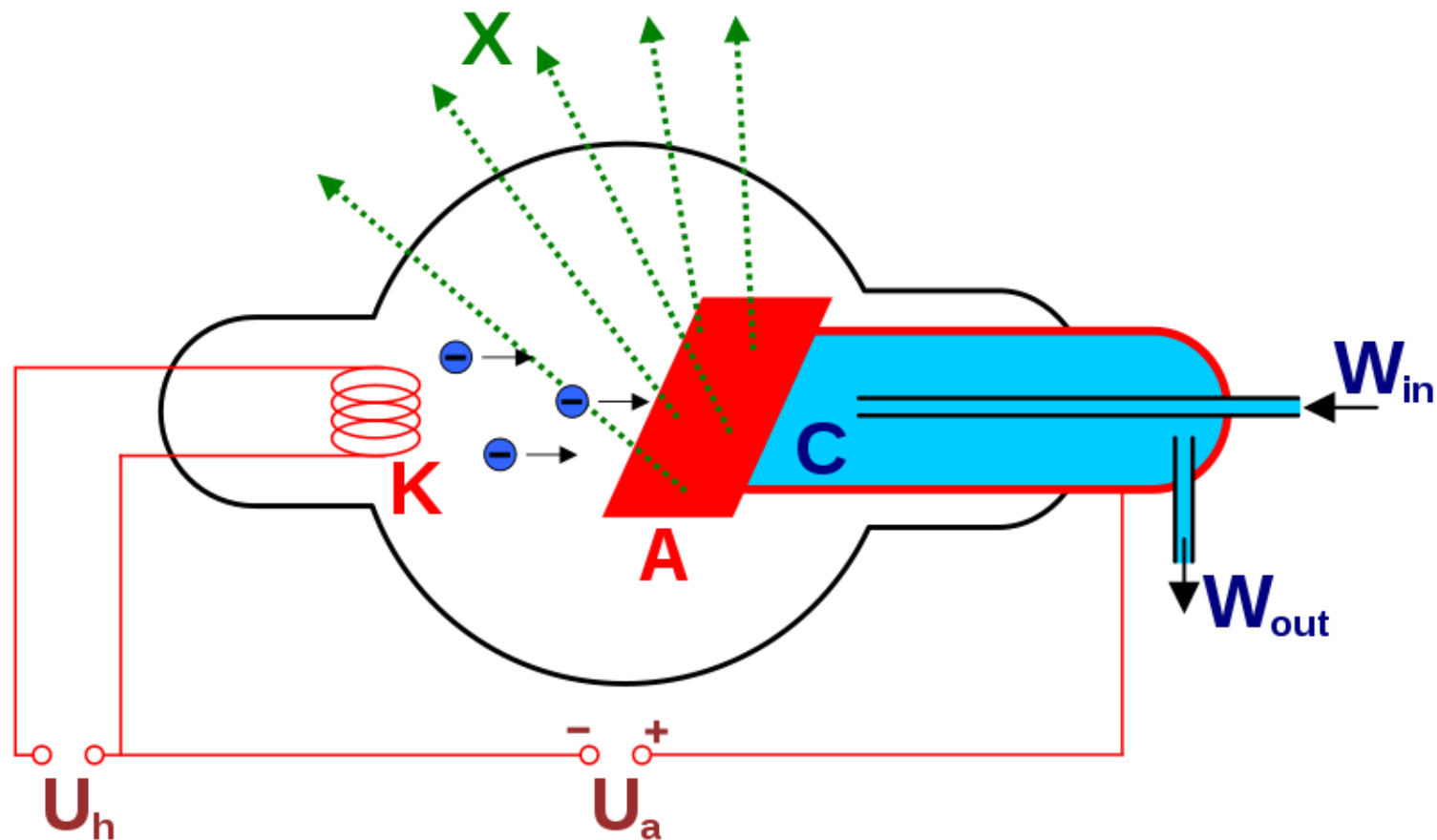
Absorpcja promieniowania γ



Oddziaływanie γ z materia

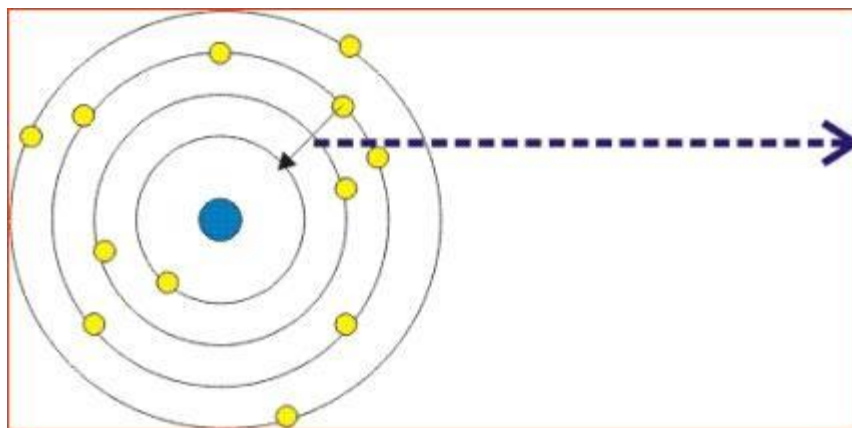
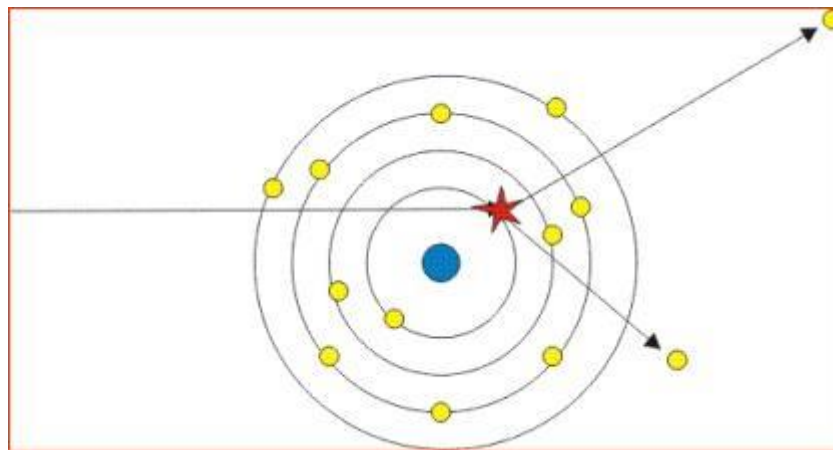


Lampa rentgenowska dla promieniowania niskich i średnich energii



Promieniowanie charakterystyczne

- padający elektron lub foton wybija elektron z wewnętrznej powłoki

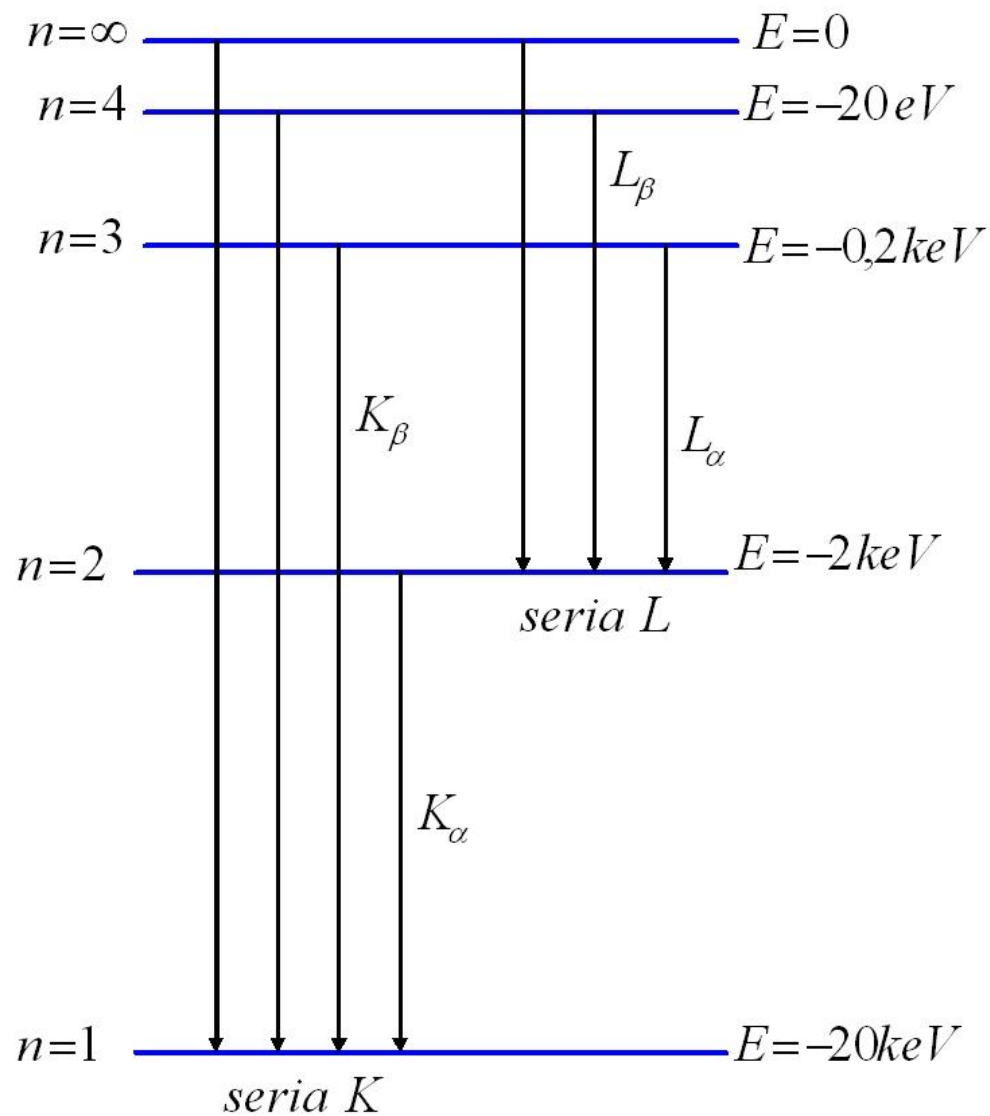


- elektron z wyższej powłoki zapełnia dziurę, a różnica energii jest emitowana jako foton promieniowania X

Widmo promieniowania charakterystycznego

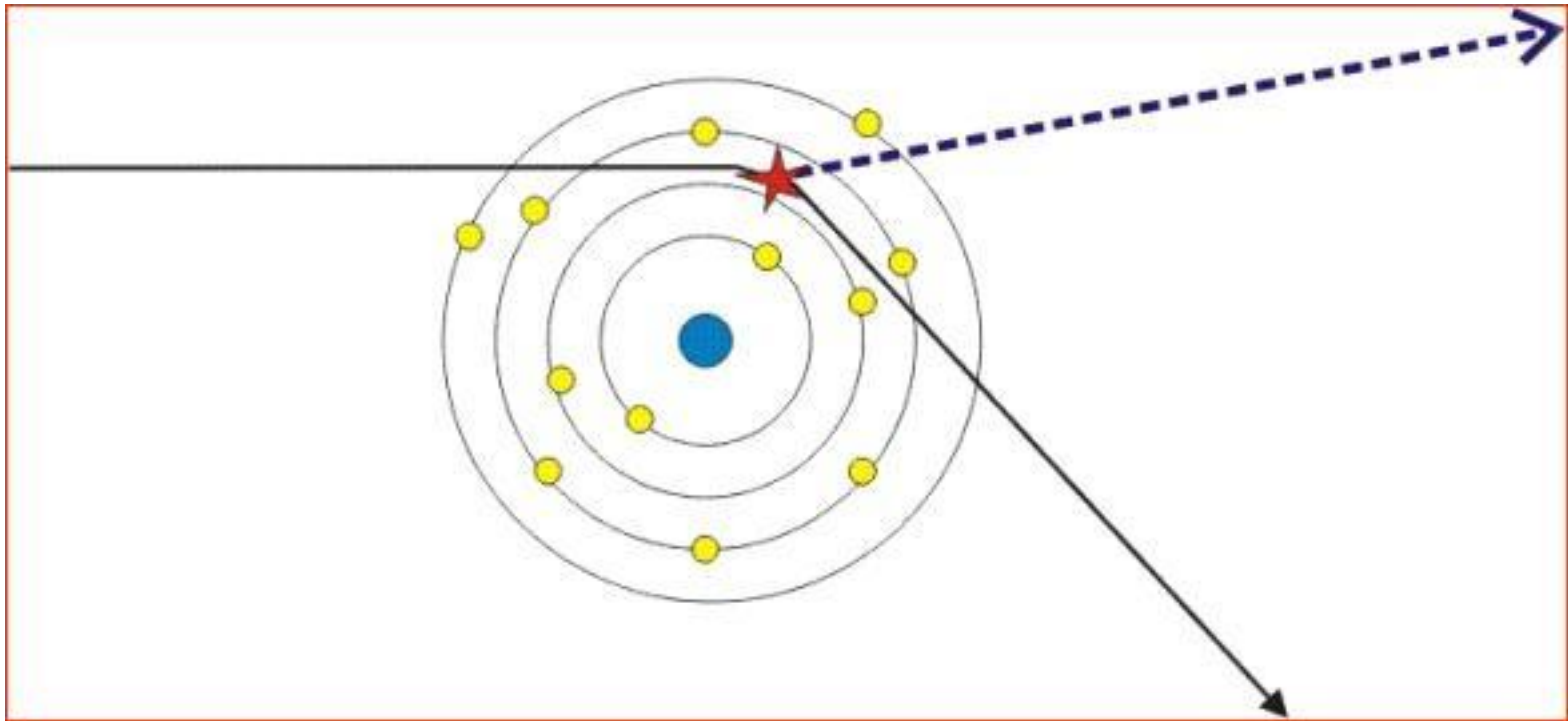
- Start z wybiciem elektronu głównie z powłoki K (możliwe również z L, M,...) - jonizacja
- e^- z powłoki L lub M obsadza dziurę w powłoce K
- Różnica energii jest emitowana jako foton
- Sekwencja kolejnych przejść elektronowych pomiędzy poziomami atomowymi
- Energia fotonów jest charakterystyczna dla atomu

Diagram przejść X

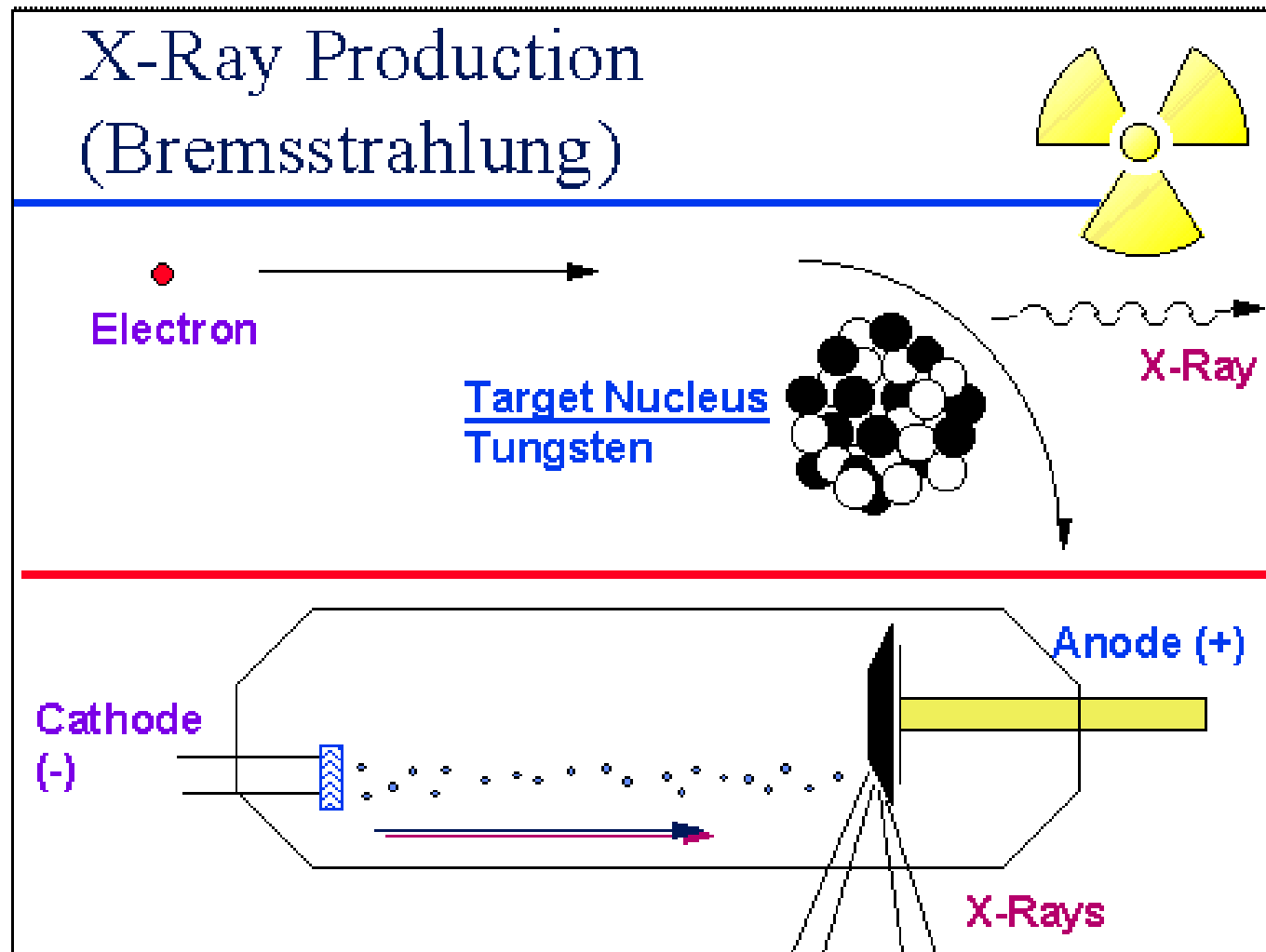


Promieniowanie hamowania

- Padający elektron jest odchylony przez pole elektryczne jądra (atomu) i hamowany. Różnica energii jest emitowana jako foton X.



Produkcja promieni X (widmo ciągłe)



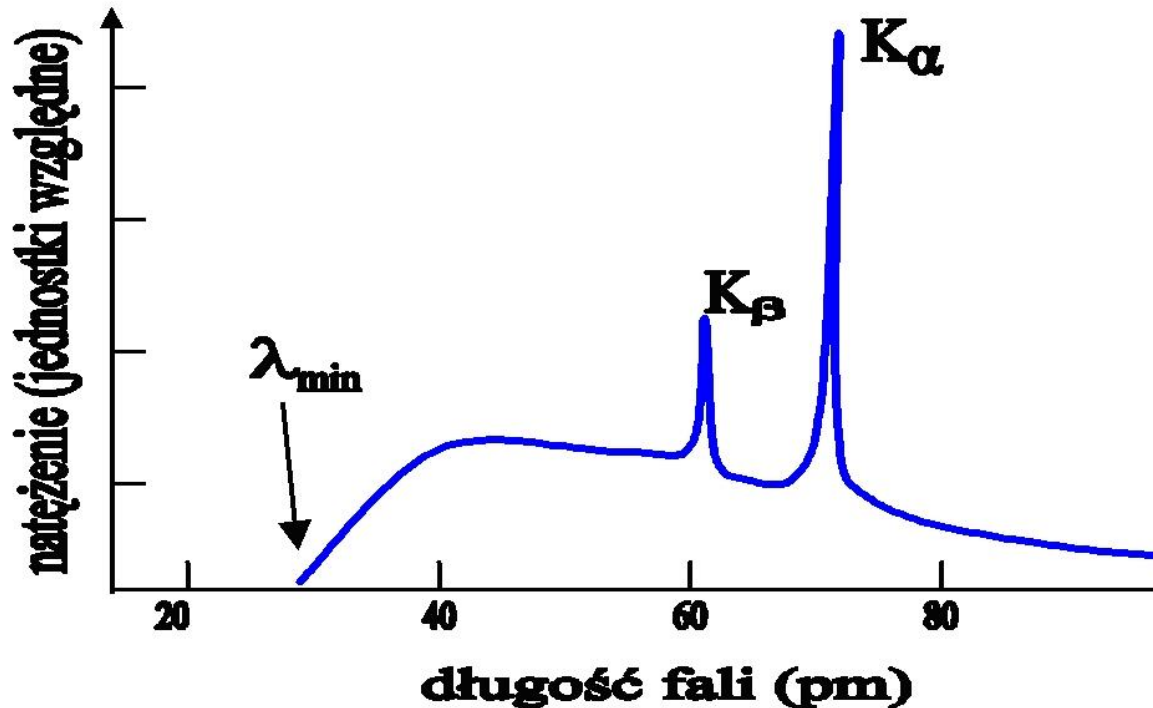
Energie rentgenowskie

Energia wiązania elektronu ciężkich pierwiastków jest znacznie wyższa niż dla atomu wodoru (13,6 eV). Ponieważ energia ta jest proporcjonalna do Z^2 , możemy oczekiwać, że np. dla miedzi ($Z=29$) może ona osiągnąć wartości prawie trzy rzędy wyższe niż obserwowaliśmy w atomie wodoru i odpowiednio zmniejszone długości fal. Poziomy dla powłok wyższych niż K, są w rzeczywistości grupami poziomów, opisanymi różnymi liczbami kwantowymi l , m i s .

Jeśli napięcie przyłożone do anody przewyższa istotnie wartość energii powłoki K ($n=0$), to elektrony będą traciły energię na kilka sposobów:

- na ogrzewanie anody,
- na emisję ciągłego promieniowania hamowania,
- na wybite elektronu z wewnętrznej powłoki anody, co wiąże się z emisją promieniowania charakterystycznego.

Promieniowanie X



Granica krótkofalowa jest zdefiniowana przez energię kinetyczną elektronów padających na tarczę, gdyż maksymalna energia promieniowania hamowania nie może przekroczyć energii kinetycznej elektronu.

Dla energii kinetycznej E_e , możemy wyliczyć granicę krótkofalową

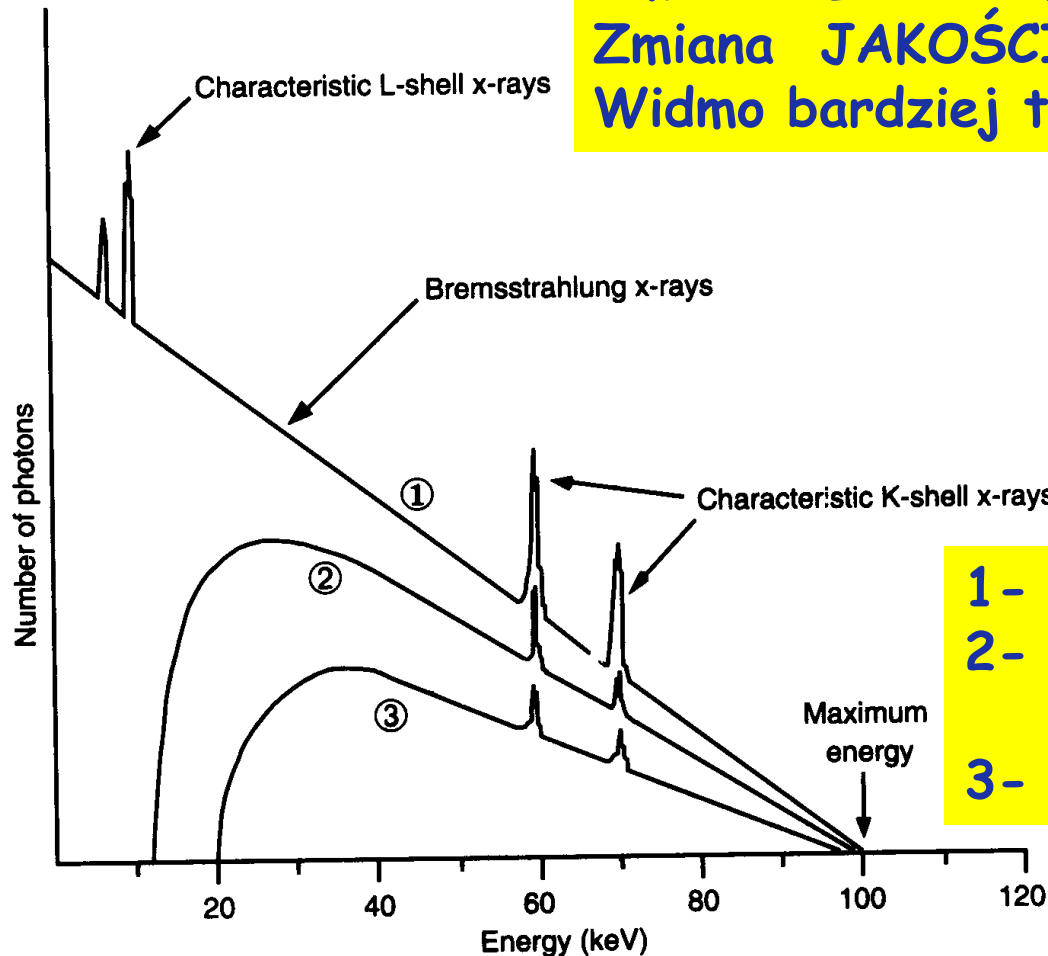
$$E_e = h\nu_{\max} = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda_{\min}} \Rightarrow \lambda_{\min} = \frac{2\pi\hbar c}{E_e}$$

Dla $E_e = 40 \text{ keV}$ mamy:

$$\lambda_{\min} = \frac{2\pi\hbar c}{E_e} = \frac{2\pi \cdot 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{40 \cdot 10^{-3} \text{ MeV}} = 31 \cdot 10^3 \text{ fm} = 31 \text{ pm}$$

Filtracja

Zmiana ILOŚCI FOTONÓW &
Zmiana JAKOŚCI WIDMA
Widmo bardziej twarde (wyższe energie)



1 - Widmo z anody
2 - Po okienku lampy RTG
(INHERENT filtration)
3 - Po DODATKOWEJ filtracji

Układ okresowy

hydrogen 1 H 1.0079																		helium 2 He 4.0026
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122											boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180	
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305											aluminium 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948	
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80	
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29	
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	57-70 *	lutetium 71 Lu 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	89-102 **	lawrencium 103 Lr [262]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [269]	meitnerium 109 Mt [268]	ununnillium 110 Uun [271]	unununium 111 Uuu [272]	ununbium 112 Uub [277]		ununquadium 114 Uuq [289]				

* Lanthanide series

lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]

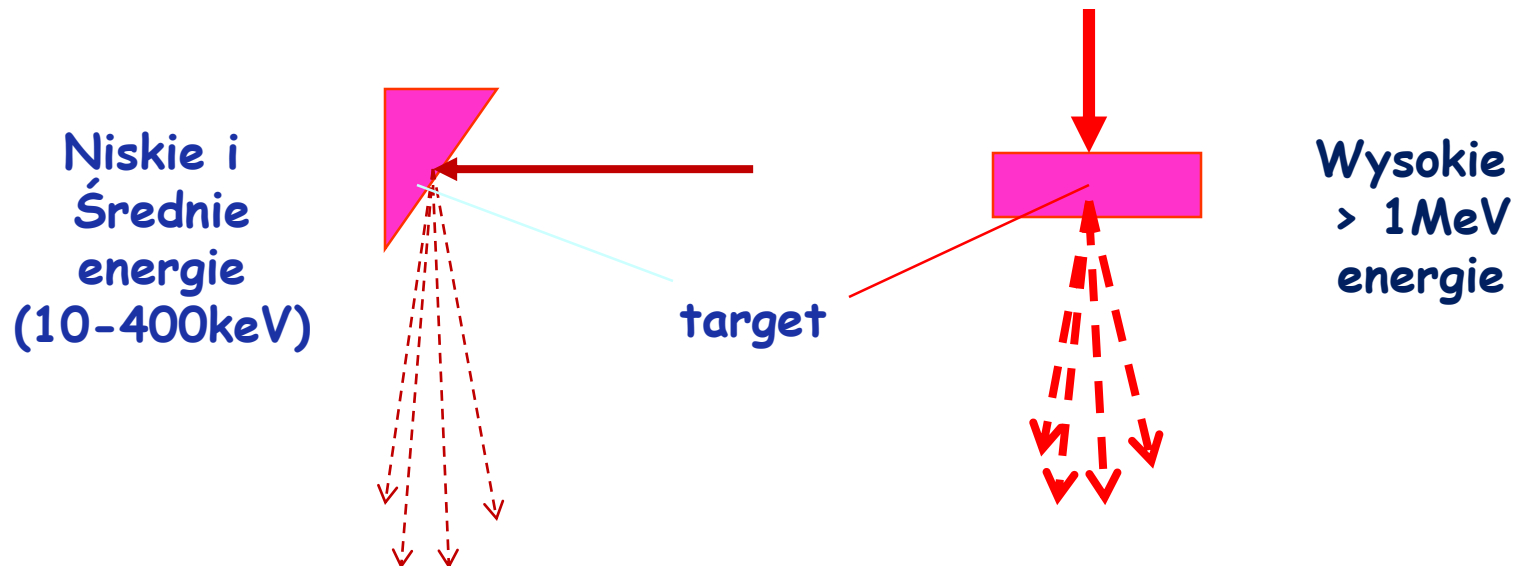
** Actinide series

15.III.2022

TJwDTM - Wykład 3

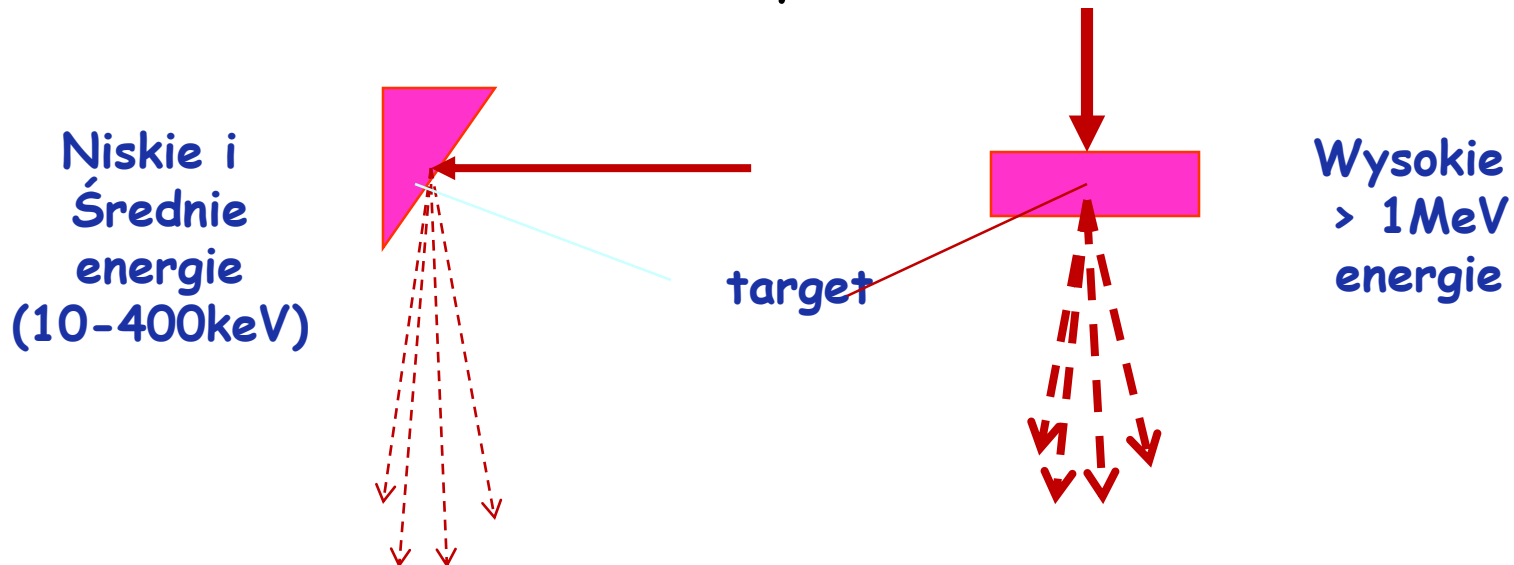
Produkcja promieniowania X

- Elektrony wysokiej energii uderzają w tarczę (metal) gdzie część ich energii jest przekształcana w promieniowanie



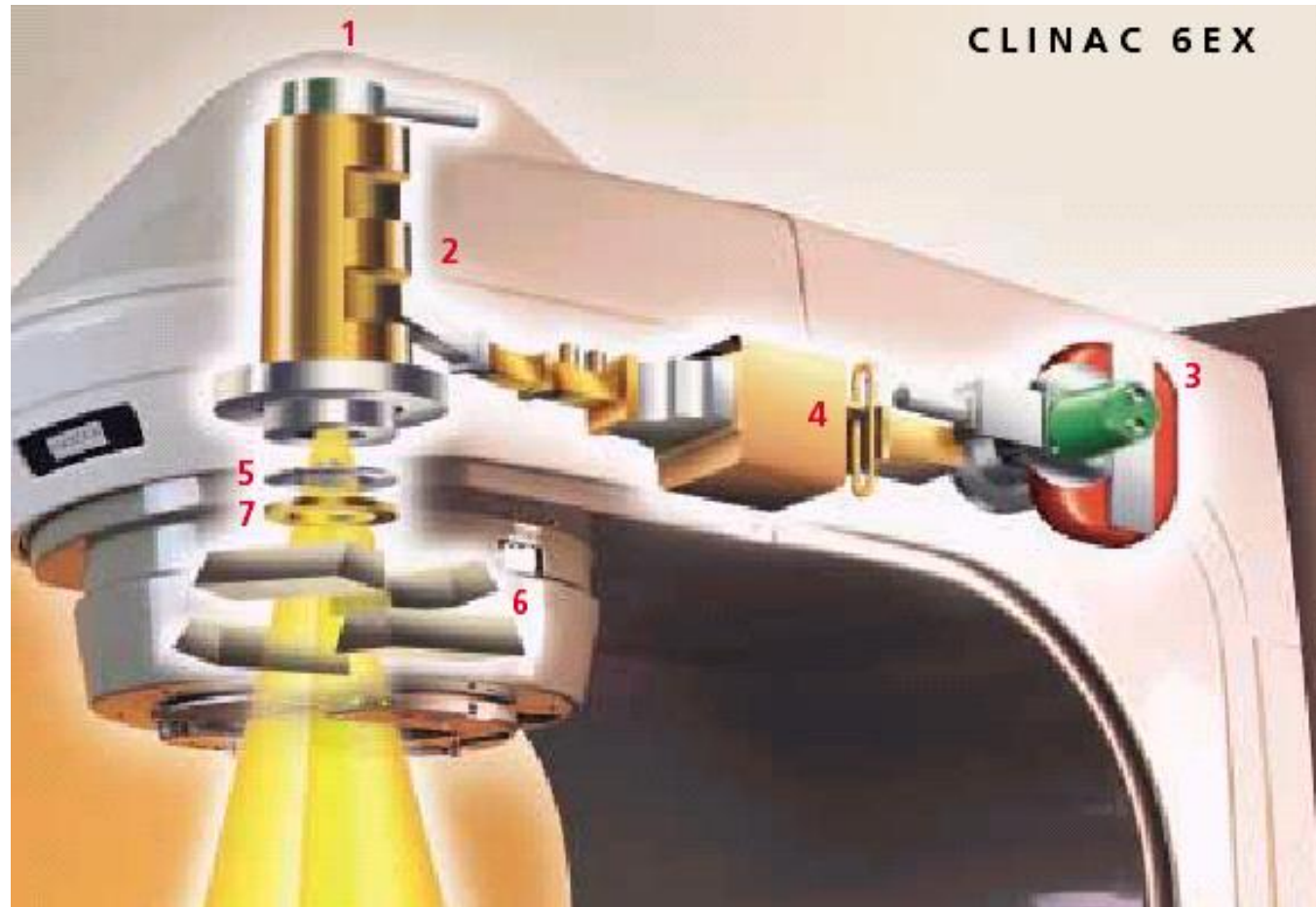
Własności promieniowania X

- **Rozkłady kątowe:** Promieniowanie X wysokich energii jest skierowane głównie do przodu, a promieniowanie X niskich energii jest emitowane głównie prostopadłe do kierunku wiązki elektronów - stąd odbicie od tarczy

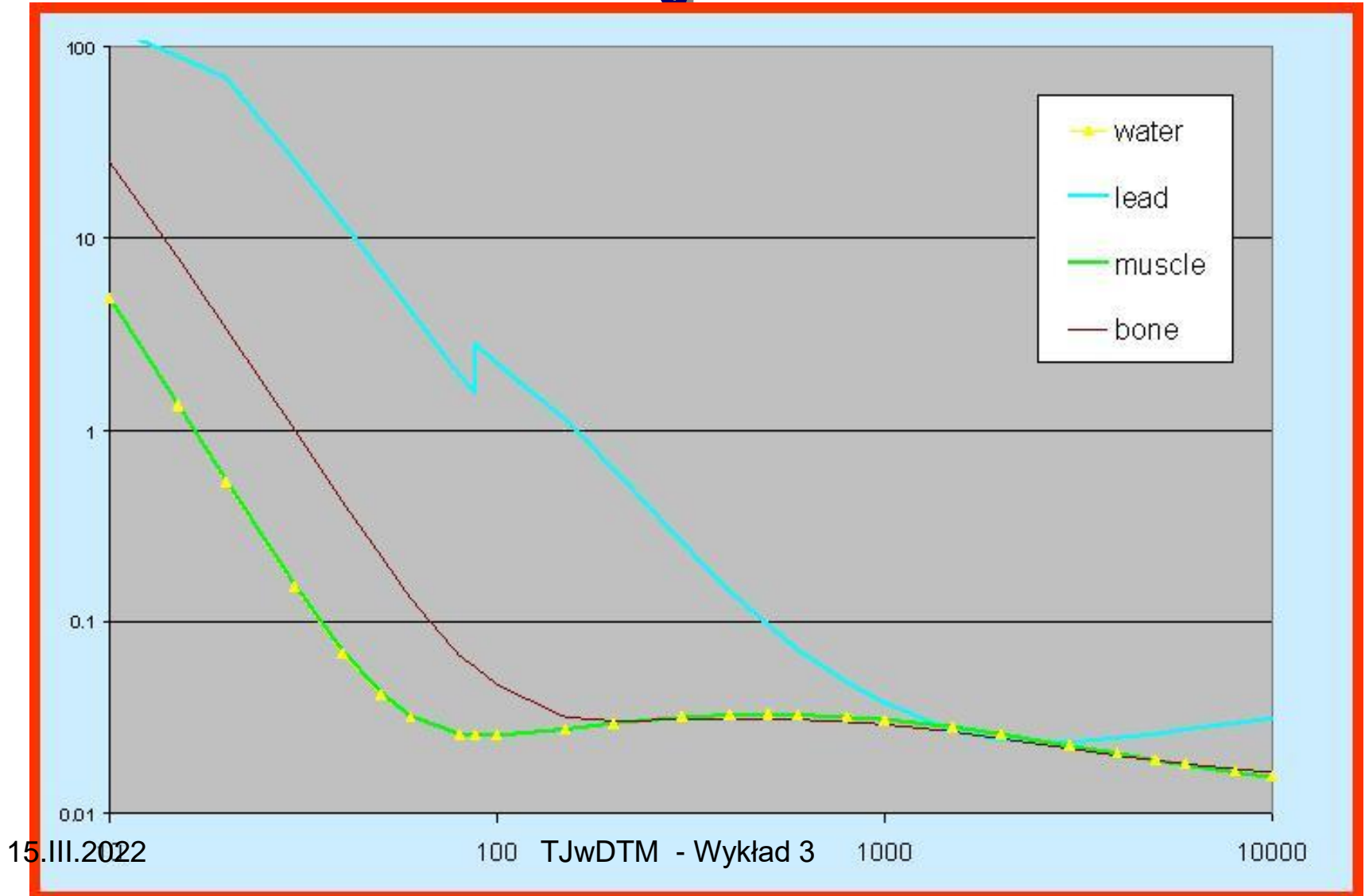


Liniak Megavoltowy

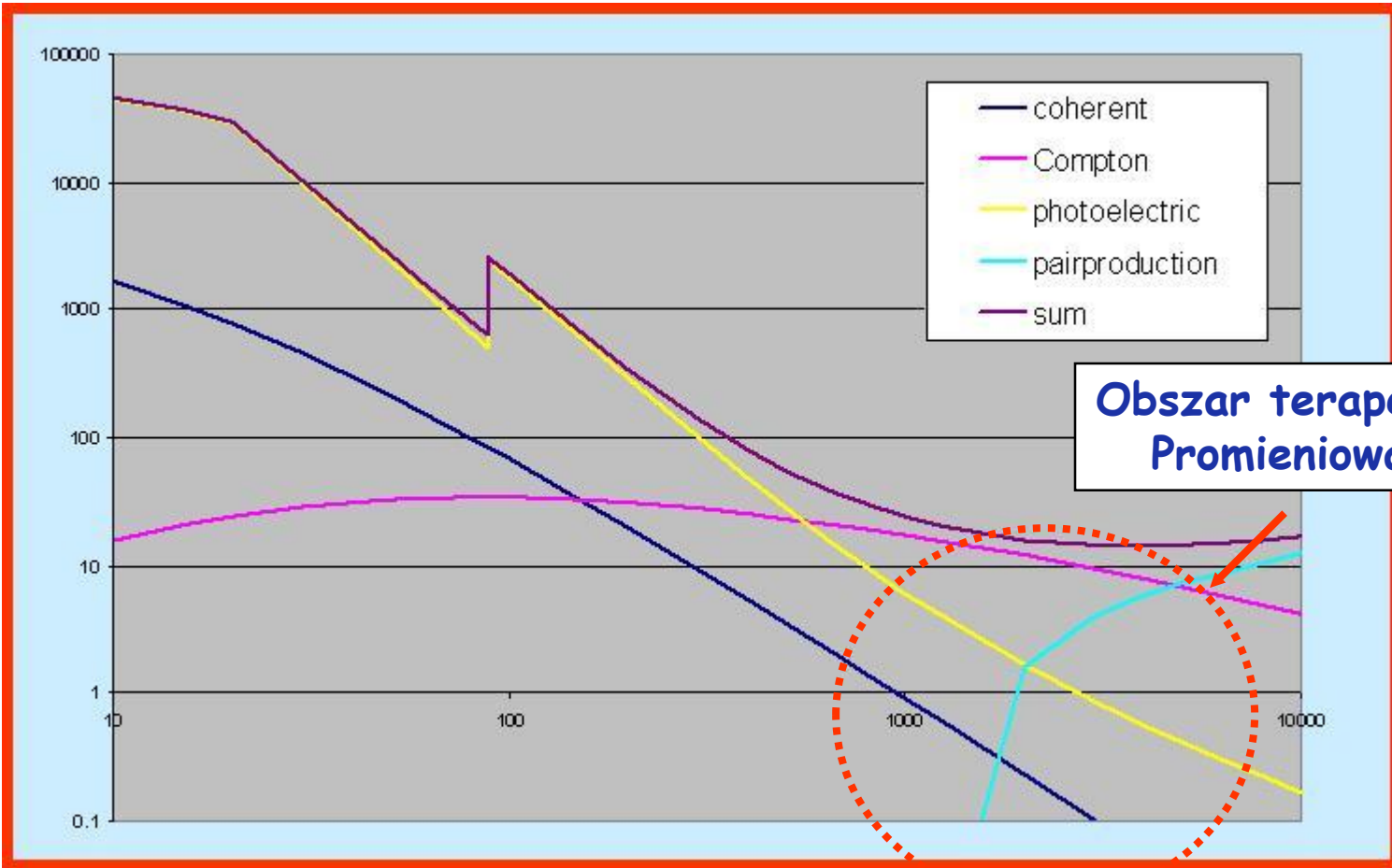
1. Źródło elektronów o energii dziesiątków keV
2. Struktura akceleracyjna
3. Magnetron jako źródło fali elektromagnetycznej (mikrofale)
4. Cyrkulator
5. Filtr - zapewnia równomierny rozkład wiązki
6. Kolimator
7. Komora jonizacyjna



Zmiany osłabienia w funkcji liczby atomowej ośrodka



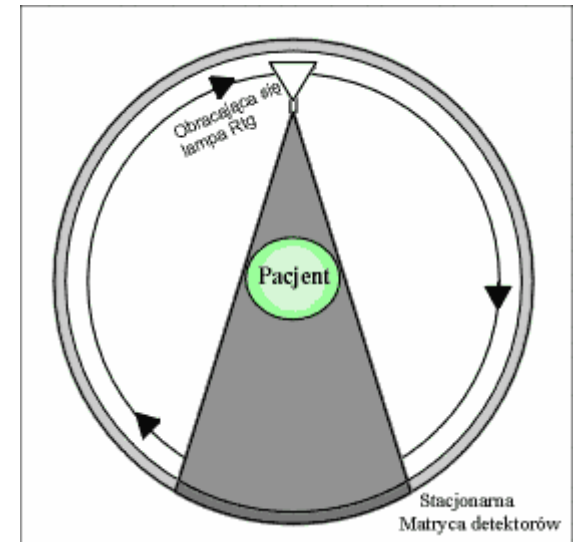
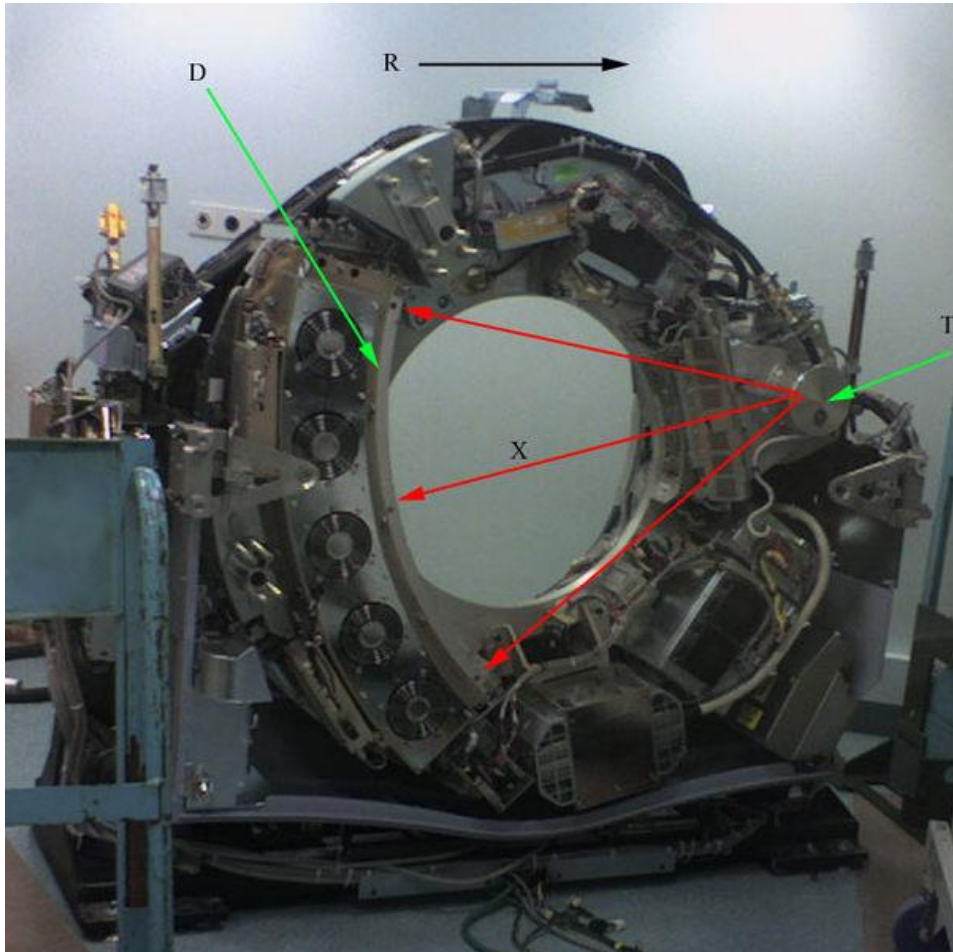
Oddziaływanie fotonów, zależność od energii



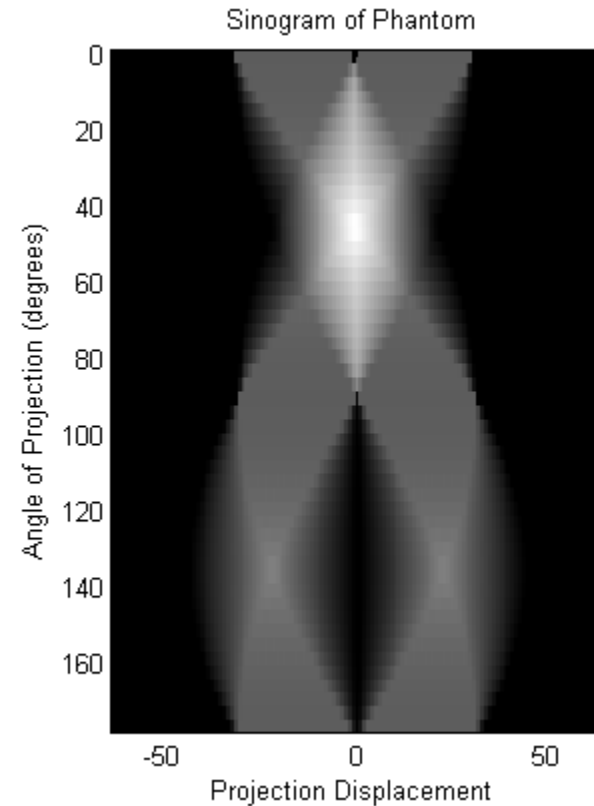
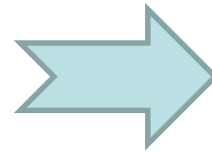
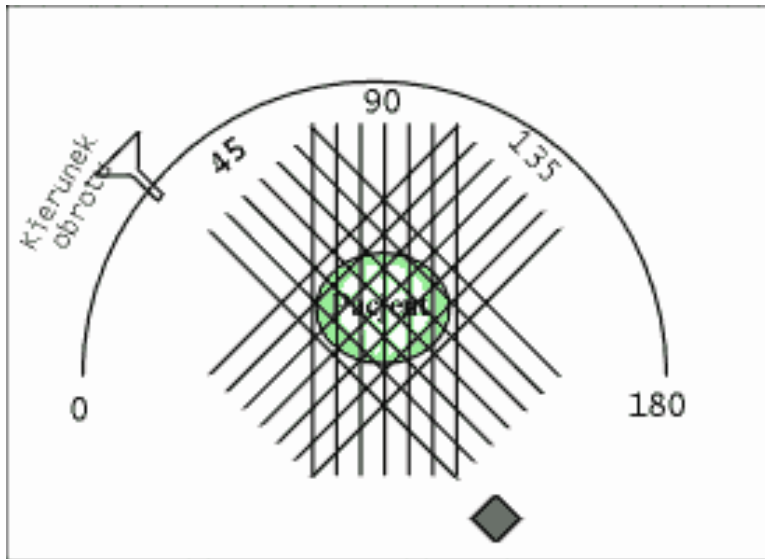
Obszar terapeutyczny
Promieniowania X

<http://pdg.lbl.gov/2011/AtomicNuclearProperties/>

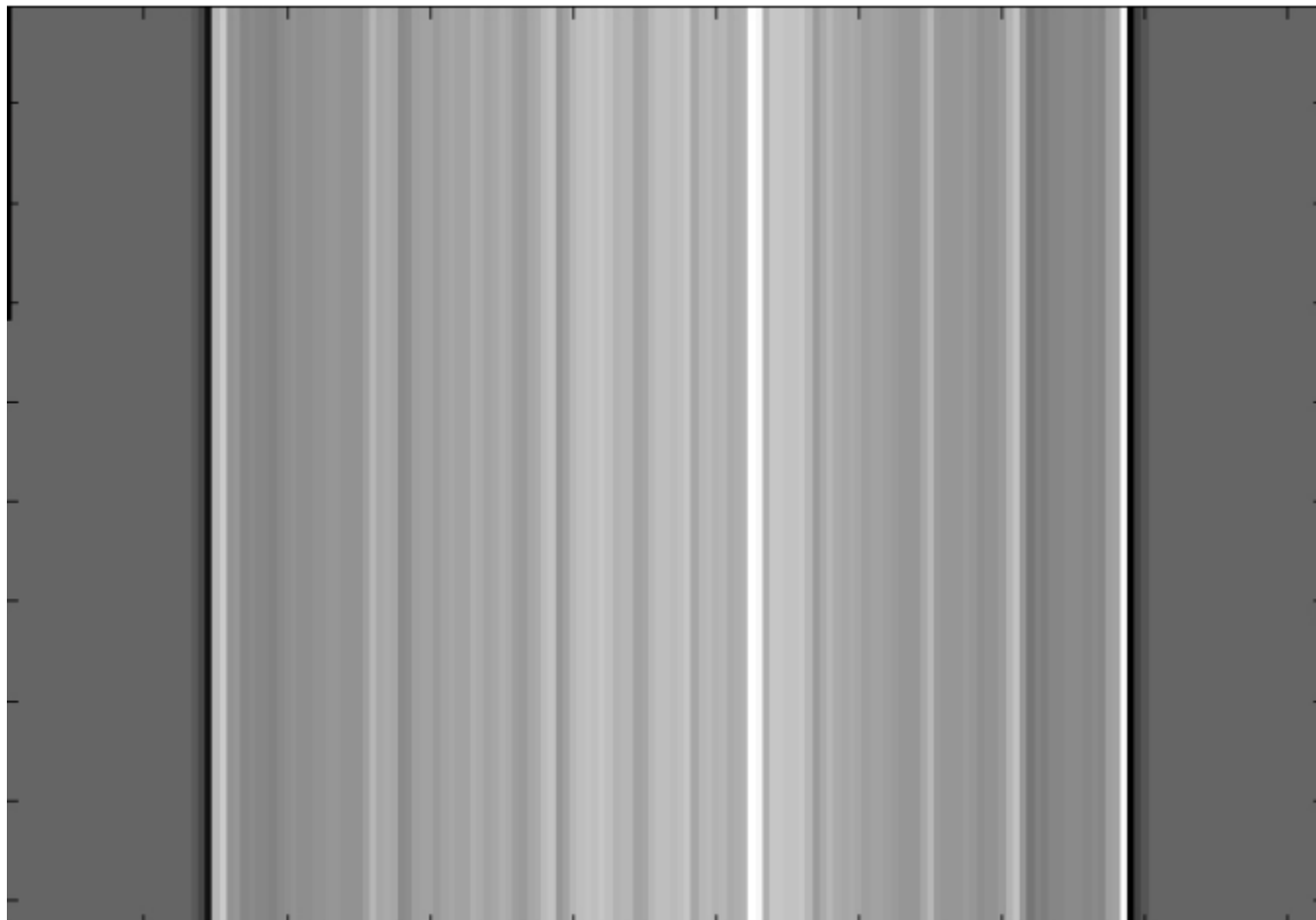
Zasada działania skanera CT



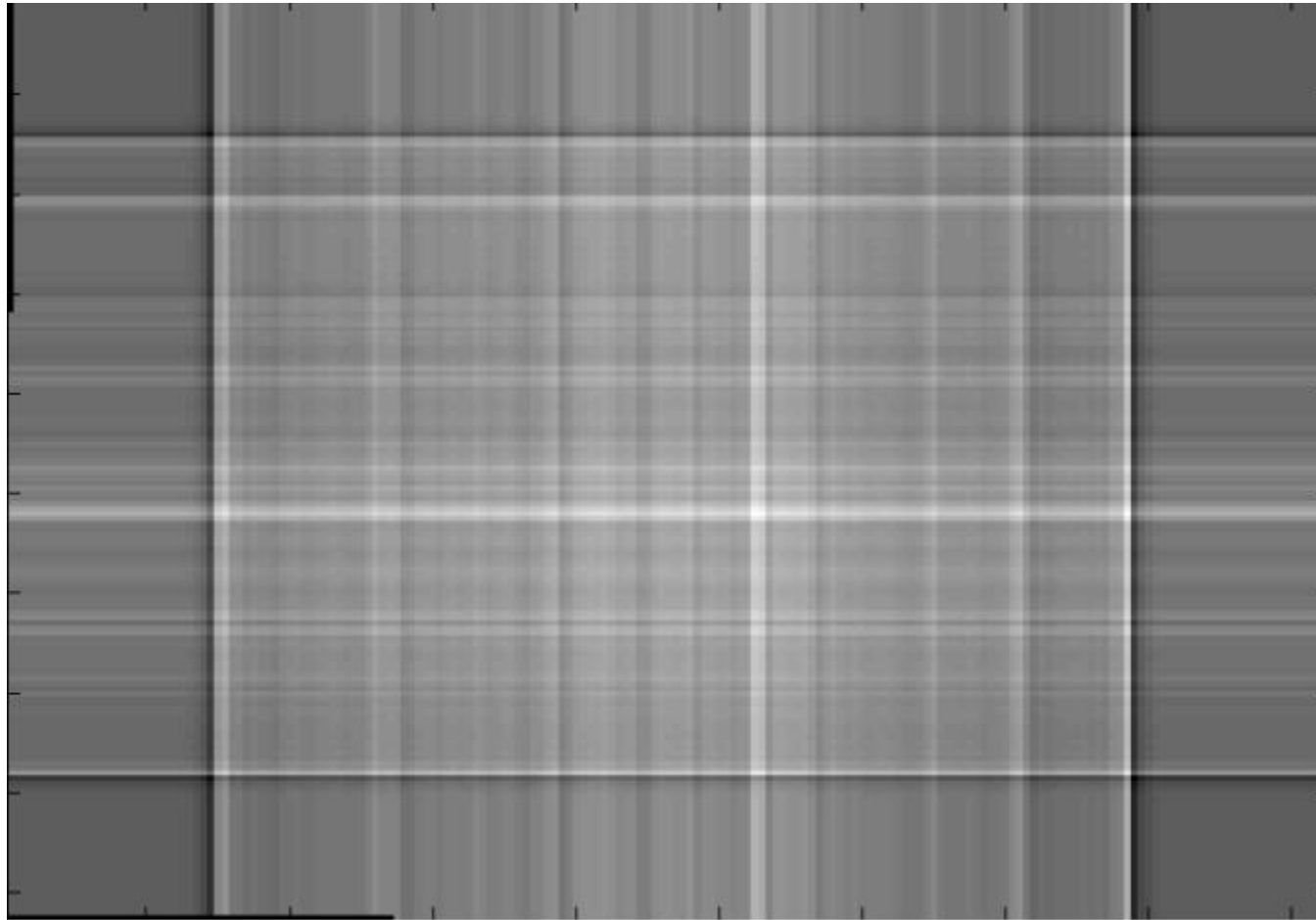
Co otrzymujemy ze skanu ?



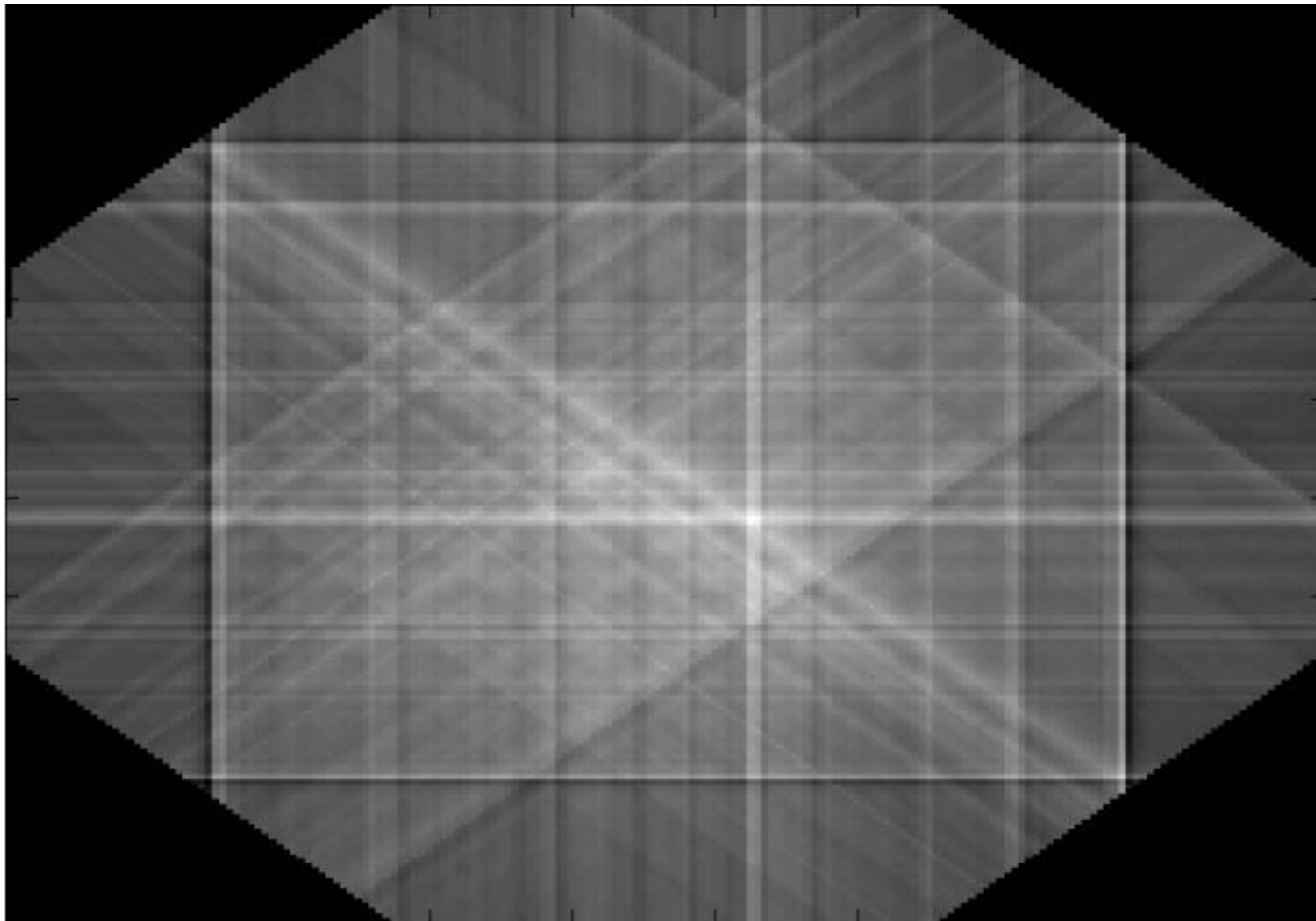
rekonstrukcja 1 ką



rekonstrukcja 2 kąty



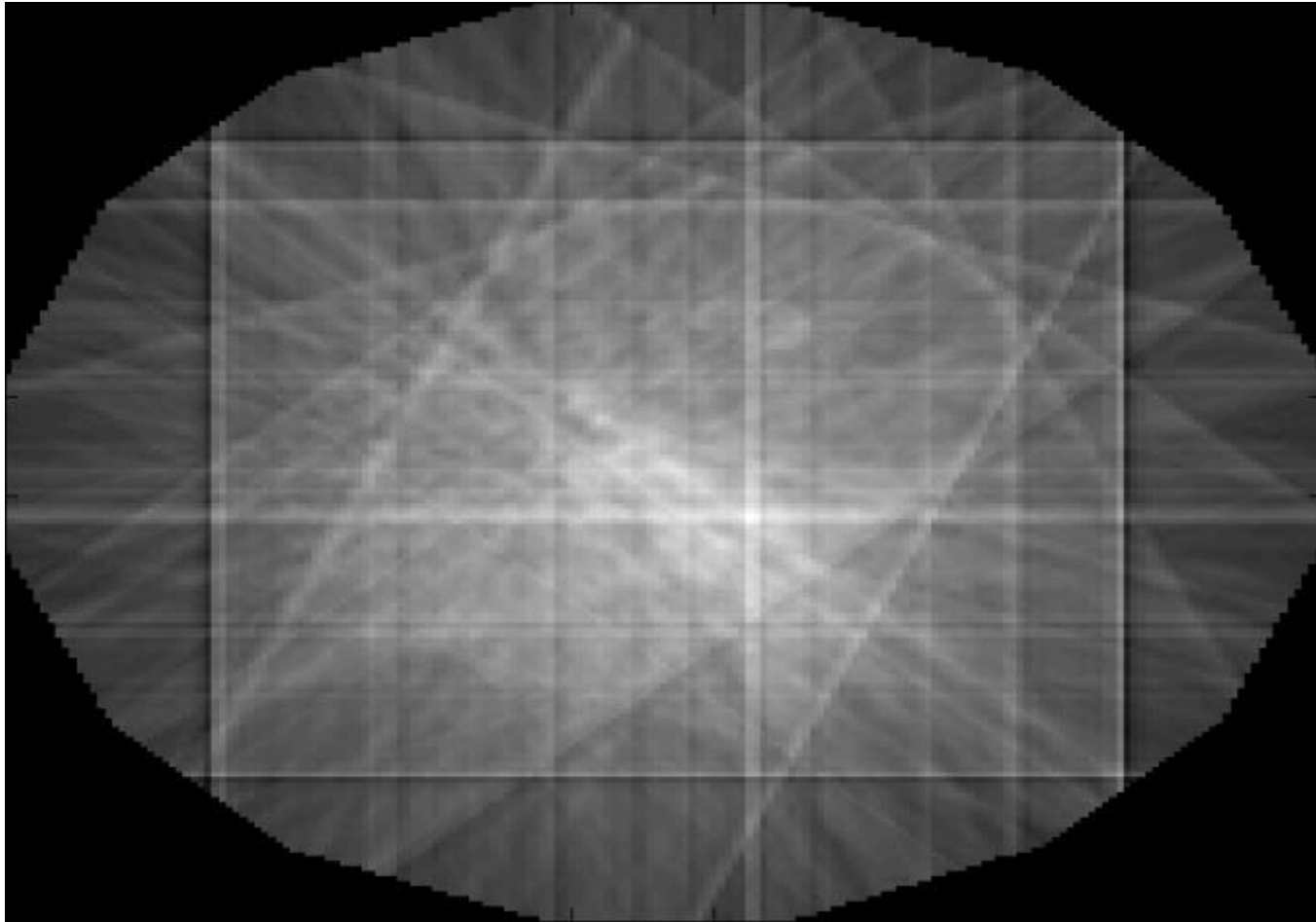
rekonstrukcja 4 kąty



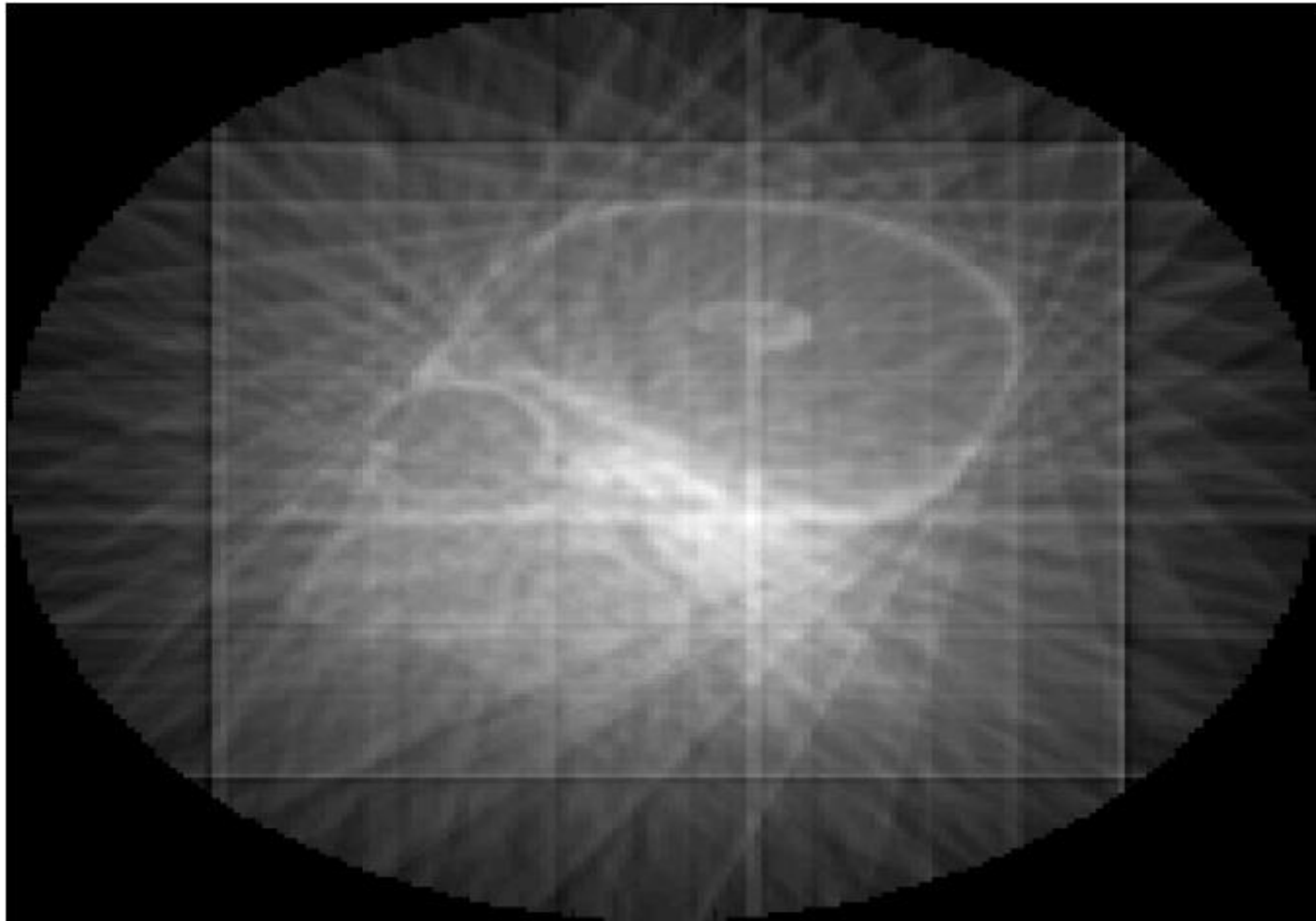
15.III.2022

TJwDTM - Wykład 3

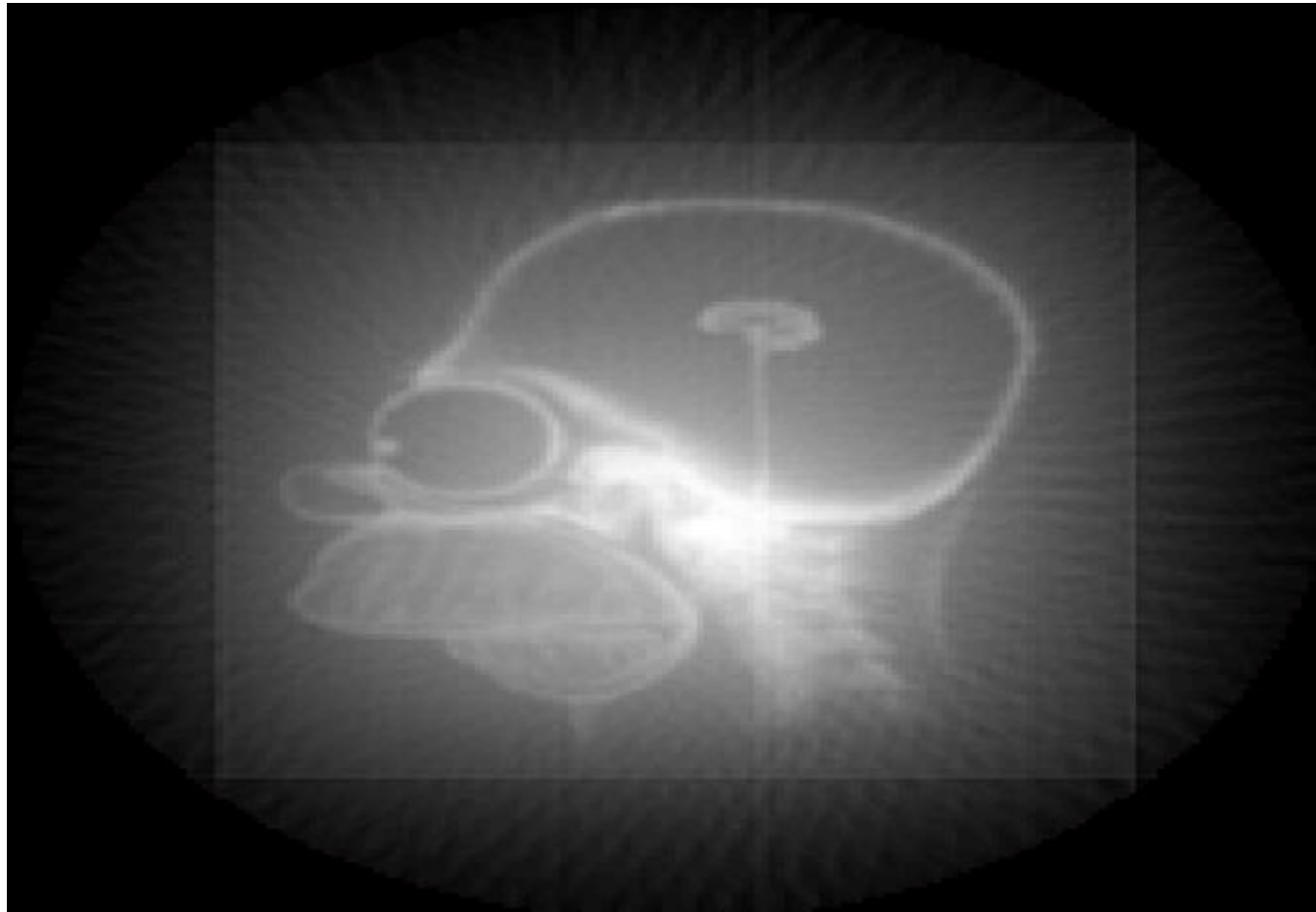
rekonstrukcja 8 kątów



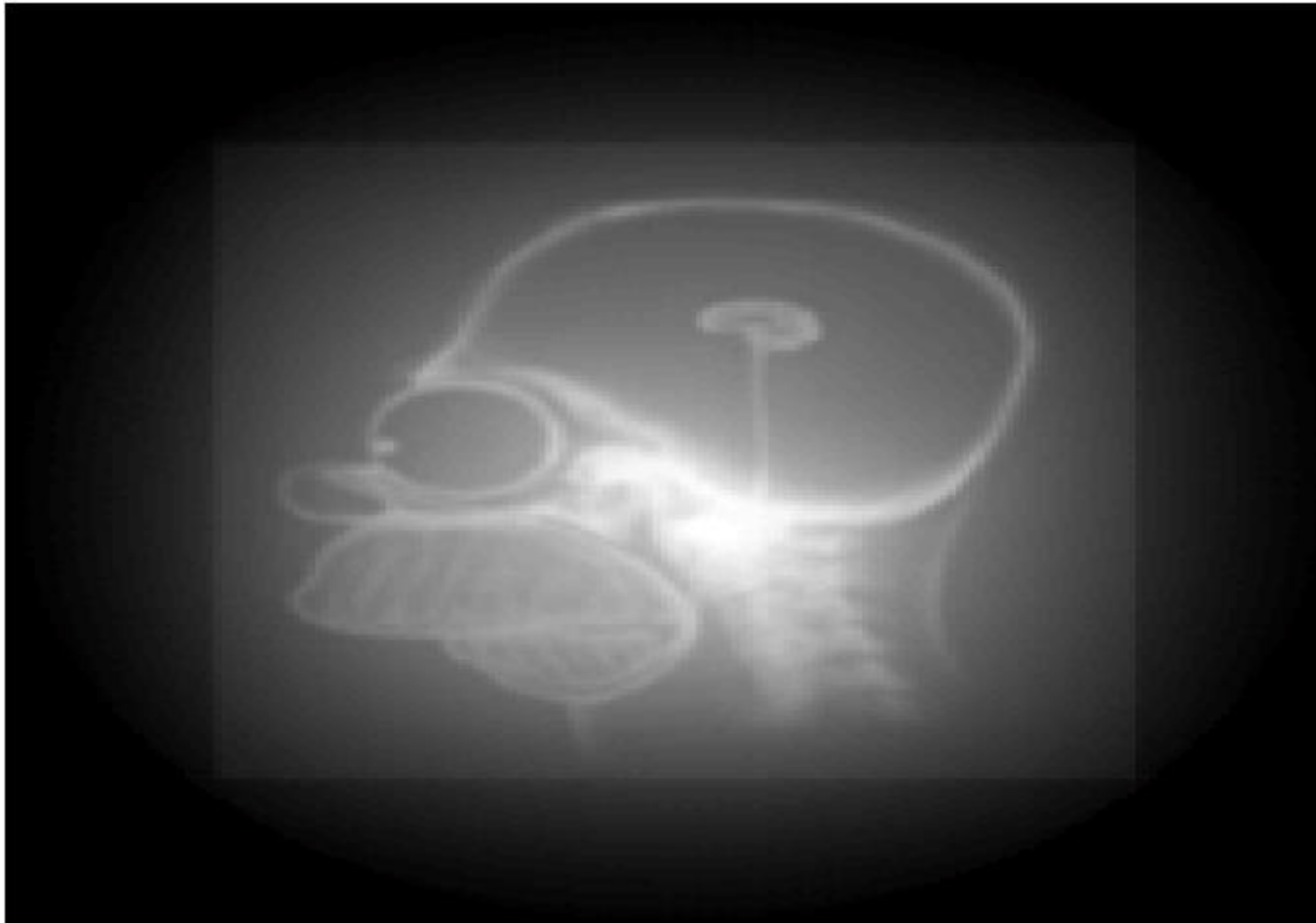
rekonstrukcja 16 kątów



rekonstrukcja 60 kątów



rekonstrukcja 180 kątów

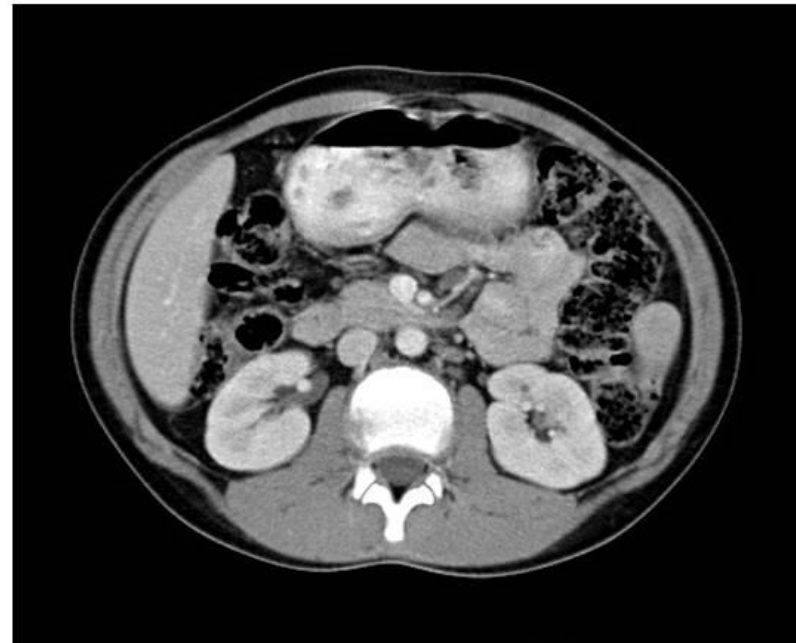


REKONSTRUKCJA

Sinogram



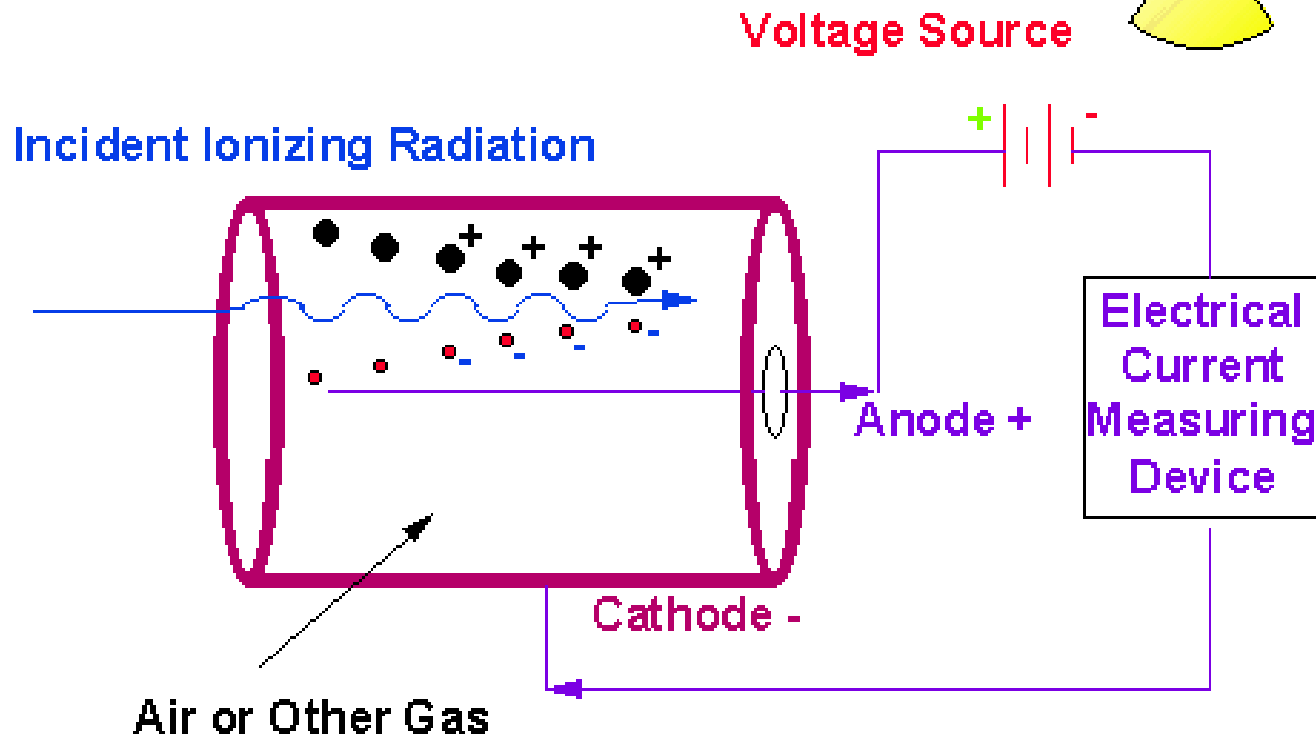
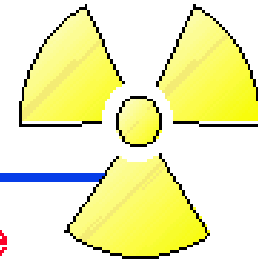
Reconstruct



Narzędzia medycyny nuklearnej

Detektor Geigera-Müllera

Radiation Detection
Gas Filled Detectors



Scyntylatory (historia)

-NaI(Tl) (Hofstadter, 1948)

(+) silna emisja światła, tani

(-) niskie Z, niska gęstość, powolny,
higroskopijny

-BGO (1977)

(+) wysokie Z, wysoka gęstość,

(-) niska emisja światła, powolny

-LSO (Melcher, 1990)

(+) wysokie Z, wysoka gęstość, silna emisja
światła, szybki,

(-) wewnętrzna radioaktywność

-GSO (~1995)

(+) wysokie Z, wysoka gęstość, szybki,

(-) niska emisja światła

Własności scyntylatorów

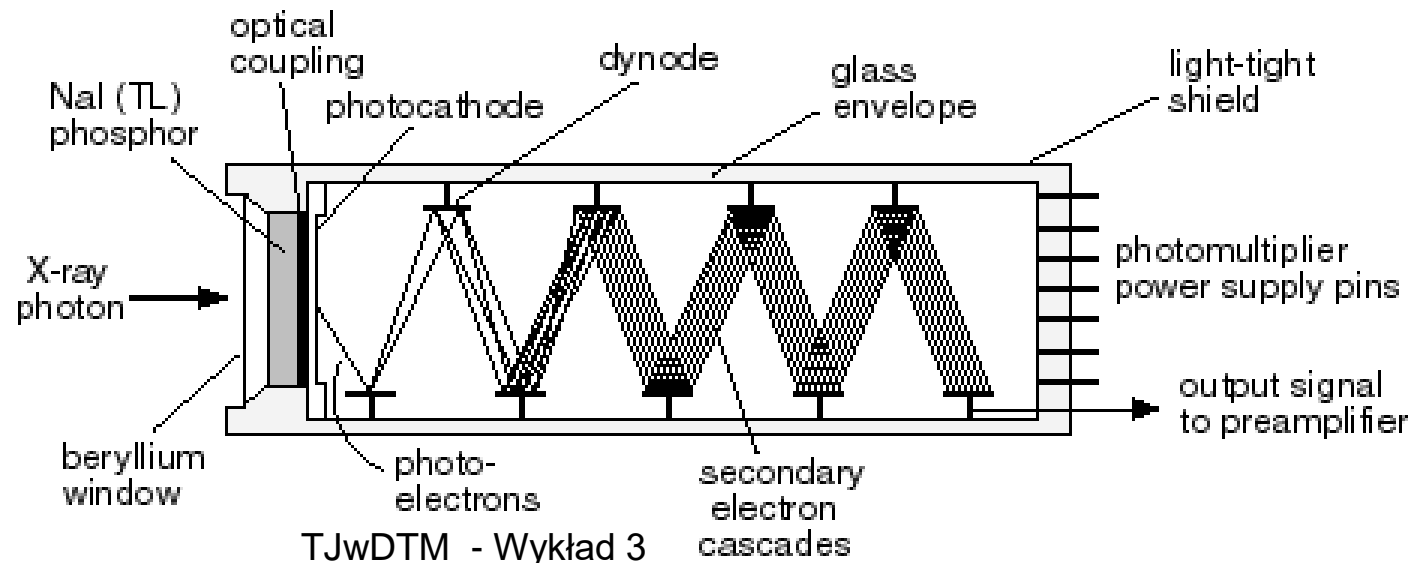
Scyntylator	Liniowy współczynnik osłabienia	ϵ^2 (Wydajność) ²	Czas zaniku świecenia [ns]	Względne natężenie scyntylacji
NaI(Tl)	0,34	0,06	230	100
BGO	0,95	0,18	300	15
LSO	0,88	0,17	40-43	75
GSO	0,70	0,14	30-60	25
BaF ₂	0,44	0,09	0.6, 620	6, 20

P.Zanzonico, Sem. in Nucl. Med. 34 (2004) 242

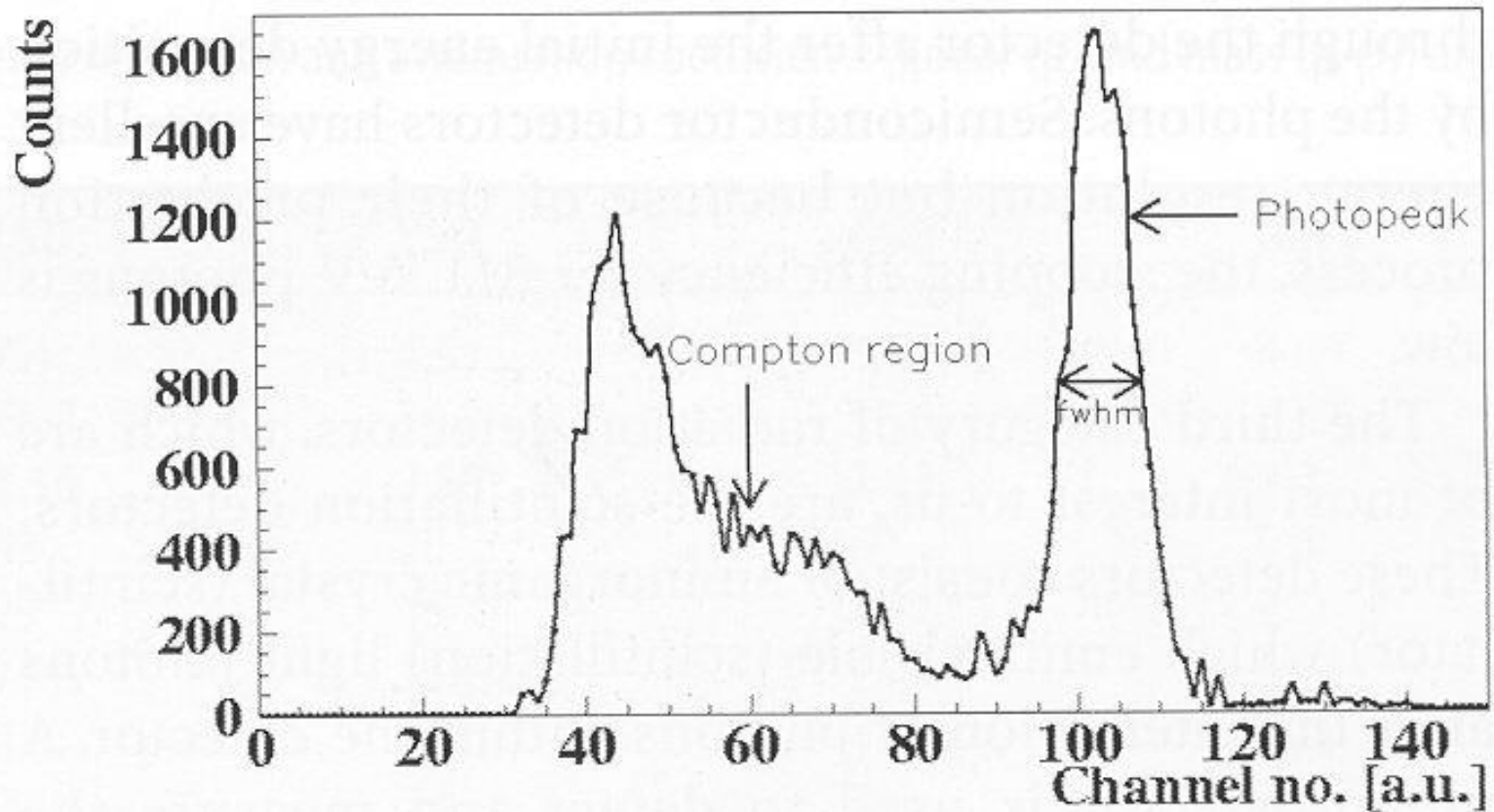
L. Ericson et al. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Research A525 (2004) 242

Detekcja fotonów

Scyntylatory i fotopowielacze

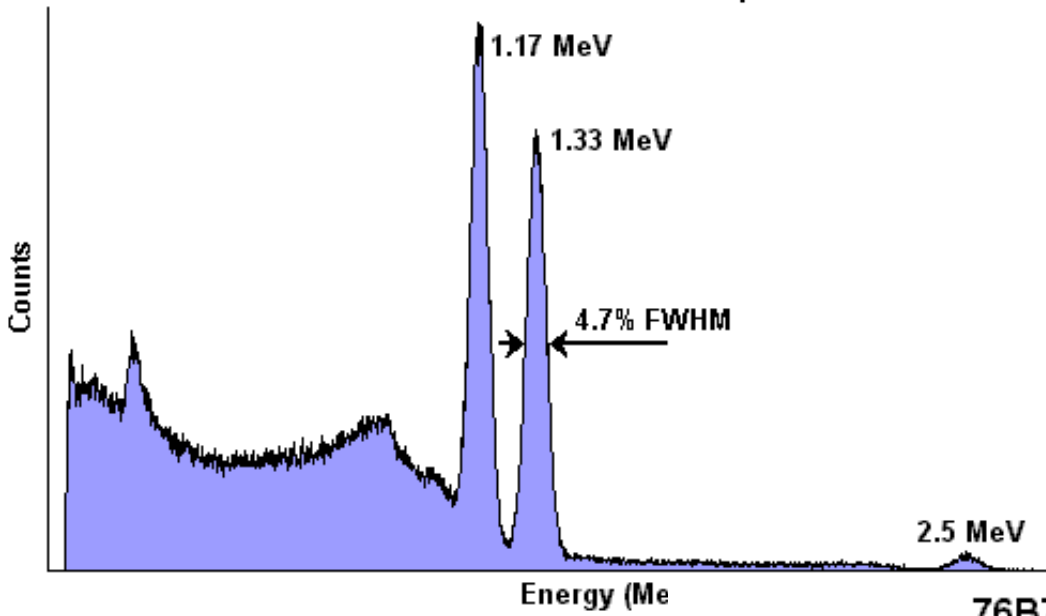


Detekcja fotonów

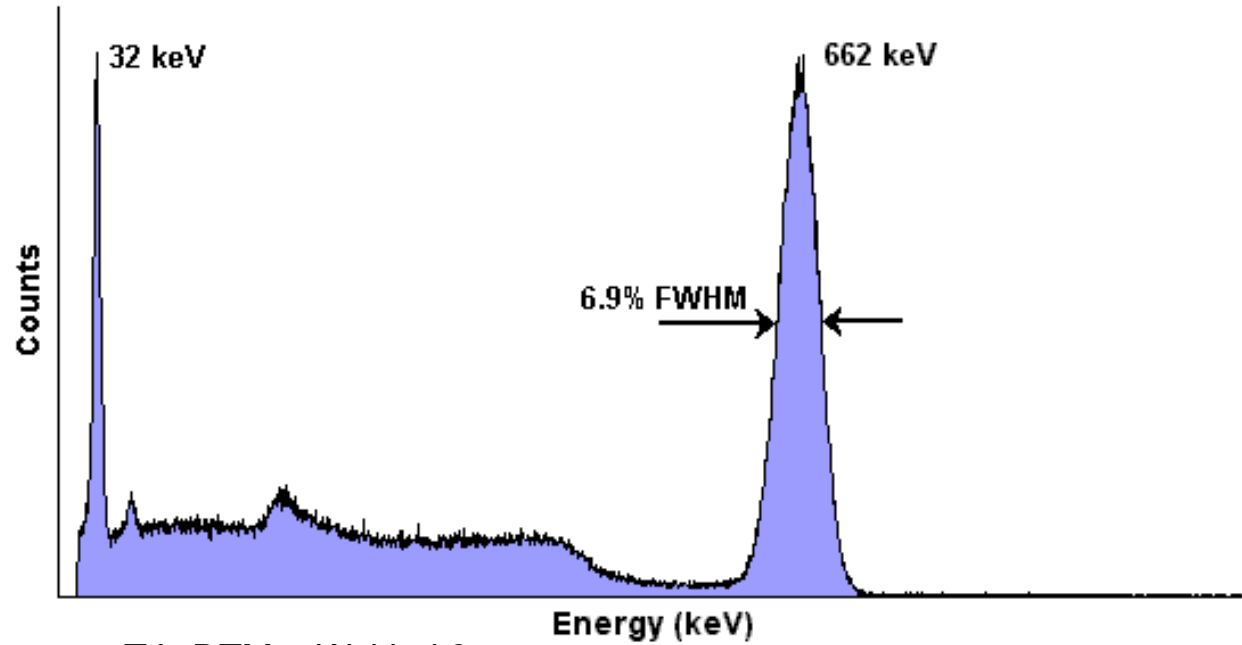


Widma γ

76B76 NaI Detector: ^{60}Co Spectrum

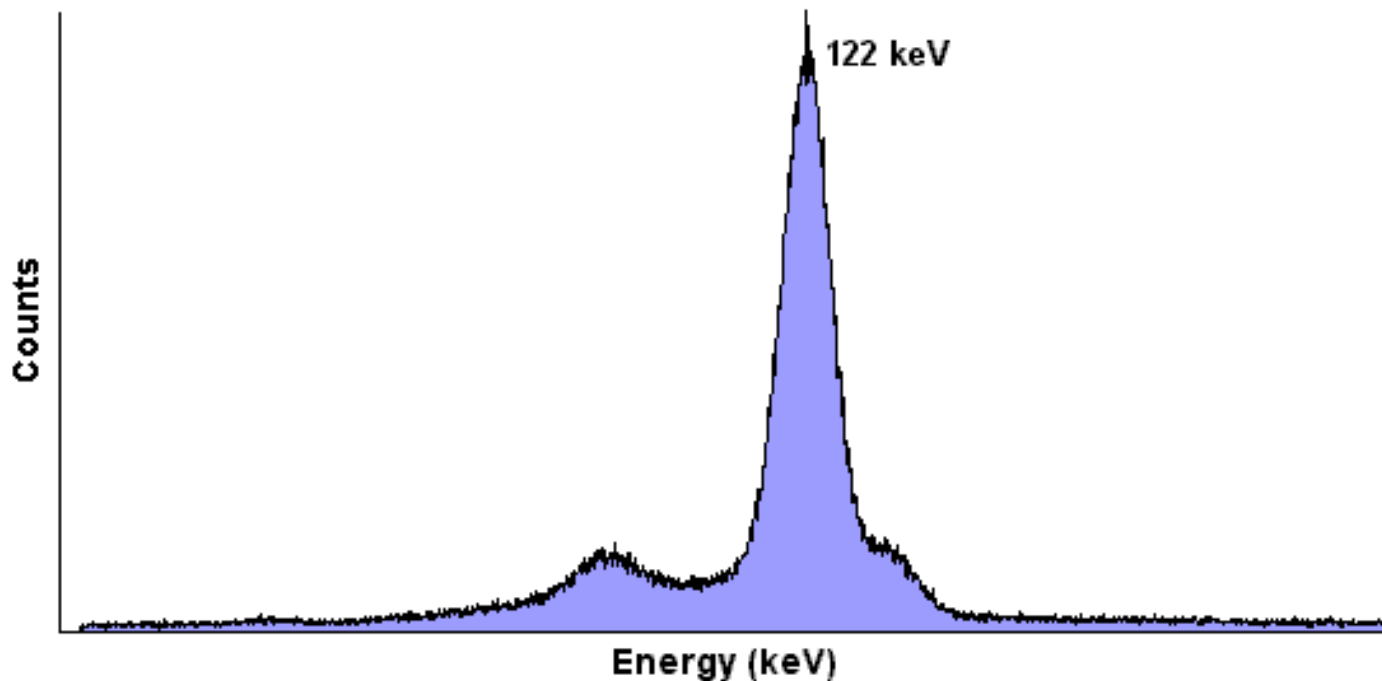


76B76 NaI Detector: ^{137}Cs Spectrum



Widmo rentgenowskie

76B76 NaI Detector: ^{57}Co Spectrum



Rozpady sekwencyjne



$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2$$

Rozwiązania:

$$N_1 = N_{01} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_3 = N_{01} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) + N_{02} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_{03}$$

Rozpady sekwencyjne

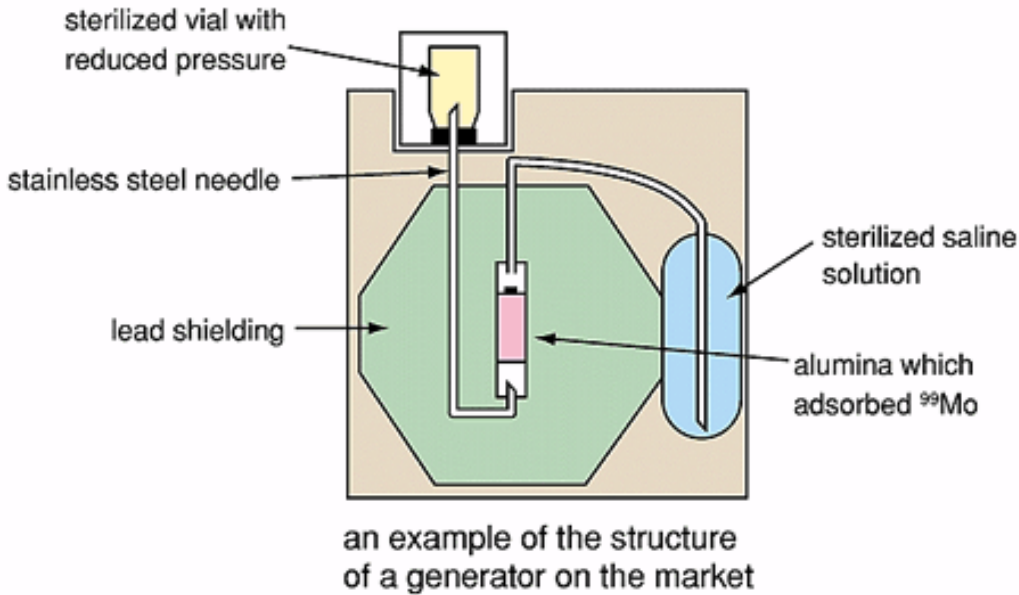
Bardzo często mamy do czynienia z przypadkiem, gdy na początku mamy tylko jądra N_1 . Wtedy $N_{02} = 0$ i $N_{03} = 0$, a rozwiązania opisujące liczby jąder 2 i 3 w rozpadzie sekwencyjnym są znacznie prostsze:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}), \lambda_1 \ll \lambda_2 \Rightarrow N_2 \cong \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

$$N_3 = N_{01} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right)$$

W przemianach sekwencyjnych często przeplatają się rozpady różnych rodzajów

Tc generator

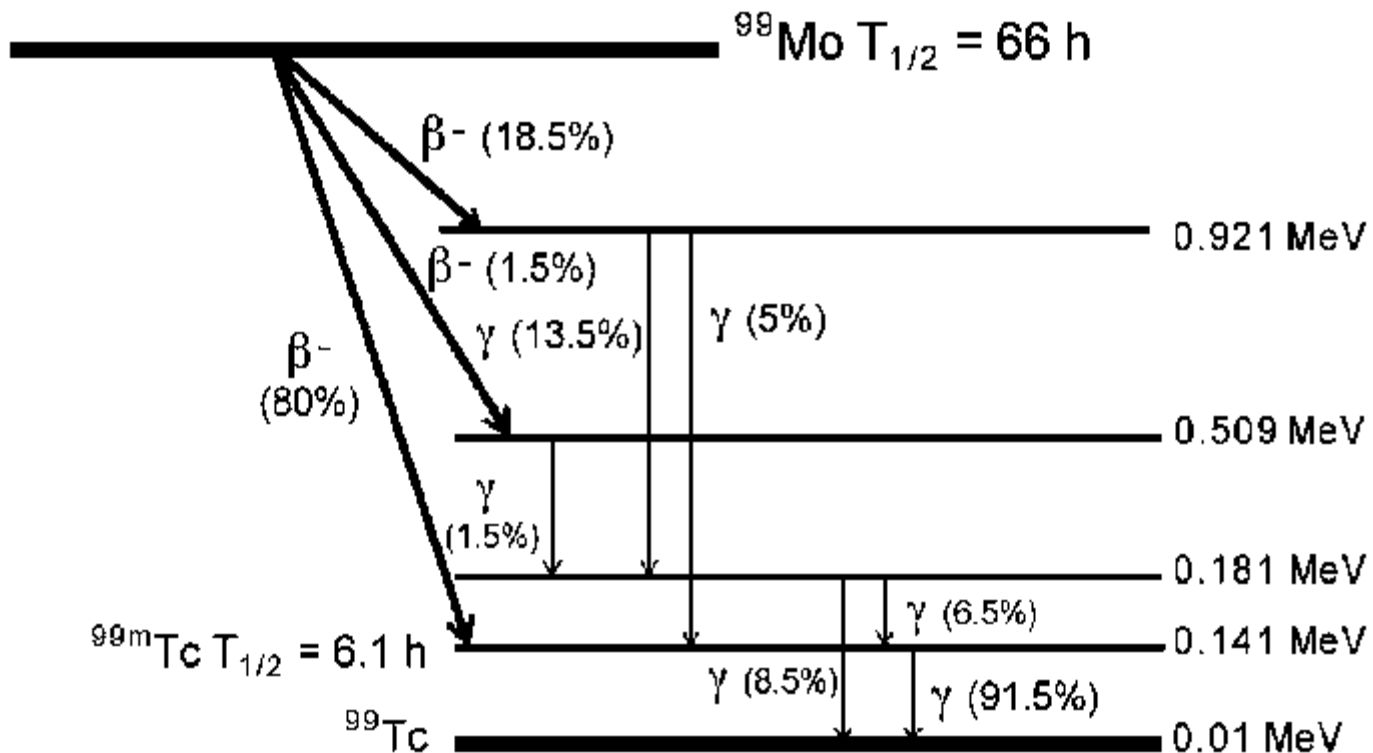


$$T_{1/2}(^{99}\text{Mo}) = 66\text{h}$$

$$T_{1/2}(^{99\text{m}}\text{Tc}) = 6\text{h}$$



Schemat rozpadu ^{99}Mo

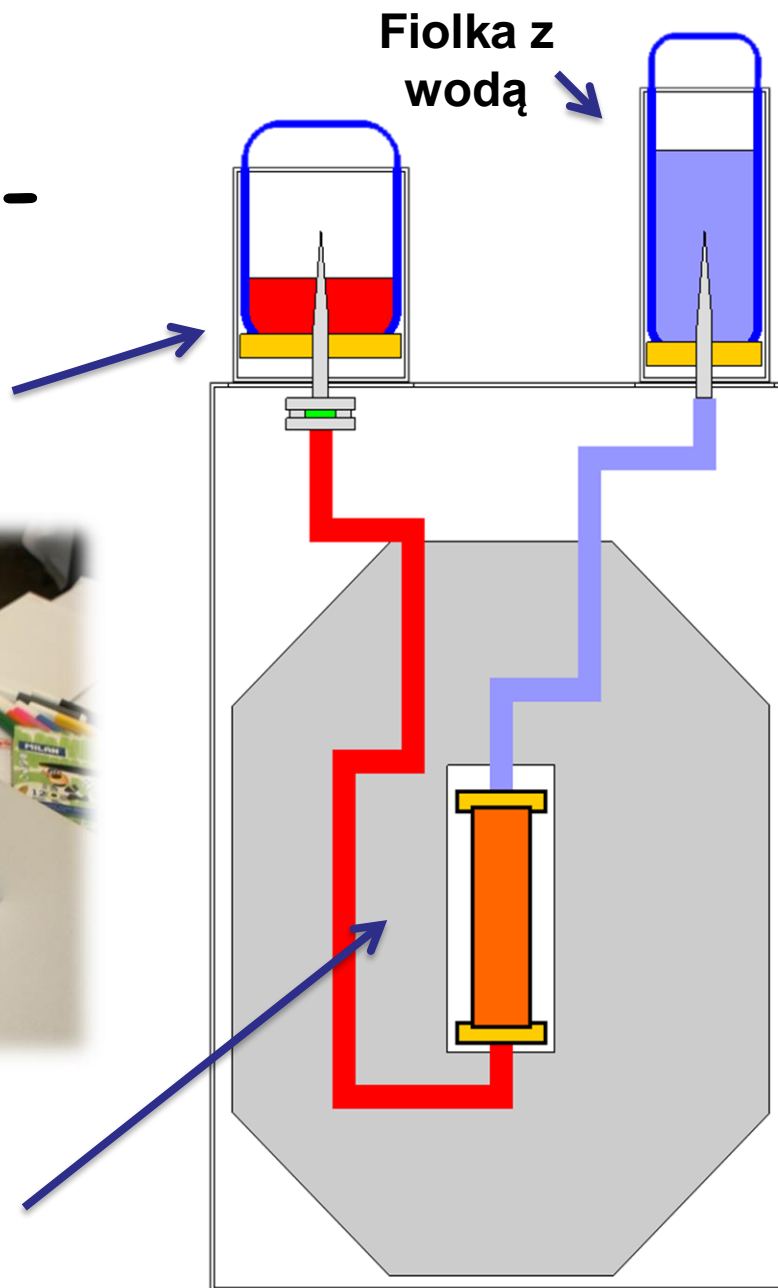


Generator molibdenowo - technetowy

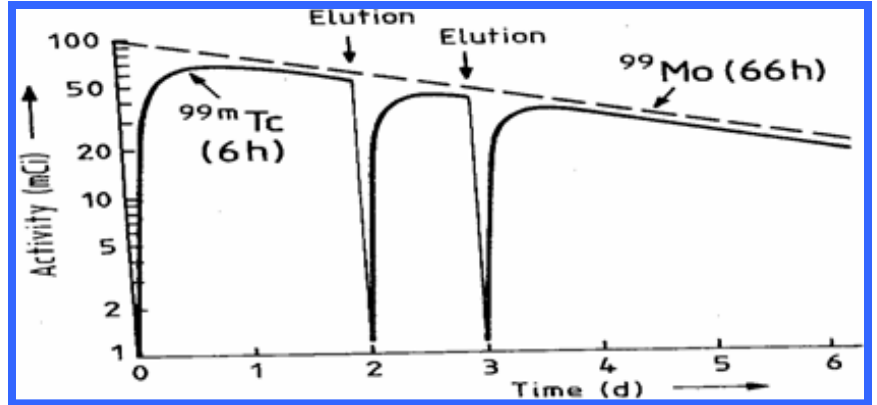
Fiolka z podciśnieniem



Kolumna z zaadsorbowanym na trójtlenku glinu (Al_2O_3) molibdenianem sodu ($\text{Na}_2^{99}\text{MoO}_4$)



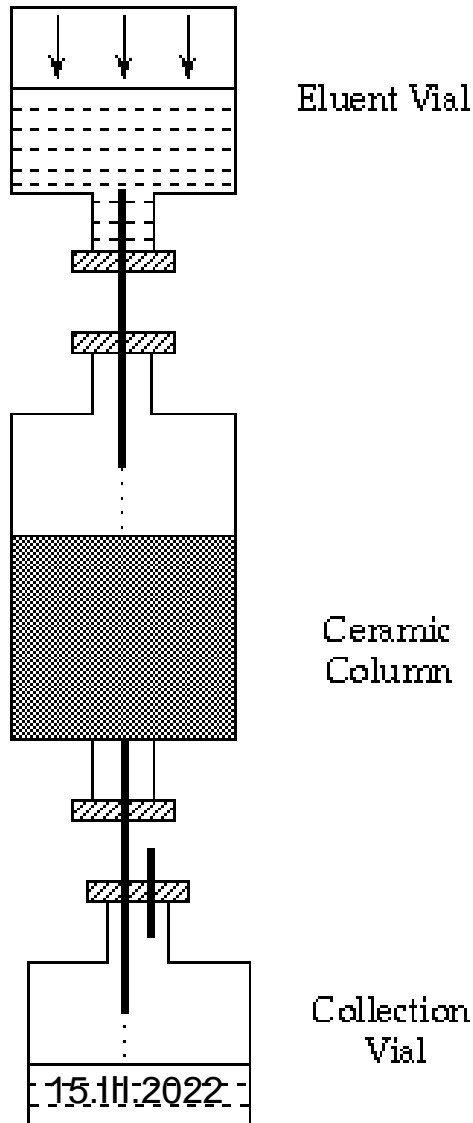
^{99m}Tc Generator



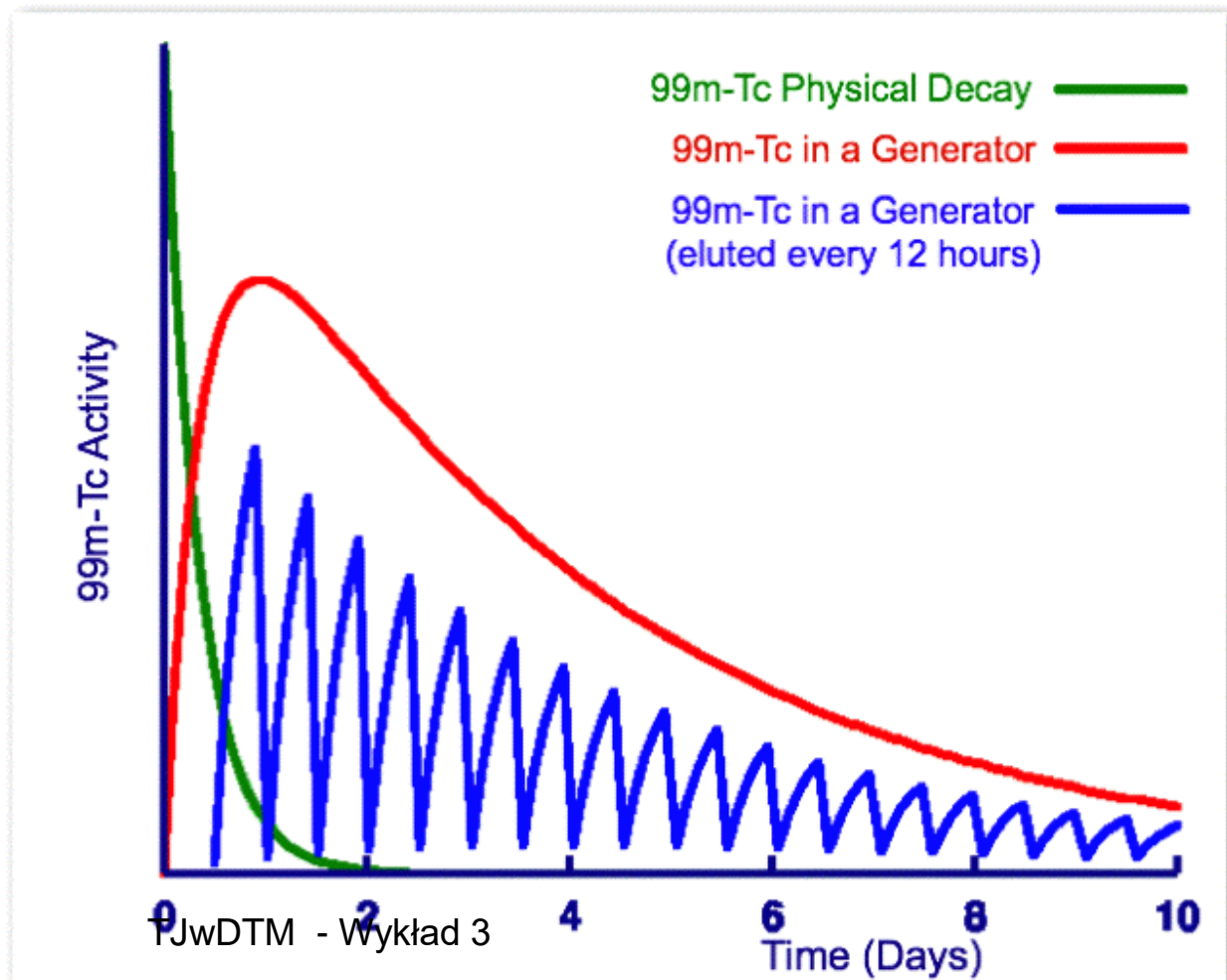
15.III.2022

TJWDTM - Wykład 3

Radiofarmaceutyki



$$N_2 \cong \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$



Radiofarmaceutyki

Part of the Body	Example Radiotracer
Brain	^{99m}Tc -HMPAO
Thyroid (tarczycza)	$\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$
Lung (wentylacja)	^{133}Xe gas
Lung (uszkodzenie)	^{99m}Tc -MAA
Liver (wątroba)	^{99m}Tc -Tin Colloid
Spleen (śledziona)	^{99m}Tc -Damaged Red Blood Cells
Pancreas (trzustka)	^{75}Se -Selenomethionine
Kidneys (nerki)	^{99m}Tc -DMSA

Najszersze zastosowanie mają:

^{99m}Tc - okresie połowicznego rozpadu 6 h.

Najczęściej wykorzystywany.

^{201}Tl - półokres zaniku 73h - gromadzony w komórkach serca

^{67}Ga - $T_{1/2}$ 3,3 dnia - zmiany zapalne

^{131}I - $T_{1/2}$ 8 dni - nowotwór, niedoczynność tarczycy

^{123}I - $T_{1/2}$ 13,1 h - niedoczynność tarczycy