

Katarzyna Grebieszko

Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

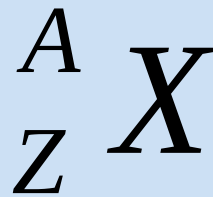
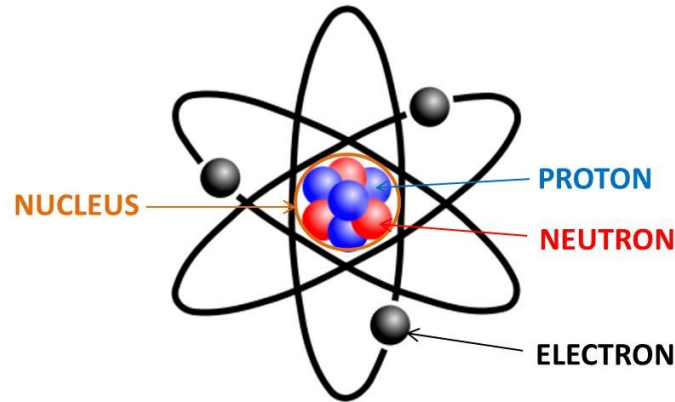
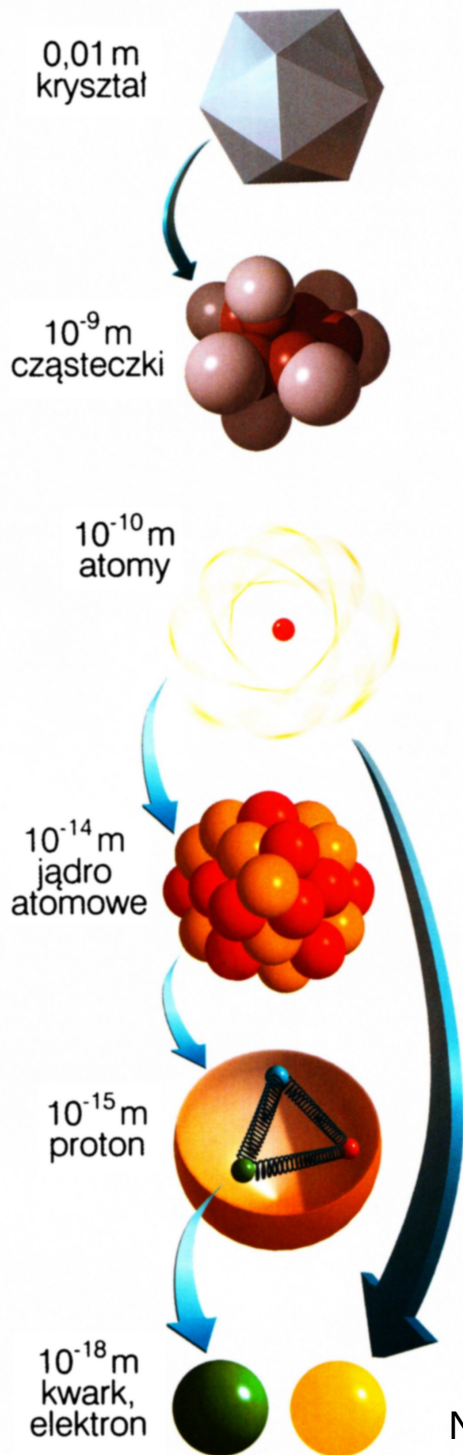
Ćwiczenie 11
Badanie osłabienia promieniowania
gamma przy przechodzeniu przez materię

sem. letni 2020/21

Widok na salę B w CLF



Budowa materii



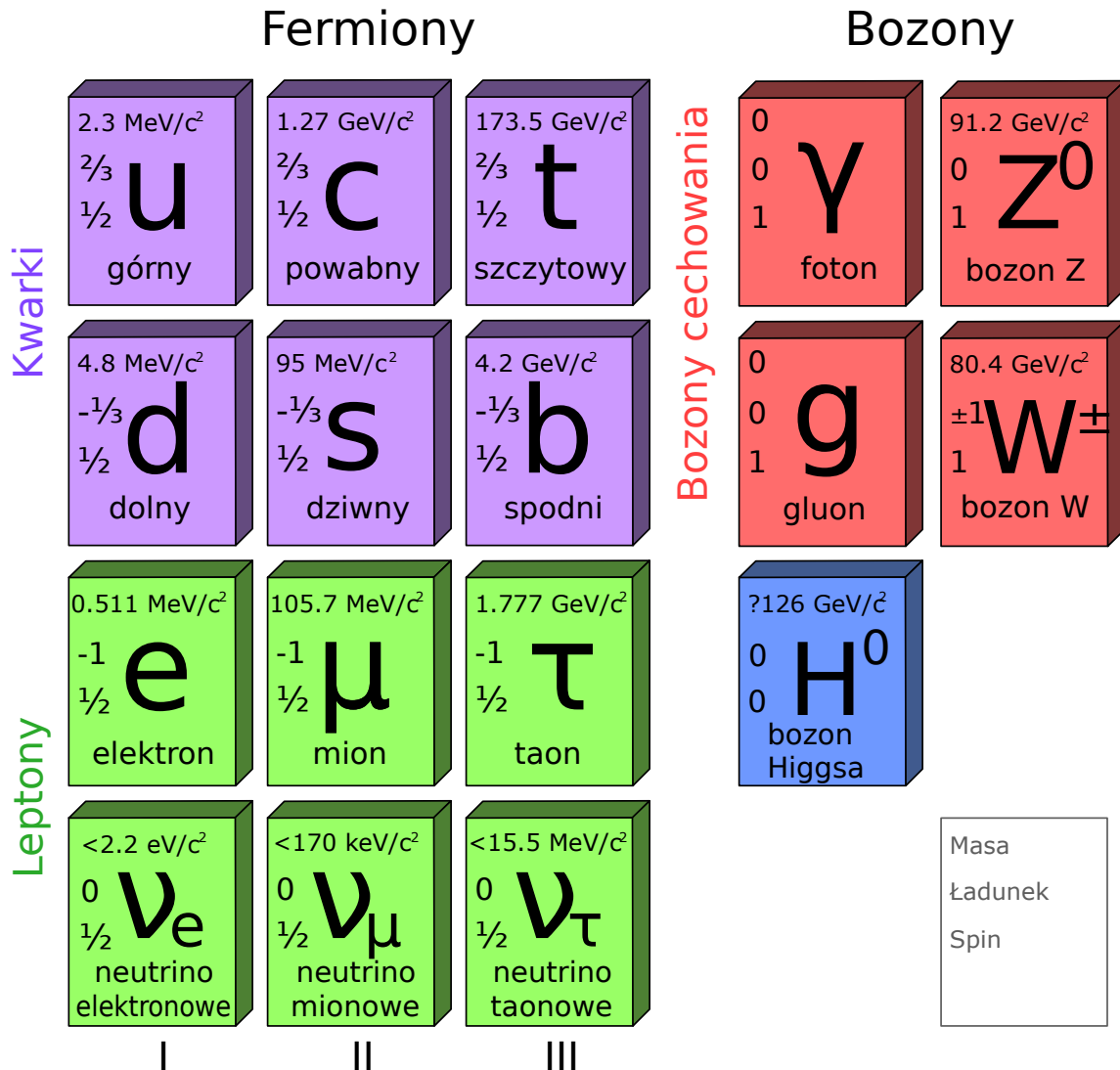
X – symbol pierwiastka

A – liczba masowa; liczba nukleonów (czyli protonów i neutronów) w jądrze atomu (nuklidzie) danego izotopu danego pierwiastka

Z – liczba atomowa; liczba protonów, która znajduje się w jądrze danego atomu (jest równa liczbie elektronów niezjonizowanego atomu)

Izotopy – atomy o tej samej liczbie atomowej a innej liczbie masowej, np. ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{18}_8\text{O}$

Cząstki elementarne



jednostka energii (eV)
 $= 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
 (energia jaką zyskuje elektron po przejściu różnicy potencjałów 1V)

jednostka pędu (eV/c)

jednostka masy (eV/c²)
 $= 1.783 \times 10^{-36} \text{ kg}$

$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$

$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

Dla fermionów mamy odpowiednie antycząstki (mają ładunki elektryczne o przeciwnych znakach)

LEPTONY

Neutrino elektronowe
Masa ~ 0

Neutrino mionowe
Masa ~ 0

Neutrino taonowe
Masa ~ 0

Elektron
Masa 0.511

Mion
Masa 105.7

Taon
Masa 1 777

KWARKI

Kwark „u”
Masa 2.2

Kwark „c”
Masa 1 270

Kwark „t”
Masa $\sim 173\,000$

Kwark „d”
Masa 4.7

Kwark „s”
Masa 93

Kwark „b”
Masa $\sim 4\,200$

Za różnice mas między cząstkami elementarnymi odpowiada oddziaływanie Higgsa, którego nośnikiem jest (odkryty w 2012 roku w CERN) bozon Higgsa

Hadrony

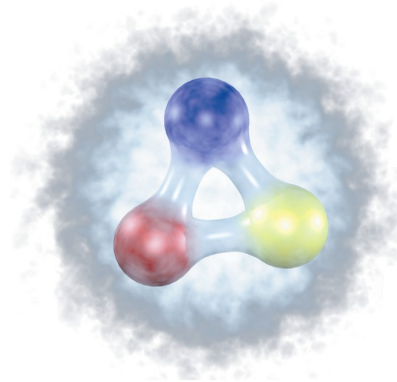
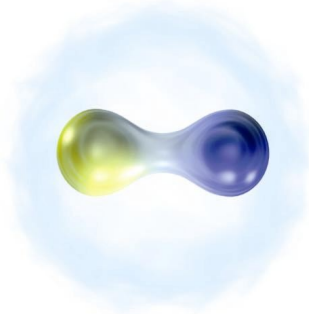
(cząstki oddziałujące silnie

– jedno z podstawowych oddziaływań w fizyce cząstek elementarnych)

mezony $q_i \bar{q}_j$

bariony $q_i q_j q_k$

antybariony $\bar{q}_i \bar{q}_j \bar{q}_k$



Skład kwarkowy przykładowych hadronów:

- **Mezony**

Mezon π^+ (pion dodatni) = u anty-d

Mezon π^- (pion ujemny) = d anty-u

Kaon K^+ (kaon dodatni) = u anty-s

- **Bariony**

Proton = uud

Neutron = ddu

Ciekawostki na temat budowy materii:

- Atom: rozmiar rzędu 10^{-10} m; jądro atomowe (w nim skupiona prawie cała masa atomu): rozmiar rzędu 10^{-14} m → **jesteśmy zbudowani głównie z pustych przestrzeni**
- Proton: masa = 938 MeV/c²; masa kwarków (uud) = (2.2+2.2+4.7) MeV/c²; reszta to energia gluonów → **jesteśmy zbudowani głównie z energii**

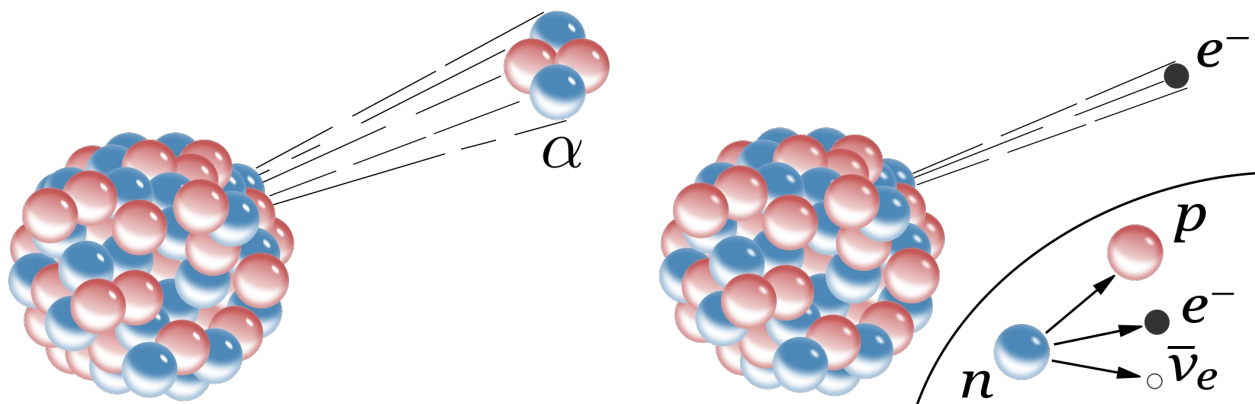
Promieniowanie jonizujące i jego źródła

Jonizacja – zjawisko powstawania jonu (kation, anion) z obojętnego atomu lub cząsteczki

Promieniowanie jonizujące – każde promieniowanie (korpuskularne lub elektromagnetyczne), które powoduje jonizację ośrodka materialnego, tj. oderwanie przynajmniej jednego elektronu od atomu lub cząsteczki

Przykłady:

- **Cząstki alfa** (α) – jądra helu ($+2e$); z substancji promieniotwórczych (np. uran i rad), z promieniowania kosmicznego, z akceleratorów
- **Cząstki beta** (β^- , β^+) – elektrony ($-1e$) lub pozytony ($+1e$); z substancji promieniotwórczych



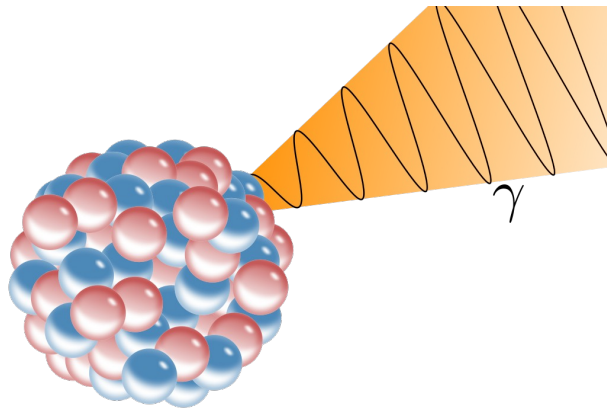
Jądrowe promieniowanie α (lewy) oraz β^- (prawy)

https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_alfa

https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_beta

Promieniowanie jonizujące i jego źródła

- **Elektrony** (e^-) ($-1e$); z akceleratorów
- **Protony** ($+1e$), **jądra atomowe** ($+xe$); z akceleratorów, promieniowania kosmicznego
- **Fotony** (promieniowanie rentgenowskie X oraz promieniowanie γ : $E_\gamma > 50 \text{ keV}$) ($0e$); np. w wyniku zderzania elektronów z tarczą, z substancji promieniotwórczych, z kosmosu. Promieniowanie elektromagnetyczne o energiach fotonów większych od energii fotonów światła widzialnego uznaje się za jonizujące



Jądrowe promieniowanie γ

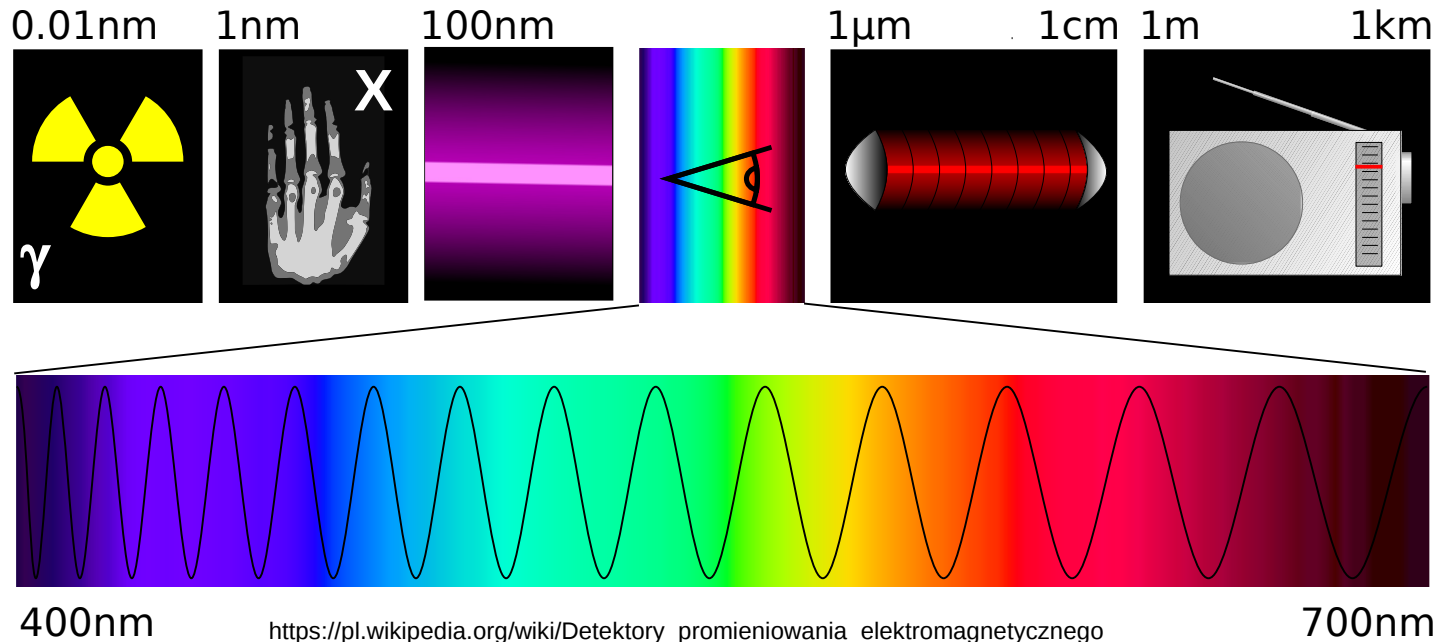
https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_gamma

- **Neutrony** ($0e$); np. ze spalacji (kruszenia) lub rozszczepienia jąder, syntezy jądrowej

Promieniowanie może jonizować materię:

- **Bezpośrednio** – cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym (np. cząstki alfa, elektrony, naładowane hadrony) jonizują materię głównie poprzez oddziaływania kulombowskie
- **Pośrednio** – obiekty bez ładunku elektrycznego (np. foton) jonizują materię poprzez oddziaływania inne niż kulombowskie (np. foton przez rozpraszanie komptonowskie, efekt fotoelektryczny, prod. par \rightarrow zob. dalej; powstałe w ten sposób cząstki naładowane mogą jonizować materię bezpośrednio). Neutrony wywołują np. reakcje jądrowe, w których powstają m.in. cząstki naładowane (np. naładowane piony) jonizujące materię bezpośrednio

Widmo fal elektromagnetycznych, dualizm korpuskularno-falowy



- **Brak “sztywnego” rozróżnienia między X i γ .** Można stosować kryterium energii / dł. fali ($E_\gamma > 50 \text{ keV}$; ale częściowe pokrycie z X) lub **sposobu prod.** (hamowanie e^- na tarczy / przemiany jądrowe)
- **Fotony można traktować jako cząstki** elementarne o zerowej masie spoczynkowej i zerowym ładunku. Ich energia $E_{X/\gamma} = hc/\lambda$, gdzie h to stała Plancka ($6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$) a λ to długość fali
- **Cząstki** (elektrony, protony, etc.) o pędzie p **można traktować jako falę**. Jej długość (długość fali de Broglie'a) $\lambda = h/p$
 λ – wielkość typowo falowa; p – wielkość typowo korpuskularna

Źródła kwantów γ – izotopy promieniotwórcze

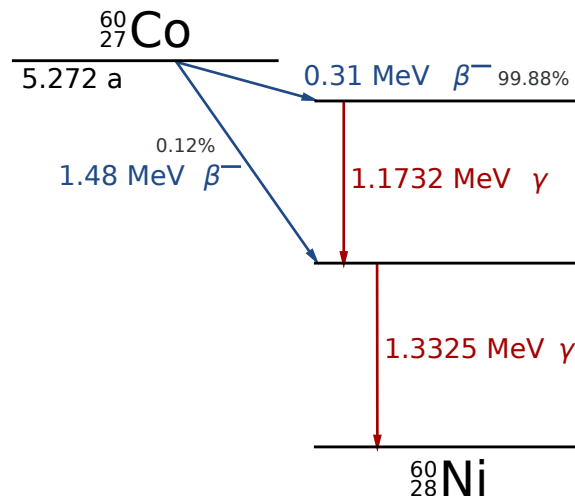
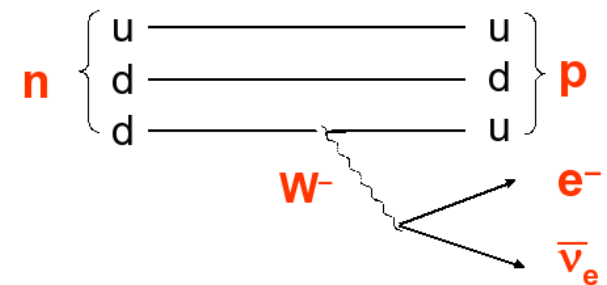
Kwenty γ powstają w czasie jądrowych rozpadów różnych izotopów promieniotwórczych np. rad (^{226}Ra), iryd (^{192}Ir), kobalt (^{60}Co), cez (^{137}Cs)

Rozpad α : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\alpha + \gamma$ (α – jądro helu)

Rozpad β^- : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + e^- + \text{anty-}\nu_e + \gamma$ (w jądrze atomowym zamiana $n \rightarrow p$)

Rozpad β^+ : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + e^+ + \nu_e + \gamma$ (w jądrze atomowym zamiana $p \rightarrow n$)

Powstające jądro atomowe (Y) jest w stanie wzbudzenia i ta energia wzbudzenia jest wypromieniowywana w postaci kwantów γ o ściśle określonych energiach (zgodnie z tzw. modelem powłokowym jądra atomowego)

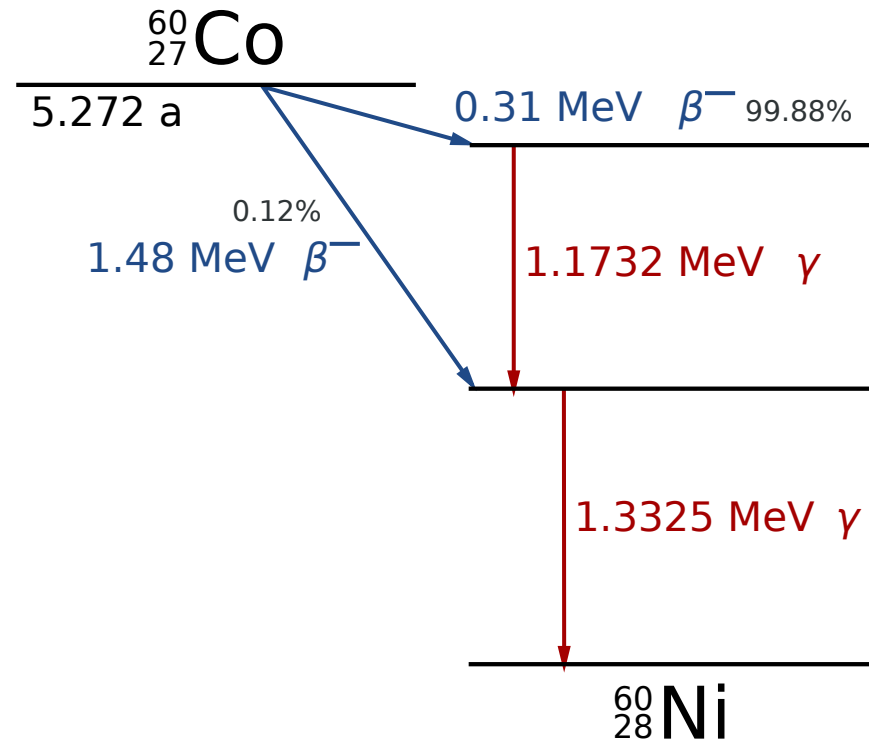
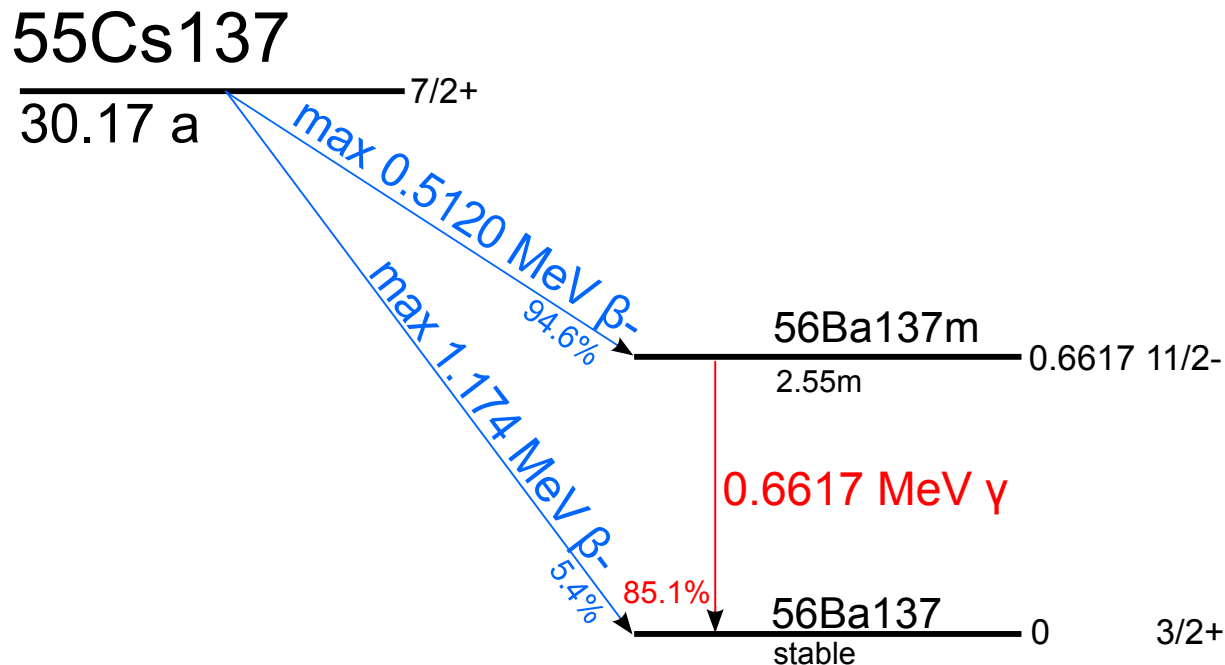


Przykład: rozpad β^- jądra kobaltu (dwa kwanty γ o energiach około 1.17 i 1.33 MeV)

http://sciencewise.info/resource/Gamma-ray_generation/Gamma-ray_generation_by_Wikipedia

Źródła promieniotwórcze w ćw. 11

Wiązki kwantów gamma, których będziemy używać w ćwiczeniu, mają energie:
 Z cezu – 0.66 MeV
 Z kobaltu – 1.33 MeV



http://sciencewise.info/resource/Gamma-ray_generation/Gamma-ray_generation_by_Wikipedia

Prawo rozpadu promieniotwórczego



$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$ – liczba jąder pozostałych po czasie t

N_0 – początkowa liczba jąder promieniotwórczych; $N(t=0)$

λ – stała rozpadu promieniotwórczego

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

<https://epodreczniki.pl/a/przemiany-jadrowe/D5AZrZPic>

Aktywność promieniotwórcza – liczba rozpadów jąder atomowych danej próbki substancji promieniotwórczej w jednostce czasu

Jeśli czasy połowicznego rozpadu są takie długie (5.3 i 30 lat dla ^{60}Co i ^{137}Cs) to można przyjąć, że **w czasie wykonywania pomiarów** (zajęcia laboratoryjne) **aktywność próbki jest stała**

Co to oznacza:

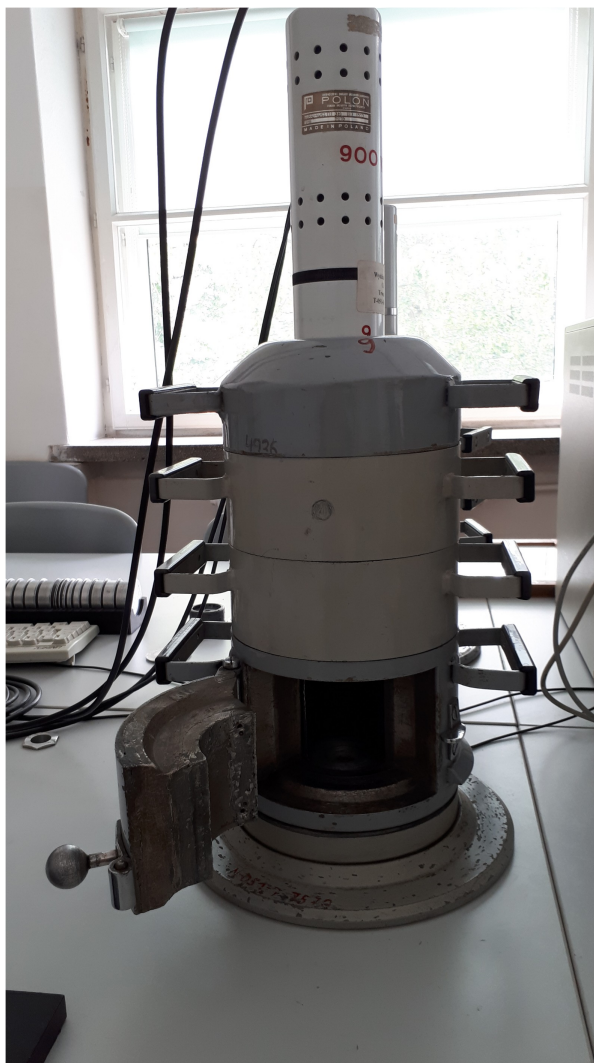
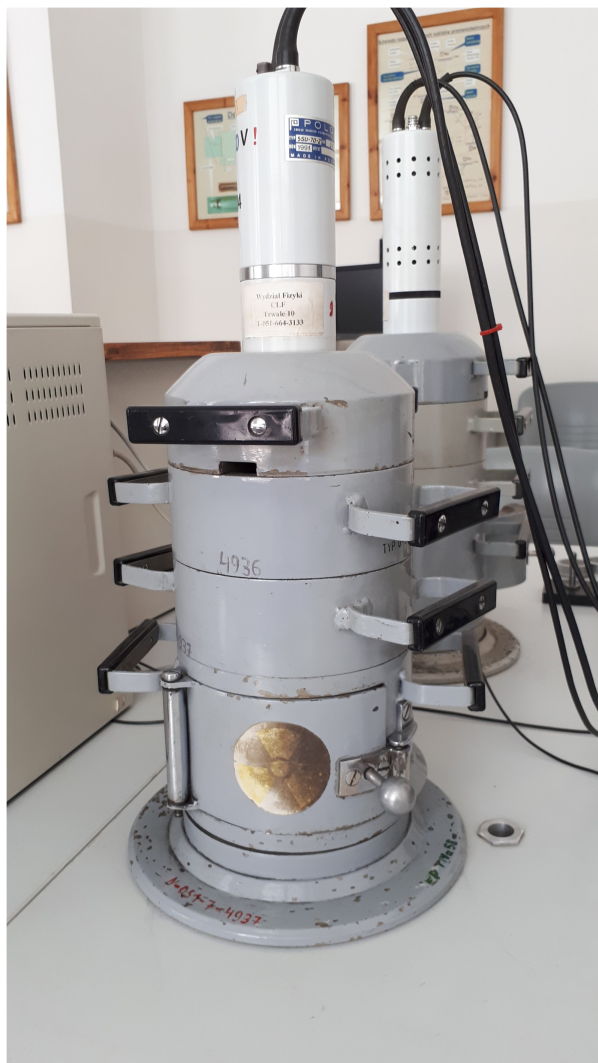
Jeśli w ciągu pierwszej, drugiej czy trzeciej godziny zmierzemy liczbę rozpadów (M) na minutę to powinna być ona taka sama (z dokładnością do tego, że podlega ona rozkładowi Poissona a więc dla zmierzonej liczby rozpadów M jej niepewność przyjmujemy jako \sqrt{M})

- Mamy źródła fotonów o określonej energii – pochodzą z β -rozpadów cezu i kobaltu
- W naszym ćwiczeniu jeden rozpad β^- oznacza emisję jednego kwantu gamma (dla kobaltu formalnie są dwa, ale detektor jest ustawiony tak, żeby mierzyć ten o energii 1.33 MeV)

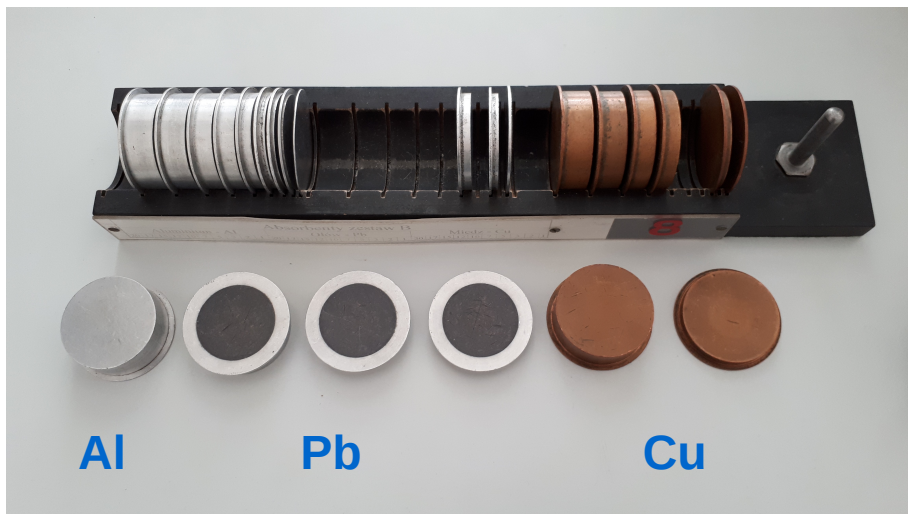
źródła w pojemnikach



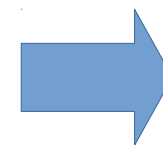
Domek pomiarowy w którym umieszczamy źródło



Absorbenty

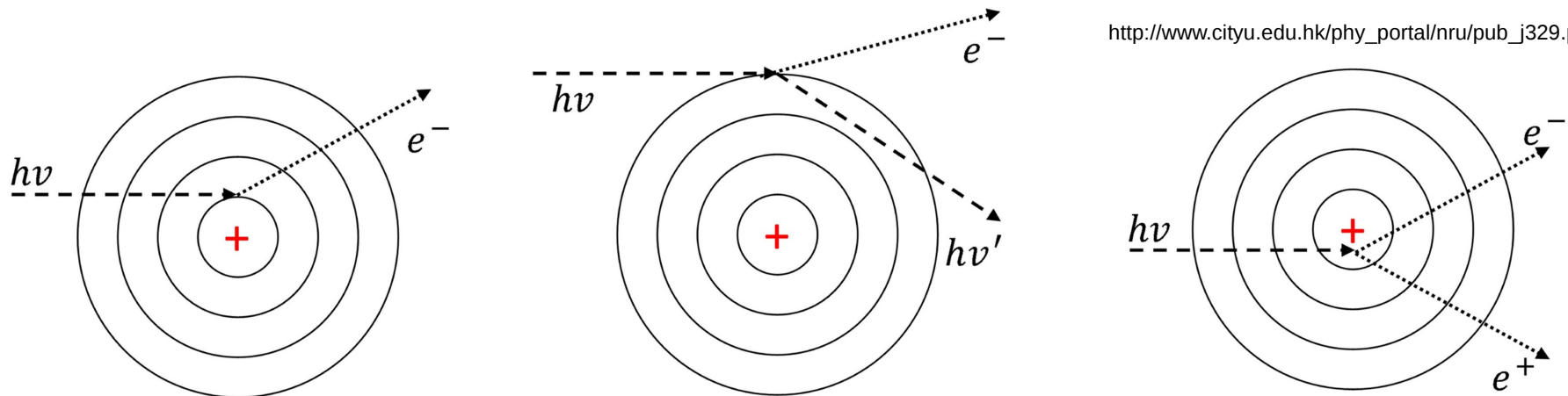


Teraz strumień kwantów γ przepuszczamy przez absorbent



Oddziaływanie fotonów z materią

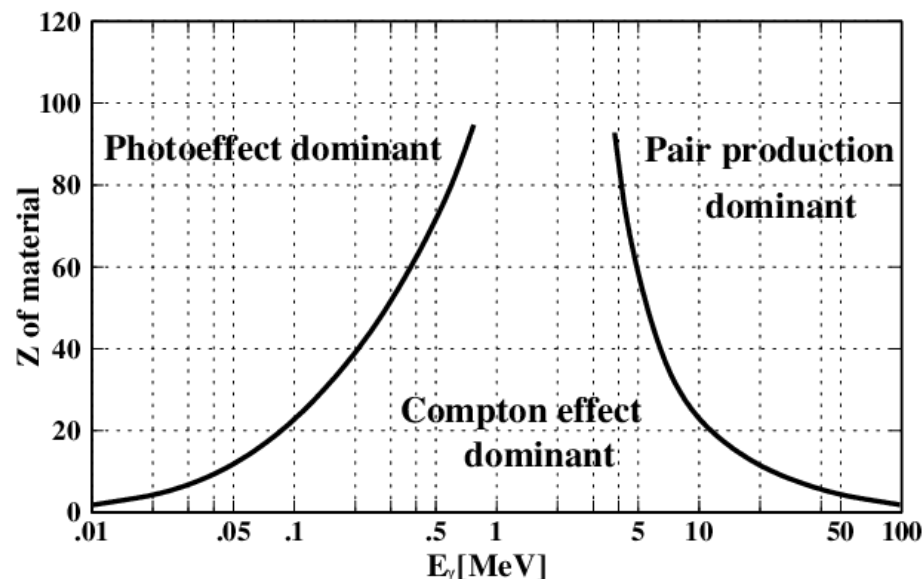
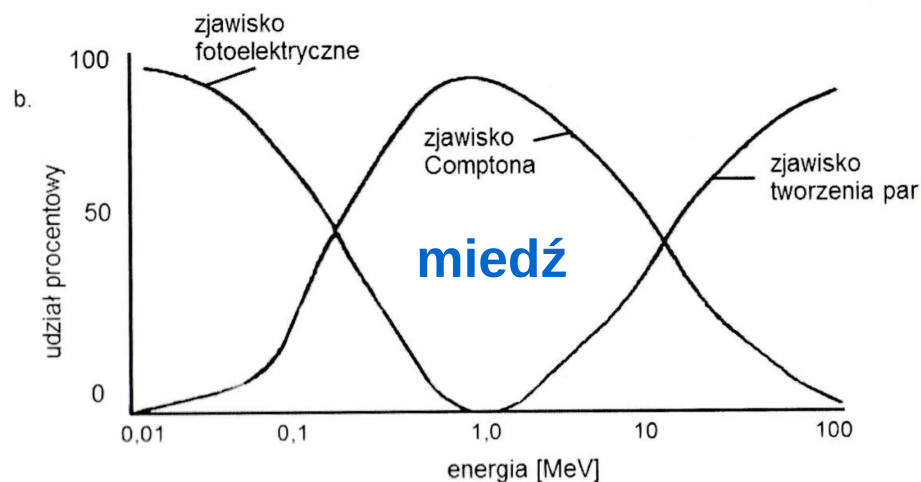
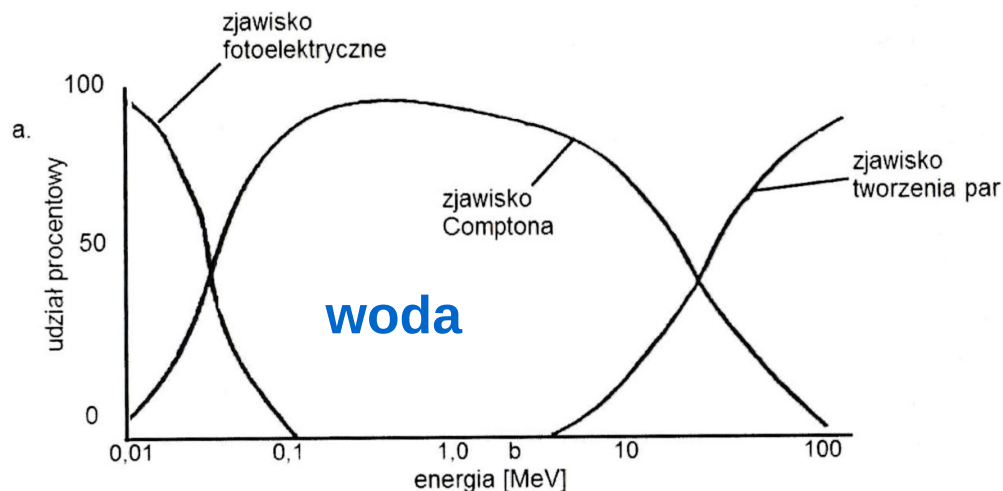
- **Fotoefekt (efekt fotoelektryczny)** – oddziaływanie fotonu z elektronem mocno związanym (wewnętrzne powłoki); całkowita absorpcja fotonu $\gamma + \text{atom} \rightarrow \text{atom}^+ + e^-$
- **Efekt Comptona** – oddziaływanie fotonu z elektronem słabo związanym (prawie swobodnym) $\gamma + \text{atom} \rightarrow \gamma' + \text{atom}^+ + e^-$
- **Produkcja pary e^+e^-** – konwersja energii fotonu w parę elektron-pozyton (w obecności trzeciego ciała np. jądro atomowe; $E_\gamma \geq 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$) $\gamma + \text{jądro} \rightarrow \text{jądro}' + e^+e^-$



Uwaga: Elektrony (i pozytony), powstałe na skutek rozpraszania komptonowskiego, efektu fotoelektrycznego i produkcji par e^+e^- , mogą (dalej) jonizować materię (jonizacja bezpośrednia – tzw. krzywe Bethego-Blocha) oraz tracić energię na promieniowanie hamowania (tzw. straty radiacyjne)

Obszary dominacji fotoefektu, zjawiska Comptona, produkcji par e^+e^-

To który z trzech ww. efektów będzie dominował zależy od energii fotonu oraz od liczby atomowej materiału absorbentu



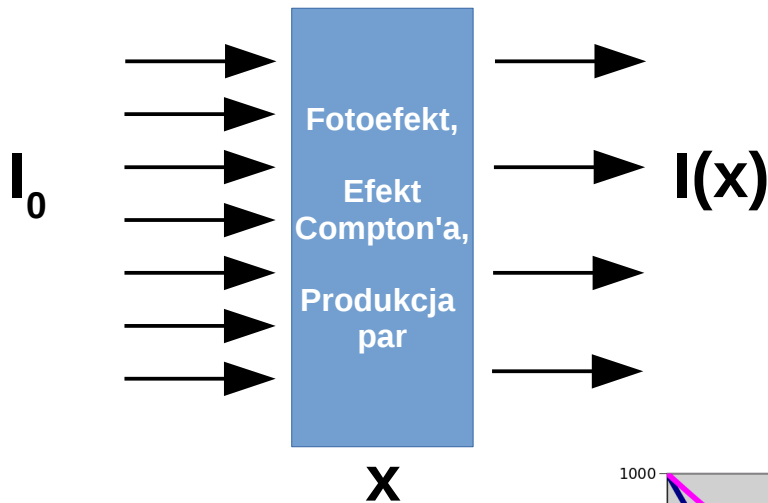
https://www.researchgate.net/figure/Areas-where-the-photoeffect-Compton-effect-and-pair-production-gamma-ray-interaction_fig1_266453326

**Liczba atomowa ołowiu – 82,
miedzi – 29, glinu – 13**

Dla porównania – średnia liczba atomowa:

- Wody – 7.4
- Tkanki miękkiej – 7.4
- Tkanki tłuszczowej – 5.9
- Tkanki kostnej – 13.8

Zmiana natężenia wiązki promieniowania γ przy przejściu przez materię



$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$ – natężenie wiązki po przejściu absorbentu o grubości x

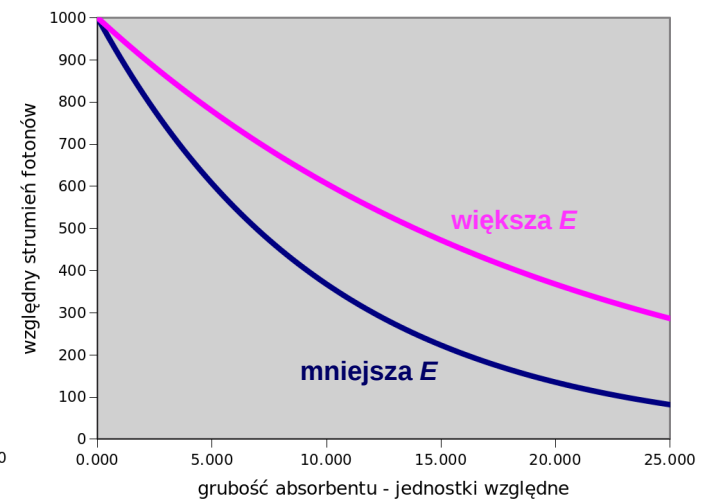
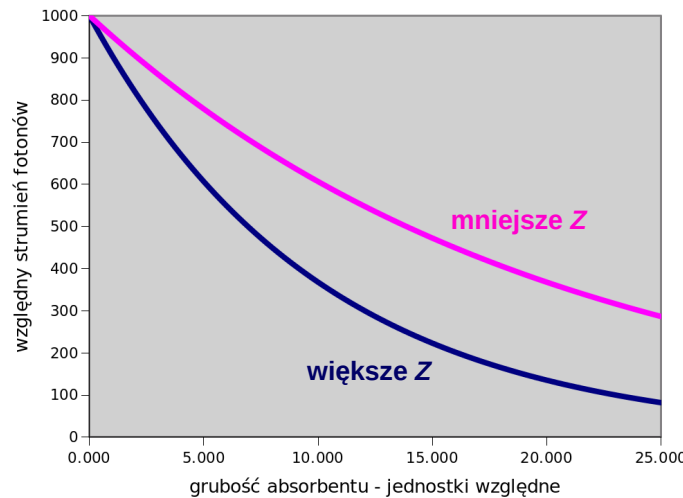
I_0 – początkowe natężenie wiązki; $I(x=0)$

μ – liniowy współczynnik osłabienia (1/cm, 1/mm)

$$\mu = \mu_{\text{fot}} + \mu_{\text{Compt}} + \mu_{\text{pary}}$$

Liniowy współczynnik osłabienia zależy od:

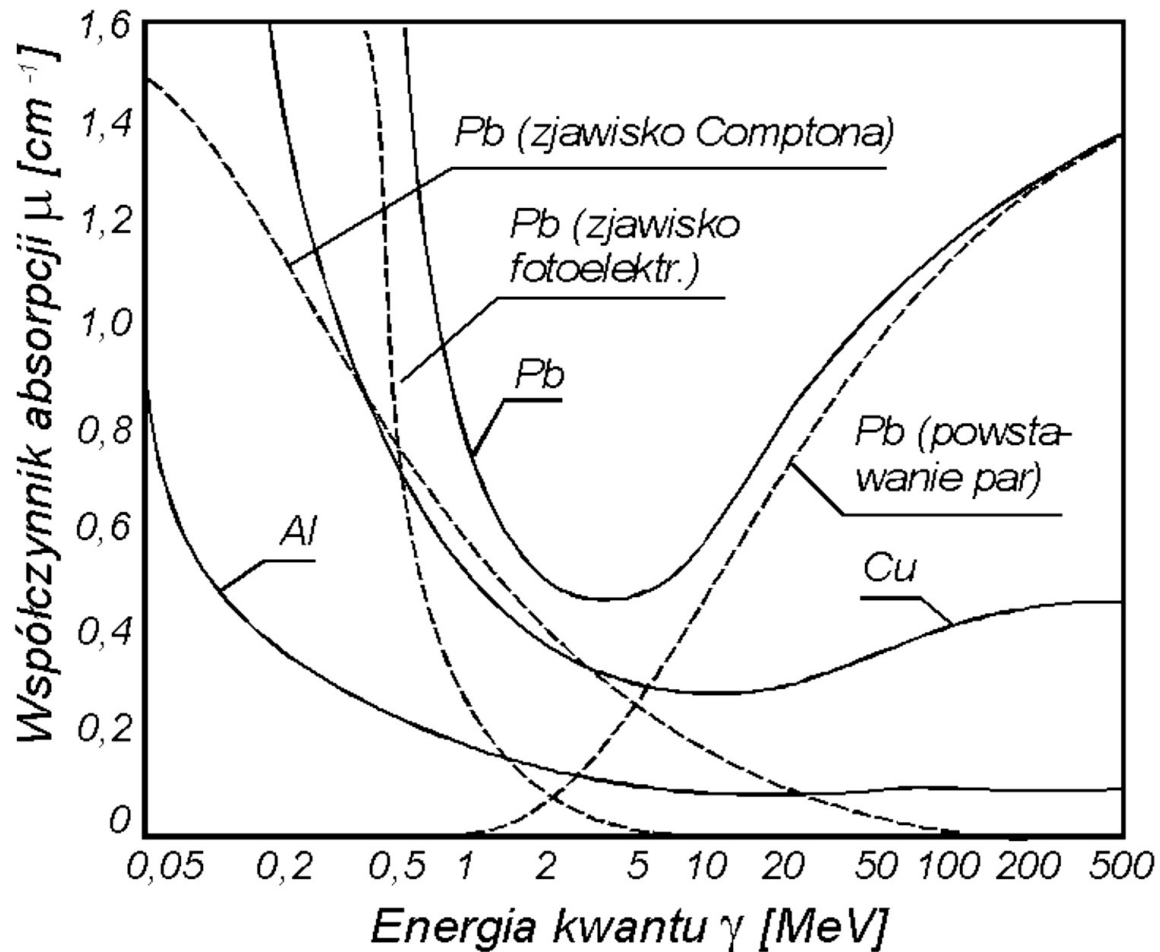
- Energii kwantów gamma
- Liczby atomowej absorbentu
- Gęstości absorbentu



Dla zainteresowanych: masowy współczynnik osłabienia (μ/ρ , gdzie ρ jest gęstością materiału) eliminuje zależność od gęstości ośrodka

Uwagi techniczne:

- Czas każdego pomiaru jest ustalony (1 minuta)
- Każdy pomiar jest wykonywany tym samym detektorem (ta sama powierzchnia)
- Można przejść od $I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$ do $N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$



Każdy z zespołów, jako końcowy rezultat ćwiczenia, otrzyma trzy punkty z wykresu obok (dla Pb, Cu, Al) przy jednej z energii kwantów γ (w zależności od użytego źródła 0.66 MeV lub 1.33 MeV)

Po co nam metoda najmniejszych kwadratów?

- Ze względu na domieszkę cząstek β^- w wiązce cząstek γ , nie jest możliwe wyznaczenie I_0 (lub N_0)
- Już najcieńszy używany absorbent zatrzymuje promieniowanie β^-
- Trzeba znaleźć metodę wyznaczania μ bez konieczności użycia I_0 (lub N_0)
- → wykonuje się serię pomiarów dla absorbentów o różnych grubościach, a następnie wykorzystuje się metodę najmniejszych kwadratów do wyznaczenia parametru μ

- Równanie

$N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$ po zlogarytmowaniu stronami daje

$$\ln(N(x)) = \ln(N_0) - \mu x$$

i do takiego równania będziemy dopasowywać prostą typu $y = ax + b$, gdzie

- **|a| jest szukanym parametrem μ**
- **niepewność wyznaczenia parametru 'a' (w metodzie najmniejszych kwadratów) jest niepewnością parametru μ**

Wygląd stanowiska pracy

- Domek pomiarowy
- Używane absorbenty
 - Pb: około 2, 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20 mm
 - Cu: około 2, 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20 mm
 - Al: około 5, 10, 15, 20 mm
- Ustawienie **napięcia zasilania detektora** (900V – dla Cs, 860V – dla Co)



Dokładne pomiary grubości absorbentów

Pomiar ze źródłem kobaltu (stanowiska przy oknie)

Absorbenty
Zestaw „A”
Al.

20.	20,07/20,08/20,07/20,06/20,06/20,07/20,07/20,08/20,08/20,07
17.	16,91/16,92/16,90/16,91/16,90/16,92/16,92/16,91/16,92/16,91/16,92
15.	14,77/14,78/14,78/14,77/14,76/14,75/14,77/14,78/14,79/14,78
12.	11,98/11,97/11,98/11,99/11,98/11,99/11,97/11,98/11,98/11,96
10.	10,00/10,01/10,00/10,00/10,00/10,12/10,00/10,01/10,01/10,01
7.	7,10/ 7,11/ 7,11/ 7,12/ 7,11/ 7,12/ 7,13/ 7,12/ 7,11/ 7,13
5.	5,05/ 5,04/ 5,04/ 5,05/ 5,04/ 5,04/ 5,04/ 5,05/ 5,04/ 5,04
3.	3,01/ 3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,01/ 3,01
2.	1,89/ 1,88/ 1,90/ 1,89/ 1,89/ 1,90/ 2,89/ 1,88/ 1,89/ 1,90
1.	0,90/ 0,89/ 0,90/ 0,89/ 0,90/ 0,90/ 0,89/ 0,88/ 0,88/ 0,89

Cu

20.	20,15/20,14/20,15/20,15/20,14/20,13/20,13/20,14/20,15/20,16
17.	17,08/17,09/17,09/17,08/17,07/17,08/17,08/17,09/17,08/17,07
15.	15,06/15,05/15,04/15,06/15,06/15,05/15,06/15,04/15,05/15,06
12.	12,05/12,04/12,05/12,06/12,06/12,05/12,04/12,05/12,06/12,05
10.	10,08/10,07/10,08/10,08/10,09/10,07/10,07/10,07/10,08/10,08
7.	7,07/ 7,08/ 7,08/ 7,09/ 7,09/ 7,08/ 7,09/ 7,09/ 7,08/ 7,08
5.	4,88/ 4,89/ 4,88/ 4,88/ 4,89/ 4,90/ 4,88/ 4,87/ 4,88/ 4,90
3.	2,72/ 2,73/ 2,71/ 2,71/ 2,72/ 2,71/ 2,73/ 2,73/ 2,72/ 2,72
2.	1,95/ 1,94/ 1,95/ 1,96/ 1,95/ 1,94/ 1,95/ 1,95/ 1,94/ 1,95
1.	0,89/ 0,88/ 0,89/ 0,90/ 0,90/ 0,89/ 0,89/ 0,88/ 0,90/ 0,90

Pb

20.	20,01/20,02/20,00/20,01/20,02/20,01/20,02/20,01/20,01/20,01
17.	16,99/16,98/16,98/16,97/16,99/16,98/16,98/16,97/16,98/16,98
15.	14,97/14,98/14,98/14,99/14,98/14,98/14,97/14,98/14,97/14,10
12.	11,89/11,90/11,90/11,89/11,88/11,89/11,89/11,90/11,90/11,89
10.	9,91/ 9,90/ 9,92/ 9,91/ 9,91/ 9,92/ 9,90/ 9,90/ 9,91/ 9,90
7.	6,99/ 6,98/ 6,98/ 6,99/ 6,98/ 6,98/ 6,98/ 6,97/ 6,98/ 6,98
5.	5,00/ 5,01/ 5,00/ 5,01/ 5,01/ 5,01/ 5,02/ 5,00/ 5,01/ 5,03
3.	2,97/ 2,98/ 2,99/ 2,98/ 2,97/ 2,98/ 2,99/ 2,98/ 2,98/ 2,98
2.	1,88/ 1,89/ 1,90/ 1,88/ 1,89/ 1,90/ 1,87/ 1,89/ 1,89/ 1,88

- Pomiary wykonane mikrometrem (najmniejsza podziałka 0.01 mm, niepewność eksperymentatora np. 0.005 mm)

- Należy policzyć średnią oraz niepewność dla każdego użytego absorbentu

- Na czerwono zaznaczono błędy grube (pomyłki) – takie pomiary należy odrzucić

Pomiar ze źródłem cezu (stanowiska przy ścianie)

Absorbenty
Zestaw „B”
Al.

20.	20,04/20,05/20,04/20,03/20,04/20,05/20,04/20,03/20,05/20,04
17.	17,00/17,01/17,02/16,99/17,00/17,01/16,99/17,00/17,01/17,01
15.	14,80/14,81/14,85/14,82/14,81/14,81/14,79/14,81/14,79/14,80
12.	11,78/11,79/11,78/11,77/11,80/11,79/11,80/11,79/11,79/11,80
10.	10,00/10,01/10,00/10,01/10,02/10,01/10,00/10,01/10,02/10,00
7.	7,04/ 7,05/ 7,04/ 7,05/ 7,06/ 7,05/ 7,05/ 7,04/ 7,05/ 7,04
5.	5,02/ 5,01/ 5,00/ 5,01/ 5,02/ 5,03/ 5,03/ 5,04/ 5,02/ 5,02
3.	3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,02/ 3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,02
2.	1,93/ 1,92/ 1,93/ 1,93/ 1,92/ 1,92/ 1,91/ 1,90/ 1,92/ 1,92
1.	0,95/ 0,96/ 0,95/ 0,96/ 0,95/ 0,96/ 0,95/ 0,94/ 0,95/ 0,96

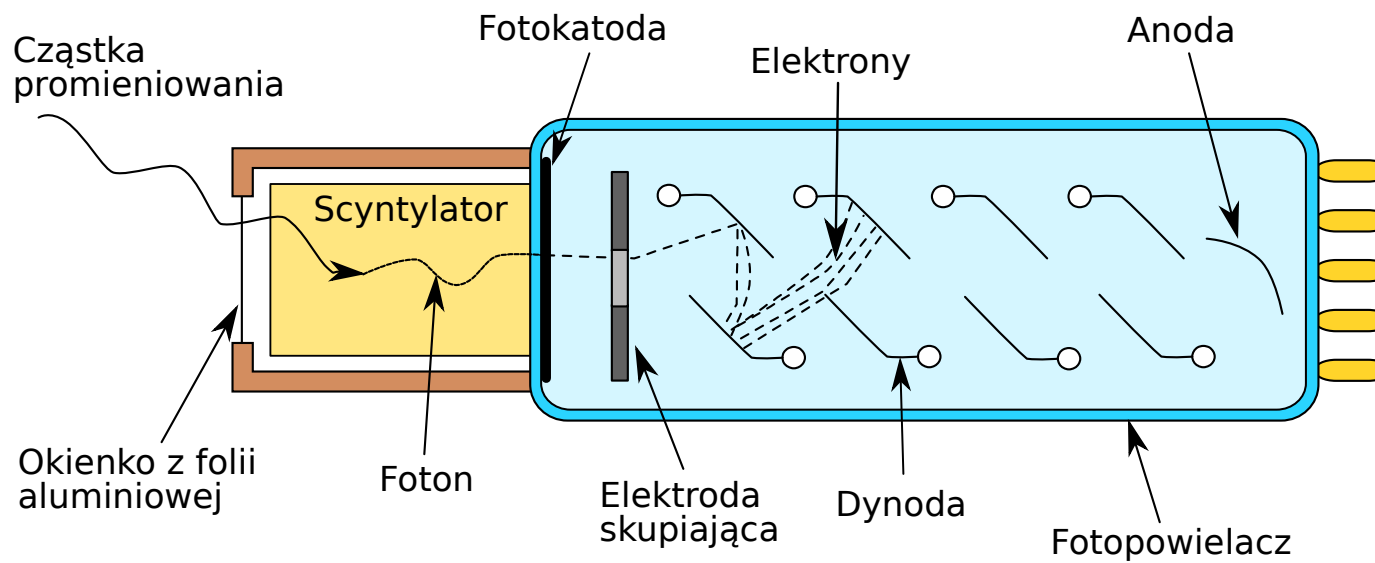
Cu

20.	20,12/20,11/20,12/20,11/20,10/20,11/20,12/20,11/20,10
17.	16,96/16,97/16,97/16,98/16,97/16,97/16,97/16,95/16,96/16,96
15.	15,08/15,07/15,09/15,08/15,08/15,07/15,09/15,08/15,08/15,08
12.	12,09/12,10/12,11/12,10/12,10/12,12/12,10/12,11/12,10/12,10
10.	10,96/10,98/10,98/10,97/10,96/10,95/10,98/10,99/10,98/10,97
7.	7,03/ 7,04/ 7,06/ 7,04/ 7,04/ 7,05/ 7,06/ 7,04/ 7,04/ 7,05
5.	4,85/ 4,84/ 4,86/ 4,86/ 4,85/ 4,87/ 4,84/ 4,85/ 4,84/ 4,83
3.	2,80/ 2,81/ 2,85/ 2,80/ 2,81/ 2,81/ 2,80/ 2,82/ 2,81/ 2,80
2.	1,95/ 1,96/ 1,96/ 1,95/ 1,94/ 1,93/ 1,95/ 1,95/ 1,95/ 1,94
1.	0,90/ 0,91/ 0,92/ 0,92/ 0,91/ 0,91/ 0,91/ 0,92/ 0,93/ 0,91/ 0,91

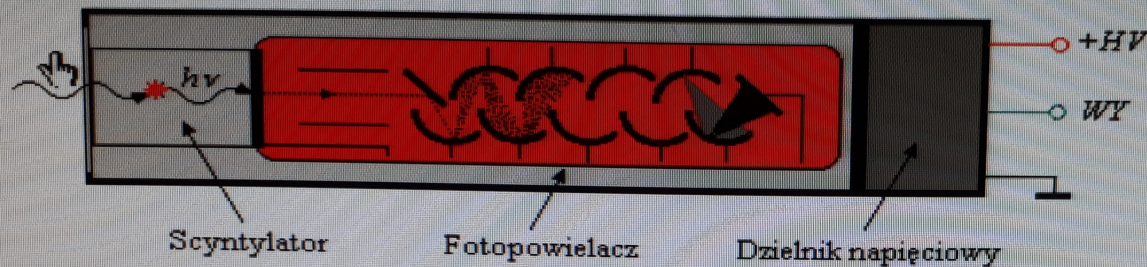
Pb

20.	19,95/19,96/19,94/19,97/19,97/19,96/19,96/19,95/19,94/19,93
17.	16,92/16,90/16,91/16,92/16,92/16,91/16,90/16,90/16,90/16,92
15.	14,82/14,85/14,84/14,85/14,84/14,85/14,86/14,84/14,82/14,83
12.	11,88/11,90/11,91/11,89/11,89/11,89/11,90/11,90/11,91/11,89/11,89
10.	9,98/ 9,97/ 9,99/ 9,98/ 9,98/ 9,97/ 9,96/ 9,98/ 9,97/ 9,98
7.	6,96/ 6,95/ 6,94/ 6,95/ 6,96/ 6,96/ 6,95/ 6,94/ 6,95/ 6,95
5.	5,05/ 5,04/ 5,05/ 5,04/ 5,01/ 5,03/ 5,04/ 5,04/ 5,04/ 5,03
3.	2,93/ 2,94/ 2,96/ 2,94/ 2,94/ 2,93/ 2,93/ 2,94/ 2,95/ 2,94
2.	1,85/ 1,85/ 1,83/ 1,84/ 1,84/ 1,84/ 1,84/ 1,85/ 1,86/ 1,85

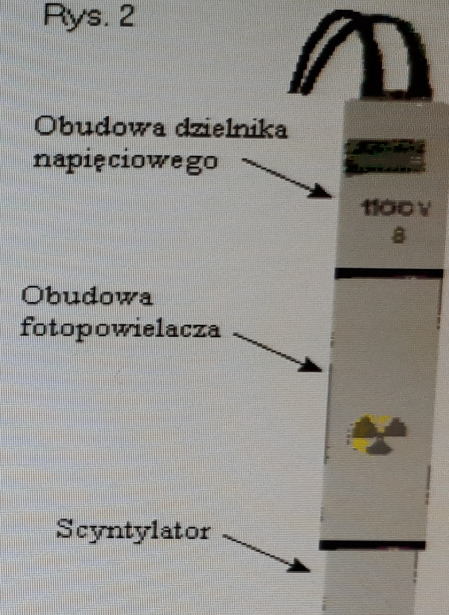
Detektor scyntylacyjny



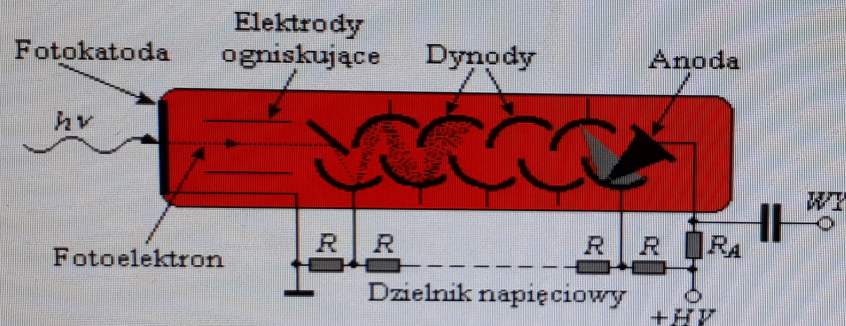
Rys. 1



Rys. 2

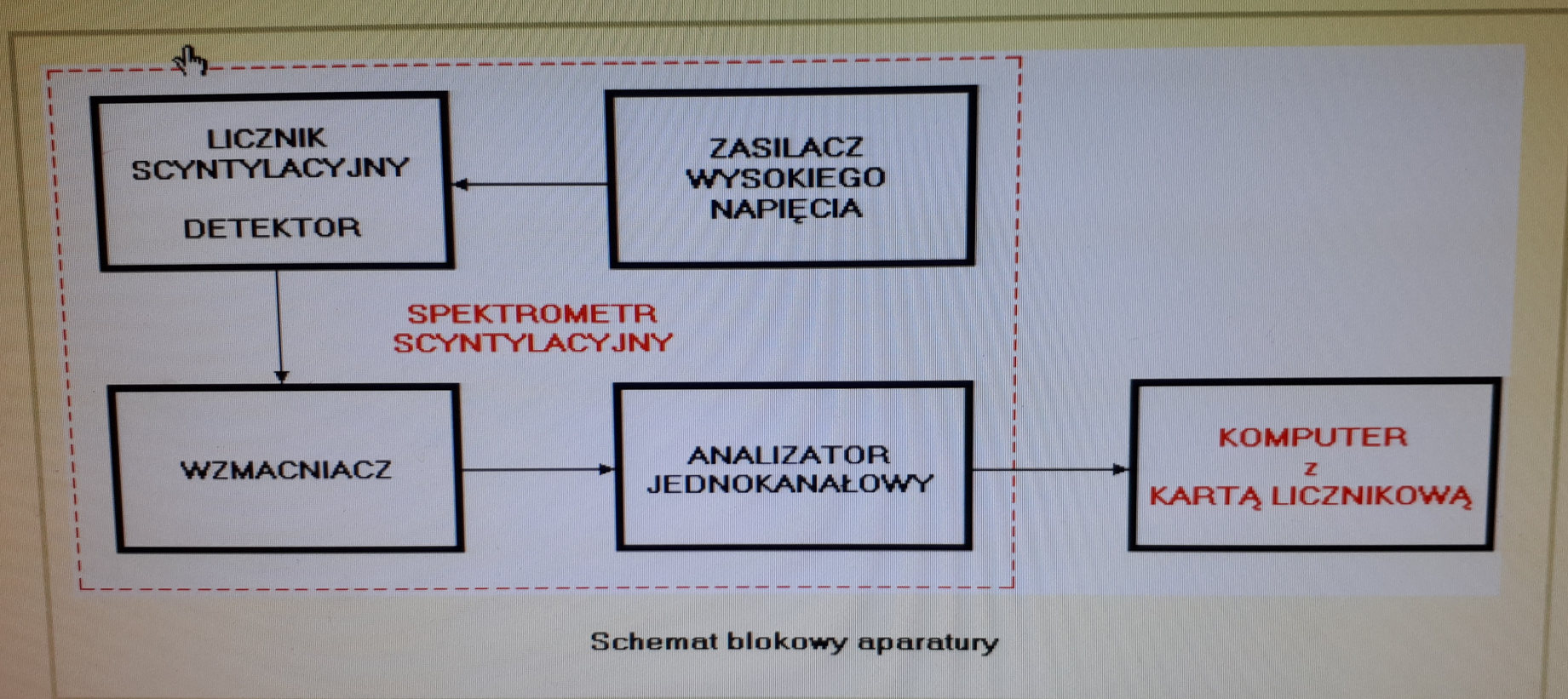


Rys. 3



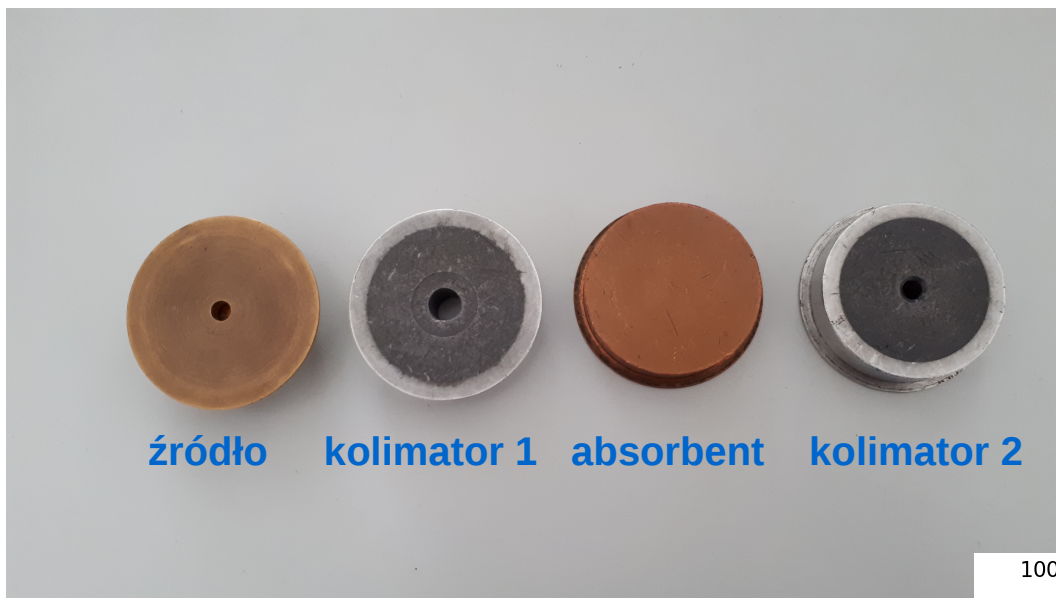
Zjawisko powstawania błysków świetlnych (scyntytacji) w scyntylnatorach pod wpływem cząstek jonizujących wykorzystano do budowy liczników scyntylnacyjnych (rys. 1 i 2). W materiałach scyntylnacyjnych (luminescencyjnych) pod wpływem zaabsorbowanej energii ma miejsce przejście w stan wzbudzenia atomów lub cząstek, które powracając do stanu podstawowego emitują energię w postaci światła widzialnego lub promieniowania ultrafioletowego. Połączenie scyntylnatora z fotopowielaczem pozwala skonstruować detektor czuły na promieniowanie jonizujące. Zasadę działania fotopowielacza ilustruje schematycznie rysunek 3. Fotokatoda, wykonana z materiału światłoczułego, emituje elektrony pod wpływem padającego na nią promieniowania, które dzięki optyce elektronowej (polegającej na kształtowaniu torów elektronów za pomocą pola elektrycznego) są ogniskowane i poruszają się w kierunku najbliższej elektrody (dynody), zwiększając po drodze swoją energię kinetyczną pod wpływem przyspieszającego pola elektrycznego. Elektrony docierające do pierwszej dynody mają zazwyczaj wystarczającą energię by bombardując jej powierzchnię spowodować emisję wtórną 2, 4 nowych elektronów, co jest równoznaczne ze wzmożeniem prądu. Jeżeli za pierwszą dynodą znajdują się kolejne, między którymi wytworzone jest odpowiednie pole elektryczne, to opisany mechanizm powielania liczby elektronów jest kontynuowany i w rezultacie do ostatniej elektrody - anody, dociera znaczna liczba elektronów, wymuszając przepływ prądu w obwodzie zewnętrznym, możliwy do pomiaru. System stopni powielających liczbę elektronów stanowi zwykle 9, 15 dynod dzięki czemu można uzyskać wzmożenie prądowe rzędu 10^5 , 10^9 . Właściwą polaryzację dynod uzyskuje się dzięki rezystorowemu dzielnikowi napięć, który jest zasilany napięciem + HV.

Schemat blokowy aparatury



Zakończ przeglądanie

Po co nam kolimatory?



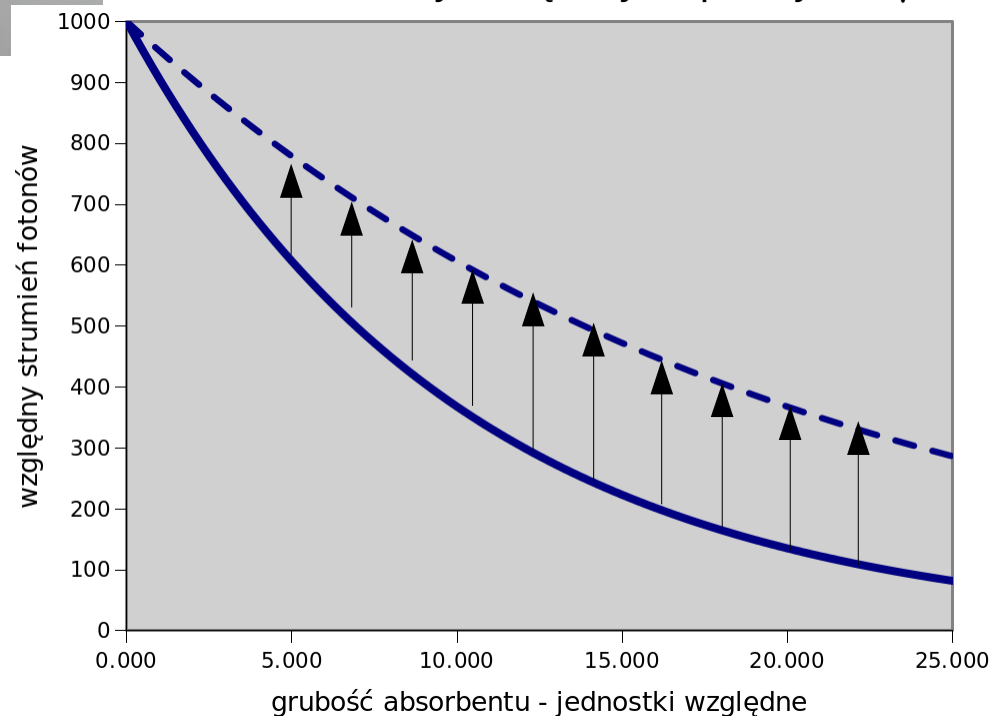
Do domku pomiarowego
wkładamy kolejno:
źródło → kolimator 1 →
absorbent → kolimator 2

kolimator 1 – do formowania wiązki

kolimator 2 – zapobiega sztucznemu
zaniżeniu współczynnika osłabienia
(ze względu na obecność
„niechcianych” fotonów ze zjawiska
Comptona)

Przerywana krzywa – tak byłoby bez
użycia kolimatora 2

Im bardziej „stroma” krzywa
tym większy współczynnik μ





Przebieg pomiarów

- **Pomiar tła** – kwanty γ , które pochodzą z różnych źródeł (poza badanym izotopem promieniotwórczym); tło mierzy się 5–10 razy (średnia jest odejmowana automatycznie przez program, który liczy już tylko „właściwe” kwanty gamma pochodzące ze źródła promieniotwórczego)
- **Wybór absorbentów i sprawdzenie ich grubości**
- **Pomiar liczby kwantów gamma dla każdego z absorbentów** (w sumie 20 absorbentów – 8 dla Pb, 8 dla Cu, 4 dla Al); pomiar na danym absorbencie wykonywany jest jeden raz. W czasie wykonywania pomiaru wartości zapisują się w tabeli i rysują na wykresie



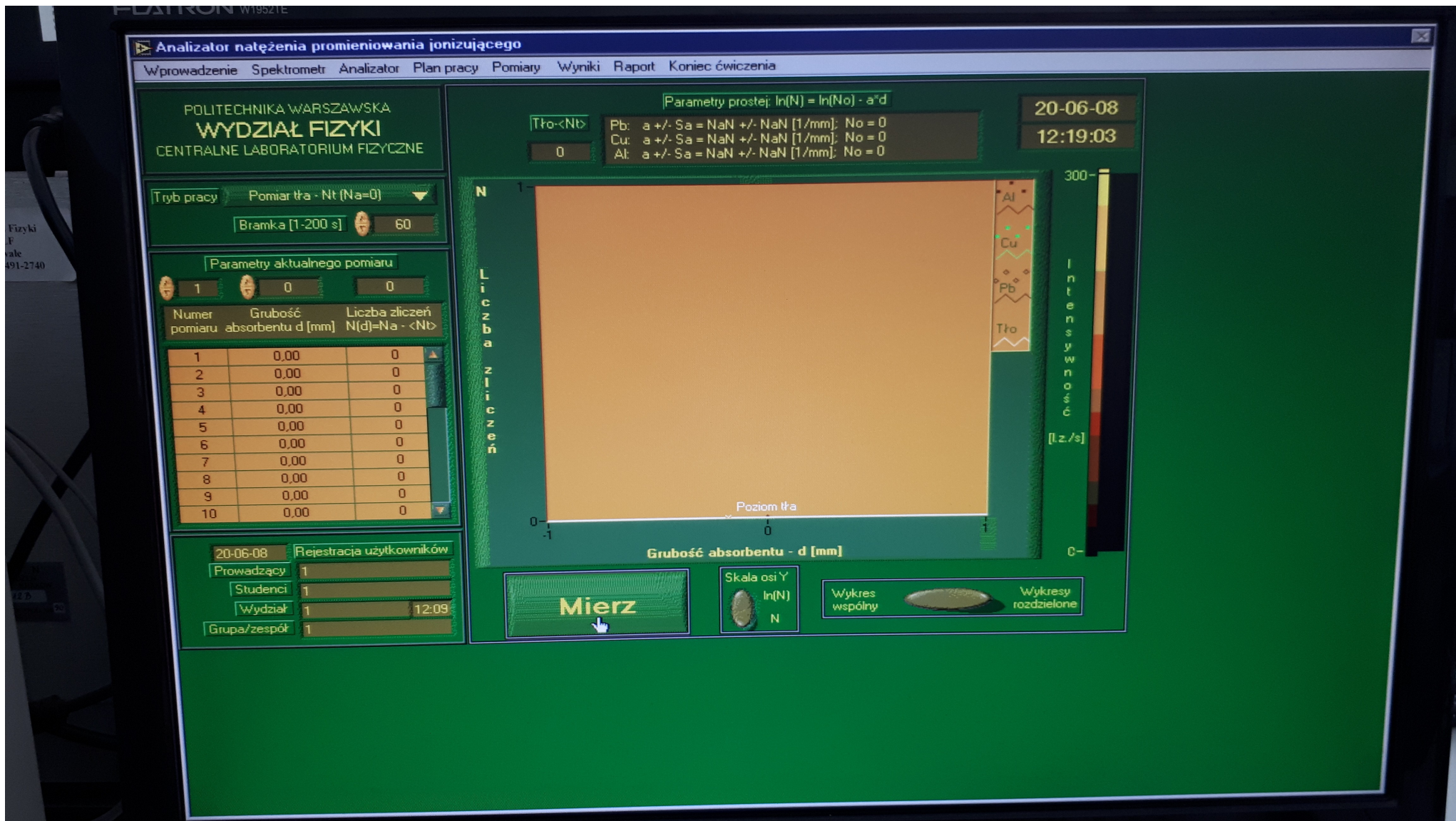
kolimator 2

absorbent (Pb, 2 mm)

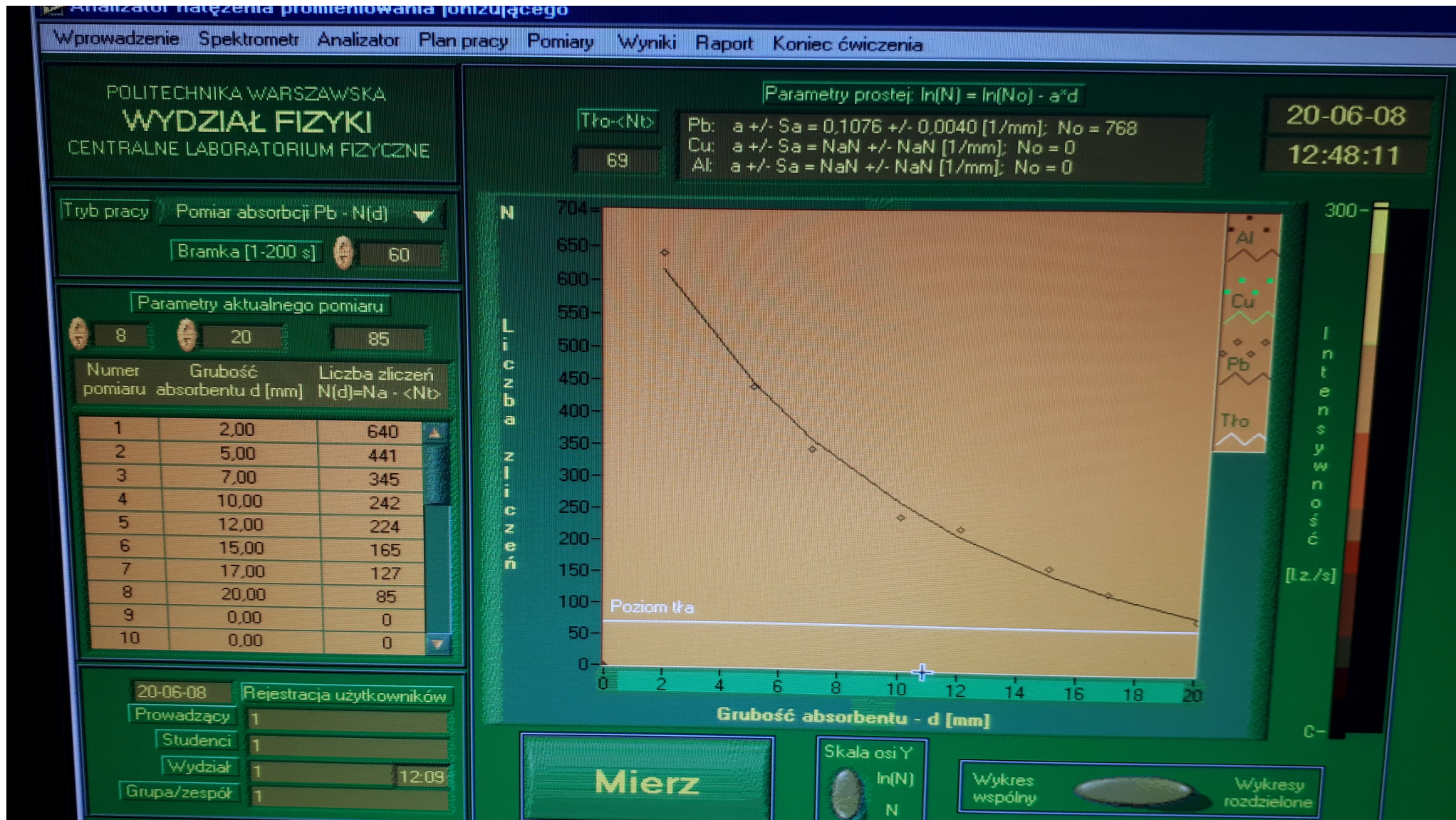
kolimator 1

źródło

Program do obsługi pomiarów

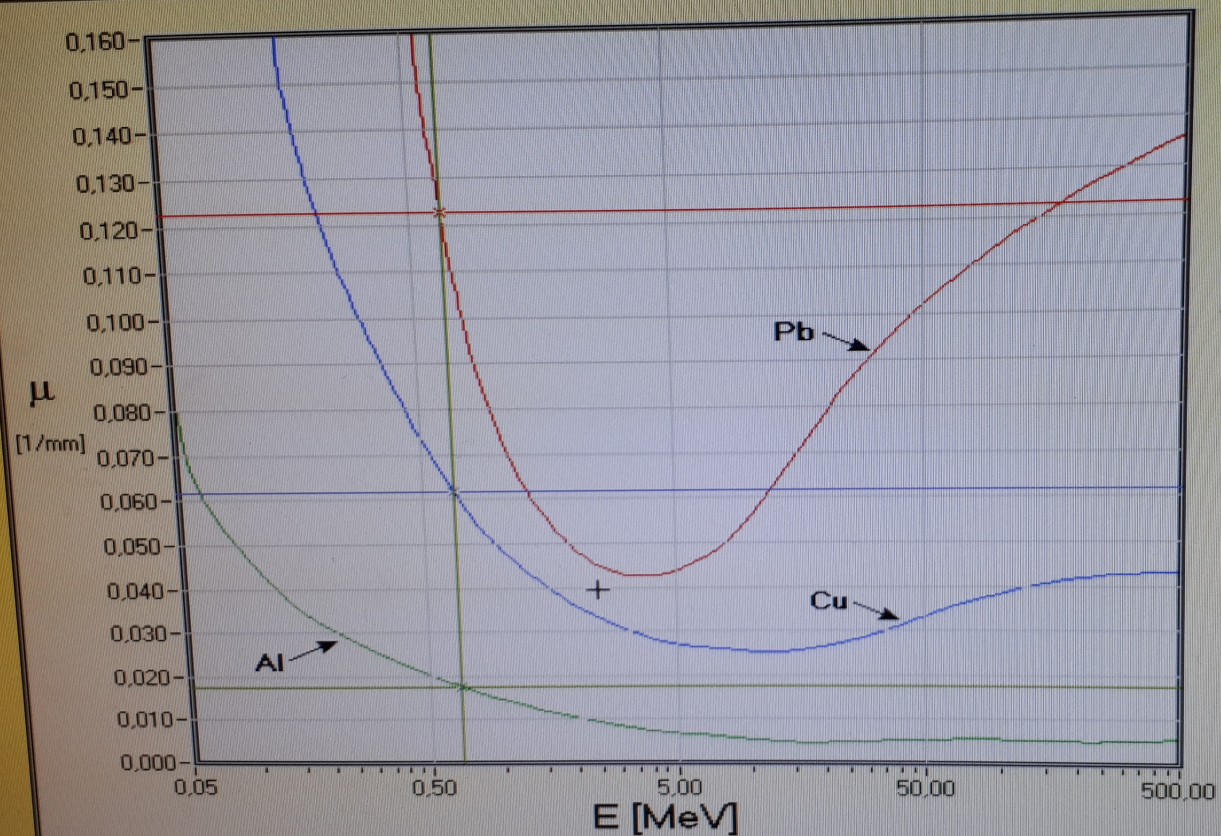


Przykładowe zebrane wyniki (Pb)



Spisanie wartości tablicowych dla ^{137}Cs


FLATRON W1952TE



Odczyt z wykresu

E μ
[MeV] [$1/\text{mm}$]

	E [MeV]	μ [$1/\text{mm}$]		
Al	0,66	0,017	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Cu	0,66	0,062	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pb	0,66	0,123	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Co-60 [1,33 MeV]  Cs-137 [0,66 MeV]

Wyniki pomiarów

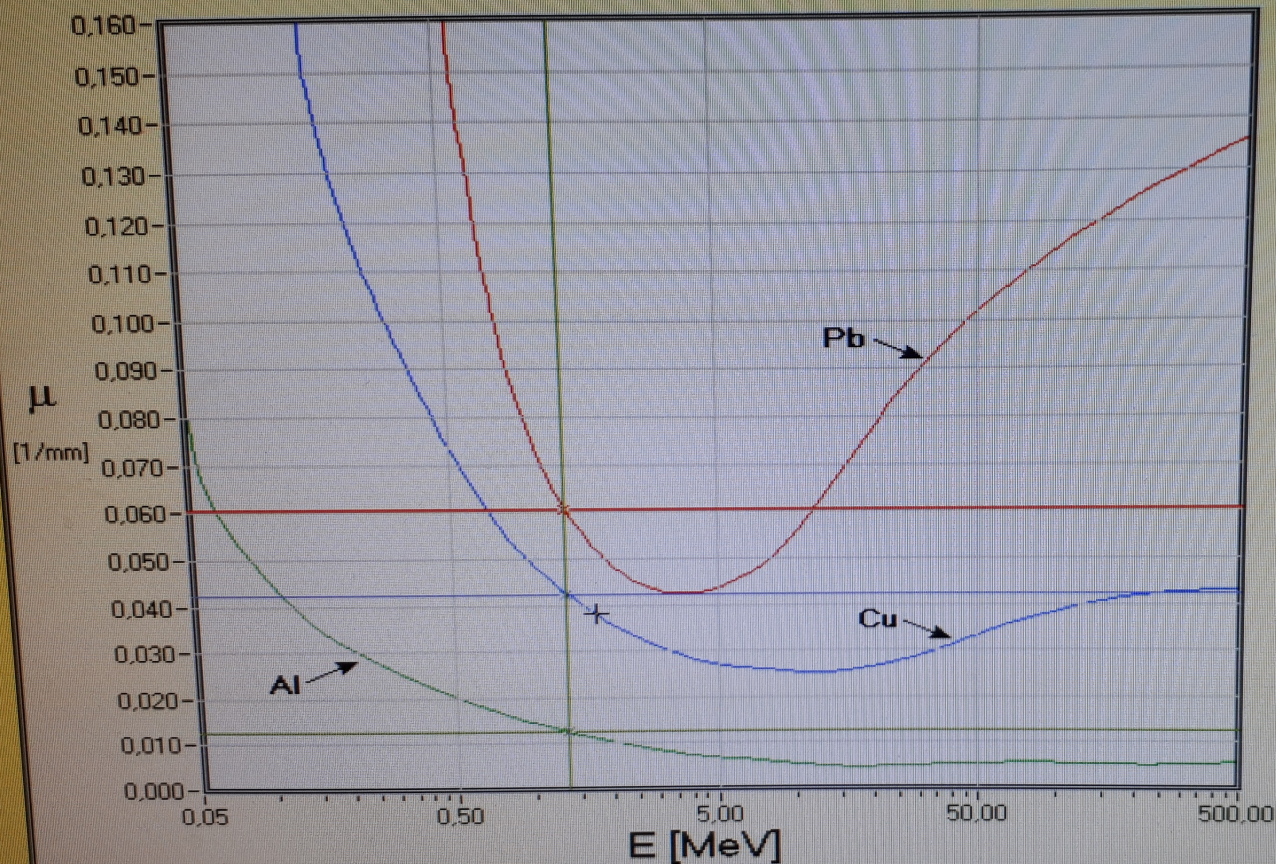
μ [$1/\text{mm}$]

Al: NaN [$1/\text{mm}$]
Cu: NaN [$1/\text{mm}$]
Pb: 0,1076 [$1/\text{mm}$]



Zakończ przeglądanie

Spisanie wartości tablicowych dla ^{60}Co



Odczyt z wykresu

E [MeV] μ [1/mm]

Al	1,33	0,013	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cu	1,33	0,042	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pb	1,33	0,061	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Co-60 [1,33 MeV] Cs-137 [0,66 MeV]

Wyniki pomiarów

μ [1/mm]

Al: NaN [1/mm]
Cu: NaN [1/mm]
Pb: 0,1076 [1/mm]



Zakończ przeglądanie

Jak będzie wyglądał zestaw otrzymanych danych liczbowych

Dane dla Cezu ($E_{\text{gamma}} = 0.66 \text{ MeV}$)

Pochłanianie w Pb

x	N
2	1220
5	834
7	643
10	434
12	360
15	233
17	183
20	128

Pochłanianie w Cu

x	N
2	1326
5	1138
7	996
10	769
12	732
15	584
17	519
20	423

Pochłanianie w Al

x	N
5	1368
10	1266
15	1161
20	1048

Wartości tablicowe (1/mm)

Pb:	0.123
Cu:	0.062
Al:	0.017

Co powinno zawierać sprawozdanie

1. Wstęp teoretyczny (cel ćwiczenia, podstawy fizyczne zjawiska, użyte źródło, energia kwantów gamma, etc.)
2. Tabele (3x) z wynikami pomiarów (poniżej wpisano wartości losowo wybrane !!)

x (mm)	s_{xsr} (mm)	$x(u_{xsr})$ (mm)	$N(u_N)$	$\ln N(u_{\ln N})$
1.948	0.003	1.948(0.007)	1267(36)	7.144(0.028)
4.885	0.004	4.885(0.008)	1050(32)	6.956(0.031)

Odchylenie standardowe średniej:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

Niepewność całkowita grubości:

$$u_{\bar{x}} = \sqrt{s_{\bar{x}}^2 + \frac{(\Delta x)^2}{3} + \frac{(\Delta x_E)^2}{3}}$$

$\Delta x = 0.01$ mm (mikrometr); $\Delta x_E = \text{np. } 0.005$ mm

Niepewność liczby kwantów gamma:

$$u_N = \sqrt{N} \text{ (rozkład Poissona)}$$

Niepewność $\ln N$:

$$u_N = \frac{\sqrt{N}}{N}$$

wynika z podstawienia $Z = \ln N$

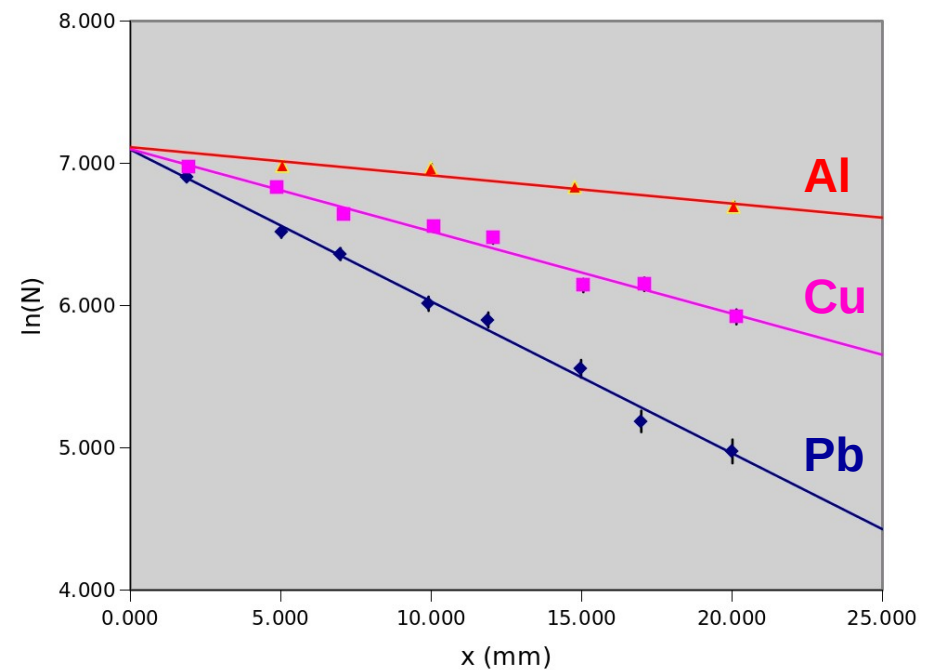
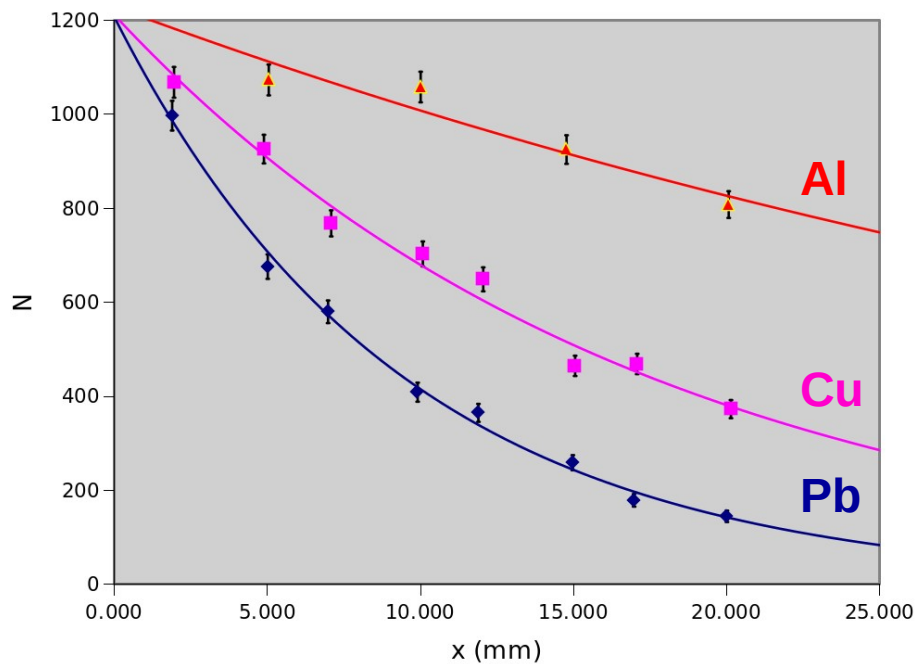
i policzenia u_Z z propagacji niepewności

Co powinno zawierać sprawozdanie

3. Dwa wykresy

- N w funkcji x
- $\ln N$ w funkcji x

(opisane osie, naniesione niepewności pomiarowe)



4. Do danych z drugiego wykresu ($\ln N$ w funkcji x) dopasowujemy prostą $y=ax+b$

$$|a| = \mu$$

$$b = \ln N_0$$

Co powinno zawierać sprawozdanie

5. Podajemy odpowiedzi końcowe – trzy współczynniki μ dla użytej energii kwantów γ

μ_{Pb} = wartość (niepewność) jednostka

μ_{Cu} = wartość (niepewność) jednostka

μ_{Al} = wartość (niepewność) jednostka

6. Każdą z ww. wymienionych wartości porównujemy z wartością tablicową (np. test „ 3σ ” – szczegóły w wykładzie wstępnym):

$$|\mu_{\text{doświadczalne}} - \mu_{\text{tablicowe}}| / (\text{niepewność } \mu_{\text{doświadczalnego}}) < 3 \quad (?)$$

→ jeśli „ < 3 ” to wartość doświadczalna i tablicowa są ze sobą zgodne, w granicach trzech standardowych odchyłeń

7. Podsumowanie (co obliczono, który ze współczynników μ jest największy a który najmniejszy, czy wartości są zgodne z tablicowymi, itp.), wnioski (np. jakie absorbenty stanowią najlepszą ochronę przed promieniowaniem gamma, itp.), co i jak można byłoby poprawić w pomiarze, etc.

Slajdy dodatkowe

Absorbenty

Zestaw „A”

Al.

20.	20,07/20,08/20,07/20,06/20,06/20,07/20,07/20,08/20,08/20,08/20,07
17.	16,91/16,92/16,90/16,91/16,90/16,92/16,91/16,91/16,92/16,91/16,92
15.	14,77/14,78/14,78/14,77/14,76/14,75/14,77/14,78/14,79/14,78
12.	11,98/11,97/11,98/11,99/11,98/11,99/11,97/11,98/11,98/11,96
10.	10,00/10,01/10,00/10,01/10,12/10,00/10,01/10,01/10,01/10,01
7.	7,10/ 7,11/ 7,11/ 7,12/ 7,11/ 7,12/ 7,13/ 7,12/ 7,11/ 7,13
5.	5,05/ 5,04/ 5,04/ 5,05/ 5,04/ 5,04/ 5,04/ 5,05/ 5,04/ 5,04
3.	3,01/ 3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,01/ 3,01
2.	1,89/ 1,88/ 1,90/ 1,89/ 1,89/ 1,90/ 2,89/ 1,88/ 1,89/ 1,90
1.	0,90/ 0,89/ 0,90/ 0,89/ 0,90/ 0,89/ 0,90/ 0,88/ 0,88/ 0,89

Cu

20.	20,15/20,14/20,15/20,15/20,14/20,13/20,13/20,14/20,15/20,16
17.	17,08/17,09/17,09/17,08/17,07/17,08/17,08/17,08/17,09/17,08/17,07
15.	15,06/15,05/15,04/15,06/15,06/15,05/15,06/15,04/15,05/15,06
12.	12,05/12,04/12,05/12,06/12,06/12,05/12,04/12,05/12,06/12,05
10.	10,08/10,07/10,08/10,08/10,09/10,07/10,07/10,07/10,08/10,08
7.	7,07/ 7,08/ 7,08/ 7,09/ 7,09/ 7,08/ 7,09/ 7,09/ 7,08/ 7,08
5.	4,88/ 4,89/ 4,88/ 4,88/ 4,89/ 4,90/ 4,88/ 4,87/ 4,88/ 4,90
3.	2,72/ 2,73/ 2,71/ 2,71/ 2,72/ 2,71/ 2,73/ 2,73/ 2,72/ 2,72
2.	1,95/ 1,94/ 1,95/ 1,96/ 1,95/ 1,94/ 1,95/ 1,95/ 1,94/ 1,95
1.	0,89/ 0,88/ 0,89/ 0,90/ 0,90/ 0,89/ 0,89/ 0,88/ 0,90/ 0,90

Pb

20.	20,01/20,02/20,00/20,01/20,02/20,01/20,02/20,01/20,01/20,01
17.	16,99/16,98/16,98/16,97/16,99/16,98/16,98/16,97/16,98/16,98
15.	14,97/14,98/14,98/14,99/14,98/14,98/14,97/14,98/14,97/14,10
12.	11,89/11,90/11,90/11,89/11,88/11,89/11,89/11,90/11,90/11,89
10.	9,91/ 9,90/ 9,92/ 9,91/ 9,91/ 9,92/ 9,90/ 9,90/ 9,91/ 9,90/
7.	6,99/ 6,98/ 6,98/ 6,99/ 6,98/ 6,98/ 6,98/ 6,97/ 6,98/ 6,98/
5.	5,00/ 5,01/ 5,00/ 5,01/ 5,01/ 5,01/ 5,02/ 5,00/ 5,01/ 5,03
3.	2,97/ 2,98/ 2,99/ 2,98/ 2,97/ 2,98/ 2,99/ 2,98/ 2,98/ 2,98
2.	1,88/ 1,89/ 1,90/ 1,88/ 1,89/ 1,90/ 1,87/ 1,89/ 1,89/ 1,88

Absorbenty

Zestaw „B”

Al.

20.	20,04/20,05/20,04/20,03/20,04/20,05/20,04/20,03/20,05/20,04
17.	17,00/17,01/17,02/16,99/17,00/17,01/16,99/17,00/17,01/17,01
15.	14,80/14,81/14,85/14,82/14,81/14,81/14,79/14,81/14,79/14,80
12.	11,78/11,79/11,78/11,77/11,80/11,79/11,80/11,79/11,79/11,80
10.	10,00/10,01/10,00/10,01/10,02/10,01/10,00/10,01/10,02/10,00
7.	7,04/ 7,05/ 7,04/ 7,05/ 7,06/ 7,05/ 7,05/ 7,04/ 7,05/ 7,04
5.	5,02/ 5,01/ 5,00/ 5,01/ 5,02/ 5,03/ 5,03/ 5,03/ 5,02/ 5,02
3.	3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,02/ 3,02/ 3,01/ 3,01/ 3,02/ 3,02
2.	1,93/ 1,92/ 1,93/ 1,93/ 1,92/ 1,92/ 1,91/ 1,90/ 1,92/ 1,92
1.	0,95/ 0,96/ 0,95/ 0,96/ 0,95/ 0,96/ 0,95/ 0,94/ 0,95/ 0,96

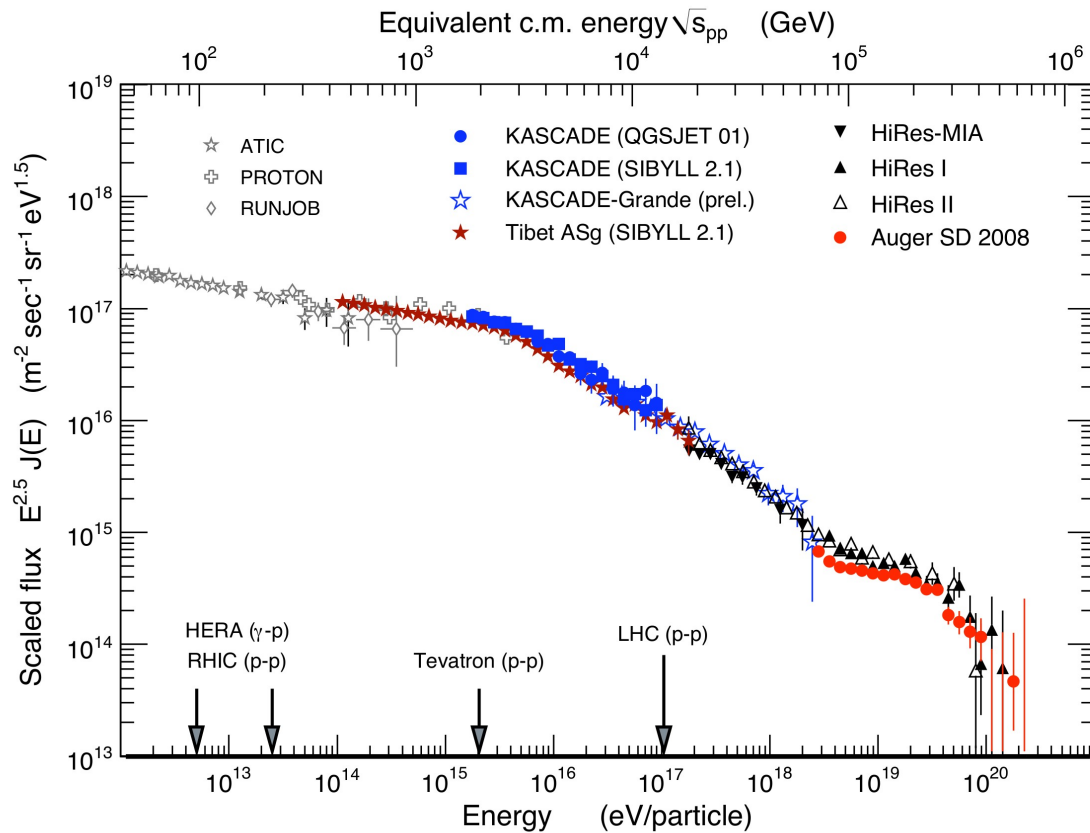
Cu

20.	20,12/20,11/20,12/20,11/20,10/20,11/20,12/20,12/20,11/20,10
17.	16,96/16,97/16,97/16,98/16,97/16,97/16,97/16,95/16,96/16,96
15.	15,08/15,07/15,09/15,08/15,08/15,07/15,09/15,08/15,08/15,08
12.	12,09/12,10/12,11/12,10/12,10/12,12/12,10/12,11/12,10/12,10
10.	10,96/10,98/10,98/10,97/10,96/10,95/10,98/10,99/10,98/10,97
7.	7,03/ 7,04/ 7,06/ 7,04/ 7,04/ 7,05/ 7,06/ 7,04/ 7,04/ 7,05
5.	4,85/ 4,84/ 4,86/ 4,86/ 4,85/ 4,87/ 4,84/ 4,85/ 4,84/ 4,83
3.	2,80/ 2,81/ 2,85/ 2,80/ 2,81/ 2,81/ 2,80/ 2,82/ 2,81/ 2,80
2.	1,95/ 1,96/ 1,96/ 1,95/ 1,94/ 1,93/ 1,95/ 1,95/ 1,95/ 1,94
1.	0,90/ 0,91/ 0,92/ 0,92/ 0,91/ 0,91/ 0,92/ 0,93/ 0,91/ 0,91

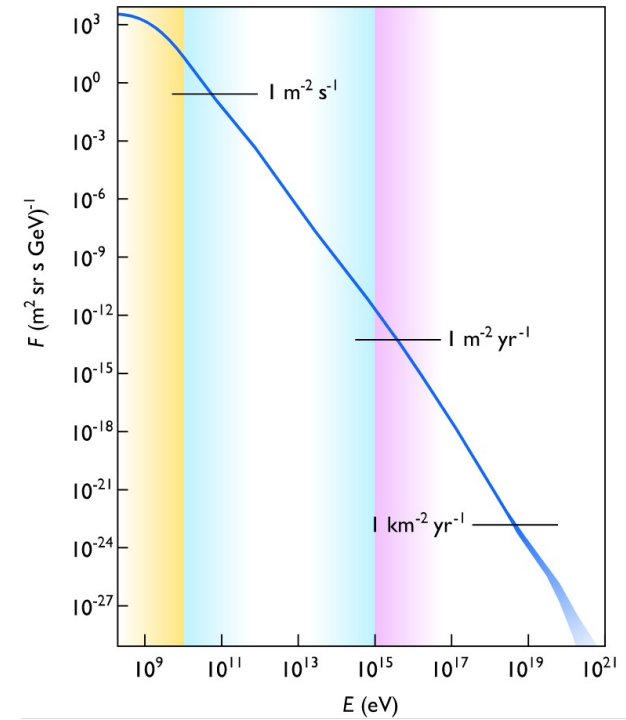
Pb

20.	19,95/19,96/19,94/19,97/19,97/19,96/19,96/19,95/19,94/19,93
17.	16,92/16,90/16,91/16,92/16,92/16,91/16,90/16,90/16,90/16,92
15.	14,82/14,85/14,84/14,85/14,84/14,85/14,86/14,84/14,82/14,83
12.	11,88/11,90/11,91/11,89/11,89/11,89/11,90/11,91/11,89/11,89
10.	9,98/ 9,97/ 9,99/ 9,98/ 9,98/ 9,97/ 9,96/ 9,98/ 9,97/ 9,98
7.	6,96/ 6,95/ 6,94/ 6,95/ 6,96/ 6,96/ 6,95/ 6,94/ 6,95/ 6,95
5.	5,05/ 5,04/ 5,05/ 5,04/ 5,01/ 5,03/ 5,04/ 5,04/ 5,04/ 5,03
3.	2,93/ 2,94/ 2,96/ 2,94/ 2,94/ 2,93/ 2,93/ 2,94/ 2,95/ 2,94
2.	1,85/ 1,85/ 1,83/ 1,84/ 1,84/ 1,84/ 1,84/ 1,85/ 1,86/ 1,85

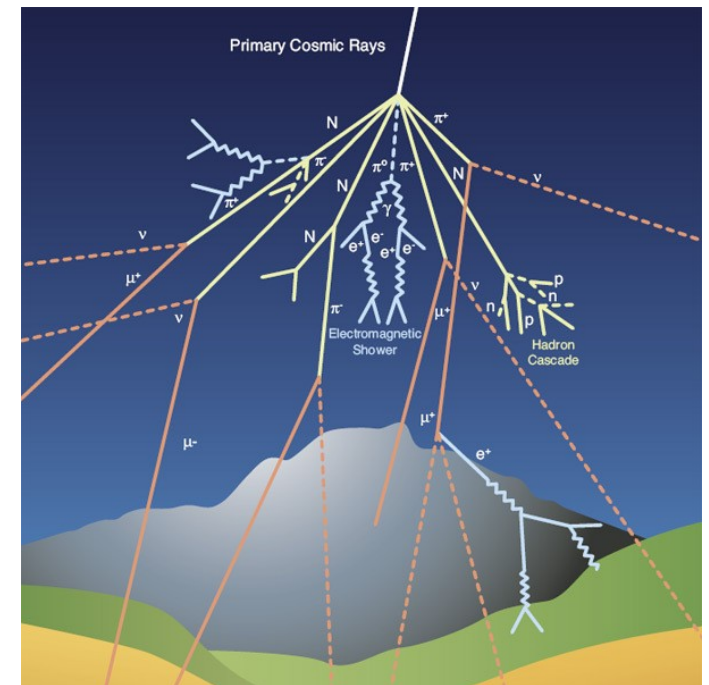
Rozkład energii cząstek promieniowania kosmicznego (głównie protony i jądra atomowe docierające do atmosfery Ziemi; mogą w niej produkować „air showers”)



Bluemer, Engel, Hoerandel, Prog. Part. Nucl. Phys. 63, 293, 2009 [arXiv:0904.0725]



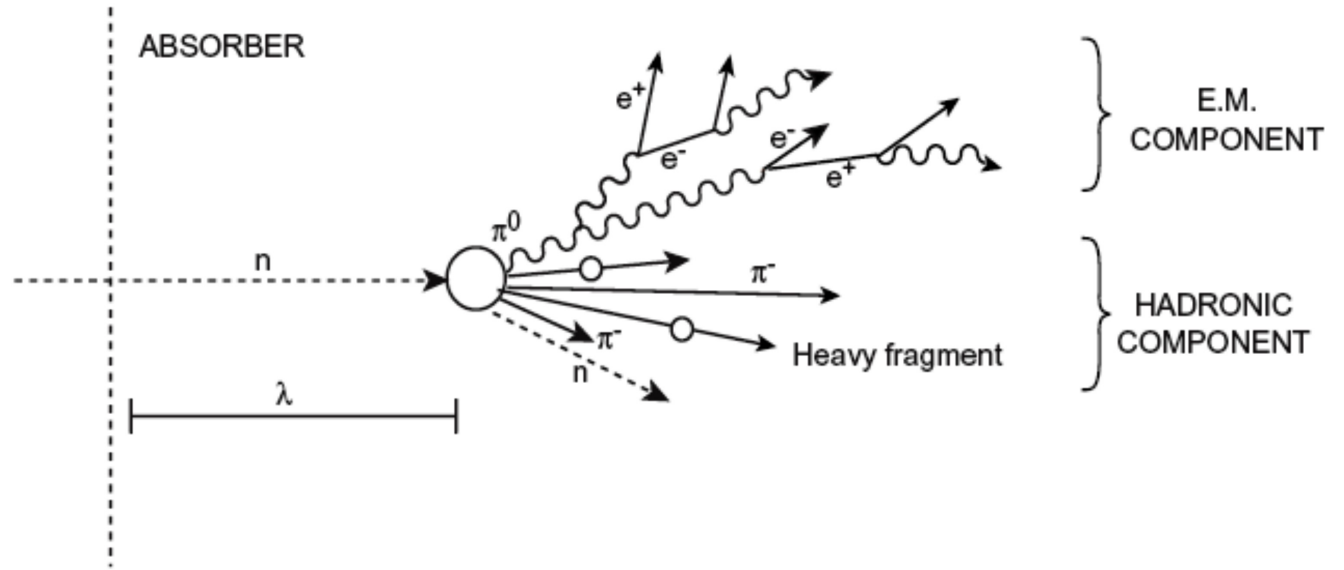
https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray



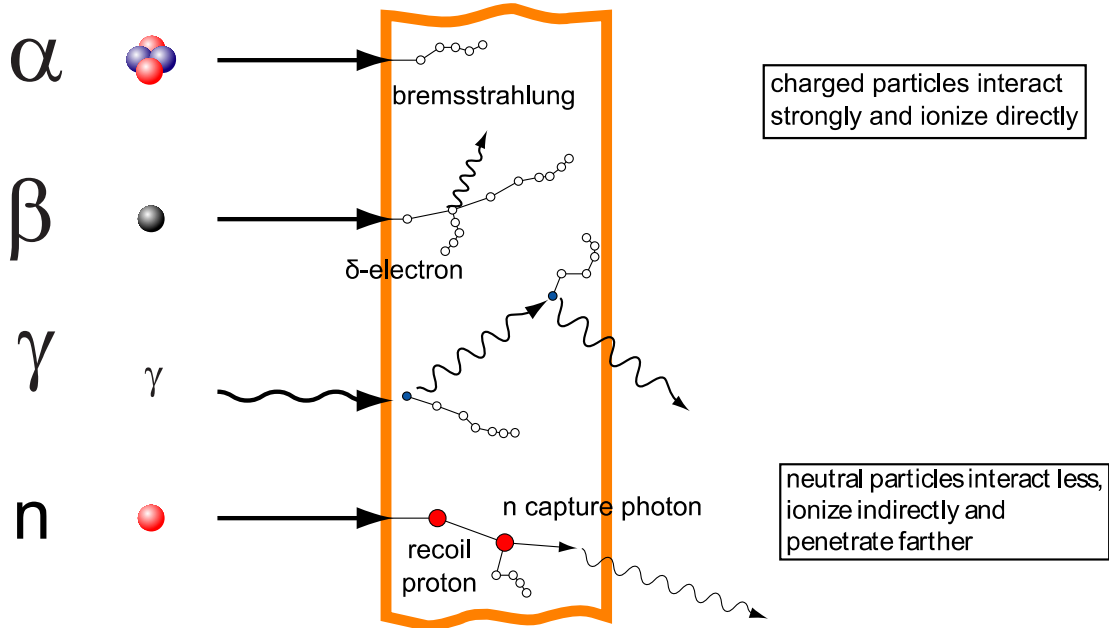
<https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>

Kaskada hadronowa →

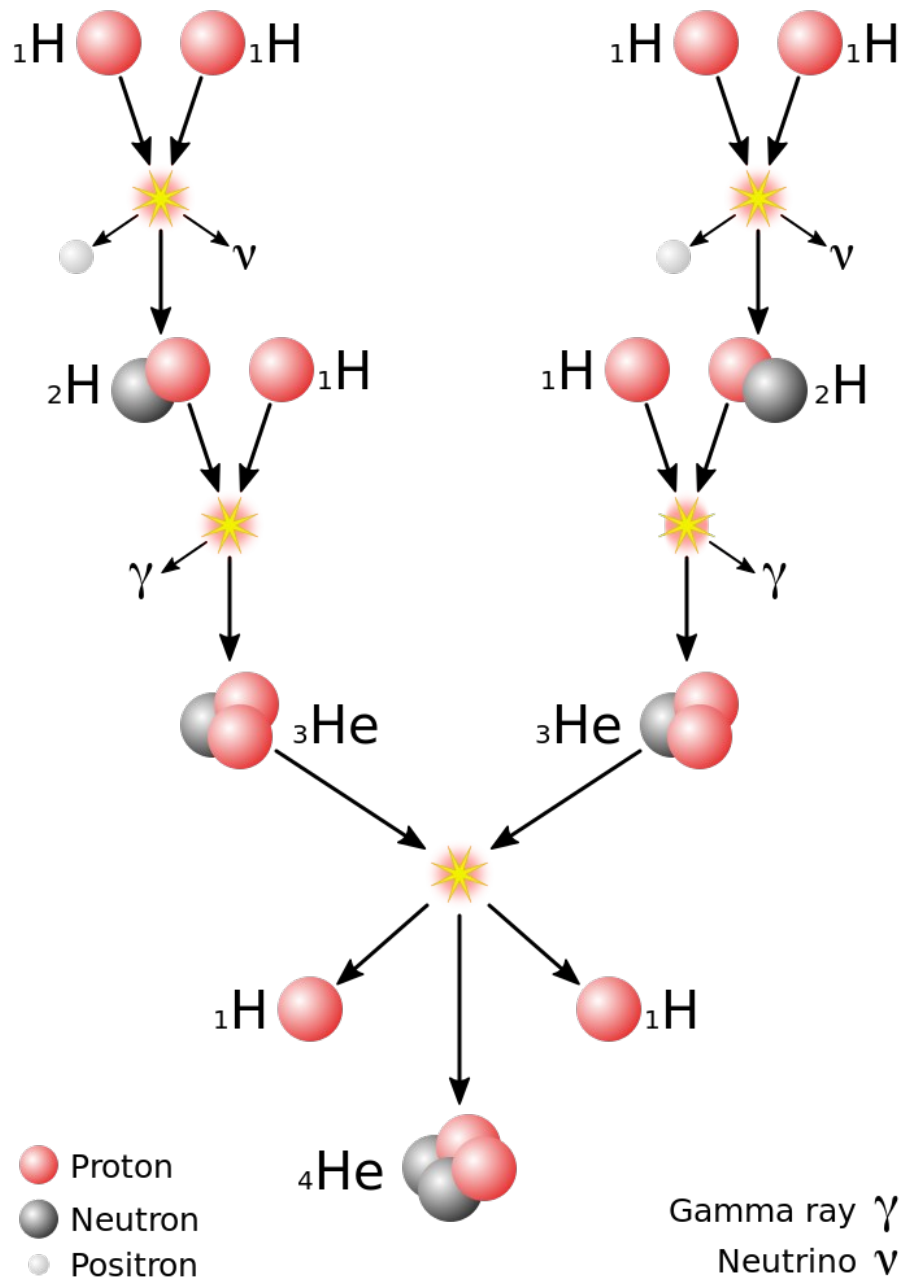
<https://indico.cern.ch/event/632138/attachments/1487098/2309902/CERNsummerStudents2017-Wingerter-5.pdf>



Interaction of ionizing radiation with matter



https://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation



Po co nam przemiana β

→ Cykl protonowy (cykl proton-proton, łańcuch pp, cykl Bethego)

Źródło energii ze Słońca

https://pl.wikipedia.org/wiki/Cykl_protonowy