

Katarzyna Grebieszko

Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

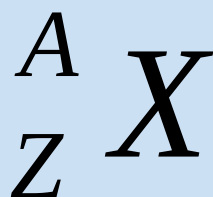
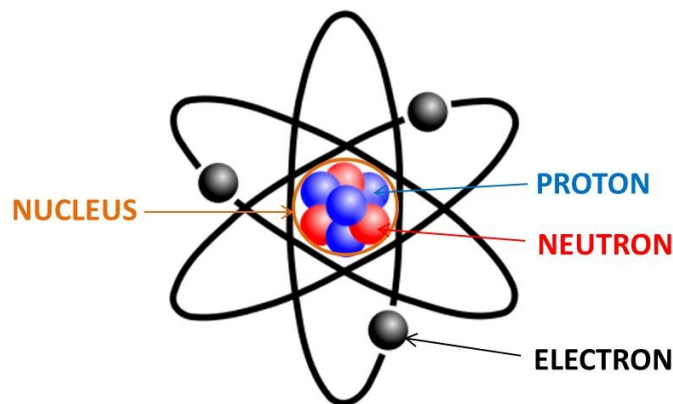
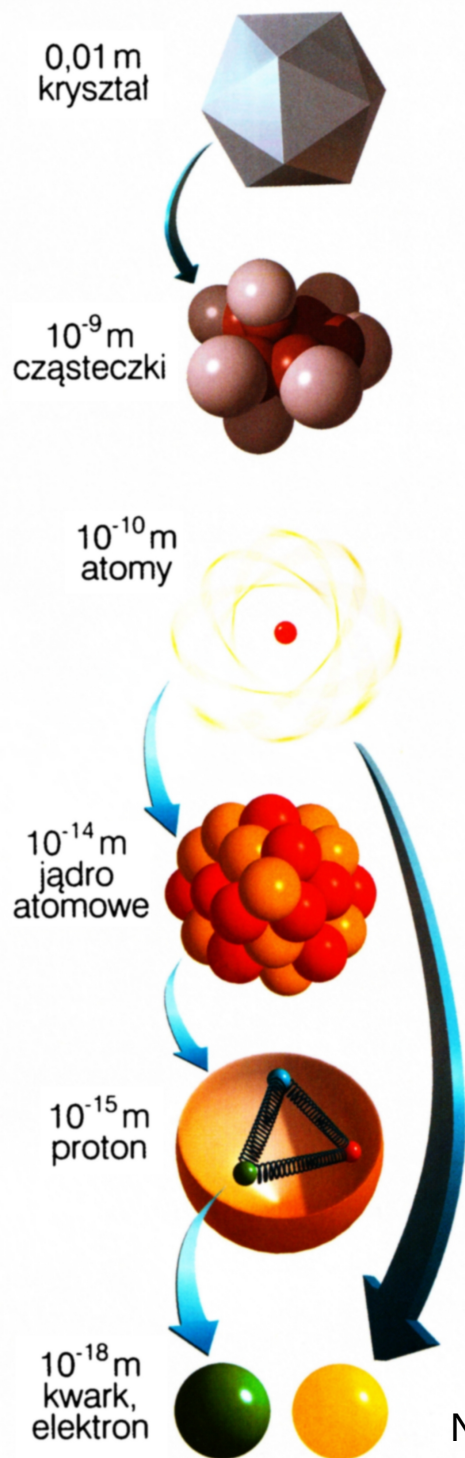
Ćwiczenie 41
Wyznaczanie energii promieniowania
gamma metodą scyntylacyjną

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

Fermiony			Bozony			
Kwarki	2.3 MeV/c² ²/₃ u ¹/₂ górny	1.27 GeV/c² ²/₃ c ¹/₂ powabny	173.5 GeV/c² ²/₃ t ¹/₂ szczytowy	Bozony cechowania	0 γ 1 foton	91.2 GeV/c² 0 Z⁰ 1 bozon Z
	4.8 MeV/c² ⁻¹/₃ d ¹/₂ dolny	95 MeV/c² ⁻¹/₃ s ¹/₂ dziwny	4.2 GeV/c² ⁻¹/₃ b ¹/₂ spodni		0 g 0 1 gluon	80.4 GeV/c² ^{±1} W[±] 1 bozon W
	0.511 MeV/c² ⁻¹ e ¹/₂ elektron	105.7 MeV/c² ⁻¹ μ ¹/₂ mion	1.777 GeV/c² ⁻¹ τ ¹/₂ taon		?126 GeV/c² 0 H⁰ 0 bozon Higgsa	
Leptony	<2.2 eV/c² 0 ν_e ¹/₂ neutrino elektronowe	<170 keV/c² 0 ν_μ ¹/₂ neutrino mionowe	<15.5 MeV/c² 0 ν_τ ¹/₂ neutrino taonowe			
	I	II	III			
	Masa Ładunek Spin					

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 keV = 10³ eV

1 MeV = 10⁶ eV

1 GeV = 10⁹ eV

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

Hadrony

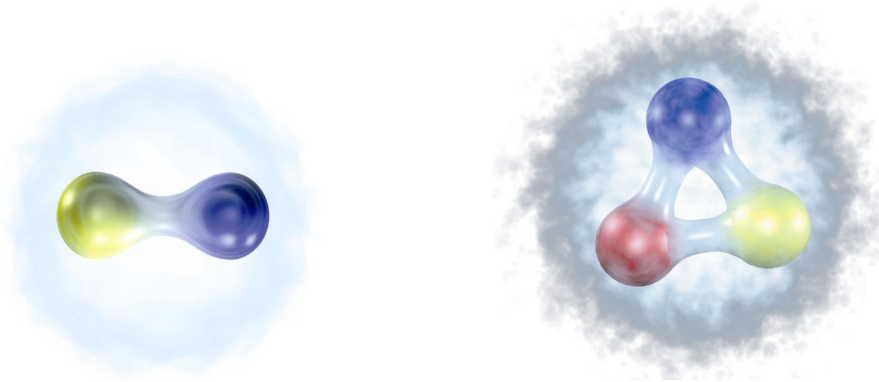
(cząstki oddziałujące silnie)

– 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

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 ($+2e$)
- **Cząstki beta** (β^- , β^+) – elektrony ($-1e$) lub pozytony ($+1e$)
- **Elektrony** (e^-) ($-1e$)
- **Protony** ($+1e$), **jądra atomowe** ($+xe$)
- **Fotony** (promieniowanie rentgenowskie X oraz promieniowanie γ : $E_\gamma > 50 \text{ keV}$) ($0e$);
Promieniowanie elektromagnetyczne o energiach fotonów większych od energii fotonów światła widzialnego uznaje się za jonizujące
- **Neutrony** ($0e$)

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 → 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

Izotopy promieniotwórcze jako źródła kwantów γ

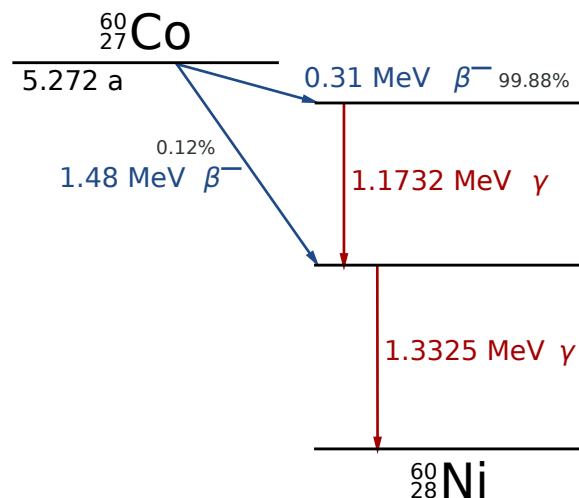
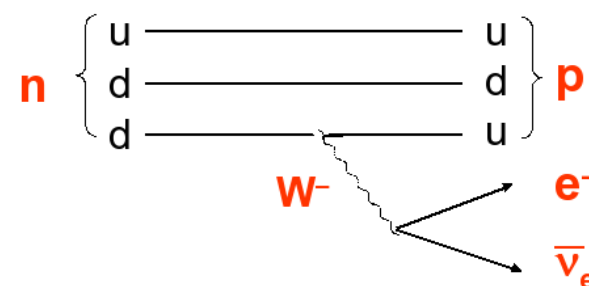
Kwenty γ powstają w czasie jądrowych rozpadów różnych izotopów promieniotwórczych np. rad (^{226}Ra), iryd (^{192}Ir), kobalt (^{60}Co), cez (^{137}Cs)

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**)

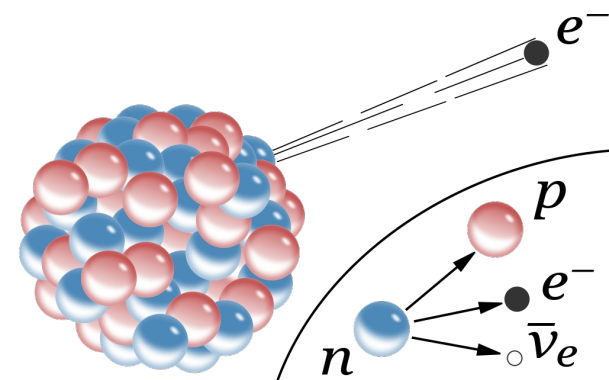
Powstające jądro atomowe (Y) jest w stanie wzbudzenia i ta energia wzbudzenia jest wypromieniowywana w postaci kwantów γ o ściśle określonych energiach (zgodnie z tzw. modelem powłokowym jądra atomowego)



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

Rys. z https://sciencewise.info/resource/Gamma-ray_generation/Gamma-ray_generation_by_Wikipedia

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



Źródła promieniotwórcze w ćw. 41

Do kalibracji:

E_γ towarzyszące rozpadowi cezu

(z jądra Ba) – **0.6617 MeV**

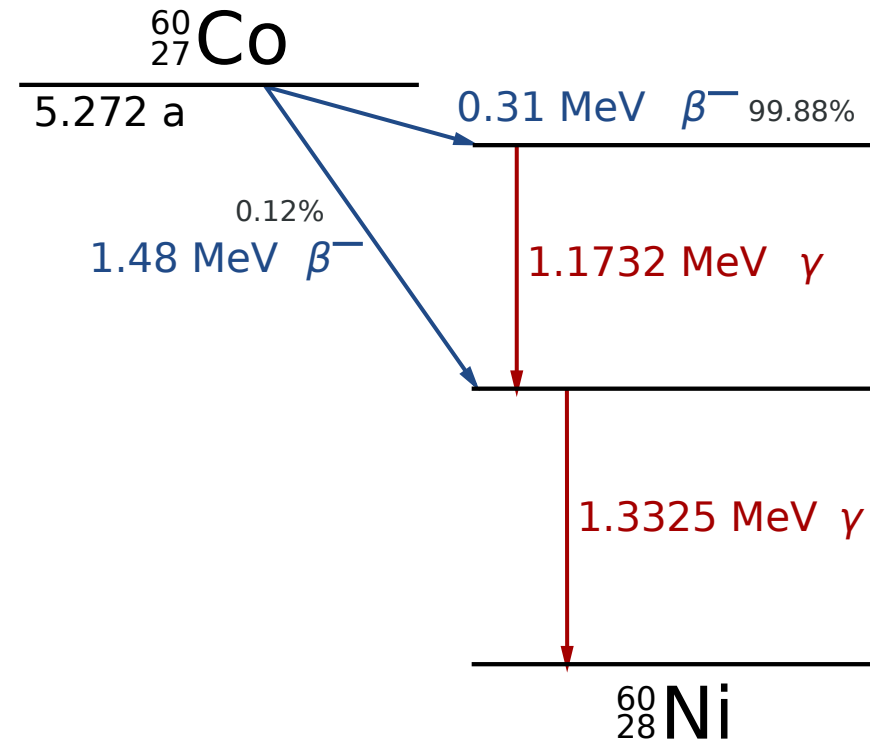
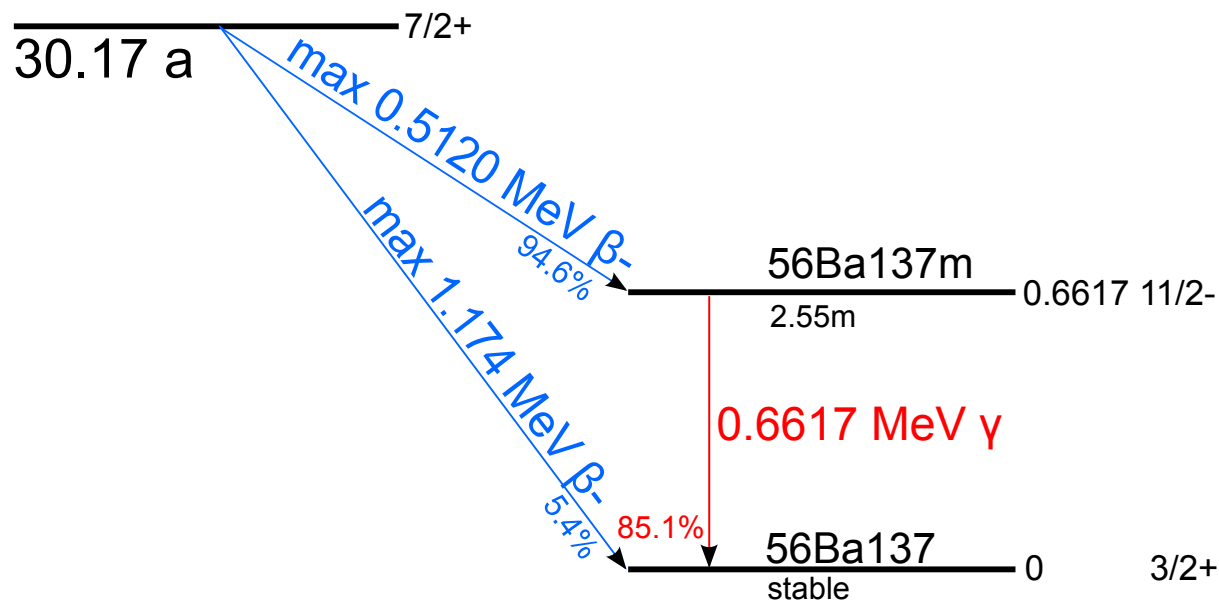
E_γ towarzyszące rozpadowi

kobaltu (z jądra Ni) – **1.1732 MeV**

oraz **1.3325 MeV**

(uwaga: proszę używać w obliczeniach ww. wartości)

^{137}Cs



Rys. z https://sciencewise.info/resource/Gamma-ray_generation/Gamma-ray_generation_by_Wikipedia

Źródła promieniotwórcze w ćw. 41

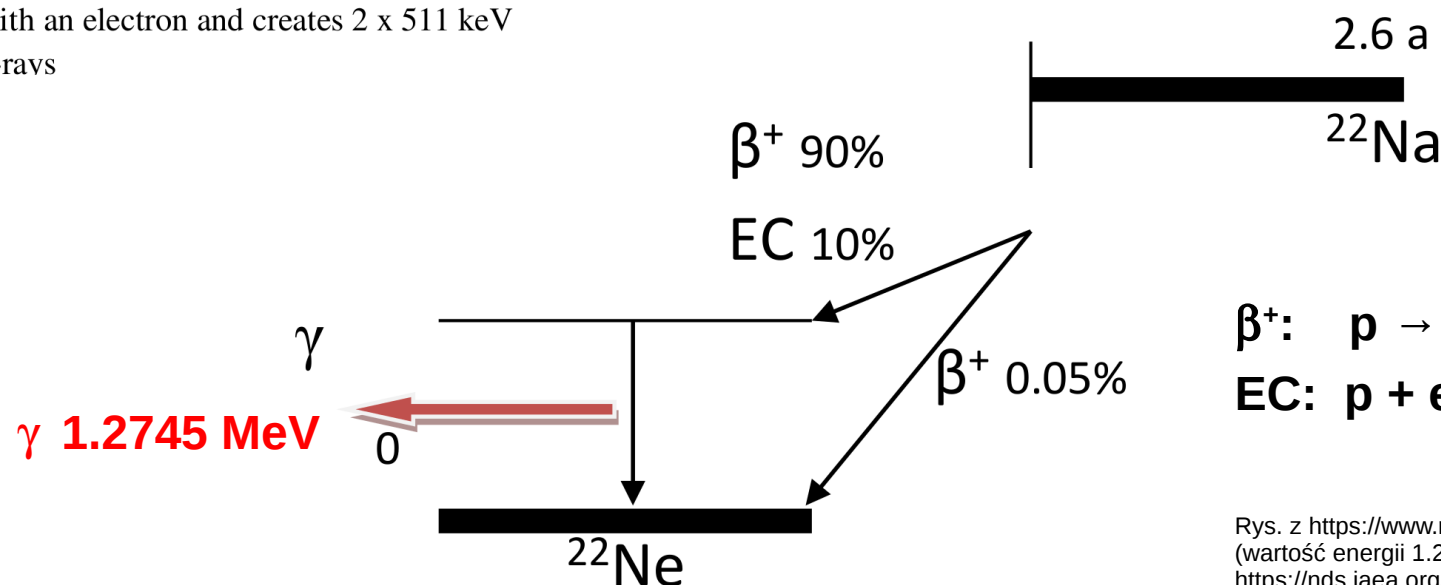
„Nieznany” izotop:

E_γ towarzyszące rozpadowi sodu (z jądra Ne) – **1.2745 MeV**

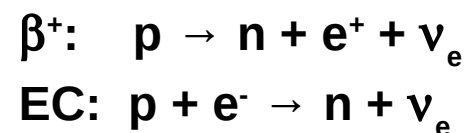
E_γ pochodzące z anihilacji (e^+e^-) – **0.511 MeV**

(uwaga: proszę używać w obliczeniach ww. wartości)

The positron (β^+ particle) then annihilates with an electron and creates 2 x 511 keV γ -rays



Produkcja
antymaterii
w sali B CLF

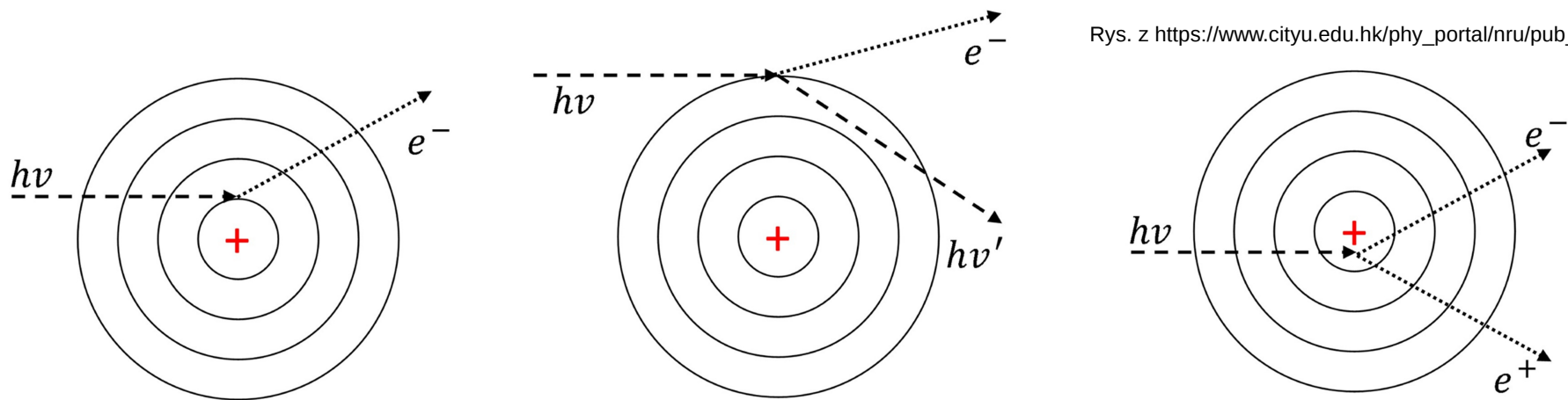


Rys. z <https://www.researchgate.net/publication/336135456>
(wartość energii 1.2745, dokładnie 1.274537, wzięta z <https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>)

EC (*electron capture*) to tzw. wychwyt elektronu (odwrotna przemiana β) czyli reakcja w której elektron z atomu jest przechwytywany przez proton z jądra atomowego, w wyniku czego powstaje neutron (pozostaje w jądrze) i neutrino elektronowe ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$)

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; $E_\gamma \geq 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$) $\gamma + \text{jądro} \rightarrow \text{jądro}' + e^+e^-$

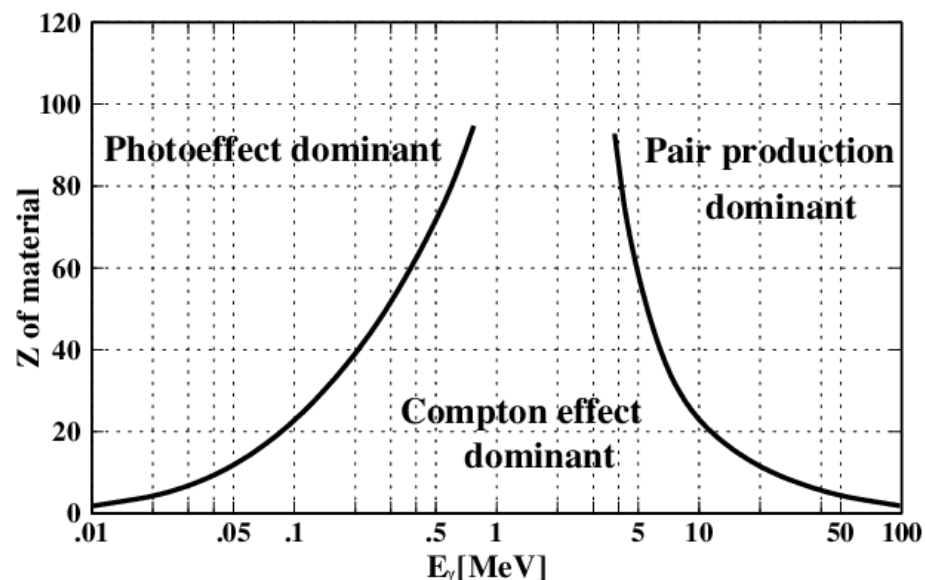
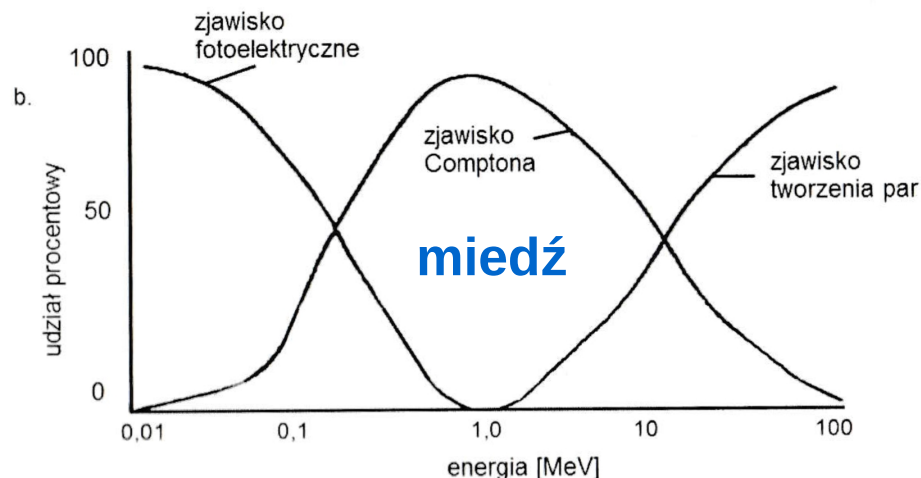
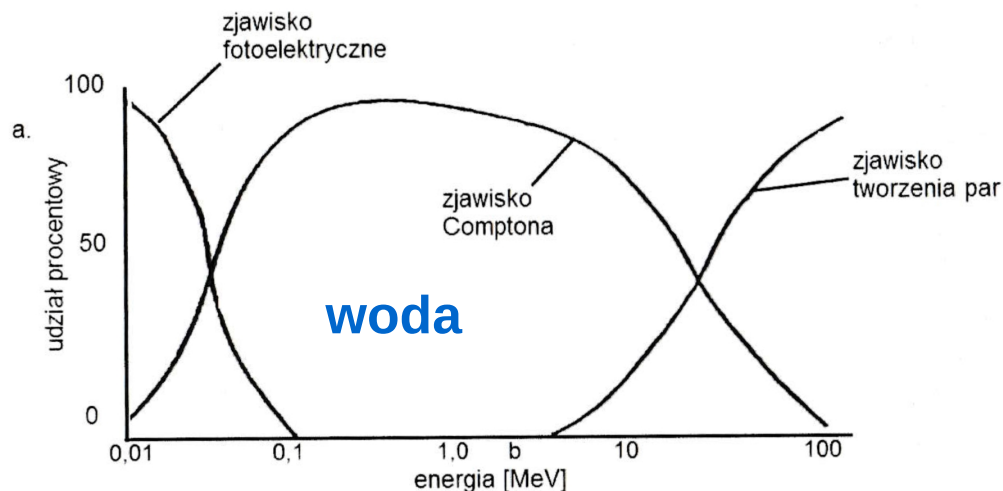


Rys. z https://www.cityu.edu.hk/phy_portal/nru/pub_j329.pdf

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



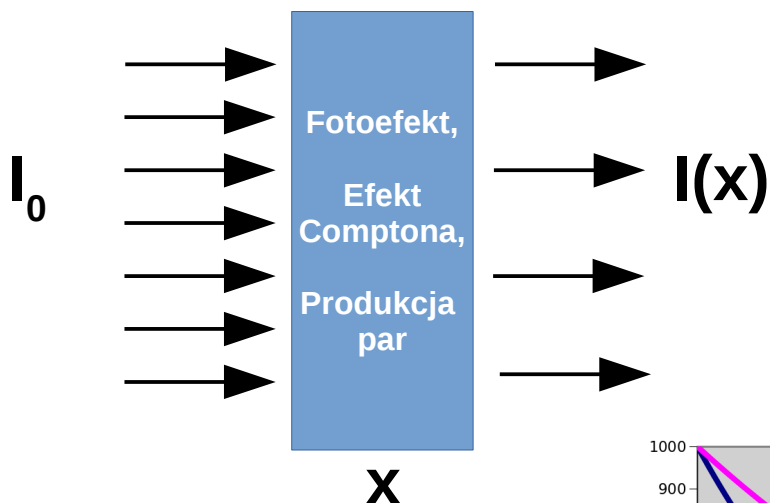
Rys. z https://www.researchgate.net/figure/Areas-where-the-photoeffect-Compton-effect-and-pair-production-gamma-ray-interaction_fig1_266453326

**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

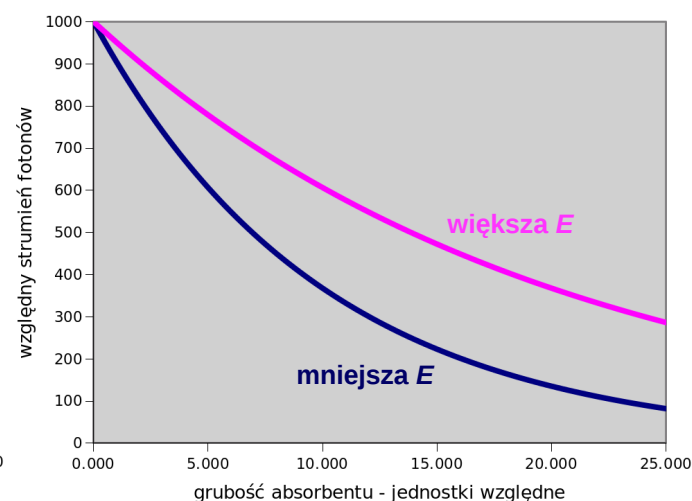
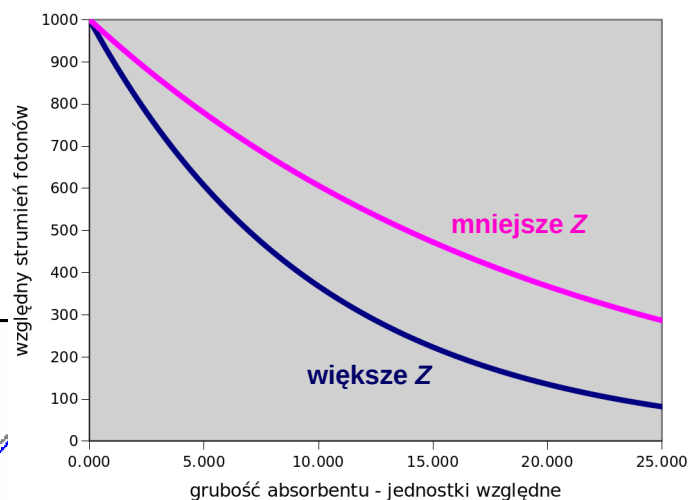
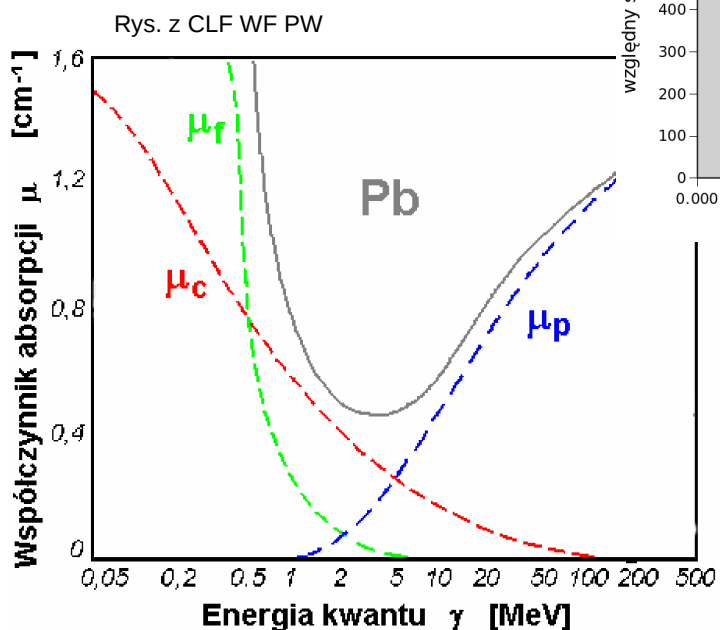


$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$ – natężenie wiązki po przejściu absorbentu o grubości x

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

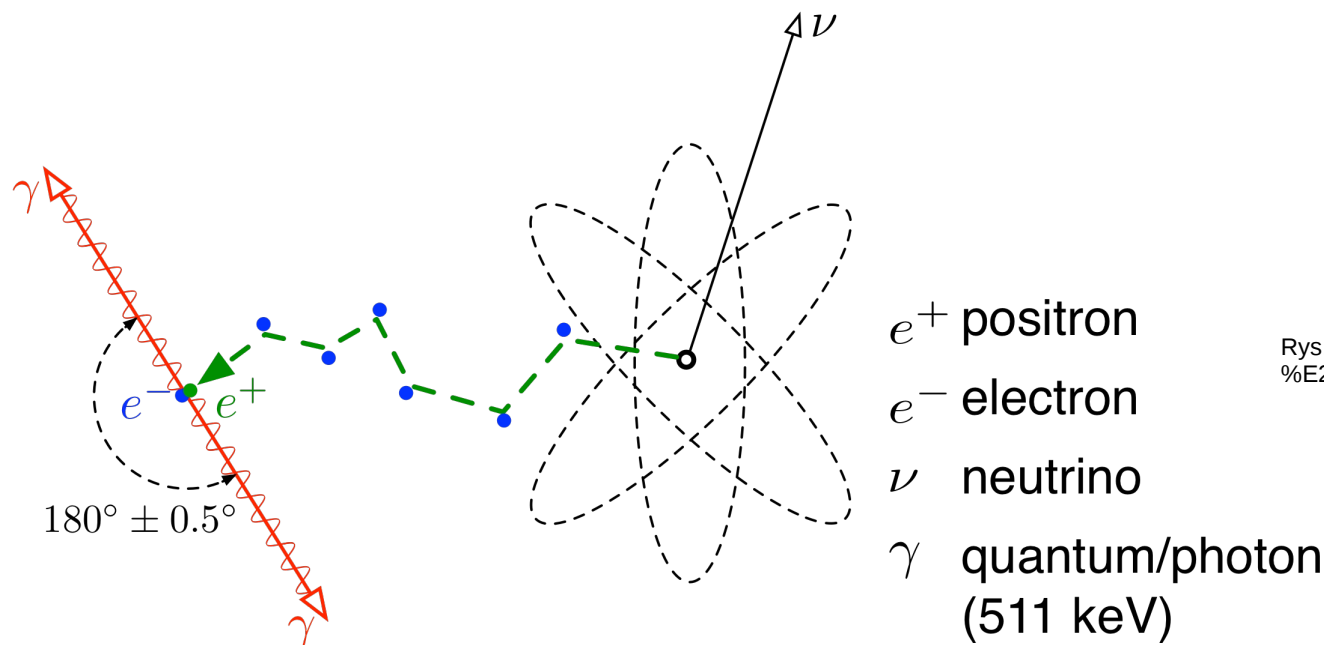
Dla zainteresowanych: masowy współczynnik osłabienia (μ/ρ , gdzie ρ jest gęstością materiału) eliminuje zależność od gęstości ośrodka

Anihilacja antymaterii (e^+) z materią (e^-)

Dla niskich energii (rys. poniżej):

e^+ (cząstka β^+) + e^- (których dużo dookoła np. w osłonie źródła) $\rightarrow 2 \gamma$

Dla wysokich energii – można produkować nawet bardzo ciężkie cząstki np. bozon pośredniczący Z^0 : $e^+ e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow$ np. lepton $^+$ lepton $^-$



Rys. z https://en.wikipedia.org/wiki/Electron%E2%80%93positron_annihilation

Antymateria jest również wokół nas. Co więcej sami jesteśmy źródłem antymaterii, banany też $\rightarrow$ potas (^{40}K) ulegający przemianom β^+

antymaterię (e^+)



WIKIPEDIA
The Free Encyclopedia

- [Main page](#)
- [Contents](#)
- [Current events](#)
- [Random article](#)
- [About Wikipedia](#)
- [Contact us](#)
- [Donate](#)

Contribute

[Help](#)

[Learn to edit](#)

Community portal

Recent changes

[Upload file](#)

Tools

What links here

Related changes

[Special pages](#)

Permanent link

Page information

[Cite this page](#)

Wikidata item

[Print/export](#)[Download as PDF](#)[Printable version](#)

Article

Talk

[Read](#) [Edit](#) [View history](#)

Search Wikipedia

Banana equivalent dose

From Wikipedia, the free encyclopedia

Banana equivalent dose (BED) is an informal measurement of [ionizing radiation](#) exposure, intended as a general educational example to compare a dose of radioactivity to the dose one is exposed to by eating one average-sized [banana](#). Bananas contain naturally occurring [radioactive isotopes](#), particularly [potassium-40](#) (⁴⁰K), one of several naturally-occurring [isotopes of potassium](#). One BED is often correlated to 10^{-7} [sievert](#) (0.1 μ Sv); however, in practice, this dose is not [cumulative](#), as the principal radioactive component is excreted to maintain [metabolic equilibrium](#).^[1] The BED is only meant to inform the public about the existence of very low levels of natural radioactivity within a natural food and is not a formally adopted dose measurement.

Contents [hide]

- 1 History
- 2 Usage
- 3 Dose calculation
 - 3.1 Source of radioactivity
 - 3.2 Criticism
- 4 Radiation from other household consumables
- 5 See also
- 6 Notes
- 7 References
- 8 External links

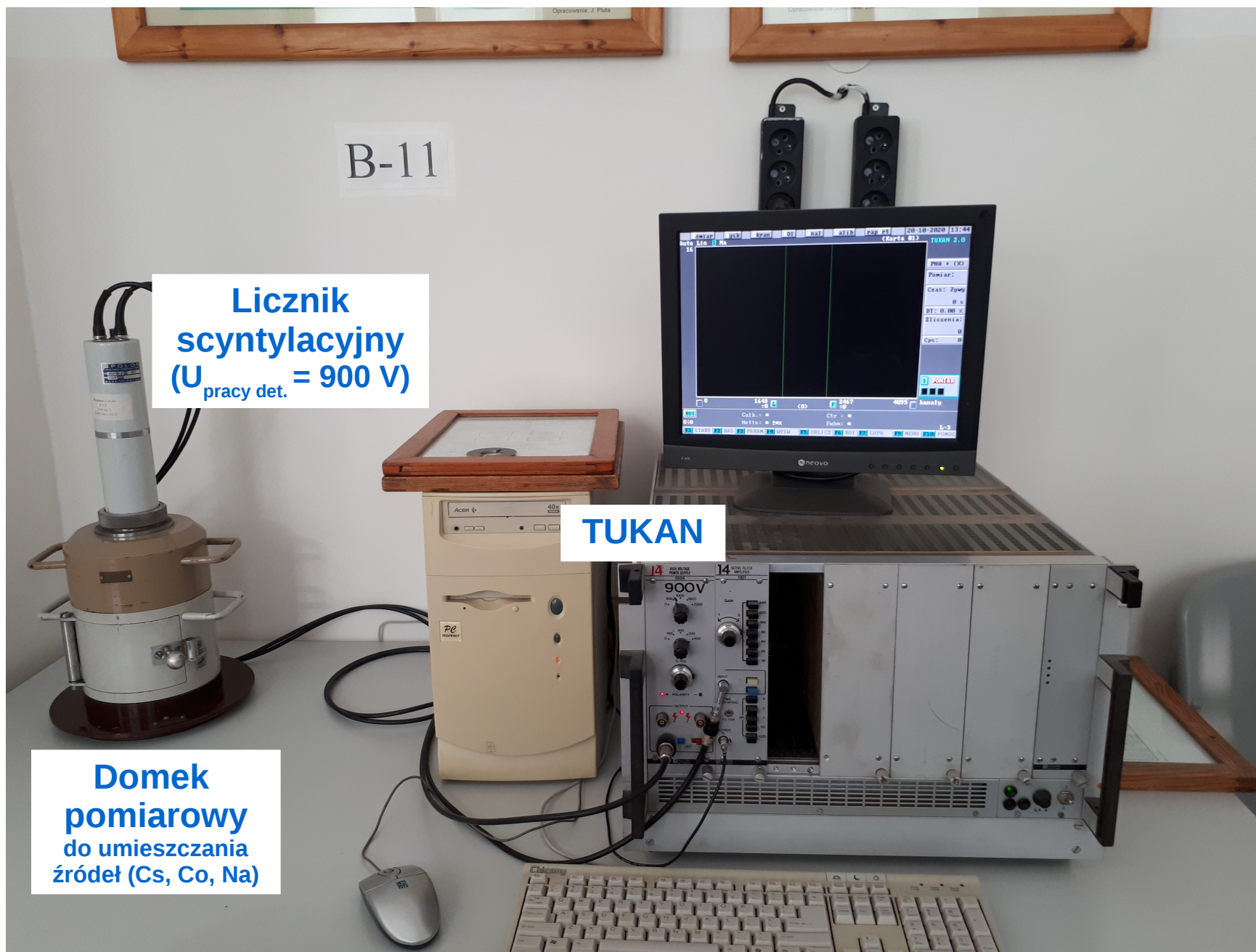
History [[edit](#)]

The origins of the concept are uncertain, but one early mention can be found on the [RadSafe](#) nuclear safety mailing list in 1995, where Gary Mansfield of the [Lawrence Livermore National Laboratory](#) mentions that he has found the "banana equivalent dose" to be "very useful in attempting to explain infinitesimal doses (and corresponding infinitesimal risks) to members of the public".^[2] A value of 9.82×10^{-8} [sieverts](#) or about 0.1 [microsieverts](#) (10 [µrem](#)) was suggested for a 150-gram (5.3 oz) banana.

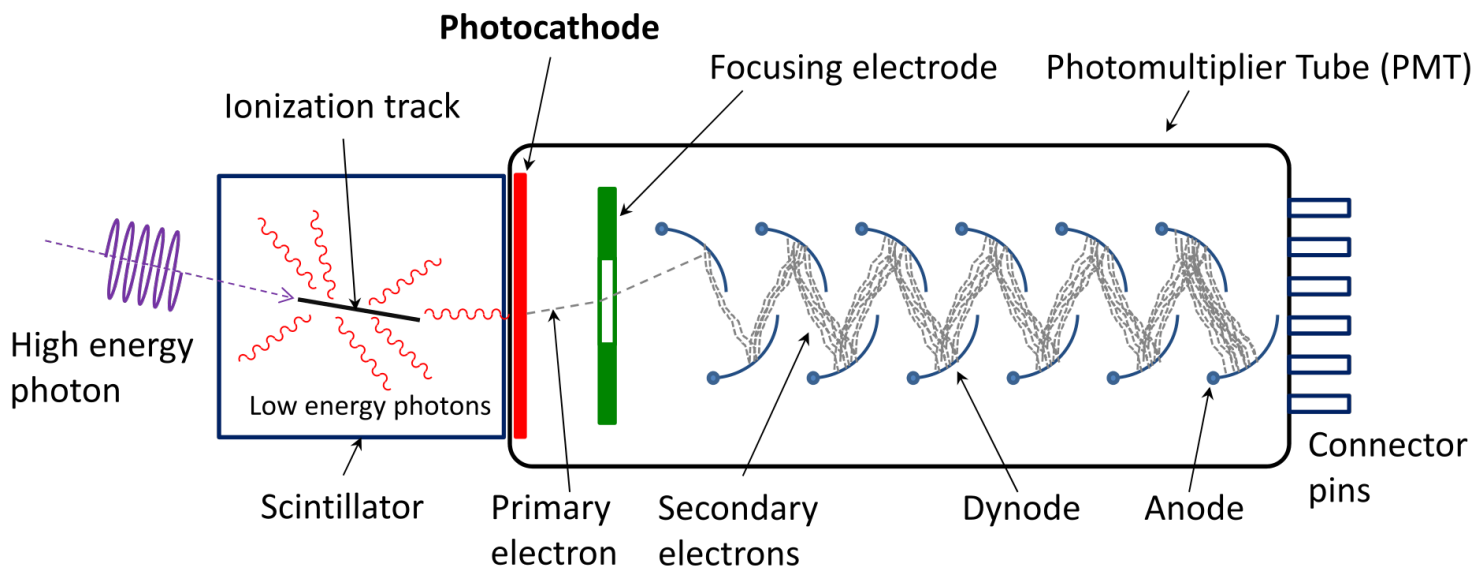


A banana contains naturally occurring radioactive material in the form of potassium-40.

Wygląd (głównego) stanowiska pracy



Detektor (licznik) scyntylacyjny

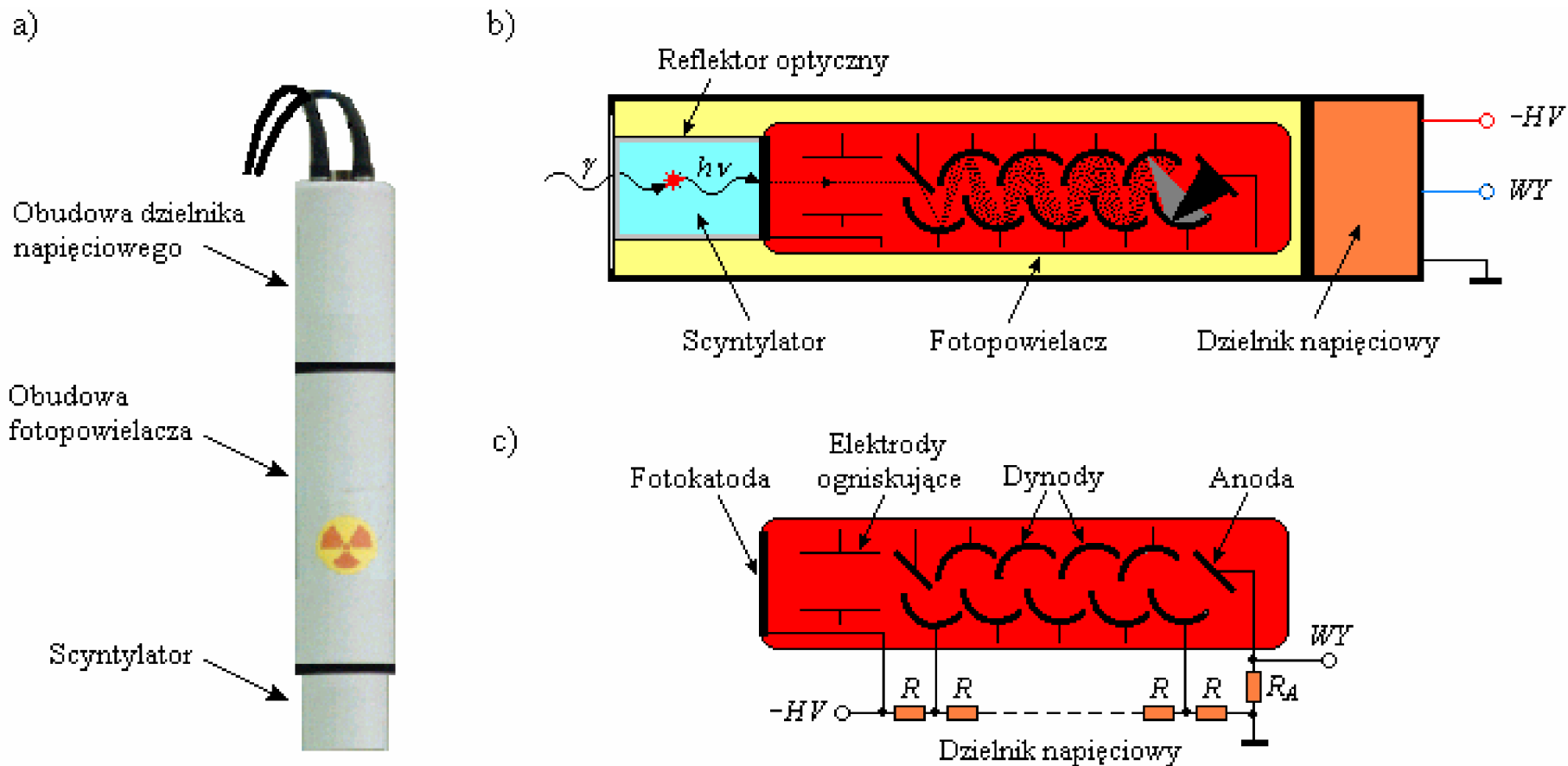


Rys. z
https://en.m.wikipedia.org/wiki/Scintillation_counter

W scyntylatorze (opis dla promieniowania jonizującego w postaci fotonów):

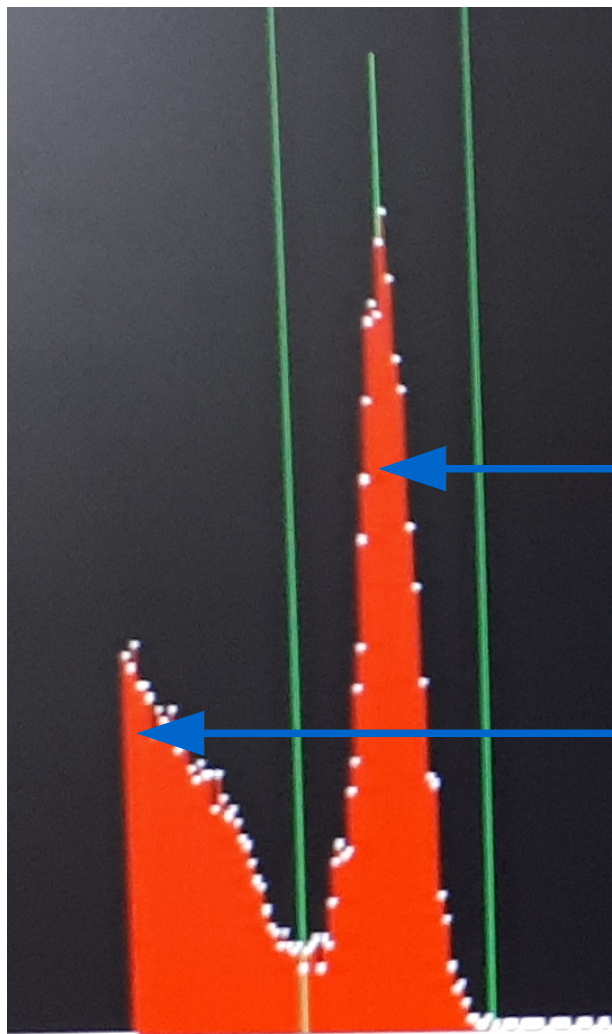
- Wysokoenergetyczny foton w wyniku zjawiska fotoelektrycznego, Comptona lub produkcji par produkuje elektrony i pozytony
- e^- i e^+ oddziałują z ośrodkiem (jonizacja oraz wzbudzenie atomów i cząsteczek) powodując (przy powrocie ze stanu wzbudzonego do podstawowego) uwolnienie niskoenergetycznych fotonów (w zakresie światła widzialnego lub ultrafioletu)
- Niskoenergetyczny foton uderza w fotokatodę, z której wybija elektron (tzw. fotoelektron), zwielokrotniany (przyłożone napięcie!) później w fotopowielaczu
- Energia (liczba) niskoenergetycznych fotonów jest proporcjonalna do energii cząstki jonizującej → w naszym przypadku elektronów i pozytonów powstałych po fotoefekcie, zjawisku Comptona i produkcji par → **nasz detektor tak naprawdę mierzy widmo energetyczne elektronów i pozytonów !**

Detektor (licznik) scyntylacyjny



Rys. 7. Licznik scyntylacyjny : a) widok sondy scyntylacyjnej, b) ilustracja zasady działania licznika, c) schemat funkcjonalny fotopowielacza

Widmo od monoenergetycznych kwantów γ w detektorze scyntylacyjnym



Próbka ^{137}Cs ($E_\gamma = 0.6617 \text{ MeV}$)

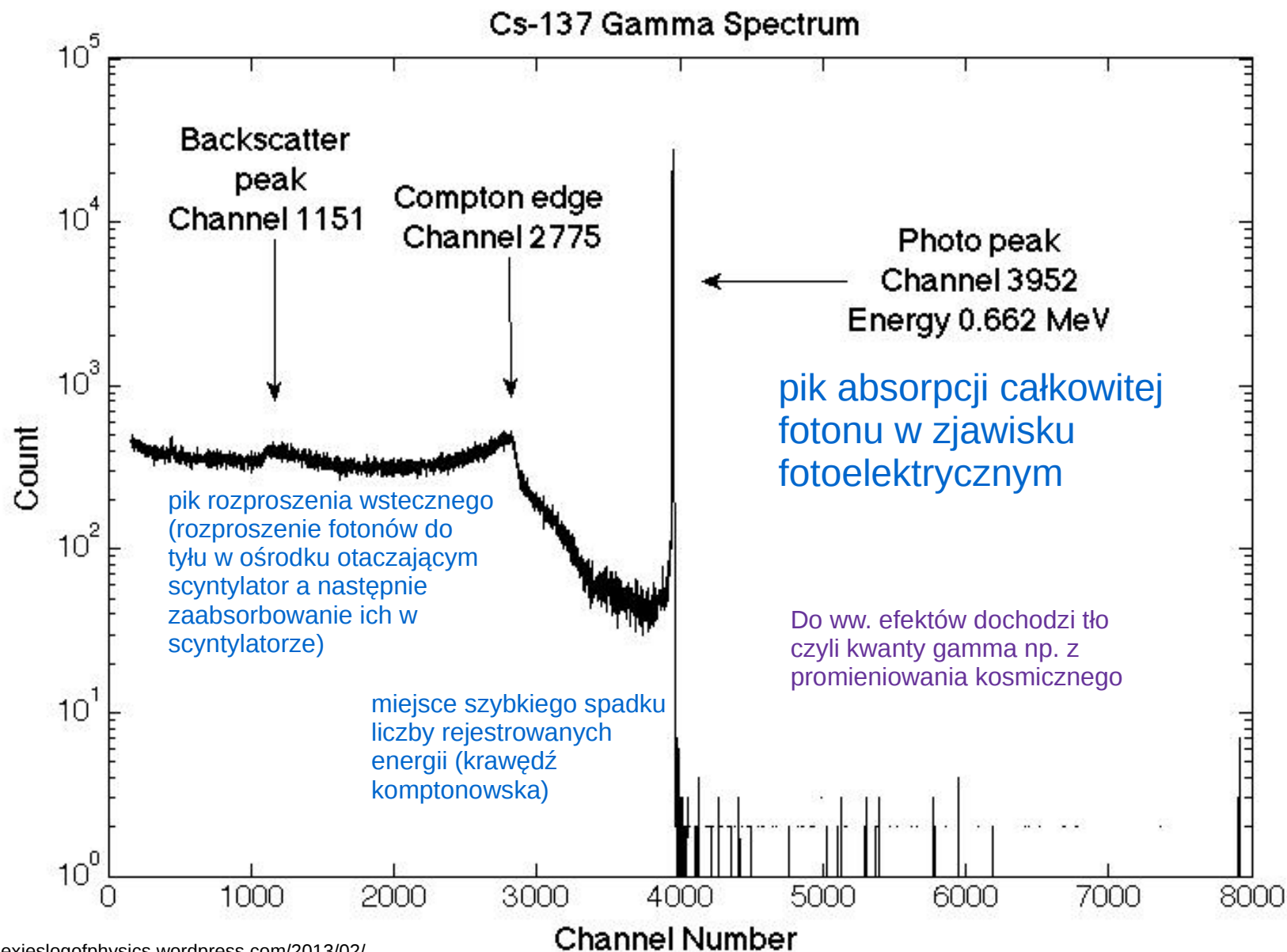
Mierzone przez detektor energie nie są energiami fotonów ale energiami elektronów powstałych na skutek (w tym przypadku) zjawiska Comptona i zjawiska fotoelektrycznego

Pik (prążek) całkowitej absorpcji – odpowiada sytuacji gdy kwant gamma swoją całkowitą energię przekazuje elektronowi (zjawisko fotoelektryczne). **Elektron ma wtedy energię praktycznie równą energii padającego kwantu gamma**

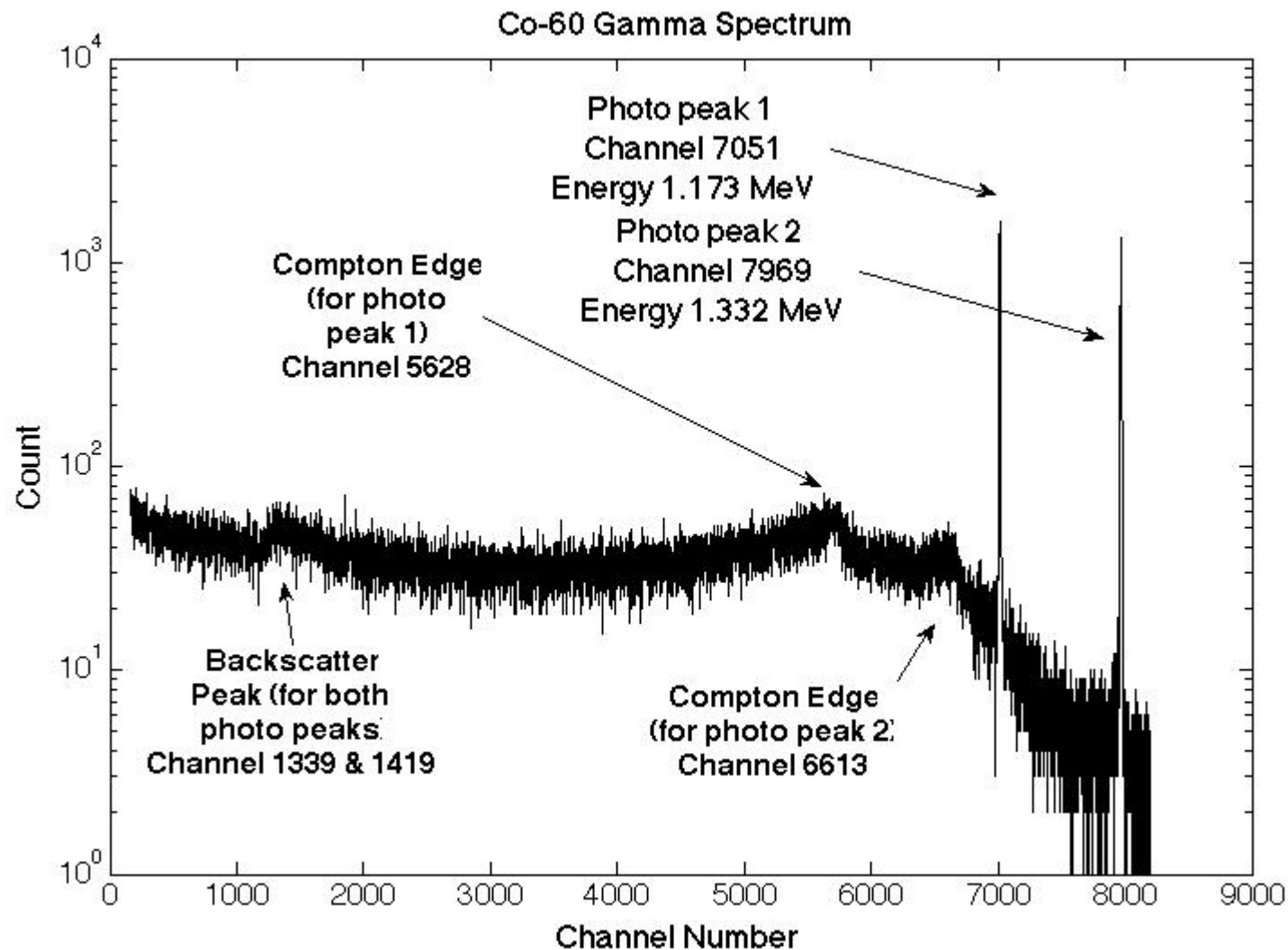
(Ucięte z lewej) spektrum energii elektronów pochodzących ze zjawiska Comptona. Komptonowska część widma to widmo ciągłe w zakresie energii od zera do maksymalnej energii elektronów komptonowskich (0.477 MeV dla izotopu ^{137}Cs)

$$E_{\text{max, e}} = 2E_\gamma^2 / (m_e + 2E_\gamma) = 0.477 \text{ MeV dla } E_\gamma = 0.6617 \text{ MeV}$$
$$m_e = 0.511 \text{ MeV}$$

Widmo od kwantów γ z ^{137}Cs w półprzewodnikowym detektorze germanowym

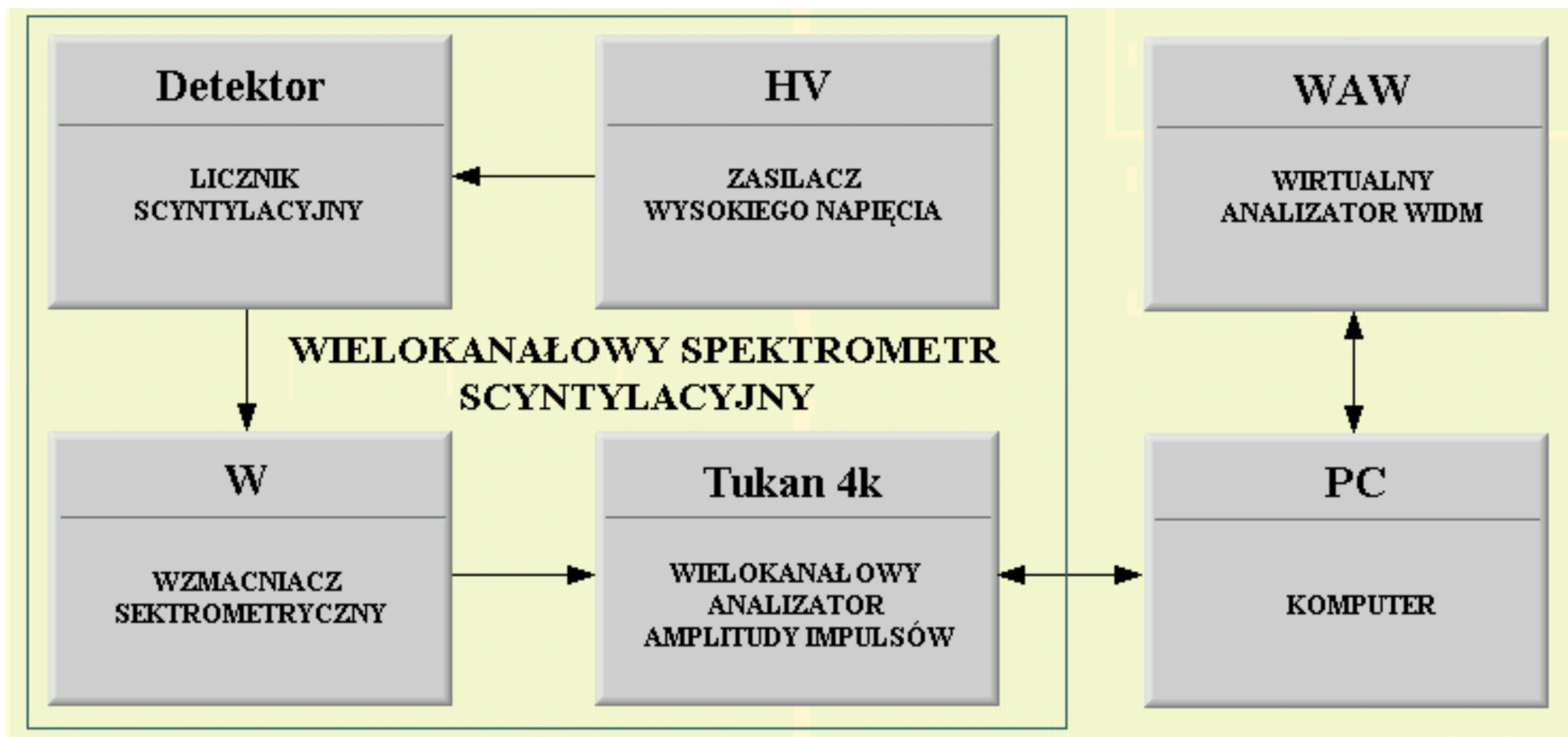


Widmo od kwantów γ z ^{60}Co w półprzewodnikowym detektorze germanowym



Schemat blokowy wielokanałowego spektrometru scyntylacyjnego

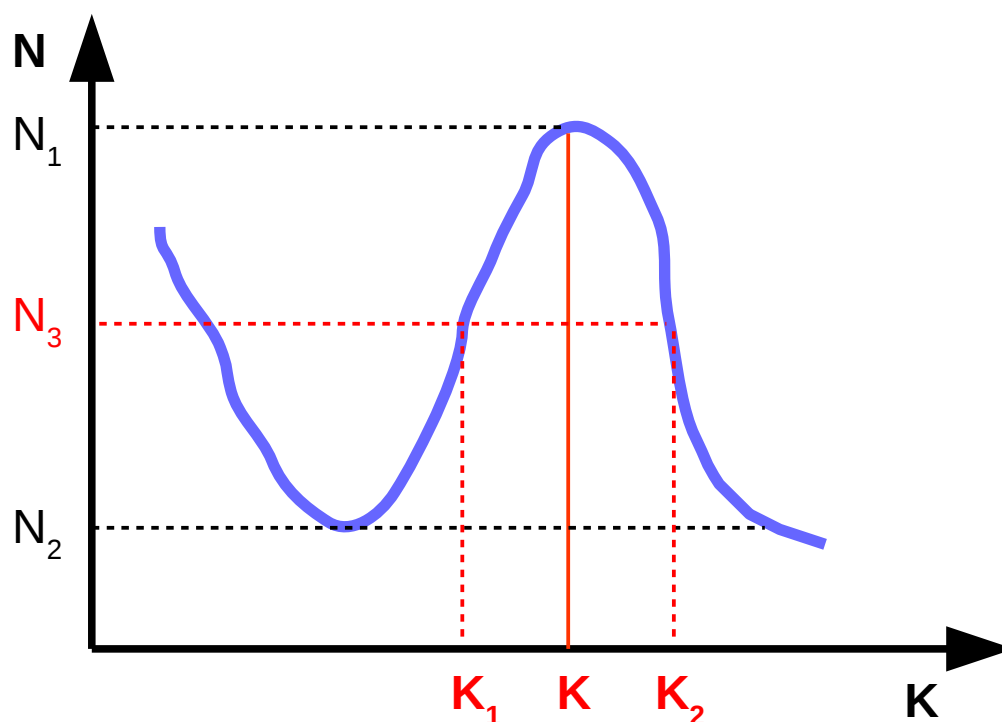
Rys. z CLF WF PW



Elementem analizatora TUKAN jest przetwornik analogowo-cyfrowy który zamienia napięcie impulsu na kod cyfrowy odpowiadający kanałowi pamięci. W rezultacie otrzymujemy widmo impulsów czyli ich liczbę w funkcji numeru kanału (→ liczbę w funkcji napięcia)

Przebieg pomiarów

- **Zebranie widma Cs** – czas oczekiwania na widmo to około 10 minut. Wyznaczenie położenia maksimum dla pików: K oraz FWHM (*Full Width at Half Maximum*)
- **Zebranie widma Co** – czas oczekiwania na widmo to około 20 minut. Wyznaczenie położenia (K) oraz szerokości (FWHM) dla dwóch pików w widmie Co
- **Zebranie widma Na** – czas oczekiwania na widmo to około 40 minut. Wyznaczenie położenia (K) oraz szerokości (FWHM) dla dwóch pików w widmie Na



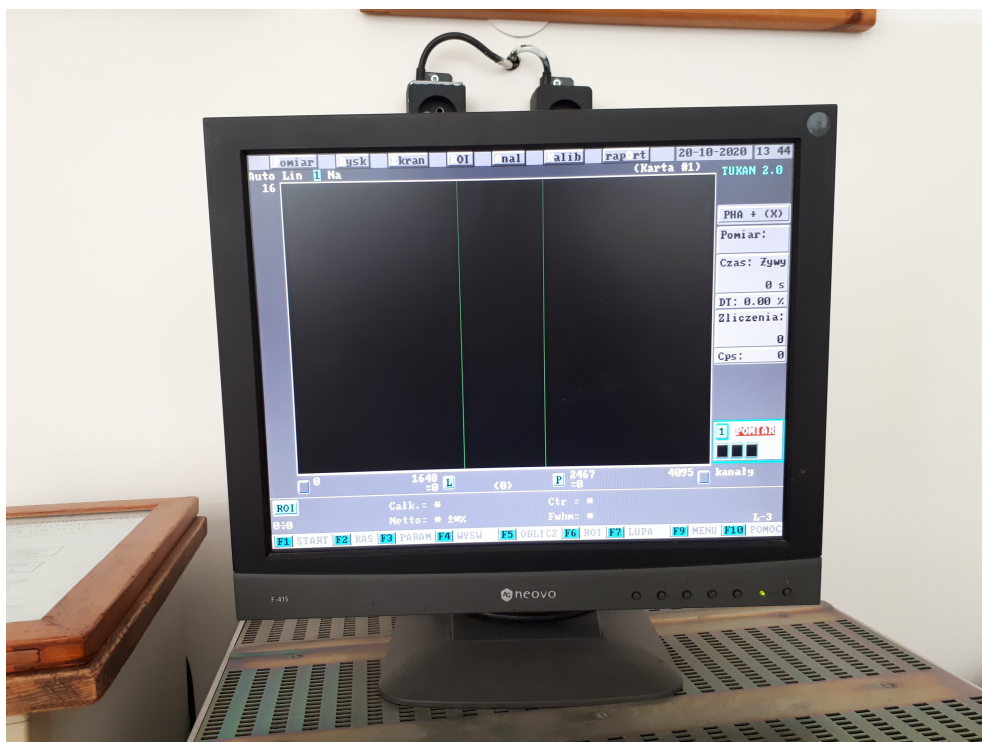
Dla każdego pików:

- Zaznaczamy i spisujemy jego K
- Znajdujemy N_1 i N_2
- Obliczamy $N_3 = (N_1 - N_2)/2 + N_2$
- Zaznaczamy linię na wysokości znalezionej N_3
- Po obu stronach pików zaznaczamy linie dla K_1 oraz K_2
- Obliczamy $FWHM = K_2 - K_1$
- Jako niepewność położenia K przyjmujemy $u_K = FWHM/2$

Program(y) do obsługi pomiarów

TUKAN
(obsługuje prowadzący)

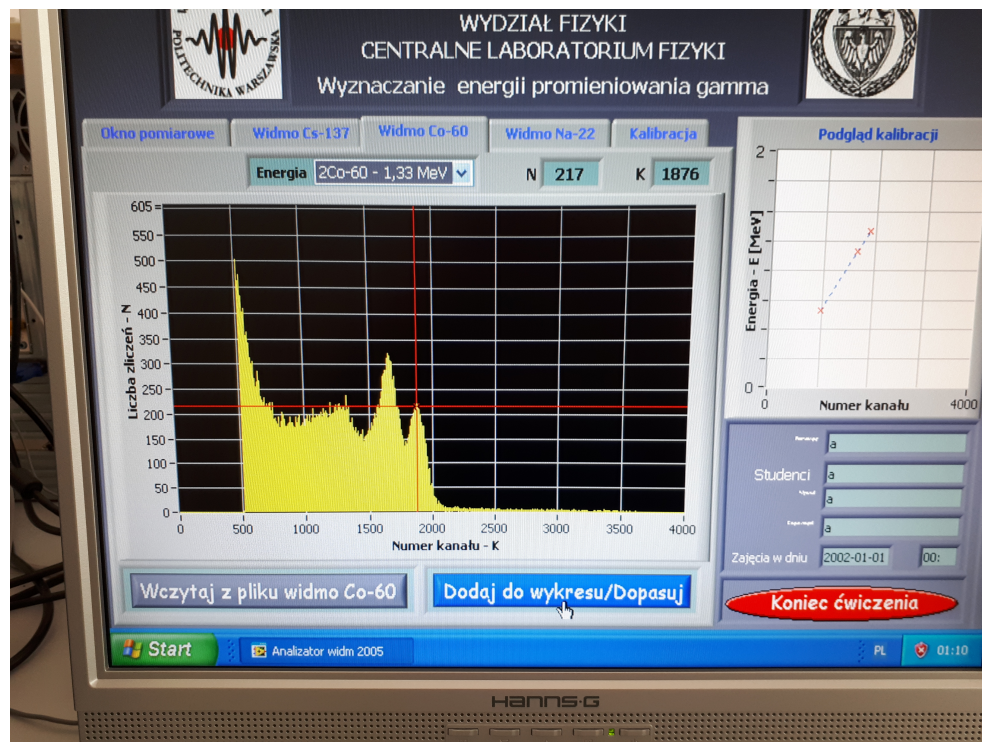
Przykład przed zebraniem widma



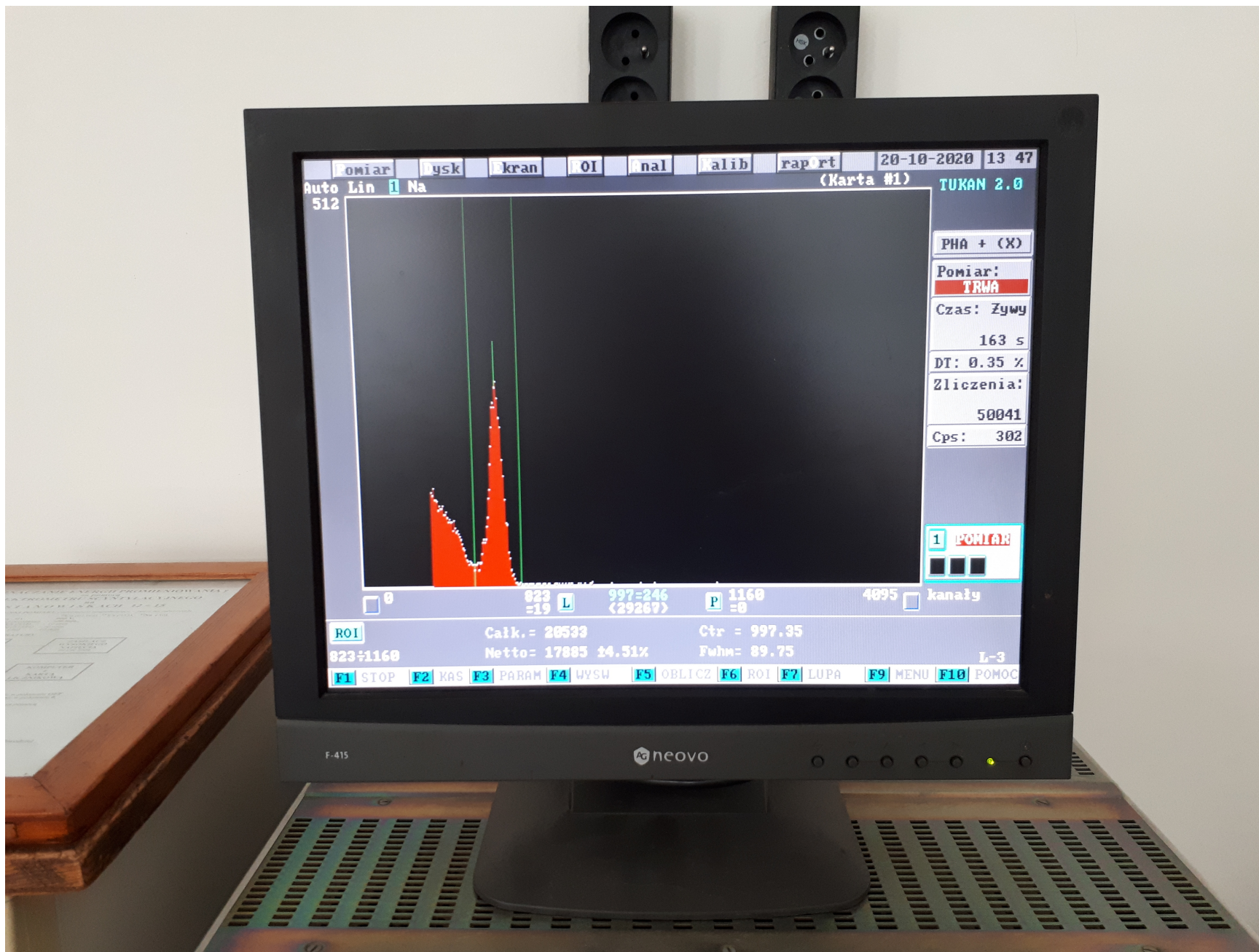
Tukan 2.0 – program obsługujący wielokanałowy analizator amplitudy impulsów Tukan 4k

Wirtualny Analizator Widm – WAW
(obsługują studenci)

Przykład dla widma ^{60}Co



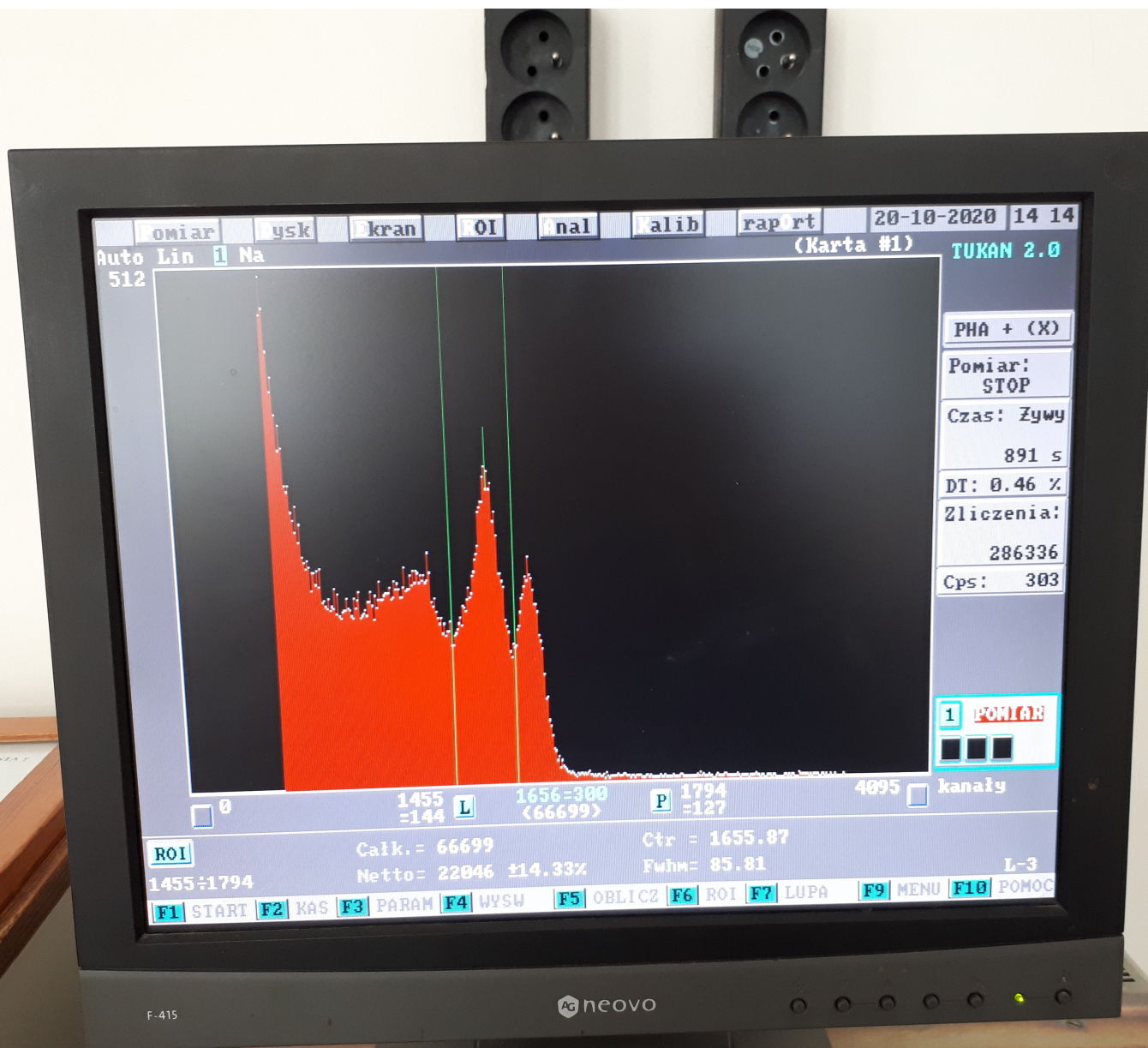
Przykładowe zebrane widmo Cs (TUKAN)



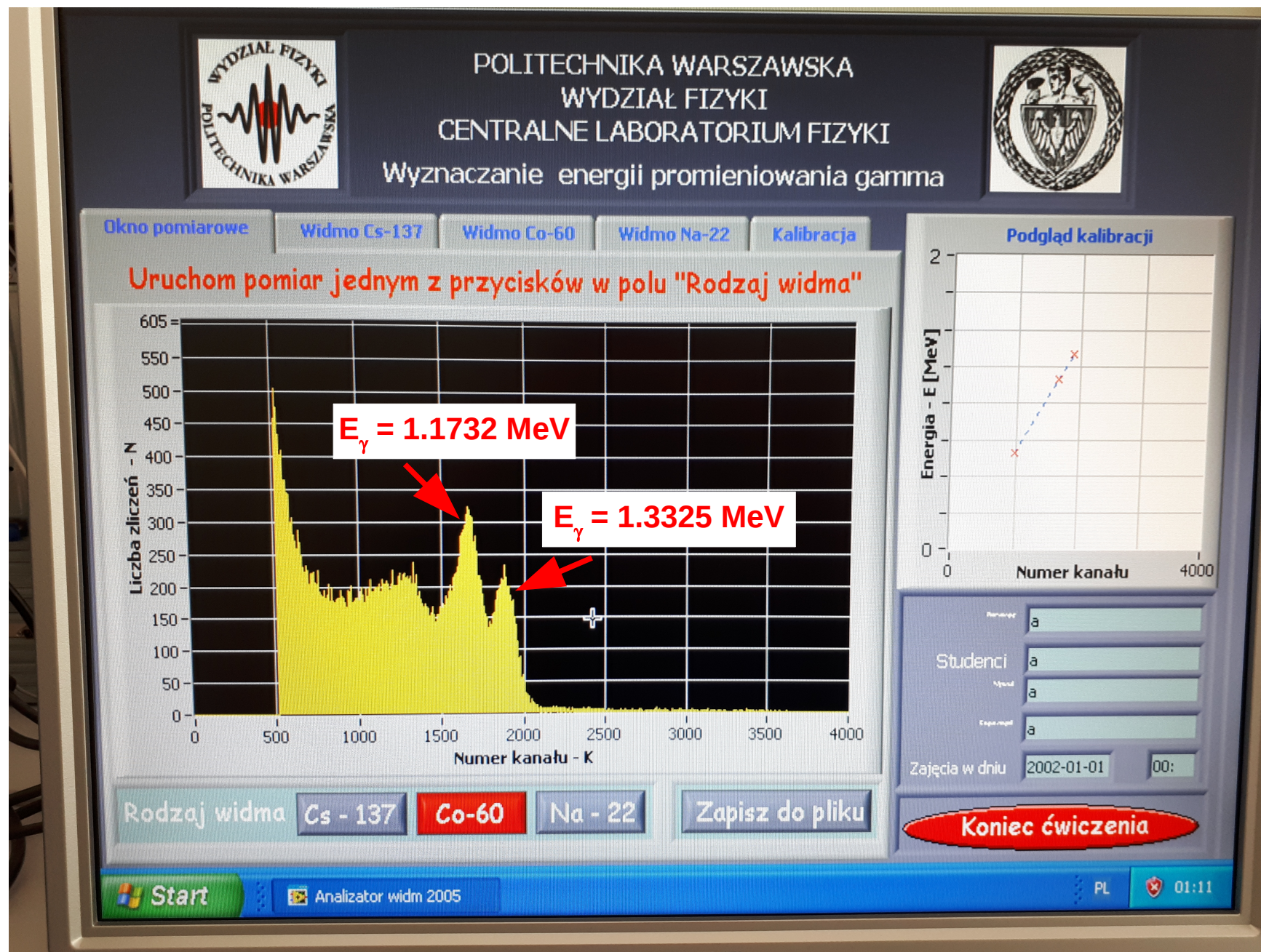
Przykładowe zebrane widmo Cs (WAW)



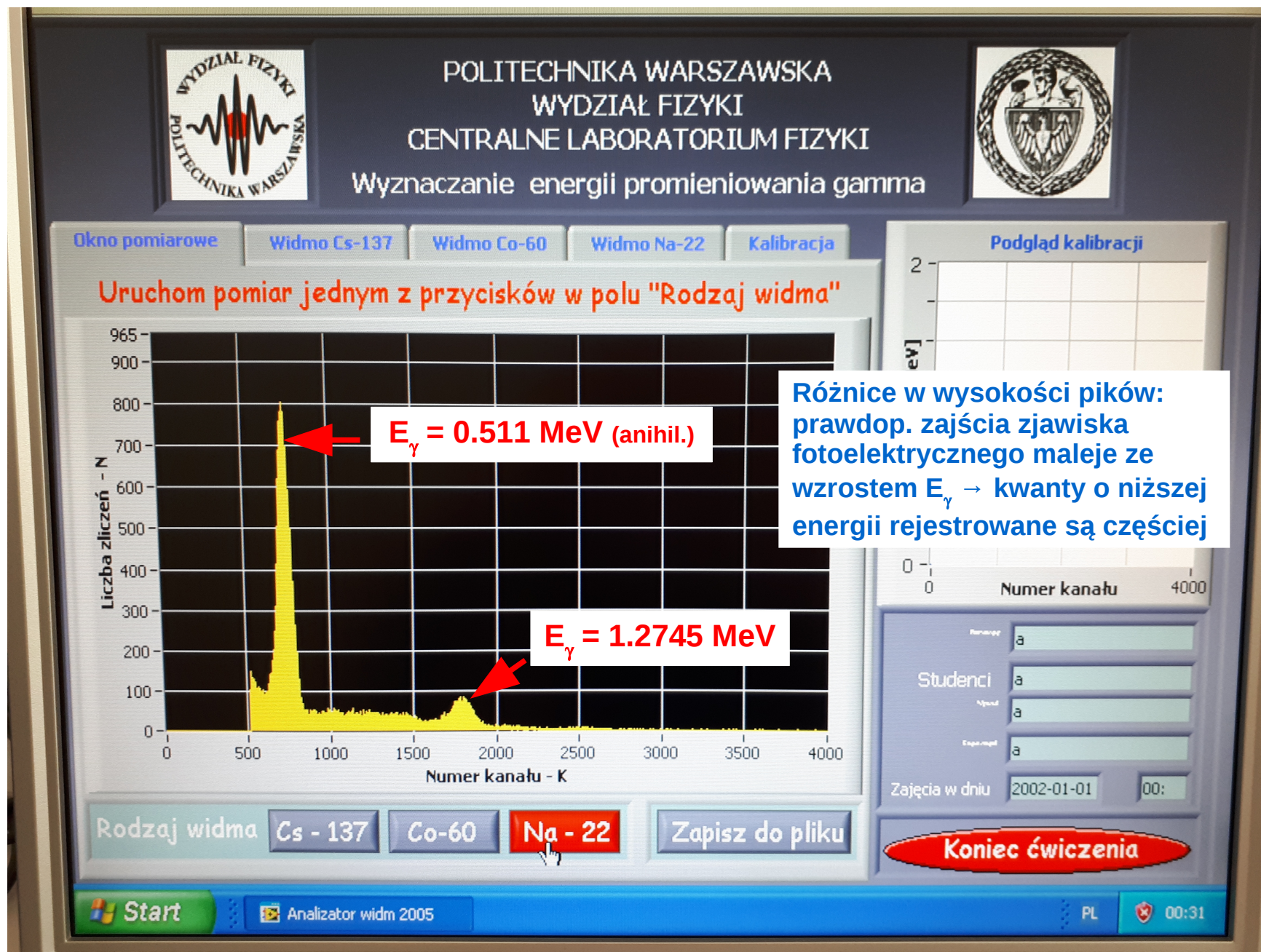
Przykładowe zebrane widmo Co (TUKAN)



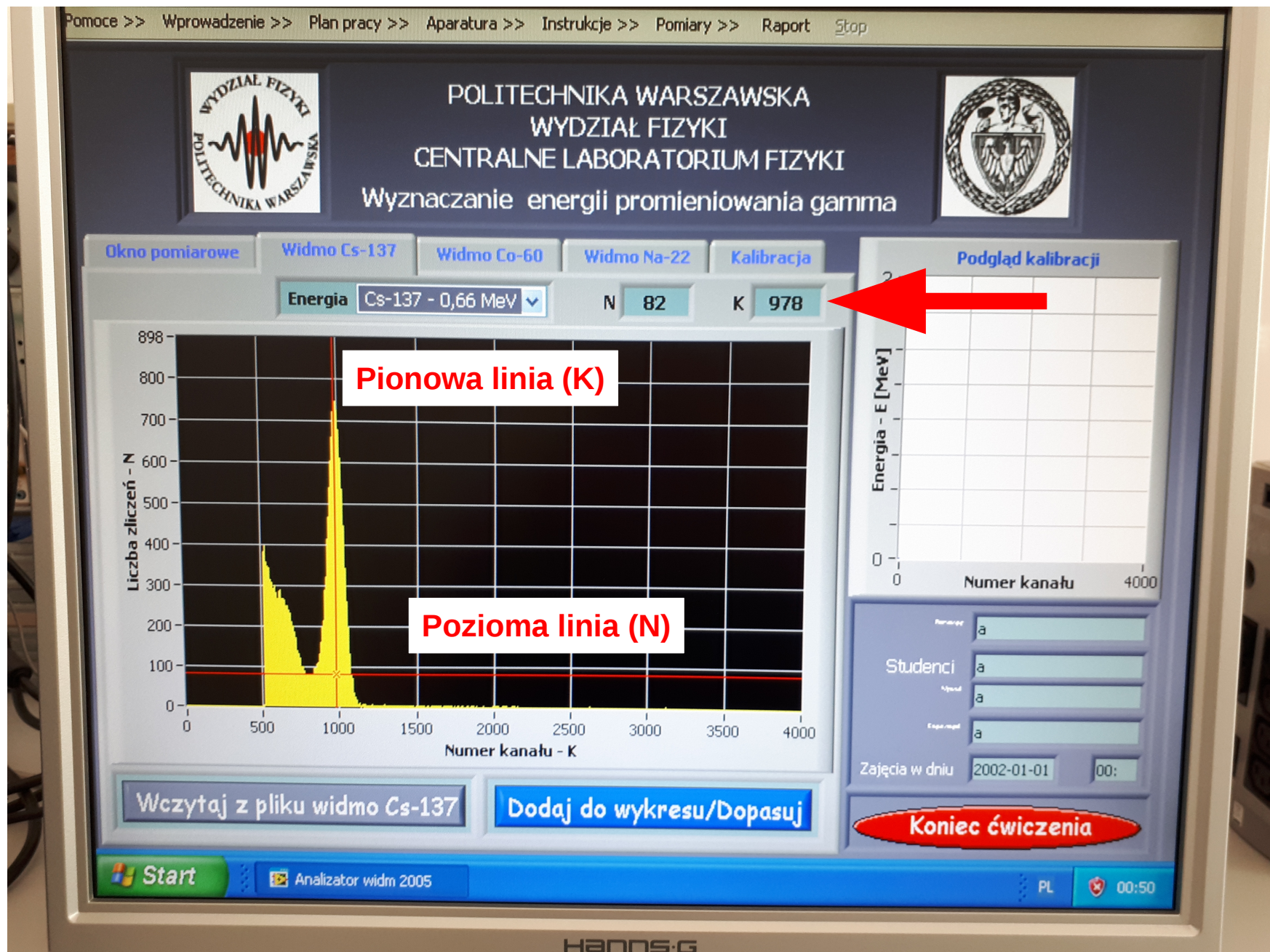
Przykładowe zebrane widmo Co (WAW)



Przykładowe zebrane widmo Na (WAW)



Linie do odczytywania wartości w WAW



Jak będzie wyglądał zestaw otrzymanych danych liczbowych

	K	FWHM
Cs	978	125
Co(1)	1653	98
Co(2)	1876	115

← do wyznaczenia prostej kalibracyjnej

dla Na:

N	K
152	512
151	518
134	541
133	554
112	577
106	585
99	603
111	619
137	637
167	659
202	682
272	688
438	697
...	...
...	...

← „nieznane” źródło

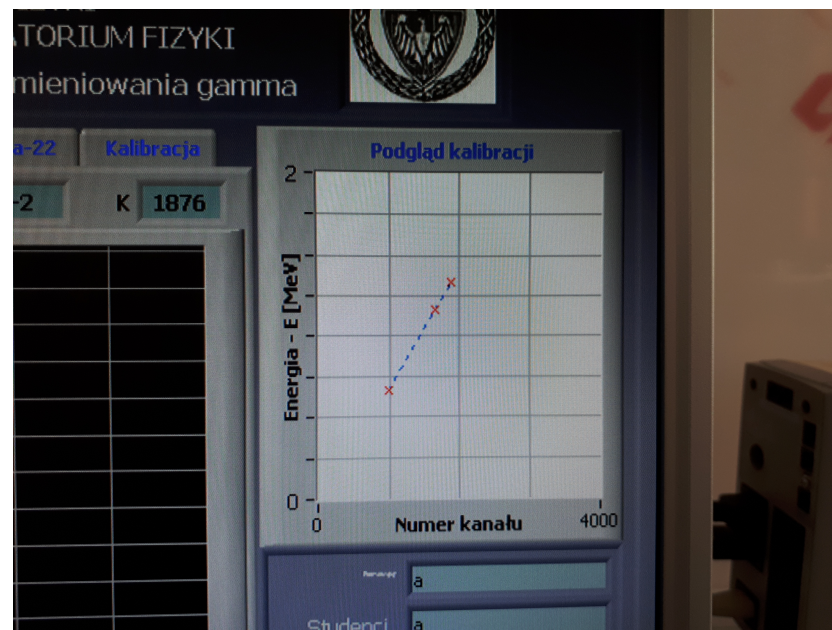
Co powinno zawierać sprawozdanie

1. **Wstęp** teoretyczny (cel ćwiczenia, podstawy fizyczne zjawiska i detekcji, użyte źródła, energie kwantów gamma, etc.)
2. **Tabela** z otrzymanymi danymi

	E_γ (MeV)	K	FWHM	$K(u_k)$ $u_k = \text{FWHM}/2$
Cs	0.6617	Z pliku	Z pliku	...
Co (1)	1.1732	Z pliku	Z pliku	...
Co (2)	1.3325	Z pliku	Z pliku	...

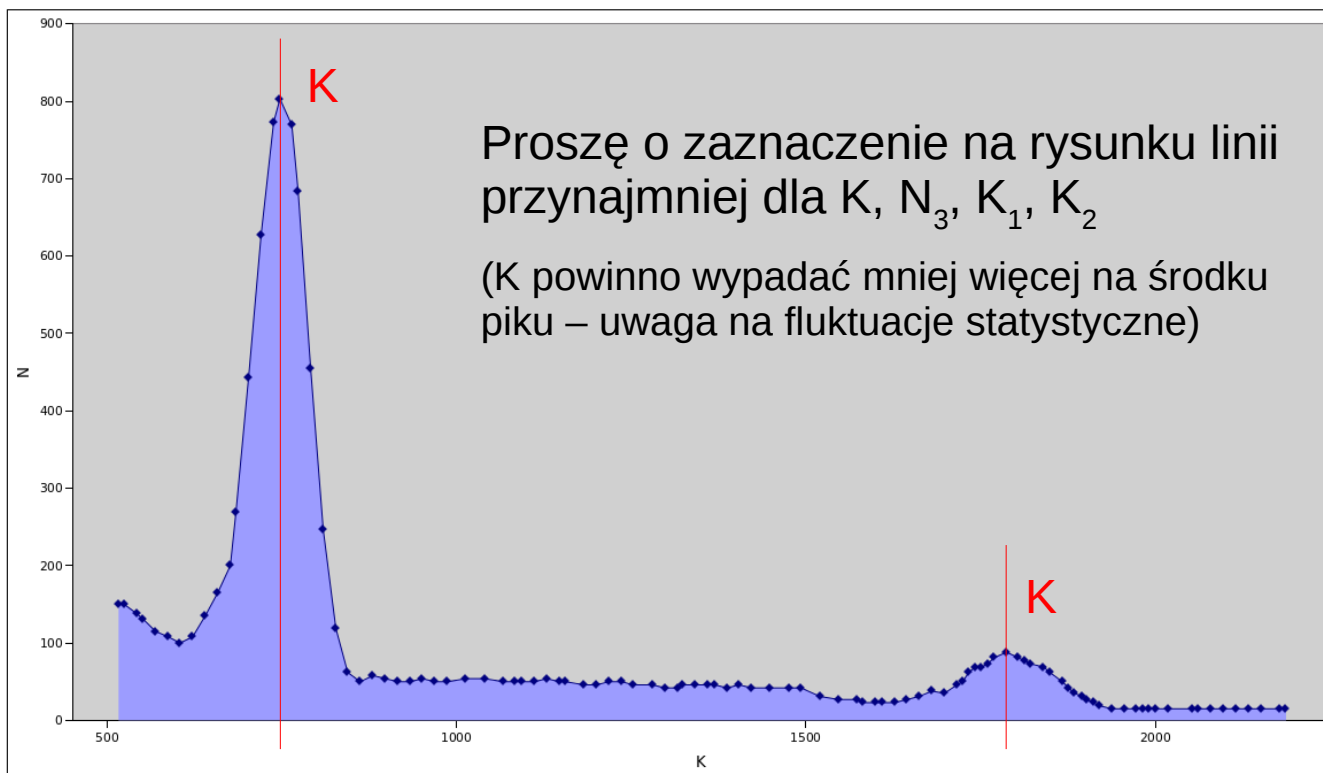
3. Rysujemy **prostą kalibracyjną** czyli E_γ (MeV) w funkcji K. Uwaga: nanosimy niepewności u_k (nie ma ich na rys. po prawej), E_γ (MeV) traktujemy jako znane ściśle

4. **Dopasowujemy prostą** (MNK) postaci: $E_\gamma = aK + b$. Podajemy w sprawozdaniu wartości:
 $a = \dots(u_a)$ jednostka
 $b = \dots(u_b)$ jednostka



Co powinno zawierać sprawozdanie

5. Na podstawie otrzymanego pliku z danymi (Na) rysujemy **N w funkcji K** (dla czytelności rysunku i ułatwienia wykonywanych na nim analiz niepewności N można nie nanosić; jeśli ktoś bardzo chce przedstawiamy je jako $\sqrt{N}$)



6. Dla obu pików gamma (anihilacyjny – lewy oraz całkowitej absorpcji, czyli γ z jądra atomowego – prawy) oszacowujemy i podajemy w sprawozdaniu: N_1 , N_2 , N_3 , K , K_1 , K_2 , **FWHM**, u_K , $K(u_K)$. Uwaga techniczna: w arkuszach można nanieść prostą definiując nową serię danych o dwóch punktach (x,y). Później tak zmieniamy wartości tych punktów żeby prosta znalazła się w miejscu o które nam chodzi (np. czerwone proste na rysunku – K)

Co powinno zawierać sprawozdanie

7. Na podstawie wyznaczonych w punkcie 4. wartości $a(u_a)$ i $b(u_b)$ oraz w punkcie 6. wartości $K(u_K)$ obliczamy $E_\gamma(u_{E_\gamma})$ dla obydwu pików „nieznanego” źródła:

$$E_\gamma = a K + b$$

$$u_{E_\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial E_\gamma}{\partial a} u_a\right)^2 + \left(\frac{\partial E_\gamma}{\partial K} u_K\right)^2 + \left(\frac{\partial E_\gamma}{\partial b} u_b\right)^2}$$

Uwaga: proszę rozpisać do końca wzór z propagacją niepewności (policzyć pochodne cząstkowe) i podać jego końcową wersję w sprawozdaniu.

8. Podajemy odpowiedzi końcowe:

E_γ (jądrowe) = ...(u_{E_γ}) jednostka

E_γ (anihil.) = ...(u_{E_γ}) jednostka

Co powinno zawierać sprawozdanie

9. Otrzymane energie (obie!) w widmie sodu należy **porównać z wartościami tablicowymi** (proponuję test 2σ)

$$|E_{\gamma \text{ doświadczalne}} - E_{\gamma \text{ tablicowe}}| / (\text{niepewność } E_{\gamma \text{ doświadczalnego}}) < 2 \quad (?)$$

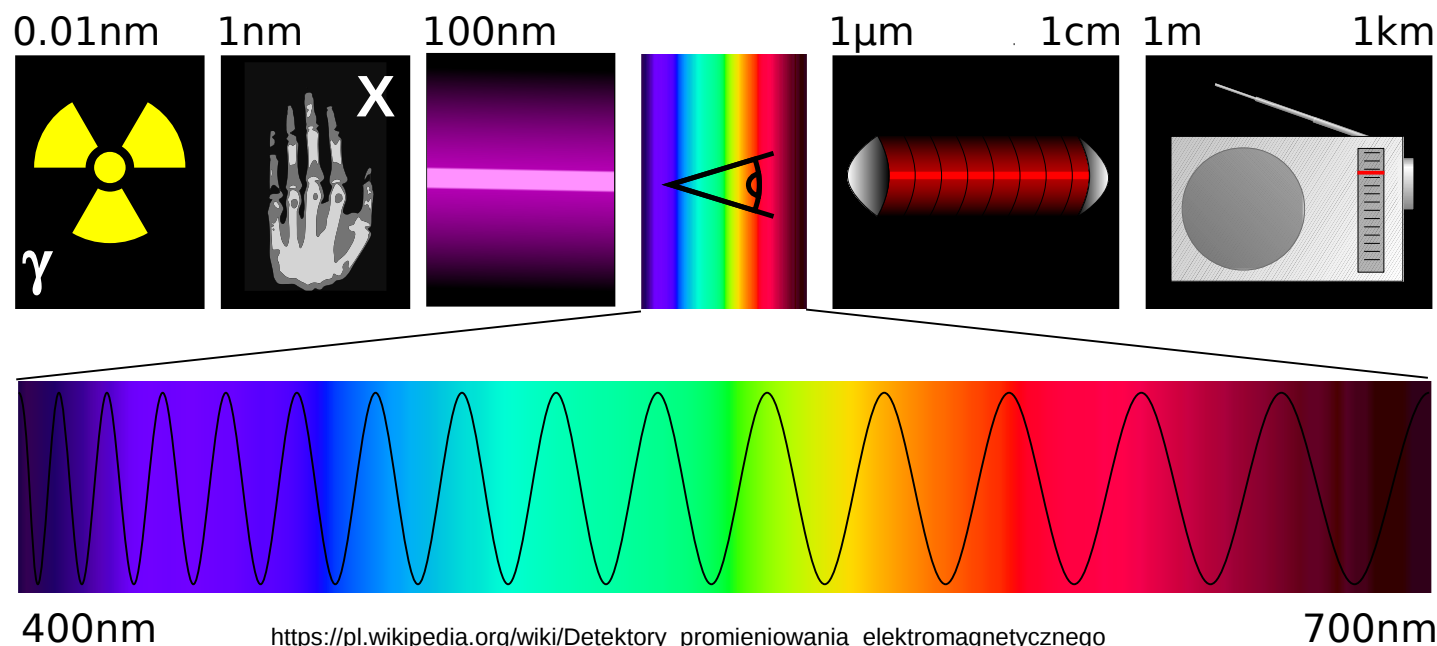
→ jeśli „< 2” to wartość doświadczalna i tablicowa są ze sobą zgodne, w granicach dwóch standardowych odchyłeń

10. Rysunek N w funkcji K konwertujemy na **N w funkcji E_{γ}** . Uwaga: tym razem oprócz samych punktów nanosimy niepewności na osiach x i y. Uwaga: tu dla pojedynczego kanału K można uznać za znane ściśle czyli zaniedbać u_K

11. Podsumowanie i wnioski (co obliczono, czy wartości są zgodne z tablicowymi, co i jak można byłoby poprawić w pomiarze, etc.)

Slajdy dodatkowe

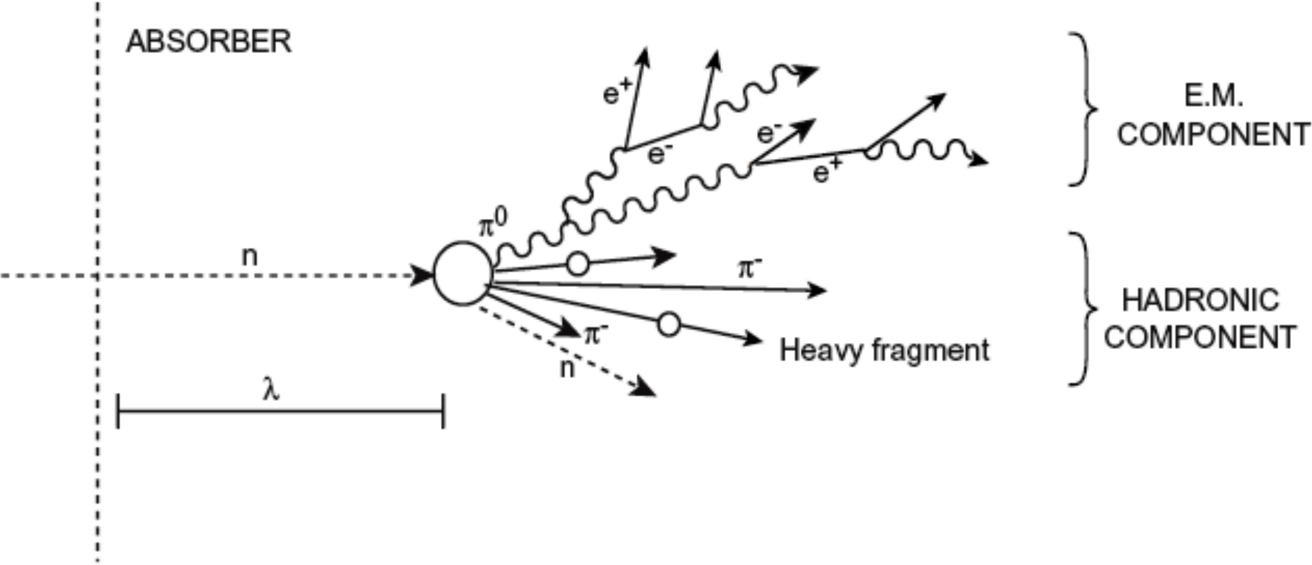
Widmo fal elektromagnetycznych, dualizm korpuskularno-falowy



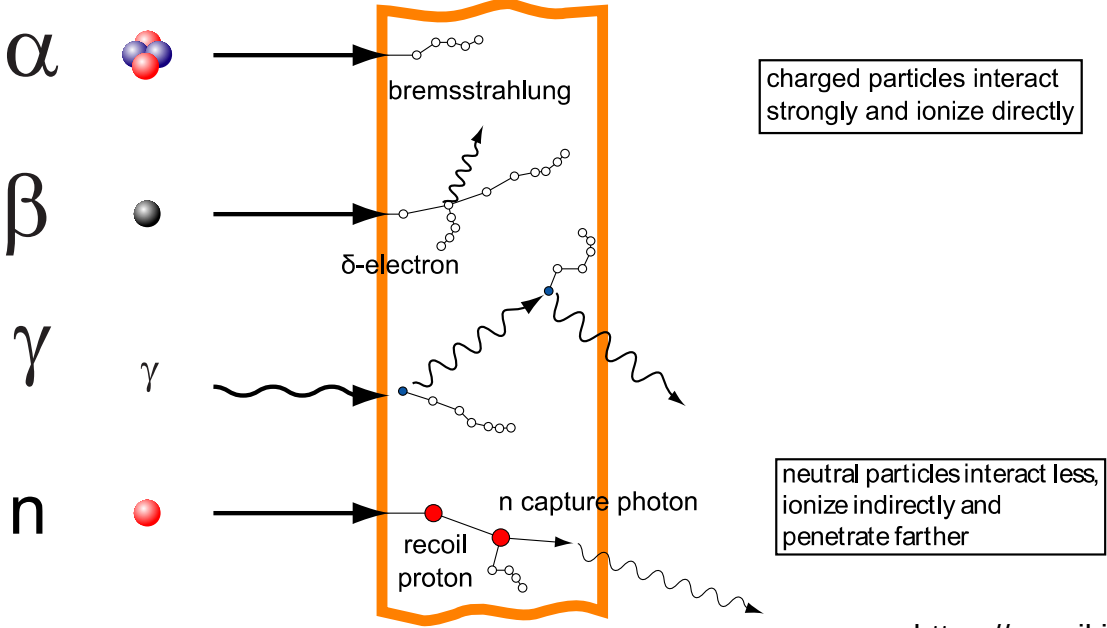
- **Brak “sztywnego” rozróżnienia między X i γ .** Można stosować kryterium energii / dł. fali ($E_\gamma > 50 \text{ keV}$; ale częściowe pokrycie z X) lub **sposobu prod.** (hamowanie e^- na tarczy / przemiany jądrowe)
- **Fotony można traktować jako cząstki** elementarne o zerowej masie spoczynkowej 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

Kaskada hadronowa →

<https://indico.cern.ch/event/632138/attachments/1487098/2309902/CERNSummerStudents2017-Wingerter-5.pdf>



Interaction of ionizing radiation with matter

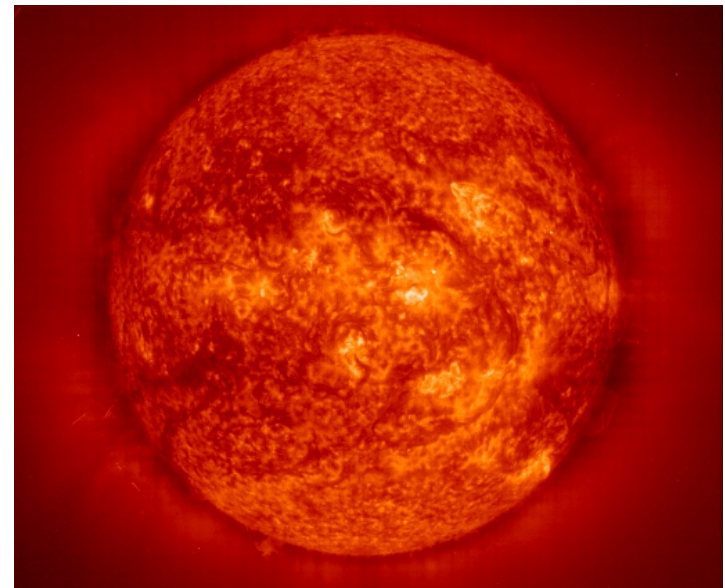
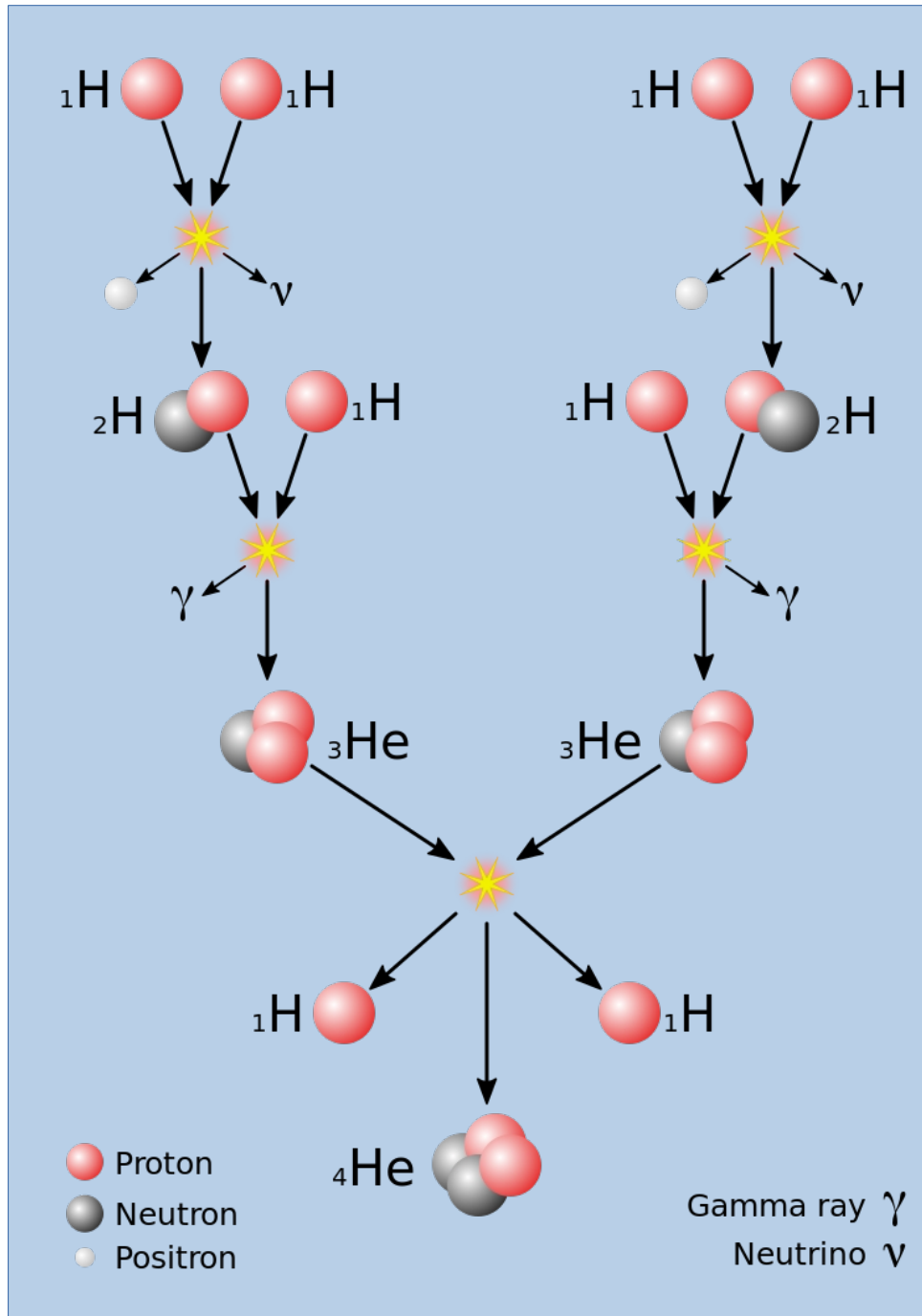


Po co nam przemiana β

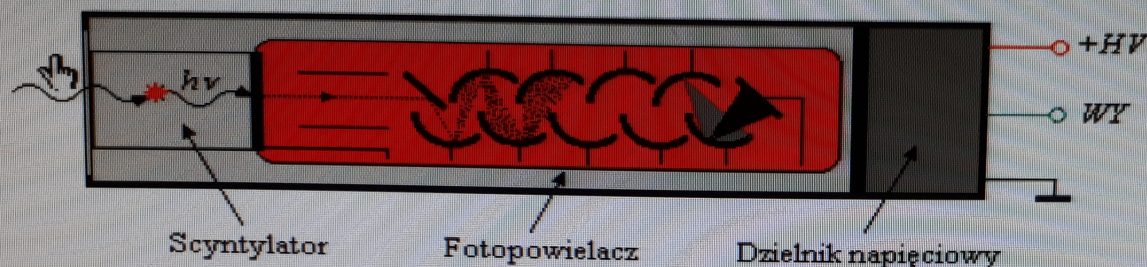
→ Cykl protonowy (cykl proton-proton, łańcuch pp, cykl Bethego)

Źródło energii ze Słońca

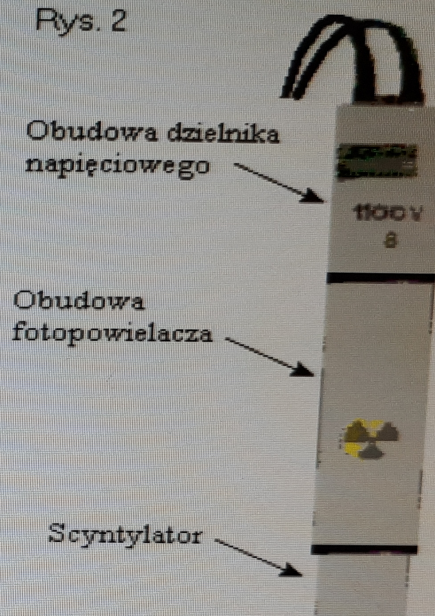
https://pl.wikipedia.org/wiki/Cykl_protonowy



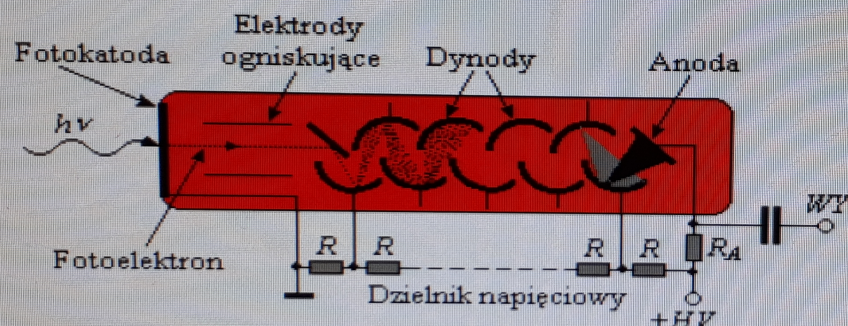
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3



Zjawisko powstawania błysków świetlnych (scyntytacji) w scyntylatorach pod wpływem cząstek jonizujących wykorzystano do budowy liczników scyntylacyjnych (rys. 1 i 2). W materiałach scyntylacyjnych (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 scyntylatora 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 zmierzenia. 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.

Commonly used radiation sources (radionuclides) for brachytherapy

Radionuclide	Type	Half-life	Energy
Cesium-131 (^{131}Cs)	Electron Capture, ϵ	9.7 days	30.4 keV (mean)
Cesium-137 (^{137}Cs)	β^- - particles, γ -rays	30.17 years	0.512, 0.662 MeV γ -rays
Cobalt-60 (^{60}Co)	β^- - particles, γ -rays	5.26 years	1.17, 1.33 MeV γ -rays
Iridium-192 (^{192}Ir)	γ -rays	73.8 days	0.38 MeV (mean)
Iodine-125 (^{125}I)	Electron Capture, ϵ	59.6 days	27.4, 31.4 and 35.5 keV
Palladium-103 (^{103}Pd)	Electron Capture, ϵ	17.0 days	21 keV (mean)
Ruthenium-106 (^{106}Ru)	β^- - particles	1.02 years	3.54 MeV
Radium-226 (^{226}Ra)	α - particles	1599 years	

Rys. z <https://en.wikipedia.org/wiki/Brachytherapy>

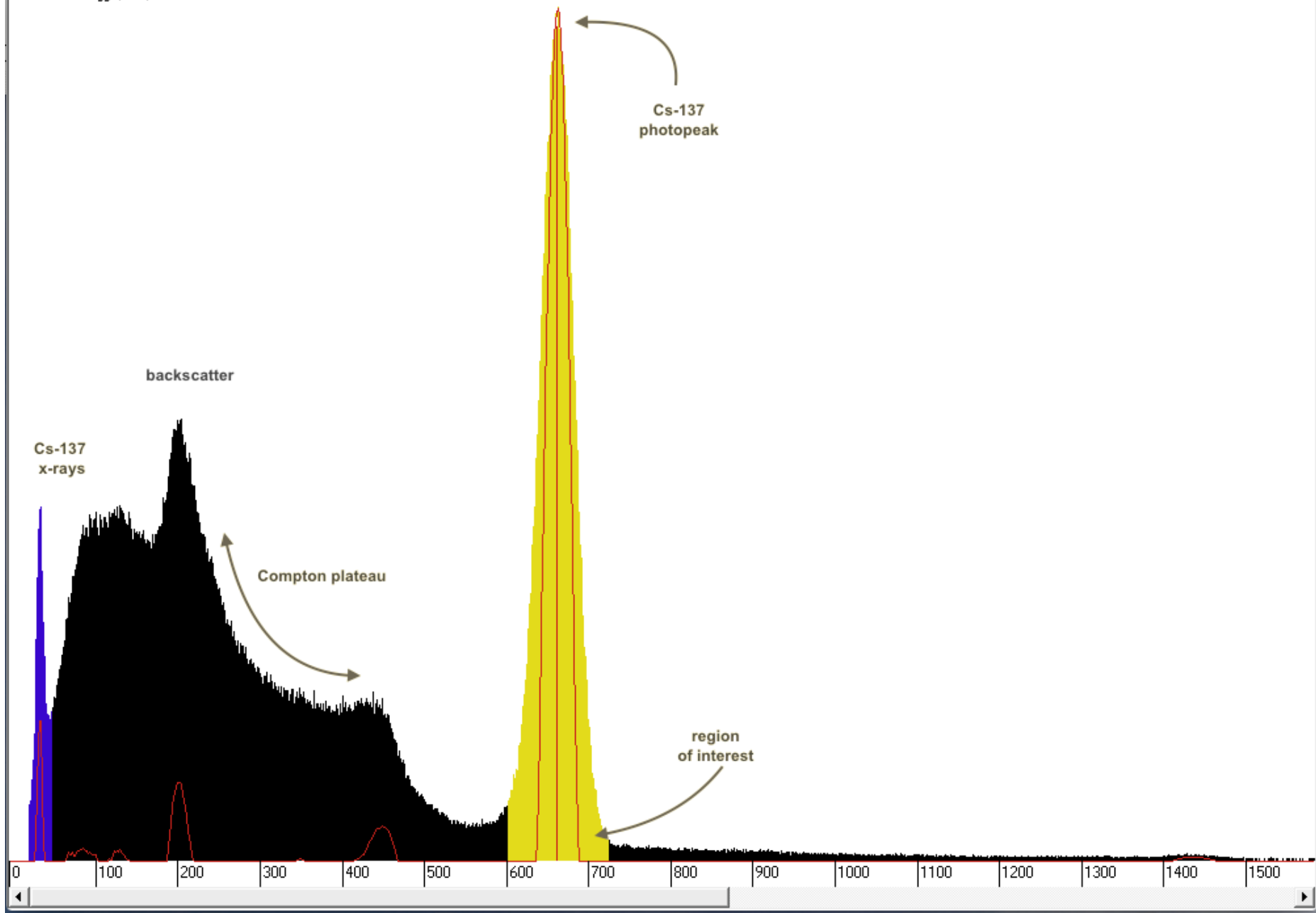
Ciekawe strony na których można znaleźć własności różnych izotopów:

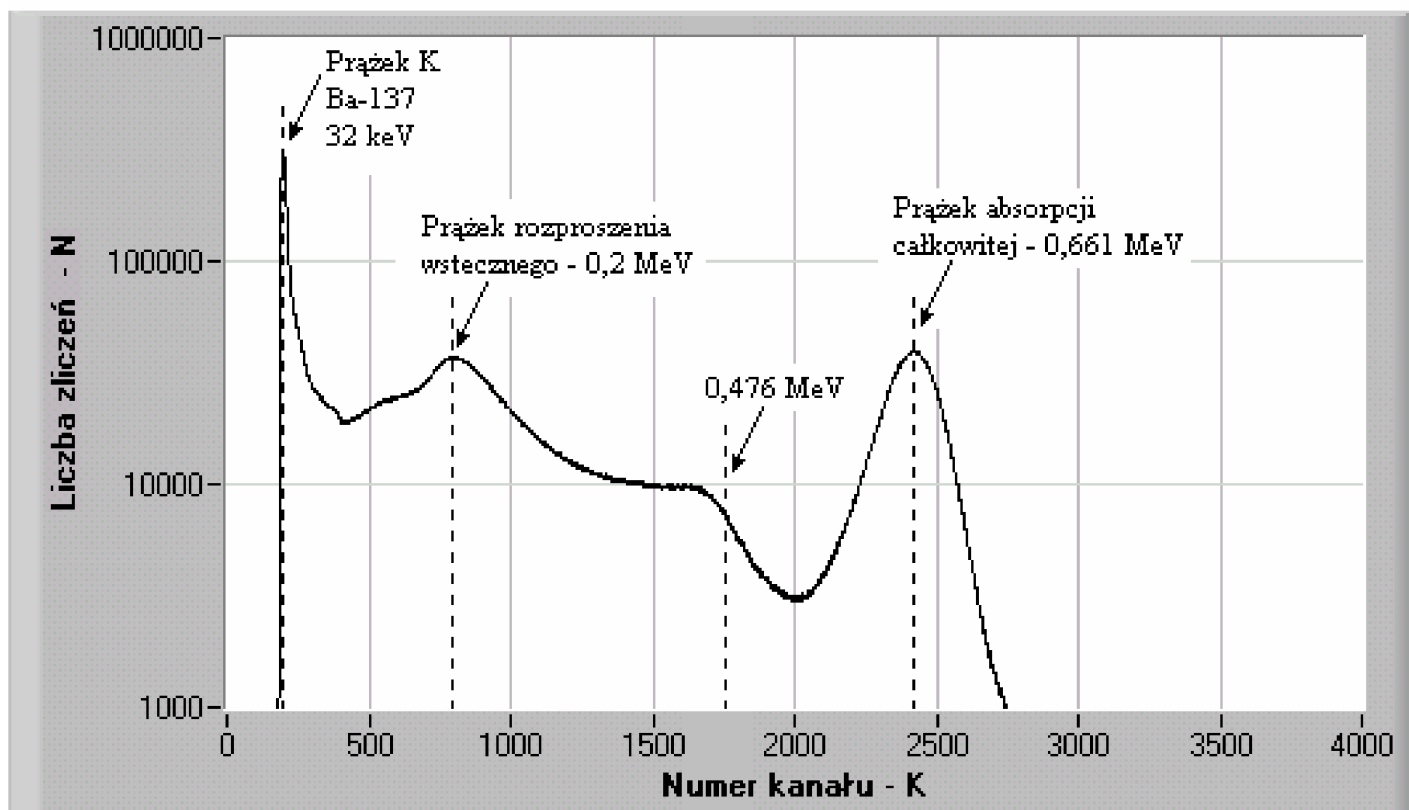
<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp> (1999 rok)

oraz

<https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

Bin 538 Energy/(keV) 662 Counts 8145 Percent 0.622 Gauss 99.423 Mean 662.002 SD 18.721 Res% 6.659 Gross 351583 Net 308848





Rys. z CLF WF PW

„W początkowej części widma, w zakresie bardzo małych energii, występuje ostro zarysowany prążek, którego maksimum przypada na kanał odpowiadający energii 32 keV. Jest to prążek K charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego izotopu ^{137}Ba , powstającego w rozpadzie ^{137}Cs i zjonizowanego przez cząstki beta emitowane w rozpadach jąder. W rzeczywistości jest to prążek, składający się z czterech prążków $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$ i $K_{\beta 2}$, które zlewają się w jeden na skutek ograniczonej zdolności rozdzielczej spektrometru.”

FWHM oraz σ

Secure | https://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum

Not logged in [Talk](#) [Contributions](#) [Create account](#) [Log in](#)



WIKIPEDIA
The Free Encyclopedia

[Main page](#)
[Contents](#)
[Current events](#)
[Random article](#)
[About Wikipedia](#)
[Contact us](#)
[Donate](#)

[Upload file](#)

[Tools](#)

[What links here](#)
[Related changes](#)
[Special pages](#)
[Permanent link](#)
[Page information](#)
[Cite this page](#)
[Wikidata item](#)

Article [Talk](#)

[Read](#) [Edit](#) [View history](#)

Full width at half maximum

From Wikipedia, the free encyclopedia

Full width at half maximum (FWHM) is an expression of the extent of a function given by the difference between the two extreme values of the [independent variable](#) at which the dependent variable is equal to half of its maximum value. In other words, it is the width of a spectrum curve measured between those points on the y-axis which are half the maximum amplitude.

Half width at half maximum (HWHM) is half of the FWHM if the function is symmetric.

FWHM is applied to such phenomena as the duration of [pulse](#) waveforms and the [spectral width](#) of sources used for optical [communications](#) and the resolution of [spectrometers](#).

The term **full duration at half maximum** (FDHM) is preferred when the independent variable is [time](#).

The convention of "width" meaning "half maximum" is also widely used in [signal processing](#) to define [bandwidth](#) as "width of frequency range where less than half the signal's power is attenuated", i.e., the power is at least half the maximum. In signal processing terms, this is at most [−3 dB](#) of attenuation, called "[half-power point](#)".

If the considered function is the density of a [normal distribution](#) of the form

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$

where σ is the [standard deviation](#) and x_0 is the [expected value](#), then the relationship between FWHM and the [standard deviation](#) is^[1]

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma \approx 2.355 \sigma.$$

The width does not depend on the expected value x_0 ; it is invariant under translations.

