

---

**Detekcja  
promieniowania elektromagnetycznego  
cząstek naładowanych  
i neutronów**

Marcin Palacz

*Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów UW*

# Rodzaje i źródła promieniowania

- Promieniowanie elektromagnetyczne:  $\gamma$ , X
- Elektrony: rozpad  $\beta$ , konwersja wewnętrzna, elektrony Auger, elektrony delta
- Ciężkie cząstki naładowane
  - ❖ Rozpad  $\alpha$ :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-Z}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$
  - ❖ Spontaniczne rozszczepienie (fragmenty)
  - ❖ p,  $\alpha$ , oraz cięższe jądra produkowane (rozpraszane) “na wiązce”
- Neutrony:
  - ❖ Spontaniczne rozszczepienie
  - ❖ Źródła ( $\alpha, n$ ) np  ${}^4_2 \alpha + {}^9_4 \text{Be} \rightarrow {}^{12}_6 \text{C} + {}^1_0 n$
  - ❖ Źródła ( $\gamma, n$ )
  - ❖ Produkty reakcji “na wiązce”

Zakres energii: eV do kilkudziesięciu MeV ( $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ )

# Rodzaje promieniowania a detekcja

Detekcja — oddziaływanie promieniowania z materią.

Promieniowanie	
z ładunkiem elektrycznym	bez ładunku elektrycznego
ciężkie cząstki naładowane $\sim 10^{-5}\text{m}$	← neutrony $\sim 10^{-1}\text{m}$
elektrony $\sim 10^{-3}\text{m}$	← X i $\gamma$ $\sim 10^{-1}\text{m}$

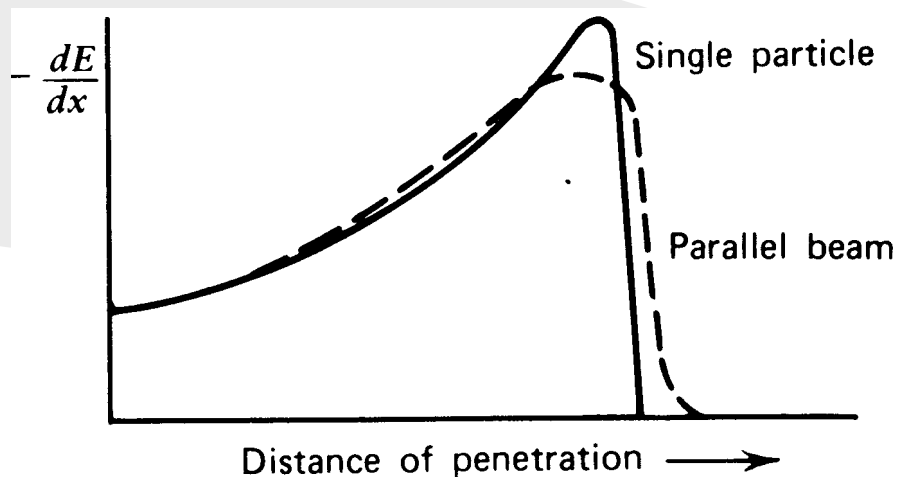
- Promieniowanie z ładunkiem — ciągłe oddziaływanie z elektronami w materiale.
- Promieniowanie bez ładunku — (najpierw) jednokrotne, “katastroficzne” oddziaływanie.

# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych

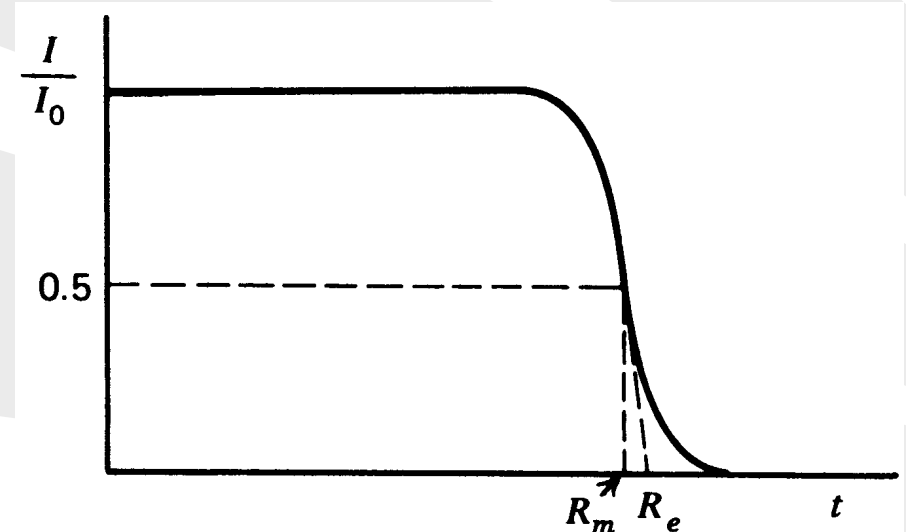
- Jednoczesne, ciągłe oddziaływanie w wieloma elektronami ośrodka, maksymalny jednokrotny transfer energii:  $4Em_e/m$
- Produkcja elektronów  $\delta$
- Wzór Bethe (nierel.):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} \cdot n \cdot Z \cdot \ln \frac{2m_e v^2}{I}$$

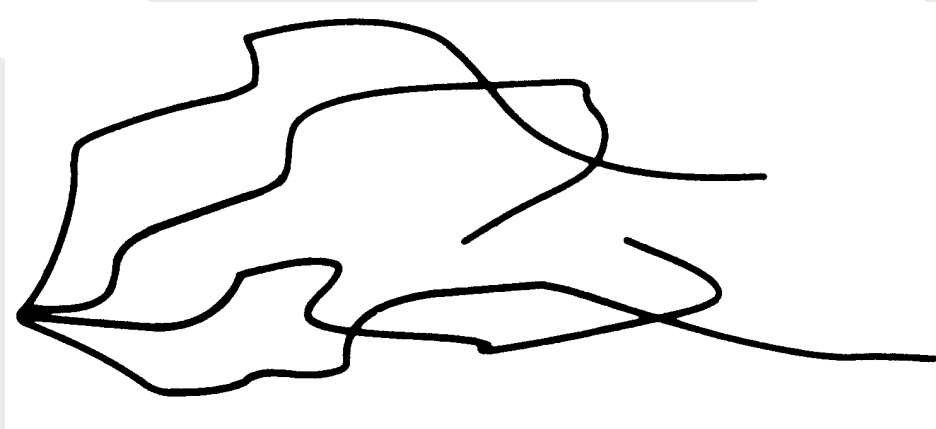
krzywa Bragga



Zasięg



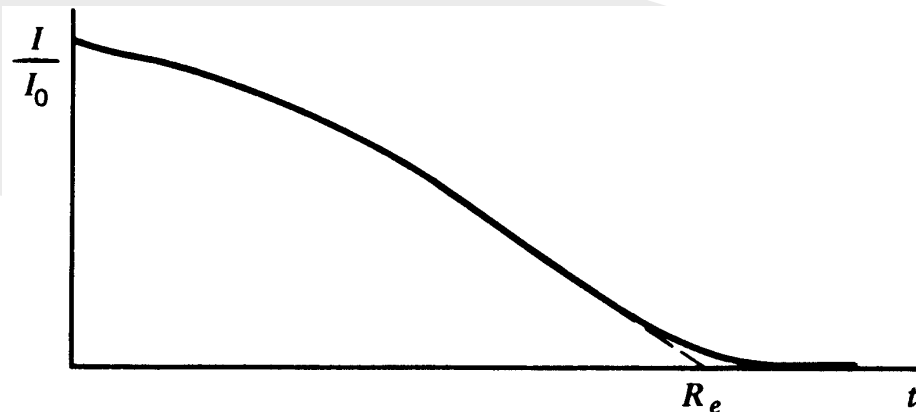
# Odziaływanie elektronów



procesy coulombowskie oraz radiacyjne:

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r$$

Zasięg:



# *Oddziaływanie neutronów*

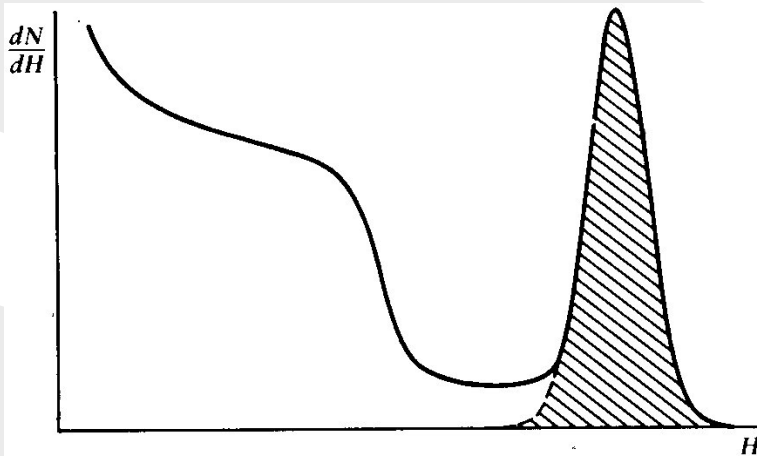
---

- oddziaływanie z jądrami: elastyczne i nieelastyczne rozpraszanie, wychwyty
- produktami oddziaływania są ciężkie cząstki naładowane
- najbardziej efektywny absorber: H

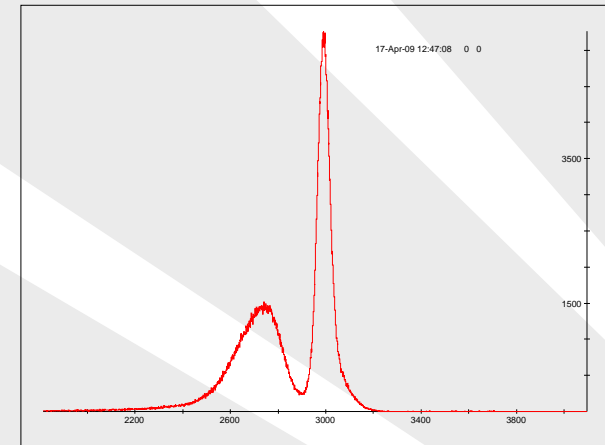
# Podstawowe własności detektora

W wyniku oddziaływania promieniowania z materiałem detektora generowany jest ładunek elektryczny (czas: ps to ns).

Ładunek zebrany  $\Rightarrow$  sygnał elektryczny (czas: ns to ms) .



Widmo energetyczne



Widmo czasowe

Parametry:

- wydajność  $\epsilon = N_{rej}/N$   
(wewnętrzna, absolutna)
- energetyczna zdolność rozdzielcza  
(FWHM)
- liniowość
- $P/T = N_{pik}/N_{total}$
- czasowa zdolność rozdzielcza
- czas martwy

# *Rodzaje detektorów*

---

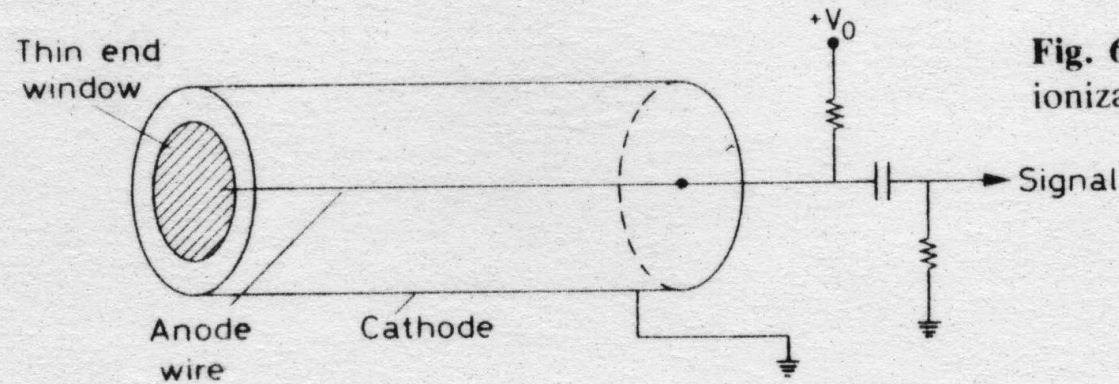
Przykłady rodzajów detektorów:

- gazowe detektory jonizacyjne
- scyntylatory
- detektory półprzewodnikowe

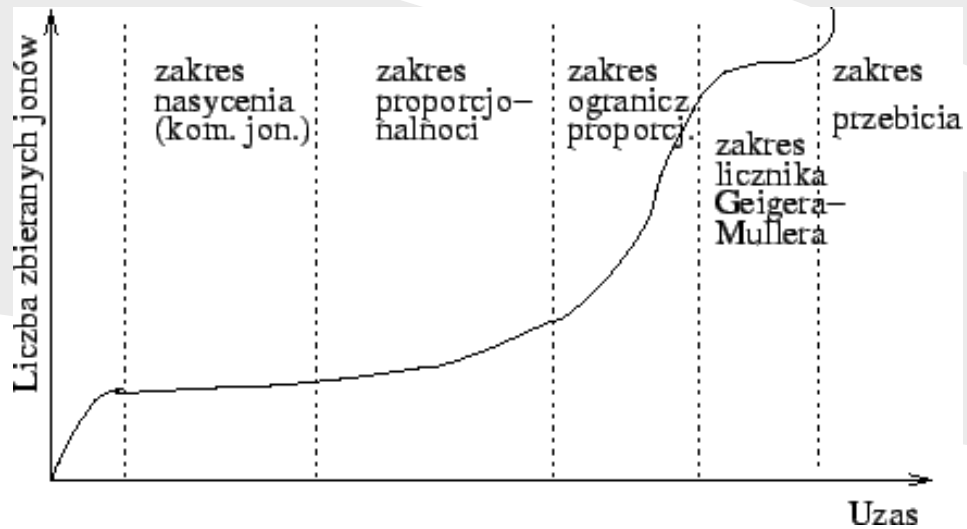
# Gazowe detektory jonizacyjne

120

6. Ionization Detectors



**Fig. 6.1.** Basic construction of a simple gas ionization detector



# Scyntylatory

---

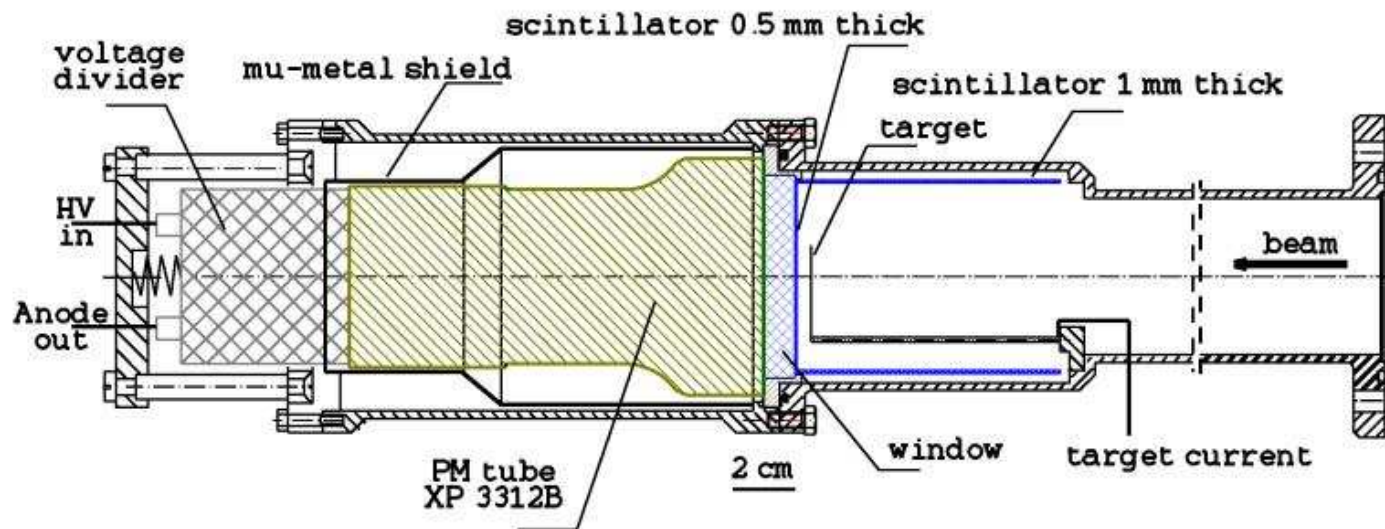
Energia kinetyczna padającej cząstki zamieniana na światło (najlepiej: natychmiastowa fluorescencja).

- scyntylatory organiczne: związki CH  
wzbudzenia elektronów w molekułach stałe i ciekłe
- scyntylatory nieorganiczne:  
wzbudzenia elektronów w strukturze krystalicznej  
wysoka gęstość i  $Z$   
mniej światła  
higroskopijne

Liniowość, szybka odpowiedź,  
kształt impulsu może zależeć od rodzaju cząstki.

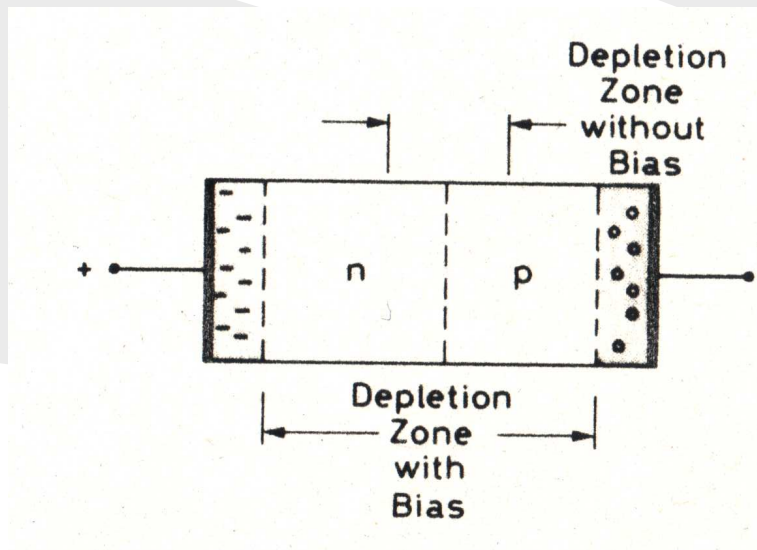
Współpracują z urządzeniem wzmacniającym światło i przekształcającym je na sygnał elektryczny (fotopowielacz, fotodiody).

# Przykład: scynt. detektor cząstek naładowanych

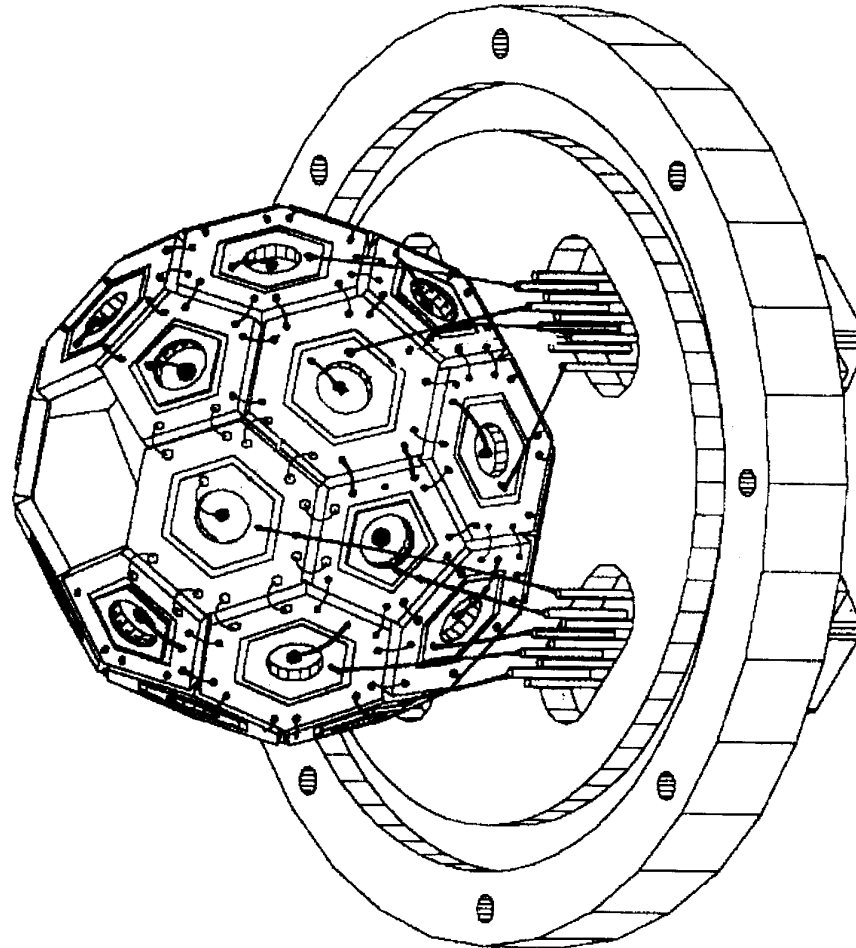


# Detektor półprzewodnikowy

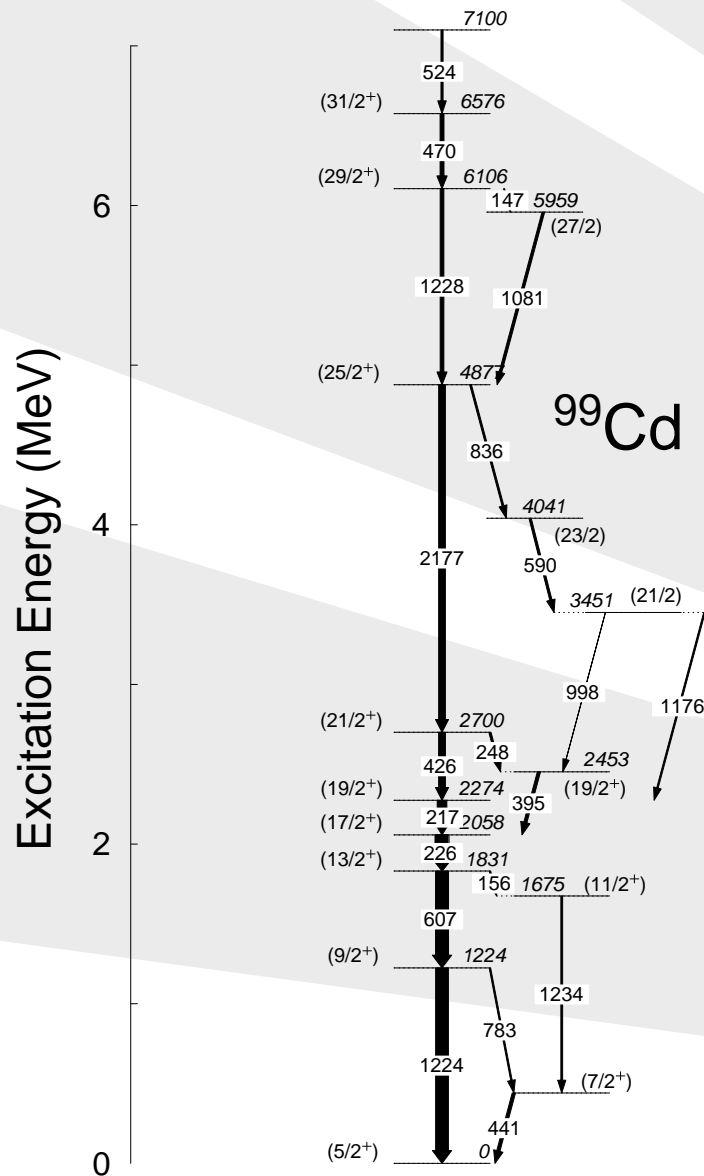
- przejście cząstki powoduje wytworzenie par elektron-dziura
- mała energia potrzebna do wytworzenia jednej pary nośników
- materiały: Si, Ge
- rozdzielczość energetyczna  $\sim 0.1\%$
- wysoka gęstość, małe rozmiary



# Przykład: detektor $\alpha$ i p — SiBall

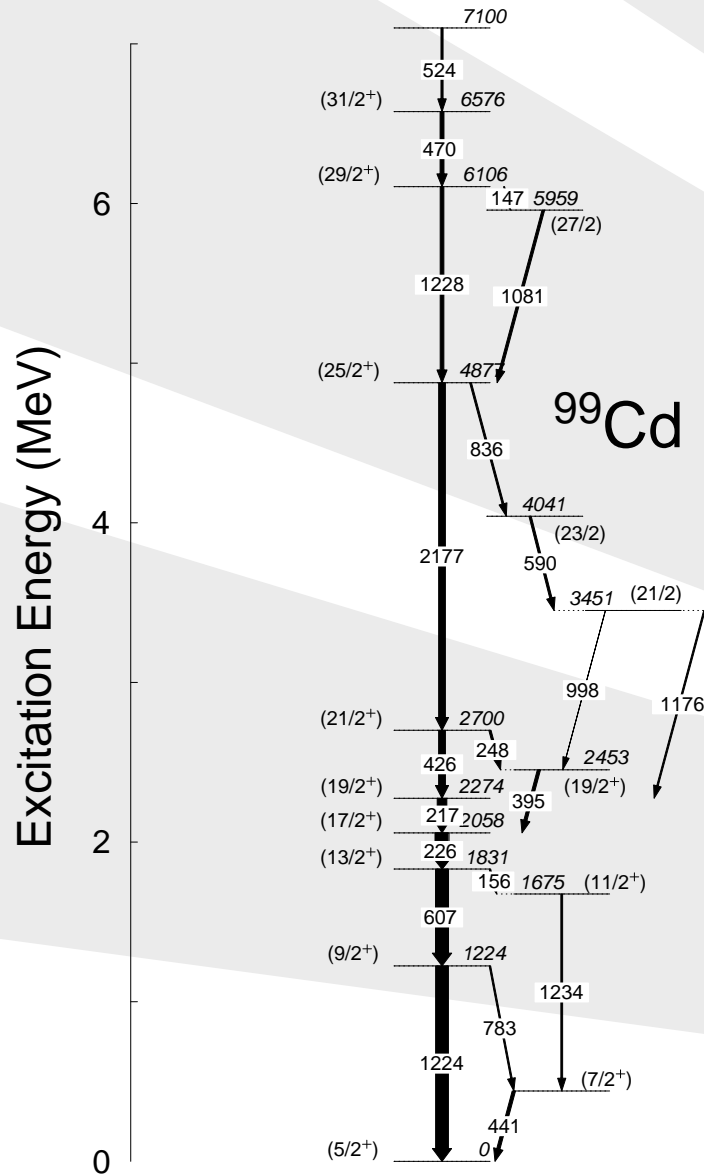


# Poziomy energetyczne jąder atomowych



# Poziomy energetyczne jąder atomowych

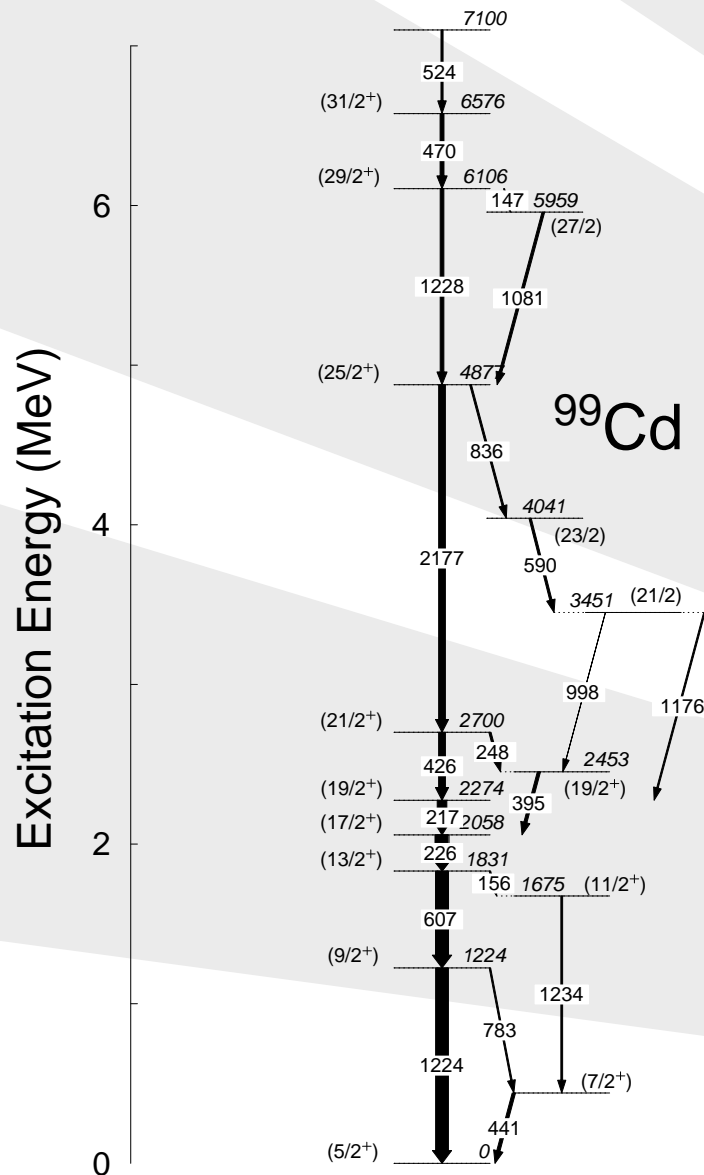
jądro atomowe emituje sekwencje kwantów  $\gamma$ , odpowiadających różnicom energii pomiędzy poziomami energetycznymi jądra



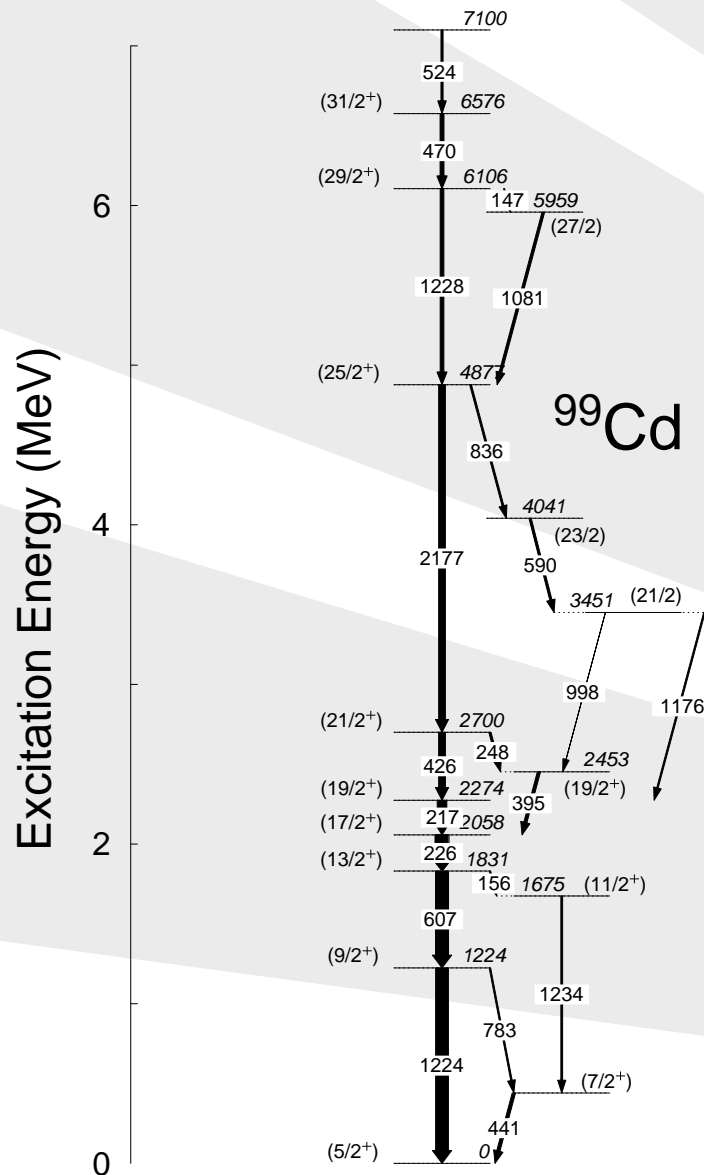
# Poziomy energetyczne jąder atomowych

jądro atomowe emituje sekwencje kwantów  $\gamma$ , odpowiadających różnicom energii pomiędzy poziomami energetycznymi jądra

kwanty te są obserwowane *jednocześnie* (w koincydencji)



# Poziomy energetyczne jąder atomowych



jądro atomowe emituje sekwencje kwantów  $\gamma$ , odpowiadających różnicom energii pomiędzy poziomami energetycznymi jądra

kwanty te są obserwowane *jednocześnie* (w koincydencji)

Tworzenie jądra w stanie wzbudzonym następuje np poprzez:

- reakcję fuzji-ewaporacji:  
 $^{58}\text{Ni} + ^{45}\text{Sc} \rightarrow ^{103}\text{In}(\text{CN}) \rightarrow$   
 $p3n + ^{99}\text{Cd}$

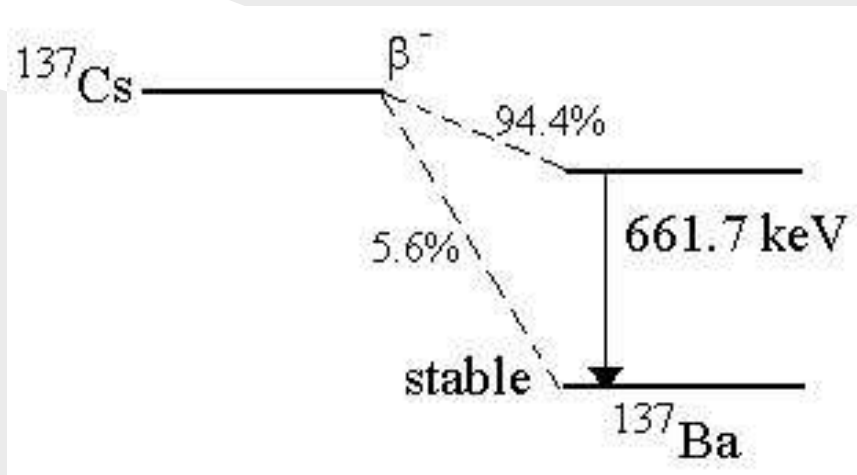
# Poziomy energetyczne jąder atomowych

jądro atomowe emituje sekwencje kwantów  $\gamma$ , odpowiadających różnicom energii pomiędzy poziomami energetycznymi jądra

kwanty te są obserwowane *jednocześnie* (w koincydencji)

Tworzenie jądra w stanie wzbudzonym następuje np poprzez:

- reakcję fuzji-ewaporacji:  
 ${}^{58}\text{Ni} + {}^{45}\text{Sc} \rightarrow {}^{103}\text{In}(\text{CN}) \rightarrow p3n + {}^{99}\text{Cd}$
- rozpad radioaktywny:  
 ${}^{137}\text{Cs} \rightarrow {}^{137}\text{Ba}^*$



# Oddziaływanie kwantów $\gamma$ z materią

- **efekt fotoelektryczny:**

kwant  $\gamma$  oddziałuje ze związanym w atomie elektronem, przekazując mu całą swoją energię. Emitowany jest **fotoelektron** oraz kwant energia  $E_\gamma$  jest (zwykle) w całości zdeponowana w detektorze w punkcie oddziaływania

$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$

$$\tau \sim \text{const} \times Z^n / E_\gamma^{3.5} \quad n = 4, 5$$

# Oddziaływanie kwantów $\gamma$ z materią

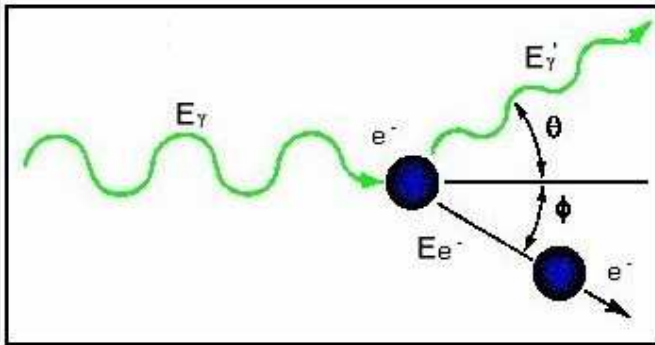
- **efekt fotoelektryczny:**

kwant  $\gamma$  oddziałuje ze związanym w atomie elektronem, przekazując mu całą swoją energię. Emitowany jest **fotoelektron** oraz kwant energia  $E_\gamma$  jest (zwykle) w całości zdeponowana w detektorze w punkcie oddziaływania

$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$

$$\tau \sim const \times Z^n / E_\gamma^{3.5} \quad n = 4, 5$$

- **rozpraszanie Comptona:**



$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (1 - \cos(\theta)) \frac{E_\gamma}{m_e c^2}}$$

# Oddziaływanie kwantów $\gamma$ z materią

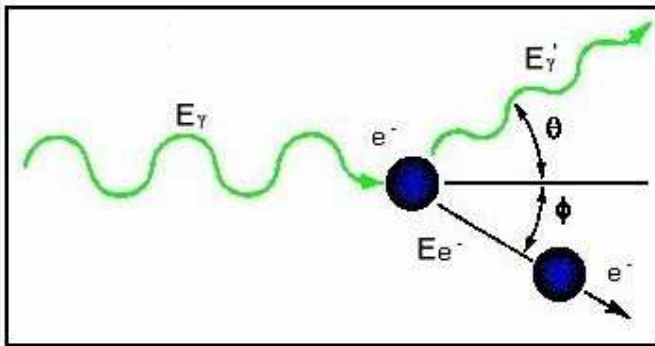
- **efekt fotoelektryczny:**

kwant  $\gamma$  oddziałuje ze związanym w atomie elektronem, przekazując mu całą swoją energię. Emitowany jest **fotoelektron** oraz kwant energia  $E_\gamma$  jest (zwykle) w całości zdeponowana w detektorze w punkcie oddziaływania

$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$

$$\tau \sim const \times Z^n / E_\gamma^{3.5} \quad n = 4, 5$$

- **rozpraszanie Comptona:**

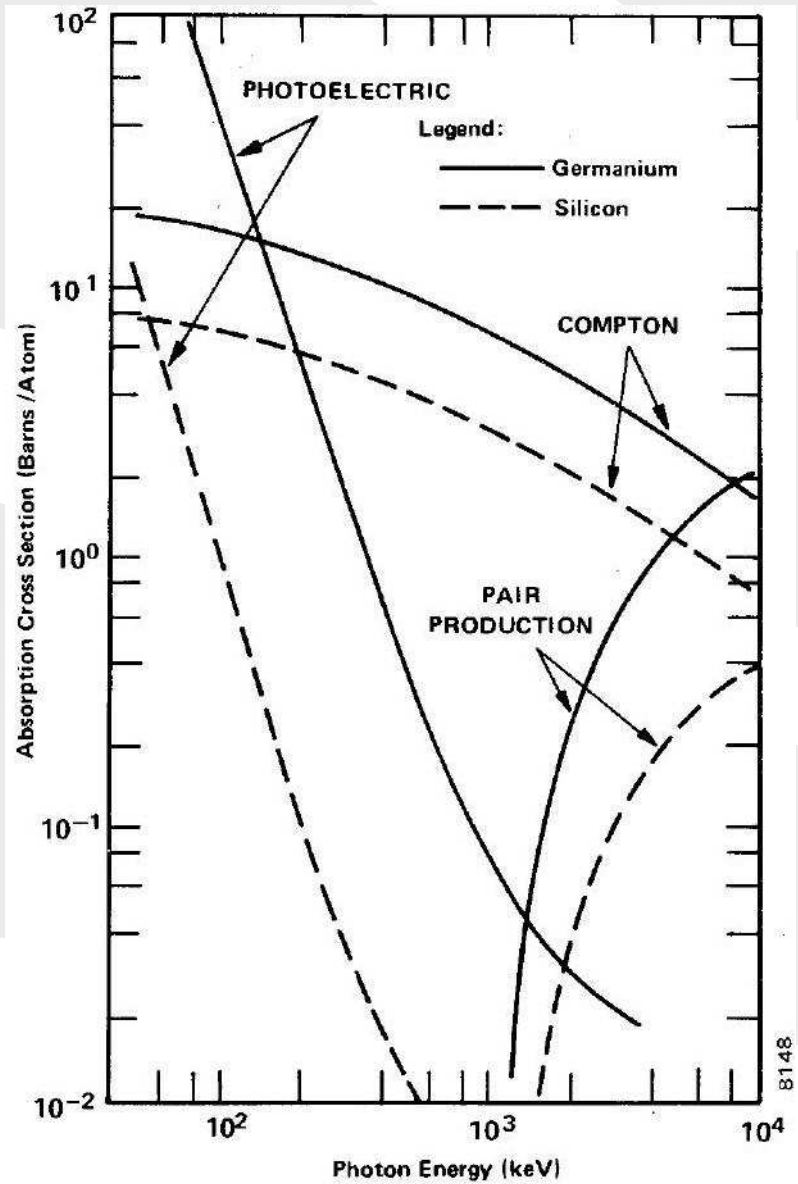


$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (1 - \cos(\theta)) \frac{E_\gamma}{m_e c^2}}$$

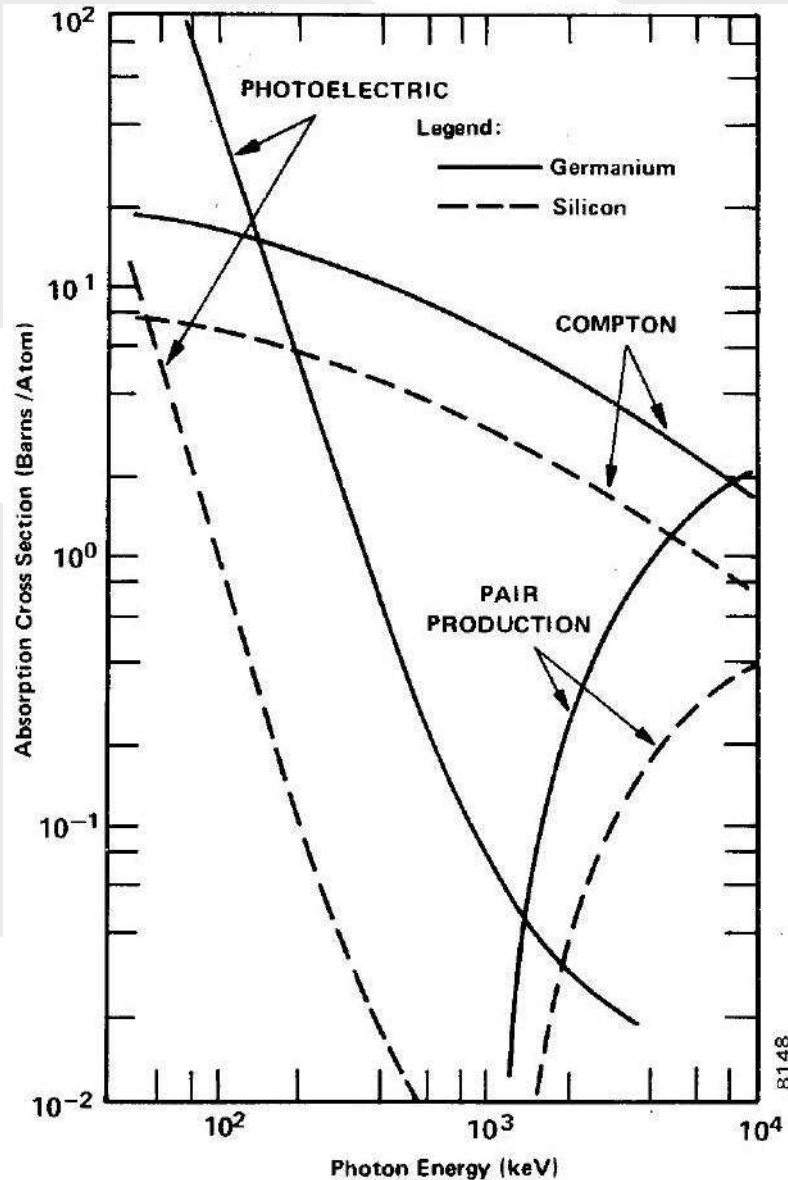
- **kreacja par  $e^+ e^-$  ( $E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}$ )**

spowolniony  $e^+$  anihiluje dając parę kwantów  $\gamma$  po **511 keV**

# Oddziaływanie kwantów $\gamma$ — porównanie



# Oddziaływanie kwantów $\gamma$ — porównanie



Przekrój czynny — współczynnik proporcjonalności  $\sigma$  w równaniu:

$$dn = \sigma N dx$$

gdzie:

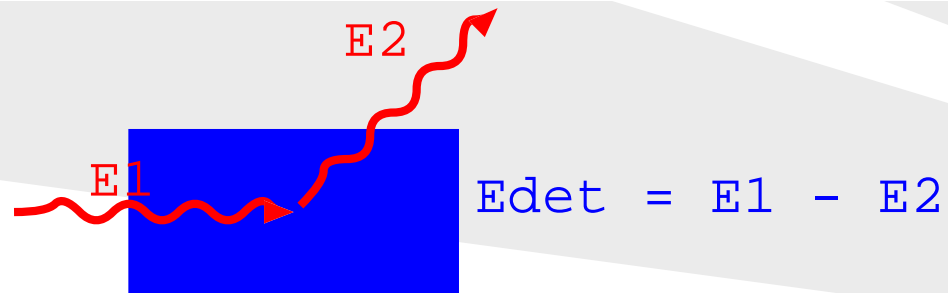
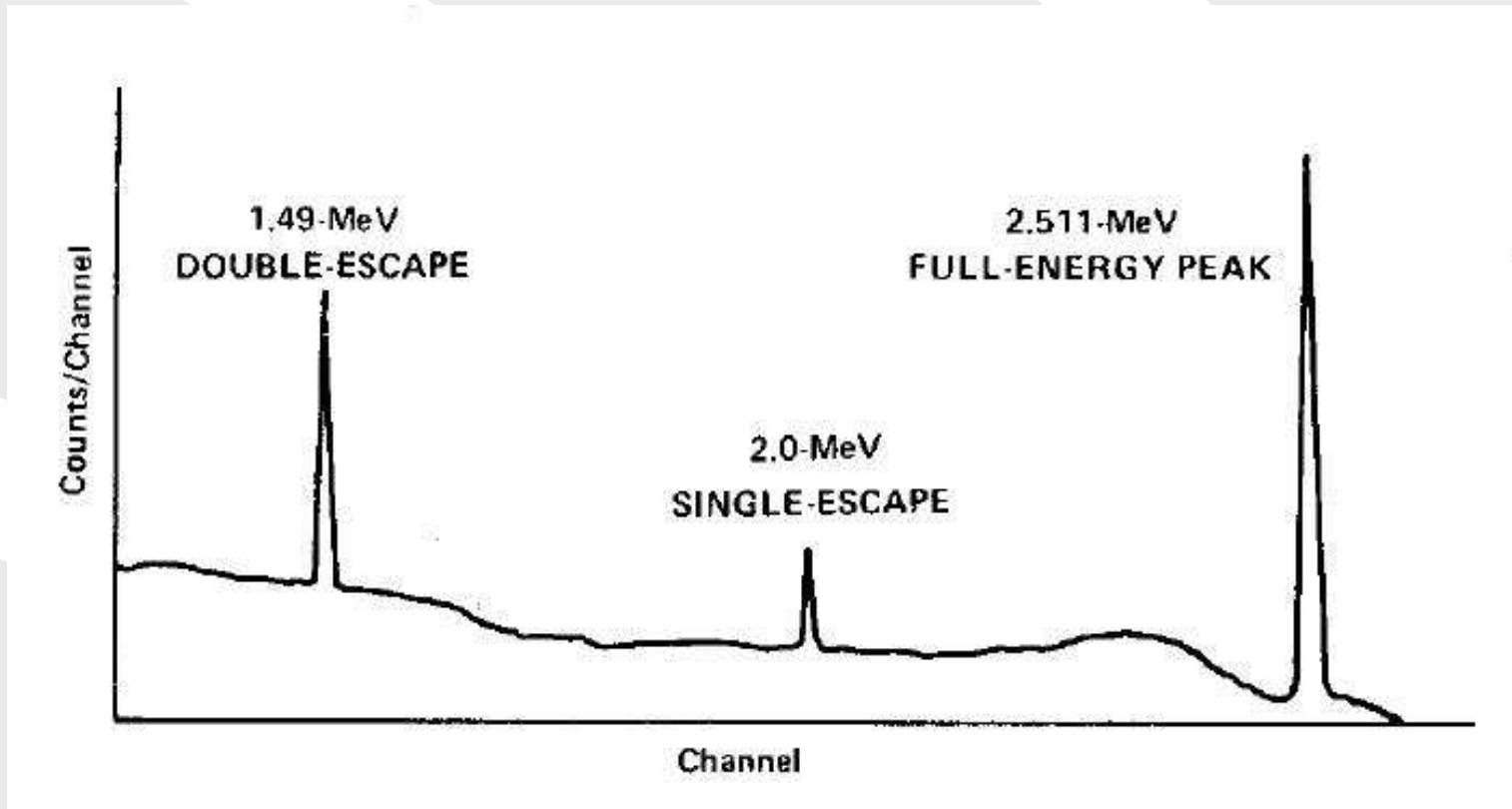
$dn$  - liczba rozproszonych cząstek

$dx$  - grubość tarczy

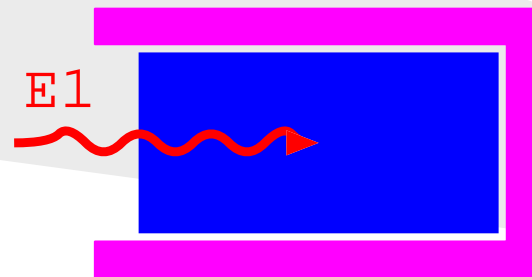
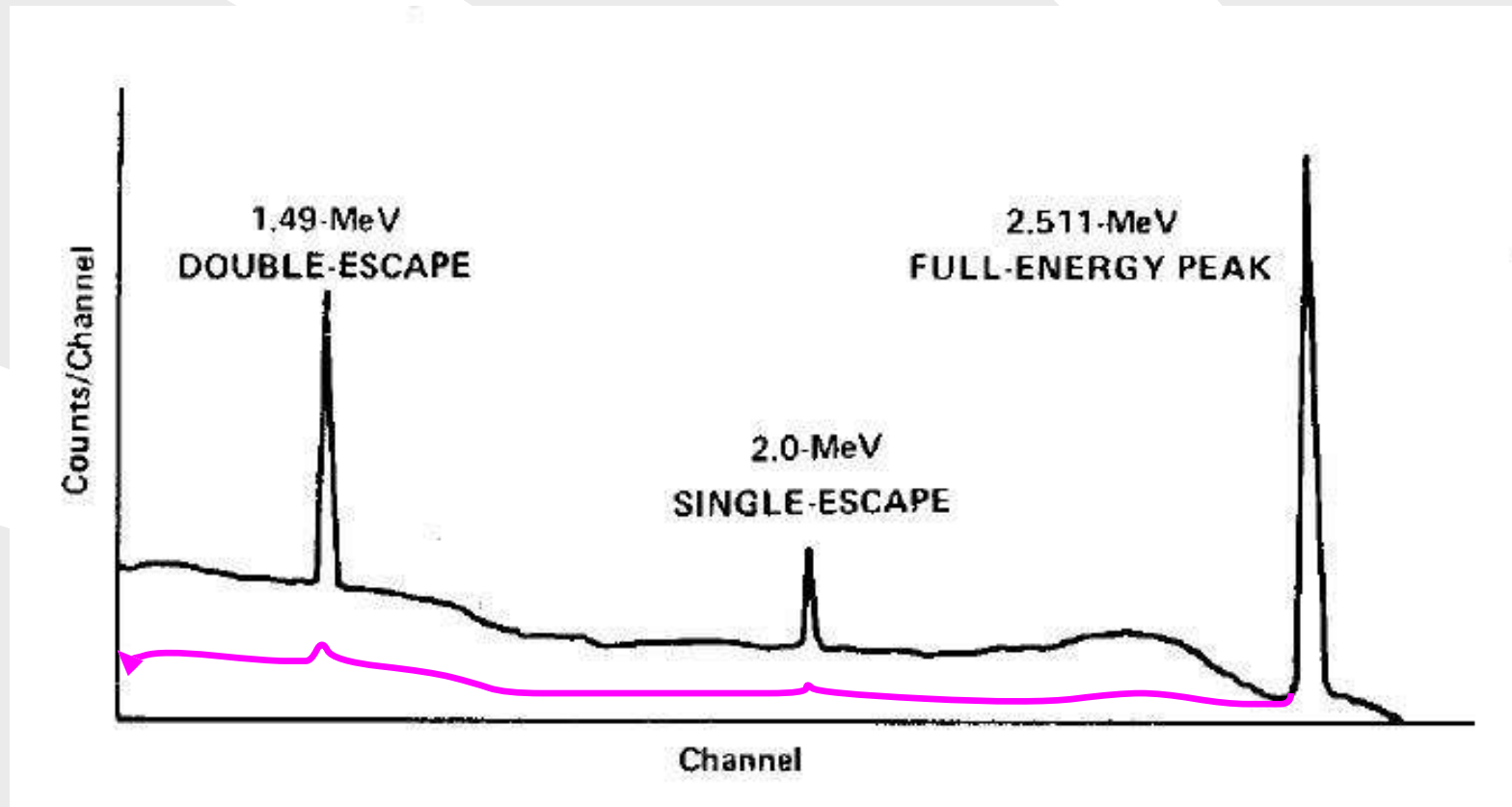
$n$  - liczba padających cząstek na jednostkę powierzchni tarczy w jednostkowym czasie

$N$  - gęstość centrów rozpraszania w tarczy

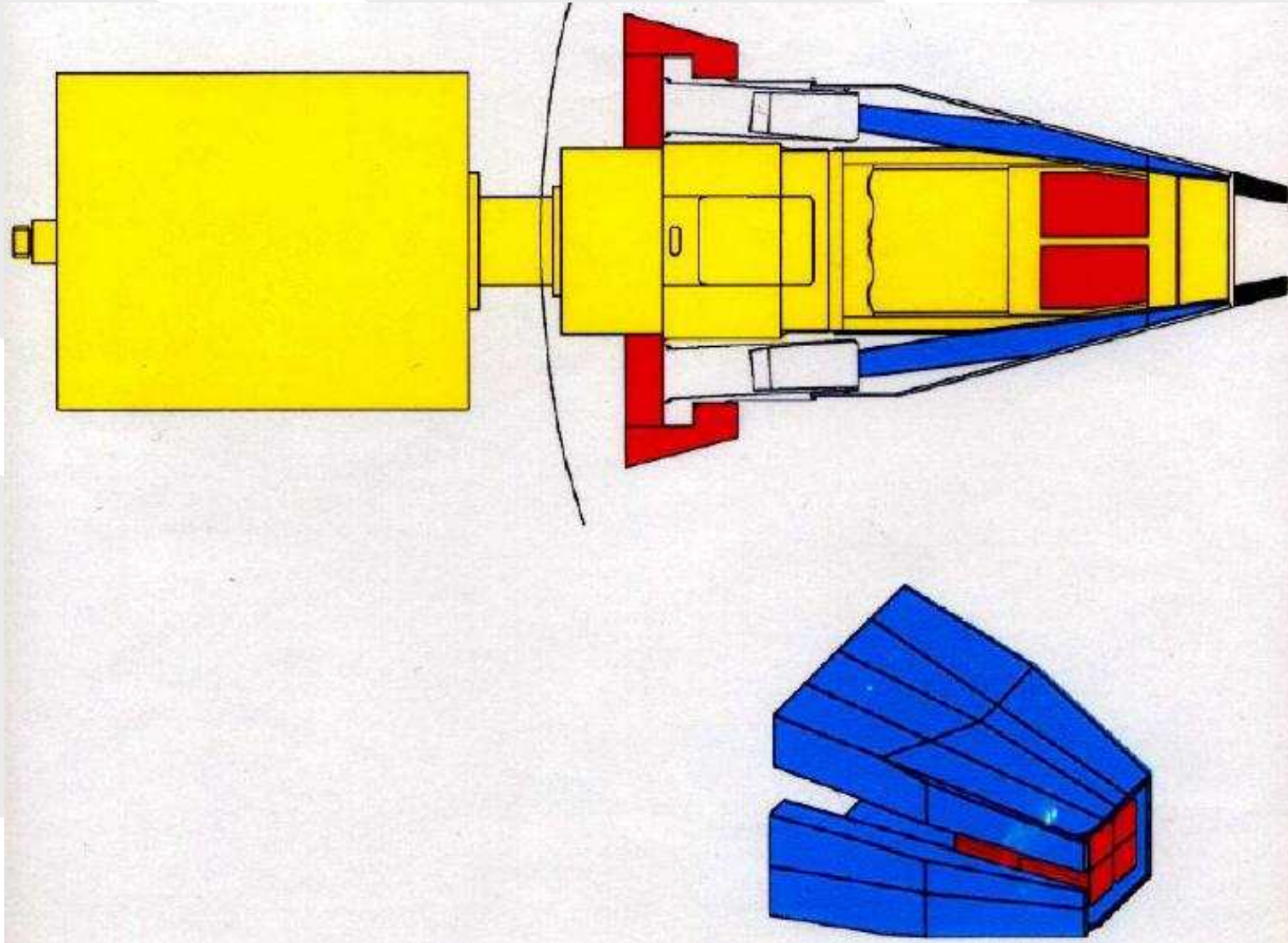
# Widmo kwantów $\gamma$ w detektorze Ge



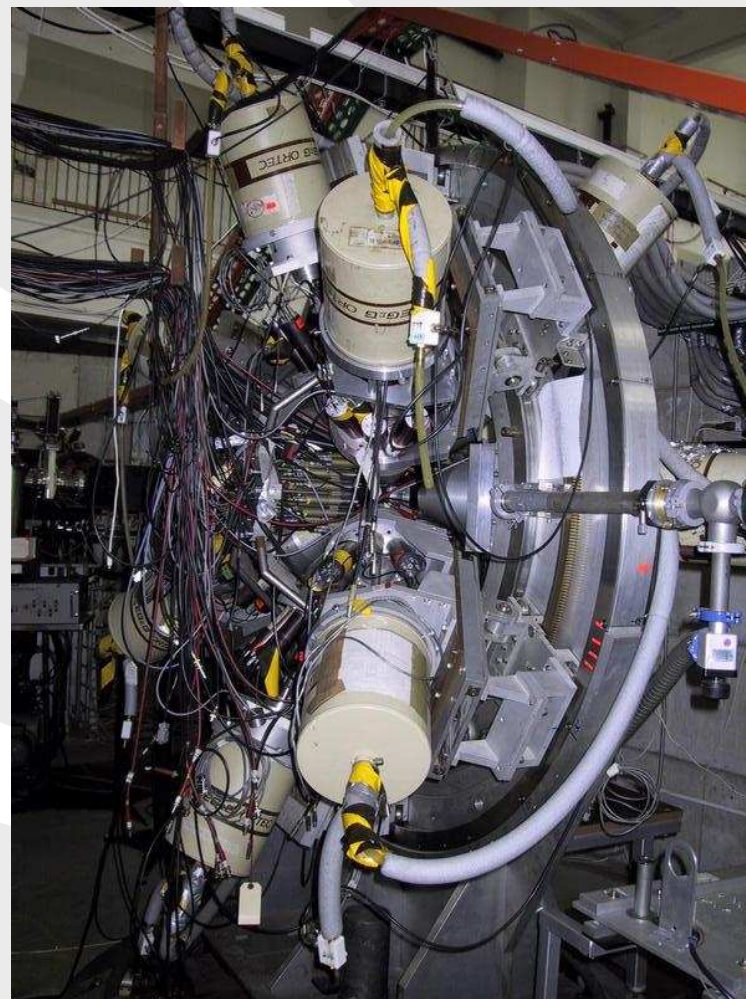
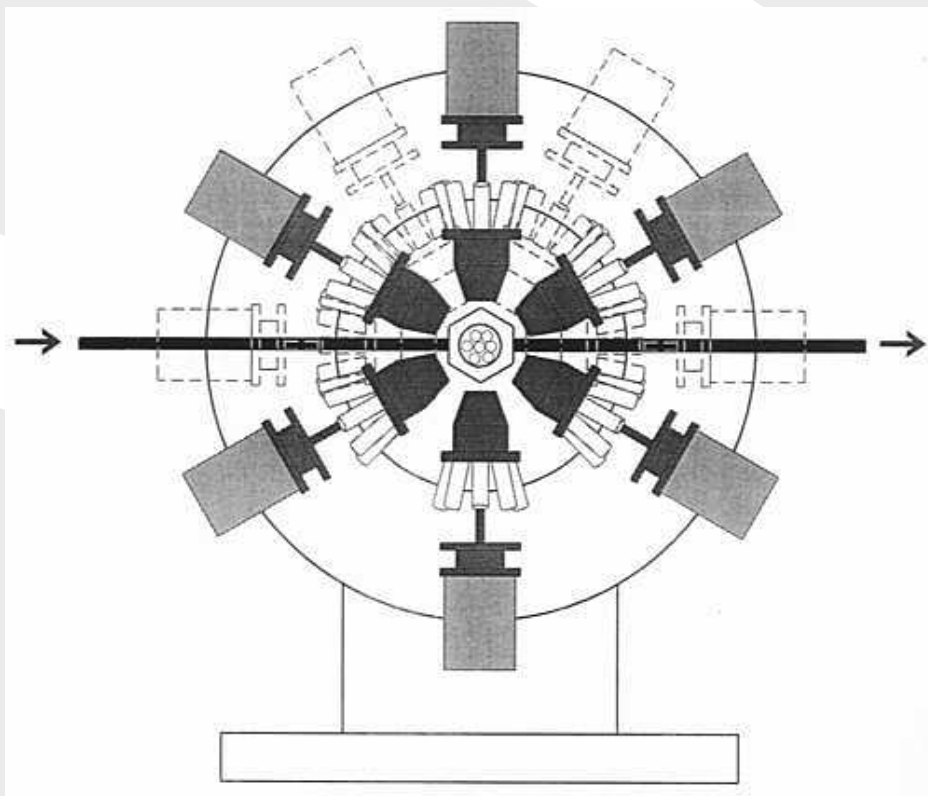
# Widmo w detektorze Ge z osłoną antykompiton.



# Detektor Ge z osłoną antykomptonowską



# Układy detektorów germanowych: OSIRIS



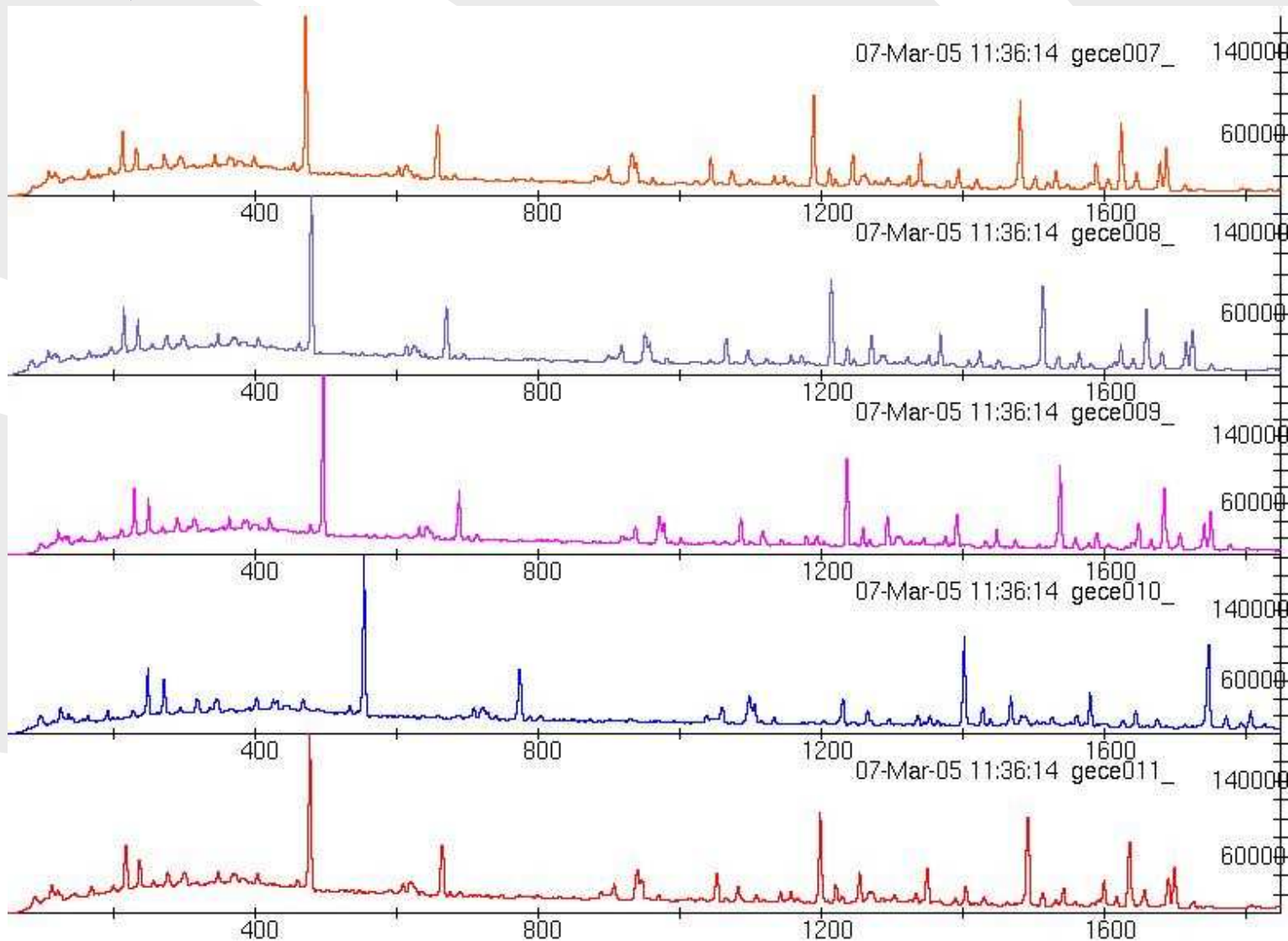
# *Układ detektorów germanowych: EAGLE*



# Widma "surowe"

$^{58}\text{Ni}(205\text{MeV}) + ^{45}\text{Sc}$

trigger: 2n



# Kalibracja energetyczna

---

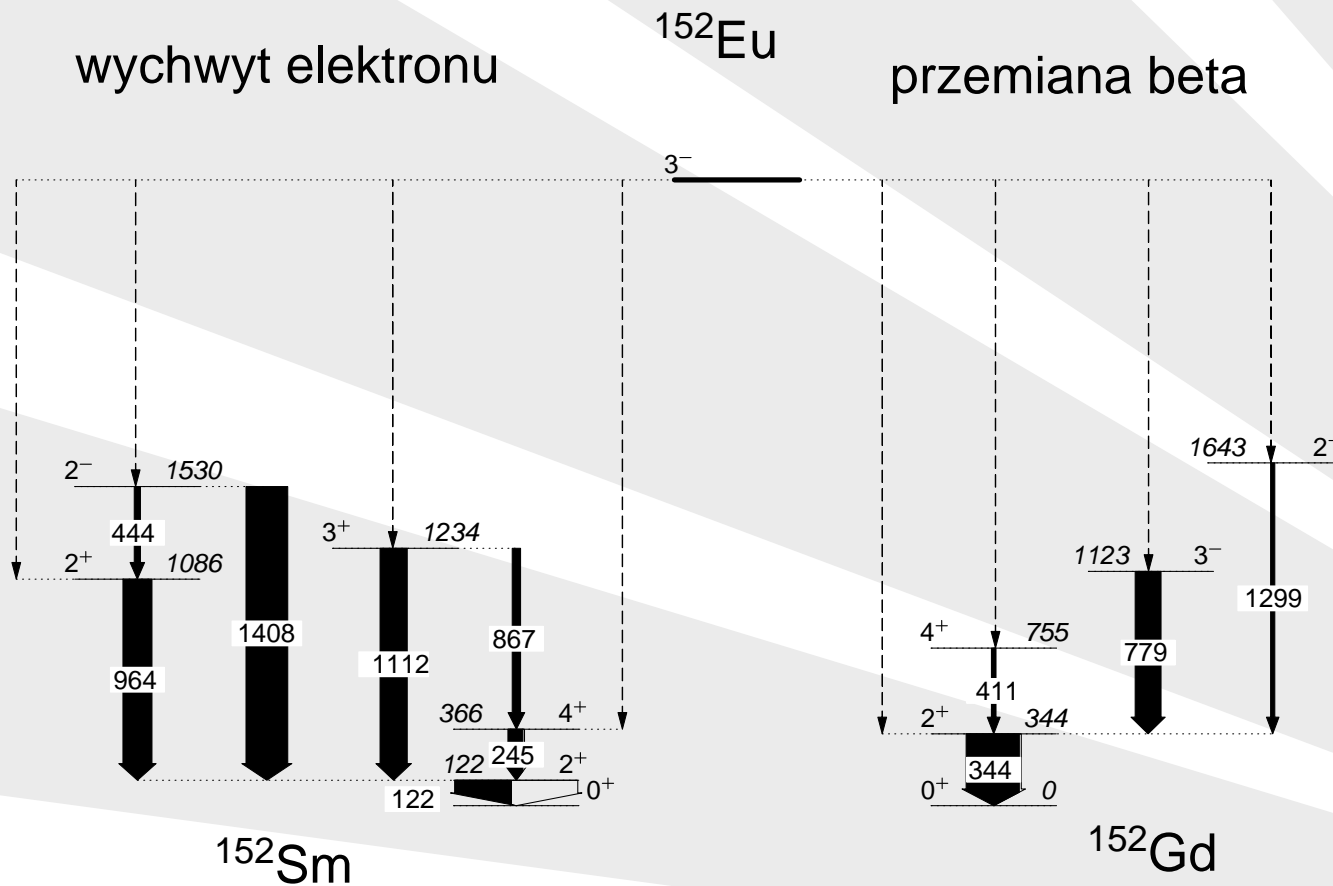
kwanty  $\gamma$  o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

$$\rightarrow E_\gamma = f(x) \quad \text{np. } E_\gamma = a_0 + a_1 * x$$

# Kalibracja energetyczna

kwanty  $\gamma$  o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

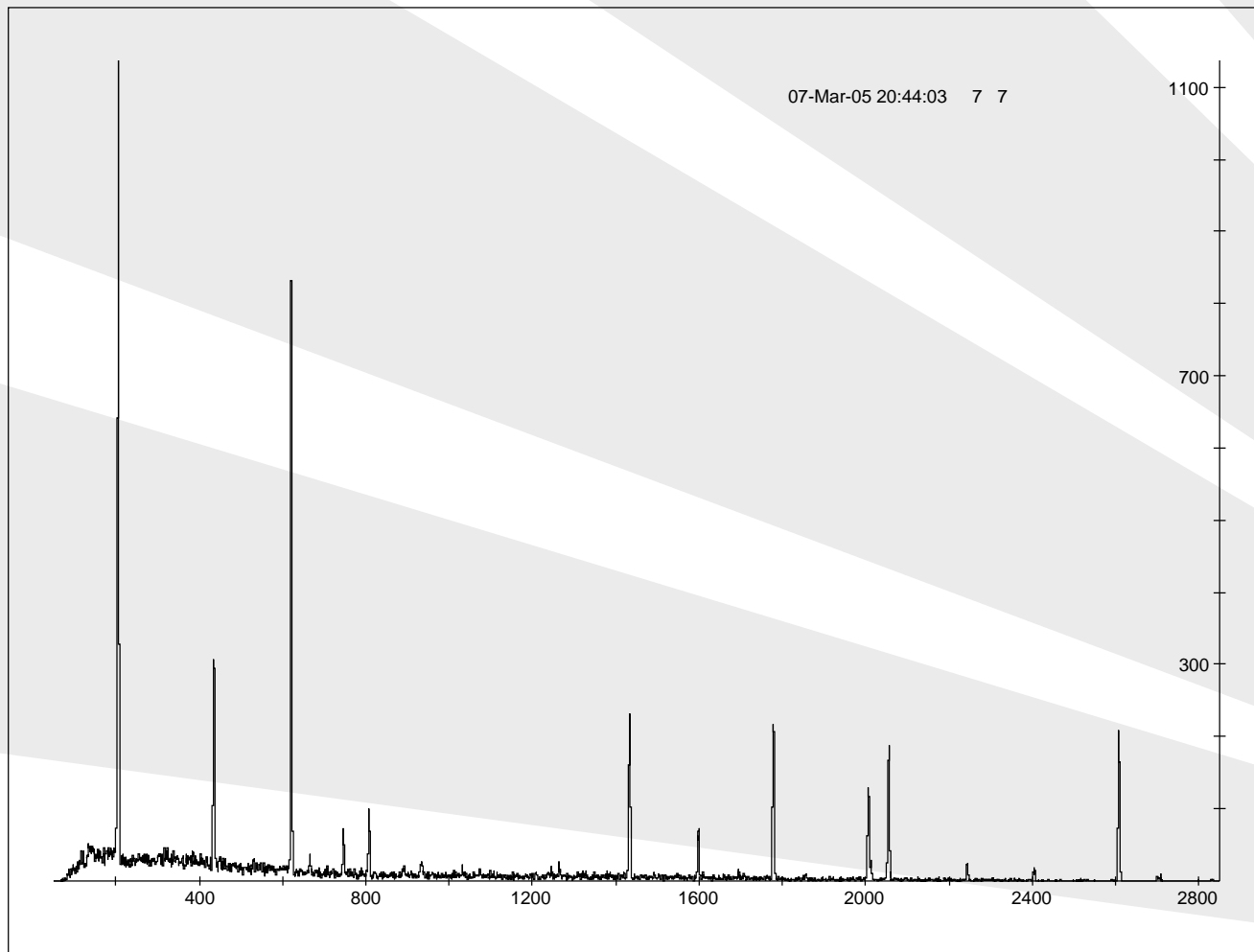
$$\rightarrow E_\gamma = f(x) \quad \text{np. } E_\gamma = a_0 + a_1 * x$$



# Kalibracja energetyczna

kwanty  $\gamma$  o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

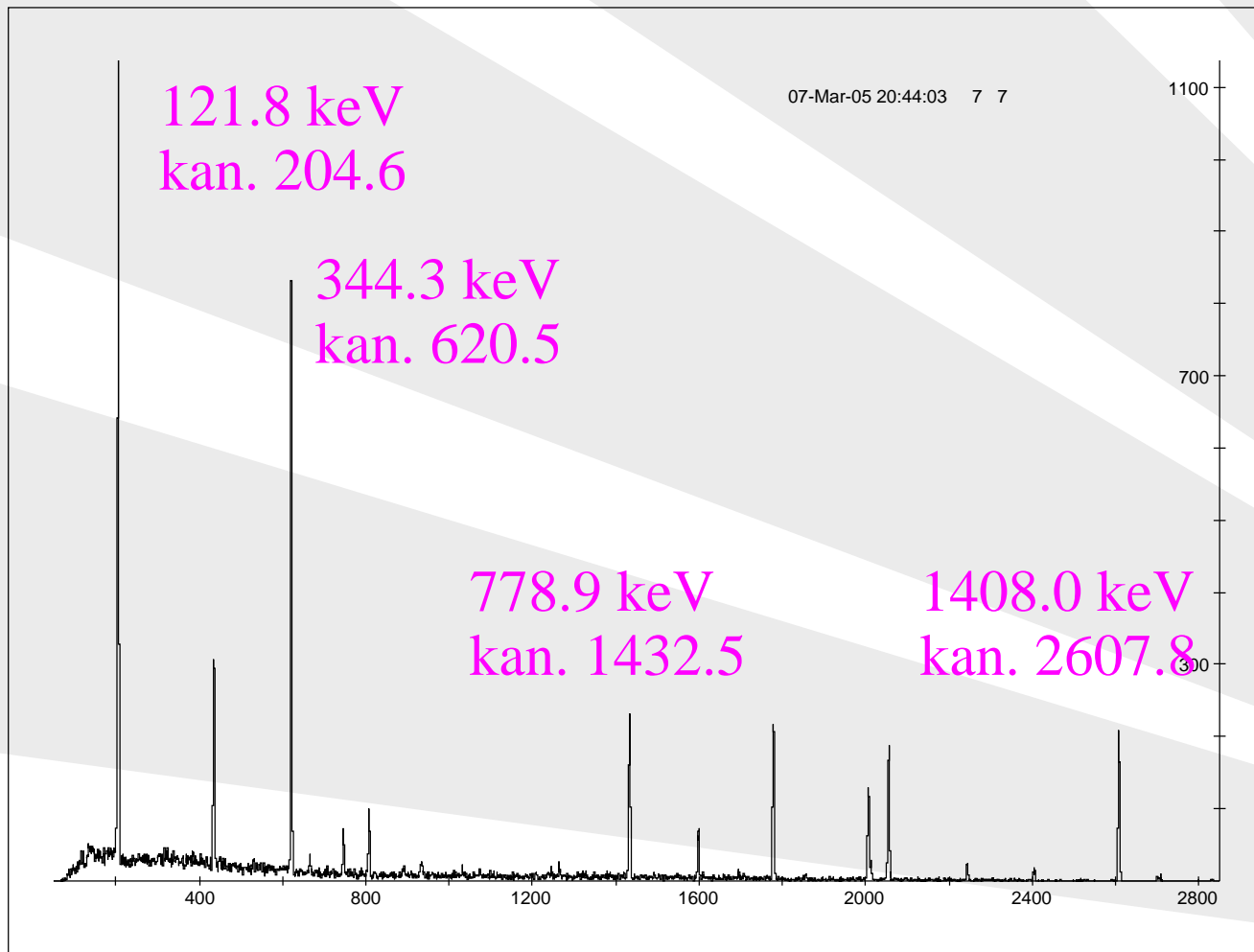
$$\rightarrow E_{\gamma} = f(x) \quad \text{np. } E_{\gamma} = a_0 + a_1 * x$$



# Kalibracja energetyczna

kwanty  $\gamma$  o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

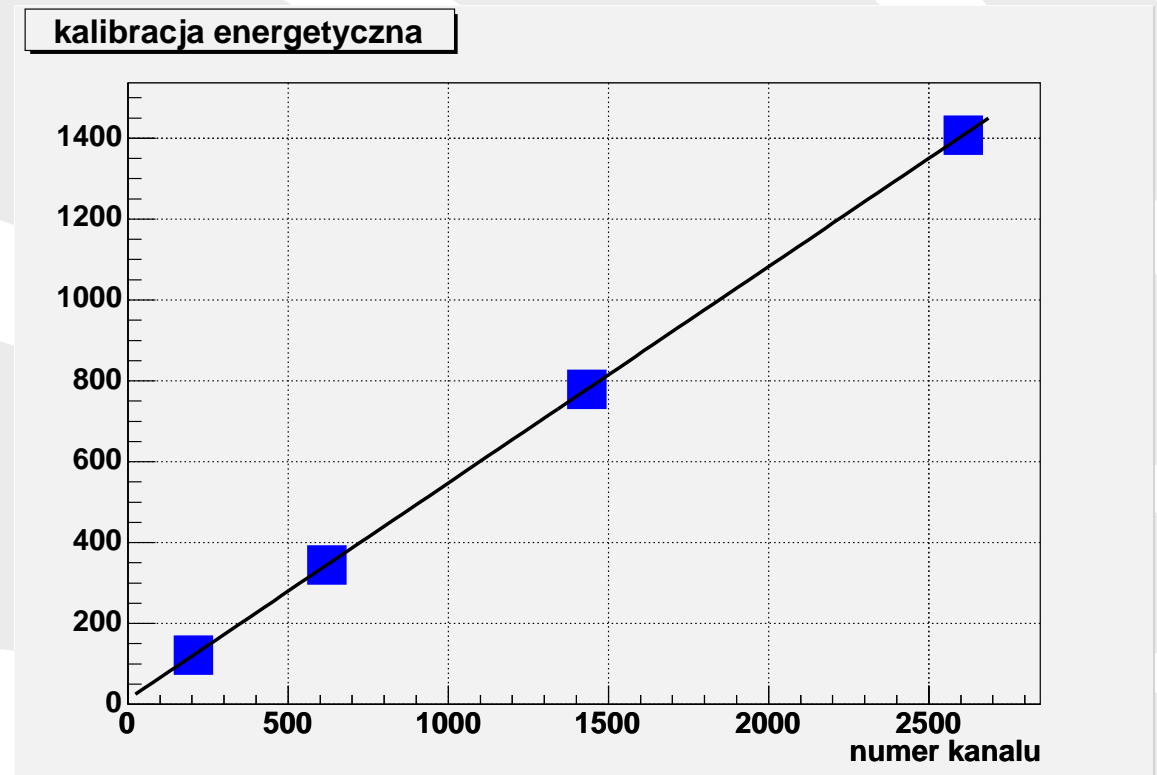
$$\rightarrow E_{\gamma} = f(x) \quad \text{np. } E_{\gamma} = a_0 + a_1 * x$$



# Kalibracja energetyczna — dopasowanie

nr. kanału	$E_\gamma$ (keV)
$204.58 \pm 0.03$	$121.783 \pm 0.002$
$620.54 \pm 0.08$	$344.276 \pm 0.004$
$1432.53 \pm 0.07$	$778.903 \pm 0.006$
$2607.8 \pm 0.2$	$1408.011 \pm 0.014$

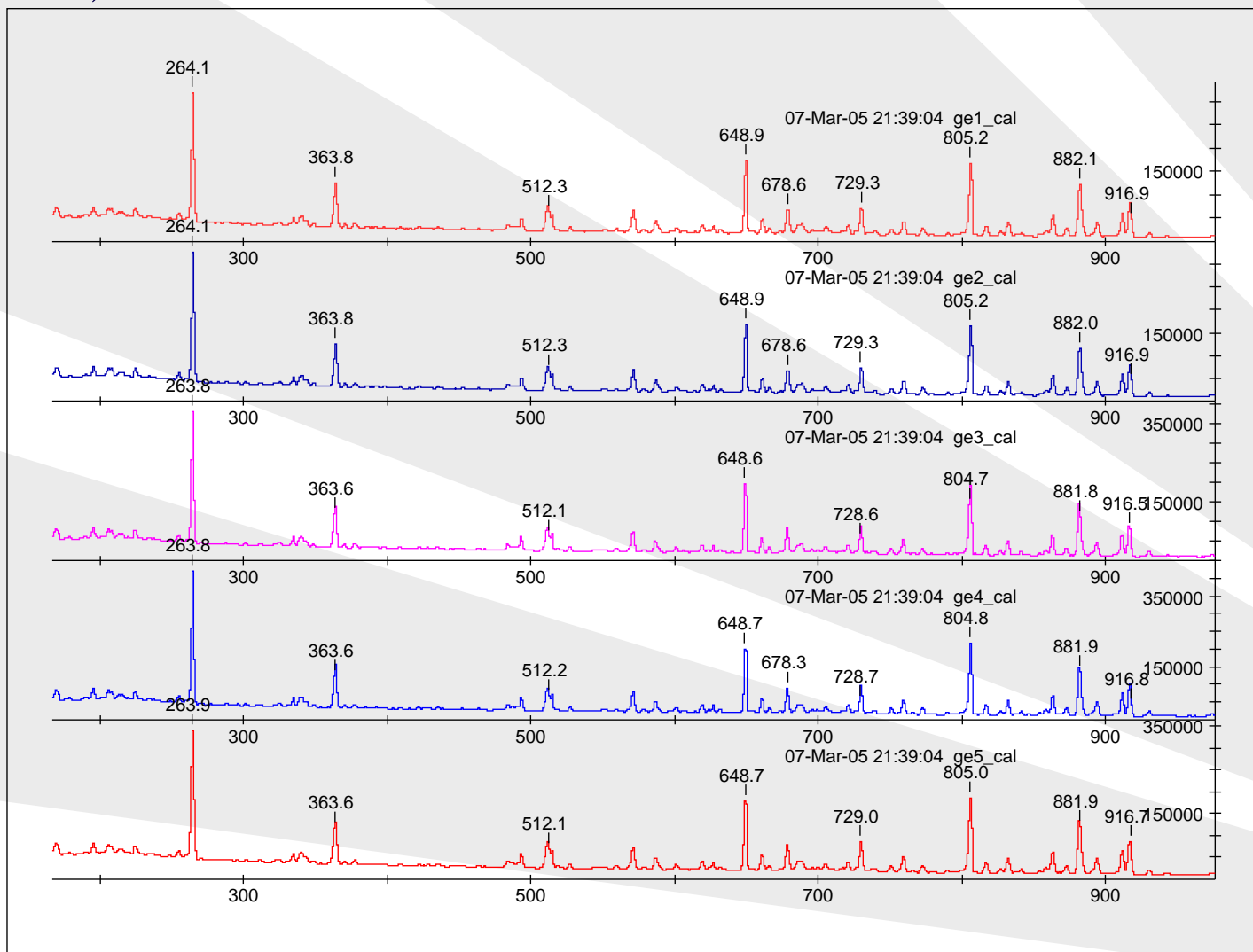
$$E_\gamma = 12.3 + 0.53515 * x$$



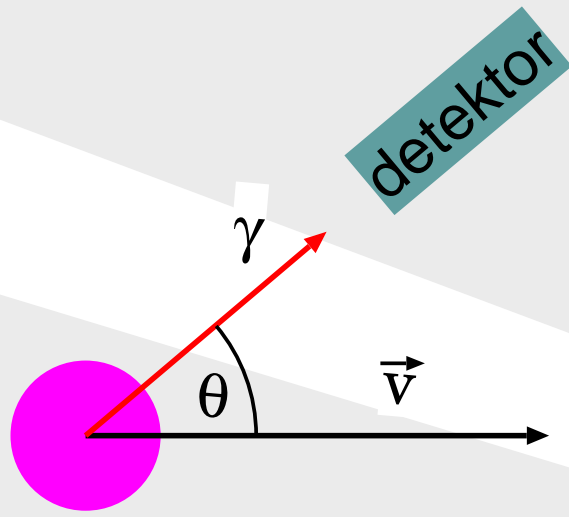
# Widma po kalibracji energetycznej

$^{58}\text{Ni}(205\text{MeV}) + ^{45}\text{Sc}$

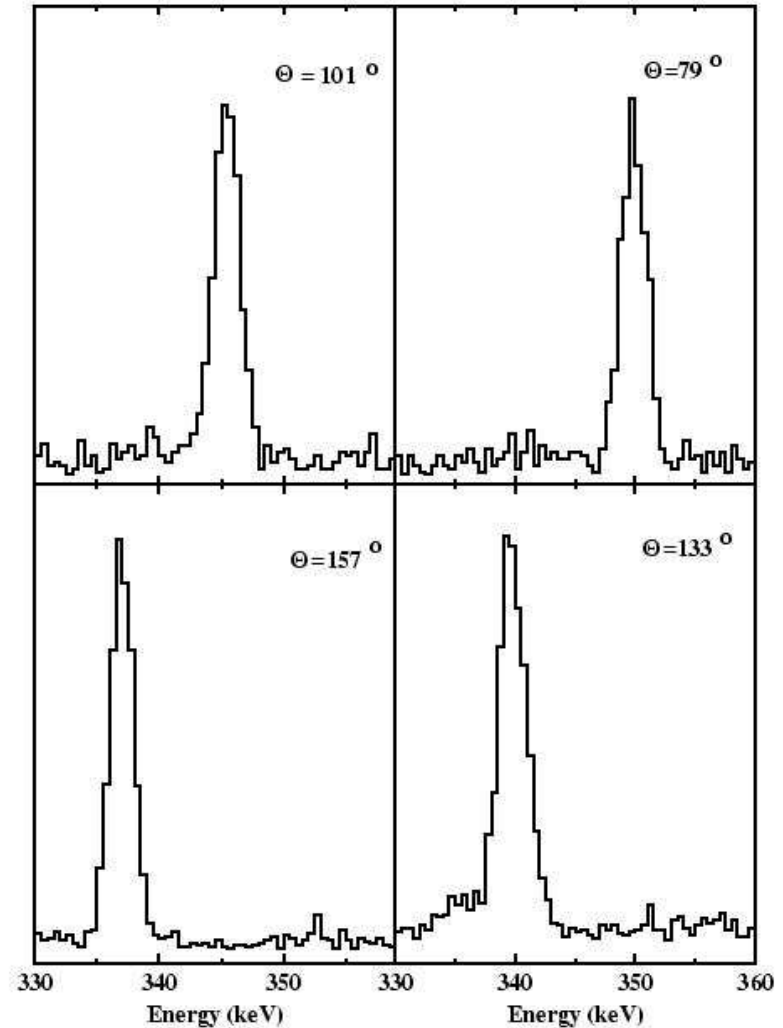
trigger: 2n



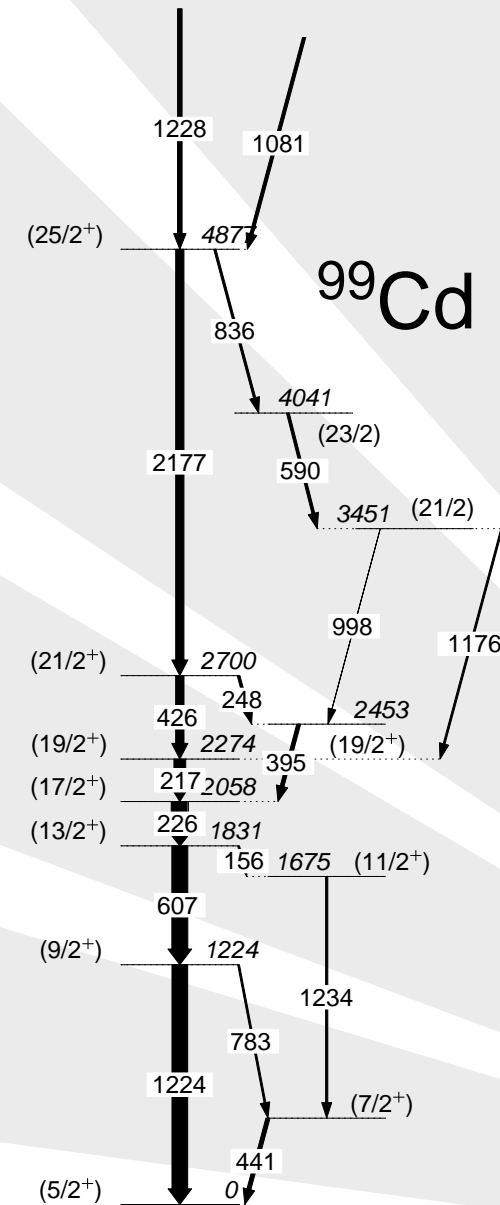
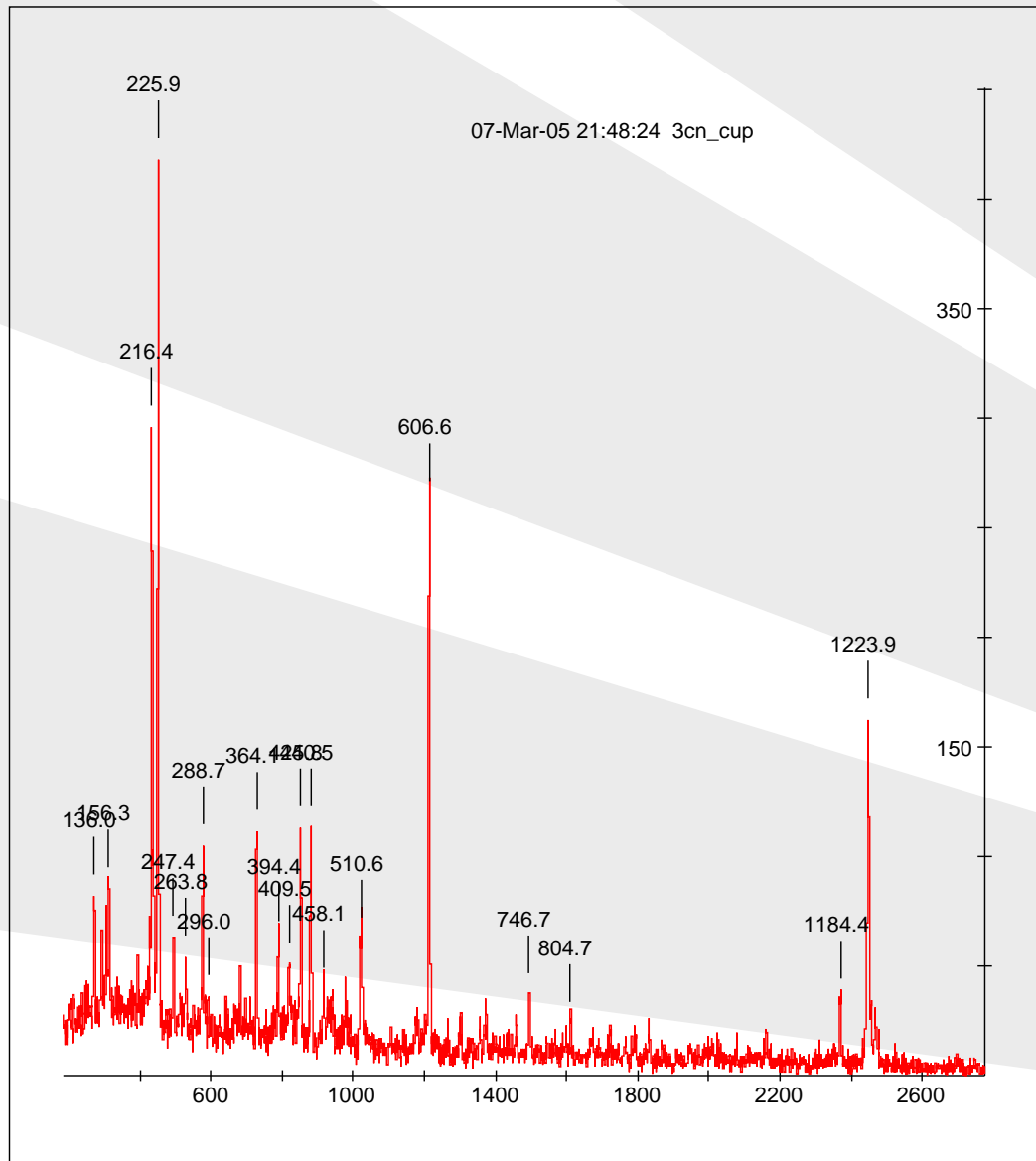
# Poprawka dopplerowska



$$E'_\gamma = E_\gamma \left(1 + \frac{v}{c} \cos(\theta)\right)$$



# Intensywność pików



# Kalibracja wydajnościowa

$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma$ względna intensywność (tablice)		
121.8	13620		
244.7	3590		
344.3	12750		
411.1	1070		
778.9	6190		
964.1	6920		
1112.1	6490		
1408.0	10000		

# Kalibracja wydajnościowa

$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma$ względna intensywność (tablice)	$N_\gamma$ liczba zliczeń (widmo)
121.8	13620	4607
244.7	3590	1077
344.3	12750	3081
411.1	1070	227
778.9	6190	1003
964.1	6920	995
1112.1	6490	859
1408.0	10000	1022

# Kalibracja wydajnościowa

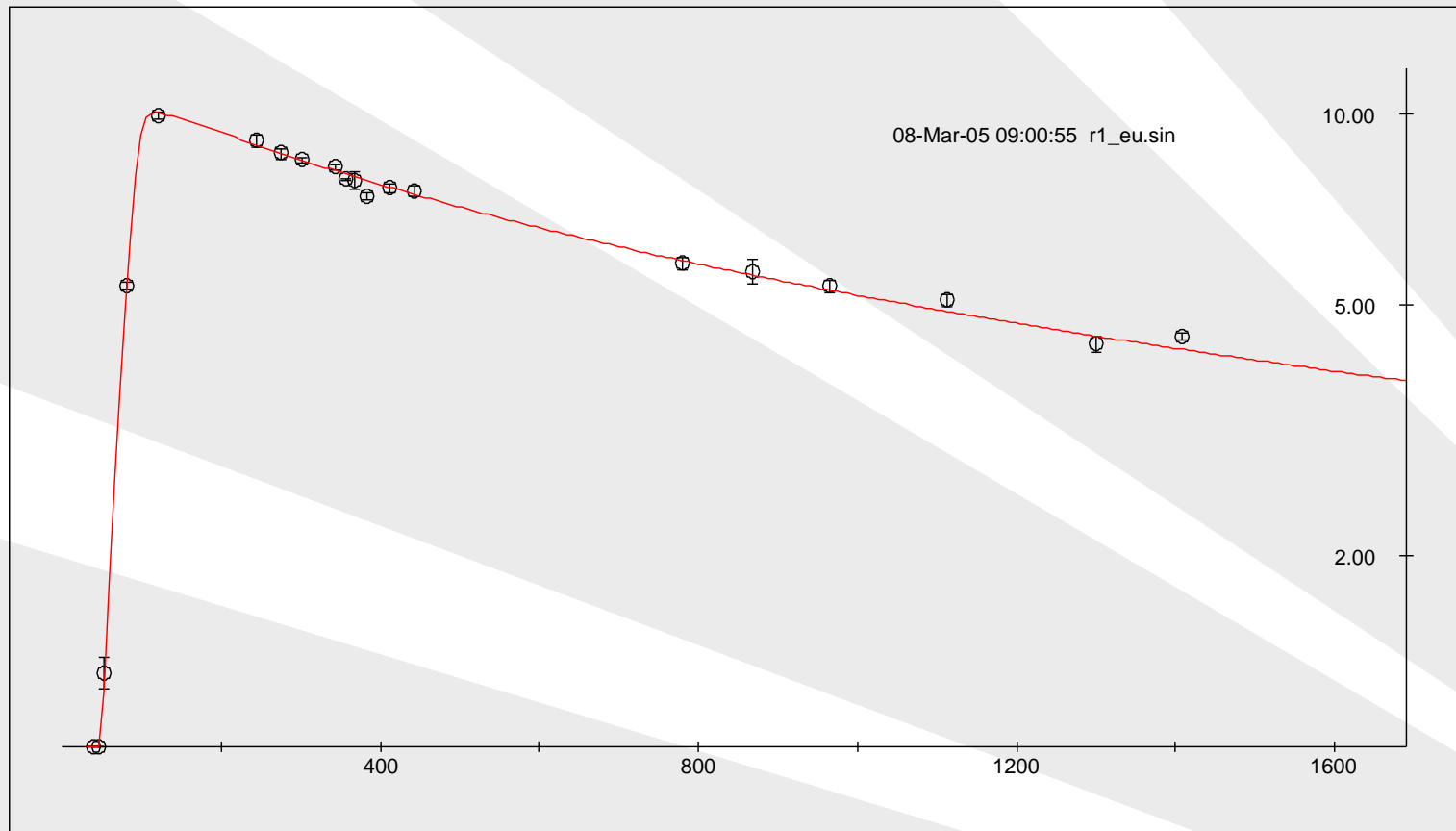
$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma$ względna intensywność (tablice)	$N_\gamma$ liczba zliczeń (widmo)	$\epsilon = N_\gamma/I_\gamma$ wydajność
121.8	13620	4607	0.34
244.7	3590	1077	0.30
344.3	12750	3081	0.24
411.1	1070	227	0.21
778.9	6190	1003	0.16
964.1	6920	995	0.14
1112.1	6490	859	0.13
1408.0	10000	1022	0.10

# Kalibracja wydajnościowa

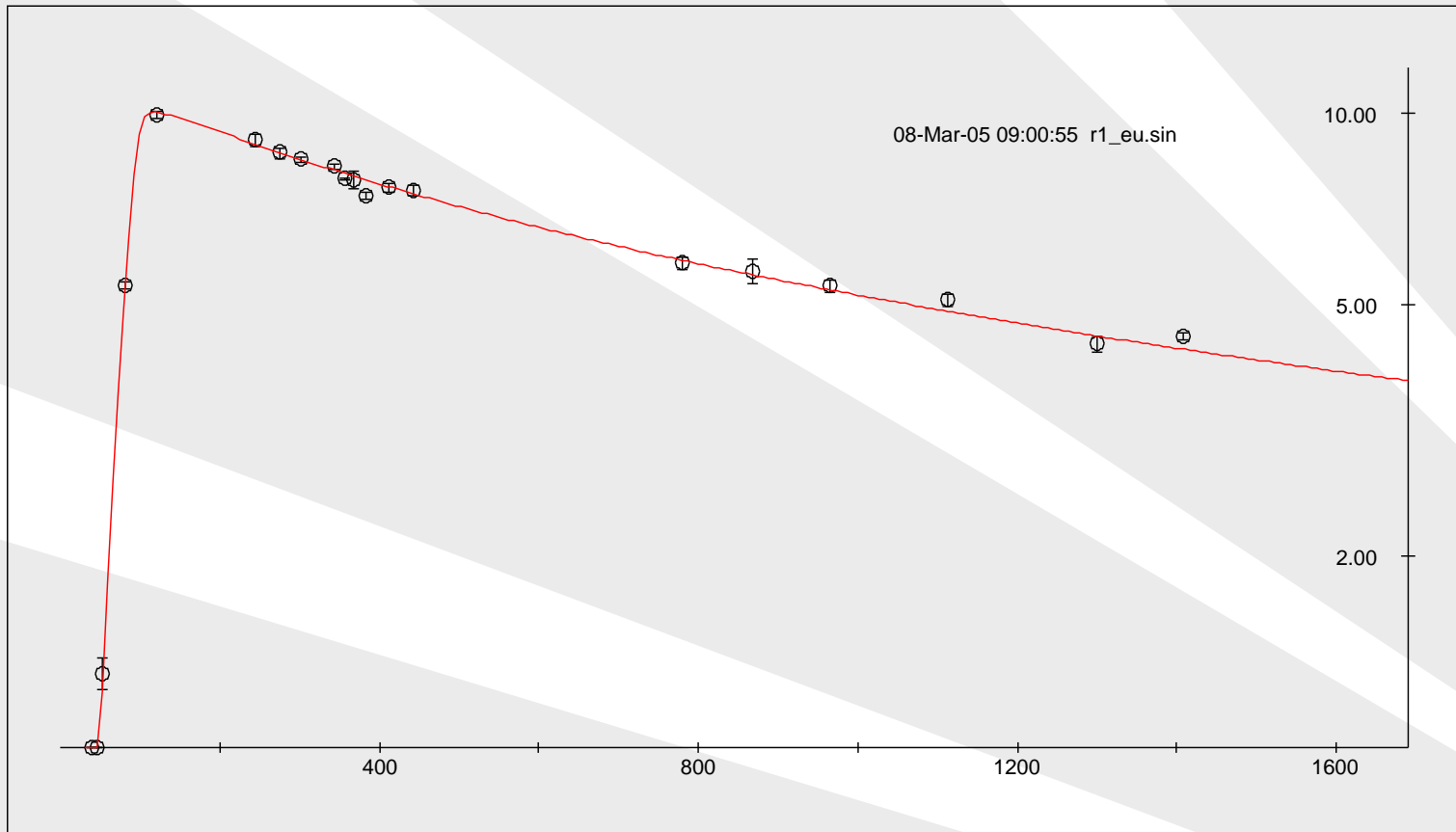
$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma$ względna intensywność (tablice)	$N_\gamma$ liczba zliczeń (widmo)	$\epsilon = N_\gamma/I_\gamma$ wydajność
121.8	13620	4607	0.34
244.7	3590	1077	0.30
344.3	12750	3081	0.24
411.1	1070	227	0.21
778.9	6190	1003	0.16
964.1	6920	995	0.14
1112.1	6490	859	0.13
1408.0	10000	1022	0.10

Jeżeli znana jest absolutna aktywność źródła ( $A = A_0 e^{-\lambda t}$ ),  
to możemy wyznaczyć absolutną wydajność detektora.

# Krzywa kalibracji wydajnościowej



# Krzywa kalibracji wydajnościowej



Poprawka na wydajność detektora:

$$I_{\gamma} = N_{\gamma} / \epsilon(E_{\gamma})$$

# Podsumowanie

---

- Oddziaływanie z materią elektronów, ciężkich cząstek naładowanych, neutronów i kwantów  $\gamma$  (X)
- Parametry charakteryzujące detektor: wydajność, rozdzielczość energetyczna i czasowa, liniowość, P/T, czas martwy
- Jonizacyjny detektor gazowy, scyntylator, detektor półprzewodnikowy
- Kalibracja energetyczna i wydajnościowa detektora

## Literatura:

- Glenn F.Knoll, *Radiation detection and measurement*
- W.R.Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*