

---

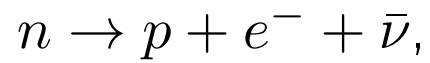
Detekcja  
promieniowania elektromagnetycznego  
cząstek naładowanych  
i neutronów

Marcin Palacz

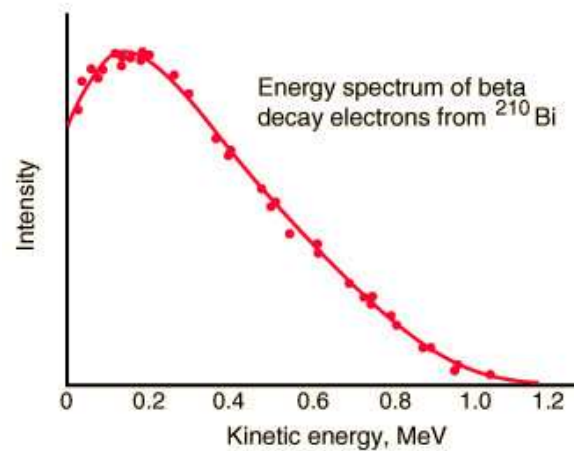
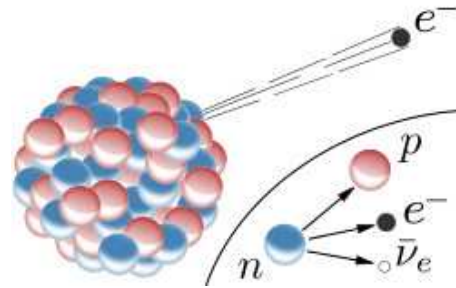
*Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów UW*

# Rodzaje i źródła promieniowania jonizującego 1/6

□ Promieniowanie  $\beta$ :



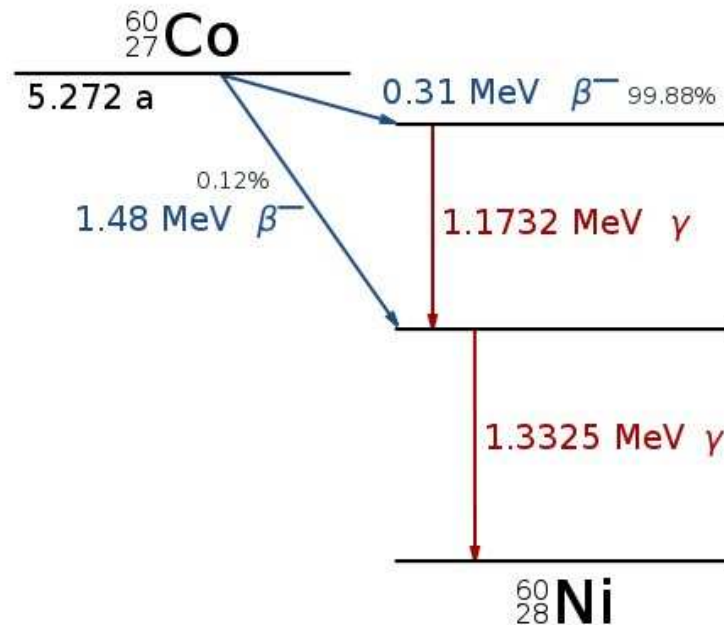
(ciągłe widmo  $e^{-}$  i  $e^{+}$ )



# Rodzaje i źródła promieniowania jonizującego 2/6

## □ Promieniowanie $\gamma$

- Liczne źródła “ $\gamma$ ”: emisja  $\gamma$  następuje po przemianie, w której powstaje jądro potomne w stanie wzbudzonym.



Deeksycytacja stanów wzbudzonych jąder potomnych.

- Anihilacja  $e^+e^-$  (np. po przemianie  $\beta$ ) 2 kwanty  $\gamma$  po 511 keV

# Rodzaje i źródła promieniowania jonizującego 3/6

---

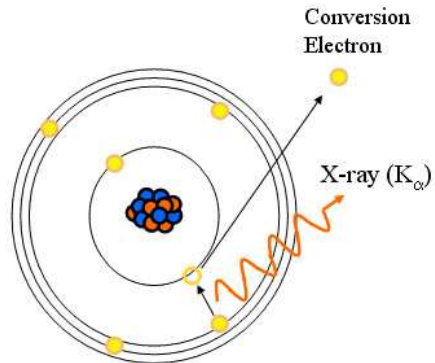
- Promieniowanie X
  - Zmiana układu elektronów na powłokach atomowych, wypełnienie “dziury”  
(KX:  $< 1$  keV do 100 keV)
  - Promieniowanie hamowania szybkich elektronów (np. lampa roentgenowska)

Z punktu widzenia detekcji:  $X \equiv \gamma$ .

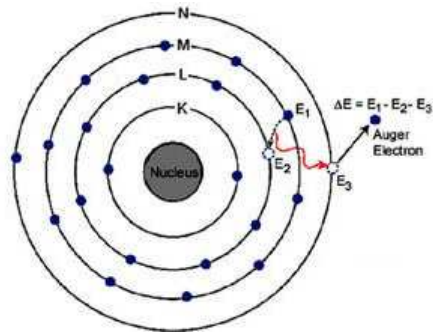
# Rodzaje i źródła promieniowania jonizującego 4/6

## □ Elektrony (inne niż $\beta$ ):

- konwersja wewnętrzna ( $E_{e^-} = E_{ex} - E_b$ )



- elektrony Auger (energia uwolniona przy wypełnianiu dziury na powłoce atomowej zostaje przekazana elektronowi z jednej z zewnętrznych powłok)



# Rodzaje i źródła promieniowania jonizującego 5/6

---

- Promieniowanie  $\alpha$ 
  - Rozpad  $\alpha$ :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-Z}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$   
(dyskretna energia, 4–6 MeV dla źródeł laboratoryjnych)
- Ciężkie cząstki naładowane
  - Spontaniczne rozszczepienie (fragmenty)

# Rodzaje i źródła promieniowania jonizującego 6/6

---

## □ Neutrony:

- Spontaniczne rozszczepienie (np. źródło:  $^{252}\text{Cf}$ )
- Źródła ( $\alpha, n$ ) np  $\frac{4}{2}\alpha + \frac{9}{4}\text{Be} \rightarrow \frac{12}{6}\text{C} + \frac{1}{0}\text{n}$
- Źródła ( $\gamma, n$ ) (tarcza:  $^9\text{Be}$ ,  $^2\text{H}$ )

# Promieniowanie “na wiązce”

Wszystkie rodzaje promieniowania:

elektromagnetyczne ( $\gamma$ , X),

$e^-$ ,  $e^+$ ,

neutrony, protony,  $\alpha$ ,

ciężkie cząstki naładowane,

obecne są w eksperymentach wykonywanych z użyciem wiązki jonów przyspieszanych przez akcelerator, zakres energii: eV do kilkudziesięciu MeV

Promieniowanie niesie informację o:

mechanizmach reakcji, oddziaływaniach,

energiach, spinach i parzystości stanów wzbudzonych jąder,

sposobach rozpadu,

kształtach (deformacja) , czasach życia

ruchach kolektywnych (rotacja, wibracja, ... ),

momentach magnetycznych, ...

Wydajne i precyzyjne metody detekcji niezbędne do:

selekcji interesujących przypadków,

analizy własności promieniowania

→ struktura materii jądrowej, mechanizm reakcji



# Rodzaje promieniowania a detekcja

Detekcja promieniowanie możliwa poprzez jego oddziaływanie z materią.

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

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

# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych

- Jednoczesne, ciągłe oddziaływanie z wieloma elektronami ośrodka, maksymalny jednokrotny transfer energii:  $\sim \frac{1}{500}E$  na nukleon
- Produkcja elektronów  $\delta$
- Ruch  $\sim$  prostoliniowy

- Wzór Bethe (nierel.):  $-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} \cdot N \cdot Z \cdot \ln \frac{2m_e v^2}{I}$

$v, z$  prędkość i ładunek pocisku

$Z$  liczba atomowa materiału detektora

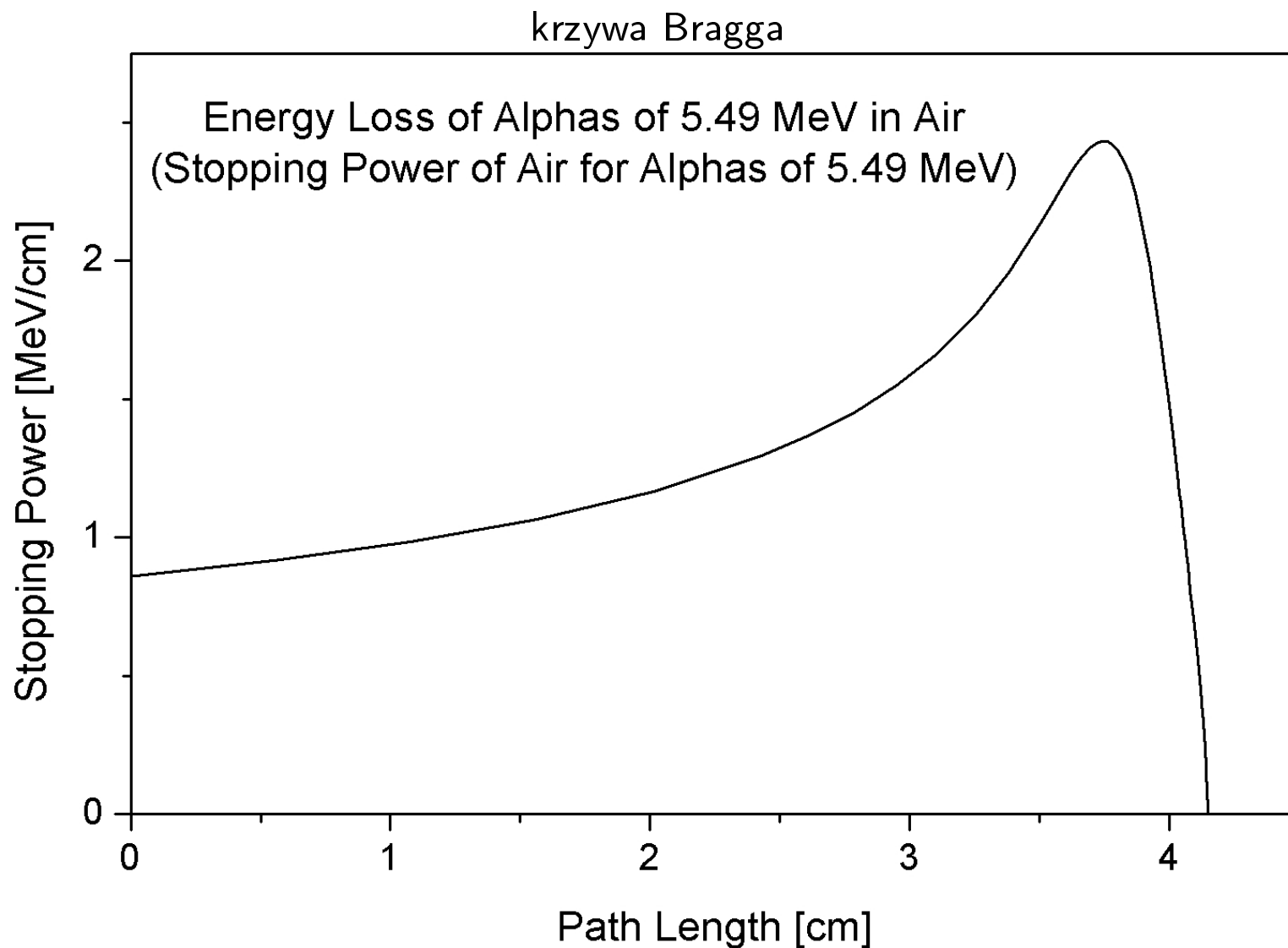
$N$  liczba atomów na jednostkę objętości w materiale detektora

$m_e$  masa spoczynkowa elektronu

$e$  ładunek elementarny

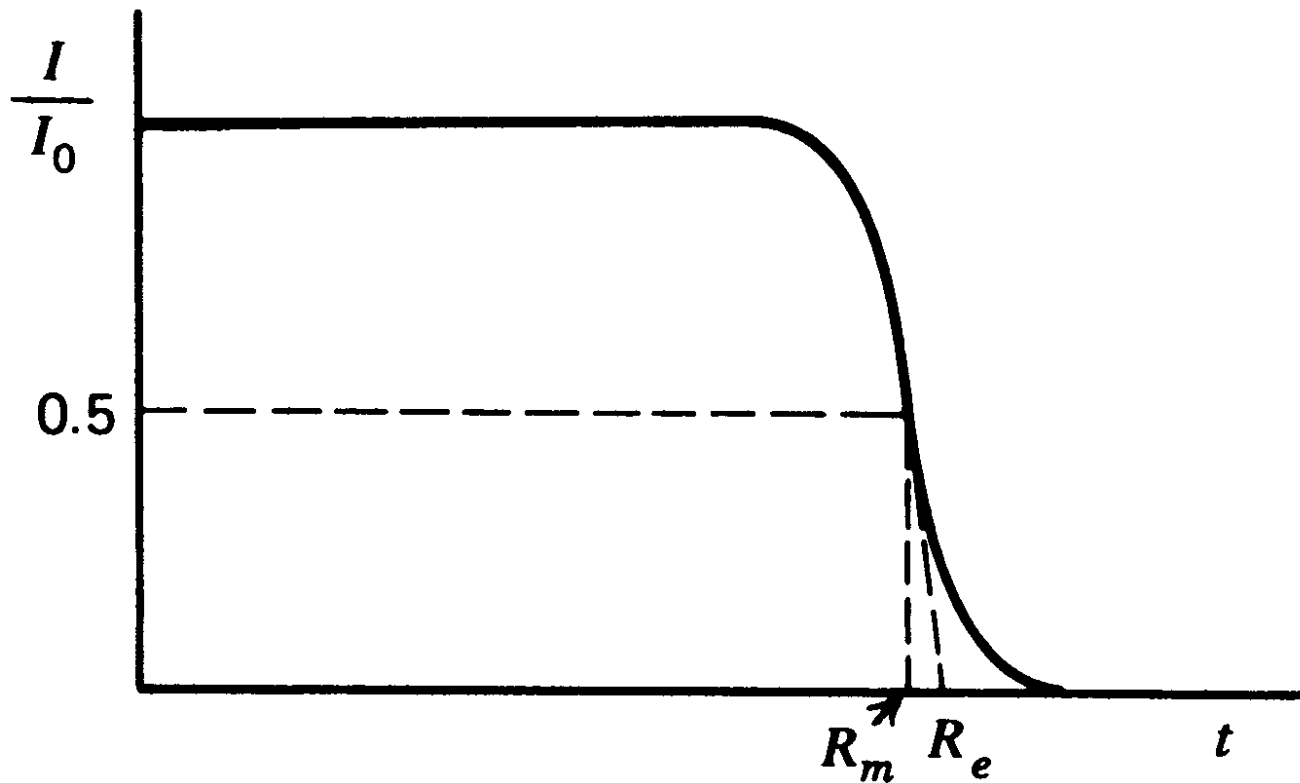
$I$  średni potencjał jonizacyjny atomów detektora ( $I \approx Z \cdot 10eV$ )

# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych

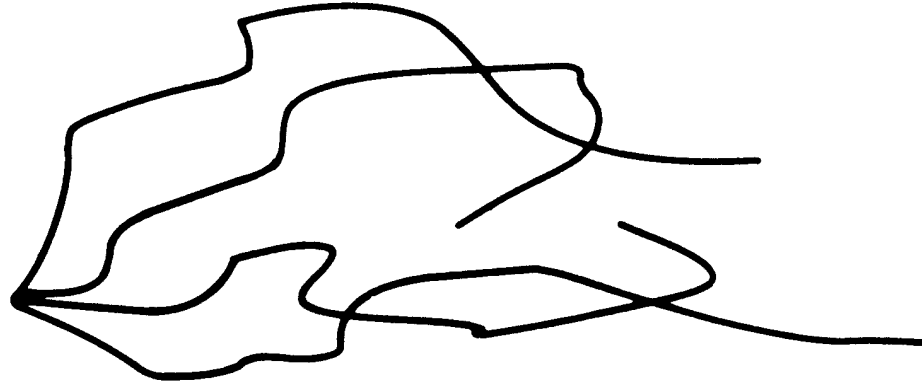


# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych

dobrze zdefiniowany zasięg



# Odziaływanie elektronów



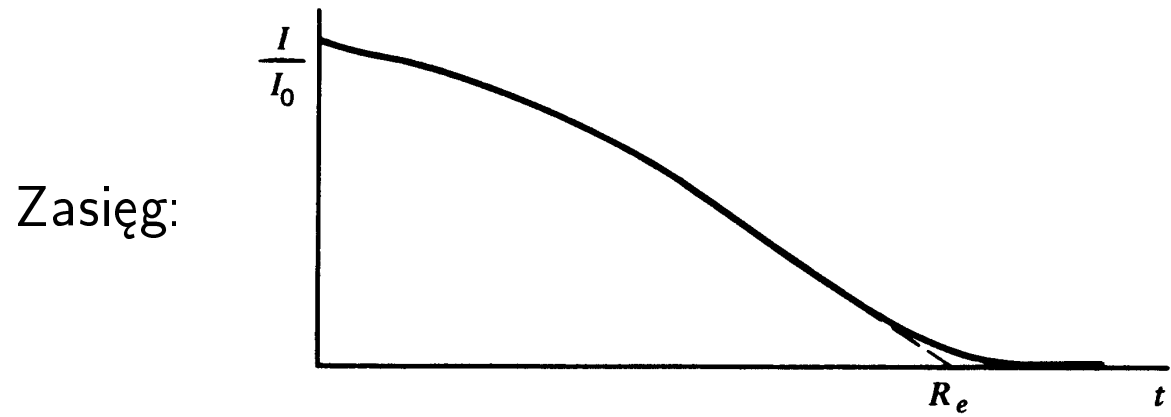
procesy coulombowskie oraz radiacyjne:

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

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_c = \frac{2\pi e^4 N Z}{m_e v^2} \left( \ln \frac{m_e v^2 E}{2I^2 (1 - \beta^2)} - \text{czł\k{o}n relatywistyczny} \right)$$

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_r = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_e^2 c^4} \left( 4 \ln \frac{2E}{m_e c^2} - \frac{4}{3} \right)$$

# Odziaływanie elektronów



# Oddziaływanie neutronów

- oddziaływanie z jądrami: elastyczne i nieelastyczne rozpraszanie, wychwyty
- produktami oddziaływania są ciężkie cząstki naładowane
- prawdopodobieństwo różnych oddziaływań silnie zależne od energii (szybkie i powolne neutrony, umownie poniżej i powyżej ok. 0.5 eV)
- powolne neutrony:
  - energia przekazana jądrom ośrodka w oddz. elastycznych jest mała, detekcja oparta na oddz. nieelastycznych z  $Q > 0$  (wychwyty radiacyjne)
- szybkie neutrony:
  - możliwa detekcja jąder odrzutu
  - najbardziej efektywny absorber: protony (wodór) (cała energia kinetyczna neutronu może być oddana w jednym oddziaływaniu)
  - możliwe reakcje nieelastyczne, prowadzące do wzbudzenia jąder ośrodka i emisji  $\gamma(Q > 0)$

# Oddziaływanie kwantów promieniowania elektro-magnetycznego

---

Nieco później ...



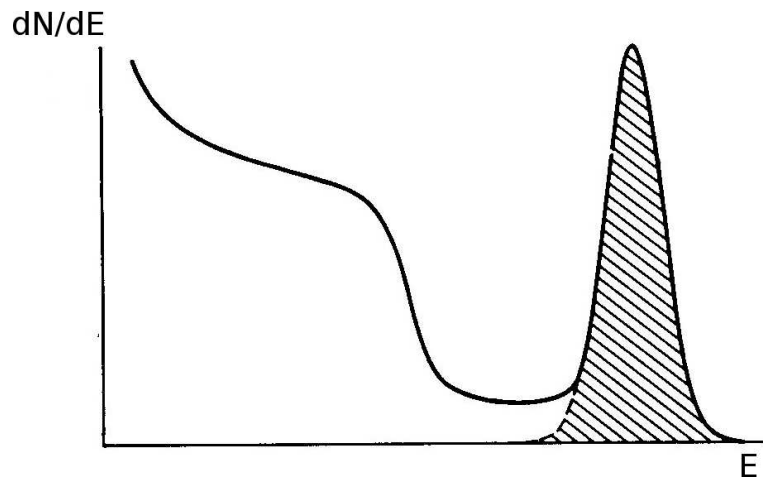
# Podstawowe własności detektora 1/2

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

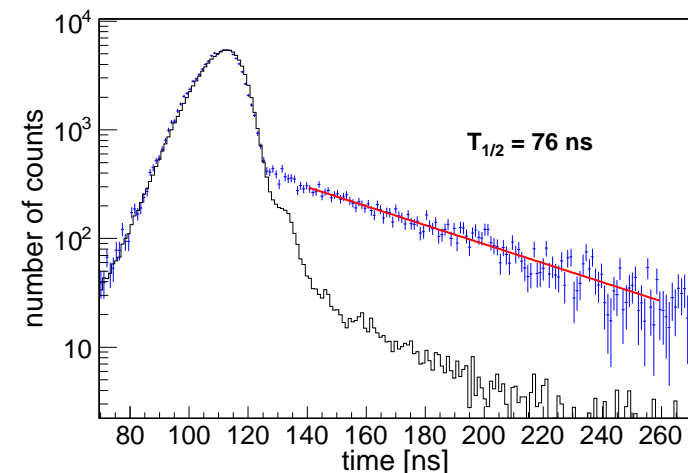
Ładunek zebrany  $\Rightarrow$  sygnał elektryczny (czas: ns do ms).

Amplituda sygnału ( $H$ ) jest (może być) proporcjonalna do liczby ( $n$ ) zebranych nośników ładunku.

Idealny detektor  $H \sim E$ .



Widmo energetyczne



Widmo czasowe

## Podstawowe własności detektora 2/2

---

Parametry detektora:

- wydajność  $\epsilon = N_{rej}/N$  (wewnętrzna, absolutna)
- energetyczna zdolność rozdzielcza (FWHM)

$$\frac{FWHM}{H} = \frac{2.35\sqrt{n}}{n} = \frac{2.35}{\sqrt{n}}$$

$n$  — liczba nośników

- $P/T = N_{pik}/N_{total}$
- szybkość odpowiedzi (od ps do ms)
- czasowa zdolność rozdzielcza
- czas martwy

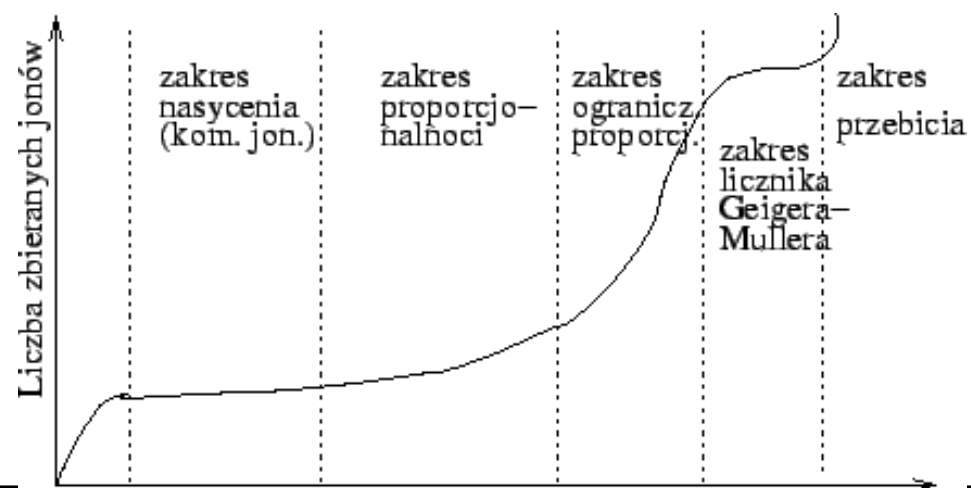
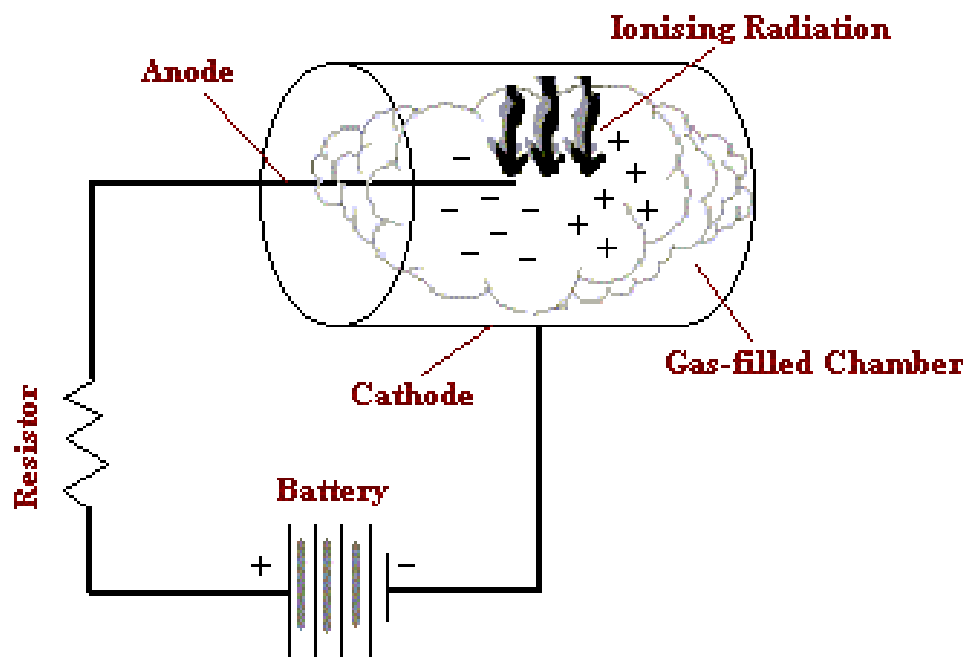
# Rodzaje detektorów

---

Najczęściej używane detektory:

- gazowe detektory jonizacyjne
- scyntylatory
- detektory półprzewodnikowe

# Gazowe detektory jonizacyjne



Uzas

# Scyntylatory (1/2)

---

Oddziaływanie promieniowania (depozyt energii) w materiale scyntyлятора powoduje wytworzenie światła.

Idealny scyntylator:

- duże prawdopodobieństwo oddziaływania (detekcji)
- wydajna konwersja  $E_{kin} \rightarrow$  światło
- liniowość odpowiedzi w dużym zakresie energii
- przezroczysty dla własnego światła
- szybki
- odpowiednia wielkość i kształt
- współczynnik załamania światła bliski 1.5 (jak dla szkła)
- w niektórych aplikacjach: różny czas wyświecania zależnie od rodzaju rejestrowanego promieniowania (np. rozróżnianie neutronów i kwantów  $\gamma$ )

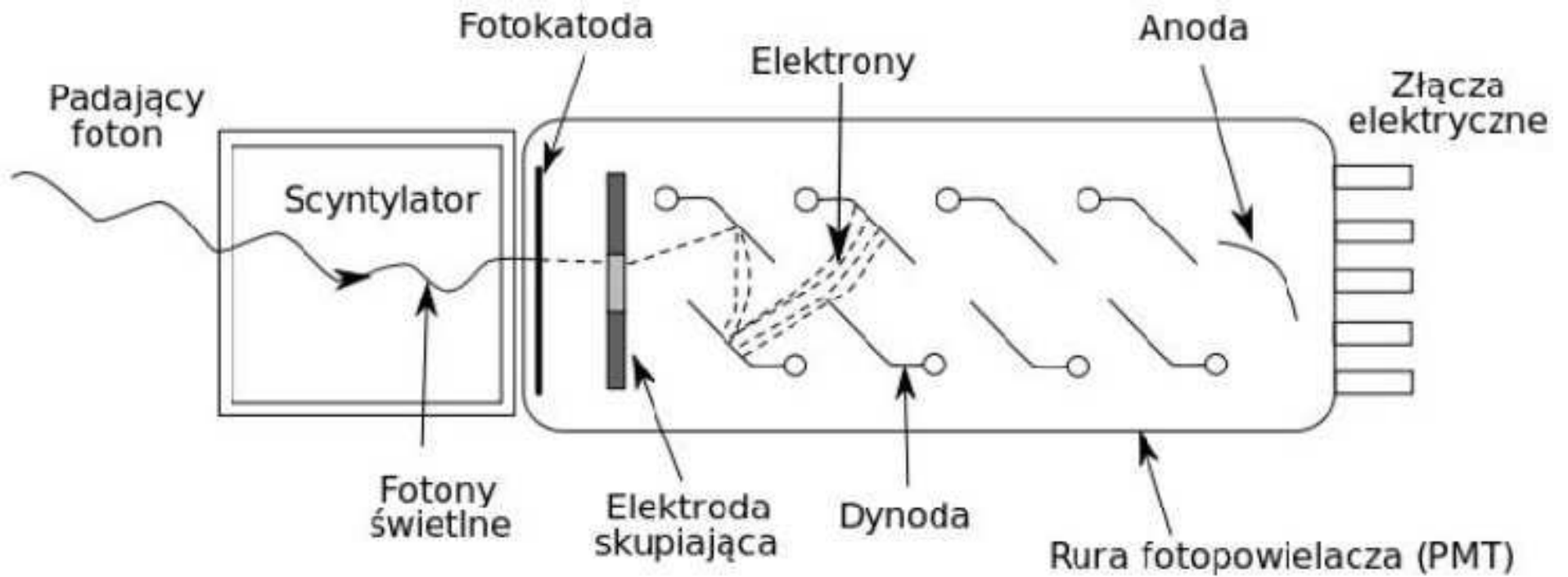
## Scyntylatory (2/2)

---

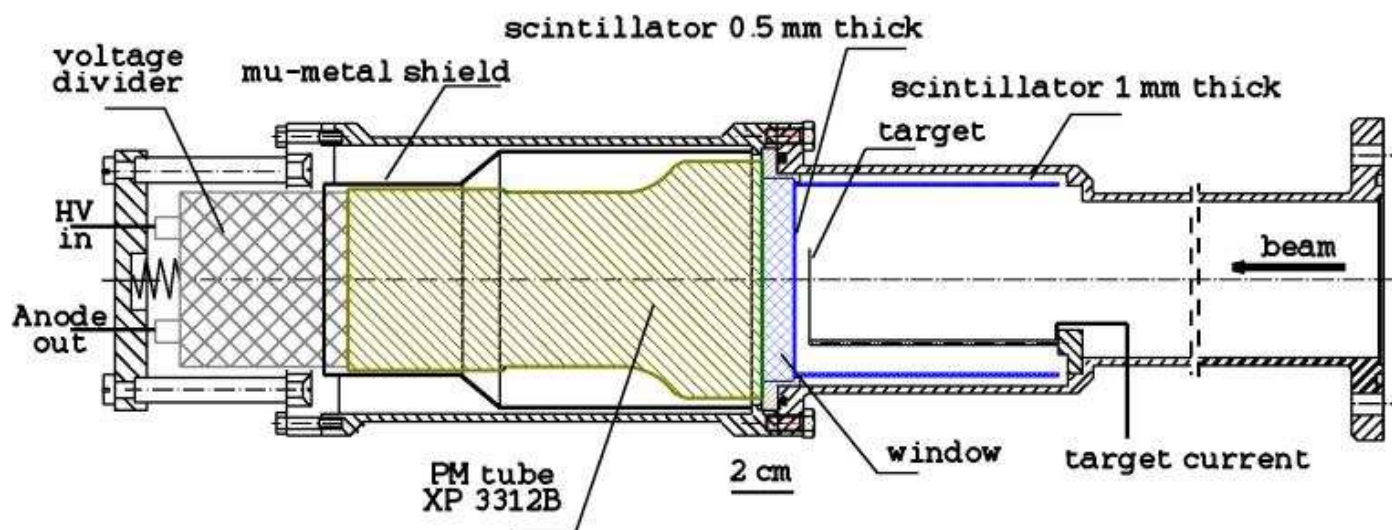
- scyntylatory organiczne: związki CH  
wzbudzenia elektronów w molekułach  
stałe i ciekłe
- scyntylatory nieorganiczne:  
wzbudzenia elektronów w strukturze krystalicznej  
wysoka gęstość i  $Z$   
mniej światła  
higroskopijne

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

# Fotopowielacz

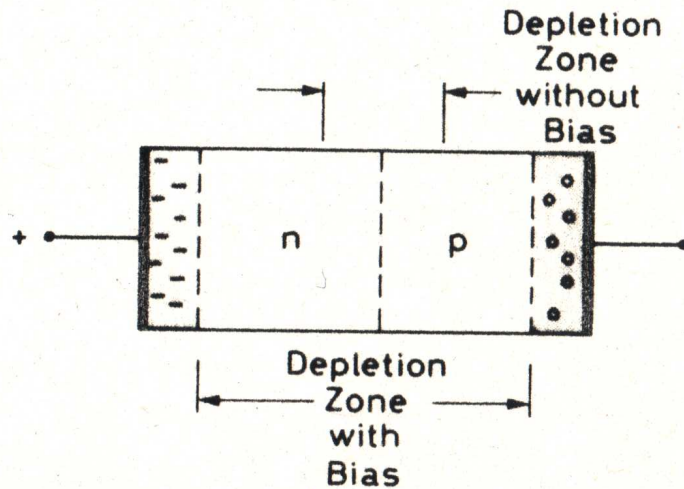


# Przykład: scynt. detektor cząstek naładowanych



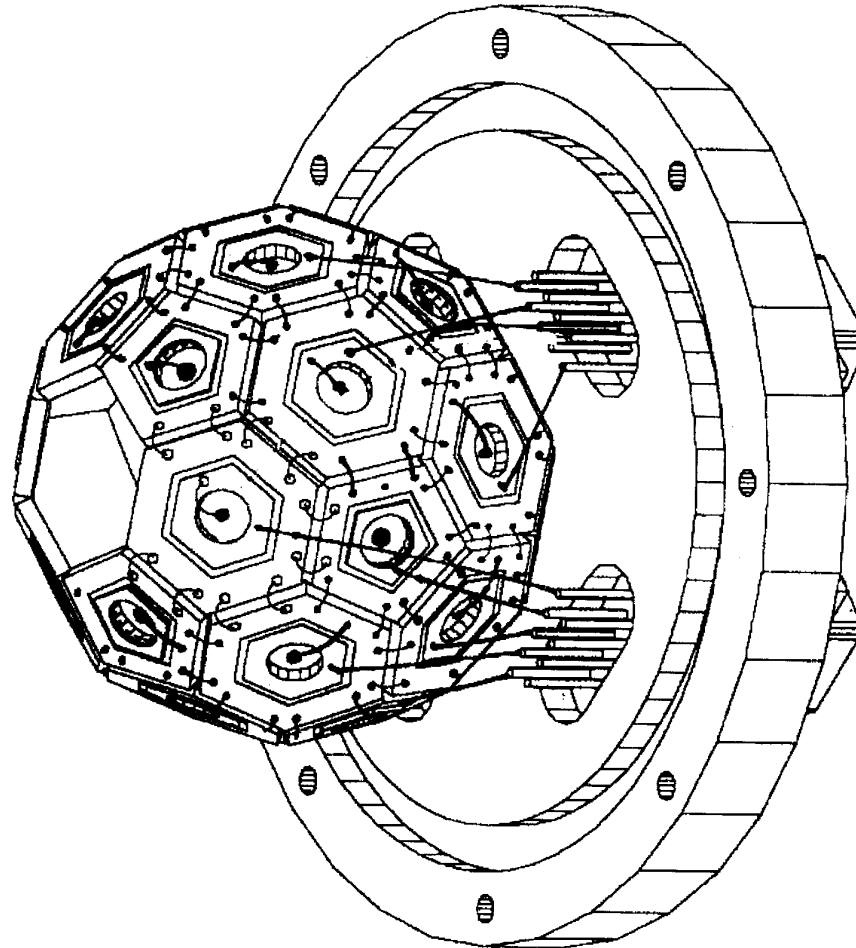


# Detektor półprzewodnikowy



- przejście cząstki powoduje wytworzenie par elektron-dziura
- mała energia potrzebna do wytworzenia jednej pary nośników  
→ rozdzielczość energetyczna  $\sim 0.1\%$
- materiały: Si, Ge
- wysoka gęstość, małe rozmiary
- niekiedy: kształt impulsu zależy od rodzaju promieniowania  
(np. rozróżnienie proton- $\alpha$ )

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



# Przerwa . . .

---

. . . a w przerwie można obejrzeć detektory

# Oddziaływanie kwantów promieniowania e-m z materią

## □ efekt fotoelektryczny:

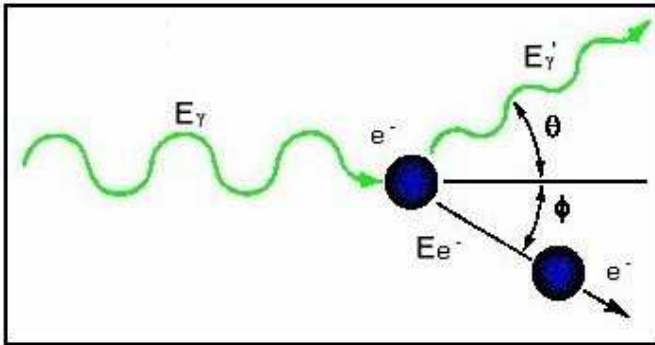
kwant  $\gamma$  oddziałuje ze związanym w atomie elektronem, przekazując mu całą swoją energię. Emitowany jest **fotolektron**.

Energia  $E_\gamma$  jest (zwykle) w całości zdeponowana w detektorze w punkcie oddziaływania

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

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

## □ rozpraszanie Comptona:



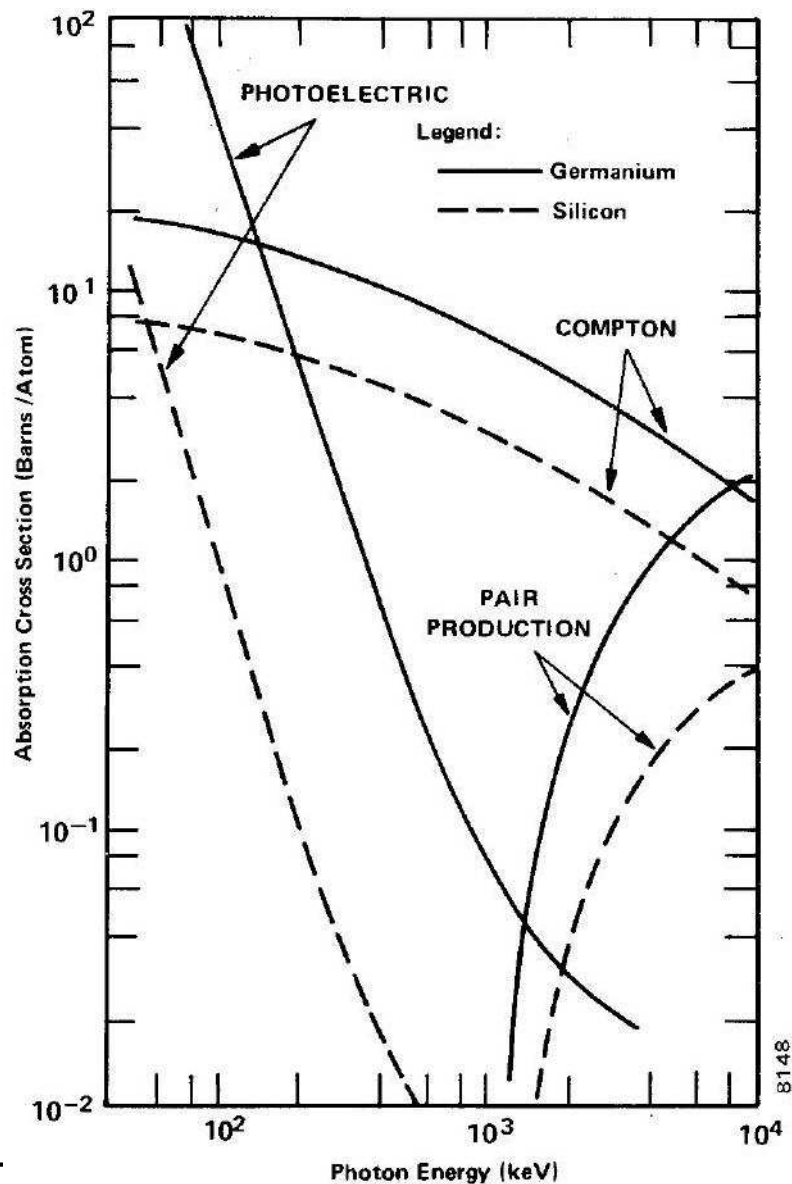
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (1 - \cos(\theta)) \frac{E_\gamma}{m_e c^2}}$$

$$E_{e^- \text{ max}} = E_\gamma \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{2E_\gamma}{511 \text{ keV}}} \right)$$

## □ tworzenie par $e^+ e^-$ ( $E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}$ )

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

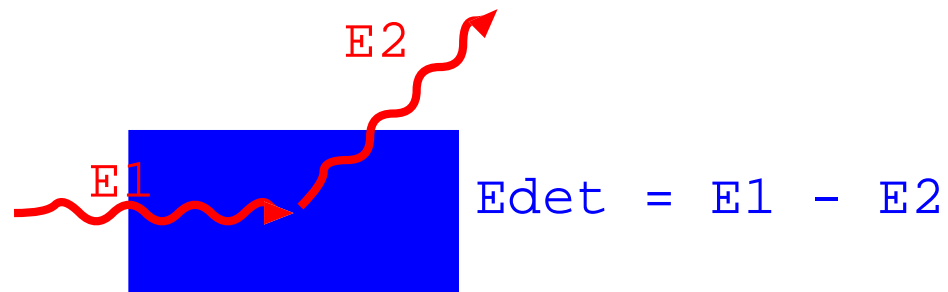
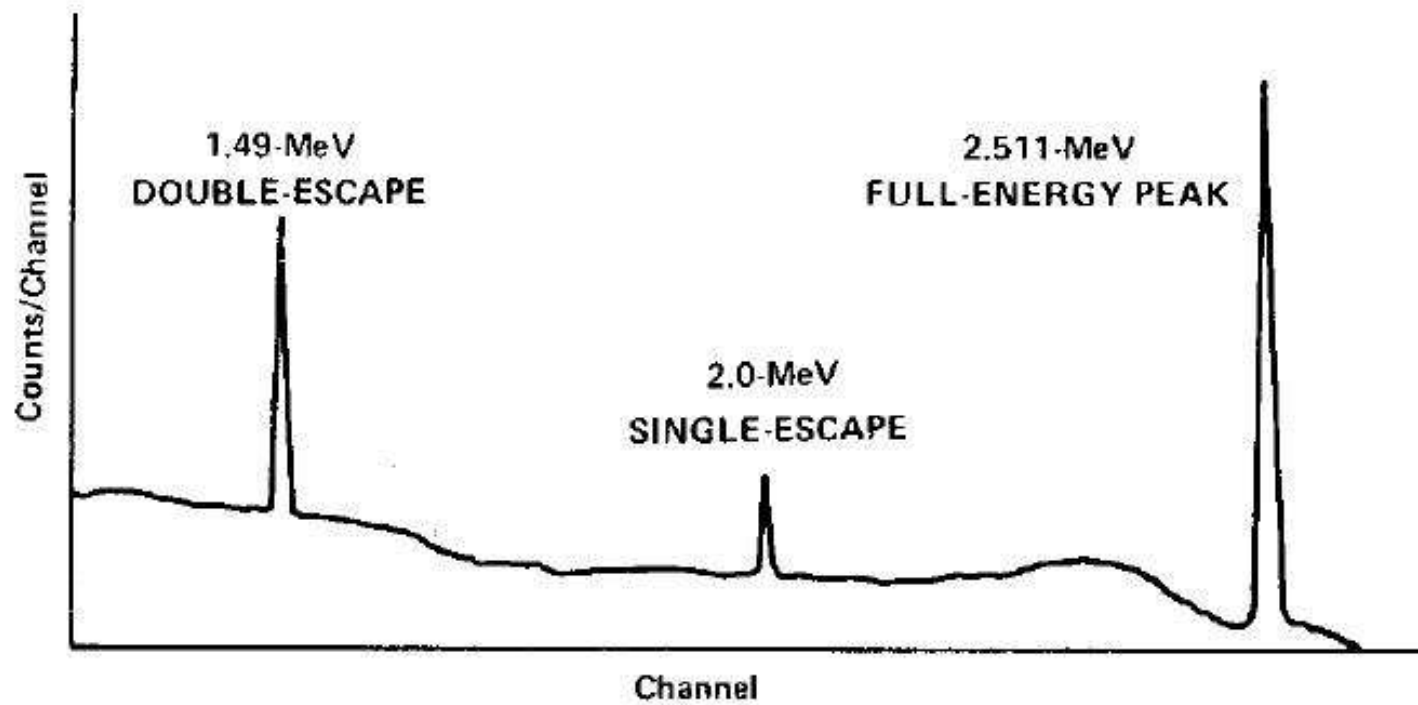
# Oddziaływanie kwantów $\gamma$ — porównanie



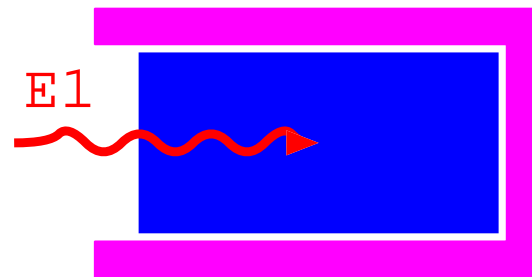
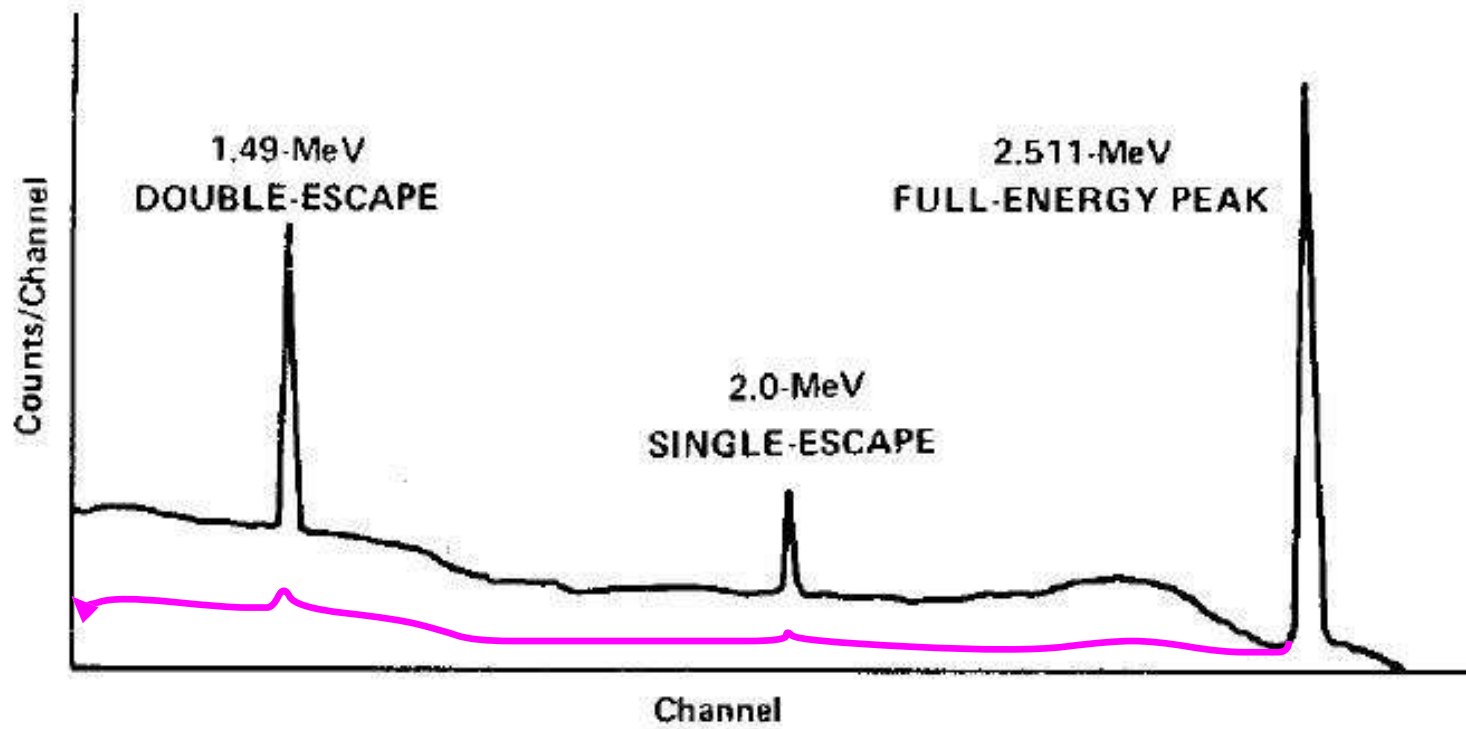
**Źle:** dla kwantów  $\gamma$  o energii powyżej  $\sim 100$  keV dominuje rozpraszanie Comptona

**Dobrze:** wtórne kwanty  $\gamma$  powstające w oddziaływaniu Comptona mogą ponownie oddziaływać w detektorze

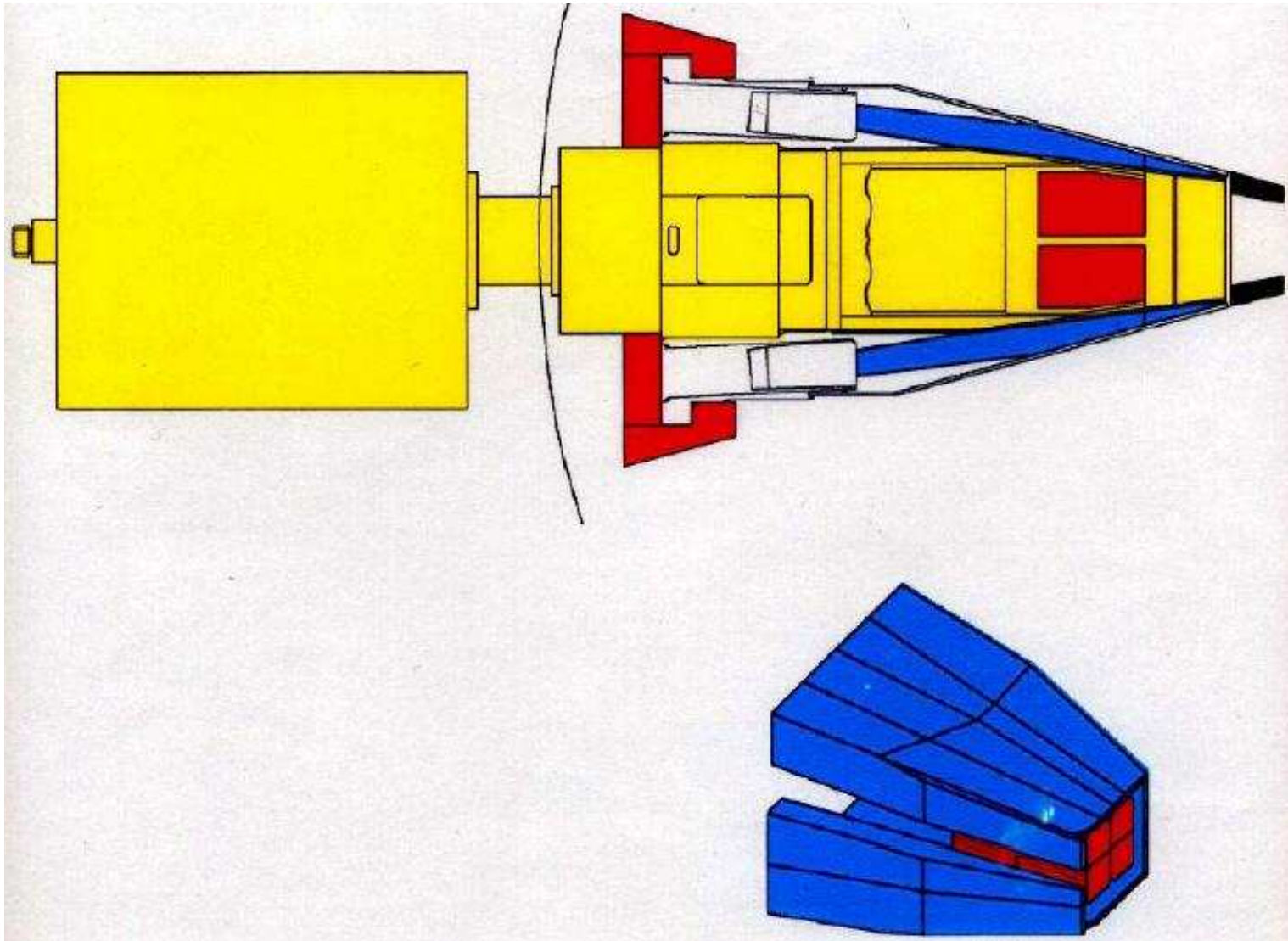
# Kwanty $\gamma$ w detektorze Ge



# Kwanty $\gamma$ w det. Ge z osłoną antykomptonowską

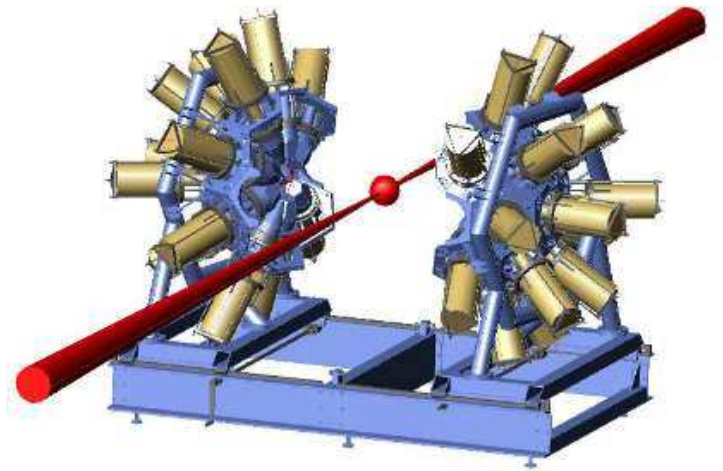
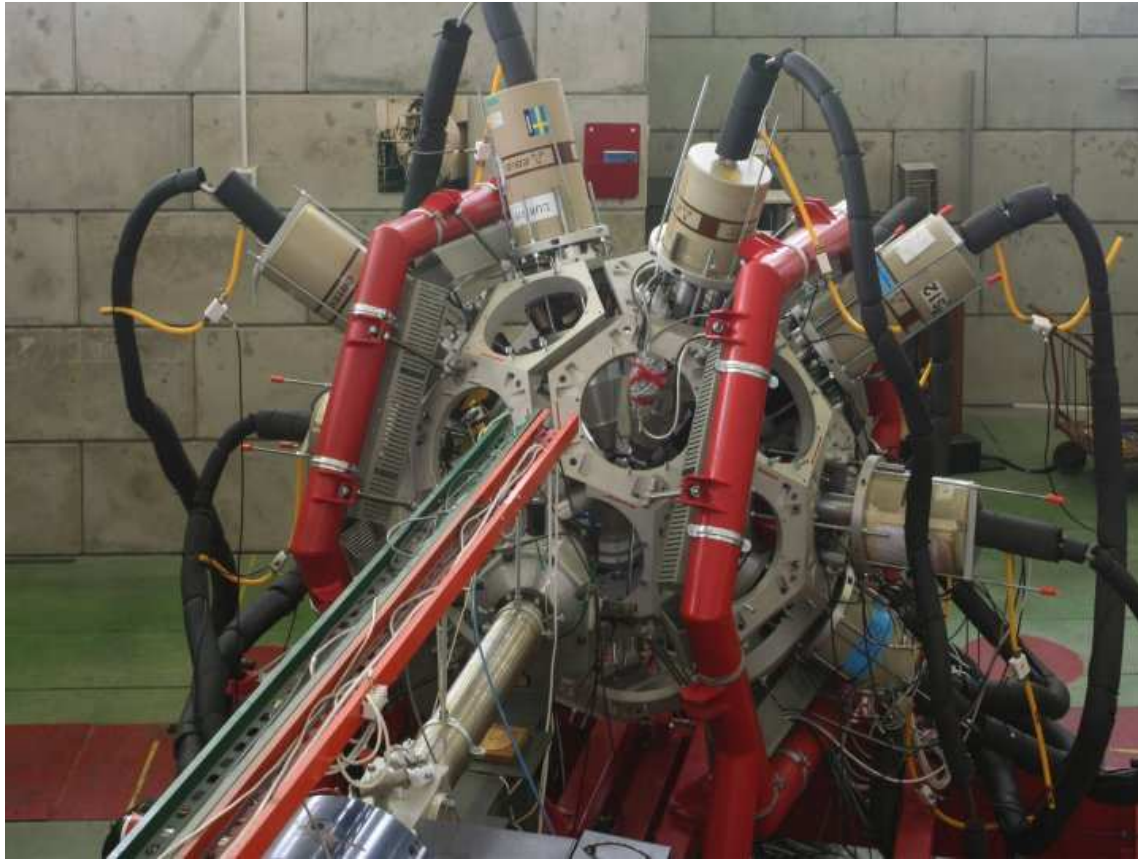


# Detektor Ge z osłoną antykomptonowską

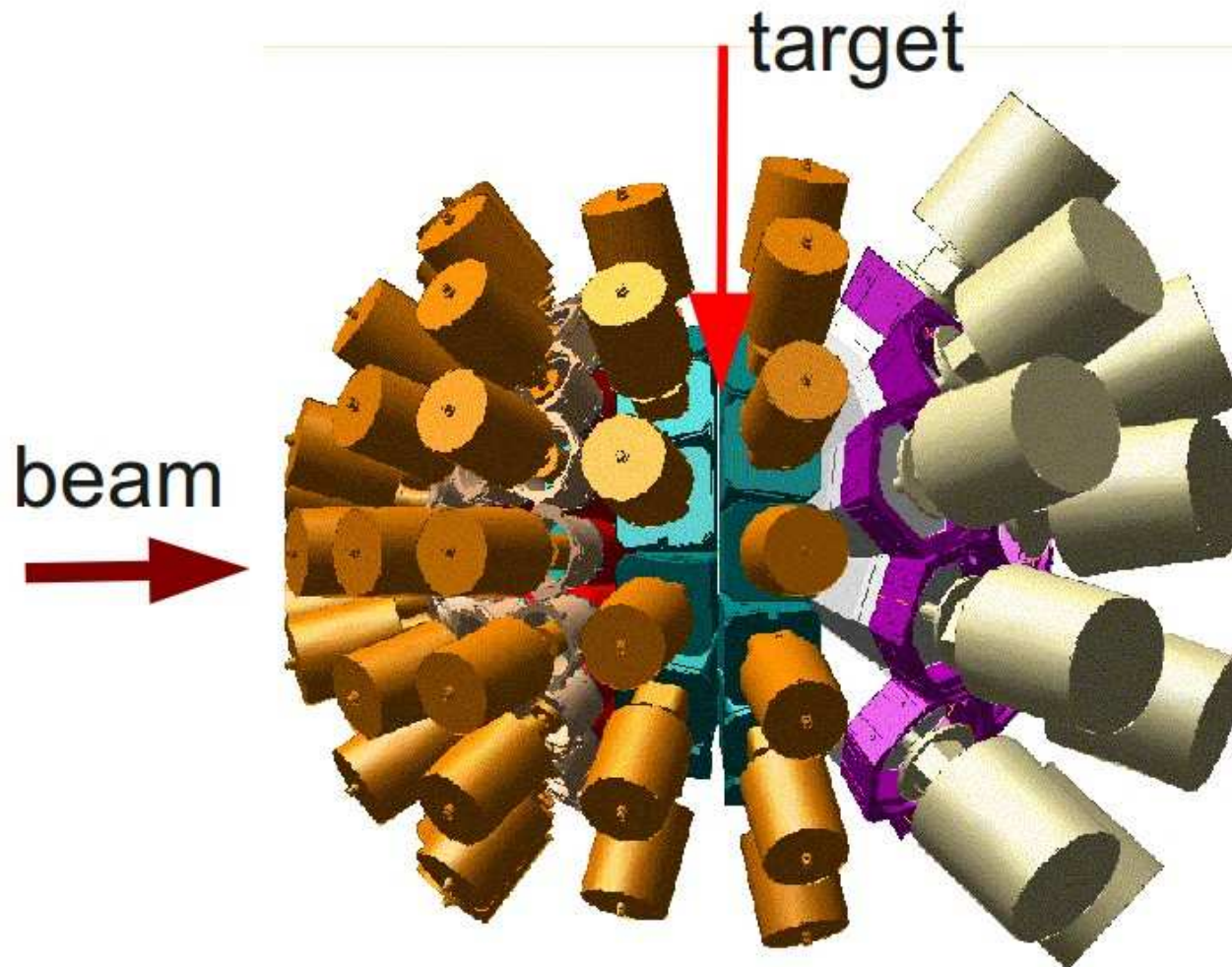




# Układ detektorów germanowych: EAGLE



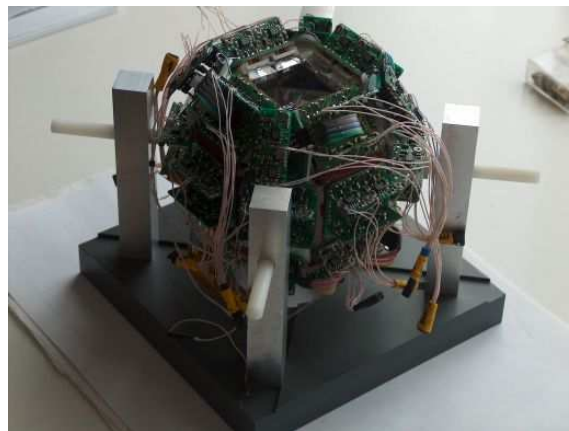
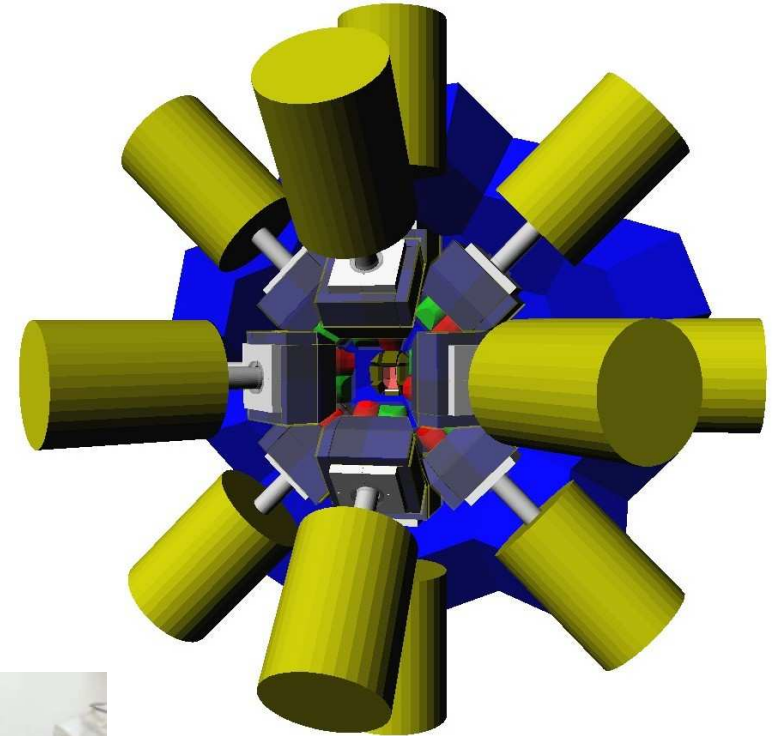
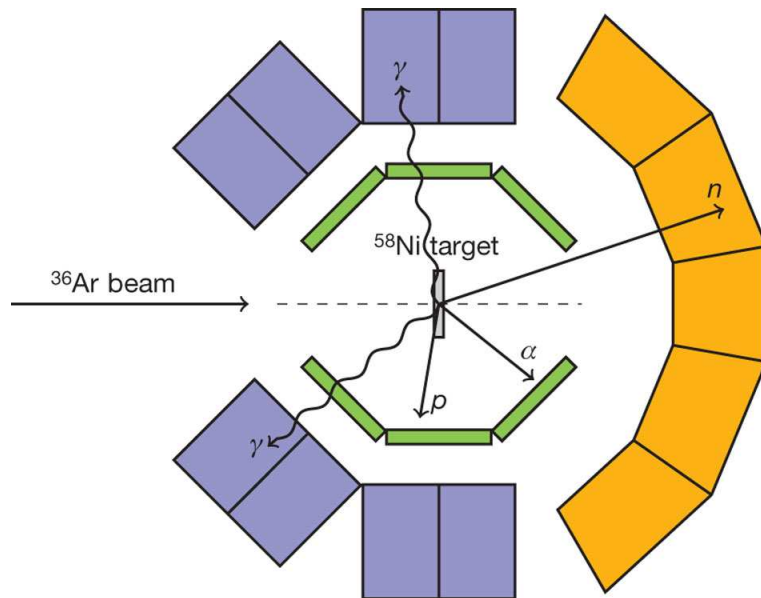
# Układ EUROBALL



Maksymalne wypełnienie sfery germanem: ok. 20%  
Maksymalna wydajność: ok. 10%.

# EXOGRAM + DIAMANT + Ściana Neutronowa

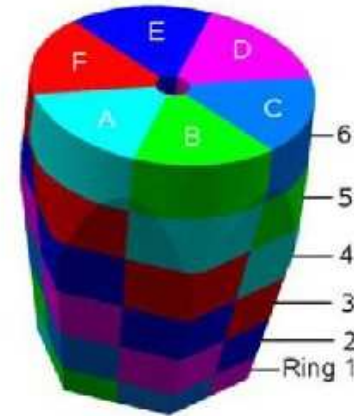
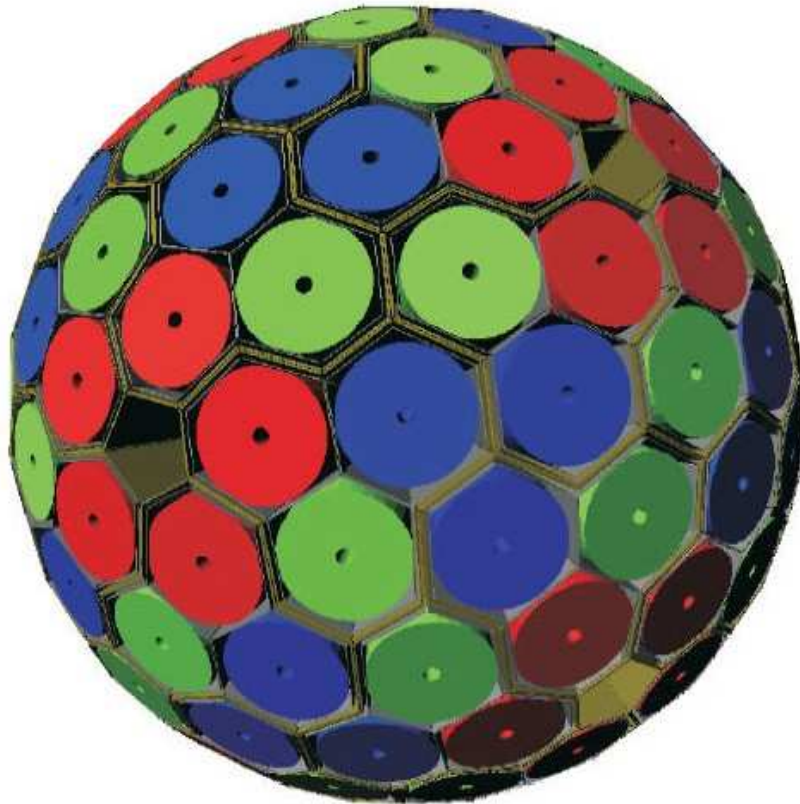
Detektory cząstek naładowanych i neutronów służą do selekcji interesujących przypadków



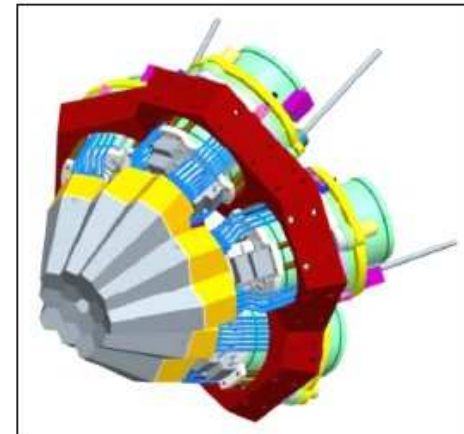
# Advanced GAMMA ray Tracking Array

Sfera germanu

$180 \times 36 = 3600$  segmentów



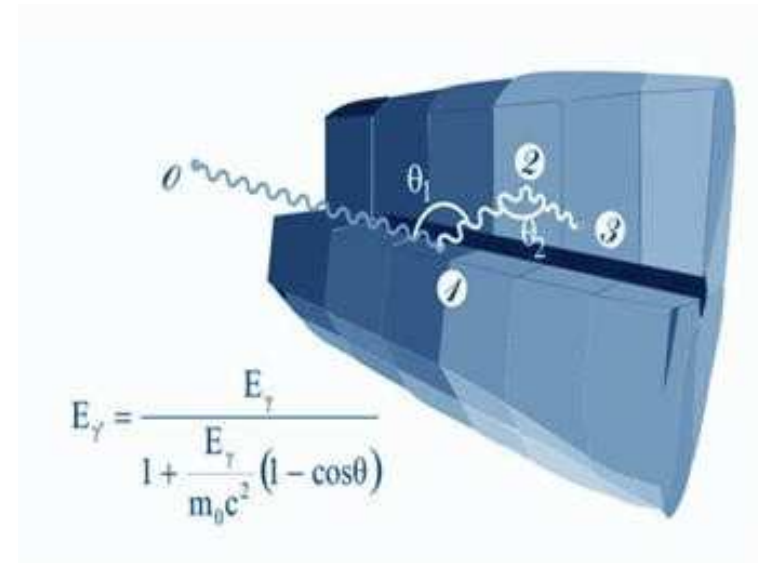
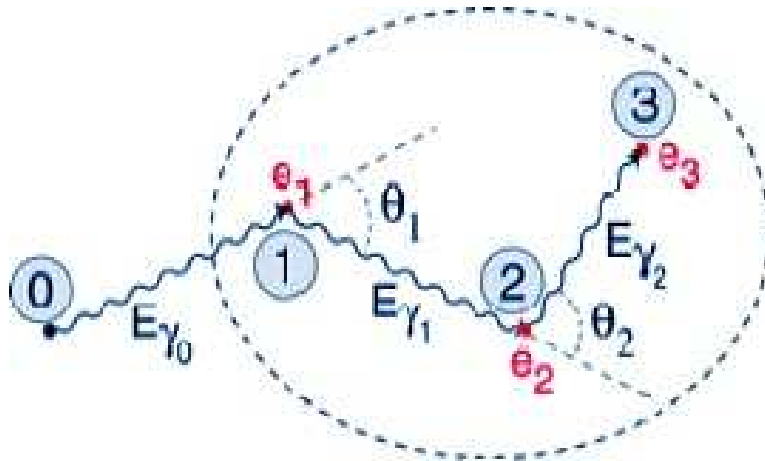
Demonstrator



# Śledzenie kwantów $\gamma$ — $\gamma$ -ray tracking

Korelacja kąta i energii w rozpraszaniu Comptona pozwalają:

- wybrać oddziaływania (kilka spośród wielu) pochodzące od jednego kwantu  $\gamma$
- odtworzyć pełną energię kwantu  $\gamma$
- ustalić pozycje pierwszego (kąt emisji) i drugiego oddziaływania (kierunek rozpraszania — polaryzacja)



Segmentacja oraz analiza kształtu impulsów pozwalają ustalić współrzędne  $x, y, z$  z dokładnością do ok. 5 mm.

# 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

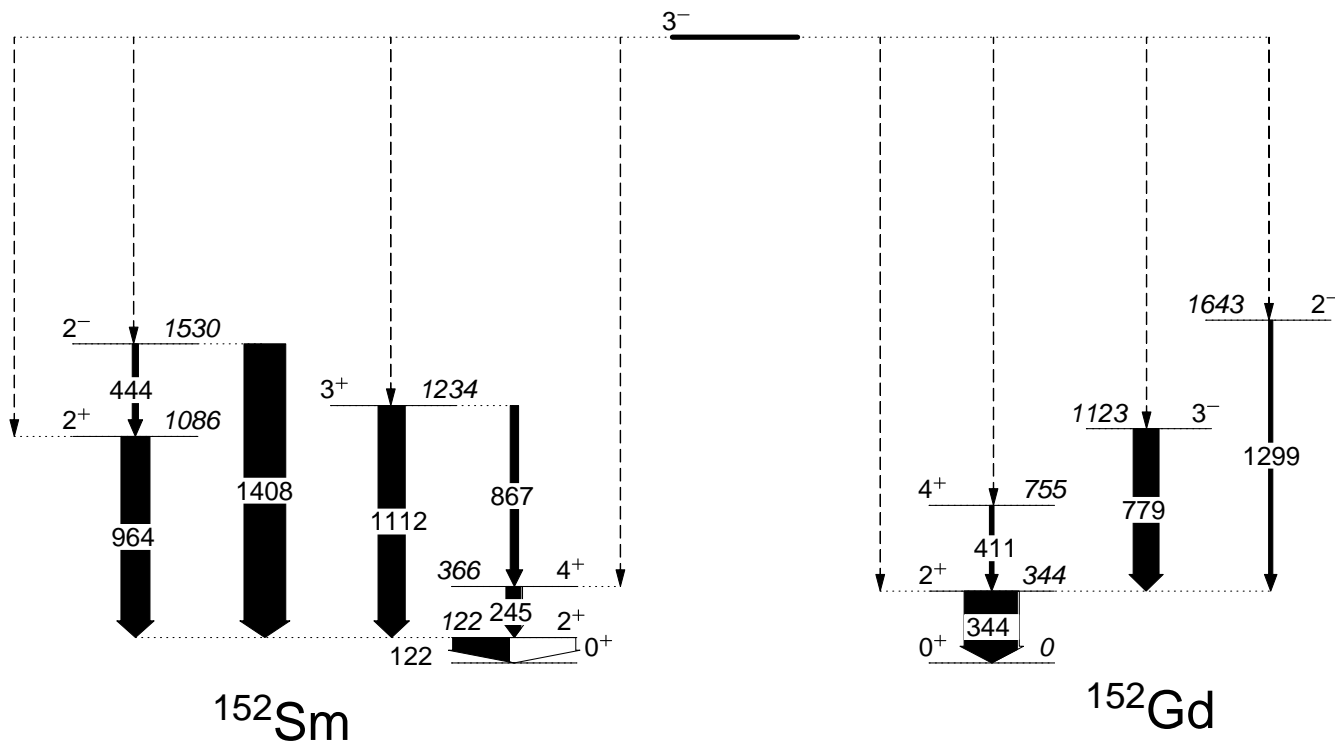
kwanty  $\gamma$  o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

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

wychwyt elektronu

$^{152}\text{Eu}$

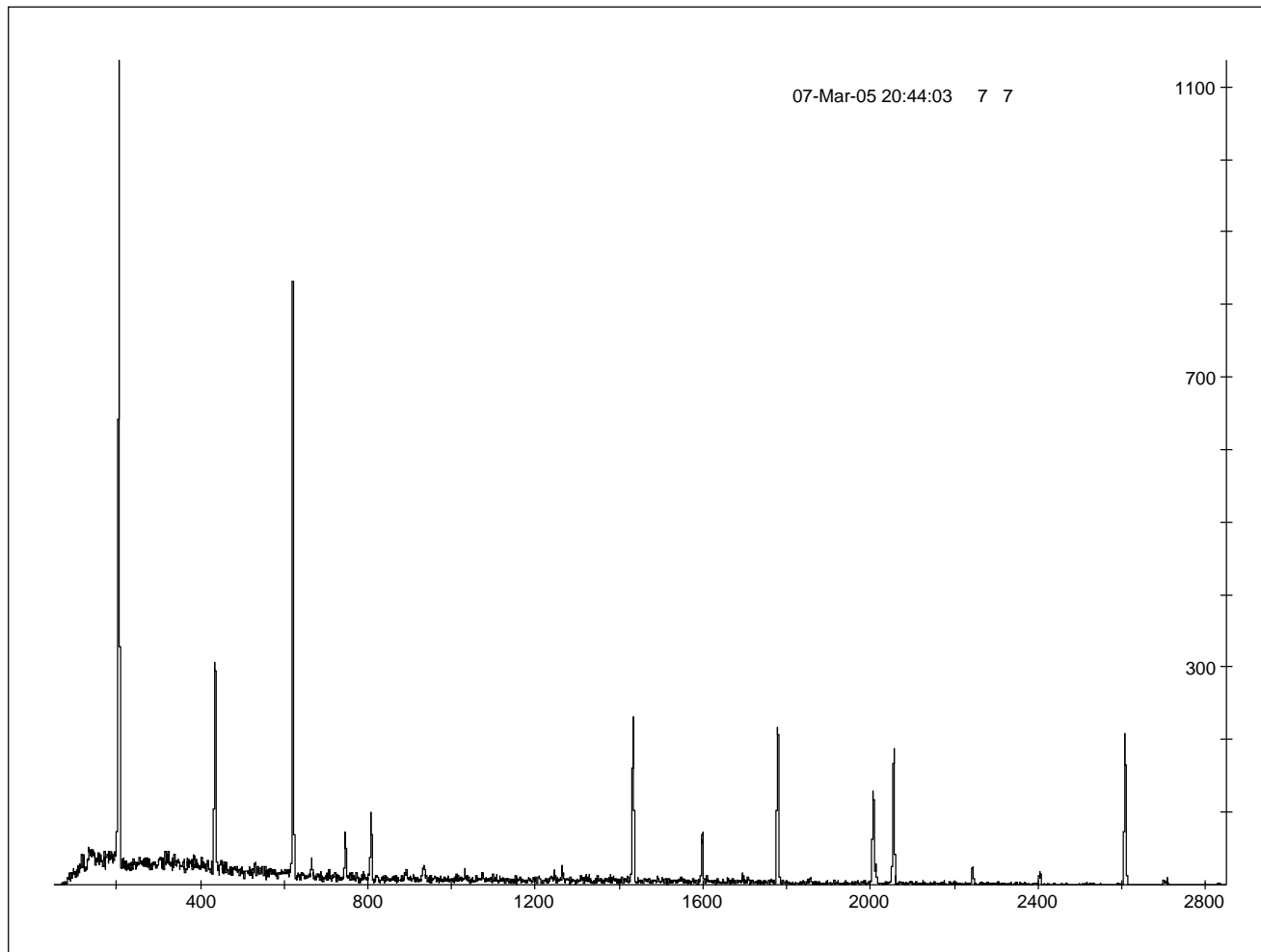
przemiana beta



# Kalibracja energetyczna

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

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

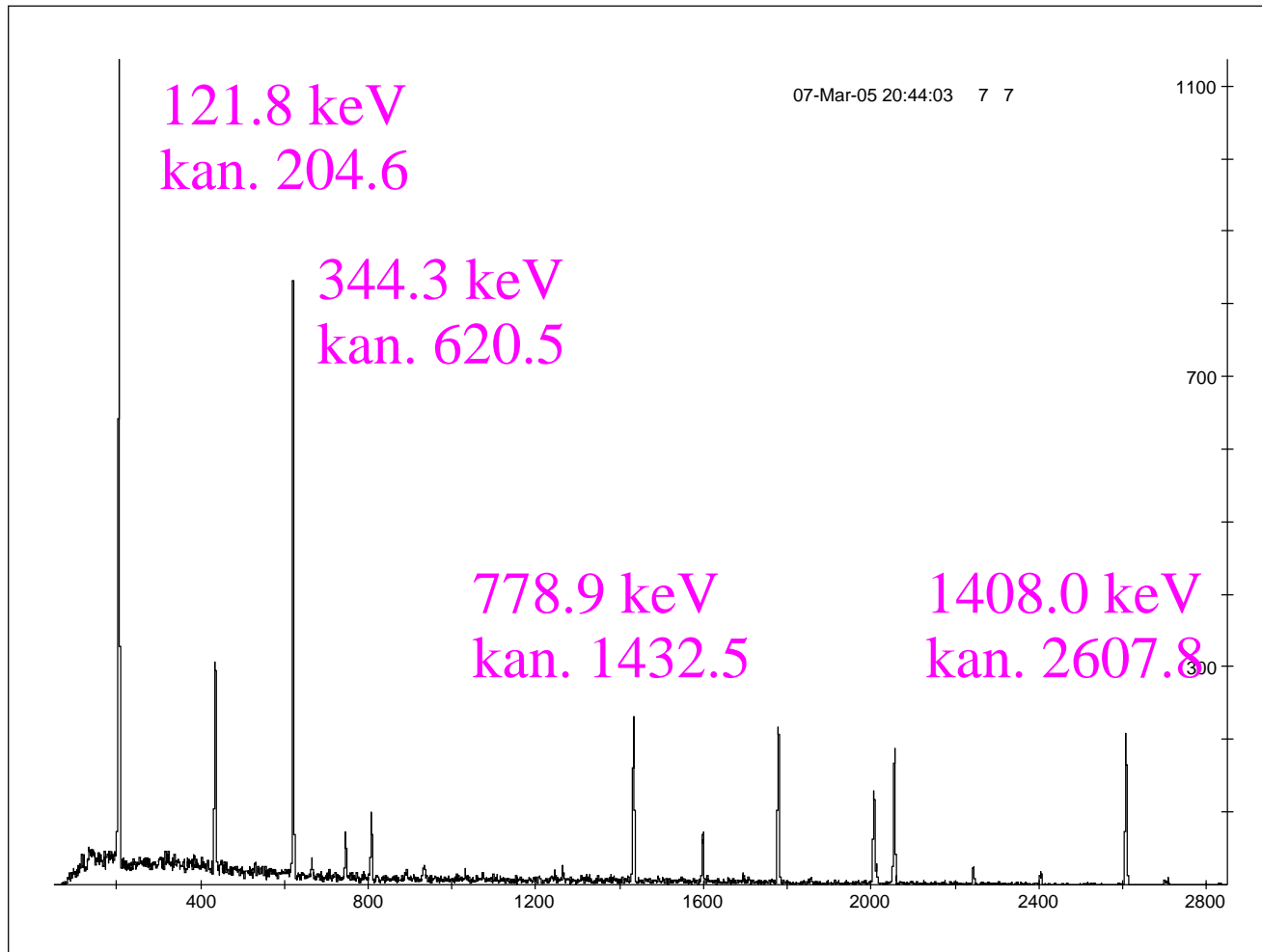




# Kalibracja energetyczna

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

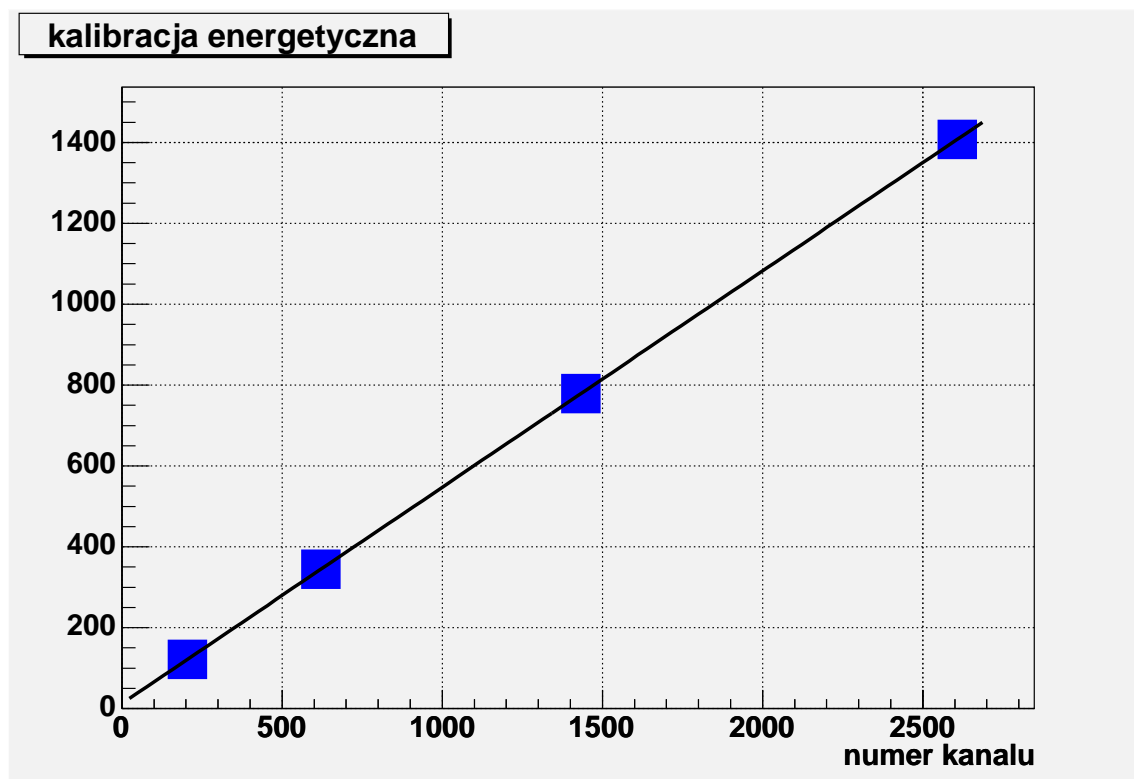
$$\rightarrow E_{\gamma} = f(x) \quad \text{np. } E_{\gamma} = a_0 + a_1 * x$$



# Kalibracja energetyczna — dopasowanie

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

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



# Kalibracja wydajnościowa

---

Wydajność detektora:

$$\epsilon(E) = \frac{N(E)}{I(E)} = \frac{N(E)}{A \cdot r(E) \cdot t}$$

gdzie:

- $N(E)$  — liczba zarejestrowanych zliczeń, odpowiadająca energii  $E$ ;
- $I(E)$  — liczba wyemitowanych kwantów (cząstek) o energii  $E$  (tablice);
- $A$  — aktywność izotopu, liczba rozpadów na jednostkę czasu;
- $r(E)$  — prawdopodobieństwo emisji kwantu (cząstki) o określonej energii  $E$ ;
- $t$  — czas pomiaru.

# Kalibracja wydajnościowa

Wydajność detektora:

$$\epsilon(E) = \frac{N(E)}{I(E)} = \frac{N(E)}{A \cdot r(E) \cdot t}$$

gdzie:

- $N(E)$  — liczba zarejestrowanych zliczeń, odpowiadająca energii  $E$ ;
- $I(E)$  — liczba wyemitowanych kwantów (cząstek) o energii  $E$  (tablice);
- $A$  — aktywność izotopu, liczba rozpadów na jednostkę czasu;
- $r(E)$  — prawdopodobieństwo emisji kwantu (cząstki) o określonej energii  $E$ ;
- $t$  — czas pomiaru.

$E_\gamma$ (keV)	$r(E)$		
121.8	0.2840		
244.7	0.0754		
344.3	0.2652		
411.1	0.0225		
778.9	0.1294		
964.1	0.0146		
1112.1	0.1356		
1408.0	0.2080		

$t = 1000$  sekund

$A = 10$  kBq

# Kalibracja wydajnościowa

Wydajność detektora:

$$\epsilon(E) = \frac{N(E)}{I(E)} = \frac{N(E)}{A \cdot r(E) \cdot t}$$

gdzie:

- $N(E)$  — liczba zarejestrowanych zliczeń, odpowiadająca energii  $E$ ;
- $I(E)$  — liczba wyemitowanych kwantów (cząstek) o energii  $E$  (tablice);
- $A$  — aktywność izotopu, liczba rozpadów na jednostkę czasu;
- $r(E)$  — prawdopodobieństwo emisji kwantu (cząstki) o określonej energii  $E$ ;
- $t$  — czas pomiaru.

$E_\gamma$ (keV)	$r(E)$	$N(E)$
121.8	0.2840	4607
244.7	0.0754	1077
344.3	0.2652	3081
411.1	0.0225	227
778.9	0.1294	1003
964.1	0.0146	995
1112.1	0.1356	859
1408.0	0.2080	1022

$t = 1000$  sekund

$A = 10$  kBq

# Kalibracja wydajnościowa

Wydajność detektora:

$$\epsilon(E) = \frac{N(E)}{I(E)} = \frac{N(E)}{A \cdot r(E) \cdot t}$$

gdzie:

- $N(E)$  — liczba zarejestrowanych zliczeń, odpowiadająca energii  $E$ ;
- $I(E)$  — liczba wyemitowanych kwantów (cząstek) o energii  $E$  (tablice);
- $A$  — aktywność izotopu, liczba rozpadów na jednostkę czasu;
- $r(E)$  — prawdopodobieństwo emisji kwantu (cząstki) o określonej energii  $E$ ;
- $t$  — czas pomiaru.

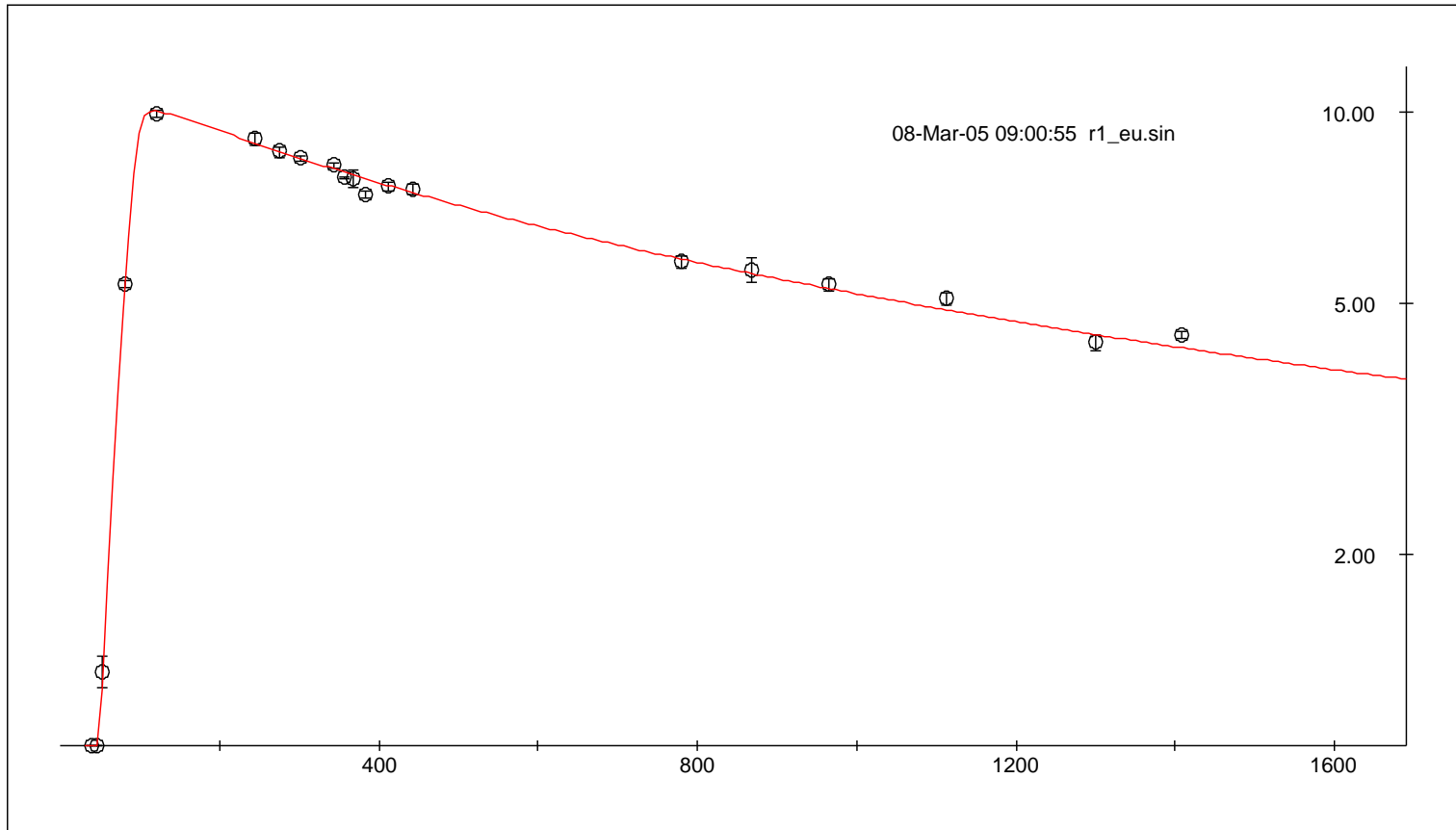
$E_\gamma$ (keV)	$r(E)$	$N(E)$	$\epsilon(E)$
121.8	0.2840	4607	0.0016
244.7	0.0754	1077	0.0014
344.3	0.2652	3081	0.0011
411.1	0.0225	227	0.0010
778.9	0.1294	1003	0.00076
964.1	0.0146	995	0.00066
1112.1	0.1356	859	0.00062
1408.0	0.2080	1022	0.00048

$t = 1000$  sekund

$A = 10$  kBq

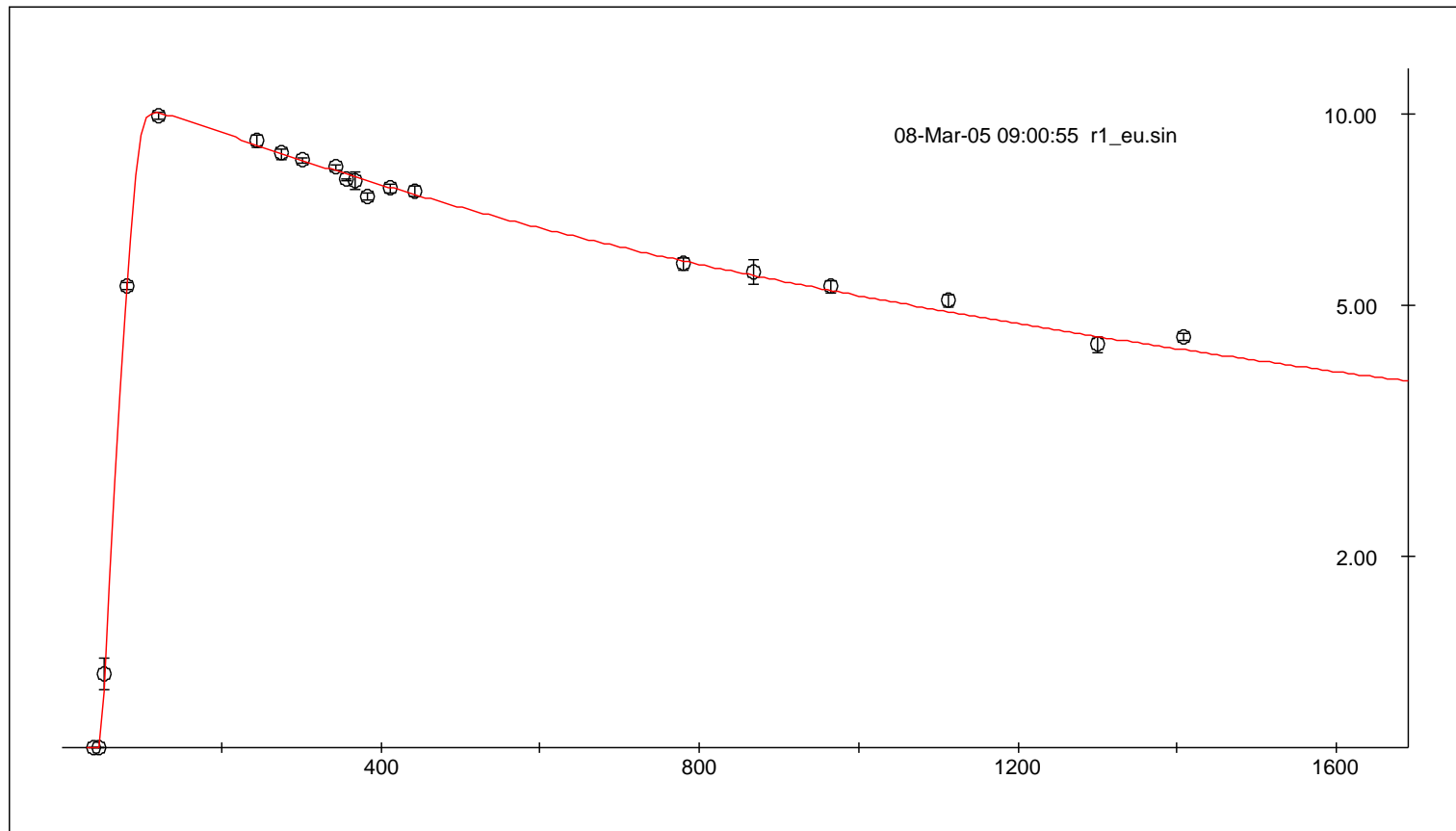
# Krzywa kalibracji wydajnościowej

Detektor germanowy



# Krzywa kalibracji wydajnościowej

Detektor germanowy



Poprawka na wydajność detektora:

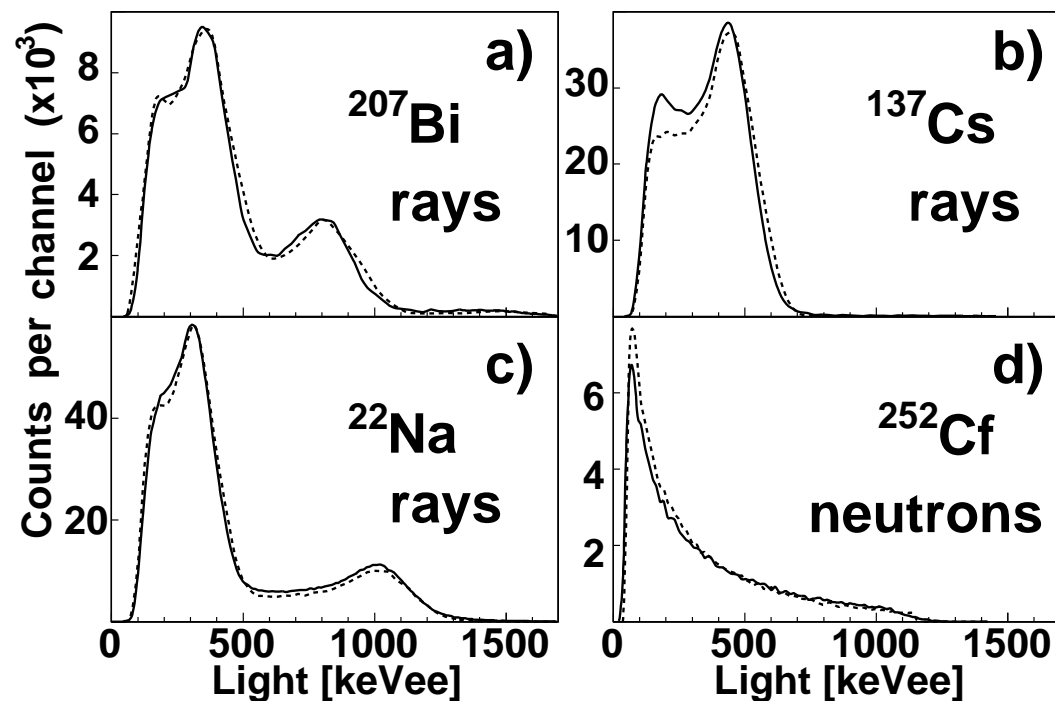
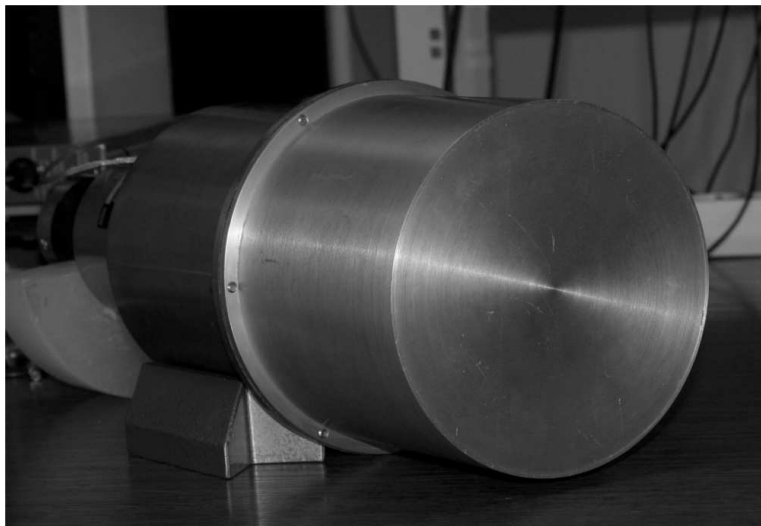
$$I_{\gamma} = N_{\gamma} / \epsilon(E_{\gamma})$$



# Kalibracja scyntylatora

Trzeba wykorzystać monochromatyczne źródła kalibracyjne (ew. dwie energie)

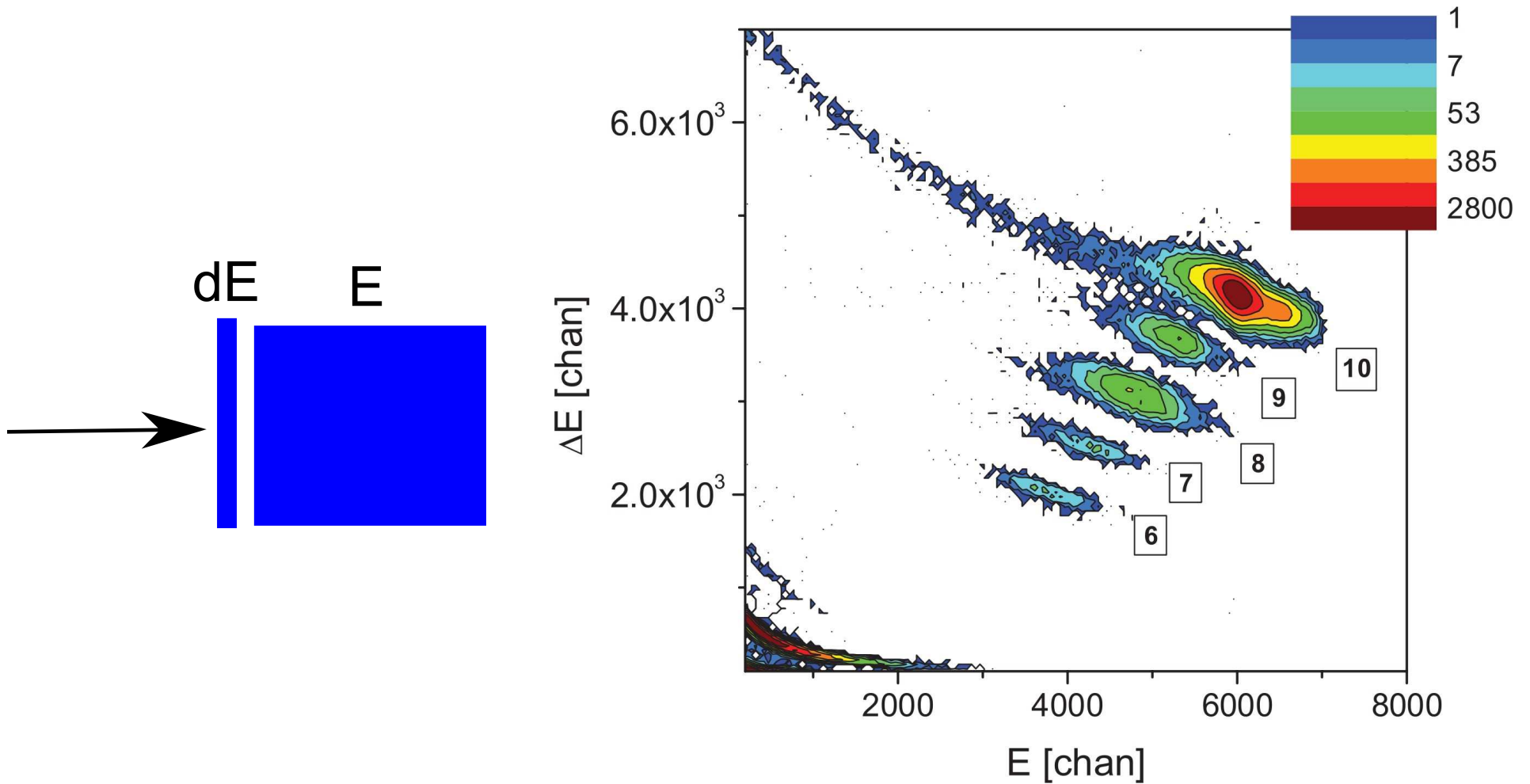
Detektor neutronów —  
ciekły scyntylator



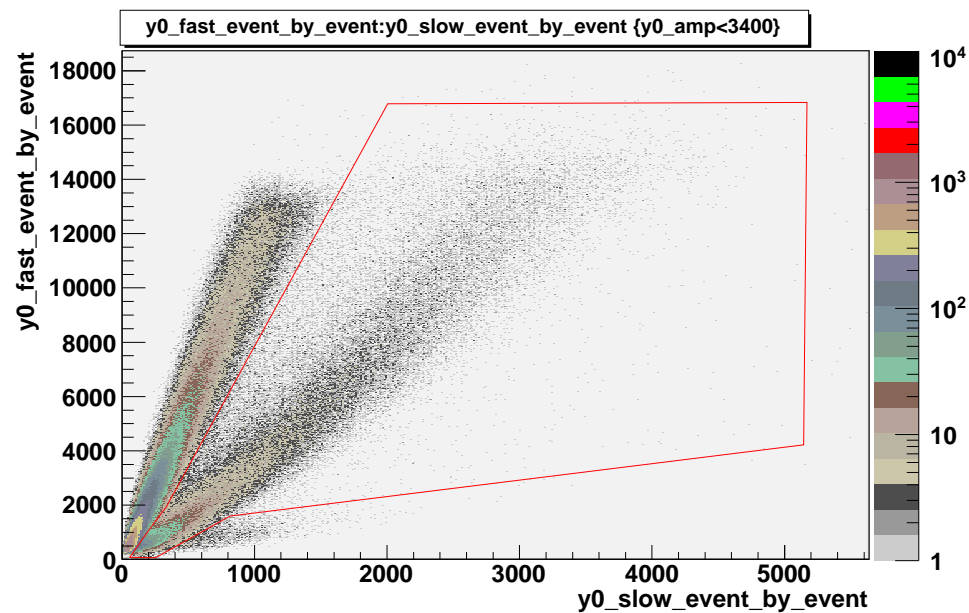
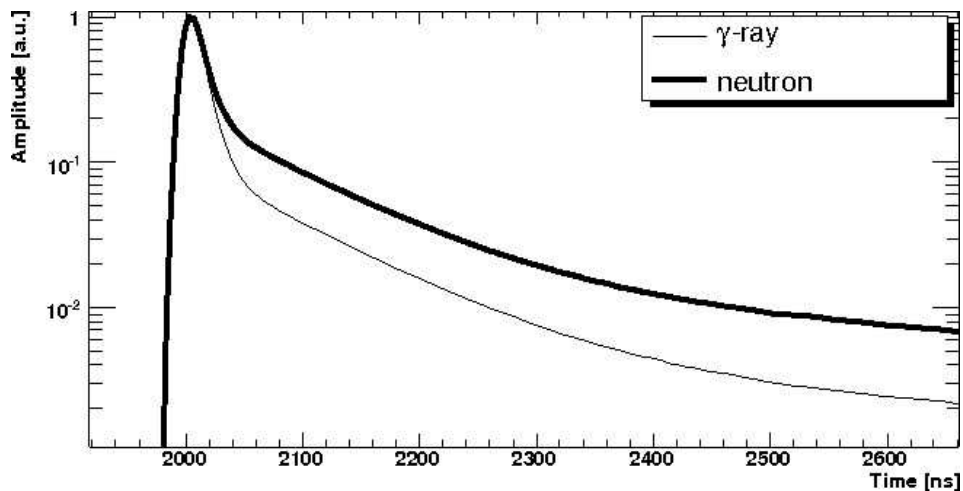
- $^{207}\text{Bi}$ : 560 i 1064 keV
- $^{137}\text{Cs}$ : 662 keV
- $^{22}\text{Na}$ : 511 i 1275 keV
- $^{252}\text{Cf}$ : neutrony

Widać krawędzie comptonowskie,  
nie pełne energie!

# Rozróżnianie różnych jonów w detektorze $E - \delta E$



# Rozróżnianie neutron- $\gamma$ w oparciu o kształt impulsu



# Podsumowanie

---

- Omówiono rodzaje promieniowania jonizującego oraz oddziaływanie z materią elektronów, ciężkich cząstek naładowanych, neutronów i kwantów elektromagnetycznych ( $\gamma$ , X)
- Energia promieniowania: eV do kilkudziesięciu MeV.
- Parametry charakteryzujące detektor: wydajność, rozdzielczość energetyczna i czasowa, liniowość, P/T, szybkość odpowiedzi, czas martwy, czasowa zdolność rozdzielcza
- 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*
- J.England, *Metody doświadczalne fizyki jądrowej*