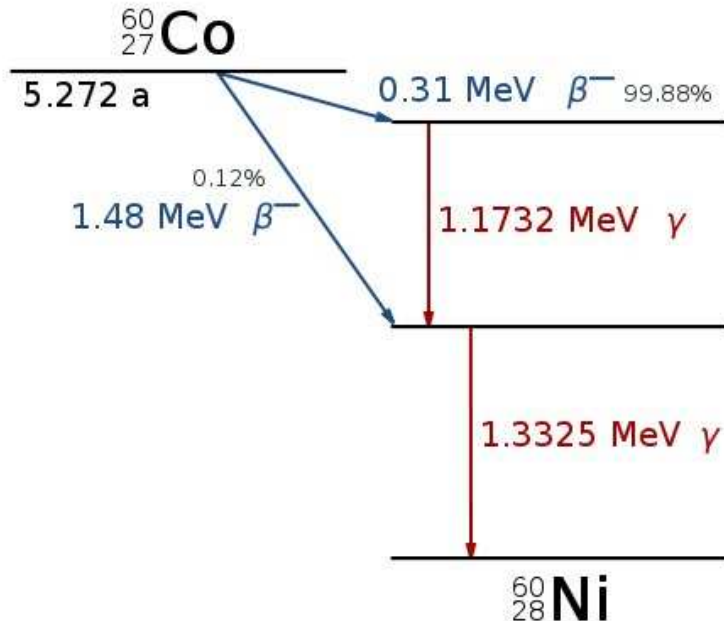

Detekcja
promieniowania elektromagnetycznego
cząstek naładowanych
i neutronów

Marcin Palacz

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów UW

Rodzaje i źródła promieniowania 1/2

- Promieniowanie elektromagnetyczne: γ



Deeksycytacja stanów wzbudzonych jąder atomowych.

Liczne źródła promieniotwórcze, w których emisja γ następuje po rozpadzie (β^- , β^+ , wychwyt elektronu) jądra macierzystego.

- Promieniowanie elektromagnetyczne: anihilacja e^+e^- po przemianie β^+ (511 keV)
- Promieniowanie hamowania szybkich elektronów (np. lampa roentgenowska)
- Promieniowanie elektromagnetyczne: X (KX: < 1 keV do 100 keV) (zmiana układu elektronów na powłokach atomowych, wypełnienie “dziury”)

Rodzaje i źródła promieniowania 2/2

- Elektrony:
 - rozpad β : $n \rightarrow p + e^- + \nu$, $p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}$ (ciągłe widmo e^- i e^+)
 - 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)
- Ciężkie cząstki naładowane
 - Rozpad α : ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-Z}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$
(dyskretna energia, 4–6 MeV dla źródeł laboratoryjnych)
 - Spontaniczne rozszczepienie (fragmenty)
- Neutrony:
 - Spontaniczne rozszczepienie (najpopularniejsze źródło: ${}^{252}_{98}\text{Cf}$)
 - Źródła (α, n) np ${}^4_2 \alpha + {}^9_4 \text{Be} \rightarrow {}^{12}_6 \text{C} + {}^1_0 n$
 - Źródła (γ, n) (tarcza: ${}^9_4 \text{Be}$, ${}^2_1 \text{H}$)

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

Promieniowanie “na wiązce”

Wszystkie rodzaje promieniowania:
elektromagnetyczne (γ , X),

e^- , e^+ ,

neutrony, protony, α ,
ciężkie jony,

obecne są w eksperymentach wykonywanych z użyciem wiązki jonów przyspieszanych przez akcelerator.

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:
analizy własności promieniowania (\rightarrow struktura materii jądrowej),
selekcji interesujących przypadków.

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 γ 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 δ
- 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

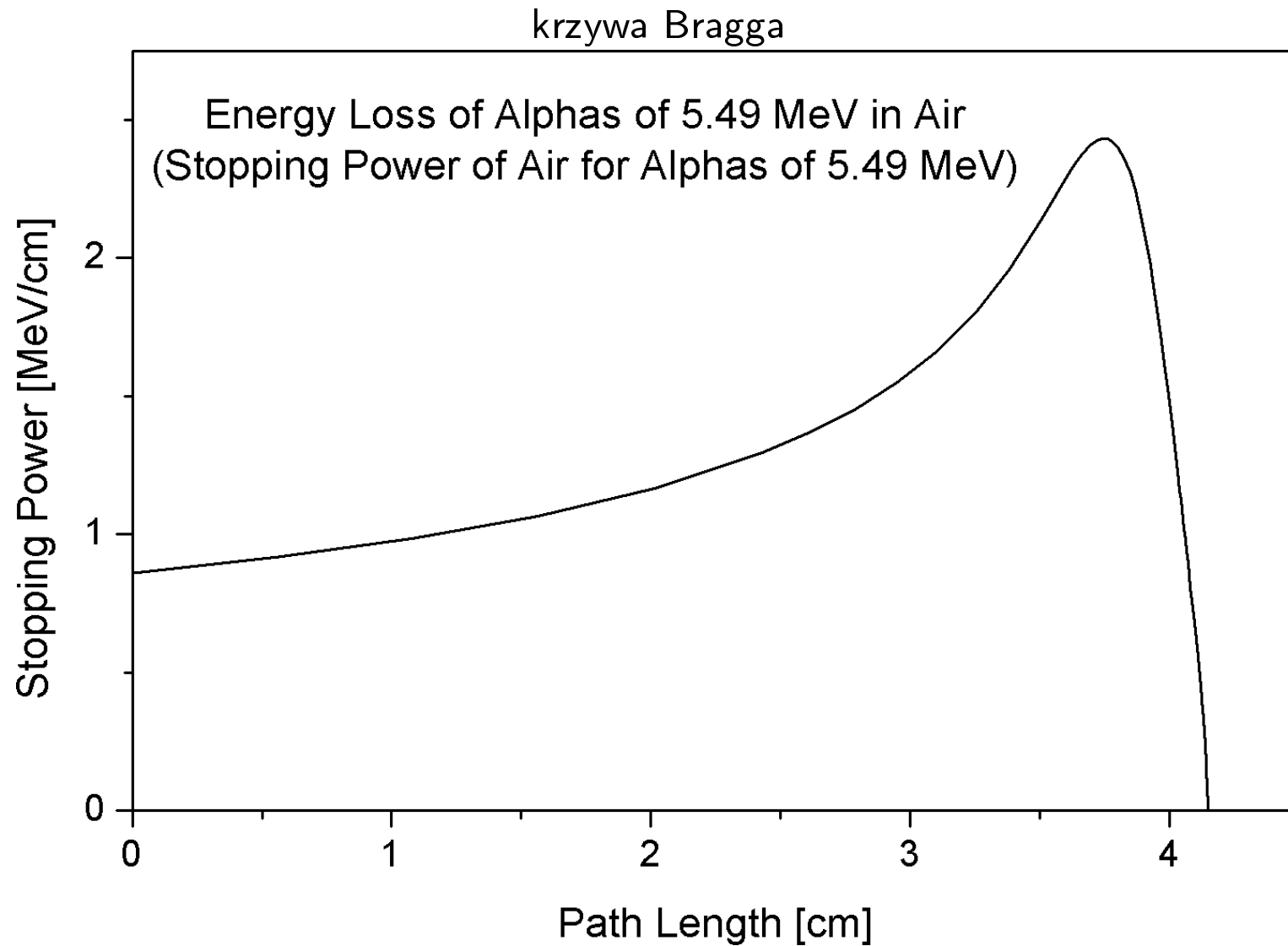
N liczba atomów na jednostkę objętości w materiale detektora

m_e masa spoczynkowa elektronu

e ładunek elementarny

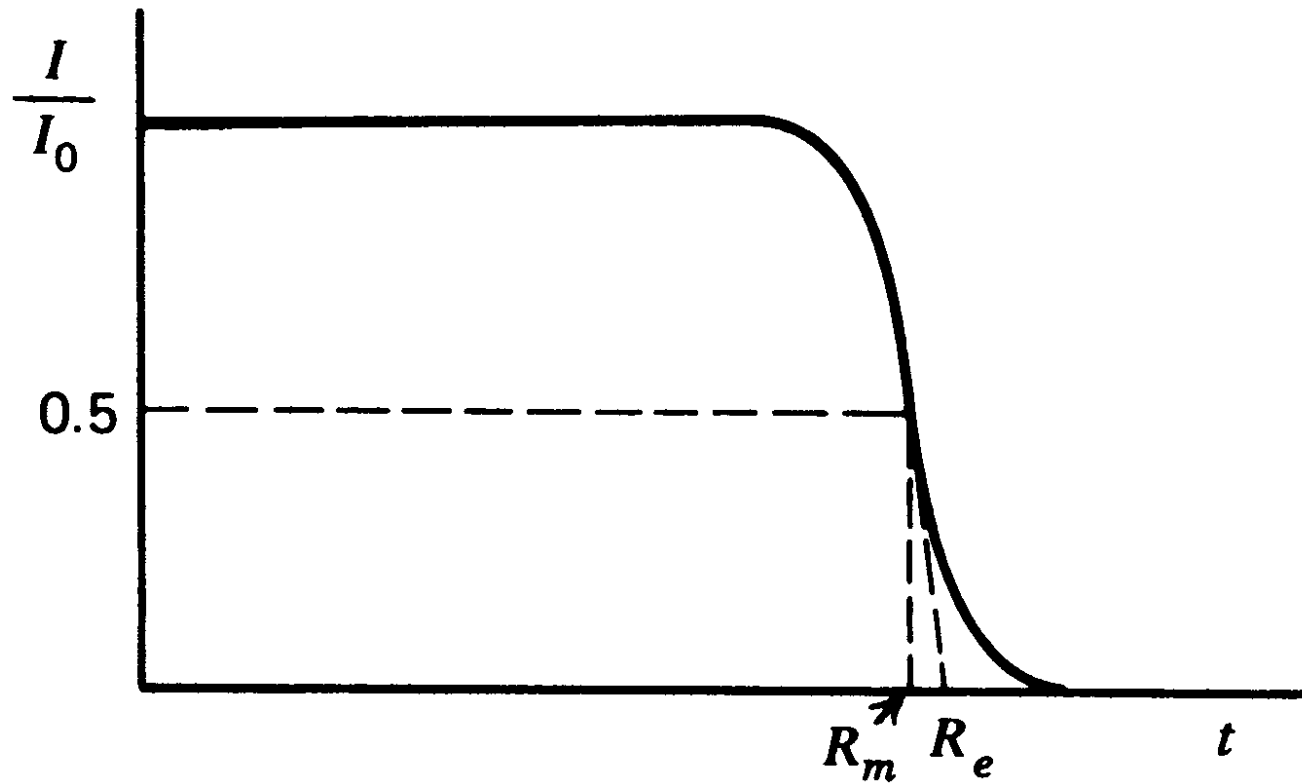
I średni potencjał jonizacyjny atomów detektora ($I \approx Z \cdot 10eV$)

Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych

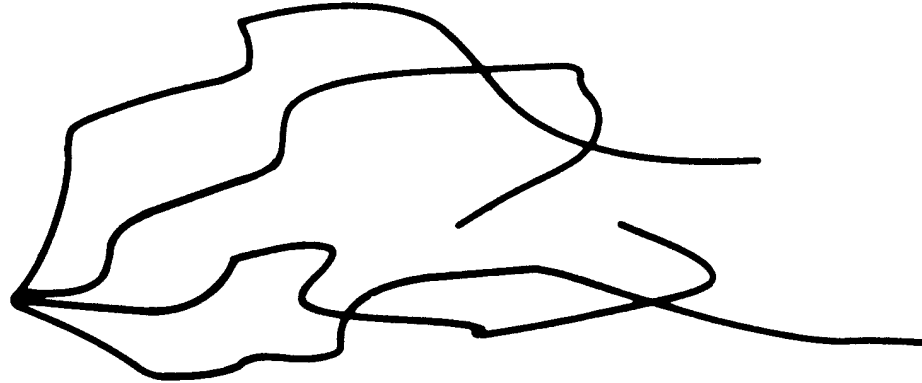


Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych

dobrze zdefiniowany zasięg



Odziaływanie elektronów



procesy coulombowskie oraz radiacyjne:

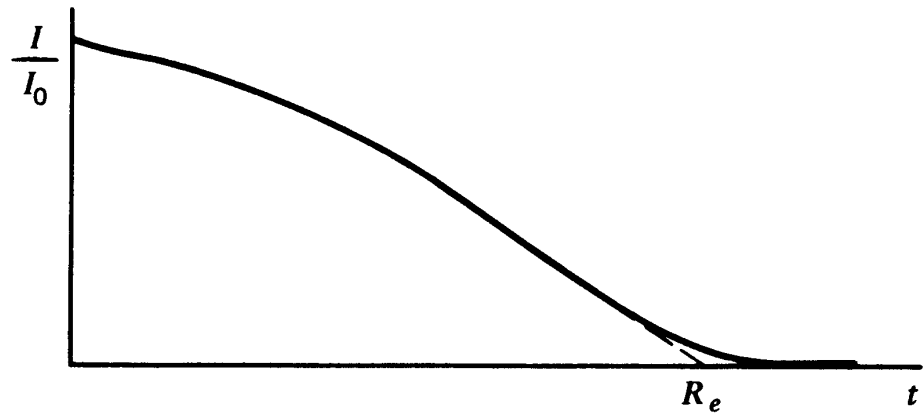
$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_c + \left(\frac{dE}{dx} \right)_r$$

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

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

Odziaływanie elektronów

Zasięg:



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

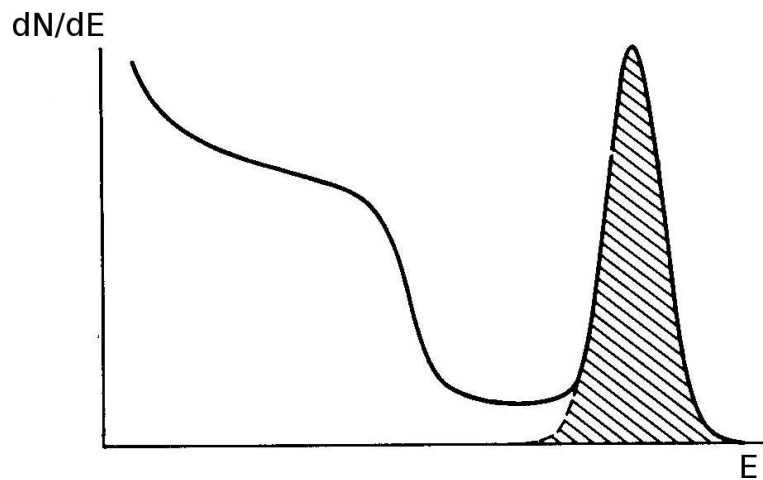
Nieco później ...

Podstawowe własności detektora 1/2

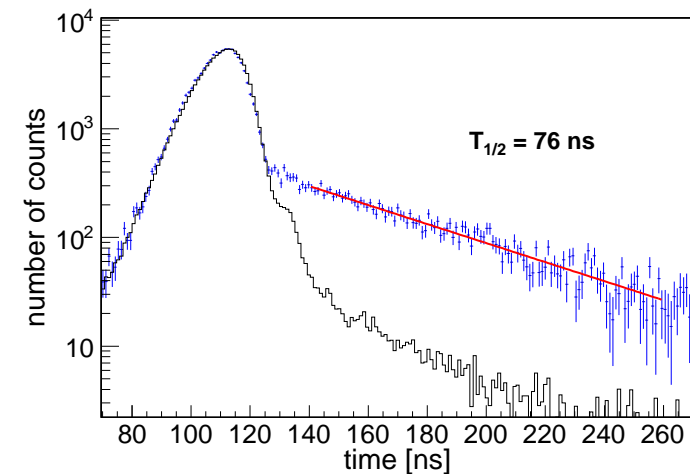
W wyniku oddziaływania promieniowania z materiałem detektora generowany jest ładunek elektryczny (czas: ps do ns).

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

Amplituda sygnału (H) jest 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

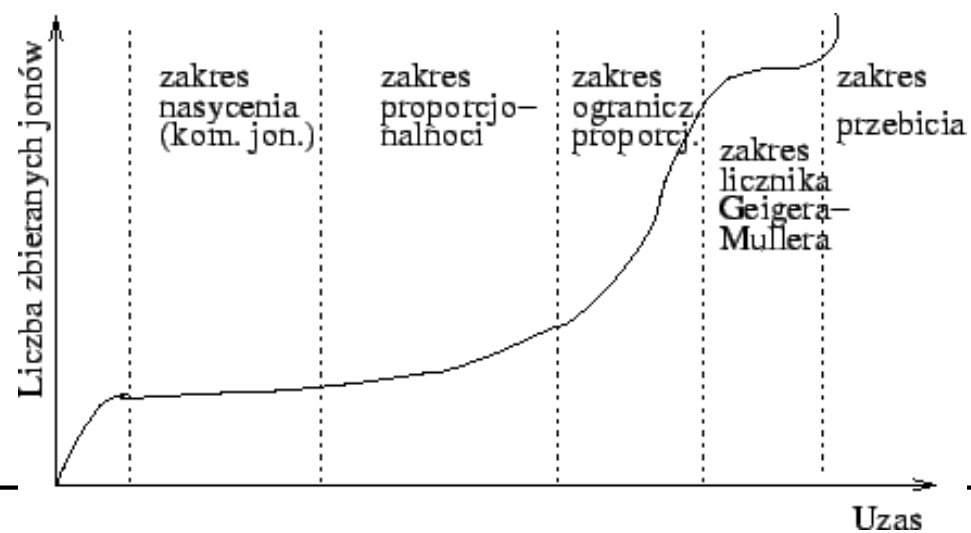
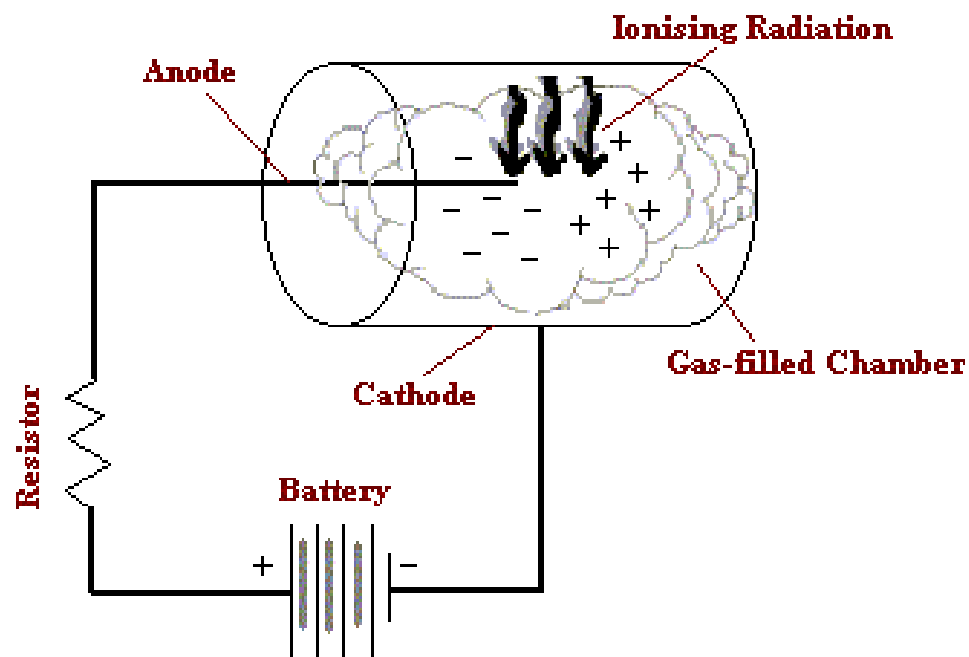
- $P/T = N_{pik}/N_{total}$
- czasowa zdolność rozdzielcza
- czas martwy

Rodzaje detektorów

Najczęściej używane detektory:

- gazowe detektory jonizacyjne
- scyntylatory
- detektory półprzewodnikowe

Gazowe detektory jonizacyjne



Scyntylatory (1/2)

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

Idealny scyntylator:

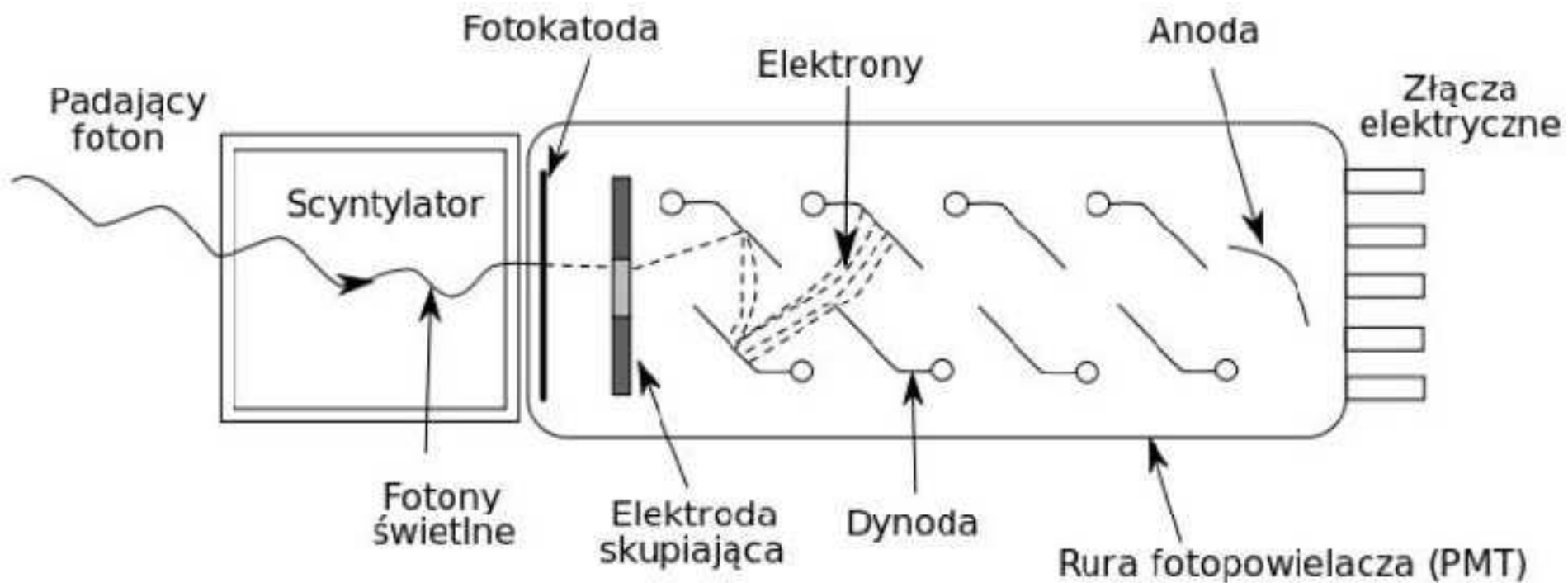
- duże prawdopodobieństwo oddziaływania (detekcji)
- wydajna konwersja $E_{kin} \rightarrow$ światło
- liniowość odpowiedzi w dużym zakresie energii
- przezroczysty dla własnego światła
- szybki
- odpowiednia wielkość i kształt
- współczynnik załamania światła bliski 1.5 (jak dla szkła)
- w niektórych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

Scyntylatory (2/2)

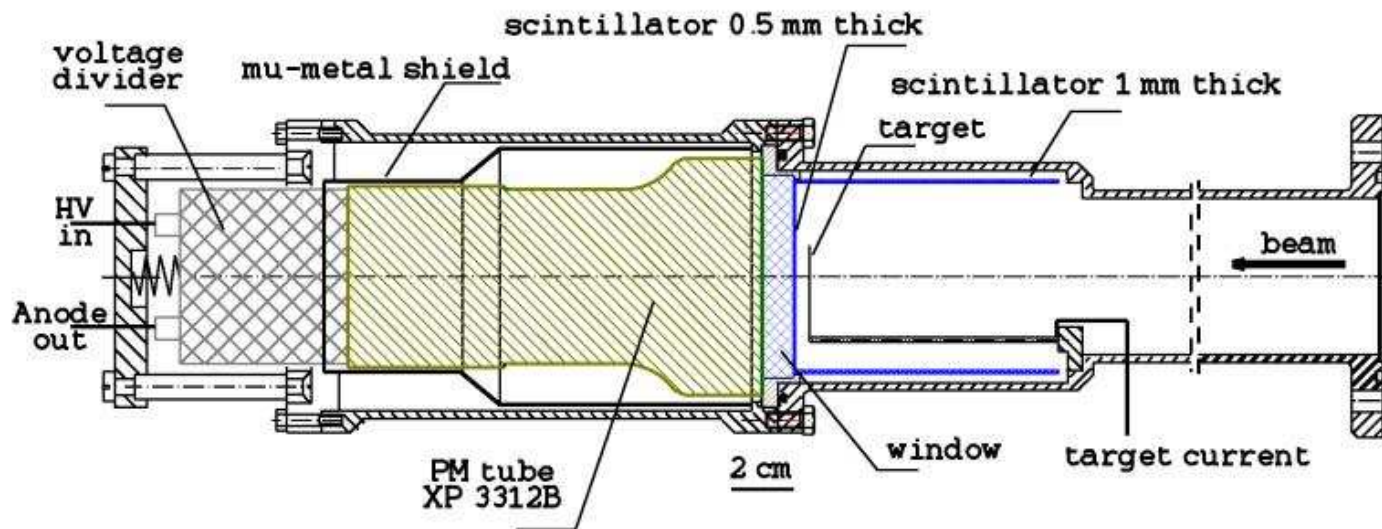
- scyntylatory organiczne: związki CH
wzbudzenia elektronów w molekułach
stałe i ciekłe
- scyntylatory nieorganiczne:
wzbudzenia elektronów w strukturze krystalicznej
wysoka gęstość i Z
mniej światła
higroskopijne

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

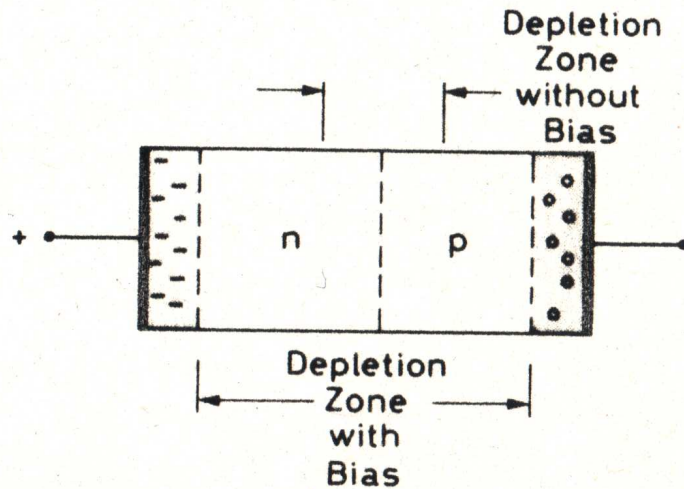
Fotopowielacz



Przykład: scynt. detektor cząstek naładowanych

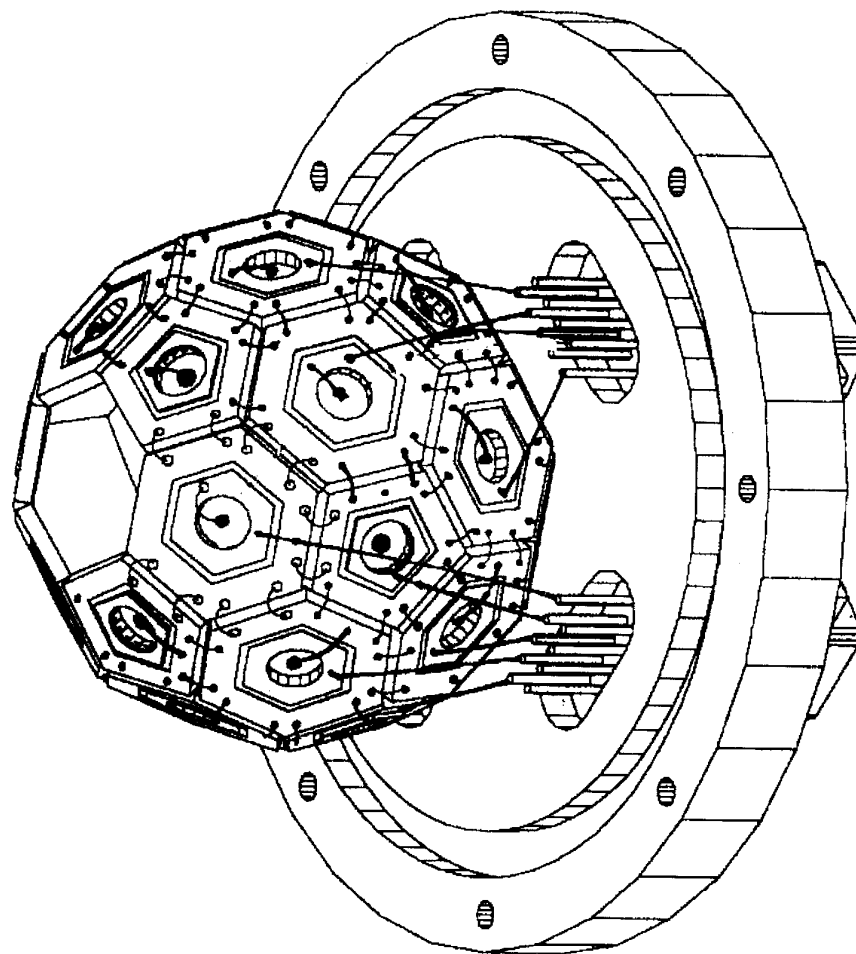


Detektor półprzewodnikowy



- 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

Przykład: detektor α i p — SiBall



Oddziaływanie kwantów γ z materią

□ **efekt fotoelektryczny:**

kwant γ oddziałuje ze związanym w atomie elektronem, przekazując mu całą swoją energię. Emitowany jest **fotoelektron** oraz kwant γ .

Energia E_γ jest (zwykle) w całości zdeponowana w detektorze w punkcie oddziaływania

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

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

Oddziaływanie kwantów γ z materią

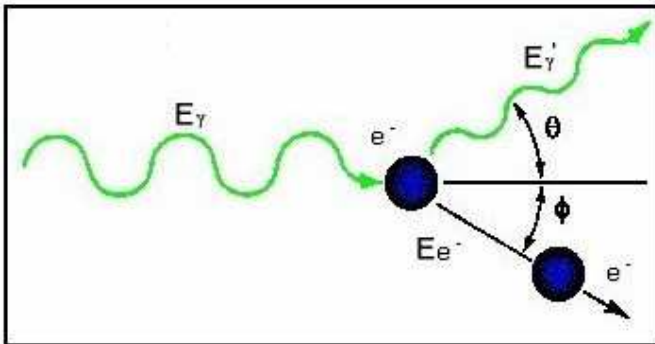
□ efekt fotoelektryczny:

kwant γ oddziałuje ze związanym w atomie elektronem, przekazując mu całą swoją energię. Emitowany jest **fotolektron** oraz kwant γ . Energia E_γ 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:



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

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

Oddziaływanie kwantów γ z materią

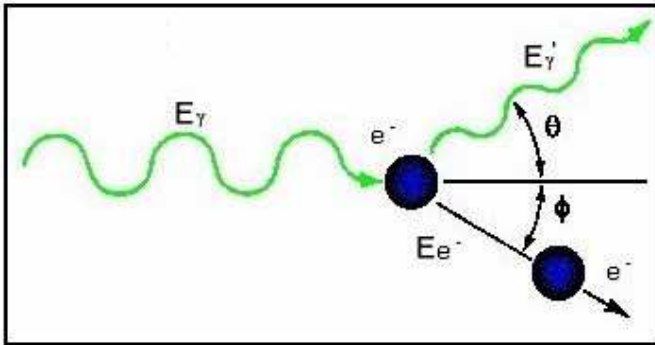
□ efekt fotoelektryczny:

kwant γ oddziałuje ze związanym w atomie elektronem, przekazując mu całą swoją energię. Emitowany jest **fotolektron** oraz kwant γ . Energia E_γ 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:



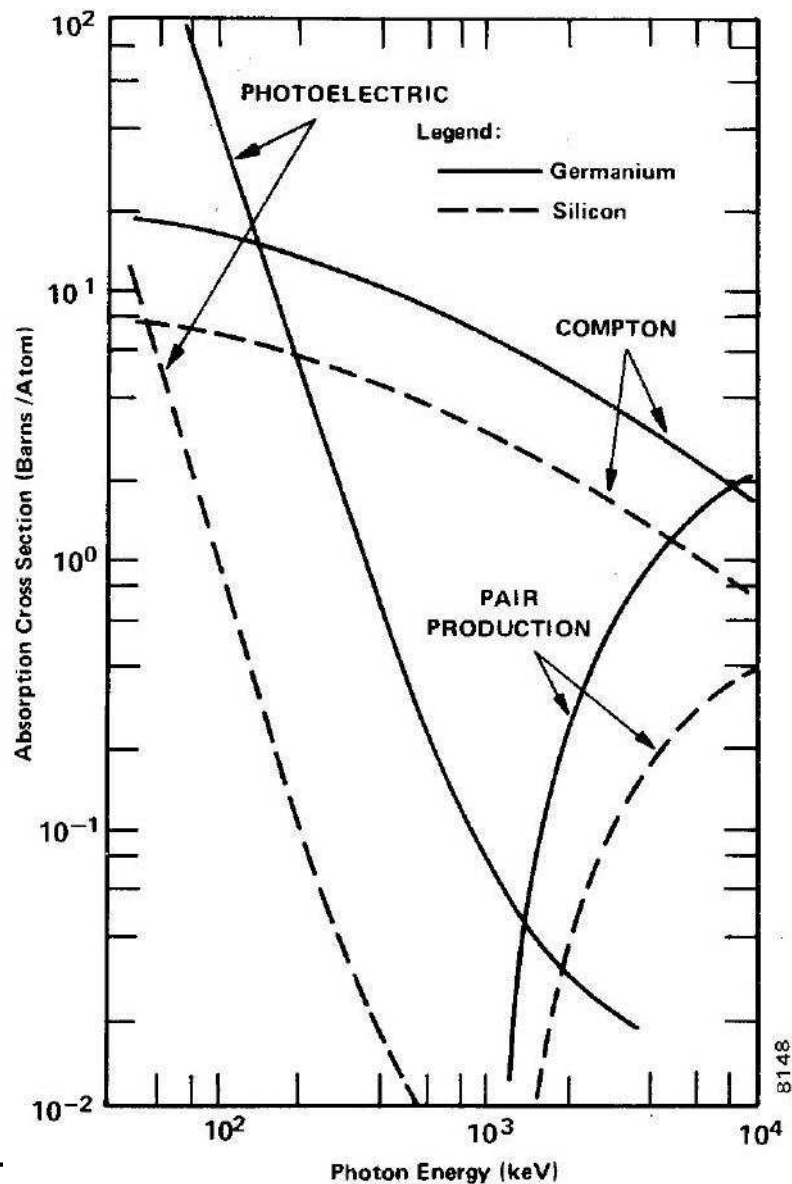
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (1 - \cos(\theta)) \frac{E_\gamma}{m_e c^2}}$$

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

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

spowolniony e^+ anihiluje dając parę kwantów γ po **511 keV** każdy

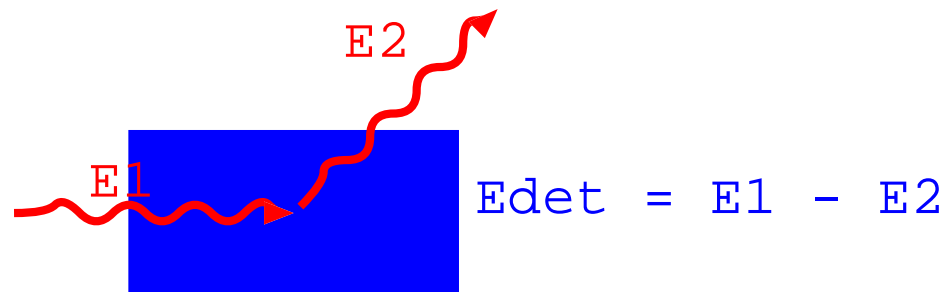
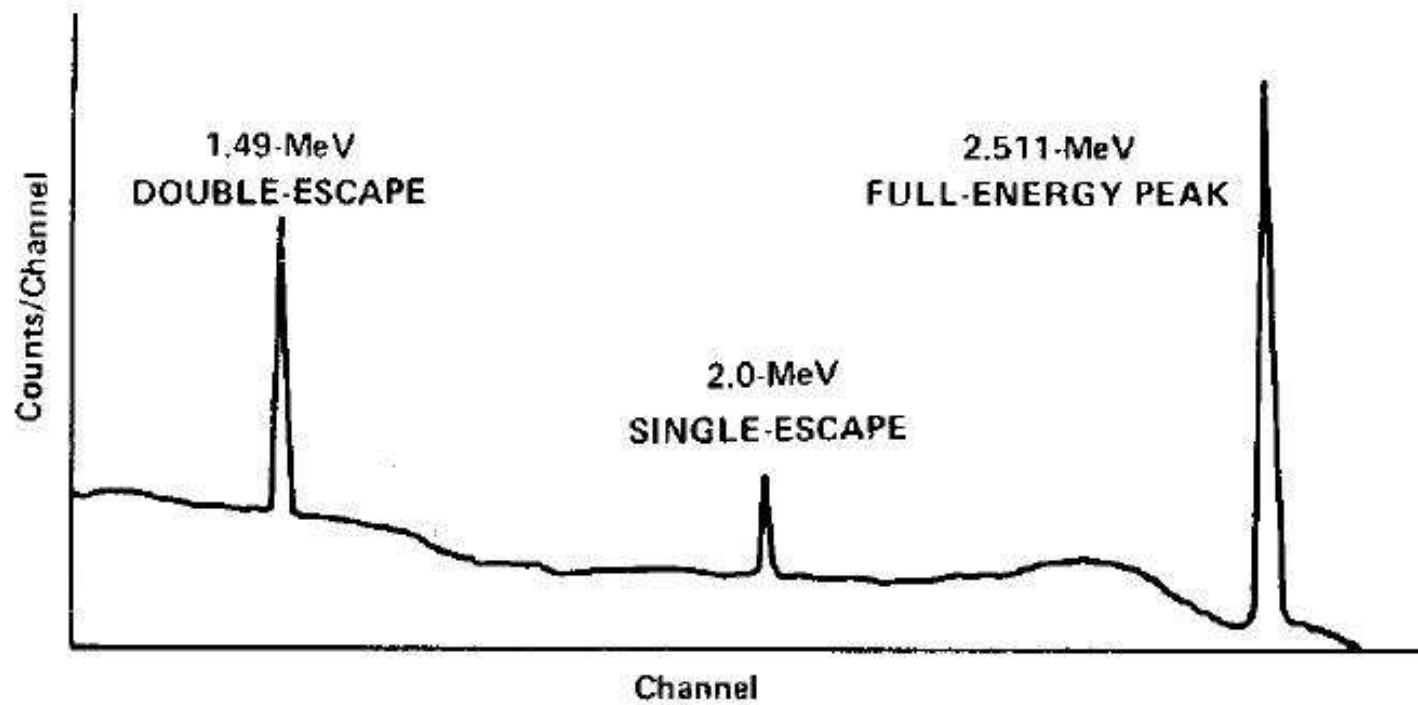
Oddziaływanie kwantów γ — porównanie



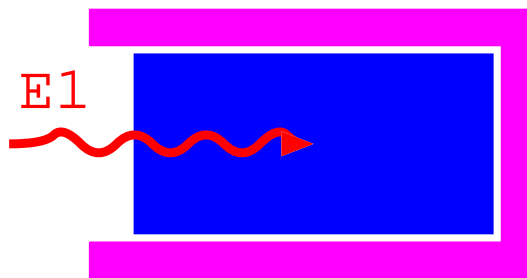
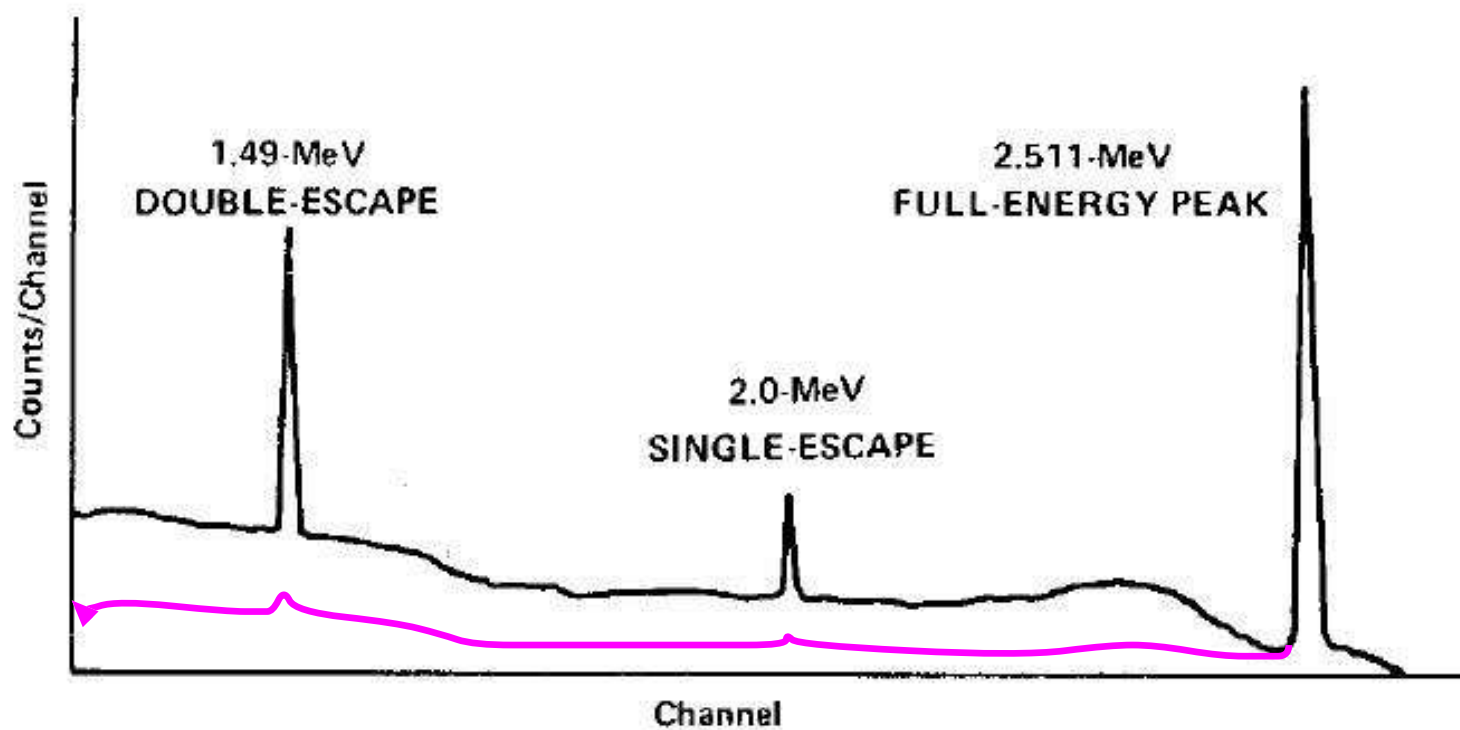
Źle: dla kwantów γ o energii powyżej ~ 100 keV dominuje rozpraszanie Comptona

Dobrze: wtórne kwanty γ powstające w oddziaływaniu Comptona mogą ponownie oddziaływać w detektorze

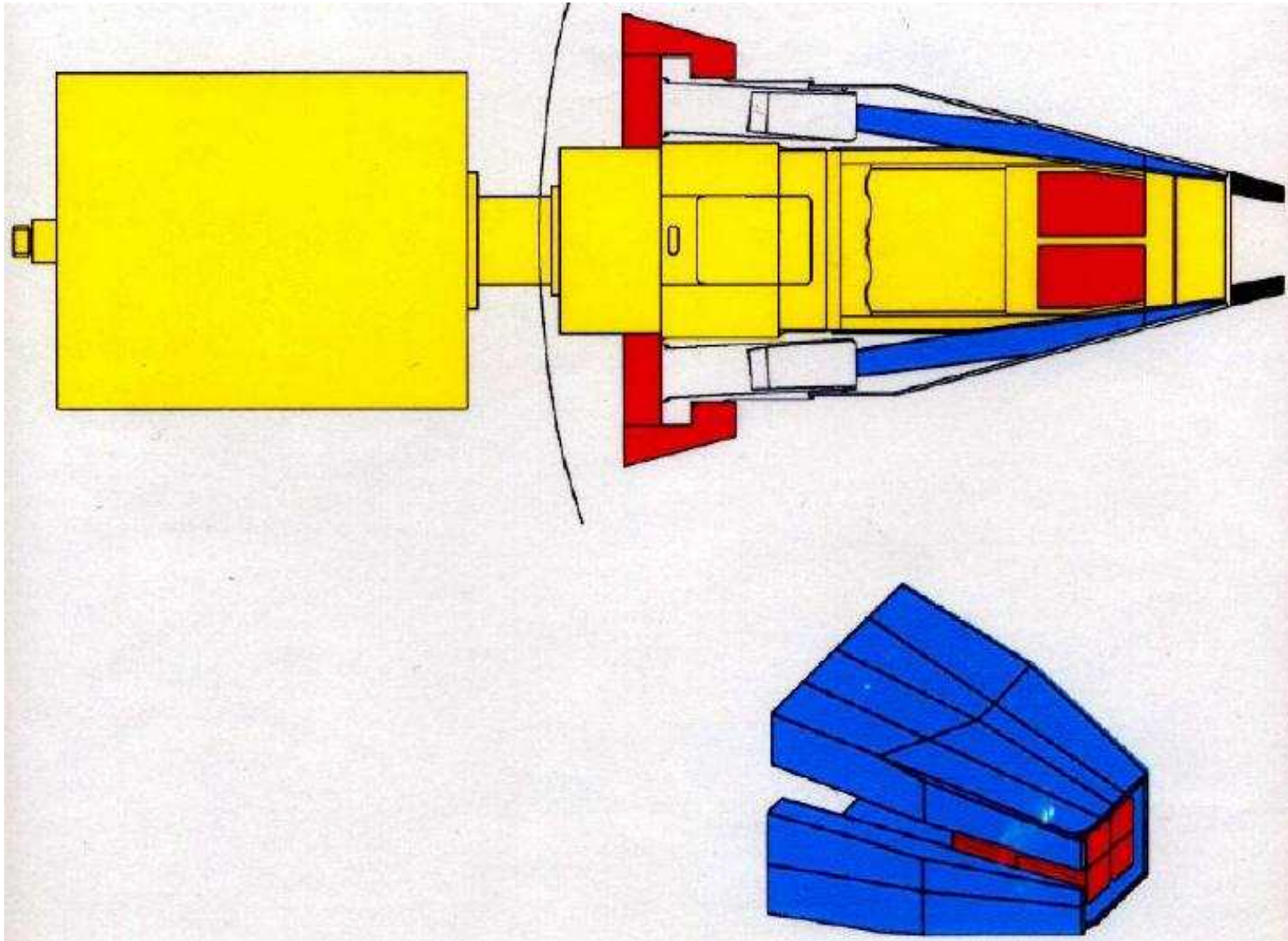
Kwanty γ w detektorze Ge



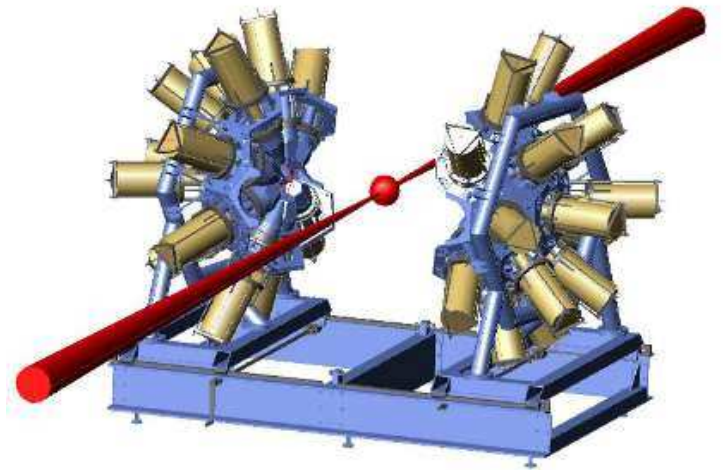
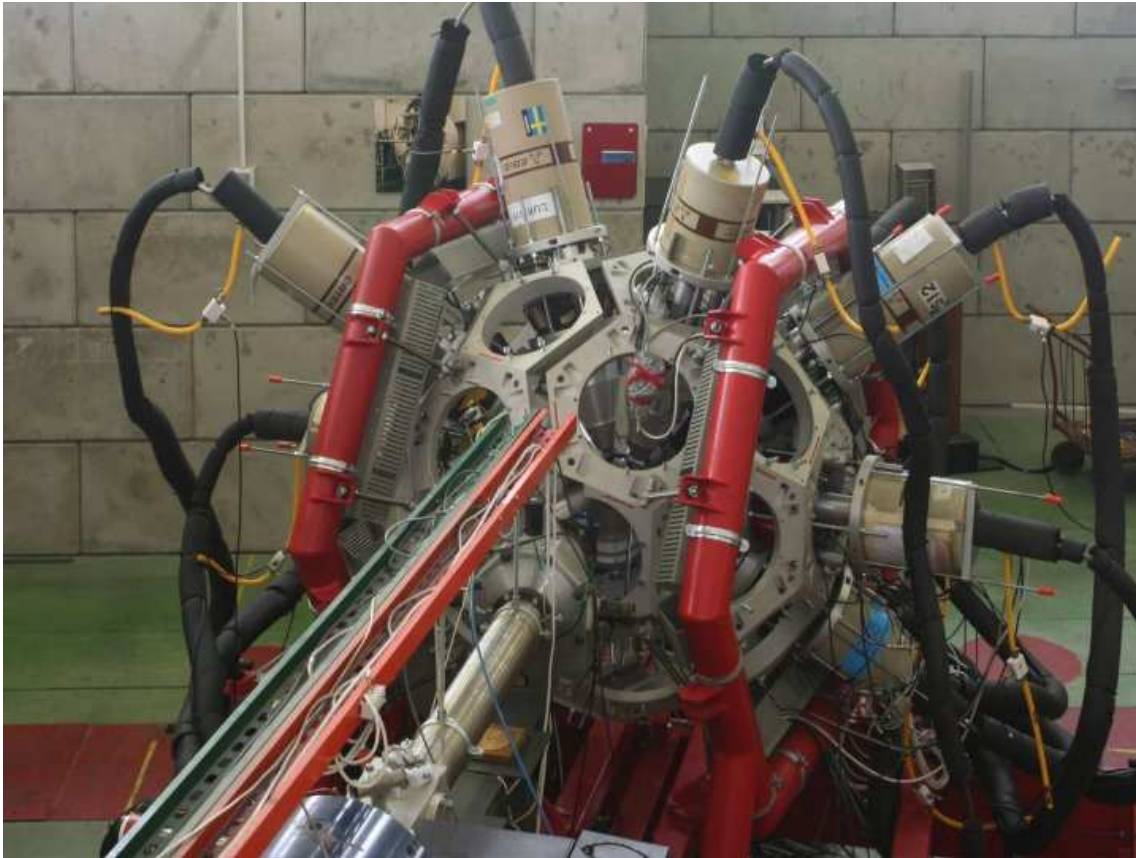
Kwanty γ w det. Ge z osłoną antykomptonowską



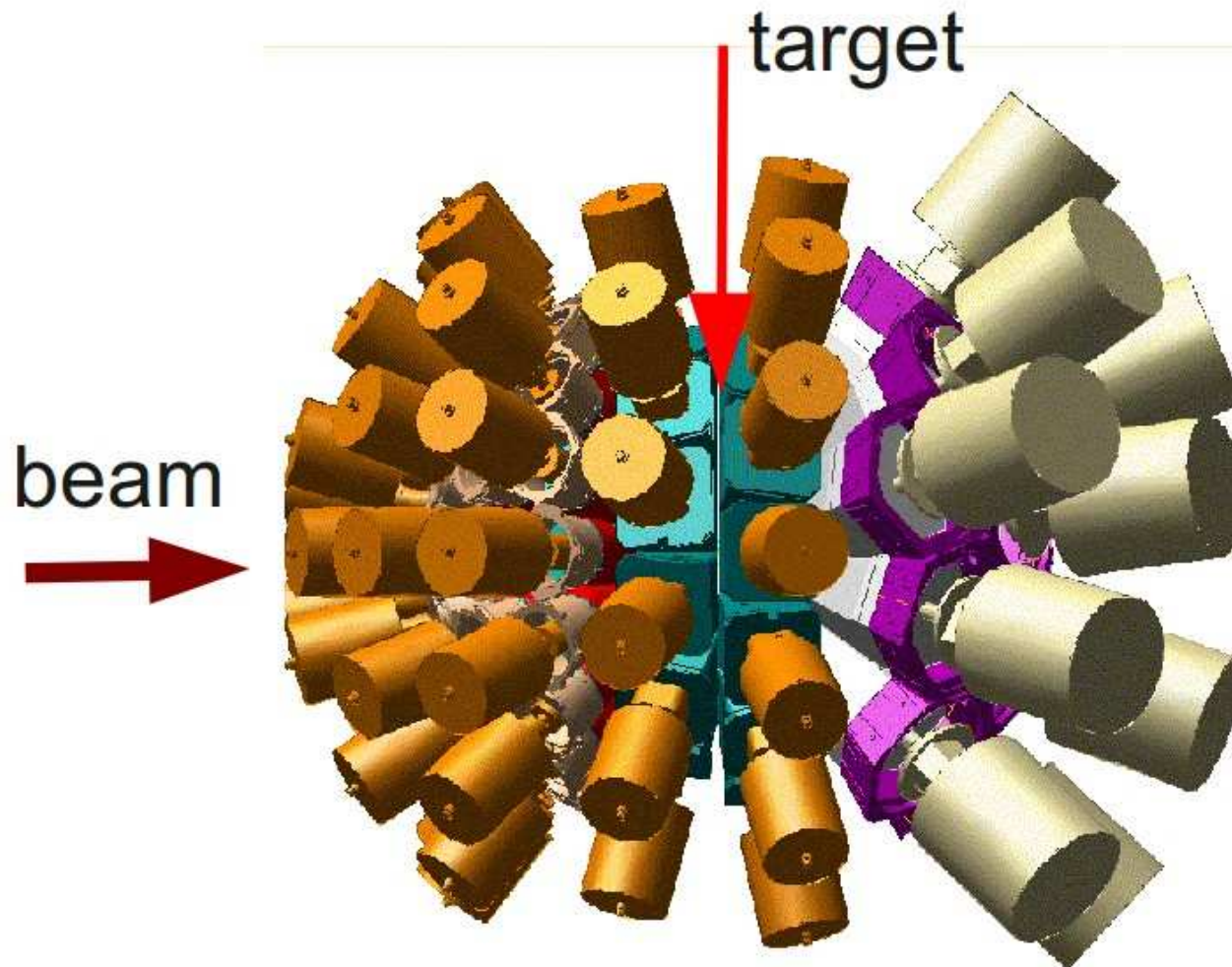
Detektor Ge z osłoną antykomptonowską



Układ detektorów germanowych: EAGLE



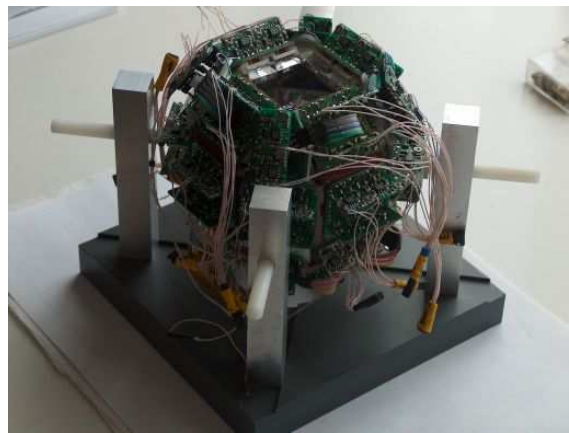
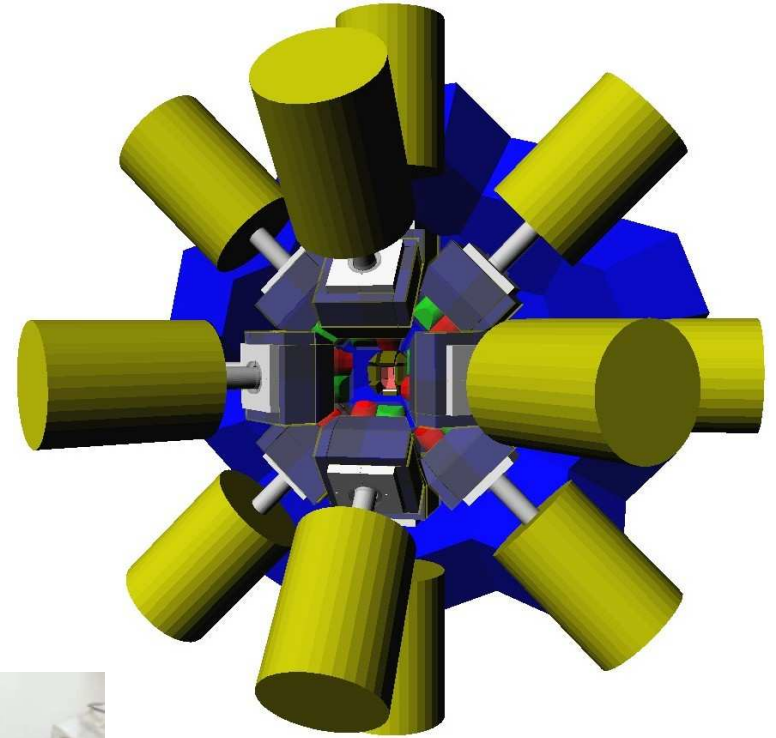
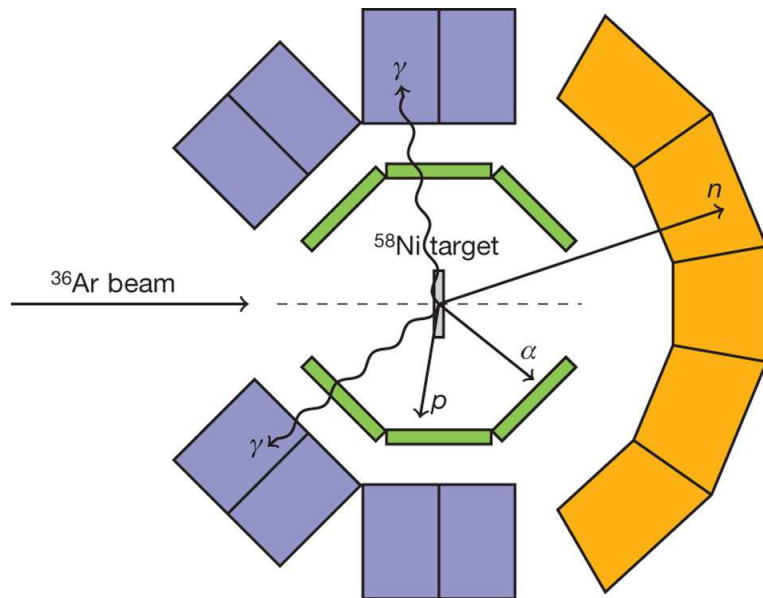
Układ EUROBALL



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

EXOGRAM + DIAMANT + Ściana Neutronowa

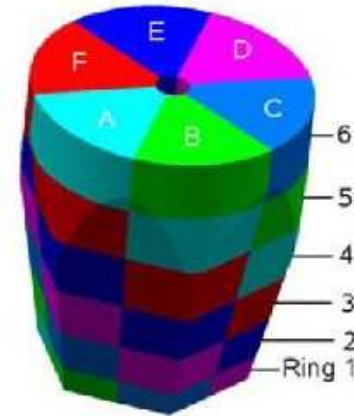
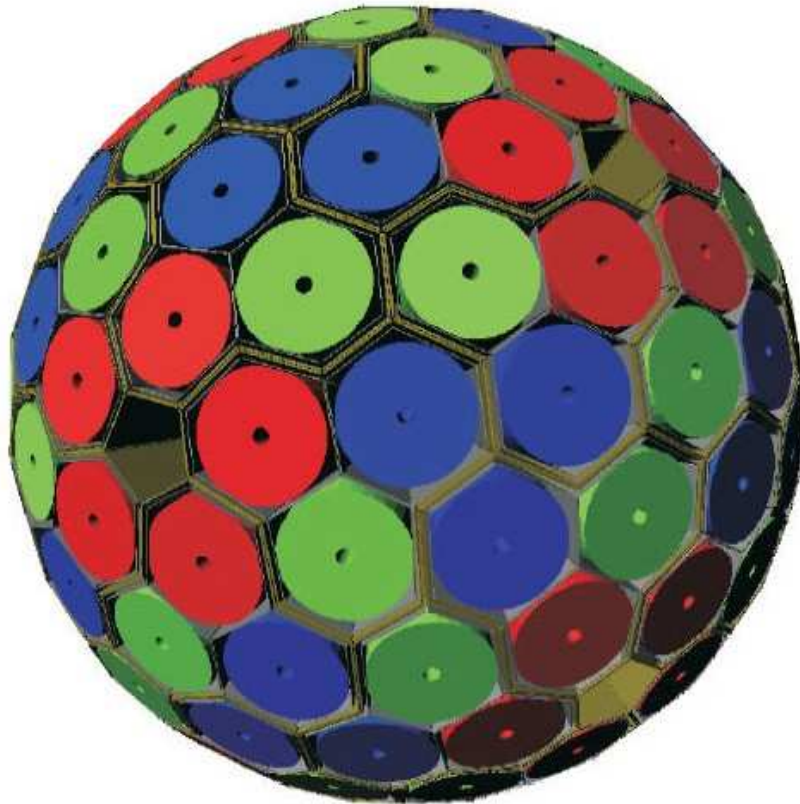
Detektory cząstek naładowanych i neutronów służą do selekcji interesujących przypadków



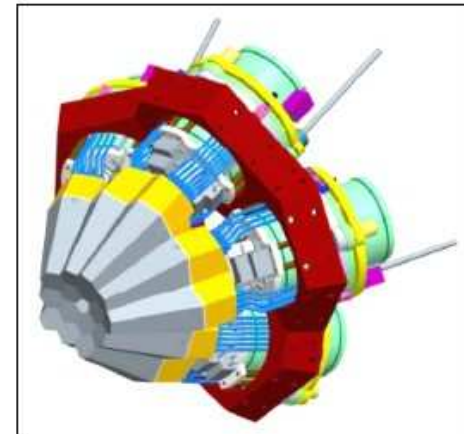
Advanced GAMMA ray Tracking Array

Sfera germanu

$180 \times 36 = 3600$ segmentów



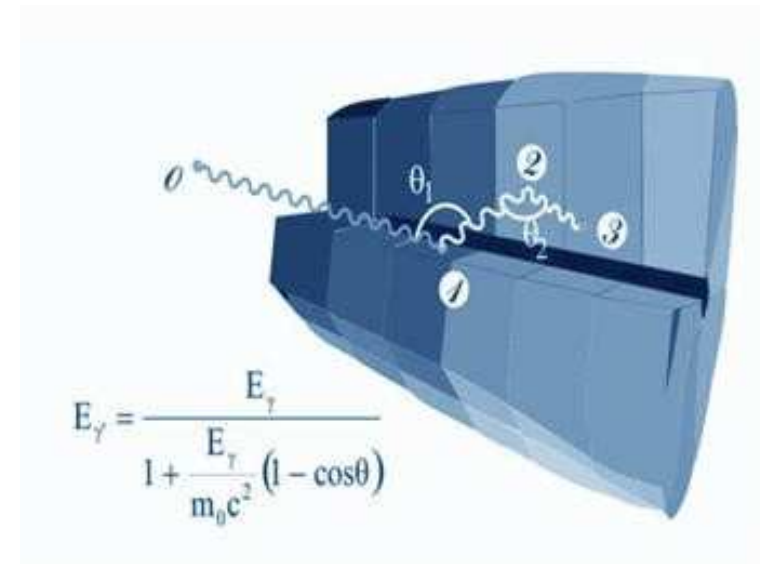
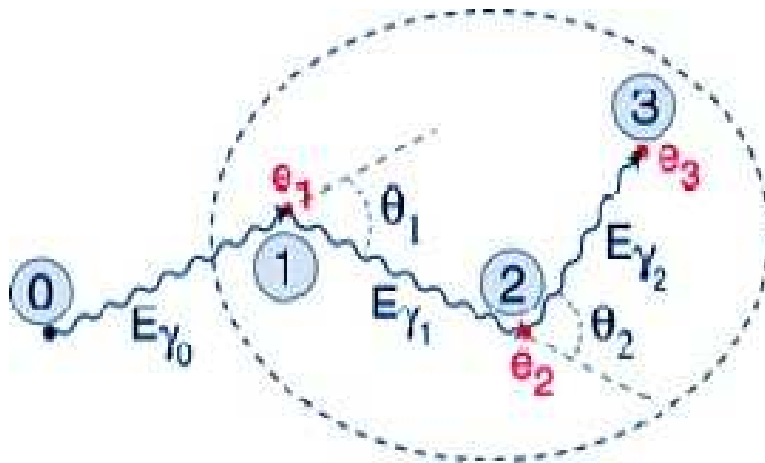
Demonstrator



Śledzenie kwantów γ — γ -ray tracking

Korelacja kąta i energii w rozpraszaniu Comptona pozwalają:

- wybrać oddziaływania (kilka spośród wielu) pochodzące od jednego kwantu γ
- odtworzyć pełną energię kwantu γ
- 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 γ o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

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

Kalibracja energetyczna

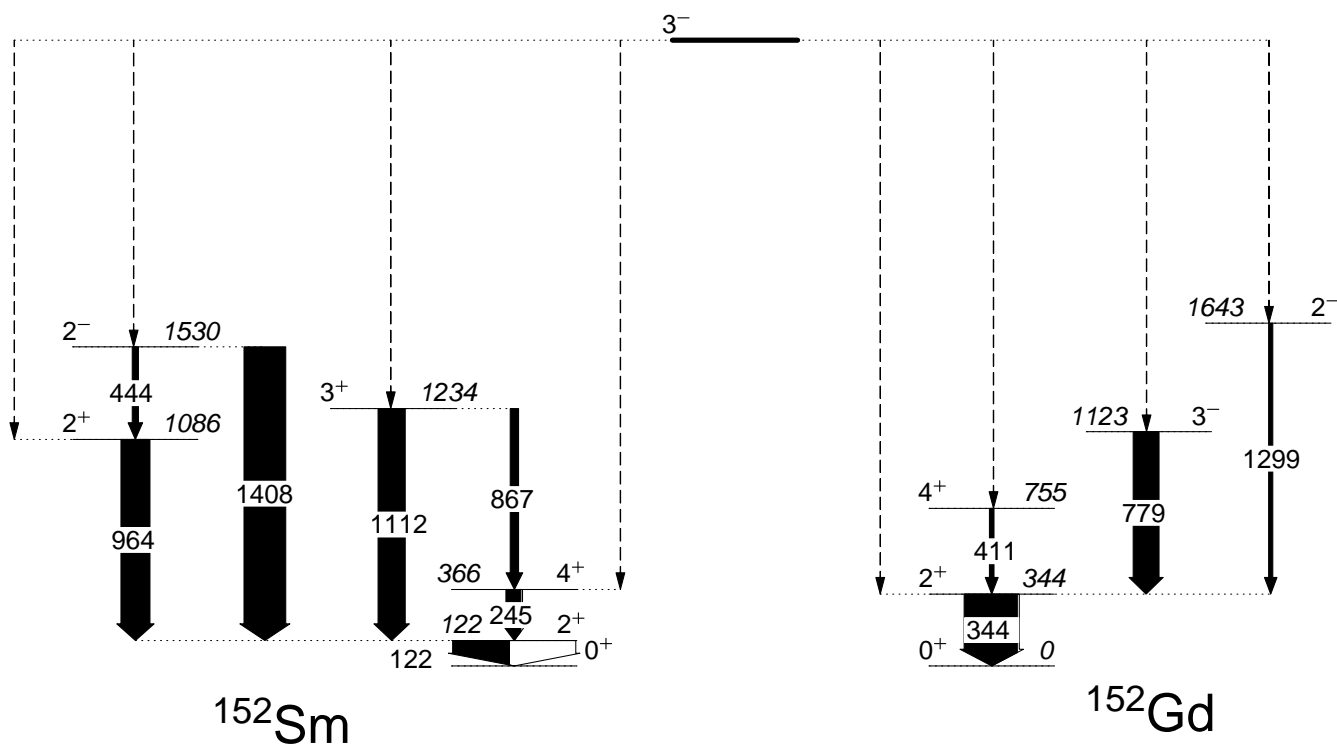
kwanty γ o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

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

wychwyt elektronu

^{152}Eu

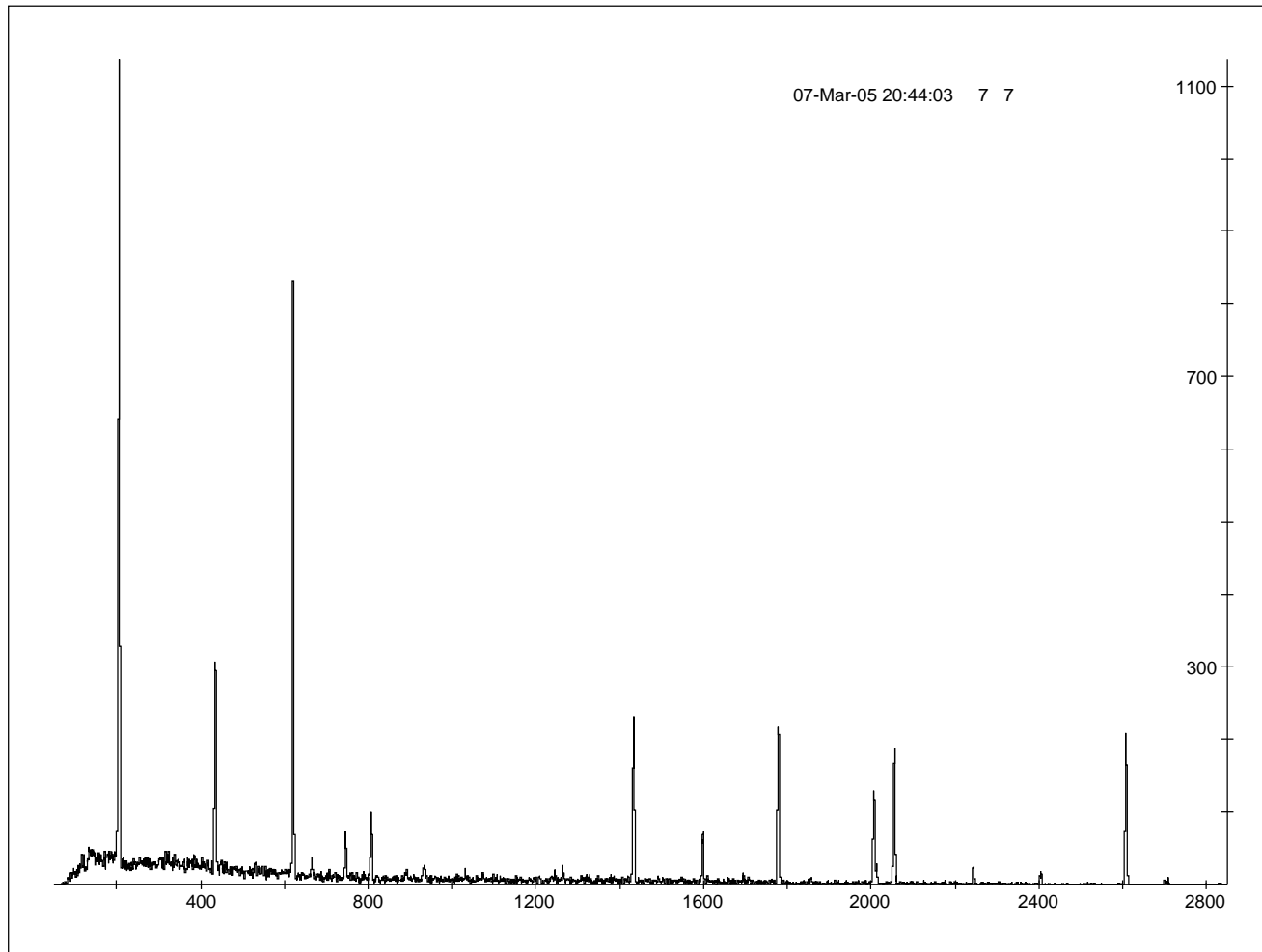
przemiana beta



Kalibracja energetyczna

kwanty γ o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

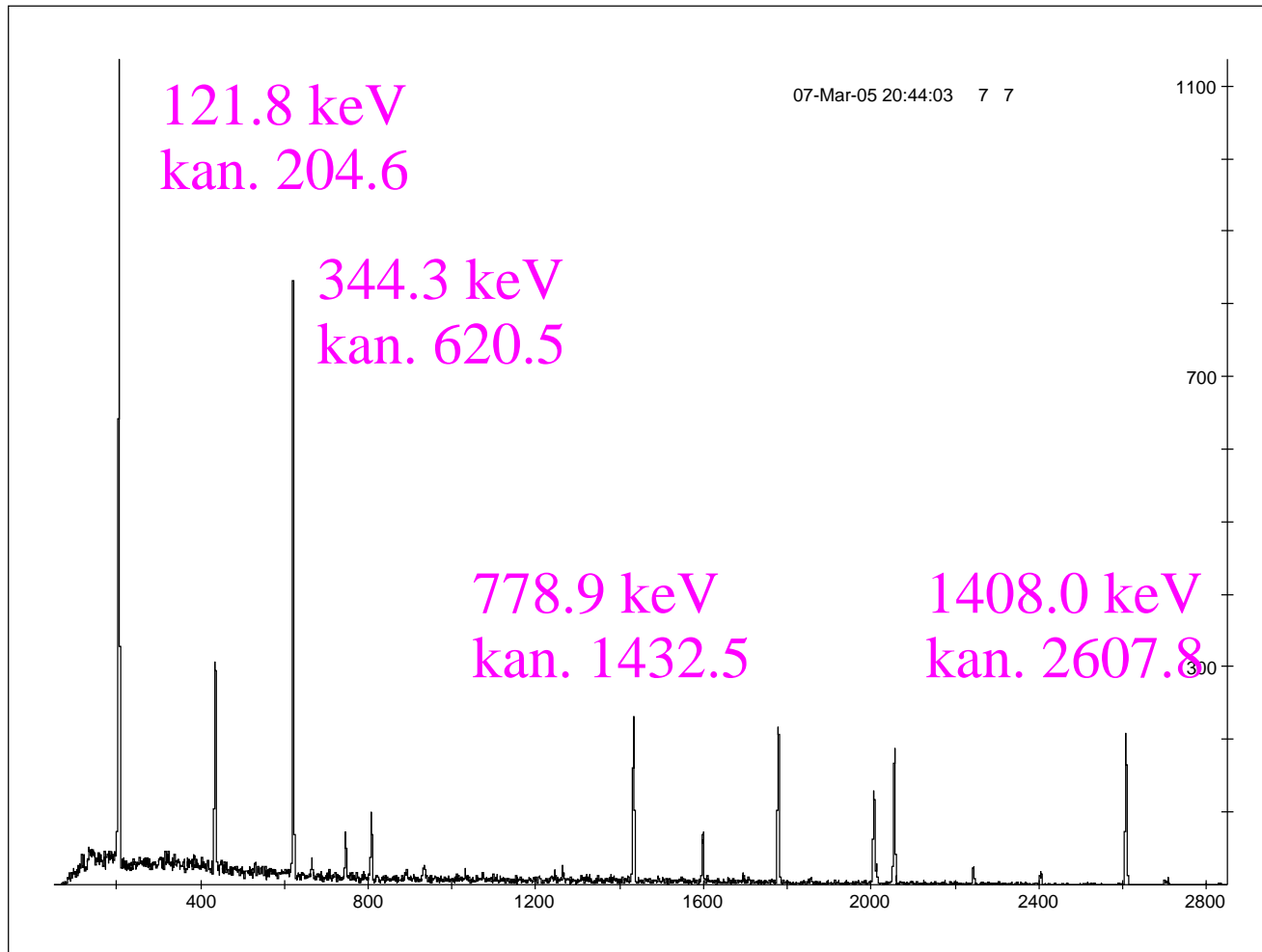
$$\rightarrow E_{\gamma} = f(x) \quad \text{np. } E_{\gamma} = a_0 + a_1 * x$$



Kalibracja energetyczna

kwanty γ o znanych energiach (źródło promieniotwórcze)

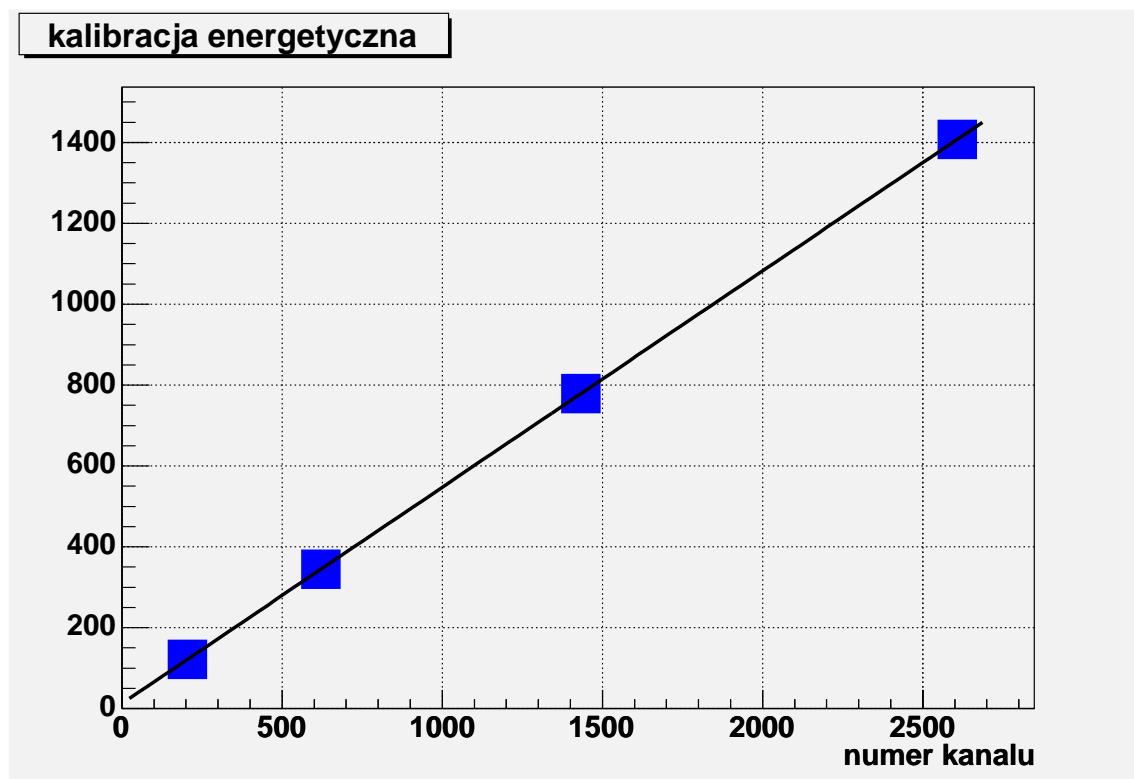
$$\rightarrow E_{\gamma} = f(x) \quad \text{np. } E_{\gamma} = a_0 + a_1 * x$$



Kalibracja energetyczna — dopasowanie

nr. kanału	E_γ (keV)
204.58 ± 0.03	121.783 ± 0.002
620.54 ± 0.08	344.276 ± 0.004
1432.53 ± 0.07	778.903 ± 0.006
2607.8 ± 0.2	1408.011 ± 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_γ (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_γ (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.

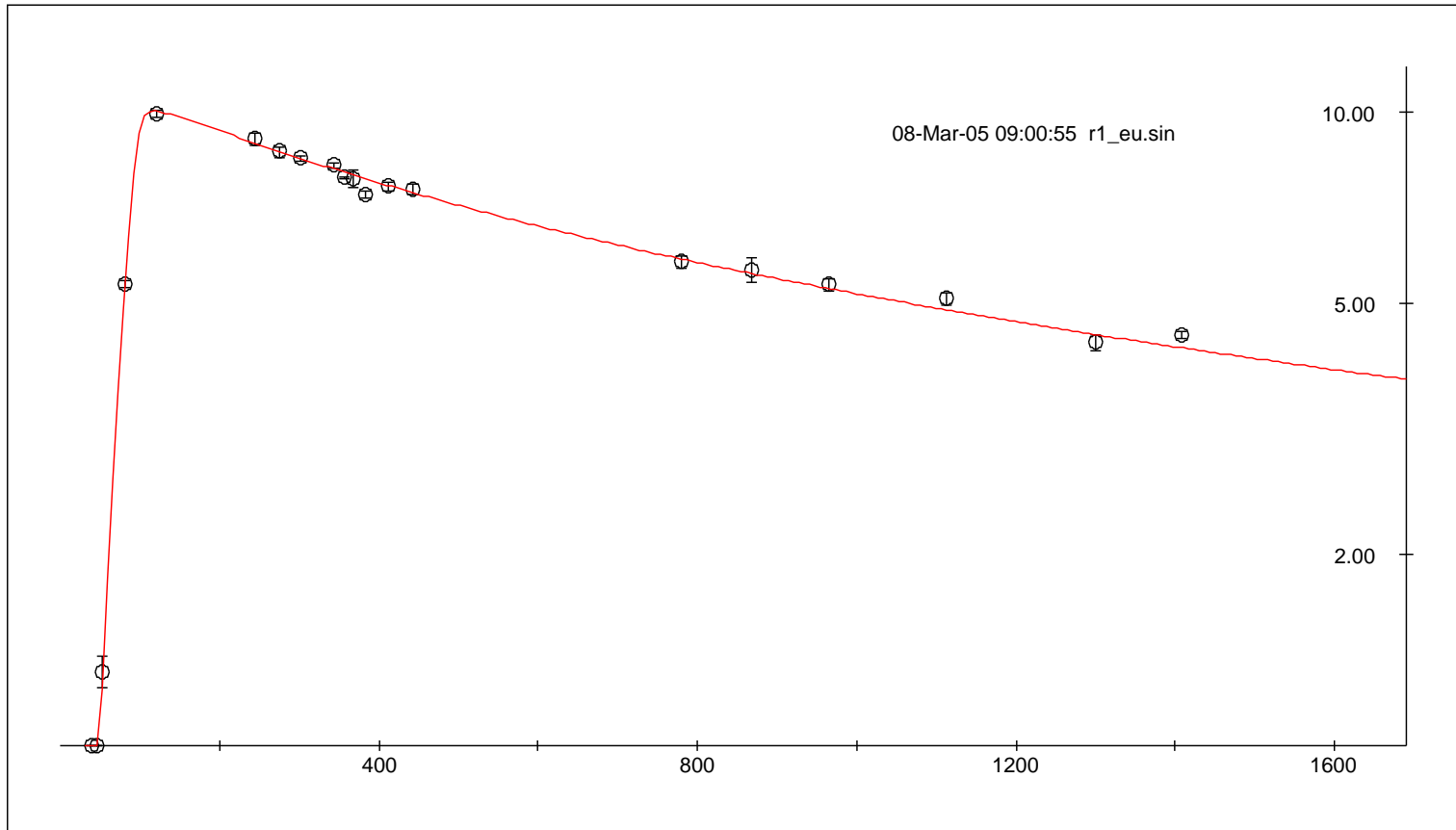
E_γ (keV)	$r(E)$	$N(E)$	$\epsilon(E)$
121.8	0.2840	4607	0.0016
244.7	0.0754	1077	0.0014
344.3	0.2652	3081	0.0011
411.1	0.0225	227	0.0010
778.9	0.1294	1003	0.00076
964.1	0.0146	995	0.00066
1112.1	0.1356	859	0.00062
1408.0	0.2080	1022	0.00048

$t = 1000$ sekund

$A = 10$ kBq

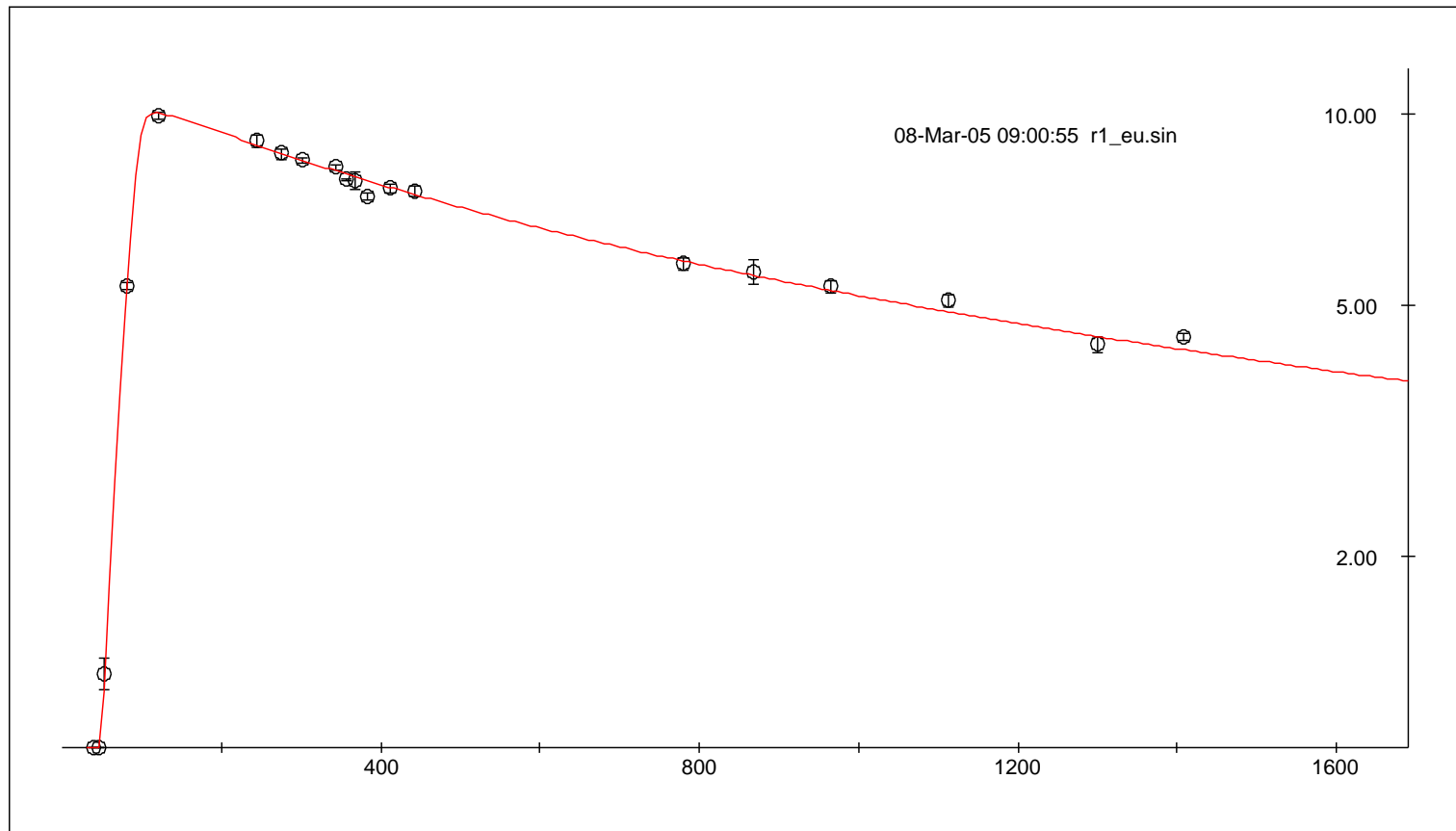
Krzywa kalibracji wydajnościowej

Detektor germanowy



Krzywa kalibracji wydajnościowej

Detektor germanowy



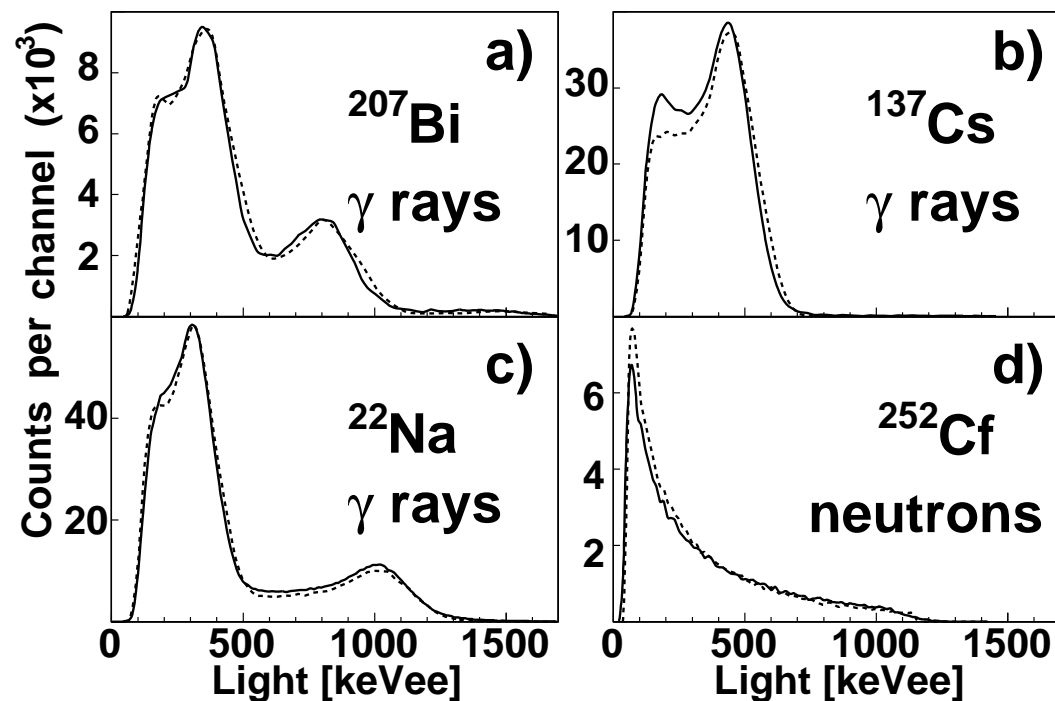
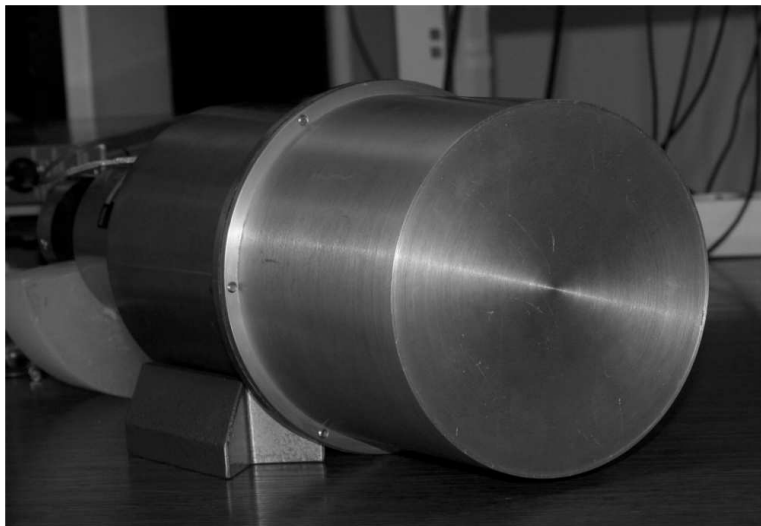
Poprawka na wydajność detektora:

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

Kalibracja scyntylatora

Trzeba wykorzystać monochromatyczne źródła kalibracyjne (ew. dwie energie)

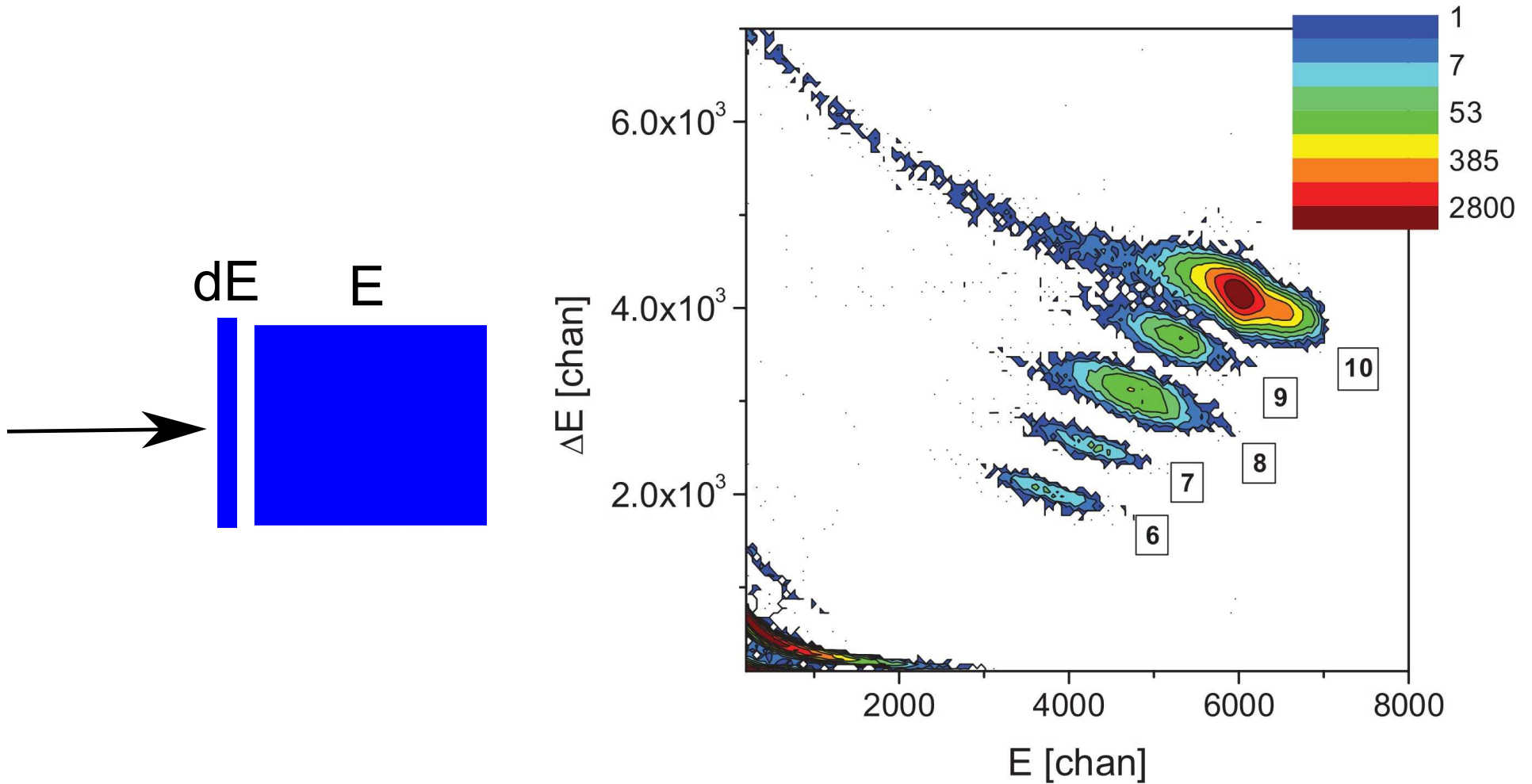
Detektor neutronów —
ciekły scyntylator



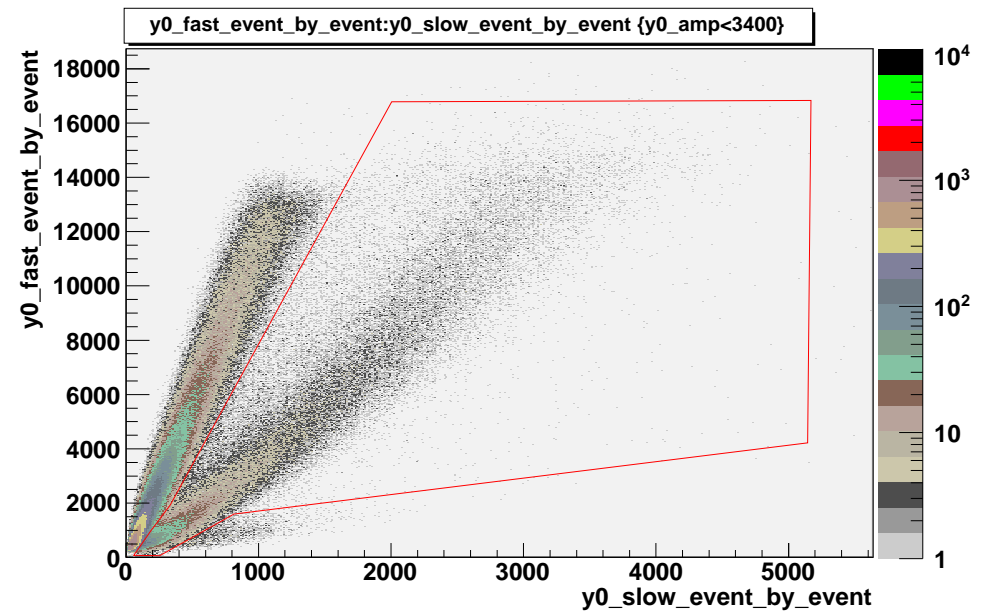
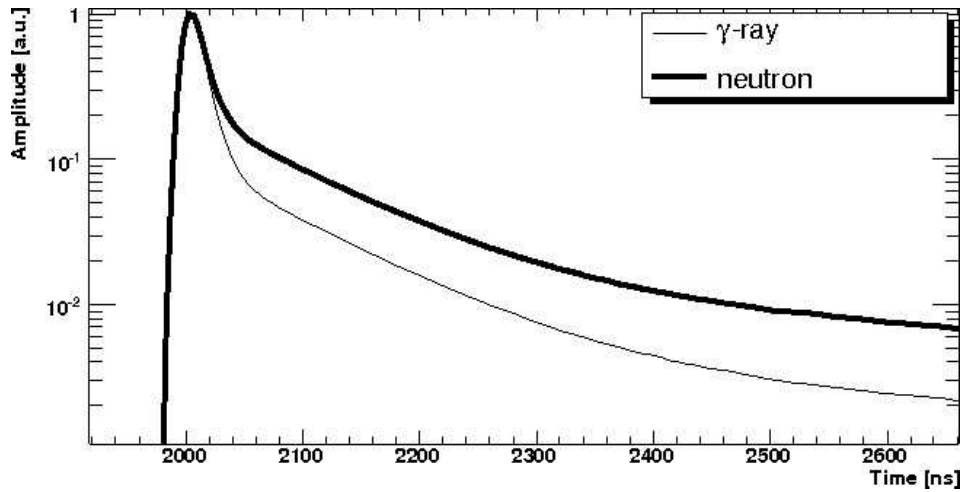
- ^{207}Bi : 560 i 1064 keV
- ^{137}Cs : 662 keV
- ^{22}Na : 511 i 1275 keV
- ^{252}Cf : neutrony

Widać krawędzie comptonowskie,
nie pełne energie!

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



Rozróżnianie neutron- γ w oparciu o kształt impulsu



Podsumowanie

- Oddziaływanie z materią elektronów, ciężkich cząstek naładowanych, neutronów i kwantów γ (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*
- J.England, *Metody doświadczalne fizyki jądrowej*