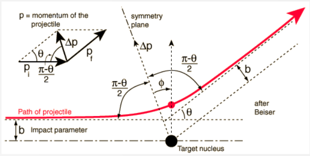
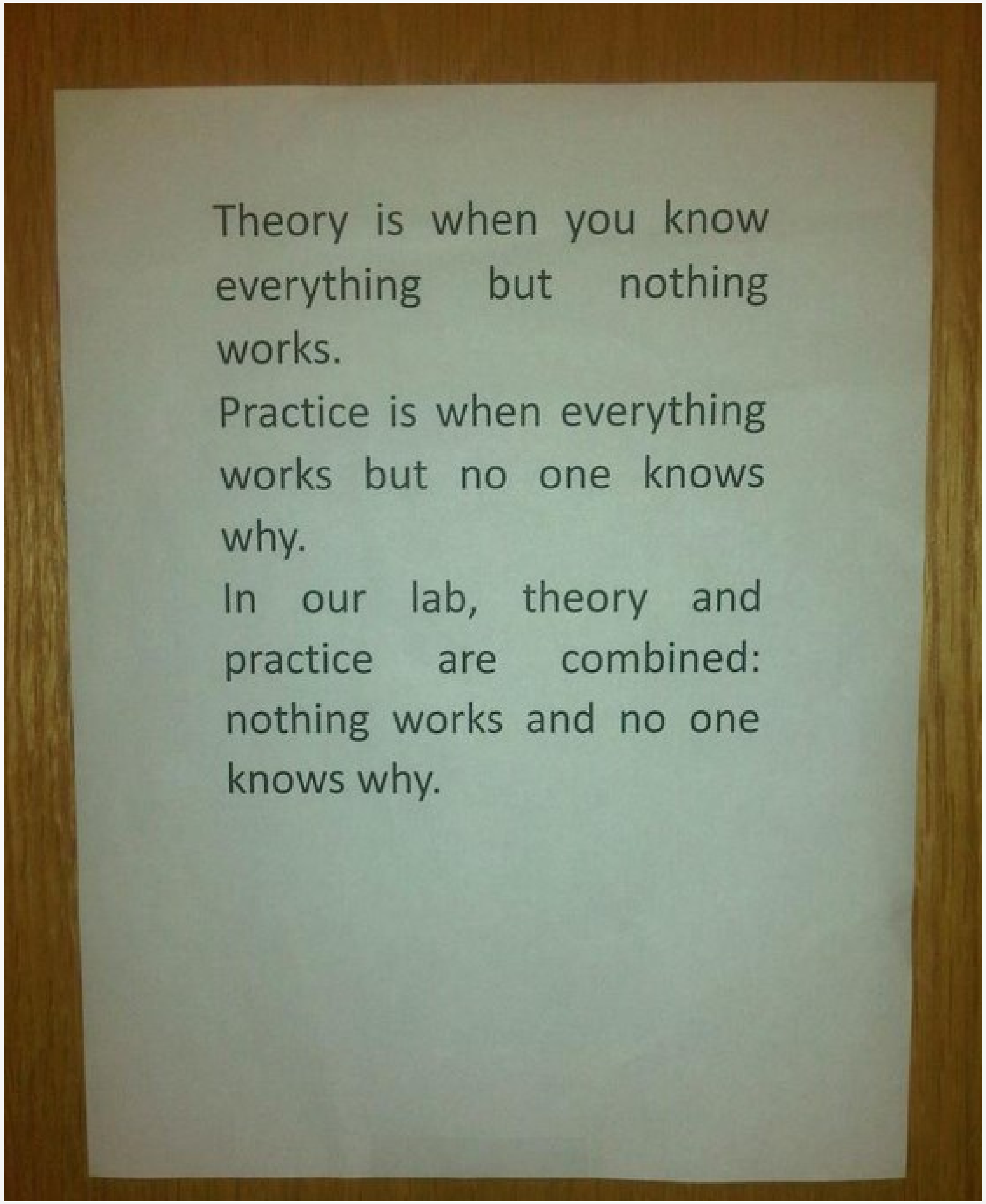


Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

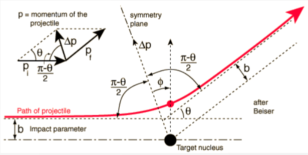
Tomasz Szumlak, <u>Agnieszka Obłąkowska-Mucha</u>

WFiIS AGH

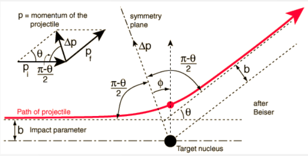
2022, Kraków



Theory is when you know everything but nothing works.
Practice is when everything works but no one knows why.
In our lab, theory and practice are combined: nothing works and no one knows why.



p = momentum of the projectile
symmetry plane
Δp
Δp
p_i
p_f
θ
θ
$\frac{\pi-\theta}{2}$
$\frac{\pi-\theta}{2}$
$\frac{\pi-\theta}{2}$
ϕ
b
b
Path of projectile
Impact parameter
Target nucleus
after Beiser



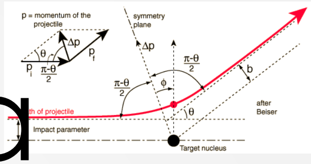
The difference between theory and practice is larger in practice than the difference between theory and practice in theory.

— Jan L. A. van de Snepscheut —

In theory, theory and practice are the same. In practice, they are not.

— Albert Einstein —

Odpowiedź detektora

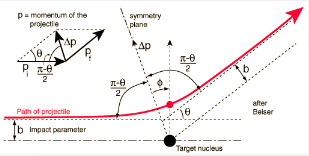


Zwykle, poza prostym stwierdzeniem **obecności** danego typu promieniowania detektory są zdolne do wykonania dodatkowych **pomiarów ilościowych** – położenie, energia cząstek, itp.

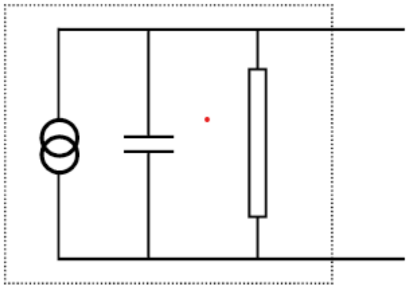
Np. w przypadku pomiaru energii, możemy wykorzystać fakt, że typowy detektor można traktować jako **źródło prądu** (depozycja energii i jonizacja powodują powstanie impulsu prądowego)

- **Liczba** wyprodukowanych **par nośników ładunku** (jonizacja) jest ~ **energii zdeponowanej** w detektorze (przy całkowitej absorpcji jest to miara energii cząstki)
- Elektronika odczytu może „podać” nam ilość wyprodukowanego na drodze jonizacji ładunku poprzez **całkowanie impulsów prądowych po czasie**
- **Całka** ta jest **proporcjonalna** do „wysokości” (amplitudy) impulsu (sygnału) – **pulse height**
- **Związek** pomiędzy energią promieniowania a wygenerowanym ładunkiem (lub wysokością impulsu) nazywamy **odpowiedzią detektora**

Sygnał



- Detektor z punktu widzenia elektroniki jest urządzeniem o bardzo dużej rezystancji.
- Interakcja cząstki z materią indukuje niewielki sygnał prądowy (impuls).
- Czas trwania impulsu: 100 ps (cienkie Si)-n10 μs (scyntylatory).
- Dlatego detektor na schematach jest oznaczany jako źródło prądu z dużym oporem i małą pojemnością.

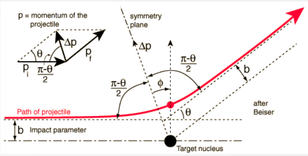


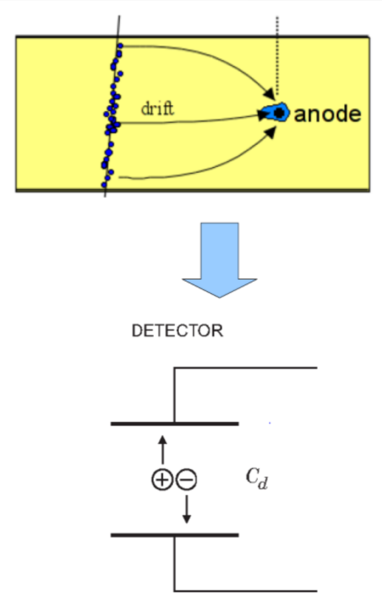
- Nawet przy braku promieniowania indukowany jest prąd zwany szumem (dark current, leakage current)
- Detektory zwykle pracują w trybie:
  - prądowym: jedynie pomiar prądu,
  - impulsowym: dodatkowo informacja o kształcie sygnału, czasie narastania i opadania, amplitudzie (najczęściej)
- Amplituda pulsu jest proporcjonalna do wielkości ładunku

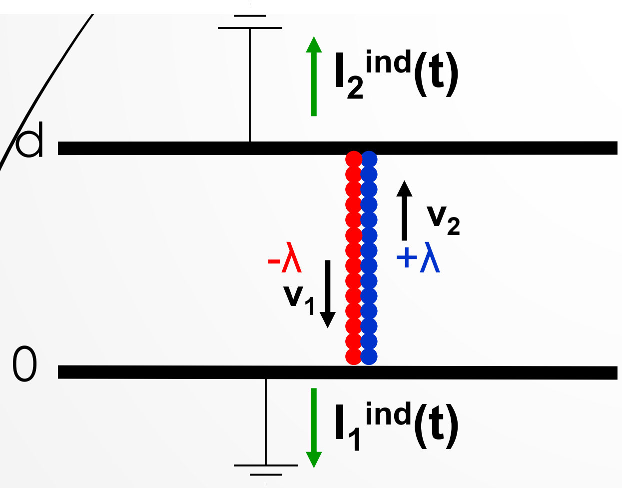
Sygnał

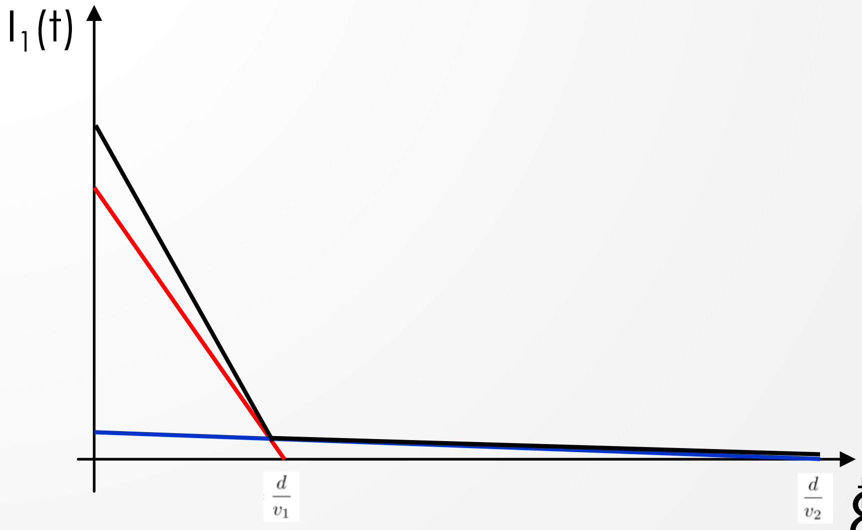
- Sygnał w detektorze pochodzi z **indukowanego pola wywołanego poruszającymi się ładunkami**. Jak ładunki dotrą do elektrod sygnał się kończy (teoria Ramo Shockley)

$$I_{ind}(t) = \frac{dQ_{ind}(t)}{dt}$$

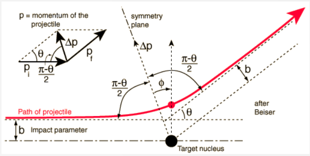






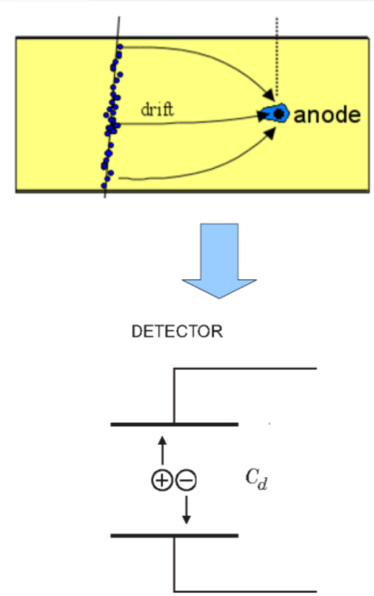


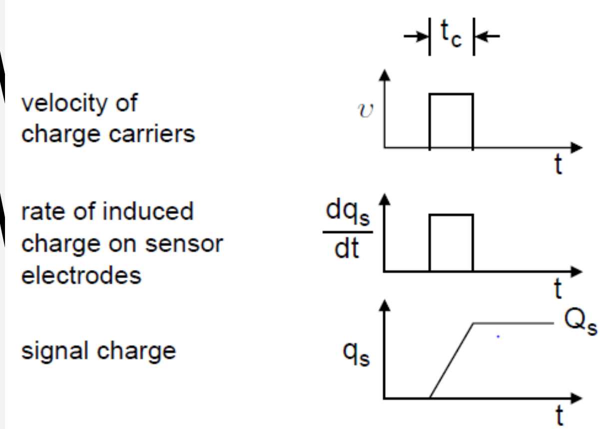
Sygnał?



- Detektor jest reprezentowany jako kondensator o pojemności C_d
- Potencjał liczony jest z równania Laplacea
- Energia zdeponowana (a o taki pomiar nam chodzi) przez przechodzącą cząstkę generuje mały impuls:

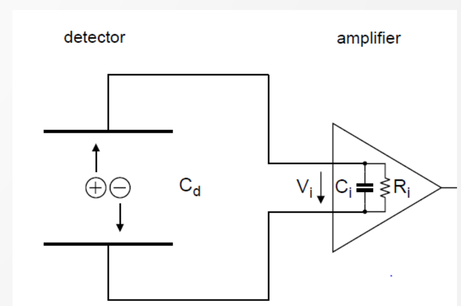
$$E_K \propto Q_s = \int i_s(t)dt$$



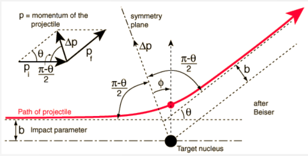


- Sygnały są niewielkie (Si: 50 aC dla X, 4 fC dla ciężkich), stąd w następnym kroku stosowane są wzmacniacze. Generuje to szumy z elektroniki

$$V_i = \frac{Q_s}{C_d + C_i}$$

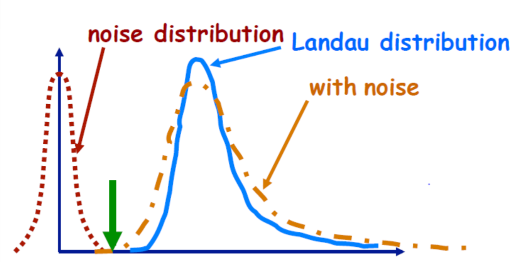


Signal-to-Noise ratio



- Podstawowym zadaniem projektu detektora jest jak najlepszy stosunek signal-to-noise ratio (SNR).
- Szumy mogą pochodzić z samego procesu detekcji i z elektroniki:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_{flukt}^2 + \Delta E_{noise}^2}$$



- Fluktuacje depozytów energii
- fluktuacje odczytu związane np. z konwersją $\gamma - e$ w fotopowielaczach

Szumy z elektroniki:
- szum termiczny (związany z poruszaniem się nośników)
- shot noise związany z statystycznym procesem produkcji nośników (Poisson distr)

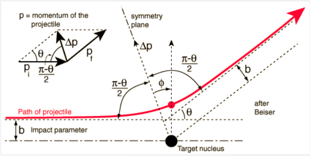
- SNR jest odwrotnie prop. do pojemności wejściowej

$$\frac{V_s}{V_n} = \frac{Q_s}{V_n\,(C_d + C_i)}$$

Szum z detektora

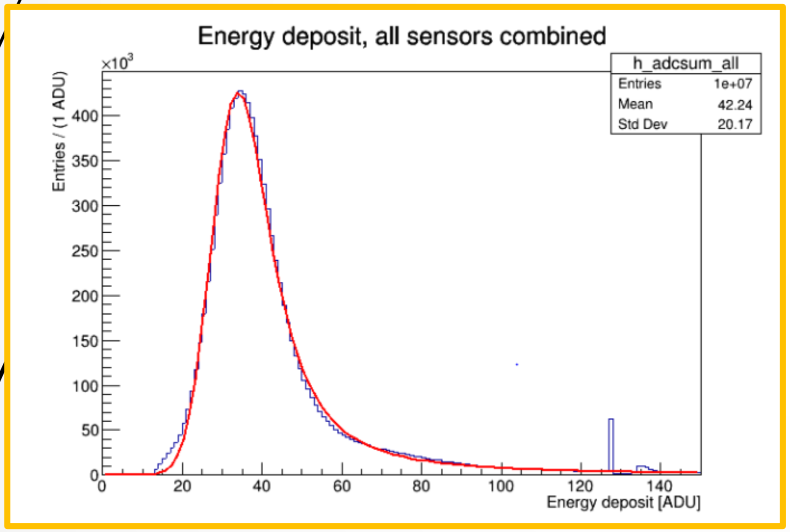
Grube detektory mają zwykle większe szumy

Signal-to-Noise ratio

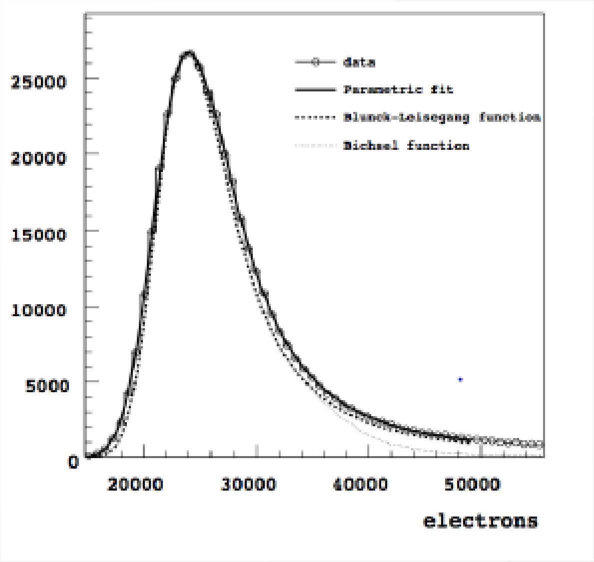


- ❑ SNR poprawi się również, gdy sygnał jest odpowiednio kształtowany (p. kursy elektroniki)

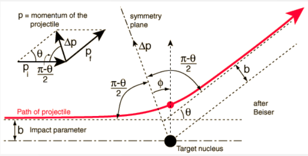
- ❑ Rzeczywiste sygnały z detektorów wyglądają tak:



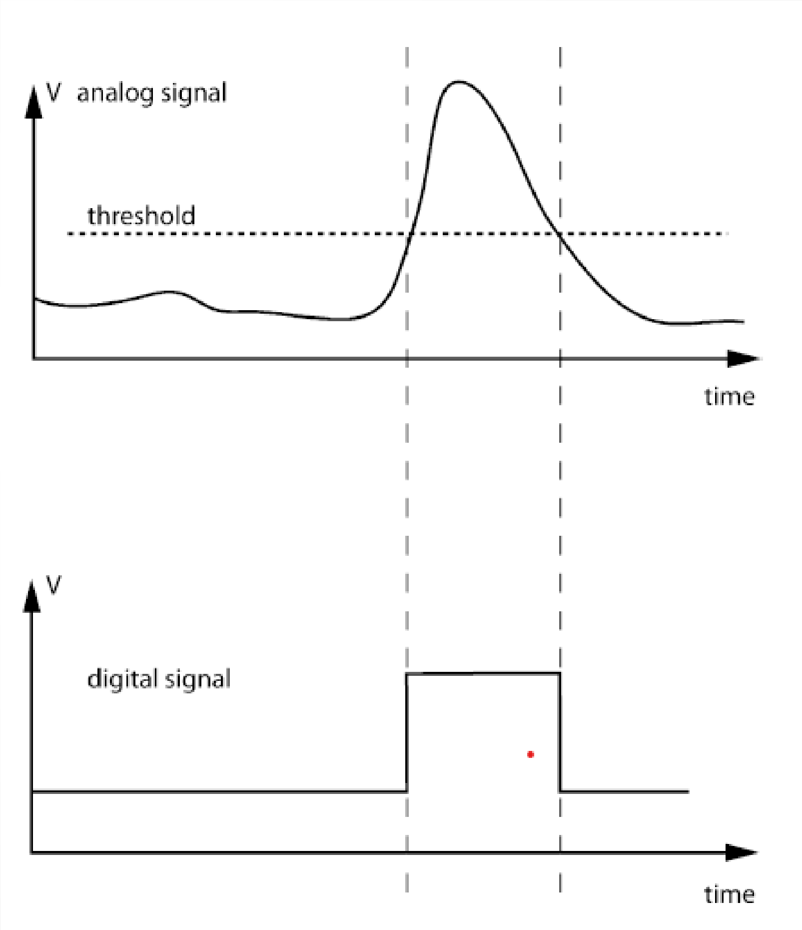
chociaż fizycy widzą je tak:

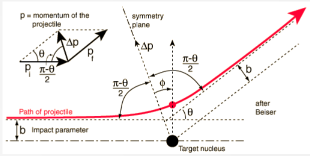


Impuls



- Elektronika front-end ma próg (powyżej szumu), od którego rejestruje sygnał.
- Jeśli sygnał jest poniżej progu – output to „0”, powyżej – „1”.

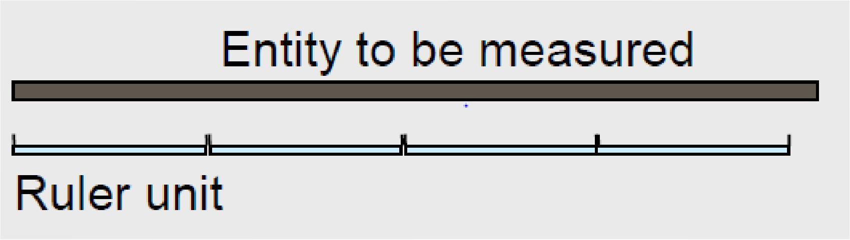




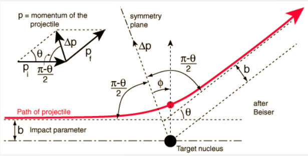
Analog to digital conversion (oczami fizyka)

- Digitalizacja sygnału to zamiana (kodowanie) wartości analogowej (ciągłej) do wartości binarnej (0-1).
- Pozwala to na dalsze procesowanie i zapis sygnału przy użyciu elektroniki cyfrowej i komputerów.

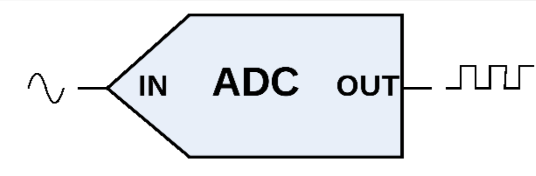
- Mamy do zmierzenia stół przy pomocy miarki z podziałką:

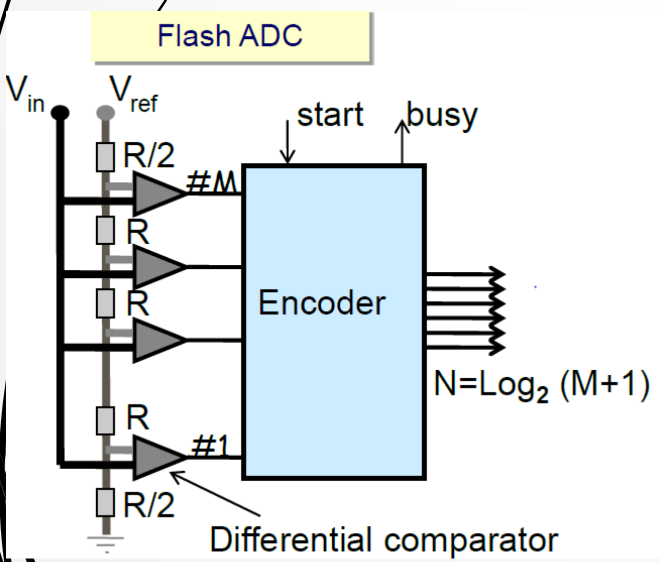


Analog to digital conversion (oczami fizyka)

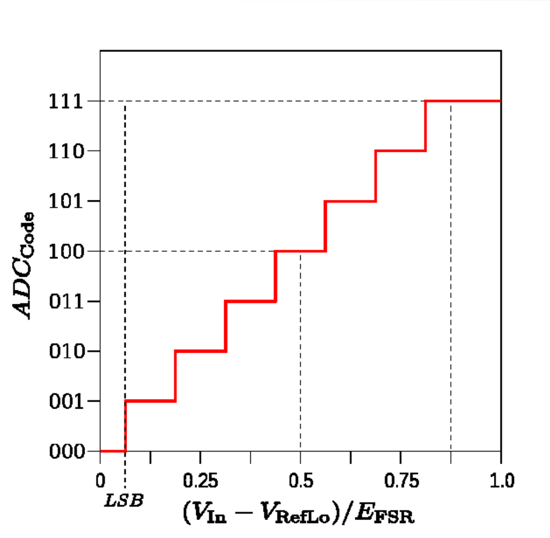


- Digitalizacja sygnału to zamiana (kodowanie) wartości analogowej (ciągłej) do wartości binarnej (0-1).
- Pozwala to na dalsze procesowanie i zapis sygnału przy użyciu elektroniki cyfrowej i komputerów.



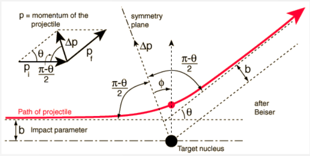


Napięcie V_{in} jest porównywane z V_{ref}.
Wynik jest zapisywany w postaci binarnej



co dalej?
p. kurs DAQ

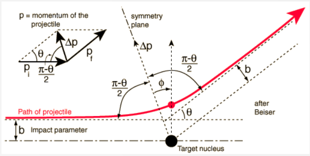
Własności detektorów



- Dzisiaj zajmiemy się sposobem ilościowego opisu najważniejszych cech detektorów, których używamy w praktyce

    - Rozdzielczość (energetyczna i przestrzenna)
    - Pomiar czasu
    - Czas martwy
    - Czułość
    - Wydajność detekcji
    - Funkcja Odpowiedzi

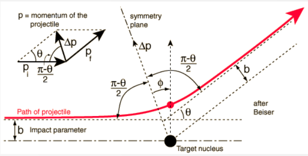
Własności detektorów



- Fizyk jest zainteresowany **wynikiem pomiaru** i musi stawić czoła jego **niepewności** – na tej podstawie sfomułuje hipotezę.
- Czynnikiem mającym decydujący wpływ na niepewność pomiaru jest **rozdzielczość detektora**.
- Rozdzielczość to **niepewność zmierzonej wartości** – mierzymy coś wielokrotnie i za każdym razem dostajemy trochę inna wartość.
- **Zdolność rozdzielcza** to możliwość rozróżnienia pomiarów – przychodzących w bliskich odstępach czasowych lub energetycznych (lub pędowych)
- Im lepsza rozdzielczość detektora tym lepiej pozwoli on na rozróżnienie cząstek.
- **Czułość** to zdolność do podania odpowiedzi na minimalny sygnał

Niepewności statystyczne

- Dokładność pomiaru jest ograniczona:
  - Niepewnościami statystycznymi procesu fizycznego, który detektor ma rejestrować (rozpady, pr-twa przejścia, itp.) – niepewności teoretyczne.
  - Fluktuacjami w depozytach energii i produkcji ładunków.
  - Fluktuacjami w odpowiedzi detektora (szumy).
  - Konstrukcją, geometrią detektora.



Pomiary jonizacji

- Ogólnie **materiał czynny**, w którym dochodzi do jonizacji może być:
  - Gazem
  - Ciałem stałym (solid-state)
- Całkowita jonizacja, N_T, (liczba par nośników, które zostały wygenerowane) wynosi:

$$N_{Tot} = \frac{\Delta E}{W}$$

  - Gdzie: ΔE – całkowita strata jonizacyjna energii, W – średnia energia potrzebna do generacji pary „jon”-elektron (dla gazów $\sim 30\ eV$ dla krzemu (germanu) $\sim 3.6\ eV$ $(\sim 2.8\ eV)$
- Liczba wygenerowanych nośników jest **zmienną losową** – dla detektorów „ss” fluktuacje N_{Tot} są oczywiście znacznie mniejsze!

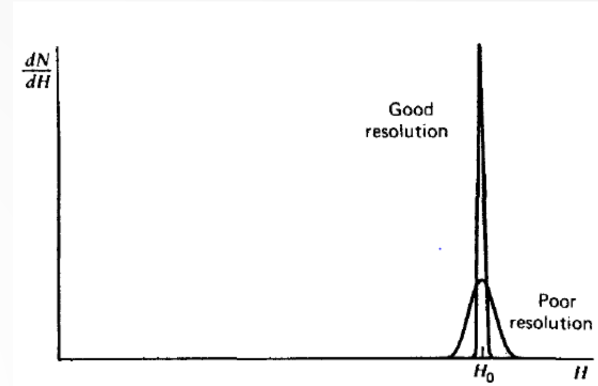
20

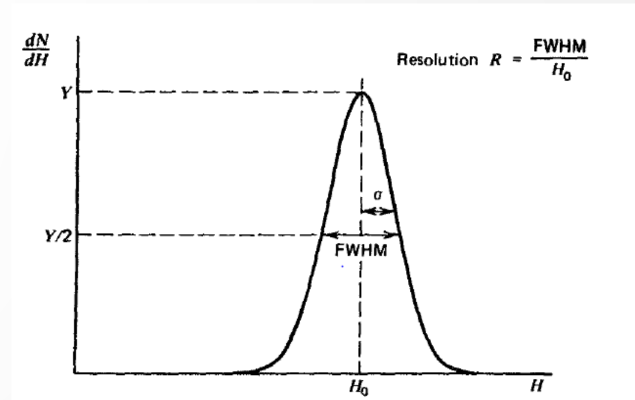
Zdolność rozdzielcza

- Jeśli zadaniem detektora jest pomiar energii, to kluczowym parametrem jest **energetyczna zdolność rozdzielcza** określona jako jego **odpowiedź (funkcja odpowiedzi)** na monoenergetyczne źródło promieniowania.
- Formalna definicja **EZR R [%]:**

$$R = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.35\,\sigma}{H_0}$$

- Dla półprzewodników R=1%, scyntylatorów R=5-10%.
- Dla lepszych zdolności rozdzielczych detektor może z większą dokładnością rozróżnić dwie energie leżące blisko siebie.



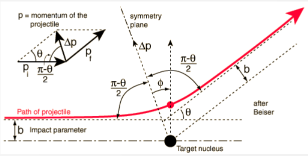


$$G(H) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(H - H_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- Bardzo ogólnie:

$$FWHM_{tot}^2 = FWHM_{stat}^2 + FWHM_{szum}^2 + FWHM_{dryft}^2 + \cdots$$

Zdolność rozdzielcza



- Opierając się na założeniach z poprzedniego slajdu, powiemy, że dwie **energie**, które oddalone są od siebie o mniej niż **wartość FWHM** zmierzoną dla widma energii cząstek monochromatycznych, **nie mogą być rozróżnione**
- Daje nam to również w praktyce **względną miarę** rozdzielczości danego detektora przy **energii $\boldsymbol{E}$**

‚FWHM' – Full Width at Half Max.

$$\sigma_E = \sigma(E) = \frac{\Delta E}{E}$$

- Typowe rozdzielczości energetyczne wahają się od ~ $a \cdot 10\%$ dla kalorymetrów do ~ 0.1% dla detektorów półprzewodnikowych (wartości podane dla fotonów γ o energii około $1\ MeV$)
- Rozdzielczość energetyczna jest funkcją energii (UWAGA! „**duża**" rozdzielczość oznacza **małą wartość $\boldsymbol{\sigma_E}$**)
- Dla większych wartości energii zdolność rozdzielcza polepsza się

Zdolność rozdzielcza (stat)

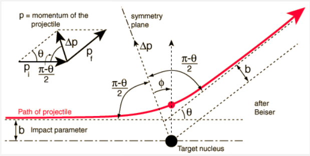
- Jeśli założymy, że odpowiedź detektora (p. slajdy za chwilę) jest liniowa: $H_0 = K\, N$
  - A formacja ładunku ma rozkład Poissona z fluktuacjami o odchyleniu standardowym $\sigma = \sqrt{N}$, czyli $\sigma = K\sqrt{N}$
  - I fluktuacje sygnału mają rozkład gaussowski, to fluktuacje statystyczne ograniczają RZR R „od dołu", jak:

$$R_{gr} = 2.35\frac{K\sqrt{N}}{KN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}}$$

  - Co oznacza, że ograniczenie na R zależy od wyłącznie od liczby wytworzonych nośników.
- Aby otrzymać R ok. 1% potrzeba $N > 55\,000$ ( dla półprzewodników).
- Ciekawą obserwacją stało się, że rzeczywista R_{gr} jest lepsza (tzn. niższa) od wartości otrzymanej wyłącznie z obliczeń statystycznych o **czynnik Fano:**

$$\boldsymbol{F \equiv \frac{\sigma^2_{obs}}{\sigma^2_{Poiss}}}, \text{ a zatem: } \boldsymbol{R_{gr} = 2.35\frac{K\sqrt{N}\sqrt{F}}{KN} = 2.35\sqrt{\frac{F}{N}}}$$

Tłumaczone jest to korelacjami w procesach prowadzących do produkcji ładunku



Pomiary jonizacji

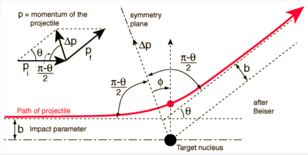
- W problemie **pomiaru energii**, musimy założyć, że liczba wyprodukowanych par j-e jest proporcjonalna do energii cząstki (uwaga – w tym przypadku detektor działa jak kalorymetr – pochłania całą energię cząstki)
- Rozdzielczość pomiaru (dokładność) będzie zależeć od średniej liczby wyprodukowanych par j-e $\langle N \rangle$
- Dokładna analiza statystyczna prowadzi do wyrażenia:

$$\boxed{\sigma^2 = F \cdot \langle N \rangle}$$

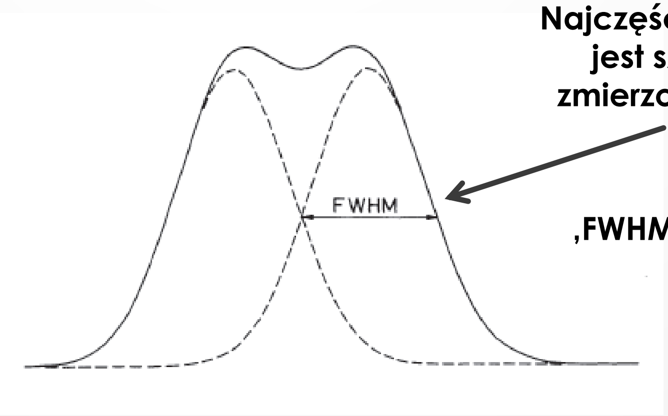
Absorber	F
Ar + 10% CH_4	≈ 0.2
Si	0.12
Ge	0.13
GaAs	0.10
Diamond	0.08

- **Współczynnik Fano**, F, zależy od materiału czynnego
- **Zwiększa rozdzielczość** energii detektora w porównaniu do tej, którą otrzymalibyśmy zakładając jedynie zależność do fluktuacji w produkcji par j-e

Zdolność rozdzielcza



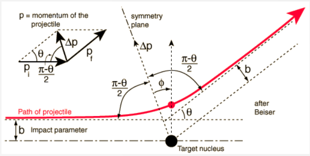
- Ogólnie, możemy powiedzieć, że rozdzielczość energetyczna jest **miarą zdolności „rozróżnienia”** dwóch różnych wartość energii przechodzących cząstek.
- Praktyczny pomiar zdolności rozdzielczej danego detektora, może być zrealizowany poprzez **pomiar odpowiedzi** tego detektora (widmo) na **monochromatyczną** wiązkę promieniowania – KALIBRACJA
- Dla „idealnego” detektora odpowiedź powinna być bliska funkcji Dirac’a
- Dla „rzeczywistego” urządzenia obserwowany „pik” jest mniej lub bardziej rozmyty i jest bliski rozkładowi Gauss’a



Najczęściej, miarą rozdzielczości jest szerokość połówkowa zmierzona dla rozkładu widma

‚FWHM’ – Full Width at Half Max.

Zdolność rozdzielcza



- Fakt **poprawy zdolności rozdzielczej wraz z energią** możemy wyjaśnić używając rozważań statystycznych
- Procesy jonizacji oraz wzbudzenia podlegają statystyce Poisson'a
- Jeżeli weźmiemy pod uwagę, że średnia energia na jonizację, W, jest stała i zależy od materiału czynnego to liczba aktów jonizacji dla cząstki, która zdeponowała w detektorze energię E wynosi:

$$N_{Jon} = \frac{E}{W}$$

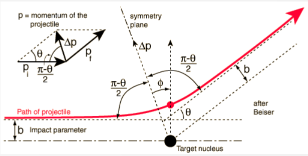
- Interpretacja – dla większych energii zdeponowanych rośnie średnia liczba aktów jonizacji – czyli jesteśmy mniej czuli na fluktuacje
- Popatrzmy na przypadek, gdy pomiar dotyczy straty energii, $\frac{dE}{dx}$ przez cząstkę jonizującą (bez całkowitej absorpcji) – liczba wzbudzeń podlega rozkładowi Poisson'a, którego wariancja wynosi:

$$\boxed{\sigma_{Jon}^2 = N_{Jon}}$$

$$\boxed{\sigma_E = 2.35\frac{\sqrt{N_{Jon}}}{N_{Jon}} = 2.35\sqrt{\frac{W}{E}}}$$

26

Czułość



Czułość – **zdolność** do wytworzenia **użytecznego technicznie** sygnału dla danego **typu promieniowania** oraz **danej energii**

Powyższe stwierdzenie nie jest trywialne – **nie da się** zbudować „uniwersalnego" detektora czułego na dowolny typ promieniowania o dowolnej energii…

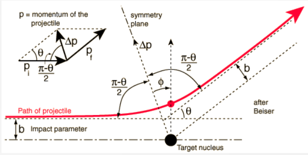
Co powinniśmy wziąć pod uwagę…

- Przekrój czynny na jonizację w danym materiale czynnym
- Masę materiału czynnego
- Szum (inherent/intrinsic device noise) – warstwa elektroniki odczytu
- Materiał „martwy" (np. potrzebny do praktycznej realizacji detektora)

Przekrój czynny (fizyka procesu) oraz masa detektora związane są z prawdopodobieństwem depozytu energii

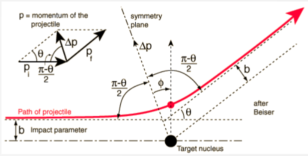
- Cząstki naładowane – „mały" detektor
- Cząstki neutralne – „duży" detektor (neutralne → naładowane)

Czułość



- **Próg detekcji** – minimalna zdeponowana energia – zależy od szumu wytwarzanego przez detektor (materiał czynny + elektronika odczytu)
- Inaczej mówiąc – zdeponowana energia musi być wystarczająca, aby wytworzyć technicznie użyteczny sygnał
- **Całkowita jonizacja** (~ zdeponowana energia) zależy, dla danego typu promieniowania oraz danej energii, jedynie od **materiału czynnego detektora**
- Wszelkiego rodzaju infrastruktura (**materiał martwy**) może spowodować znaczną absorpcję promieniowania – jest to więc kolejny czynnik ograniczający minimalną energię jaka może zostać zmierzona przez dany typ detektora (okienka)

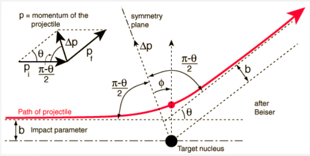
Statystyka



- Załóżmy, że chcemy „wymyśleć" **metrykę**, która opisywałaby jakość pomiaru danej wielkości realizowanej przez detektor
  - Wielkość mierzona może być bardzo różna (czas, energia, położenie,…)
  - Pomiar ma naturę statystyczną i to właśnie w języku statystyki musimy wyrazić naszą metrykę
  - Czy dla różnych wielkości mierzonych możemy opracować **wspólną metrykę**? To byłoby bardzo eleganckie…

- Załóżmy, że mierzymy energię fotonów (niech to będzie wiązka monochromatyczna o energii E_0), ale jako E można wstawić dowolny parametr, np. położenie lub czas.
- Jeżeli wartość zmierzoną energii (zawsze inną!!) oznaczymy jako E_r to możemy zbadać własności rozkładu zmiennej losowej $E = E_r - E_0$
- Wartość oczekiwaną rozkładu oraz jego wariancję możemy wyznaczyć jako:

$$\langle E \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} E \cdot R(E) dE}{\int_{-\infty}^{+\infty} R(E) dE} \qquad \sigma_E^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (E - \langle E \rangle)^2 \cdot R(E) dE}{\int_{-\infty}^{+\infty} R(E) dE}$$



Rozkład normalny

- W wielu przypadkach wyniki mają rozkład normalny (Gaussa): $D(z) = \frac{1}{\sigma_z\sqrt{2\pi}} e^{-(z-z_0)^2/2\sigma_z^2}$
- Prawdziwa wartość z_0 jest nieznana, ale możemy wprowadzić pojęcie przedziału ufności:

$$1 - \alpha = \int_{\langle z\rangle-\delta}^{\langle z\rangle+\delta} R(z)dz\,, \delta = \sigma_z$$

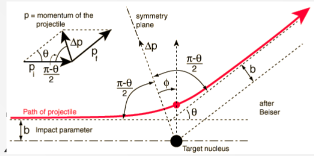
  - Czyli 68.27% wszystkich wyników ma być w przedziale $[z_0 - \sigma_z, z_0 + \sigma_z]$, 95.45% w $z_0 \pm 2\sigma_z$, itp.
  - Lub też: 95% jest w przedziale $z_0 \pm 1.96\sigma_z$, itp.

$$1 - \alpha = 95\% \;\rightarrow\; \delta = 1.96\sigma_z$$

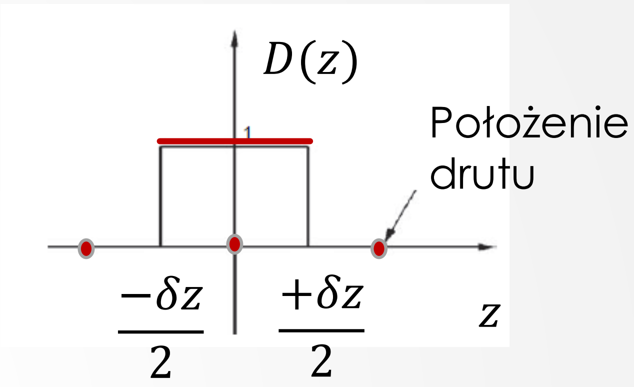
- Jeżeli rozkład posiada „ogony", które są inne niż w przypadku rozkładu normalnego do opisu szerokości rozkładu używamy:

$$\sigma_{FWHM} = 2\sqrt{2\ln(2)} \cdot \sigma_z = 2.35\sigma_z$$

Przestrzenna zdolność rozdzielc



- Moglibyśmy również opisać rozdzielność w przestrzeni położenia, np. wyznaczyć odchylenie standardowe w pomiarze położenia np. w komorze wielodrutowej:
- Zakładając pomiar „binarny" dostaniemy:

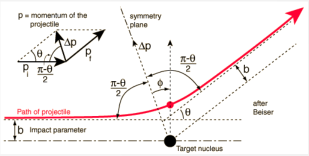


$$\langle z\rangle = \frac{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} z\cdot R(z)dz}{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} R(z)dz} = \frac{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} z\cdot C dz}{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} dz} = \frac{z^2}{2}\Bigg|_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} = 0$$

$$\sigma_z^2 = \frac{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2}(z-0)^2\cdot C dz}{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} R(z)dz} = \frac{1}{\delta z}\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} z^2\cdot dz = \frac{\delta z^2}{12}$$

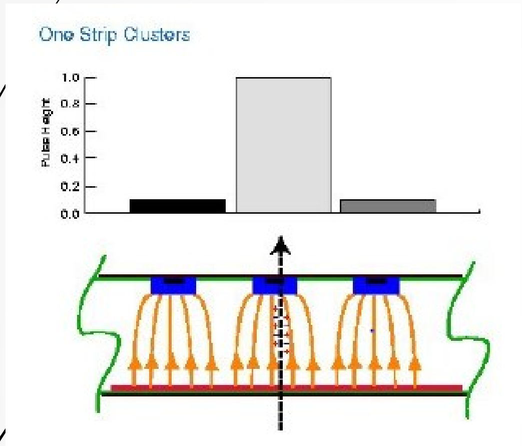
- Możemy więc przestrzenną zdolność rozdzielczą komory drutowej wyrazić jako:

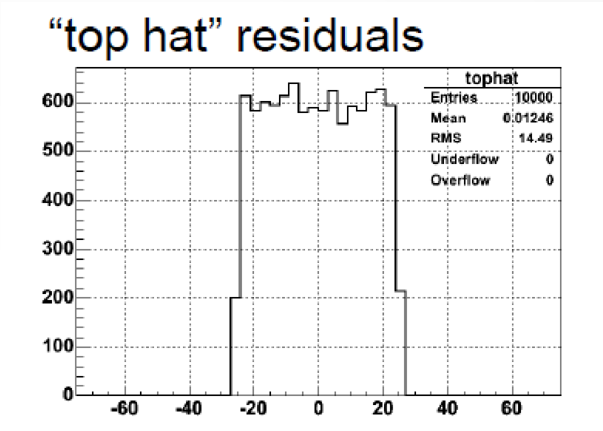
$$\boxed{\sigma_z = \frac{\delta z}{\sqrt{12}}}$$



Zdolność rozdzielcza

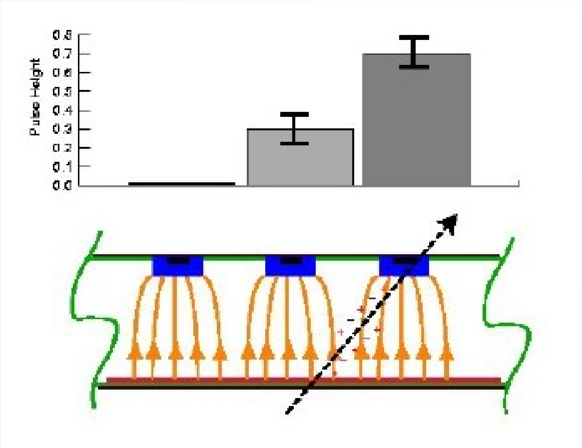
- Podobny rachunek można zrobić dla miropaskowego detektora krzemowego:

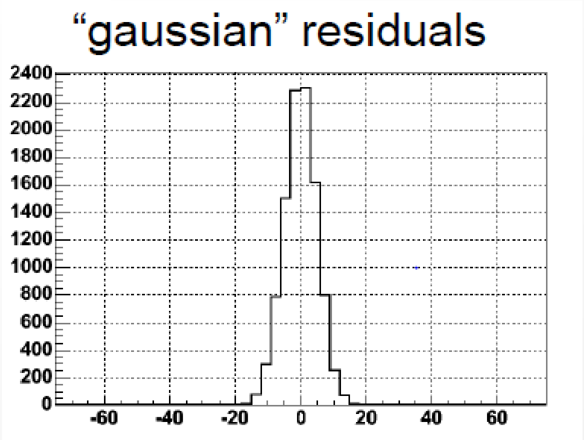




$$\sigma = \frac{\text{pitch}}{\sqrt{12}}$$

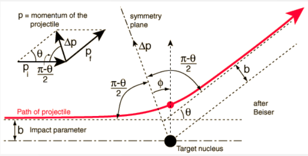
- Ale tu mamy dodatkowy pomiar dla sygnałów, które generowały ładunek w więcej niż jednym pasku, co poprawia zdolność rozdzielczą!





$$\sigma \approx \frac{\text{pitch}}{1.5 * (S/N)}$$

Liczenie przypadków

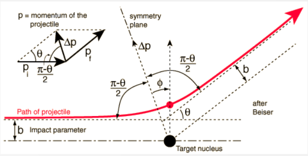


- Bardzo często zależy nam na pomiarze liczby cząstek
- Liczba zliczeń jest zmienną ciągłą i podlega rozkładowi Poissona

$$f(n,\mu)=\frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}, n=0,1,2$$

- Wartość oczekiwana oraz wariancja rozkładu są sobie równe, co jest dość ciekawą cechą: $\sigma^2=\mu$
- Dla dużej liczby zliczeń (n) rozkład Poisson'a dąży do rozkładu Gaussa
- Rozkład taki znajdziemy np. w przypadku pomiaru czasu życia izotopów promieniotwórczych przy pomocy licznika Geiger'a-Müller'a
- Blisko związane z tym tematem jest zagadnienie dotyczące oszacowania wydajności detekcji (zliczeń)

Wydajność detekcji



- Problem taki możemy interpretować jako proces Bernoulli'ego
  - Zdarzenia są niezależne
  - Możliwe są tylko dwa stany: cząstka została zarejestrowana lub nie

$$f(n, r, p) = \binom{n}{r} p^r q^{n-r}$$

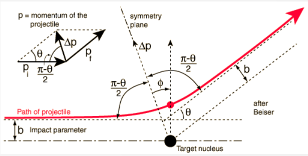
- Powyższy rozkład pozwala na oszacowanie prawdopodobieństwa że detektor zarejestrował r przypadków w n próbach
- Wartość oczekiwana i wariancja wynoszą:

$$\langle r \rangle = np, \sigma^2 = npq$$

- Załóżmy, że zmierzyliśmy wydajność detekcji p = 95%, w 100 pomiarach spodziewamy się 95 obserwacji (średnio) a błąd pomiaru wyniesie:

$$\sigma = \sqrt{npq} = \sqrt{100 \cdot 0.95 \cdot 0.05} = 2.18$$

$$p = (95 \pm 2.18)\%$$



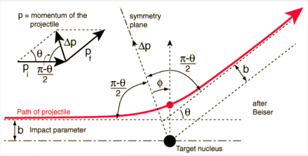
Wydajność

- **Wydajność detekcji** jest parametrem krytycznym z punktu widzenia każdego eksperymentu – musi zostać uwzględniona w analizie wyników!
- Zwykle wyznaczenie wydajności jest jedną z **najważniejszych** i zarazem **najtrudniejszych** części eksperymentu
- Rozważania na temat wydajności rozpoczyna się od wprowadzenia pojęcia wydajności **absolutnej** oraz wydajności **wewnętrznej** detektora

$$\boxed{\epsilon_{Tot} = \frac{liczba\ zarejestrowanych\ przypadków}{liczba\ \text{wszystkich}\ przypadków\ emitowanych\ ze\ źródła}}$$

- Ogólnie zależy od geometrii detektora i prawdopodobieństwa (czyli przekroju czynnego) oddziaływania
- Bardzo często całkowitą wydajność możemy przedstawić jako **iloczyn** (dlaczego?) wydajności **wewnętrznej** oraz **akceptancji** (wydajność geometryczna)

$$\boxed{\epsilon_{Tot} = \epsilon_{Int}\epsilon_{Geo}}$$



Wydajność

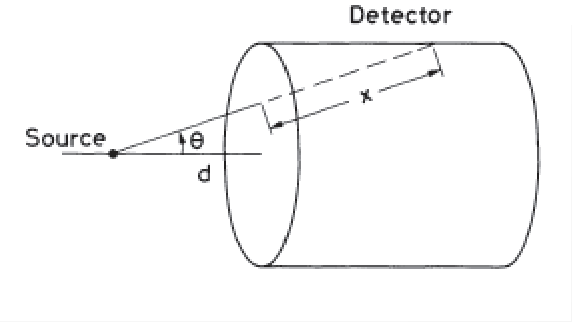
- Dla wydajności wewnętrznej definicja wygląda następująco:

$$\boxed{\epsilon_{Int} = \frac{liczba\ przypadków\ zarejestrowanych}{liczba\ przypadków\ rekonstruowalnych}}$$

- Ta część wydajności detektora zależy więc od przekroju czynnego na oddziaływanie danego typu promieniowania z materiałem czynnym

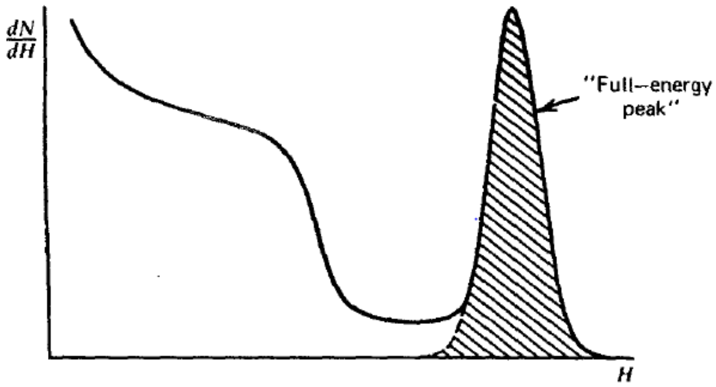
$$\epsilon_{Int} = \epsilon_{Int}(Promieniowanie, E, Materiał)$$

- Akceptancja detektora zależy wyłącznie od jego geometrii oraz od **rozkładu kątowego promieniowania**, które chcemy zbadać
- Zwykle, wydajność geometryczną możemy traktować jako pewną stałą proporcjonalną do kąta bryłowego zdefiniowanego przez materiał czynny



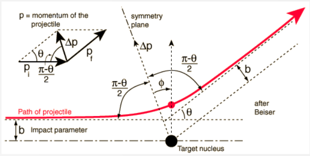
Wydajność

- Definiujemy również:
  - Całkowitą wydajność (sumujemy wszystkie sygnały, bez względu skąd pochodzą),
  - Wydajność w maksimum (peak efficiency): sygnały tylko od całkowitych depozytów



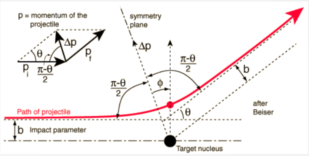
- I tu dochodzimy do problemu **funkcji odpowiedzi detektora i kalibracji**,
- Pamiętajmy na początek, że średnia z pomiarów $\langle z \rangle$ może mieć mało wspólnego z wartością rzeczywistą z_0

Funkcja odpowiedzi



- Jednym z typowych zastosowań detektorów promieniowania jest pomiar **widma energii** promieniowania
- Pamiętając o przeprowadzonej właśnie dyskusji dotyczącej odpowiedzi detektora na cząstki mono-energetyczne dochodzimy do wniosku, że istotnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę jest **zachowanie się detektora** – czyli jego odpowiedź na dany typ promieniowania
- Zachowanie to – opisujemy przy pomocy **funkcji odpowiedzi** – która jest **widmem impulsów** prądowych produkowanym przez nasz detektor w rezultacie oddziaływania z wiązką mono-energetyczną
- W idealnym przypadku chcielibyśmy, żeby dla **określonej energii** cząstek detektor produkował **impuls o stałej amplitudzie** (rozkład mniej lub bardziej przypominający rozkład normalny)
- **Postać** funkcji odpowiedzi zależy od **typu promieniowania**, który badamy czyli od tego jaki jest **mechanizm jego oddziaływania** z materiałem czynnym naszego urządzenia
- Dla rzeczywistego urządzenia, znaczenie ma również jego geometria i budowa (np. materiał martwy)

Kalibracja



- Związek pomiędzy zrekonstruowaną (bądź zmierzoną) wartością a „prawdziwą” musi być zwykle ustalony na podstawie procedury **kalibracji** (wyskalowania detektora)
- W najprostszym przypadku związek taki jest liniowy

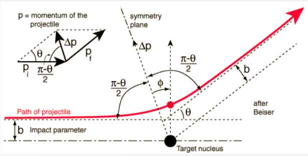
$$\langle X \rangle = \kappa_{Kalib}(t) \cdot m + \ d$$

- W ogólności jednak może być skomplikowaną, trudną do wyznaczenia funkcją

$$\langle X \rangle = f_{Kalib}(m, t) \cdot m + \ d$$

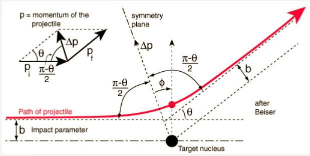
- Pomiary kalibracyjne powinniśmy traktować jako pierwszy pomiar fizyczny uzyskany przy pomocy danego urządzenia
- Bez dokładnego procesu kalibracji wyniki uzyskane dla detektora mogą być **bezużyteczne**!

Alignement



- Alignement to kalibracja ustawienia detektora względem Ziemi lub względem pozostałych części detektora.
- Jak detektor pikselowy ma rozdzielczość rzędu mikrometrów, to z taką precyzją powinno być znane położenie detektora.
- Alignement może być wykonywany przy użyciu technik geodezyjnych (OPERA) lub laserowych.
- Alignement częściej jest wykonywany albo softwarowo lub przy pomocy wzorcowych pomiarów (LHCb – pomiary wierzchołków oddziaływań).
- Bez dokładnego alignementu wyniki uzyskane dla detektora mogą być **bezużyteczne**!

Funkcja odpowiedzi

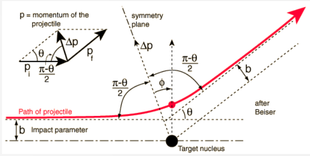


Wykonajmy następujący eksperyment myślowy – co się dzieje gdy wiązka elektronów o danej energii zostaje całkowicie pochłonięta w detektorze

- Przekaz energii na drodze rozpraszania na chmurach elektronowych atomów materiału czynnego
- Spodziewamy się więc, że w odpowiedzi dostaniemy widmo impulsów o rozkładzie normalnym
- Rozkład ten może być niesymetryczny z obciążeniem w kierunku niskich energii
- Związane jest to z:
  - Możliwością ucieczki elektronów przez depozycją całej energii
  - Emisją promieniowania hamowania, które z kolei nie jest rejestrowane

Problemy z **ucieczką** oraz **emisją promieniowania hamowania** należy uwzględnić w projekcie detektora – np. można wybrać lekki materiał oraz odpowiednio dobrać geometrię

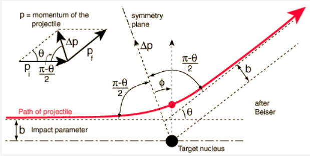
Funkcja odpowiedzi



Zastanówmy się teraz co się stanie, gdy zmienimy typ cząstek promieniowania na strumień fotonów

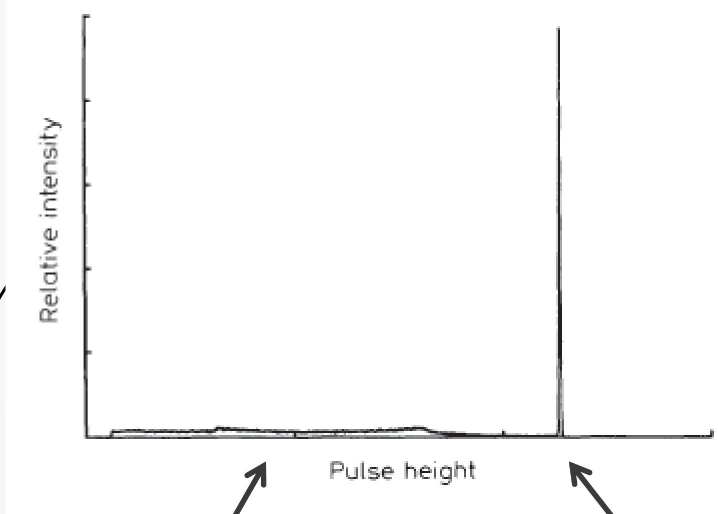
- Zmienia się drastycznie mechanizm oddziaływania – teraz musimy doprowadzić do produkcji cząstek naładowanych
  - Efekt foto-elektryczny – wzbudzenie atomów z emisją elektronów
  - Rozpraszanie Compton'a
  - Kreacja par
- Przyjmijmy, że w danym materiale czynnym dominuje pierwszy i drugi typ oddziaływania
- W rezultacie funkcja odpowiedzi będzie zawierać wyraźne **maksimum typu Gauss'a** oraz **widmo ciągłe** związane z rozpraszaniem Comptona
- W tym momencie dochodzimy do slajdu poprzedniego…

Funkcja odpowiedzi

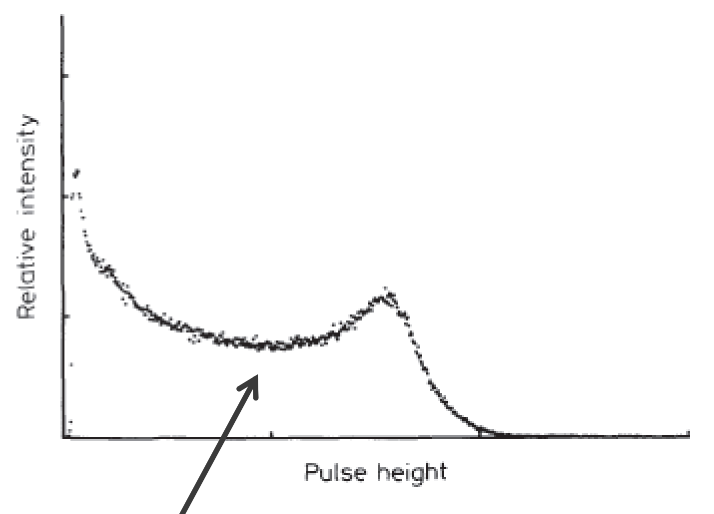


Ten sam typ promieniowania –
fotony o energii ~ 660 keV

Detektor krzemowy (german)



Detektor scyntylacyjny



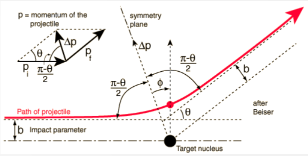
Rozpraszanie Comptona

Foto-elektrony

Rozpraszanie Comptona

- Względne **natężenie widma impulsów** ~ do względnego **przekroju czynnego** na dany typ oddziaływania – funkcja odpowiedzi zależy więc silnie od energii promieniowania!

Funkcja odpowiedzi



- Ostatecznie – jeżeli mierzymy promieniowanie, które posiada pewne spektrum energii, to odpowiedź naszego detektora, będzie funkcją energii, którą możemy wyrazić jako splot funkcji opisującej widmo promieniowania oraz widmo odpowiedzi detektora

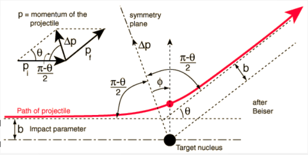
$$\boxed{f_{ph}(E) = f_p(E') \otimes R(E,E') = \int_{-\infty}^{+\infty} f_p(E') R(E,E') dE'}$$

Widmo badanego promieniowania

Funkcja odpowiedzi detektora

- Kalibracja krytyczna dla zrozumienia wyników!
- Idealnie, chcielibyśmy zawsze dostać funkcję odpowiedzi postaci:

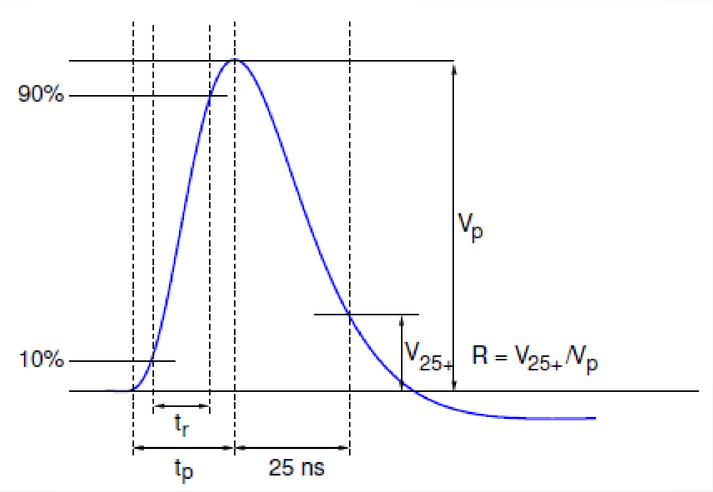
$$\boxed{R(E,E') \propto \delta(E - E')}$$



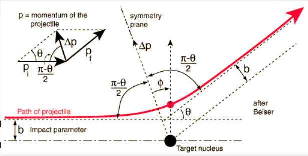
Czasy charakterystyczne

- Mamy w tej kategorii kilka ciekawych egzemplarzy…
- Zaczniemy od czasu **odpowiedzi** oraz czasu **martwego**
- Czas odpowiedzi detektora (ang. response time)
  - Czas potrzebny na formowanie sygnału po tym, jak cząstka penetrująca oddziałała z materiałem czynnym
  - Zależy od typu detektora (gazowy, półprzewodnikowy)
  - Impuls powinien narastać b. szybko
  - Ważne również jak długo trwa odpowiedź

Beetle dla LHCb

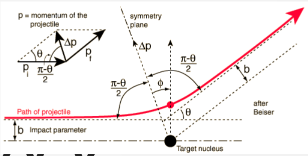


Czasy charakterystyczne

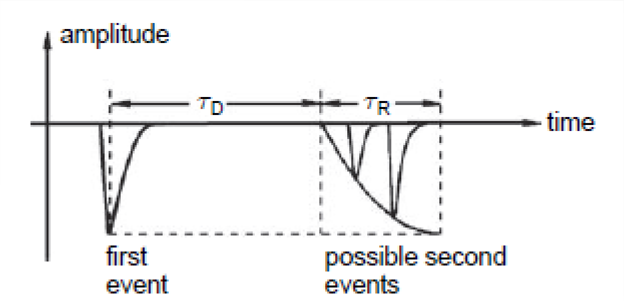


- **Długość trwania** impulsu określa możliwość obserwacji **następnego przypadku**
- Mamy możliwość nie akceptowania żadnych nowych przypadków lub dodanie dodatkowego sygnału (pile-up)
  - W pierwszym przypadku **tracimy** bezpowrotnie dane!
  - Jeżeli akceptujemy pile-up możemy doprowadzić do zaburzeń sygnału wygenerowanego w detektorze, który z kolei może spowodować, że przypadki mogą być bezużyteczne…
  - Musimy znaleźć „sweet-spot"
- W praktyce lepiej jest zaakceptować, że detektor nie może działać z taką samą wydajnością cały czas – musimy wybrać mniejsze zło i wprowadzić czas martwy
- Zmniejszy to oczywiście wydajność detekcji…

Poprawka na czas martwy



- Każdy detektor boryka się z czasem martwym



- Jeżeli jest on stosunkowo „długi”, musimy stosować odpowiednie poprawki
- Czas, w którym detektor nie akceptuje nowych zdarzeń zależy głównie od zjawisk fizycznych, które wykorzystujemy w procesie detekcji
  - Scyntylator ~ 1 ns
  - Krzem ~ 10 ns
  - G-M ~ 1 ms

$$N_{true} = \frac{N}{1 - N\tau_D}$$

C. Grupen, Electromagnetic Interactions of High Energy Cosmic Ray Muons, *Fortschr. der Physik* **23** (1976) 127–209