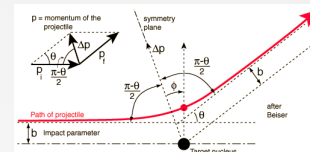


# Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

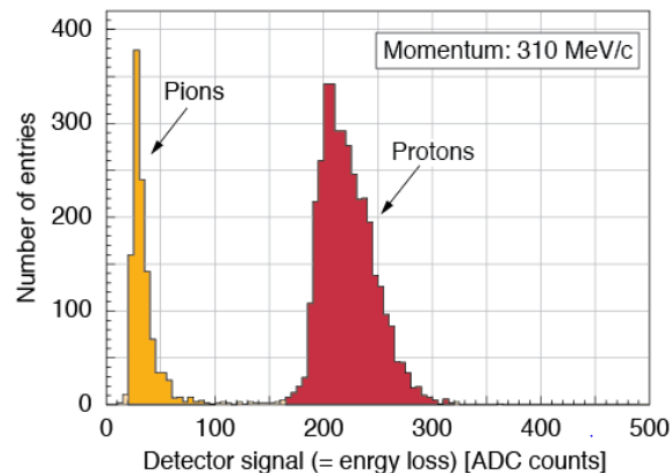
**Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłąkowska-Mucha**

**WFiIS AGH  
Kraków**

# Pomiary jonizacji

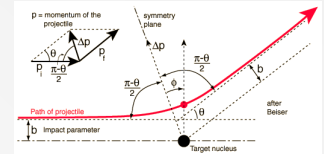


- ❑ Nasze piękne równania opisujące straty jonizacyjne mogą zostać użyte do wyznaczenia **średniej** liczby par **jon-elektron** generowanych na drodze cząstki jonizującej
- ❑ **UWAGA** – należy zawsze używać sformułowań jak poniżej
  - ❑ Cząstka naładowana deponuje energię (nie ładunek!!)
  - ❑ Deponowanie energii powoduje generację ładunku wzdłuż toru cząstki
- ❑ Wyróżniamy tu jonizację **pierwotną**  $n_p$  (liczba pierwotnie wytworzonych par e-jon) oraz **wtórną** (związaną z elektronami  $\delta$ ) oraz **całkowitą**  $N_T$  (suma obu).
- ❑ Średnia energia potrzebna do produkcji par jon-elektron,  **$W$**  jest w zasadzie **stała dla danego materiału** (zależy b. słabo od parametrów cząstek penetrujących)



W. Adam et al., CMS note 1998/092 (1998)

# Pomiary jonizacji

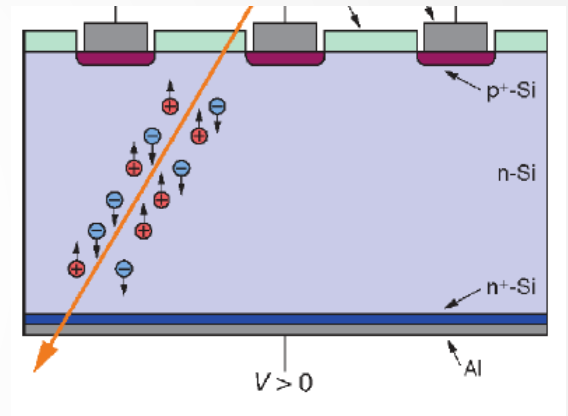


- ❑ W praktyce rozpatrujemy **dwa typy detektorów**, które wykorzystujemy do „pomiarów jonizacji”: **materiał czynny**, w którym dochodzi do jonizacji może być:

- Gazem
- Ciałem stałym (solid-state)

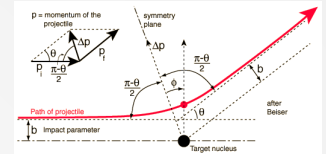
- ❑ Całkowita jonizacja,  $N_T$ , (liczba par nośników, które zostały wygenerowane) wynosi:

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



- ❑ Gdzie:  $\Delta E$  – 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!
- ❑ Kapitalne znaczenie w przypadku pomiaru energii cząstek

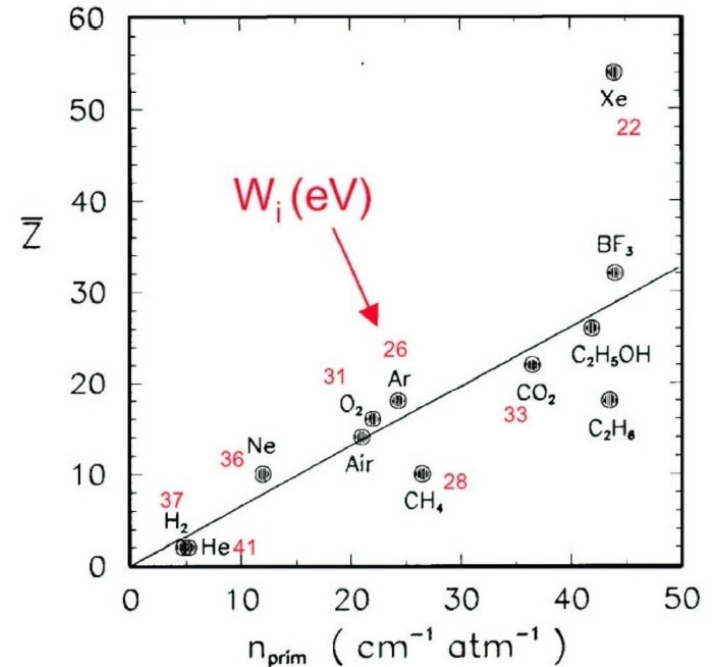
# Jonizacja pierwotna



## Straty energii:

- głównie na jonizację,
- zależą od  $\beta\gamma$ ,
- typowa strata to ok. 2-3 MeV cm<sup>2</sup>/g,
- w cieczech i ciałach stałych kilka MeV/cm,
- w gazach – kilka keV/cm.

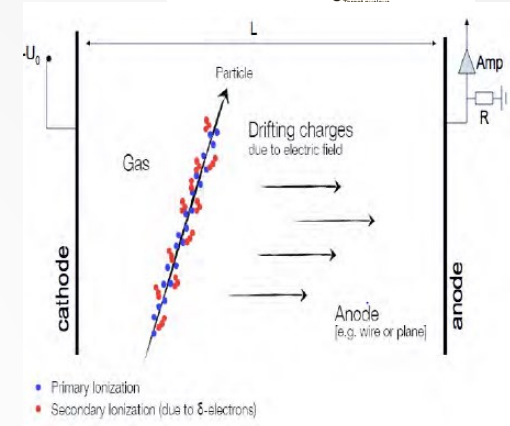
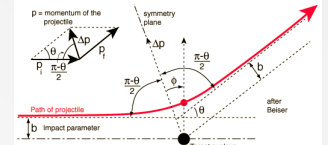
☐ Jonizacja pierwotna: naładowana cząstka wybija elektron z atomu, również wzbudzenia.



- ☐ Energia potrzebna do wytworzenia pary elektron – jon  $W > I$
- ☐ w gazach  $W \approx 30$  eV, czyli średnio 60 par e-jon/cm (2 MeV/30 eV) – uwaga! Liczba nośników podlega rozkładowi Poissona!

# Jonizacja wtórna

- $n_{prim} \approx 20 - 50$  na cm.
- Elektrony z jonizacji pierwotnej jonizują dalej gaz, typowo dając 2-3 razy więcej nośników, czyli ok 60-120 elektronów/cm.

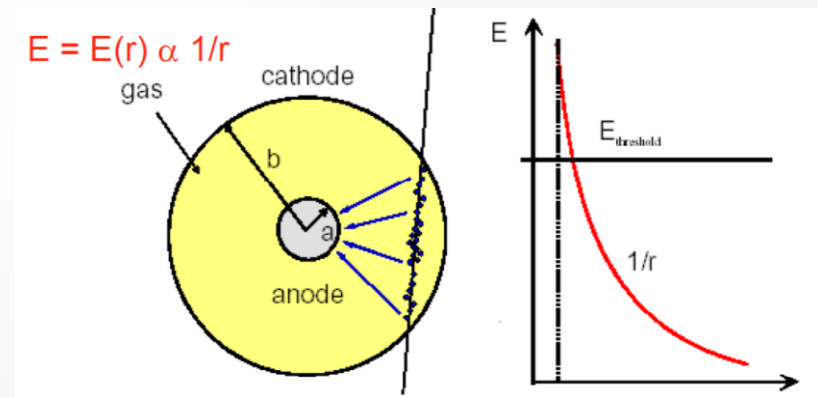


120 par elektron-jon wytworzy puls o amplitudzie:

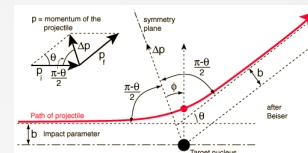
$$V = \frac{ne}{C} = 2 \text{ mV}, \text{ przy } C = 10 \text{ pF}.$$

To jest za mało na detekcję.

Pomysł: powielanie (multiplikacja) nośników w silnym polu elektrycznym:  $E \cong 10 \text{ kV/cm}$ , potencjał 10 V w pobliżu anody (10 mm)



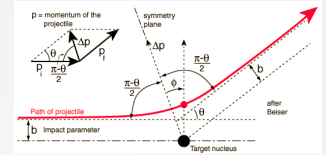
# Jonizacja



- Średnia energia potrzebna do produkcji par jon-elektron,  $W$  jest w zasadzie **stała dla danego materiału** (zależy b. słabo od parametrów cząstek penetrujących)

Gas	Density $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$I_0$ [eV]	$W$ [eV]	$n_p$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n_T$ [cm <sup>-1</sup> ]
H <sub>2</sub>	$8.99 \cdot 10^{-5}$	15.4	37	5.2	9.2
He	$1.78 \cdot 10^{-4}$	24.6	41	5.9	7.8
N <sub>2</sub>	$1.25 \cdot 10^{-3}$	15.5	35	10	56
O <sub>2</sub>	$1.43 \cdot 10^{-3}$	12.2	31	22	73
Ne	$9.00 \cdot 10^{-4}$	21.6	36	12	39
Ar	$1.78 \cdot 10^{-3}$	15.8	26	29	94
Kr	$3.74 \cdot 10^{-3}$	14.0	24	22	192
Xe	$5.89 \cdot 10^{-3}$	12.1	22	44	307
CO <sub>2</sub>	$1.98 \cdot 10^{-3}$	13.7	33	34	91
CH <sub>4</sub>	$7.17 \cdot 10^{-4}$	13.1	28	16	53
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$2.67 \cdot 10^{-3}$	10.8	23	46	195

# Fluktuacje

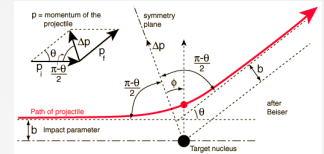


- ❑ Całkowita jonizacja,  $N_T$ , (liczba par nośników, które zostały wygenerowane) wynosi:

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

- ❑ Gdzie:  $\Delta E$  – całkowita strata jonizacyjna energii,  $W$  – średnia energia potrzebna do generacji pary „jon”-elektron (dla gazów  $\sim 30 eV$  dla krzemu (germanu)  $\sim 3.6 eV$  ( $\sim 2.8 eV$ ), **ŚREDNIO!!!**
- ❑ Zależność jest prawdziwa, gdy cała zdeponowana energia została przekazana na jonizację.
- ❑ Oznacza to, że dla ciał stałych produkowana liczba nośników jest o rząd wielkości wyższa niż dla gazów (a fluktuacje mniejsze).
- ❑ Liczba wygenerowanych nośników jest **zmienną losową**, w pierwszym przybliżeniu o rozkładzie Poissona.
- ❑ Zatem fluktuacje wokół wartości średniej powinny być rzędu  $\sqrt{N}$ .
- ❑ Są jednak mniejsze o czynnik  $\sqrt{F}$  (współczynnik Fano).

# Pomiary jonizacji



- ❑ Rozdzielczość pomiaru (dokładność) będzie zależeć od średniej liczby wyprodukowanych par j-e  $\langle N \rangle$
- ❑ Dokładna analiza statystyczna prowadzi do wyrażenia:

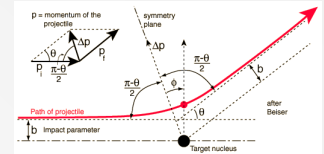
$$\sigma^2 = F \cdot \langle N \rangle$$

Absorber	$F$
Ar + 10% CH <sub>4</sub>	$\approx 0.2$
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
- ❑ Pamiętajmy ciągle o zdarzających się bardzo dużych stratach energii, zwłaszcza w cienkich absorberach (p. rozkład Landaua)



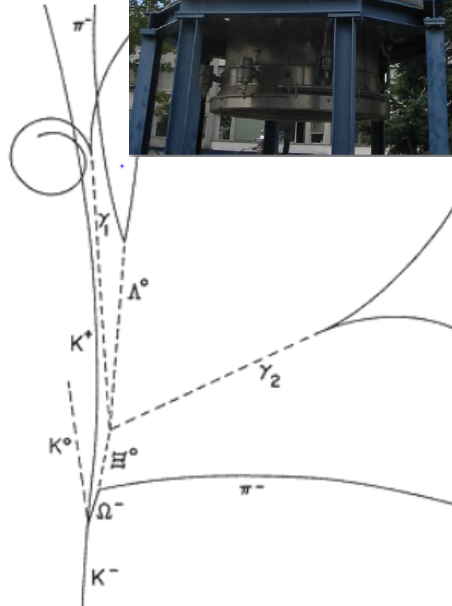
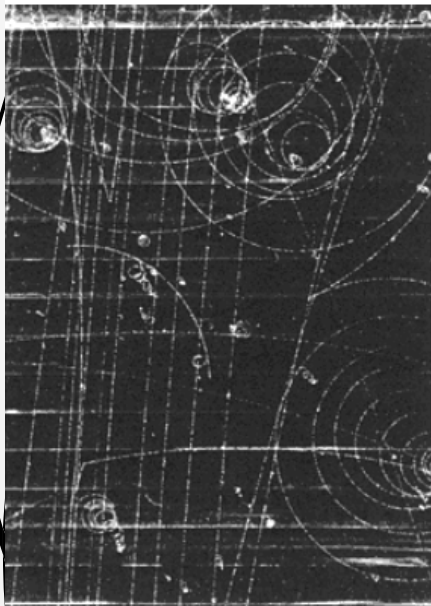
# Co chcemy zrobić?



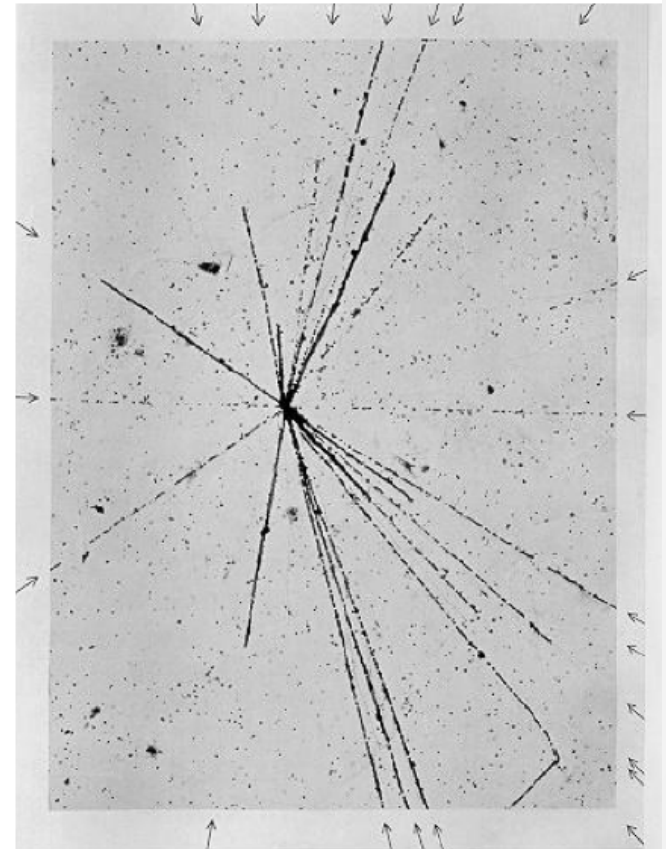
- ❑ Konstrukcja (rodzaj) detektora zależy bezpośrednio od tego jaką wielkość fizyczną chcemy zmierzyć
- ❑ Zwykle jesteśmy zainteresowani:
  - ❑ Detekcją cząstek (wykrycie obecności, np. Geiger-Müller – duże ograniczenia związane z brakiem **zależności** pomiędzy **energiją zdeponowaną a sygnałem** oraz **saturation** dla dużych strumieni cząstek związane z **czasem martwym**)
  - ❑ Pomiarom energii (np. detektory krzemowe)
  - ❑ Pomiarom położenia, trajektorii oraz pędu
  - ❑ Identyfikacją cząstek
- ❑ Intuicyjnie rozumiemy, że **wykrycie** bądź pomiar **energii** są „łatwe” i nie wymagają (zwykle) skomplikowanych urządzeń hybrydowych
  - ❑ To się może zmienić, jeżeli widmo energii jest szerokie,
  - ❑ Bądź kompozycja strumienia cząstek jest złożona (fotony, elektrony...)
- ❑ Pomiar trajektorii, pędu (wektor!) czy rodzaju cząstki są trudne

# Trochę historii

- Cloud chambers
- Emulsions
- Bubble chambers



Discovery of the  $\Omega^-$  in 1964

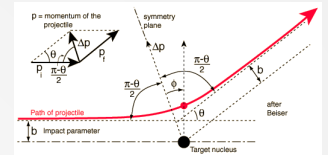


'EXPLOSIVE' DISINTEGRATION OF A NUCLEUS

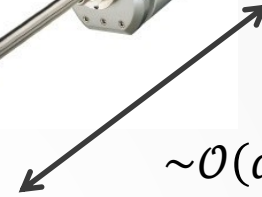
nuclear disintegrations in 1937

11

# Małe i duże

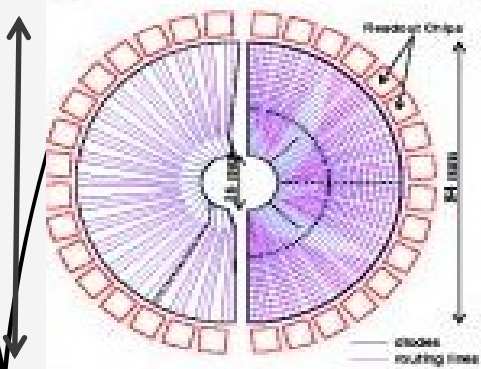


$\sim O(a \cdot 10)cm$

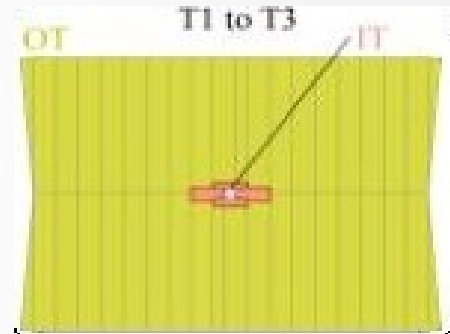
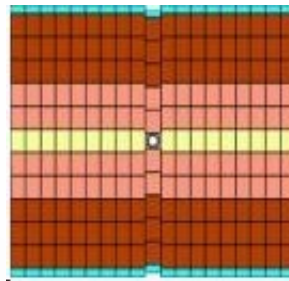


$\sim O(a \cdot 10)cm$

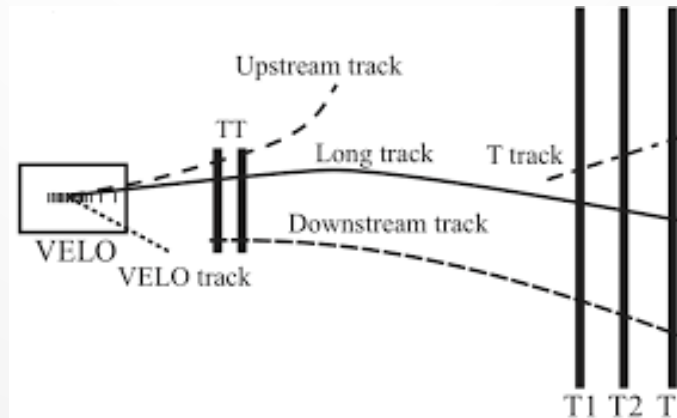
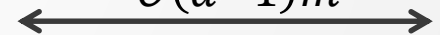
$\sim O(10)cm$



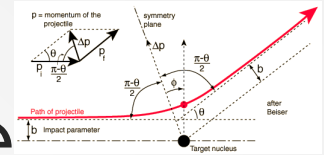
$\sim O(1)m$



$\sim O(a \cdot 1)m$

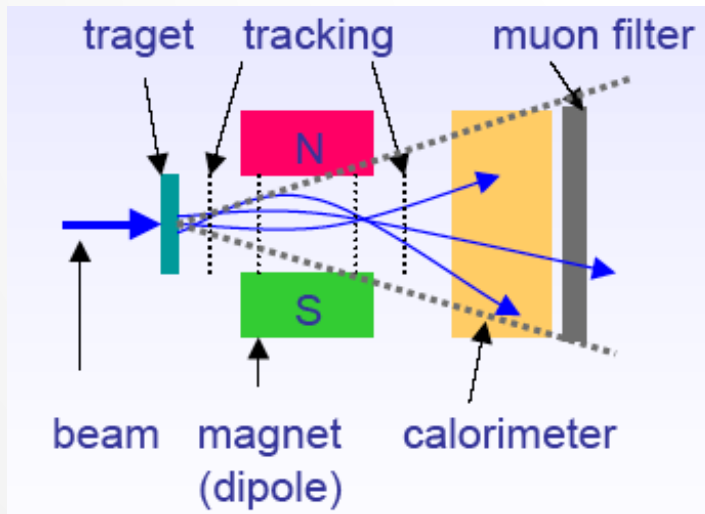


# I bardzo skomplikowane

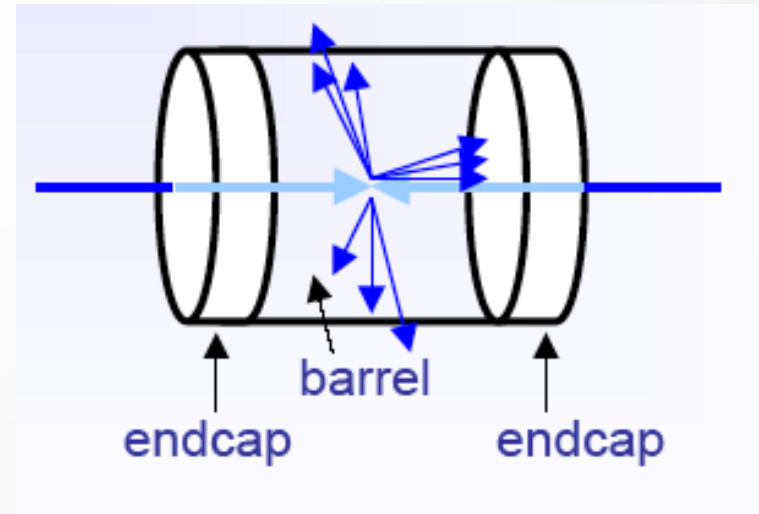


- Bez względu na rodzaj promieniowania oraz aparatury jakiej używamy, zawsze interesować nas będzie (skrót myślowy...):
  - Detekcja cząstek
  - Estymacja 4-pędu  $p^\mu$
  - Identyfikacja (PID – Particle IDentification)

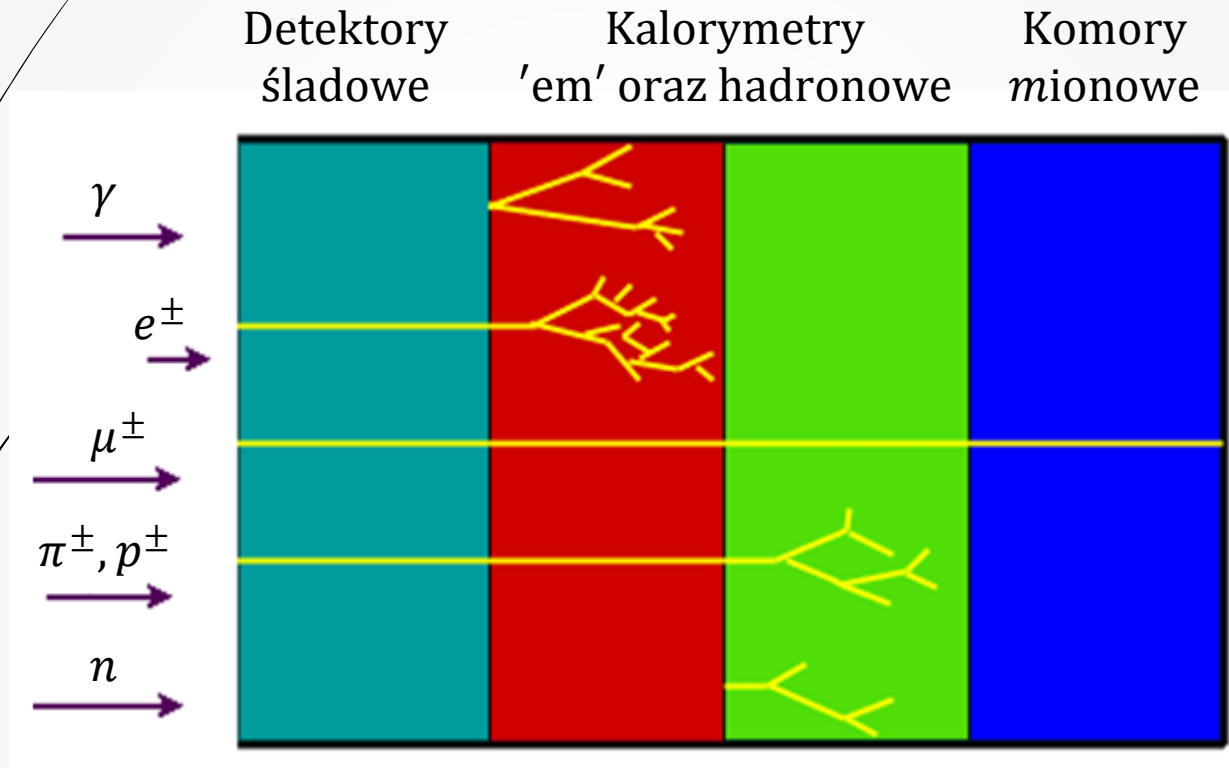
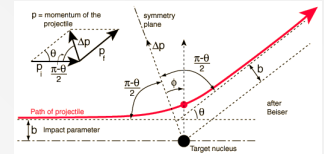
## Geometria typu spektroskop



## Geometria typu $4\pi$



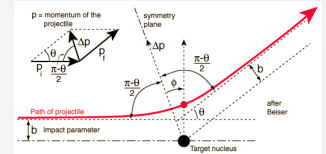
# Eksperymenty FWE



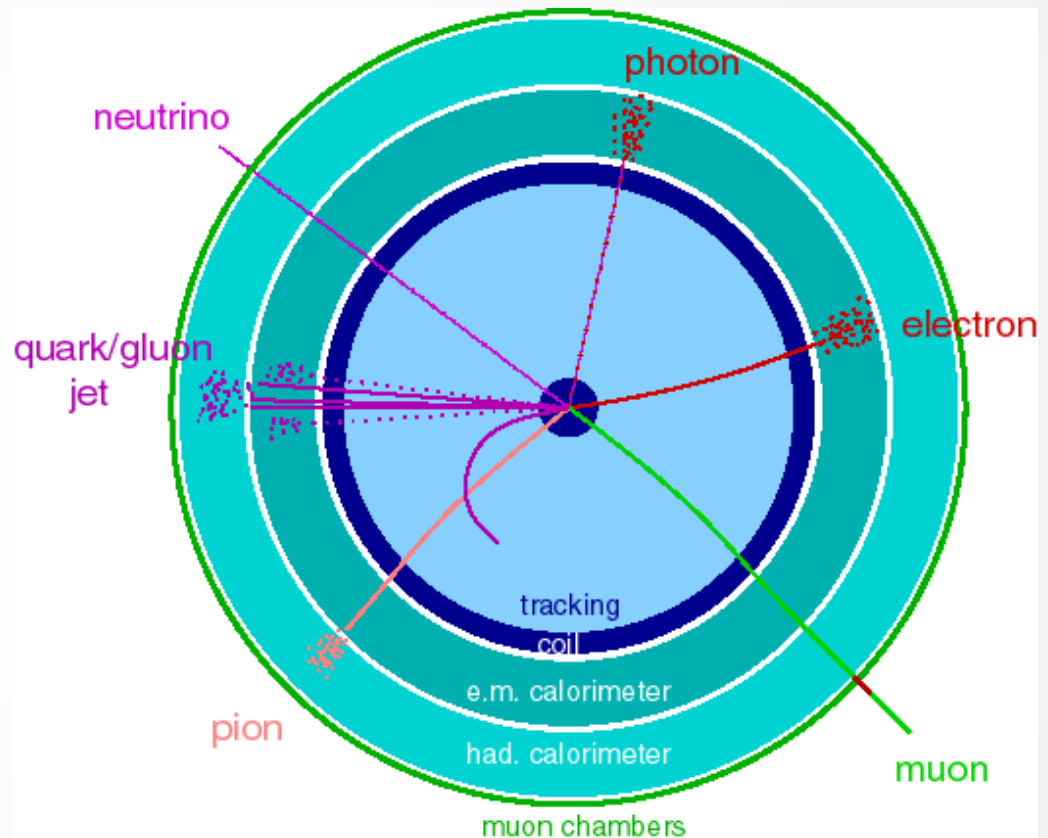
blisko źródła → daleko od źródła

- ❑ Obserwacja cząstek zawsze jako konsekwencja oddziaływania z materiałem „czynnym” detektora
- ❑ Bez względu na typ cząstki i własności oddziaływania na końcu zawsze mamy **jonizację!**

# Eksperymenty FWE

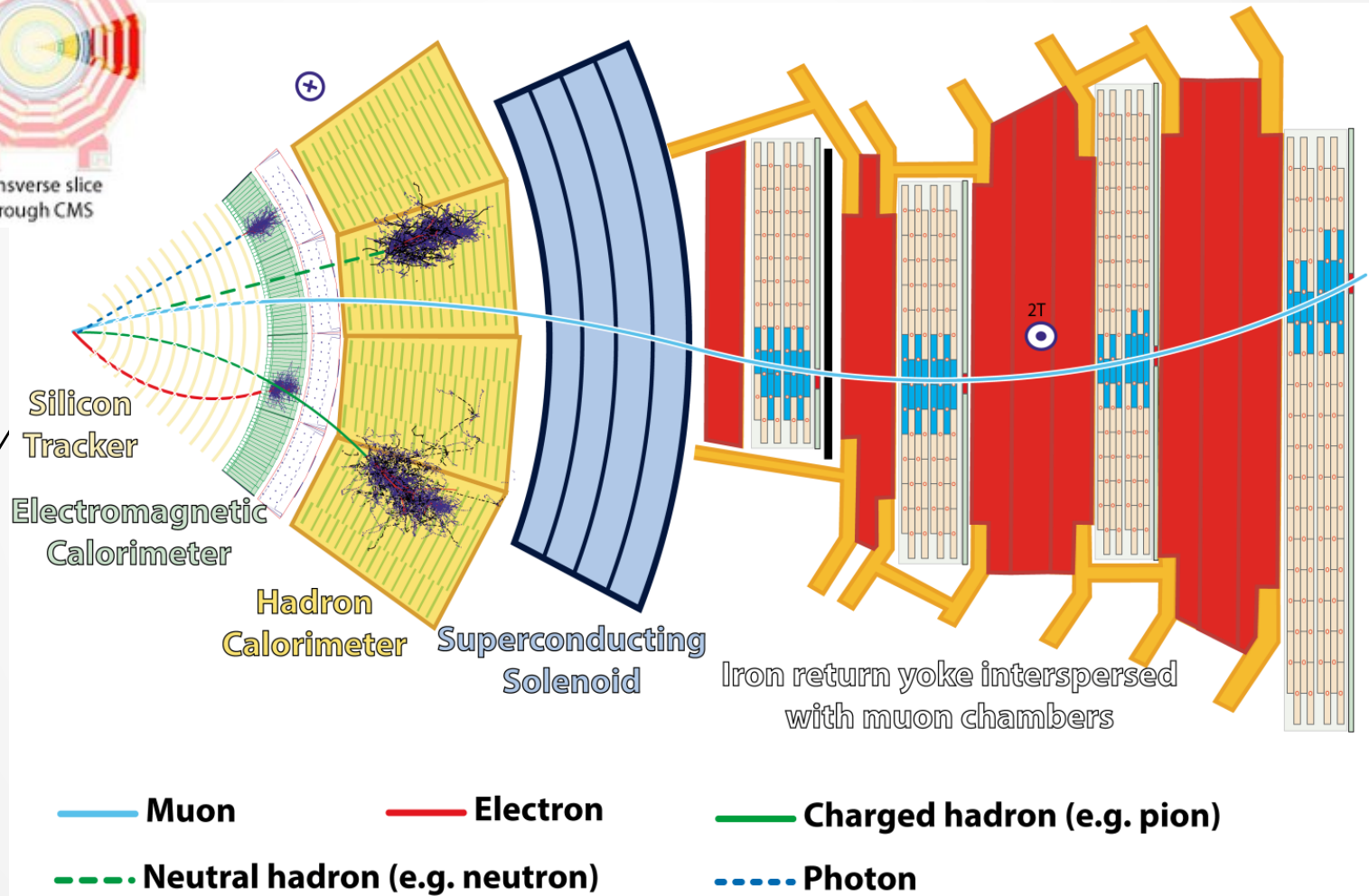
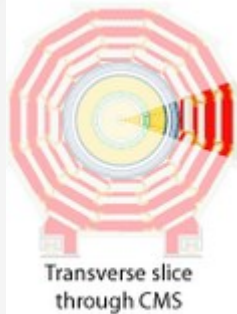
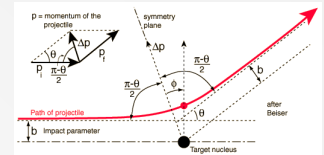


- ❑ Układy śladowe powinny zawierać jak **najmniej materiału** (wielokrotne rozproszenia, straty na jonizację)
- ❑ Kalorymetry „odwrotnie” powinny zawierać jak **najwięcej materiału** („katastroficzne” pochłonięcie cząstek)

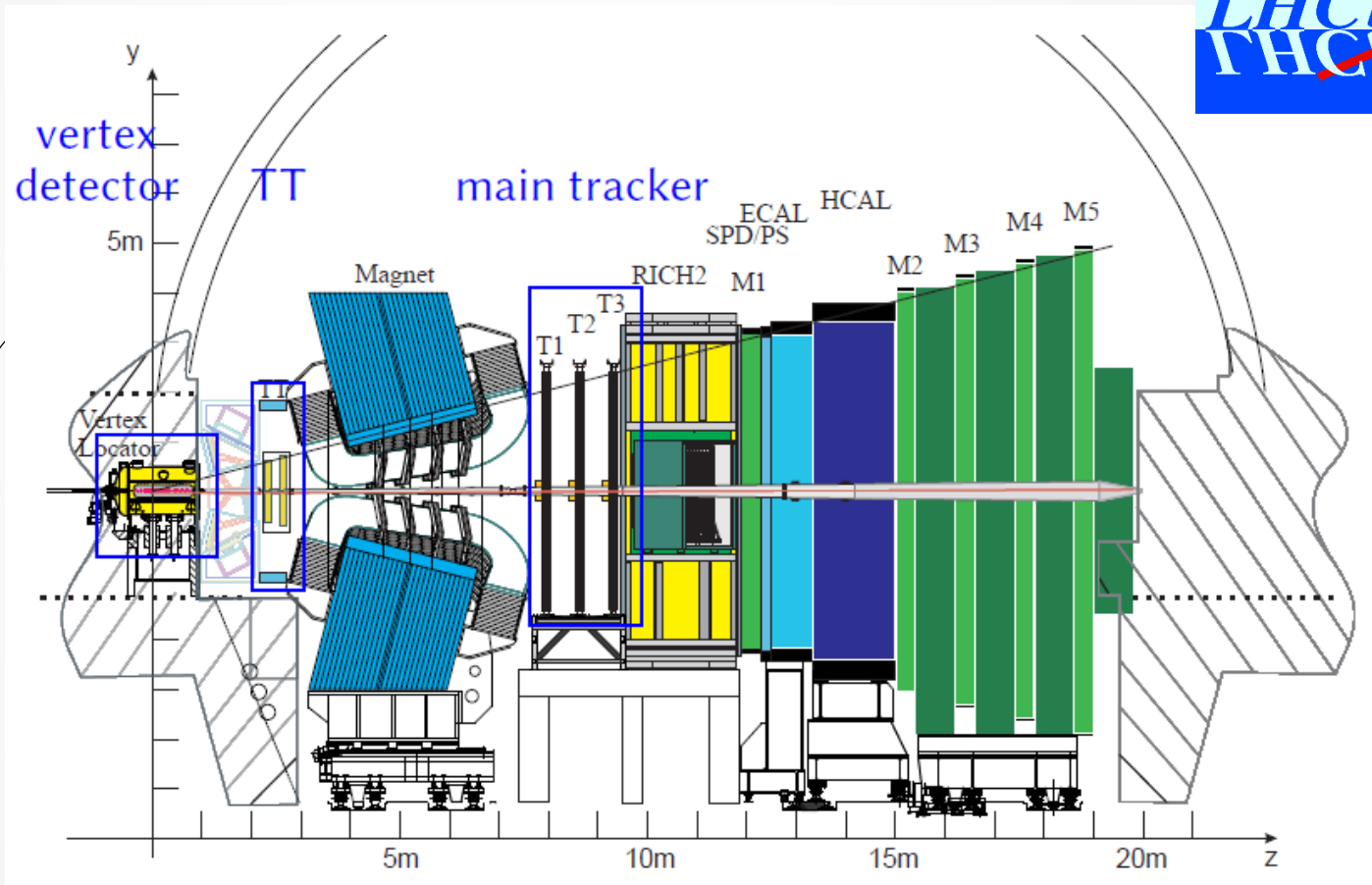
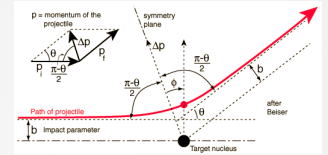




# Eksperymenty (IV)

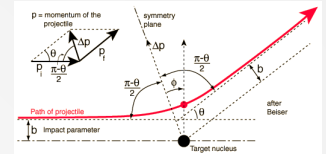


# Eksperymenty FWE





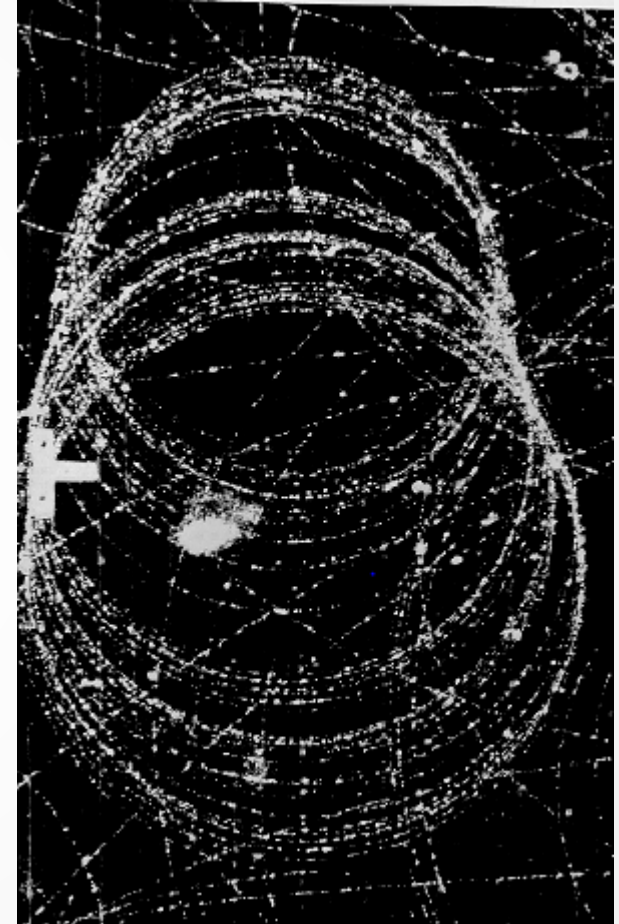
# Układy śladowe (I)



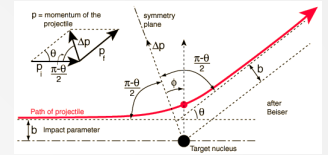
- ❑ **Pomiar pędu** jest procesem b. skomplikowanym i wymaga użycia detektorów hybrydowych
- ❑ Odpowiednio skonstruowany detektor, który jest w stanie zmierzyć **pozycję cząstki naładowanej** (na podstawie wygenerowanego w detektorze ładunku) umożliwia pomiar pędu
  - ❑ Cząstka naładowana musi poruszać się w polu magnetycznym

Elektron w polu magnetycznym (1940).

- Energia początkowa: 16.9 MeV, końcowa 12.4 MeV.
- Energia stracona na jonizację: 2.8 MeV.
- Pozostała energia wypromieniowana jako bremsstrahlung

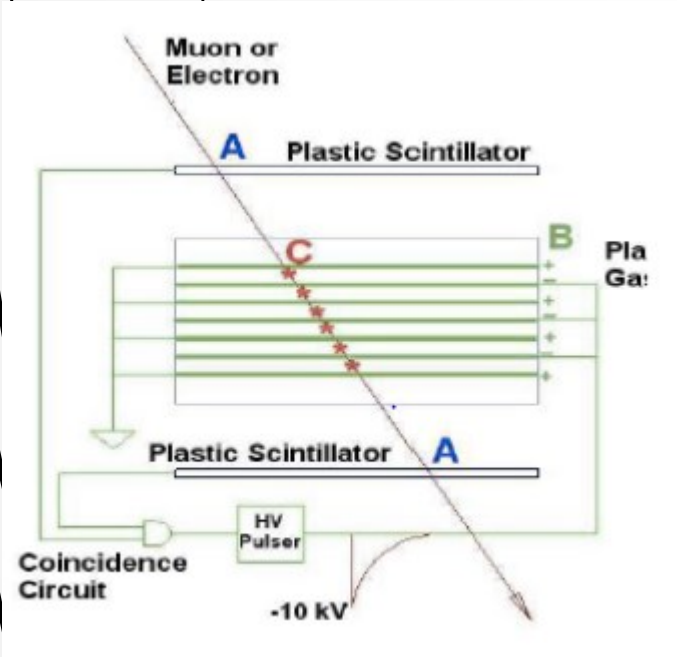
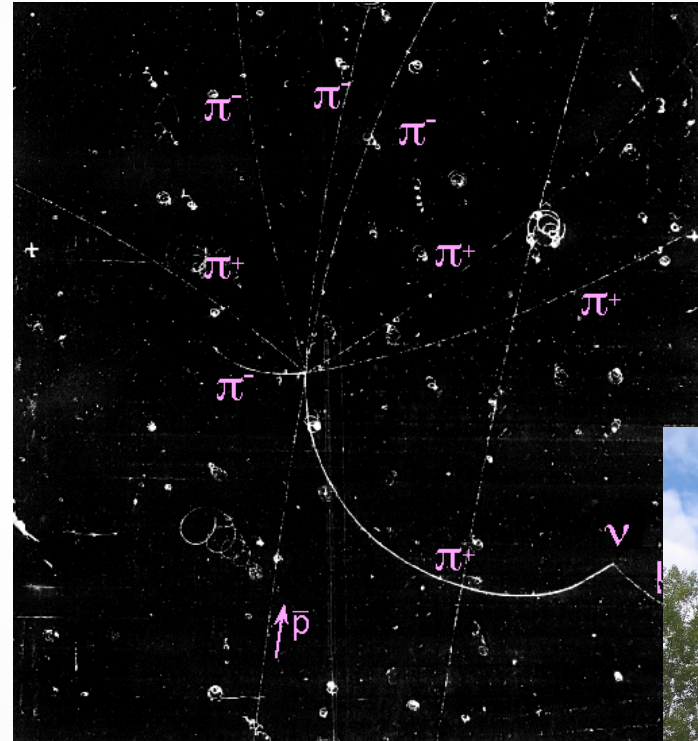


# Układy śladowe (I)

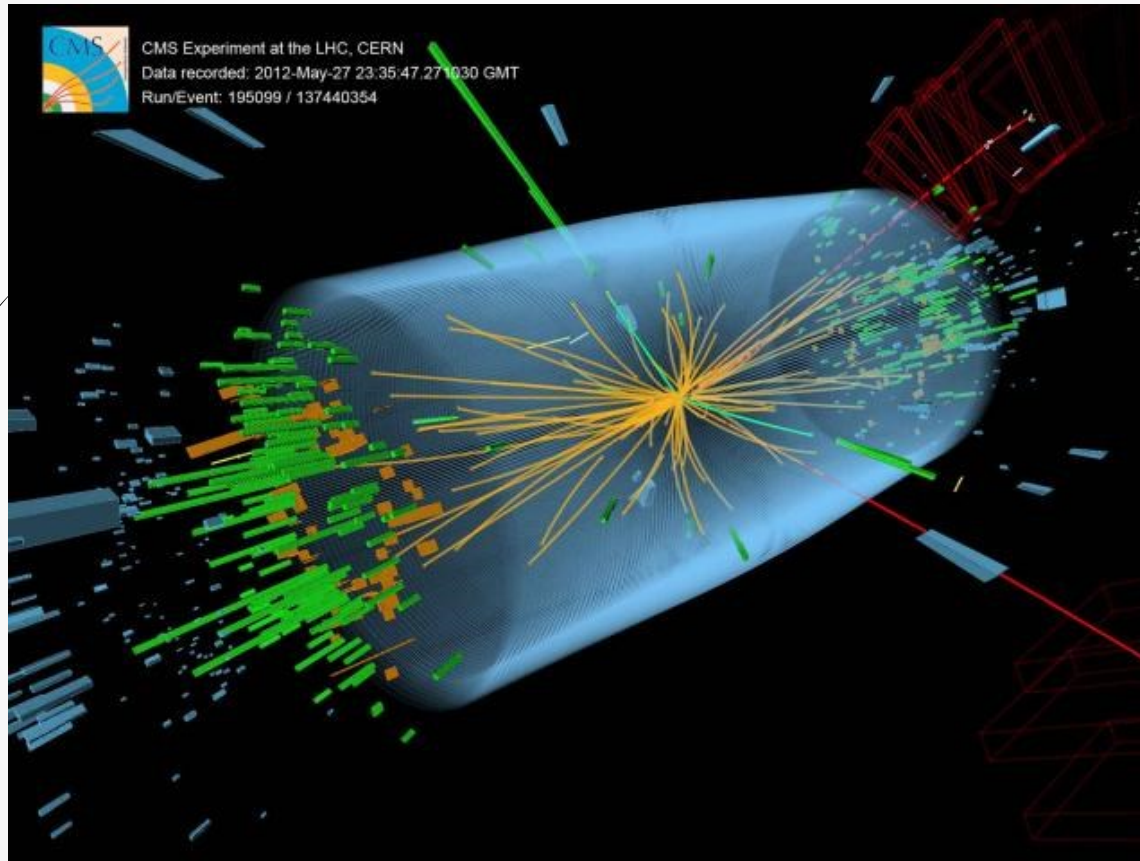
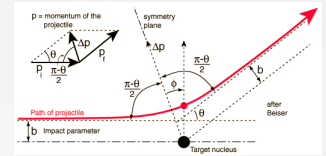


Komora iskrowa (~1960)

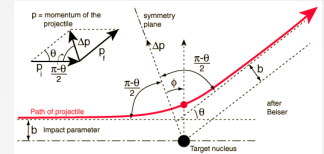
Komora pęcherzykowa



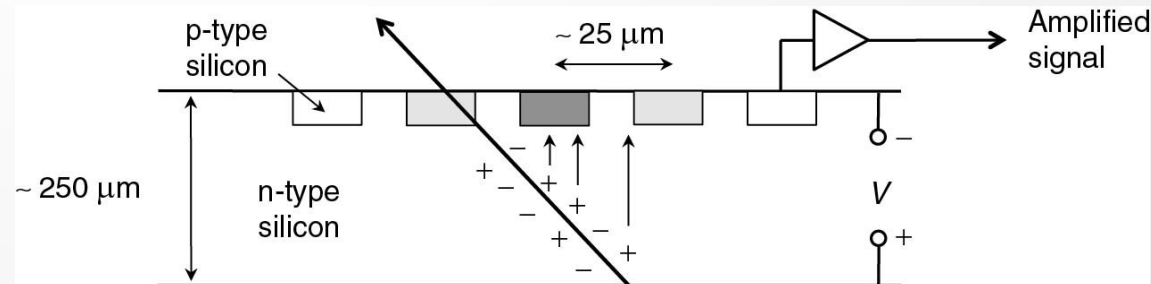
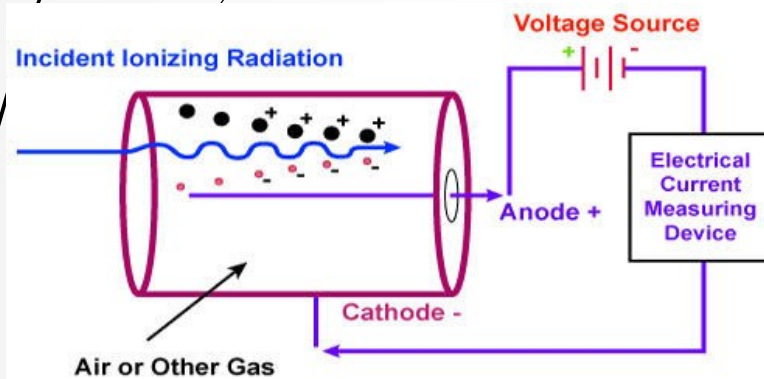
# Układy śladowe (2010)



# Układy śladowe (I)

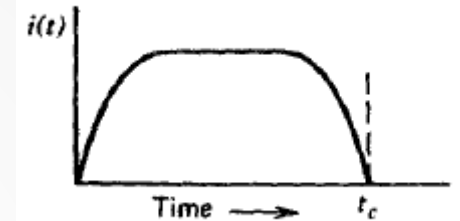


- ❑ Do pomiaru pozycji używa się głównie detektorów **gazowych** oraz **półprzewodnikowych** (mikro-paskowe lub pikselowe)
  - ❑ Zasada detekcji oraz rekonstrukcji położenia praktycznie jednakowa – komory jonizacyjne
  - ❑ Fizyka oddziaływania inna – detektory krzemowe oferują znacznie większą amplitudę generowanego sygnału



# Model detektora

- ❑ Detektor ma za zadanie zbierać ładunek.
- ❑ Od jego powstania do końca.. czasu zbierania.
- ❑ W każdym typie detektora użytecznym parametrem jest całkowita liczba jonów wytworzona przez przechodzące promieniowanie.
- ❑ Problem powstanie, gdy jest dużo przechodzących cząstek, sygnały się nałożą.
- ❑ Problemem też może być zbyt duży czas martwy.
- ❑ A na końcu okaże się, że sygnał był tak niewielki, że nie widać go na tle szumu.



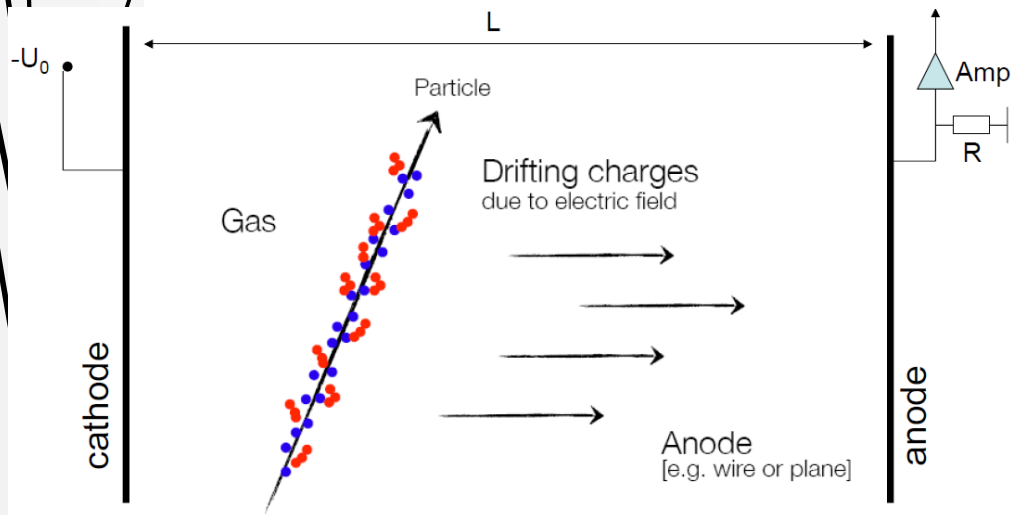
$$\int_0^{t_c} i(t) dt = Q$$

Dzisiaj omówię pokrótce dwa typy detektorów: gazowy i półprzewodnikowy.

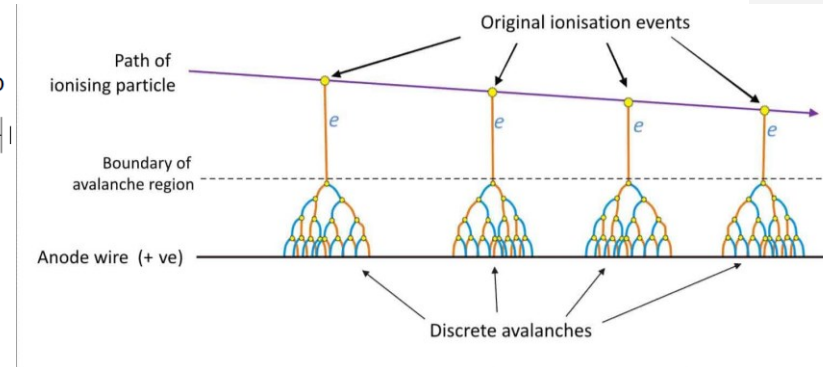


# Detektory gazowe – licznik proporcjonalny

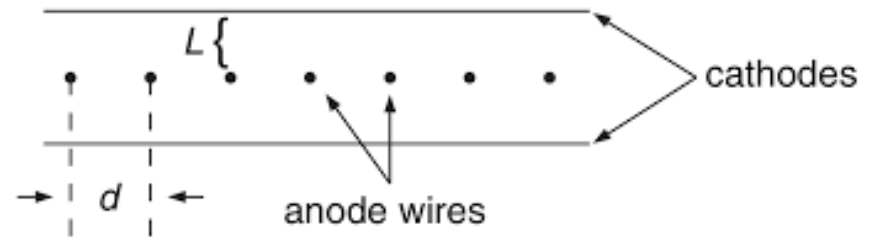
- ❑ Przechodząca cząstka ( $p$ ) jonizuje gaz  $X$ :  $X + p \rightarrow X^+ + p + \delta_{el}$  (jonizacja pierwotna).
- ❑ Jeśli  $E_{\delta} > E_j$  następuje jonizacja wtórna. Typowo  $E_j \sim 30 \text{ eV}$ , ok 100 par/3 keV cząstki padającej.
- ❑ Jeśli w liczniku jest pole elektryczne, pary dryfują do elektrod lub/i są powielane.



- Primary Ionization
- Secondary Ionization (due to  $\delta$ -electrons)



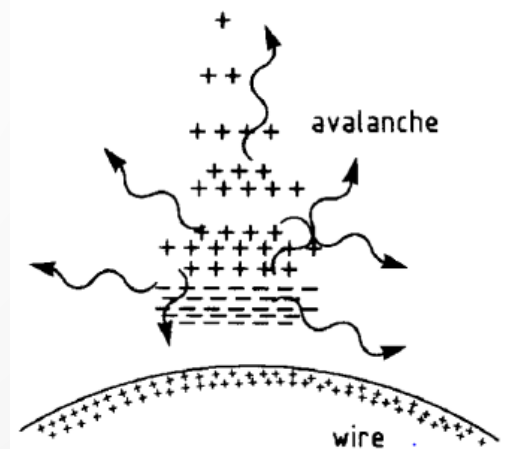
# Sygnal



- ❑ Sygnal pochodzi głównie z rejonów w pobliżu anody (bo tam jest b. duże pole elektryczne i powstaje lawina)
- ❑ Nie ma zatem znaczenia, w którym miejscu ładunek został wytworzony. Liczy się czas dotarcia elektronów i jonów z miejsc w pobliżu anody, a nie czas trwania impulsu pierwotnie wytworzonej pary.
- ❑ Dryft elektronów i jonów indukuje sygnał elektryczny. A szybkość (mobilność) jonów jest dwa rzędy wielkości mniejsza niż elektronów i to sygnał od jonów jest znacznie większy.
- ❑ W licznikach proporcjonalnych sygnał jest proporcjonalny do liczby zebranego ładunku

$$v_{d_{el}} \approx cm/\mu s$$

$$v_{d_{jon}} \approx cm/ms$$



# Wzmocnienia gazowe

## Ionization mode:

full charge collection  
no multiplication; gain  $\approx 1$

## Proportional mode:

multiplication of ionization  
signal proportional to ionization  
measurement of  $dE/dx$   
secondary avalanches need quenching;  
gain  $\approx 10^4 - 10^5$

## Limited proportional mode:

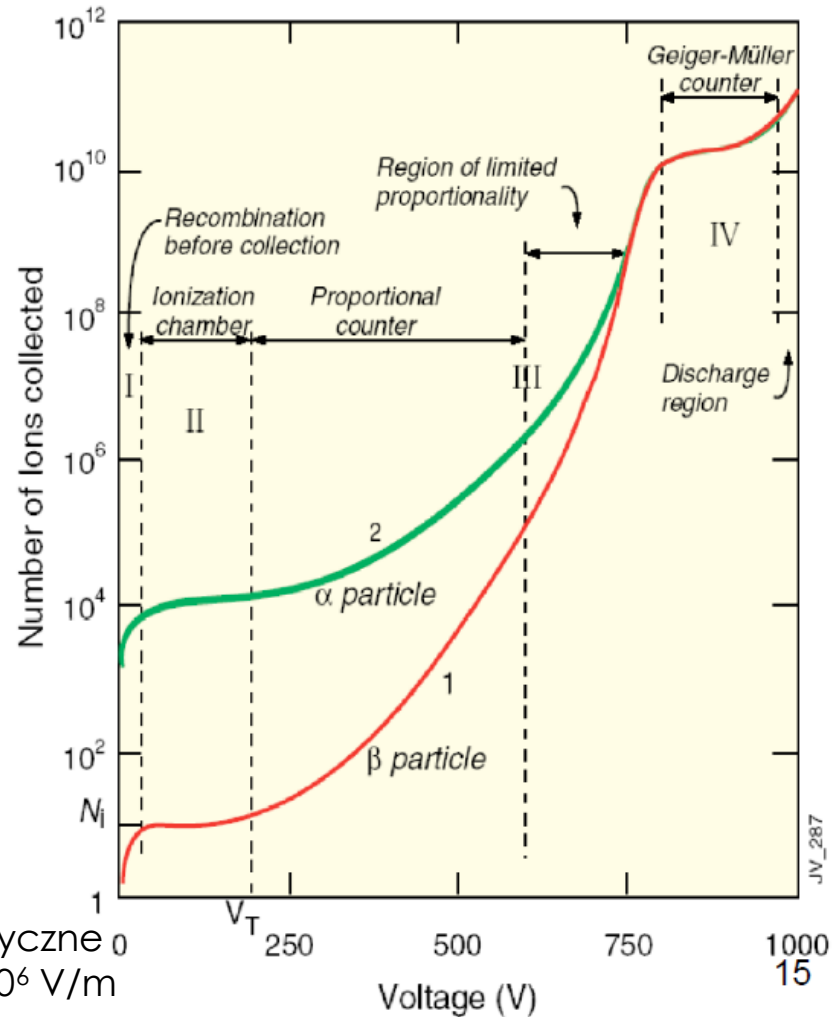
[saturated, streamer]

strong photoemission  
requires strong quenchers or pulsed HV;  
gain  $\approx 10^{10}$

## Geiger mode:

massive photoemission;  
full length of the anode wire affected;  
discharge stopped by HV cut

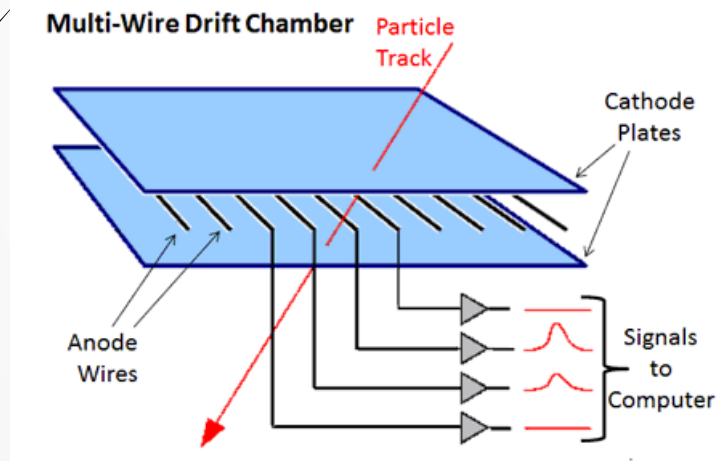
powielanie jest możliwe, gdy pole elektryczne  $E$  przekroczy wartość krytyczną, typowo  $10^6$  V/m



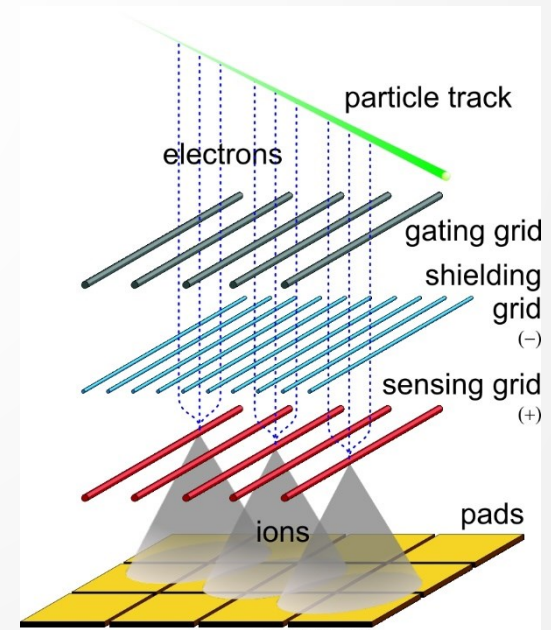
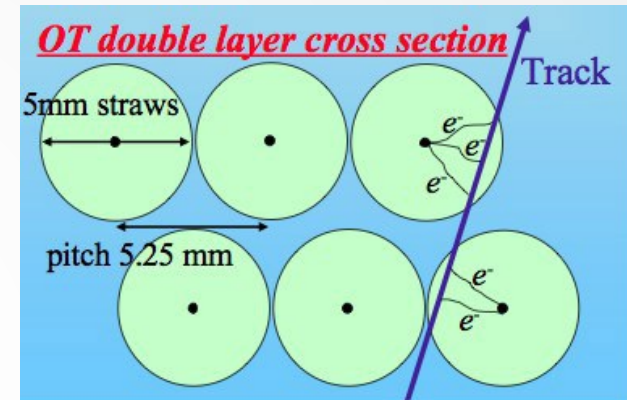


# Detektory słomkowe

- Można też połączyć kilka liczników proporcjonalnych razem:
- Lub połączyć katody liczników w płaszczyznę:

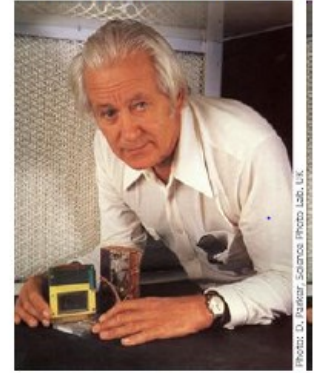


- Lub nawet usunąć i płaszczyzny....

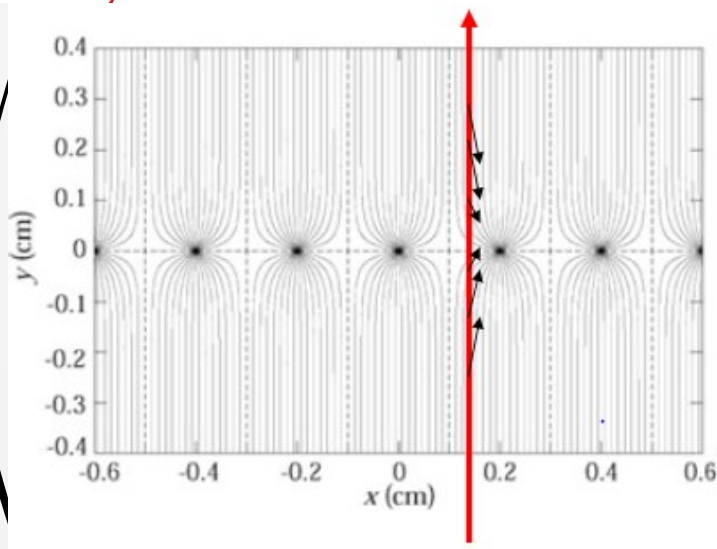
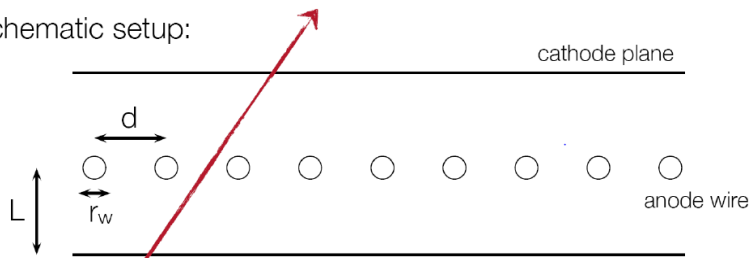


# Komora wielodrutowa (MWPC)

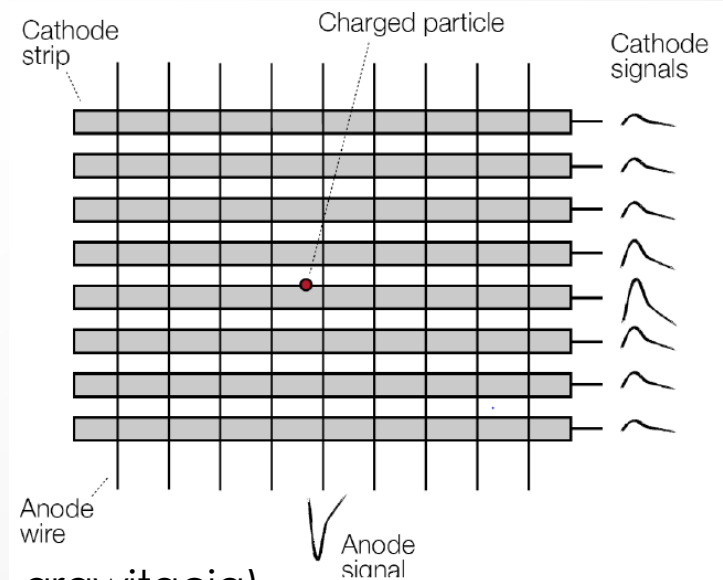
G. Charpak  
Nobel price (1992)



Schematic setup:



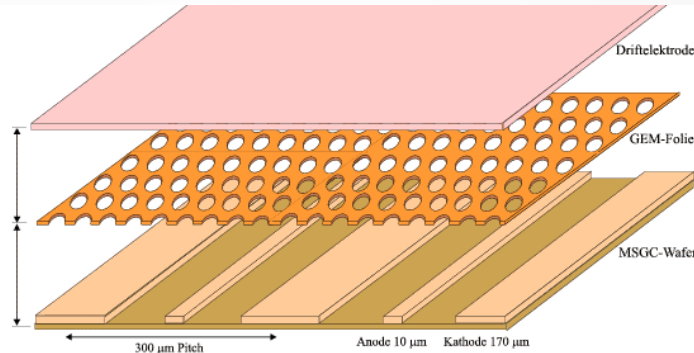
- ❑ Elektrony dryfują do najbliższego drutu.
- ❑ Powielanie jest tylko w pobliżu anody,
- ❑ Sygnał jest generowany przez elektrony, ale głównie pochodzi z **powolnych JONÓW** rozdzielczość czasowa ok. 10 ns,



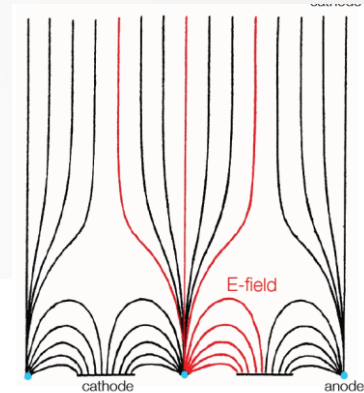
- ❑ Druty stanowią tu ograniczenia (starzenie, grawitacja), konstrukcja droga i mało użyteczna do szybkich sygnałów

# Micro-strip gas chambers (MSGC)

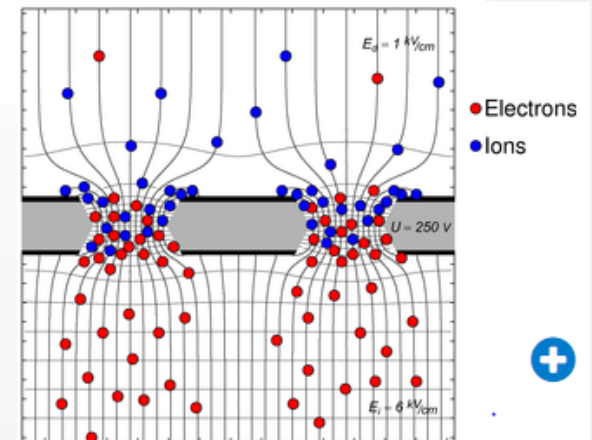
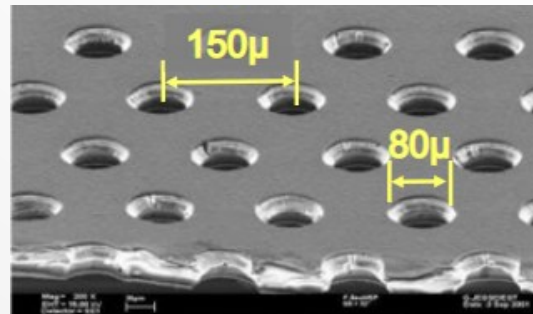
- ❑ Zamiast drutów-  
mikrostruktury, poprawiają  
rezolucję przestrzenną
- ❑ Powielanie lawinowe w  
niewielkim obszarze



- ❑ Problem z  
niejednorodnością  
pola

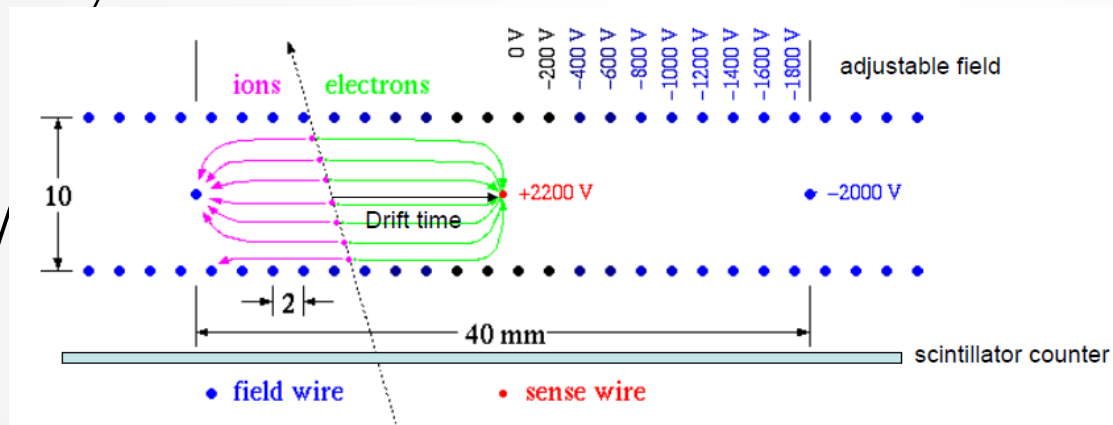


- ❑ GEM (Gas Electron Multiplier):
  - wytrawiane otwory o średnicy 100-200  $\mu\text{m}$  w specjalnej metalizowanej folii.
  - Powielanie lawinowe tylko w pobliżu otworów
  - Dryft elektronów do anody,
  - Sygnał głównie od jonów.

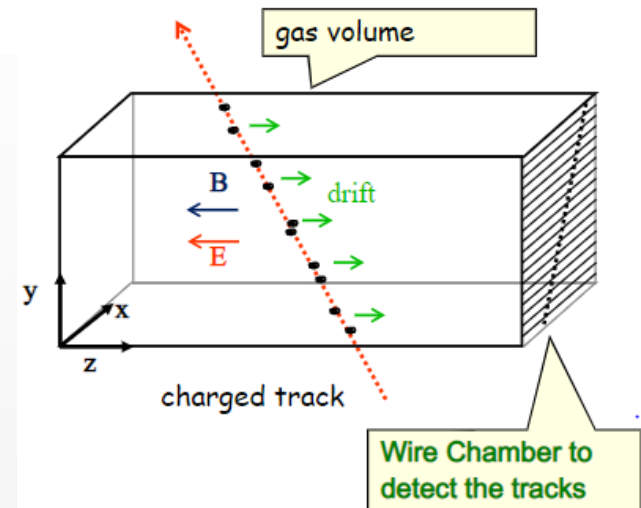


# Komory dryfowe

- Można też skonstruować detektor mierzący położenie w oparciu o pomiar czasu dryfu w stosunku do zewnętrznego sygnału (np. scyntyлятора).

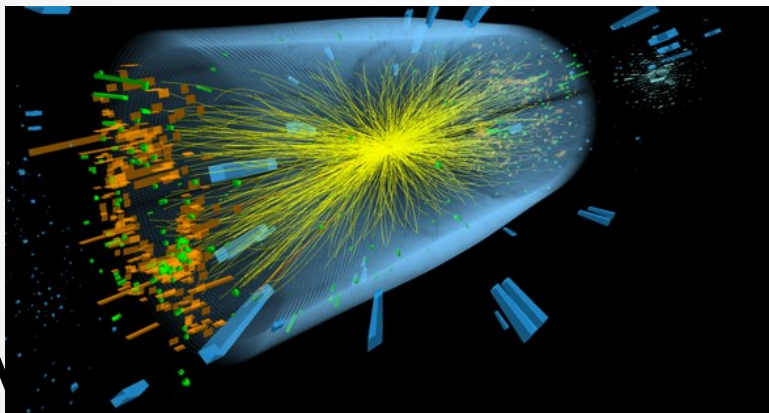
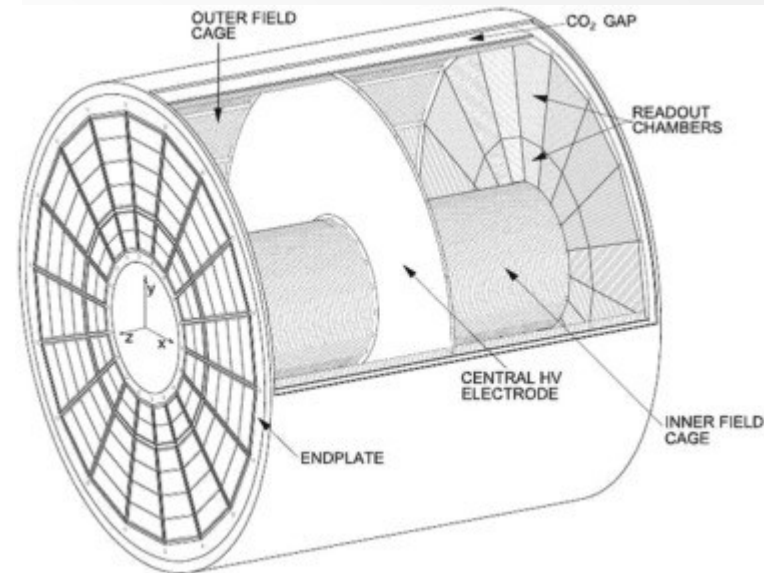
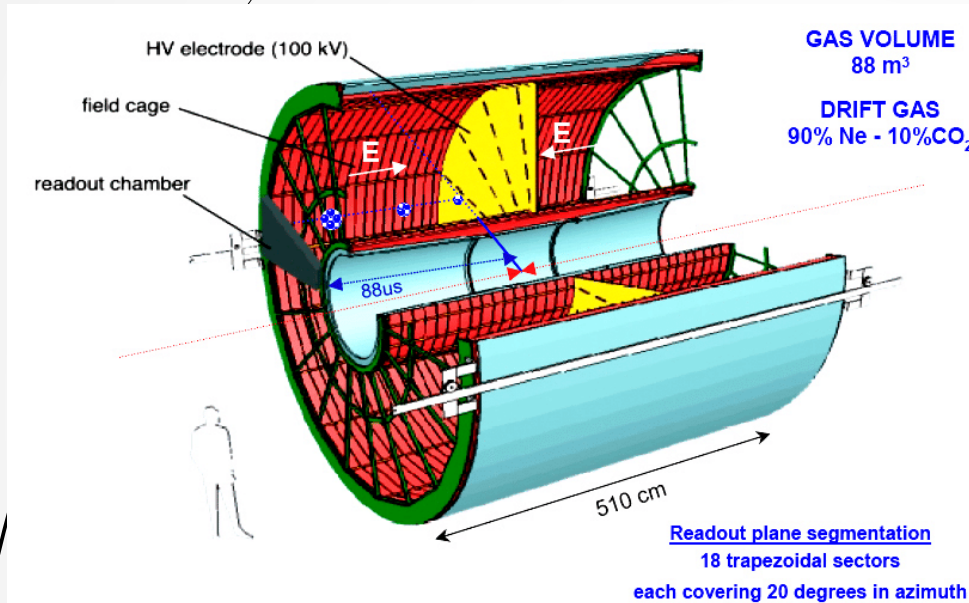


- W komorze dryfowej często jest również pole magnetyczne.



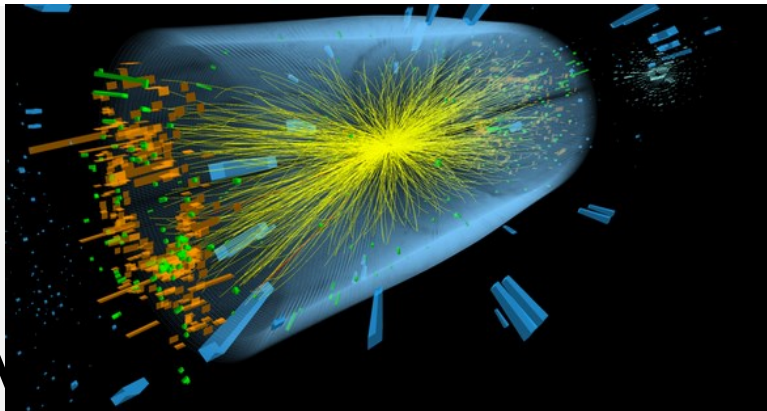
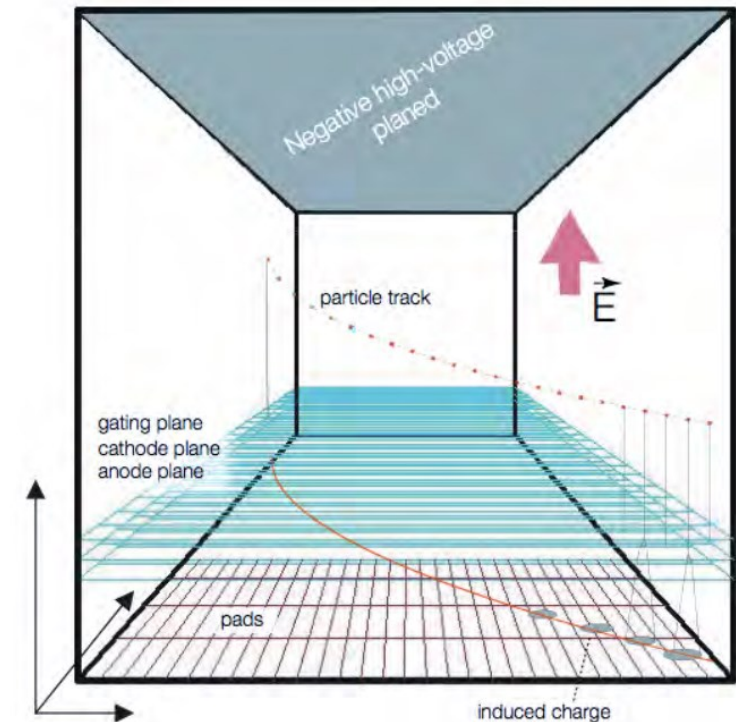
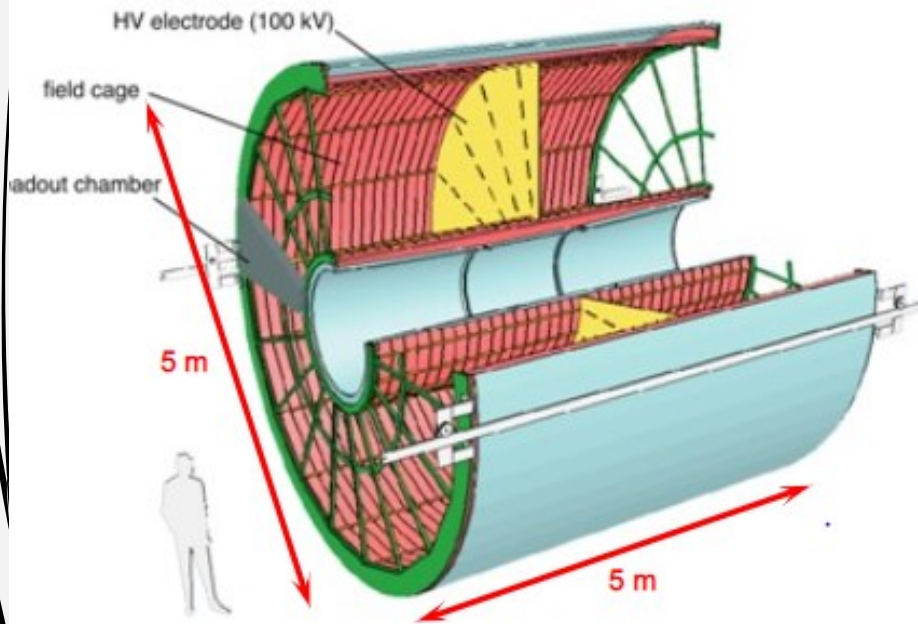


# Duże komory dryfowe



pomiar  $dE/dx$  umożliwia:  
 wyznaczenie trajektorii cząstki,  
 Identyfikację,  
 Rezolucja:  $z, y \sim mm, x \sim 150 - 300 \mu m$

# Duże komory dryfowe (ALICE)



pomiar  $dE/dx$  umożliwia:  
 wyznaczenie trajektorii cząstki,  
 Identyfikację,  
 Rezolucja:  $z, y \sim mm, x \sim 150 - 300 \mu m$

# Detektory półprzewodnikowe

## ATLAS

Strips: 61 m<sup>2</sup> of silicon, 4088 modules, 6x10<sup>6</sup> channels

Pixels: 1744 modules, 80 x 10<sup>6</sup> channels

## CMS

the world largest silicon tracker  
200 m<sup>2</sup> of strip sensors (single sided)  
11 x 10<sup>6</sup> readout channels

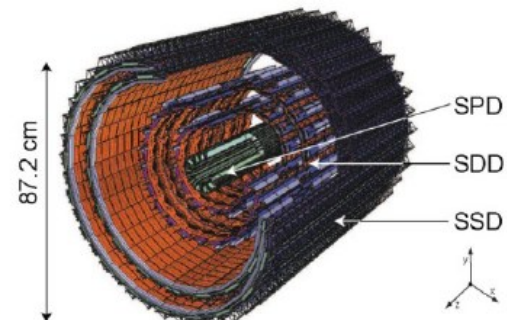
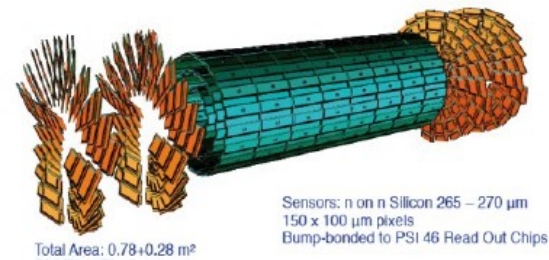
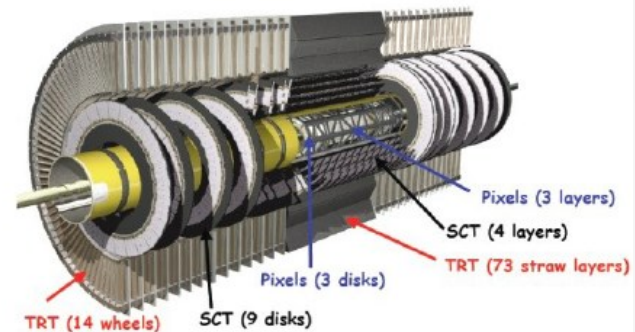
~1m<sup>2</sup> of pixel sensors, 60x10<sup>6</sup> channels

## ALICE

Pixel sensors  
Drift detectors  
Double sided strip detectors

## LHCb

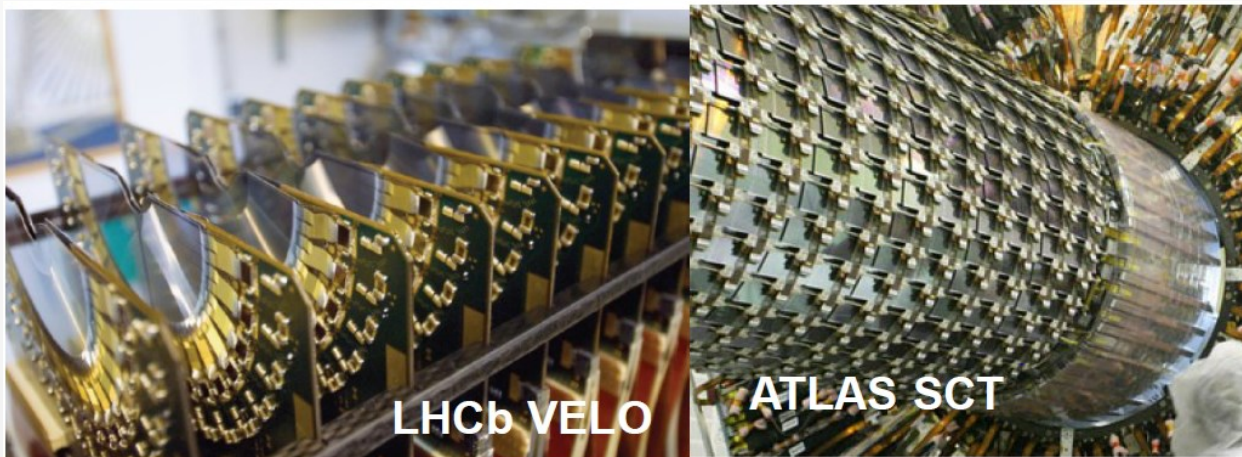
VELO: Si Strips





# Detektory półprzewodnikowe

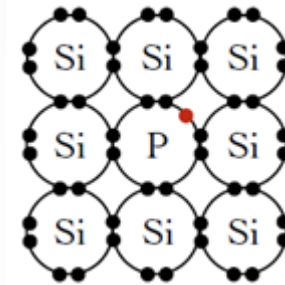
- ❑ Półprzewodniki mają większą gęstość i niższy potencjał jonizacyjny w porównaniu do gazów (kilka eV/eh)
- ❑ Nośniki mają wysoką mobilność (szybki detektor)
- ❑ German – wymaga chłodzenia, używany w fiz. jądrowej.
- ❑ Krzem – temp. pokojowa, synergia z elektroniką, najczęściej używany detektor śladowy i do wyznaczenia wierzchołków oddziaływań.
- ❑ Diament – bardzo odporny radiacyjnie, drogi i trudny w produkcji, stosowany do monitorów wiązek.



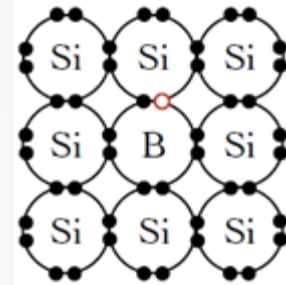


# Detektory krzemowe

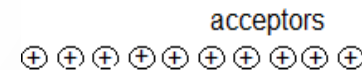
- Silicon belongs to IV group with four valence electrons which form a covariant bonding with the neighbour atoms.
- Si atom substituted from III (B) or V (P) group form an additional energy slightly below the conduction band (**donors, n-type**) and a bit above the valence level (**acceptors, p-type**).
- **At room temperature 99.6% of the donors electrons are ionized**, and therefore contribute to conduction. The same happens for holes.
- Once an n-type silicon is put into physical contact with a p-type silicon, the donors diffuse to the p-side and recombine with acceptors on p-side.
- The diffusion of electrons (majority carriers) leaves positive ions on the n-side and causes the excess of negative charge on the p-side. An electrical field builds up what prevents further diffusion.



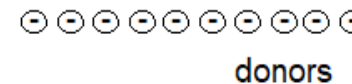
Conduction Band



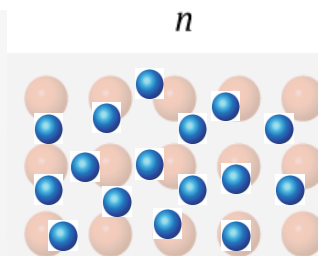
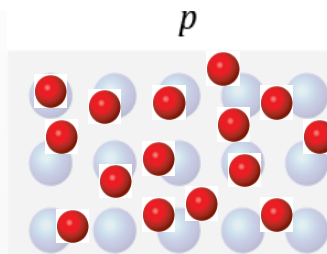
Conduction Band



Valence Band

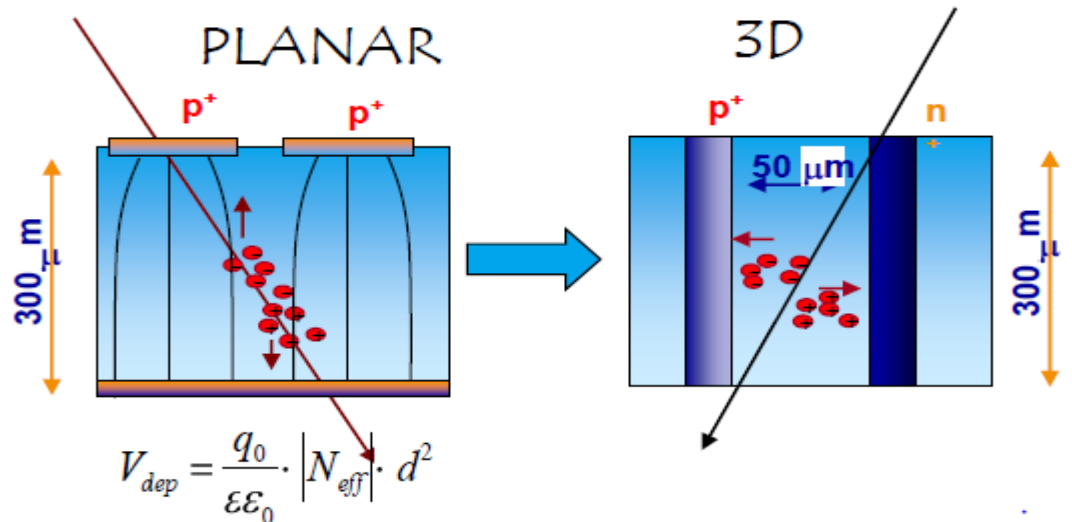
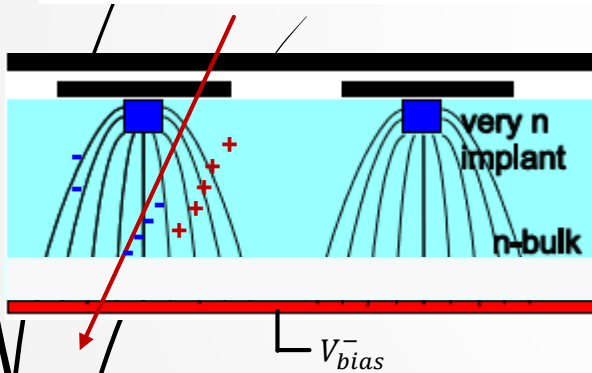
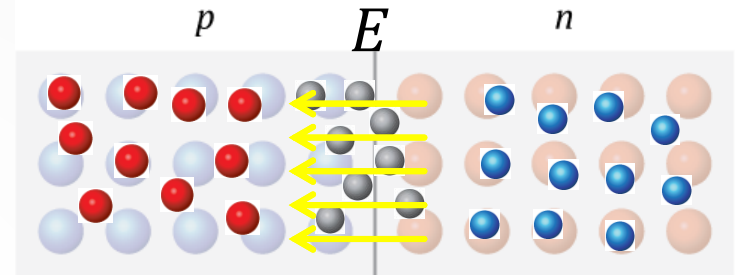


Valence Band



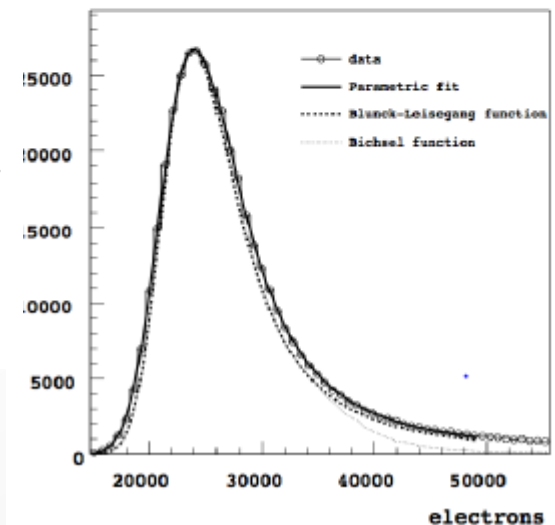
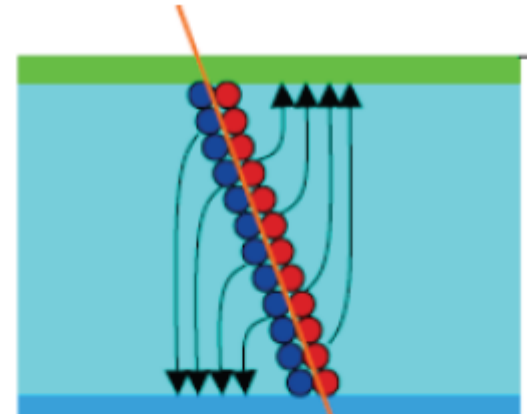
# Detektory krzemowe

- Region around the junction is free of charge, so is called the **depletion zone**.
- The reverse bias is applied to broaden the depleted region

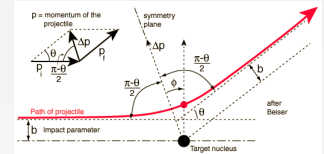


# Detektory krzemowe

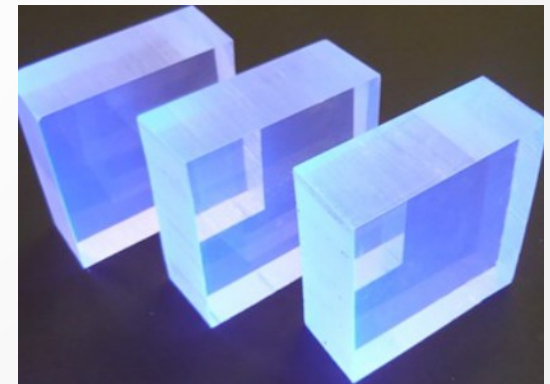
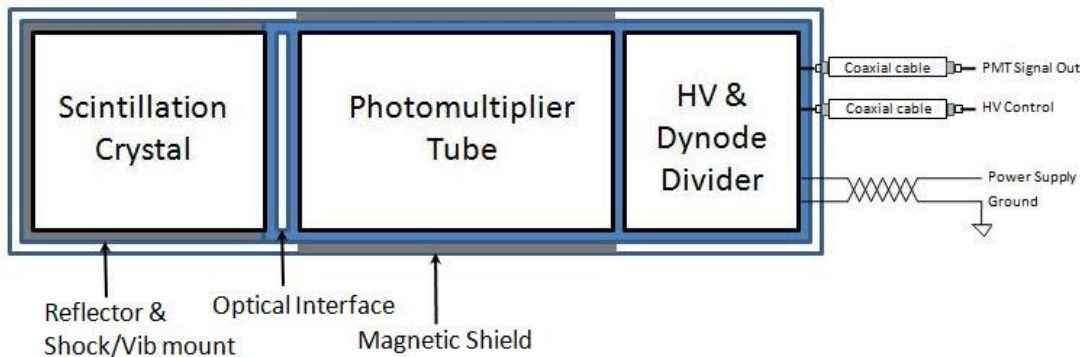
- ❑ Sygnał z detektorów krzemowych zależy od szerokości strefy zubożenia.
- ❑ Średnia strata energii MIP to 3.87 MeV/cm
- ❑ Rozkład Landaua i MPV = 0.7 max
- ❑ Dla 300  $\mu\text{m}$  sensora, MPV to ok. 23 400 par e/h.
- ❑ Szum w detektorach krzemowych zależy od wielu parametrów: geometrii, napięcia, elektroniki odczytu, temperatury.
- ❑ Rozdzielczość przestrzenna zależy od geometrii detektora i jest rzędu kilkudziesięciu  $\mu\text{m}$ .



# Scyntylatory



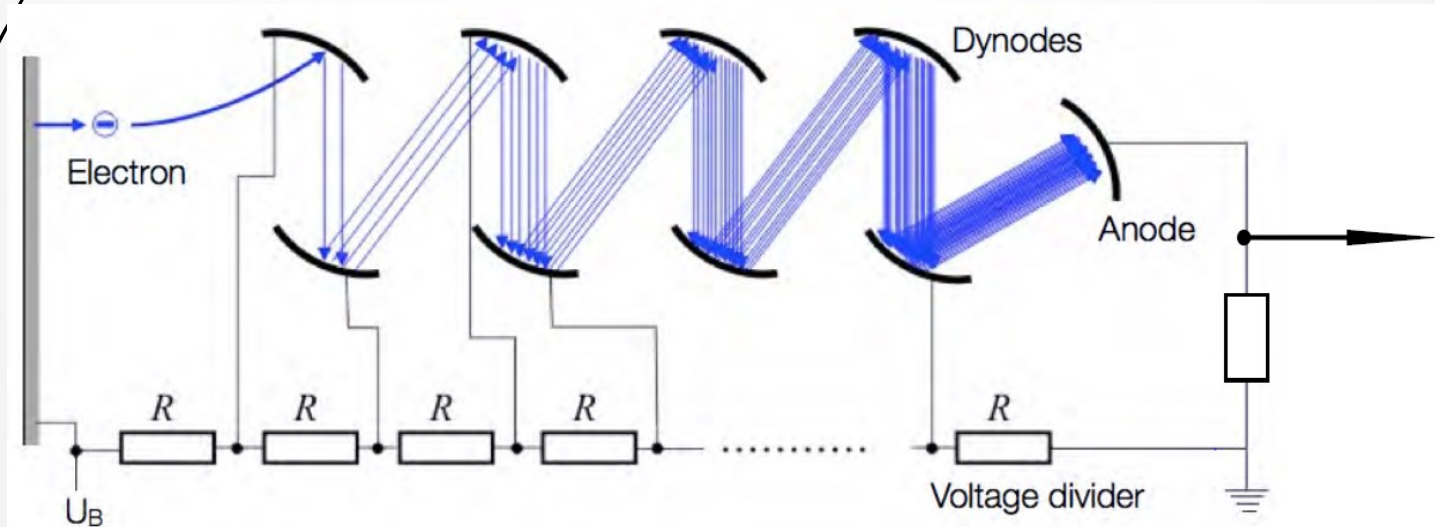
- ❑ Bardzo popularne detektory do detekcji przejścia cząstek naładowanych
  - ❑ Ograniczona czułość dotycząca krotności
  - ❑ Niezwykle użyteczne, gdy **nie potrzebna** jest **dokładna** informacja dotycząca **położenia cząstek**
  - ❑ Również użyteczne w budowaniu układów koincydencyjnych
- ❑ Materiały scyntylacyjne wykazują własności tzw. **luminescencji**, na skutek wzbudzenia przez cząstki naładowane – cząstki scyntylatora pochłaniają energię i emitują fotony przy de-ekscytacji



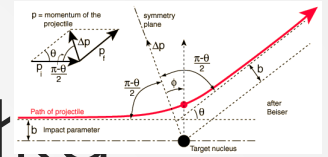
# Fotopowielacze



- ❑ Detektory światła
- ❑ Fotony są absorbowane na fotokatodzie, wybity fotoelektron jest następnie przyspieszany i powielany na kolejnych fotodynodach
- ❑ Wzmocnienia ok.  $10^6$ - $10^8$ , a sygnał jest proporcjonalny do liczby pierwotnych fotonów
- ❑ Problem: praca w polu magnetycznym



# Układy śladowe i wierzchołka

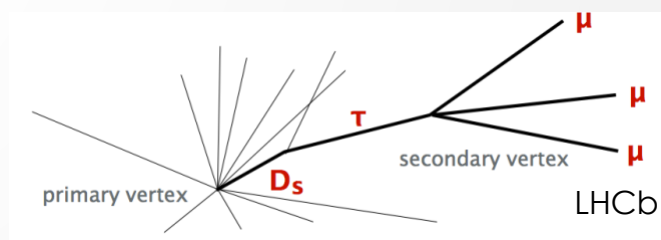
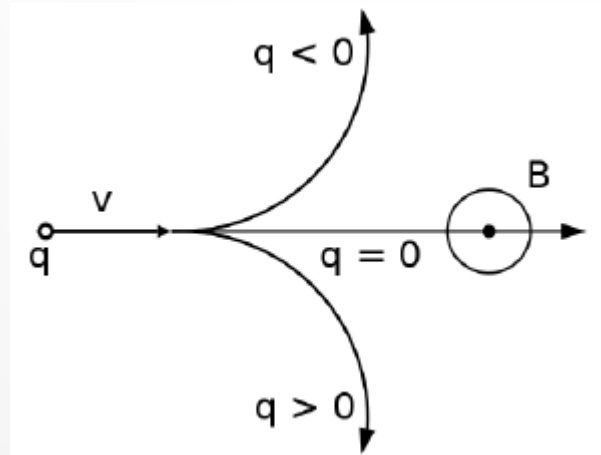
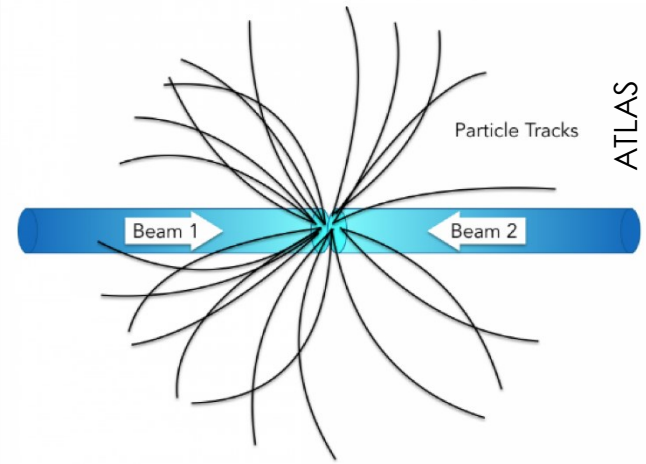


Cel: wyznaczenie pędu i miejsca produkcji i rozpadu cząstek (wierzchołka)

Pomiar pędu w polu magnetycznym

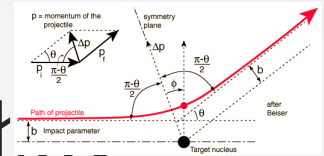
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$



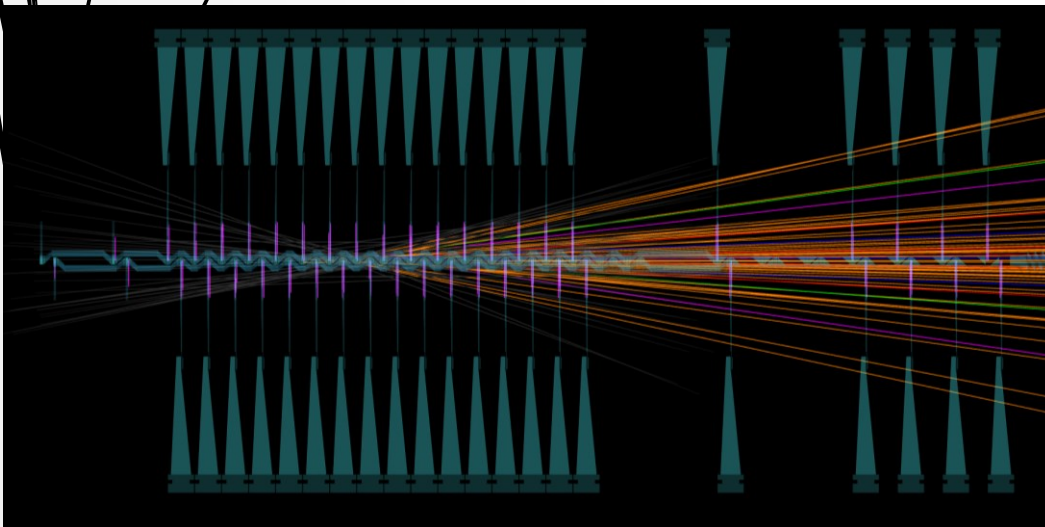
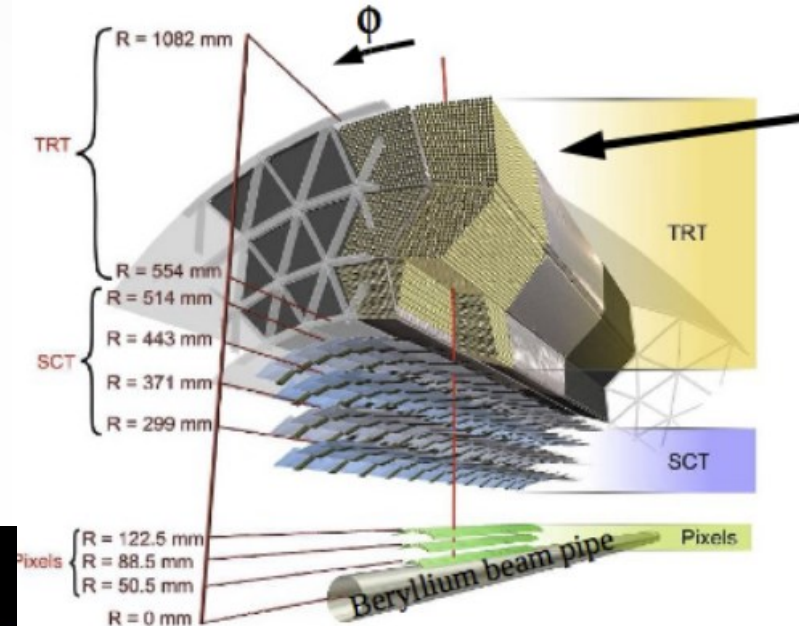
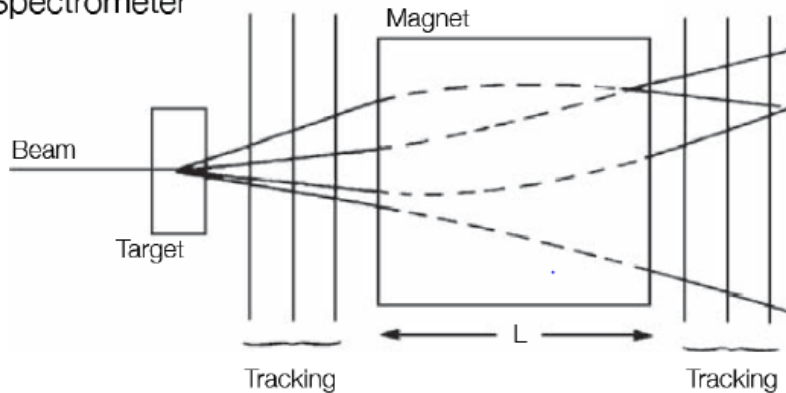


# Układy śladowe i wierzchołkowe

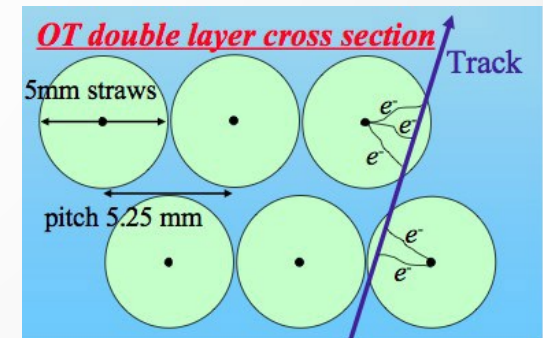
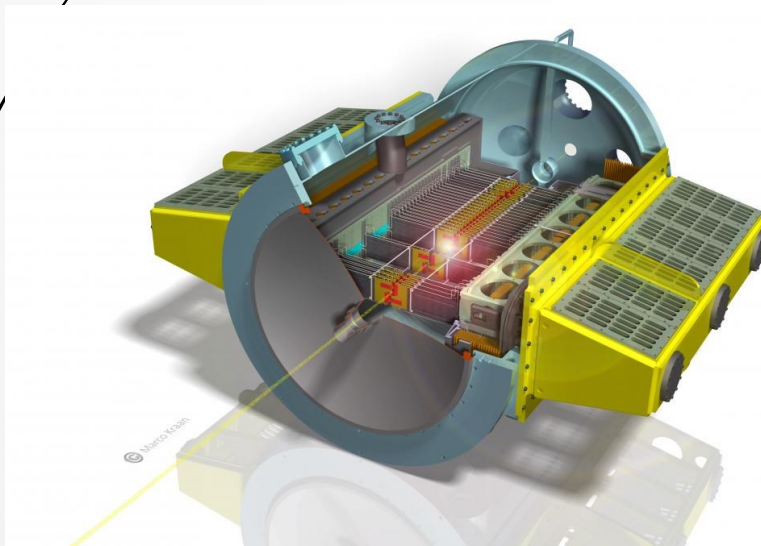
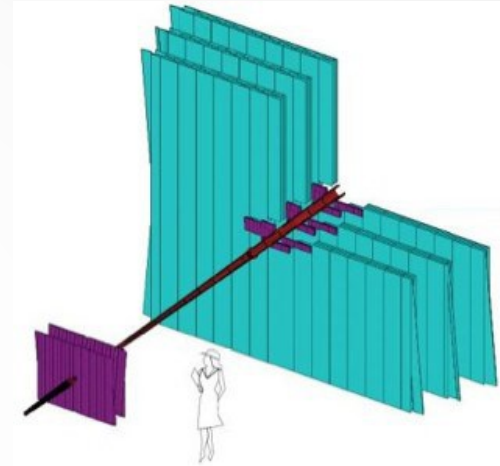
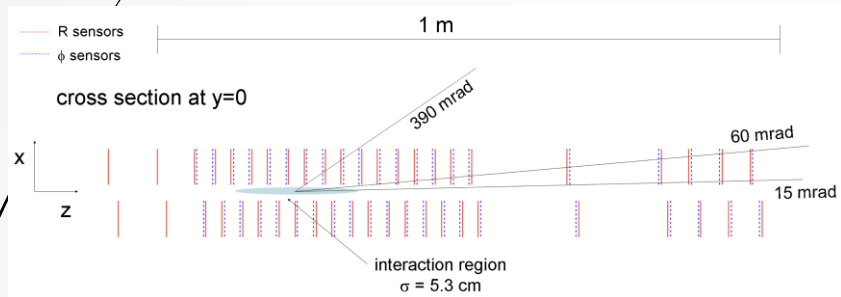
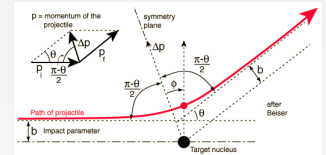


Praktycznie zawsze stosowane są warstwy detektorów

Schematics of a Spectrometer

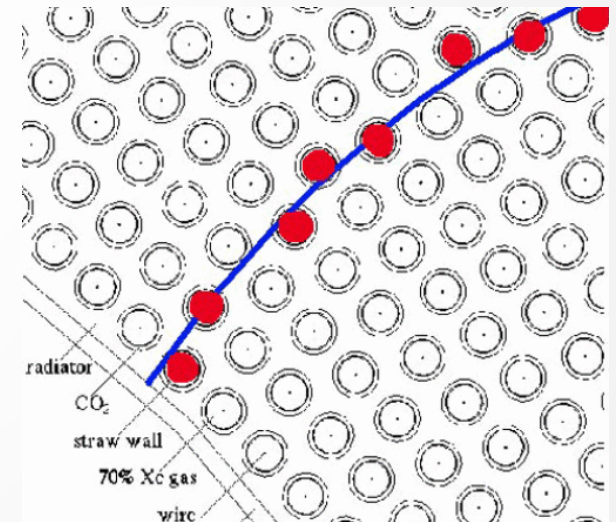
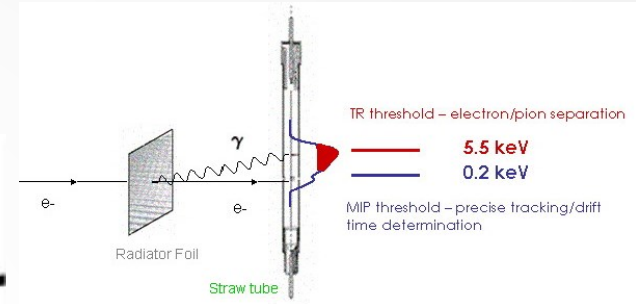
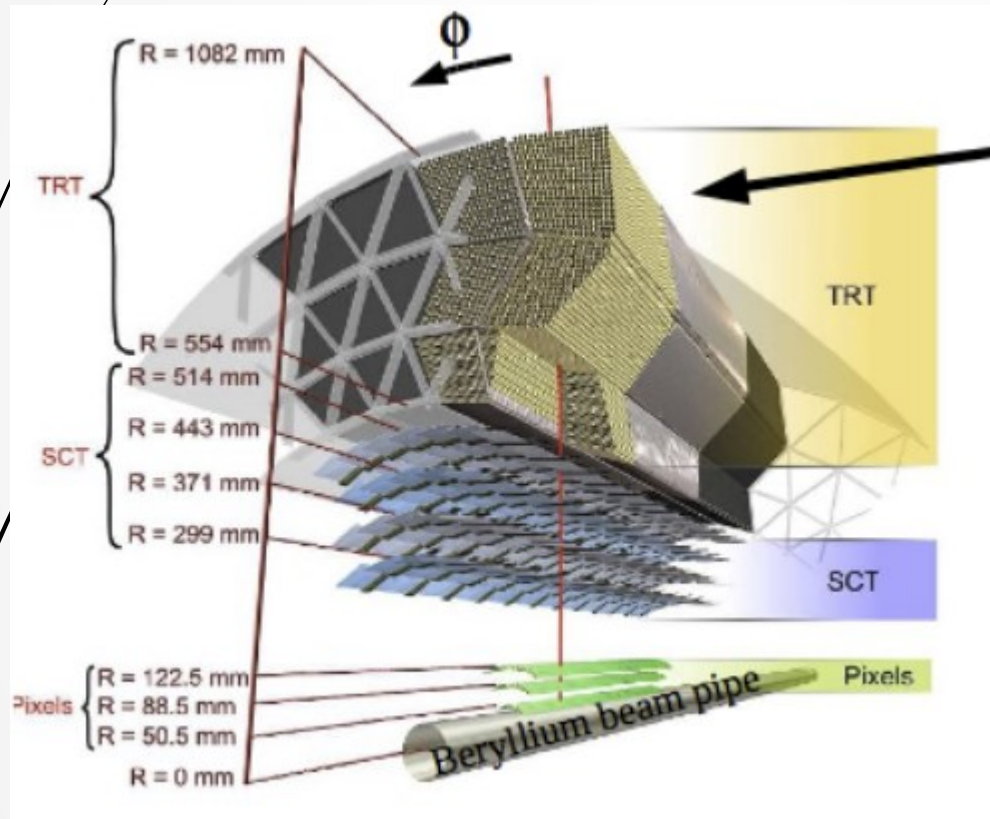
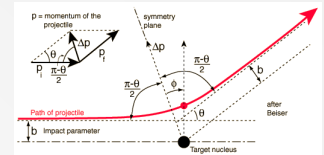


# Układy śladowe (II)





# Układy śladowe (III)



Atlas TRT – Transition Radiation Tracker