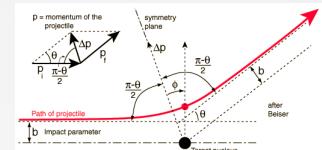


Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materiałem

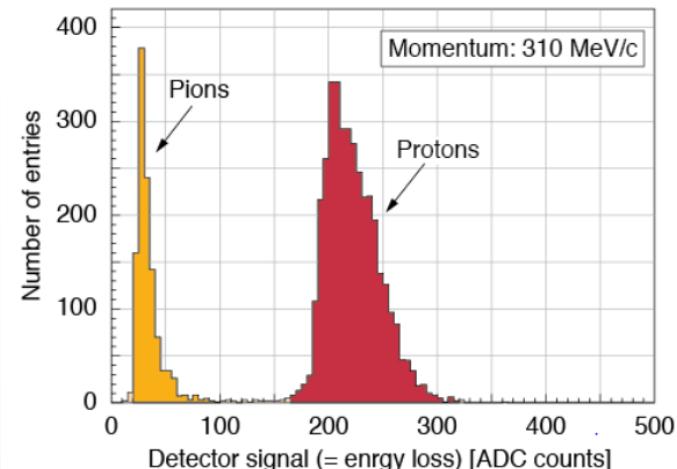
Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłakowska-Mucha

WFiIS AGH
Kraków

Pomiary jonizacji

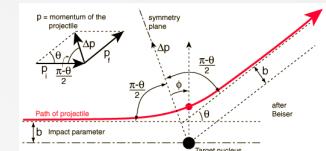


- Nasze piękne równania opisujące straty jonizacyjne mogą zostać użyte do wyznaczenia **średniej** liczby par **jon-elektron** generowanych na drodze cząstki jonizującej
- **UWAGA** – należy zawsze używać sformułowań jak poniżej
 - Cząstka naładowana deponuje energię (nie ładunek!!)
 - Deponowanie energii powoduje generację ładunku wzdłuż toru cząstki
- Wyróżniamy tu jonizację **pierwotną** n_p (liczba pierwotnie wytworzonych par e-jon) oraz **wtórną** (związaną z elektronami δ) 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)



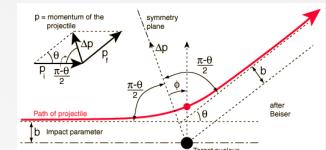
W. Adam et al., CMS note 1998/092 (1998)

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: ΔE – całkowita strata jonizacyjna energii, W – średnia energia potrzebna do generacji pary „jon”-elektron (dla gazów ~ 30 eV dla krzemu (germanu) ~ 3.6 eV (~ 2.8 eV))
 - ❑ Liczba wygenerowanych nośników jest **zmieniątą losową** – dla detektorów „ss” fluktuacje N_{Tot} są oczywiście znacznie mniejsze!
 - ❑ Kapitalne znaczenie w przypadku pomiaru energii cząstek

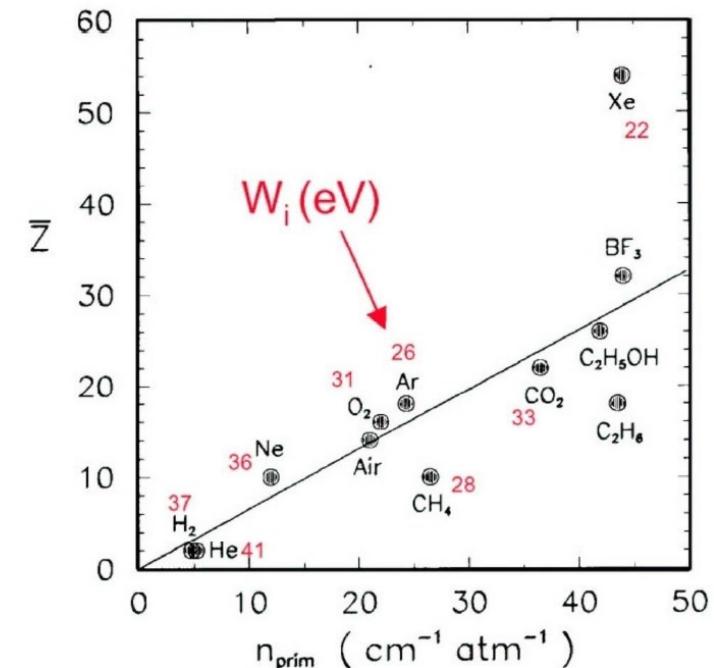
Jonizacja pierwotna



Straty energii:

- głównie na jonizację,
- zależą od $\beta\gamma$,
- typowa strata to ok. $2-3 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$,
- w cieczach i ciałach stałych kilka MeV/cm ,
- w gazach – kilka keV/cm .

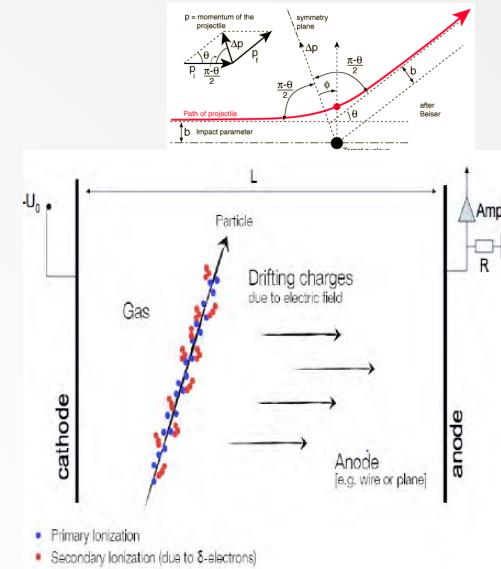
❑ Jonizacja pierwotna: naładowana cząstka wybija elektron z atomu, również wzbudzenia.



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

Jonizacja wtórna

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

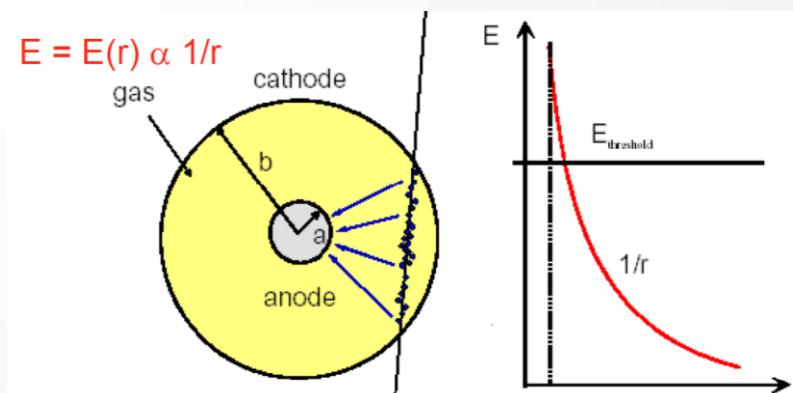


120 par elektron-jon wytworzy puls o amplitudzie:

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

To jest za mało na detekcję.

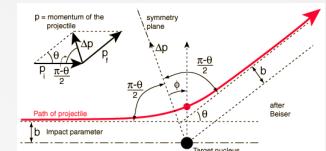
Pomysł: powielanie
(multiplikacja) nośników w silnym
polu elektrycznym: $E \cong 10 \text{ kV/cm}$,
potencjał 10 V w pobliżu anody
(10 mm)



6

Jonizacja

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



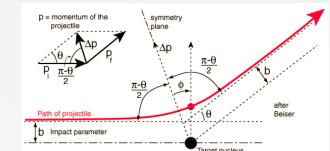
Gas	Density ρ [g/cm ³]	I_0 [eV]	W [eV]	n_p [cm ⁻¹]	n_T [cm ⁻¹]
H ₂	$8.99 \cdot 10^{-5}$	15.4	37	5.2	9.2
He	$1.78 \cdot 10^{-4}$	24.6	41	5.9	7.8
N ₂	$1.25 \cdot 10^{-3}$	15.5	35	10	56
O ₂	$1.43 \cdot 10^{-3}$	12.2	31	22	73
Ne	$9.00 \cdot 10^{-4}$	21.6	36	12	39
Ar	$1.78 \cdot 10^{-3}$	15.8	26	29	94
Kr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

Fluktuacje

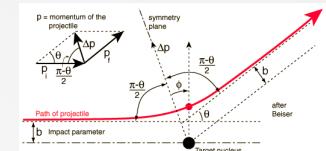
- Całkowita jonizacja, N_T , (liczba par nośników, które zostały wygenerowane) wynosi:

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

- Gdzie: ΔE – całkowita strata jonizacyjna energii, W – średnia energia potrzebna do generacji pary „jon”-elektron (dla gazów $\sim 30 \text{ eV}$ dla krzemu (germanu) $\sim 3.6 \text{ eV}$ ($\sim 2.8 \text{ eV}$), **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:

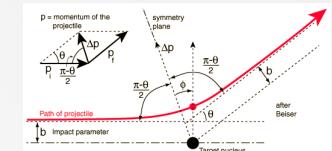
$$\sigma^2 = F \cdot \langle N \rangle$$

Absorber	<i>F</i>
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

- ❑ Pamiętamy ciągle o zdarzających się bardzo dużych stratach energii, zwłaszcza w cienkich absorberach (p. rozkład Landau)

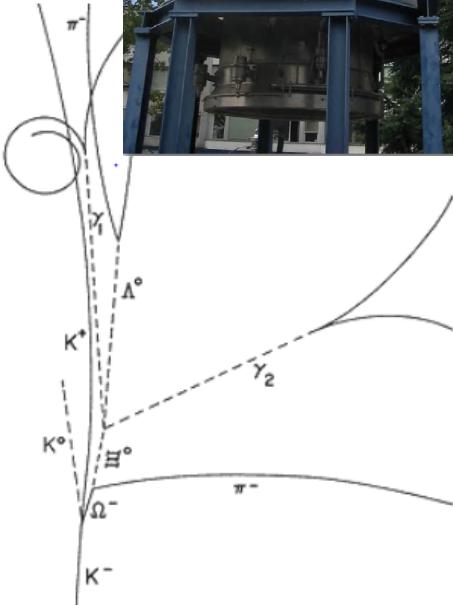
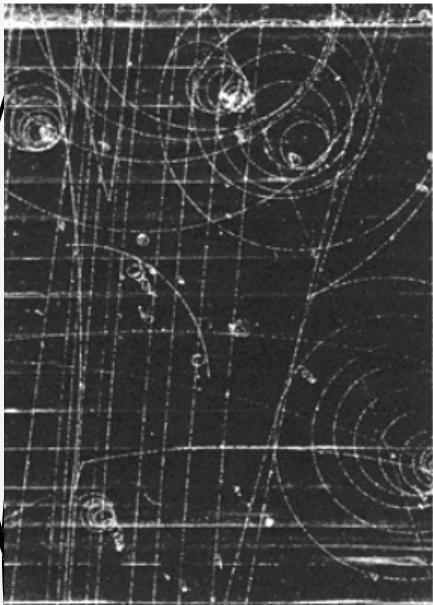
Co chcemy zrobić?



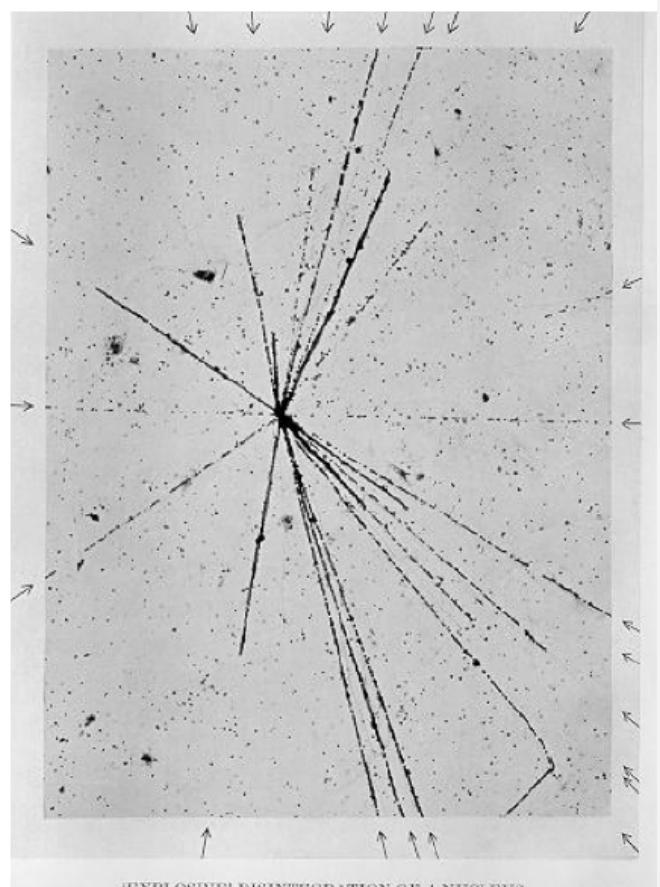
- Konstrukcja (rodzaj) detektora zależy bezpośrednio od tego jaką wielkość fizyczną chcemy zmierzyć
- Zwykle jesteśmy zainteresowani:
 - Detekcją cząstek (wykrycie obecności, np. Geiger-Müller – duże ograniczenia związane z brakiem **zależności** pomiędzy **energią zdeponowaną a sygnałem** oraz **saturacja** 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...)
- Pomiary trajektorii, pędu (wektor!) czy rodzaju cząstki są trudne

Trochę historii

- Cloud chambers
- Emulsions
- Bubble chambers



Discovery of the Ω^- in 1964

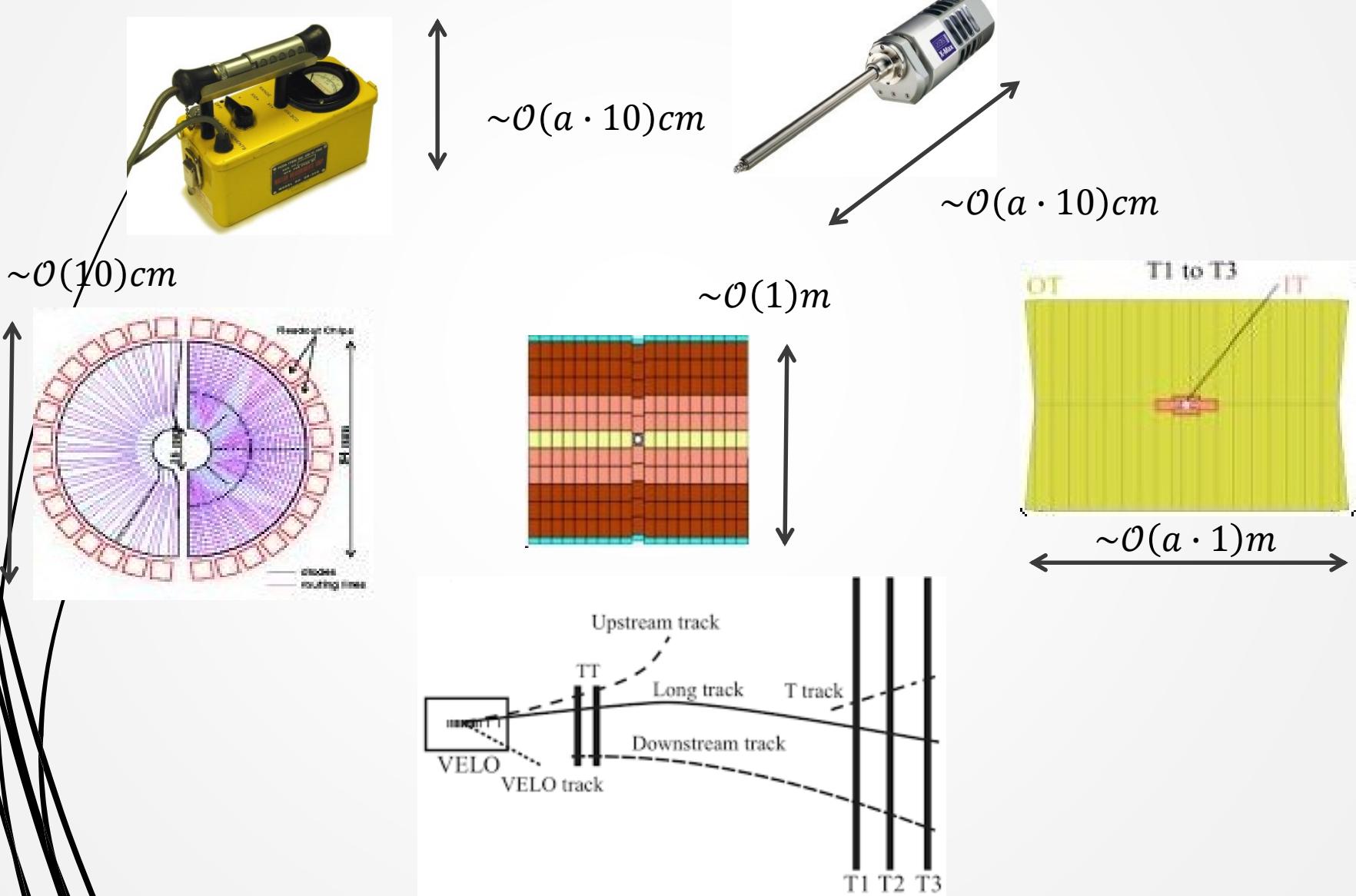


'EXPLOSIVE' DISINTEGRATION OF A NUCLEUS

nuclear disintegrations in 1937

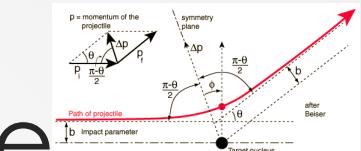
11

Małe i duże

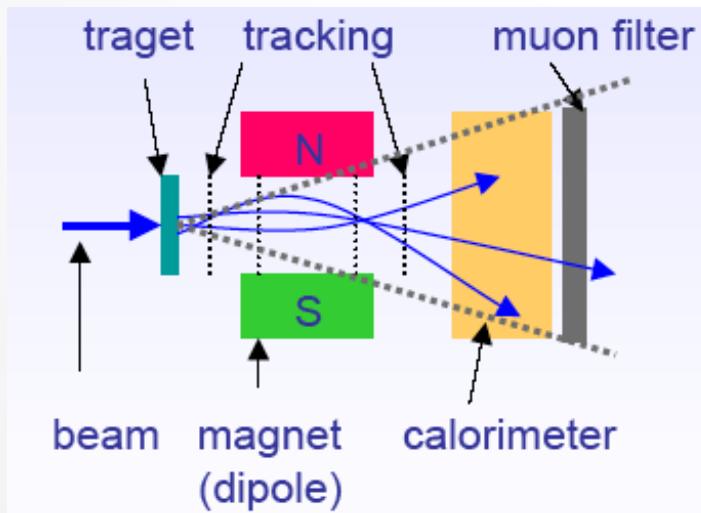


I bardzo skomplikowane

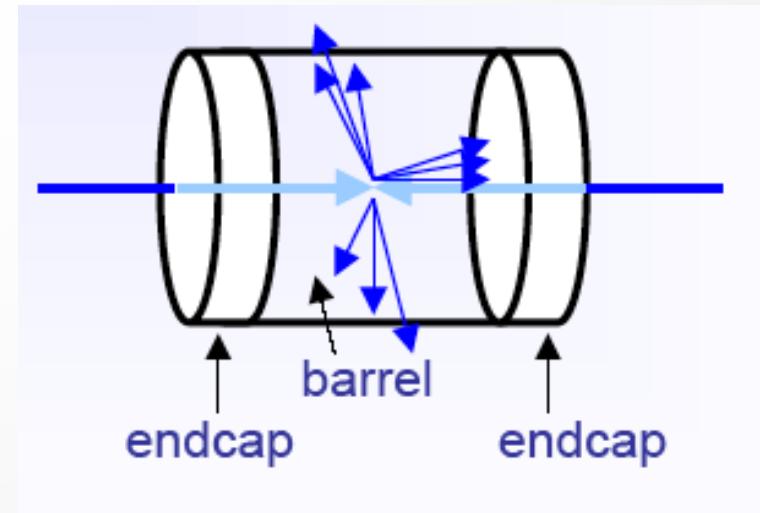
- Bez względu na rodzaj promieniowania oraz aparatury jakiej używamy, zawsze interesować nas będzie (skrót myślowy...):
 - Detekcja cząstek
 - Estymacja 4-pędu p^μ
 - Identyfikacja (PID – Particle IDentification)



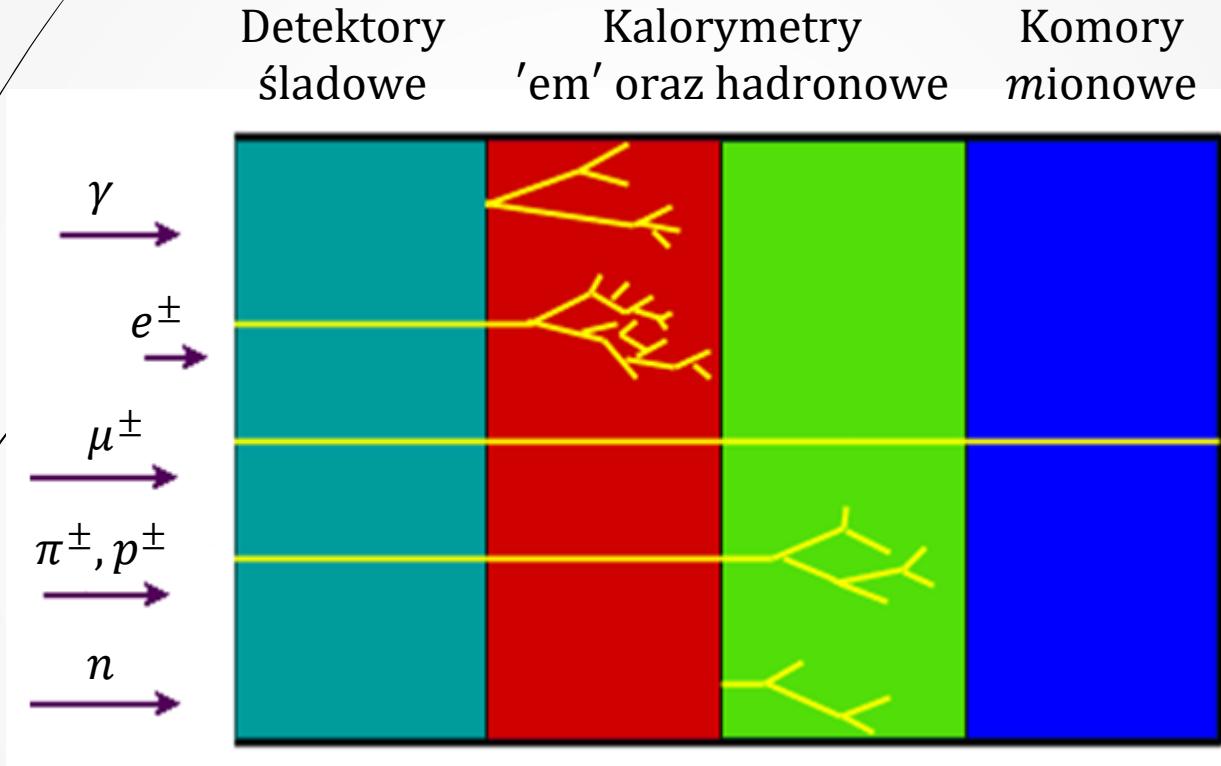
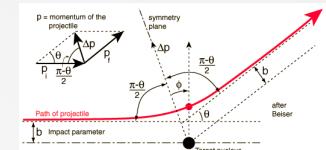
Geometria typu spektroskop



Geometria typu 4π



Eksperymenty FWE

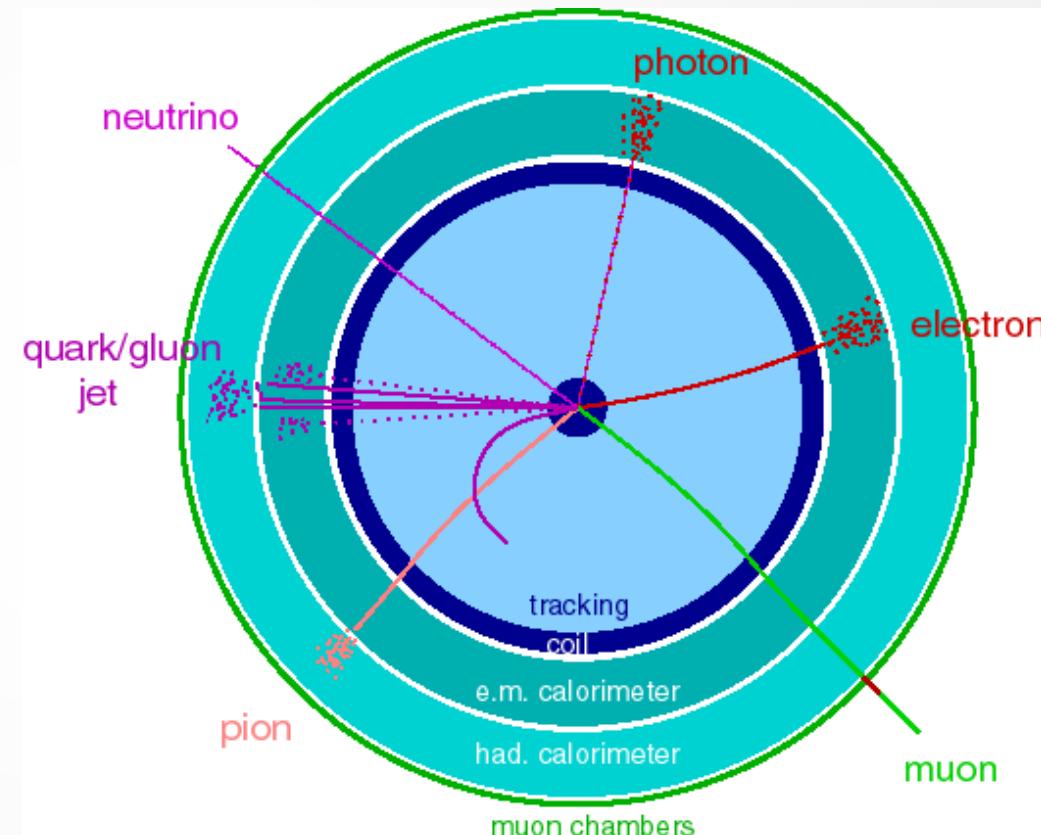


blisko źródła → daleko od źródła

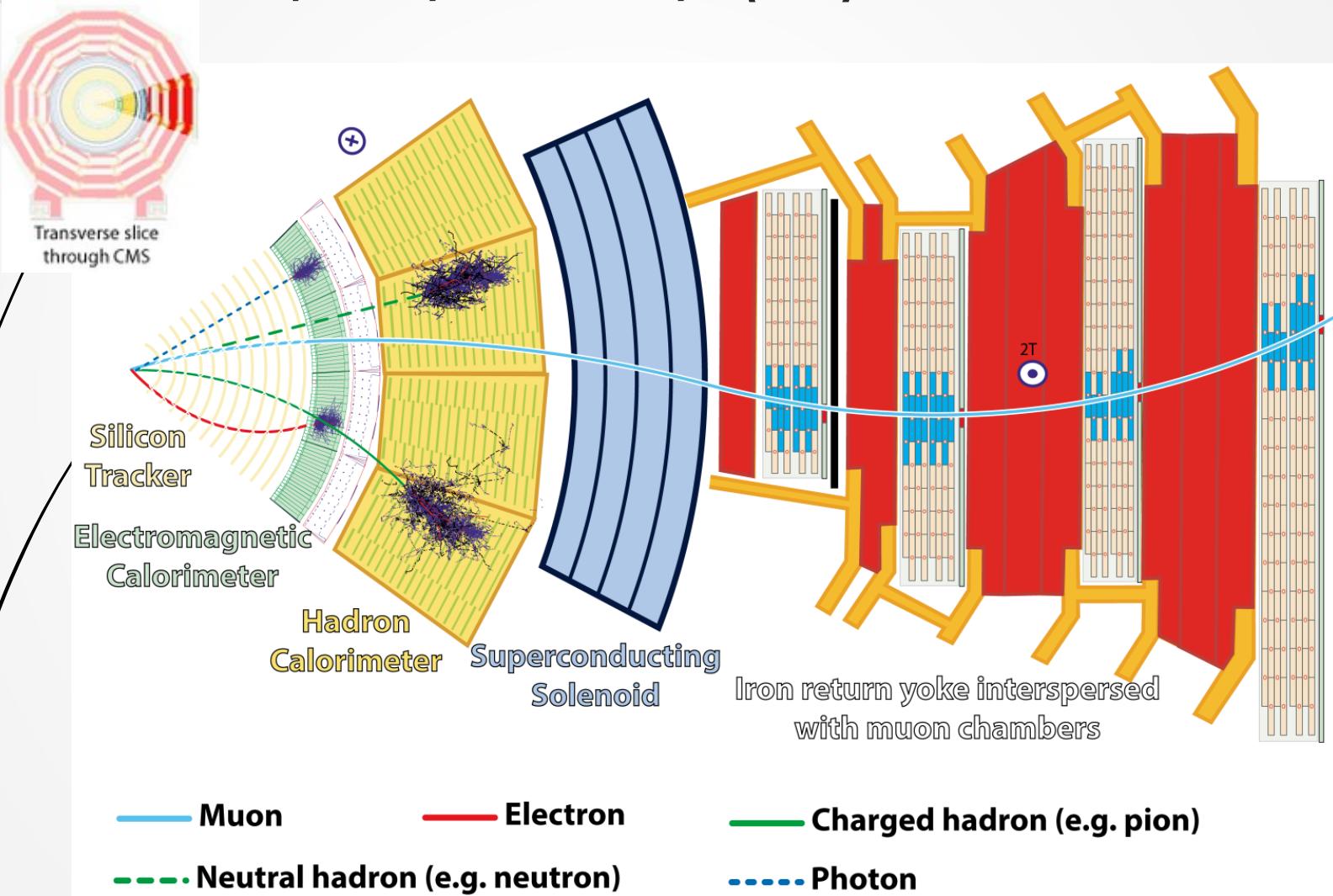
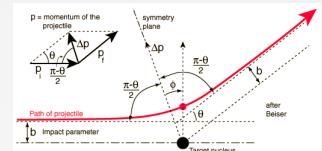
- Obserwacja cząstek zawsze jako konsekwencja oddziaływania z materiałem „czynnym” detektora
- Bez względu na typ cząstki i własności oddziaływania na końcu zawsze mamy **jonizację!**

Eksperymenty FWE

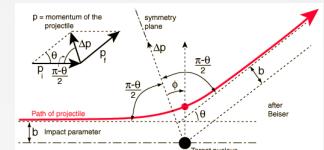
- Układy śladowe powinny zawierać jak **najmniej materiału** (wielokrotne rozproszenia, straty na jonizację)
- Kalorymetry „odwrotnie” powinny zawierać jak **najwięcej materiału** („katastroficzne” pochłonięcie cząstek)



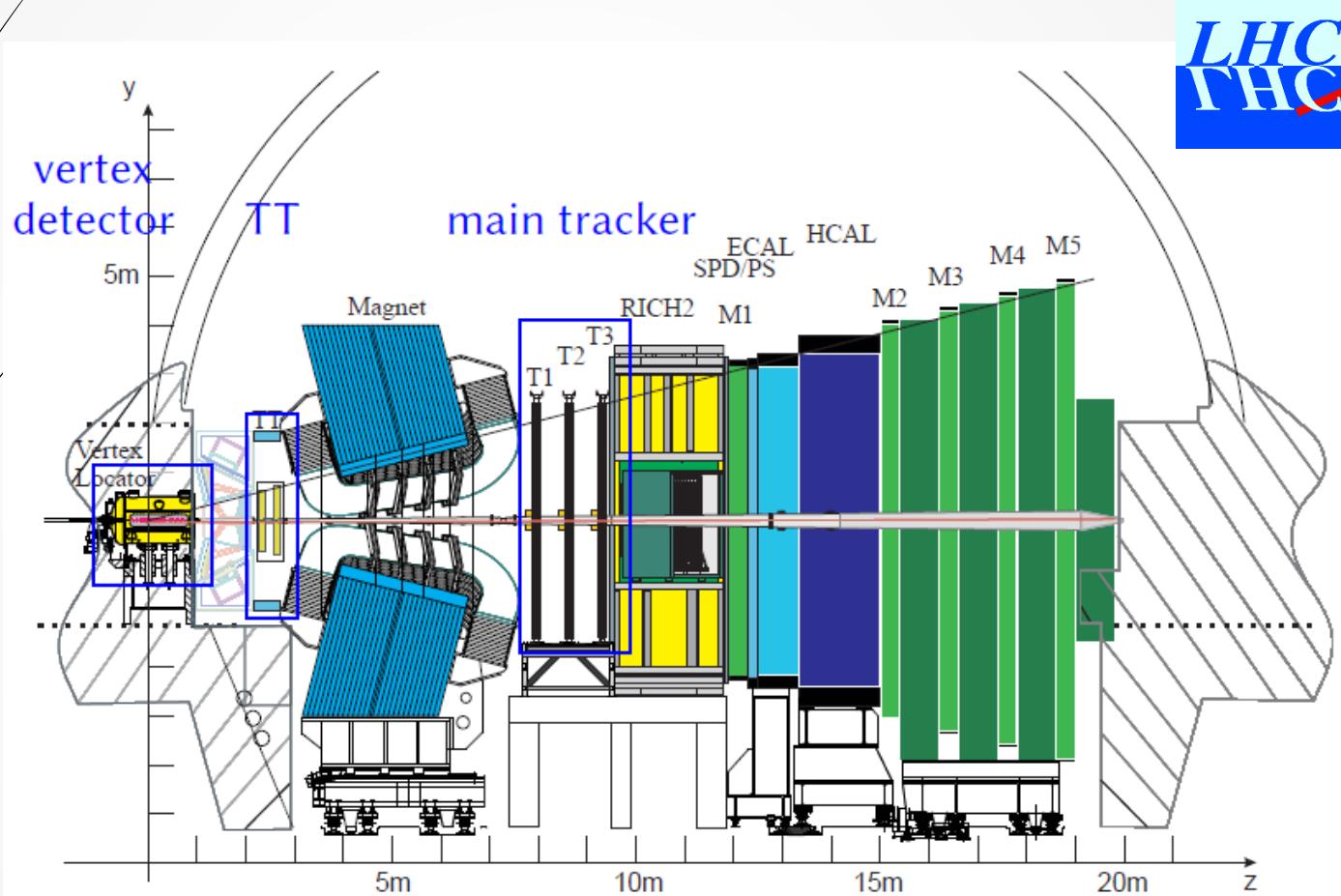
Eksperymenty (IV)



Eksperymenty FWE



LHCb
FHCb

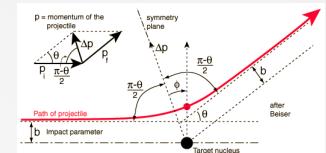
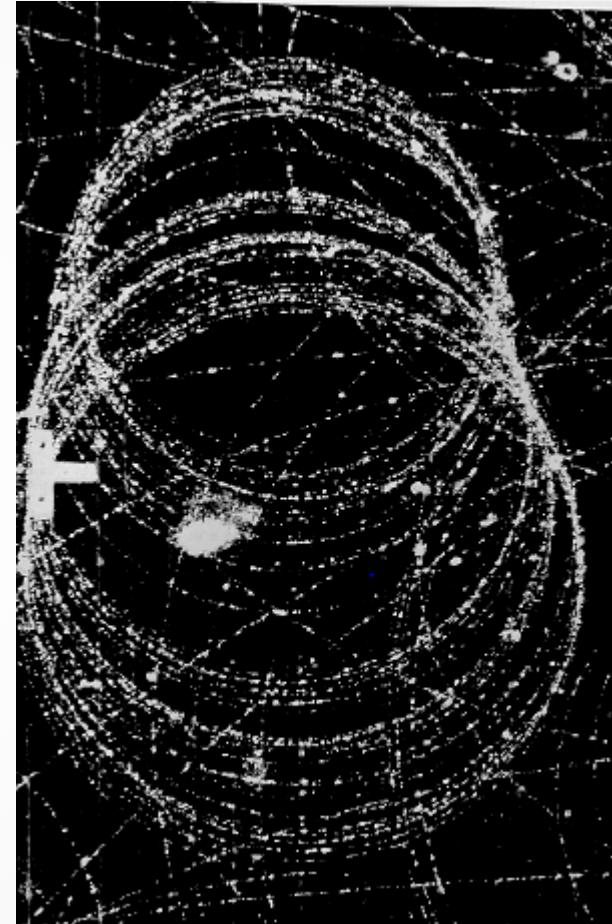


Układy śladowe (I)

- ❑ **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

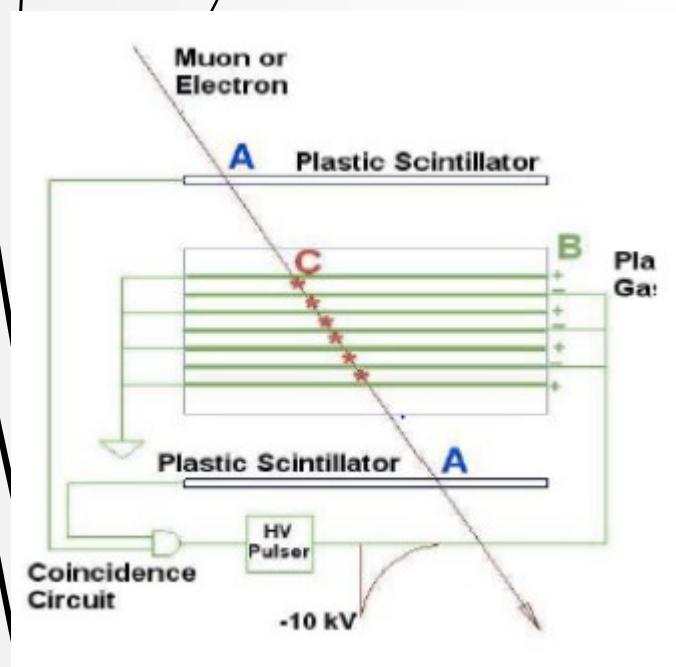
Elektron w polu magnetycznym (1940).

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

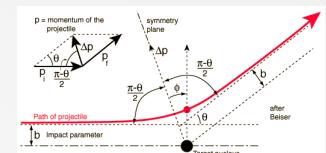
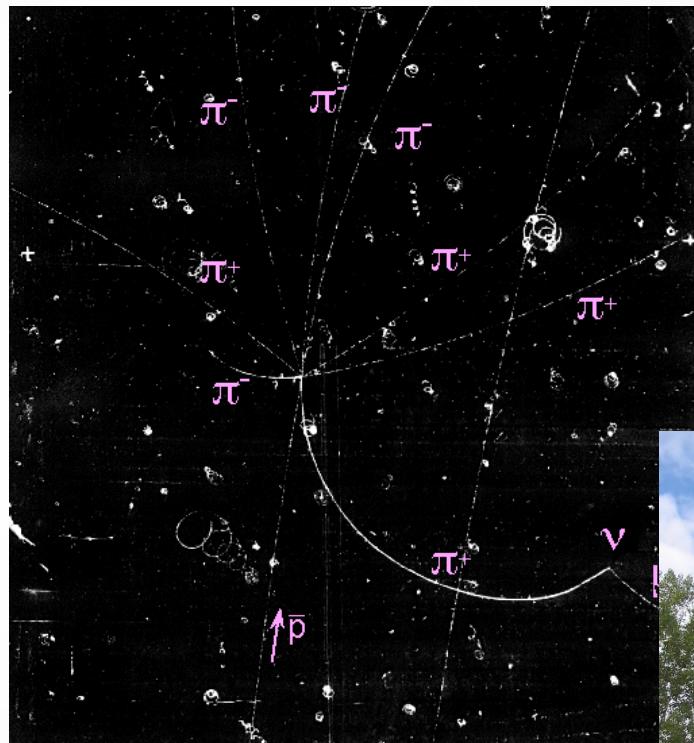


Układy śladowe (I)

Komora iskrowa (~1960)

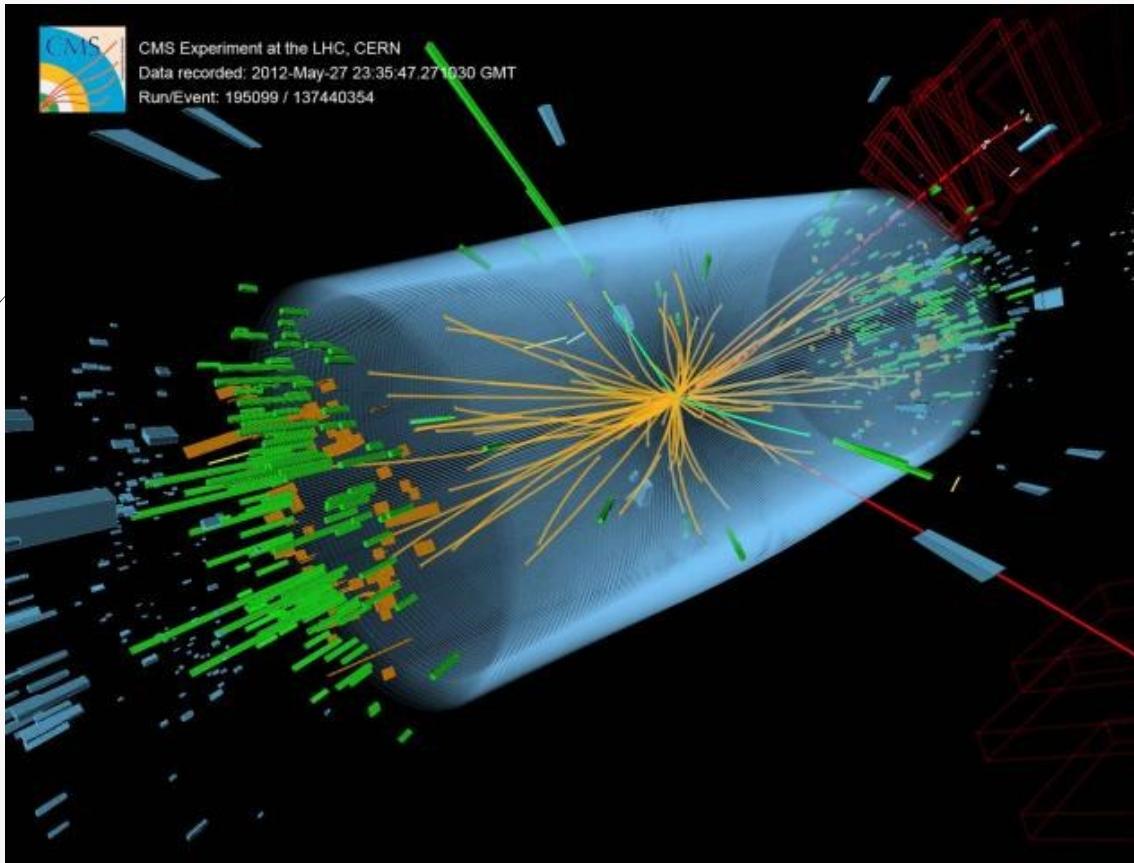
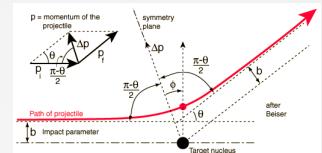


Komora pęcherzykowa

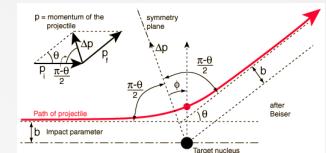


19

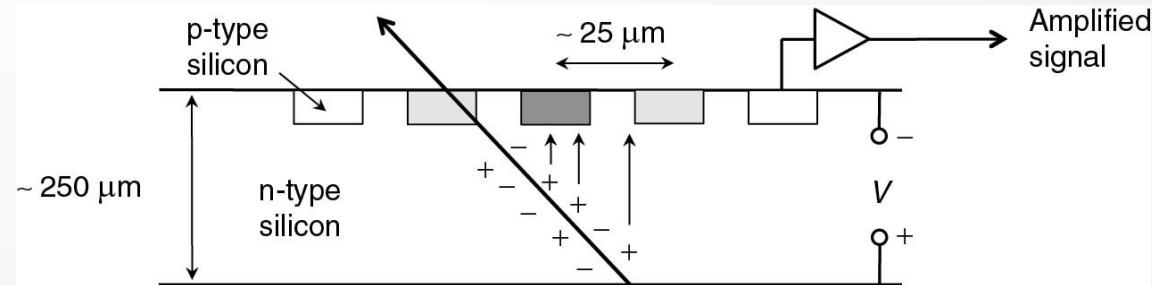
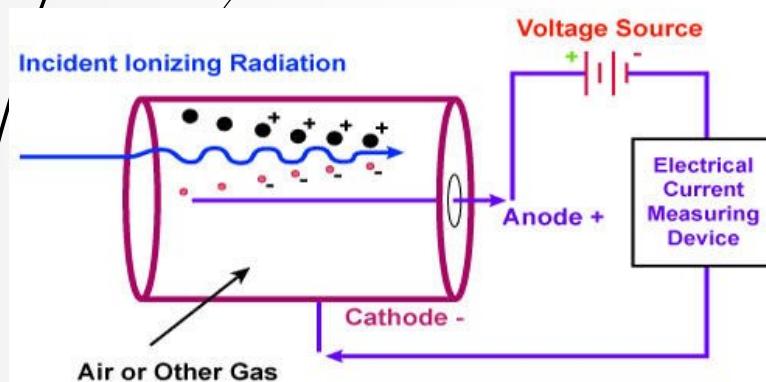
Układy śladowe (2010)



Układy śladowe (I)

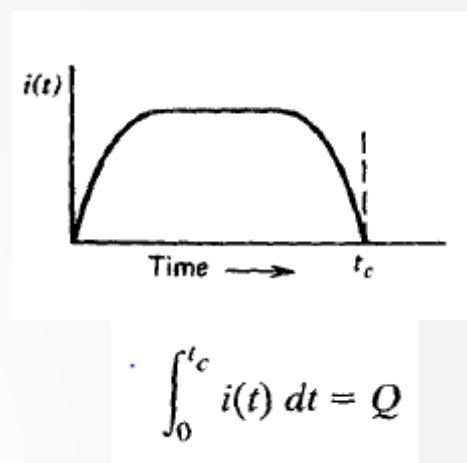


- Do pomiaru pozycji używa się głównie detektorów **gazowych** oraz **półprzewodnikowych** (mikro-paskowe lub pikselowe)
- Zasada detekcji oraz rekonstrukcji położenia praktycznie jednakowa – komory jonizacyjne
- Fizyka oddziaływania inna – detektory krzemowe oferują znacznie większą amplitudę generowanego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



Model detektora

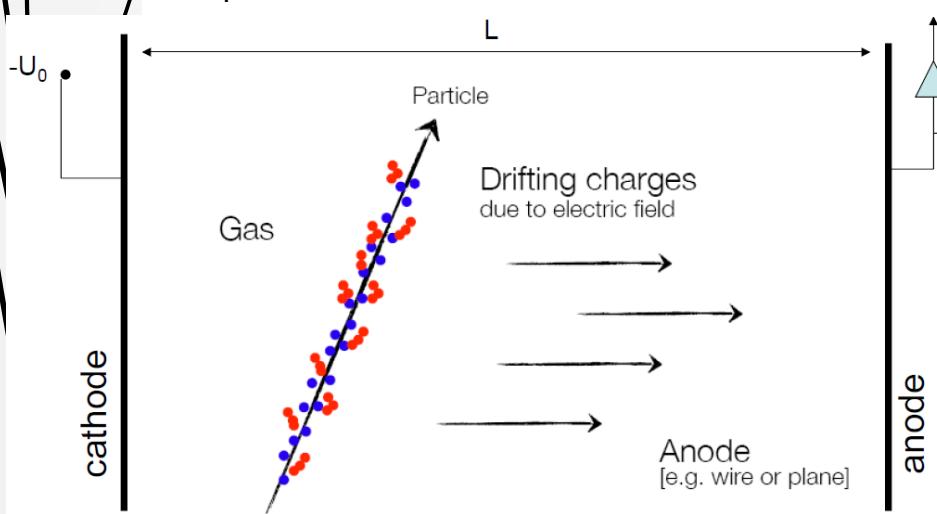
- Detektor ma za zadanie zbierać ładunek.
- Od jego powstania do końca.. czasu zbierania.
- W każdym typie detektora użytecznym parametrem jest całkowita liczba jonów wytworzona przez przechodzące promieniowanie.
- Problem powstanie, gdy jest dużo przechodzących cząstek, sygnały się nałożą.
- Problemem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



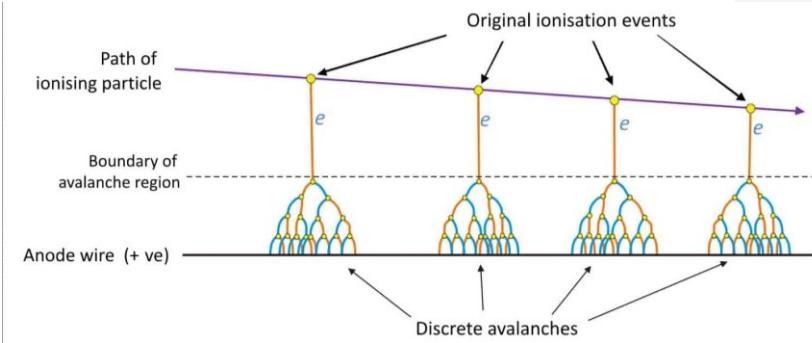
Dzisiaj omówię pokrótce dwa typy detektorów:
gazowy i półprzewodnikowy.

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 wtórnego. 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 są powielane.

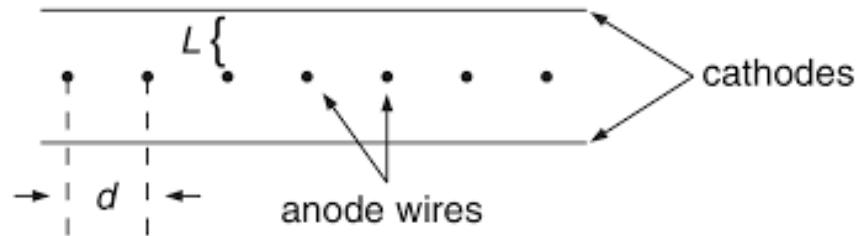


- Primary Ionization
- Secondary Ionization (due to δ -electrons)



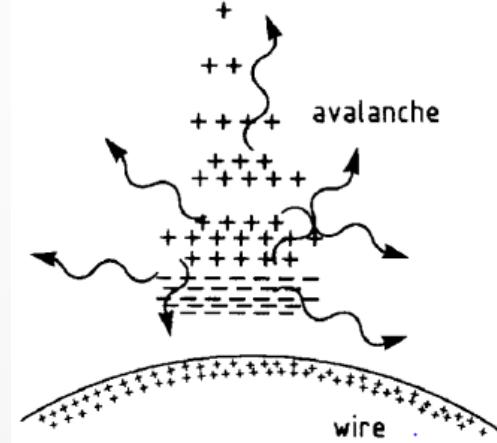
Sygnal

- Sygnał 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



$$v_{de} \approx cm/\mu s$$

$$v_{djon} \approx cm/ms$$



Wzmocnienia gazowe

Ionization mode:

- full charge collection
- no multiplication; gain ≈ 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:

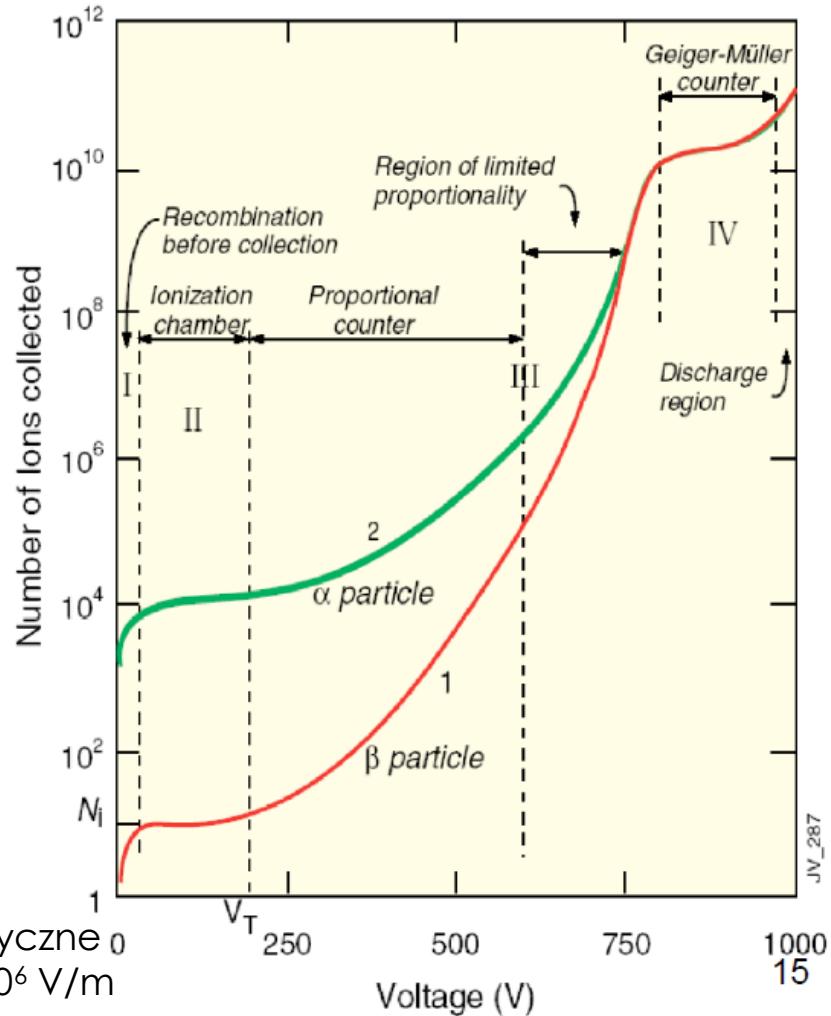
[saturated, streamer]

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

Geiger mode:

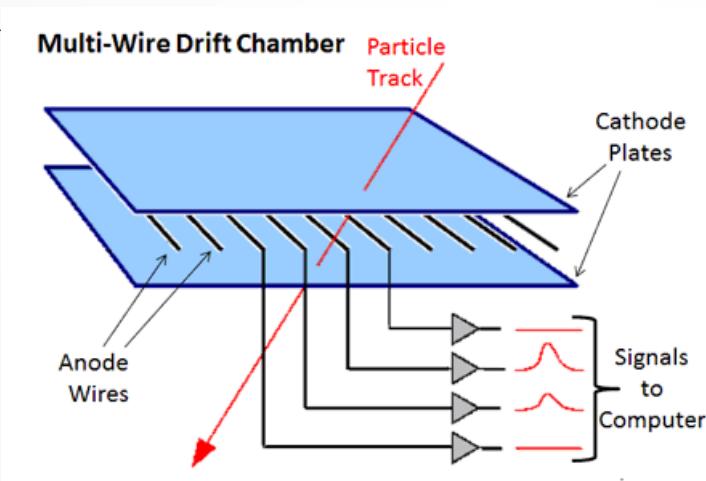
- massive photoemission;
- full length of the anode wire affected;
- discharge stopped by HV cut

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

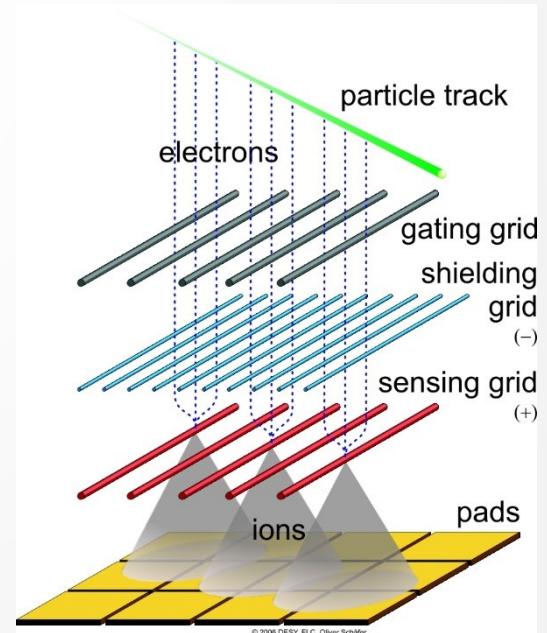
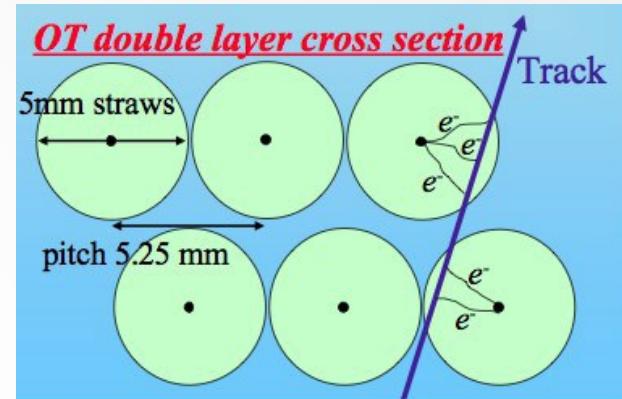


Detektory słomkowe

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

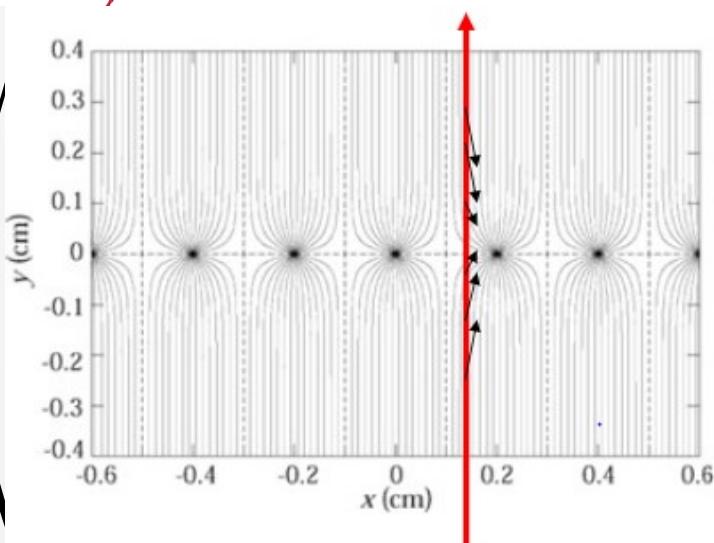
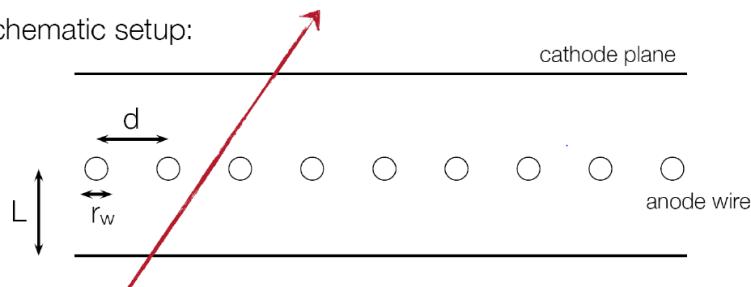


- ❑ Lub nawet usunąć i płaszczyzny....

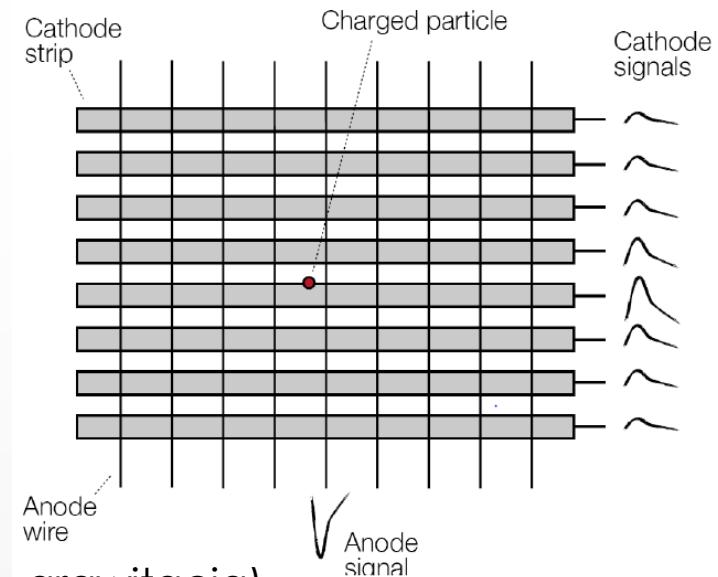
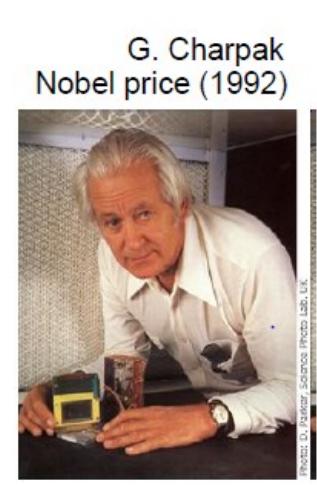


Komora wielodrutowa (MWPC)

Schematic setup:



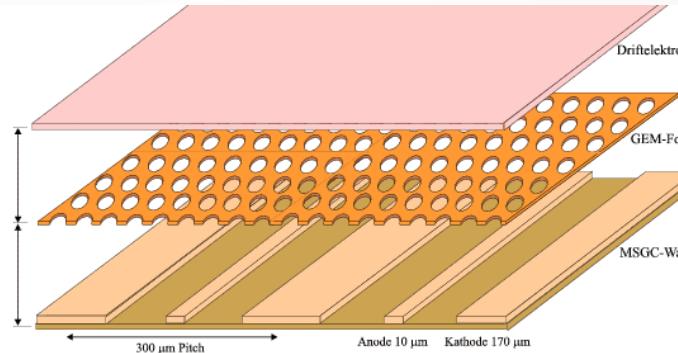
- Elektrony dryfują do najbliższego drutu.
- Powielanie jest tylko w pobliżu anody,
- Sygnał jest generowany przez elektrony, ale głównie pochodzi z **powolnych JONÓW** rozdzielcość czasowa ok. 10 ns,



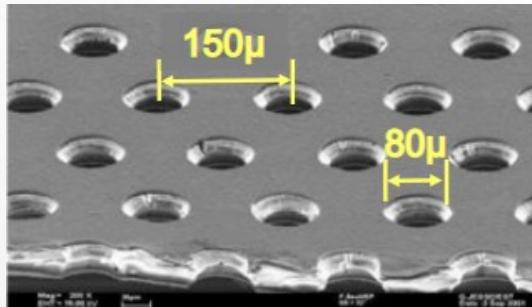
- Druty stanowią tu ograniczenia (starzenie, grawitacja), konstrukcja droga i mało użyteczna do szybkich sygnałów

Micro-strip gas chambers (MSGC)

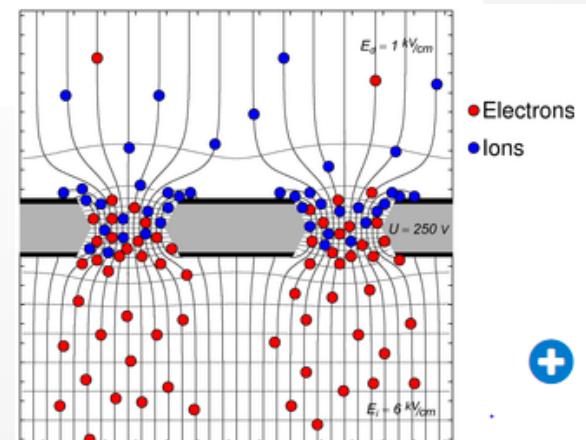
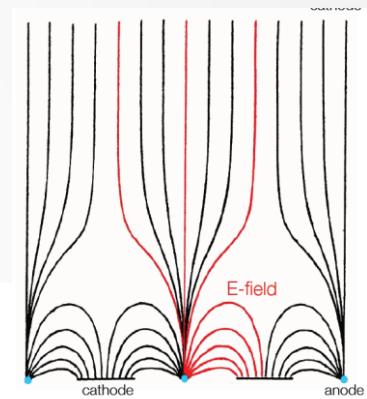
- Zamiast drutów-mikrostruktury, poprawiają rezolucję przestrzenną
- Powielanie lawinowe w niewielkim obszarze



- GEM (Gas Electron Multiplier):
 - wytrawiane otwory o średnicy 100-200 μm w specjalnej metalizowanej folii.
 - Powielanie lawinowe tylko w pobliżu otworów
 - Dryft elektronów do anody,
 - Sygnał głównie od jonów.

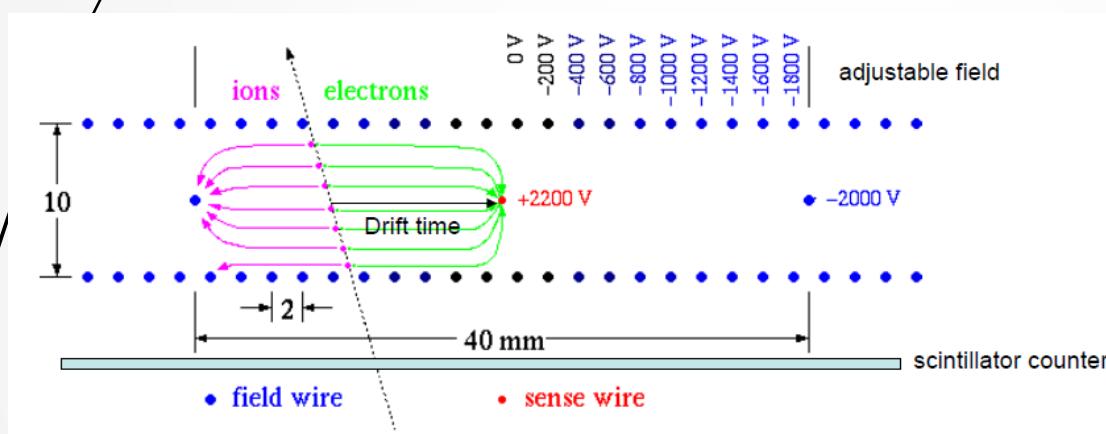


- Problem z niejednorodością pola

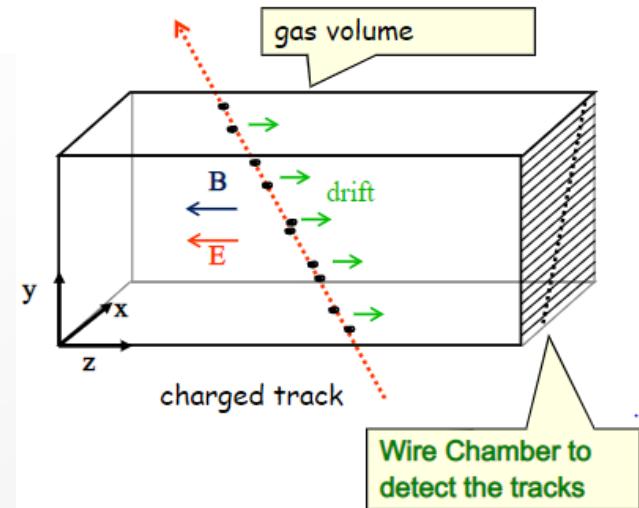


Komory dryfowe

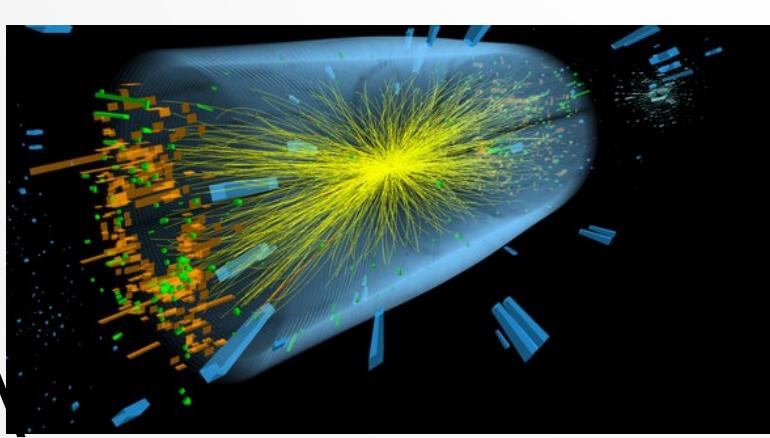
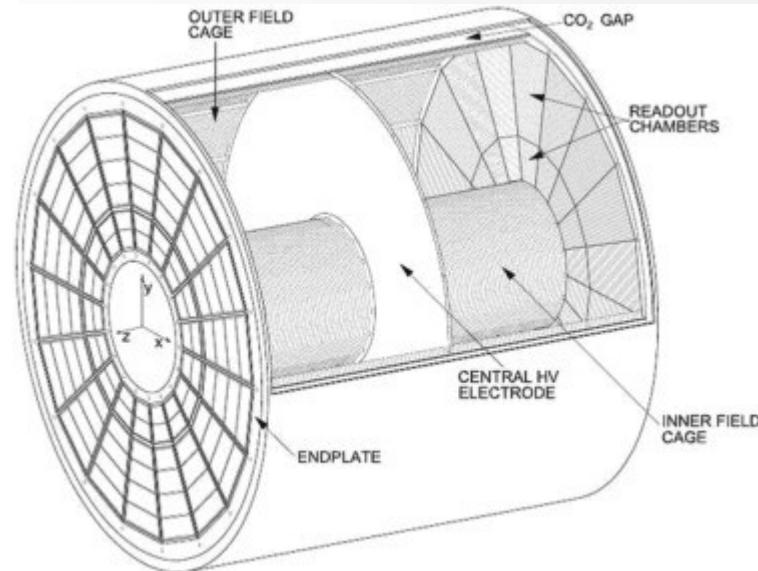
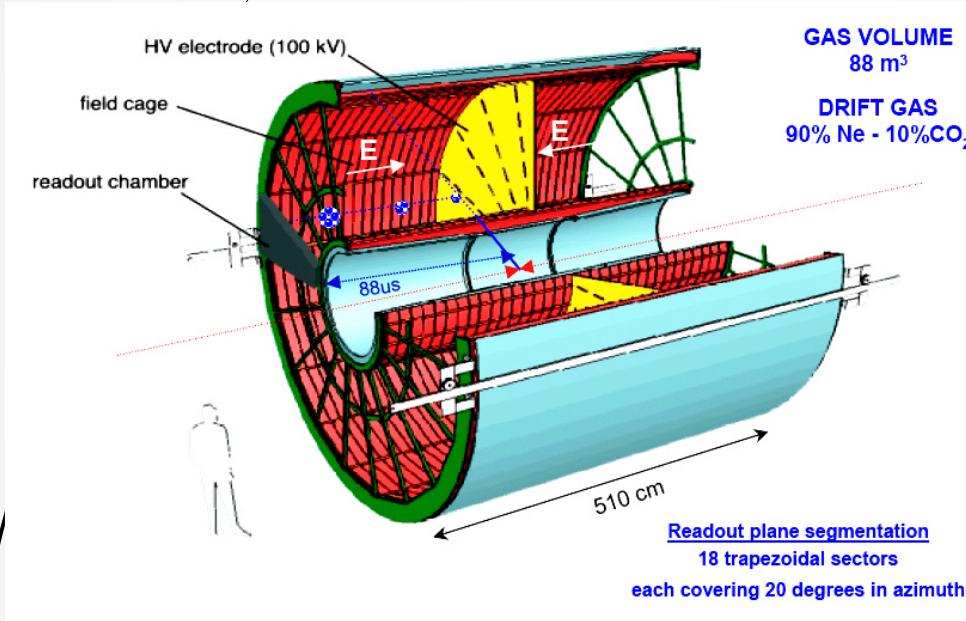
- Można też skonstruować detektor mierzący położenie w oparciu o pomiar czasu dryfu w stosunku do zewnętrznego sygnału (np. scyntylatora).



- W komorze dryfowej często jest również pole magnetyczne.



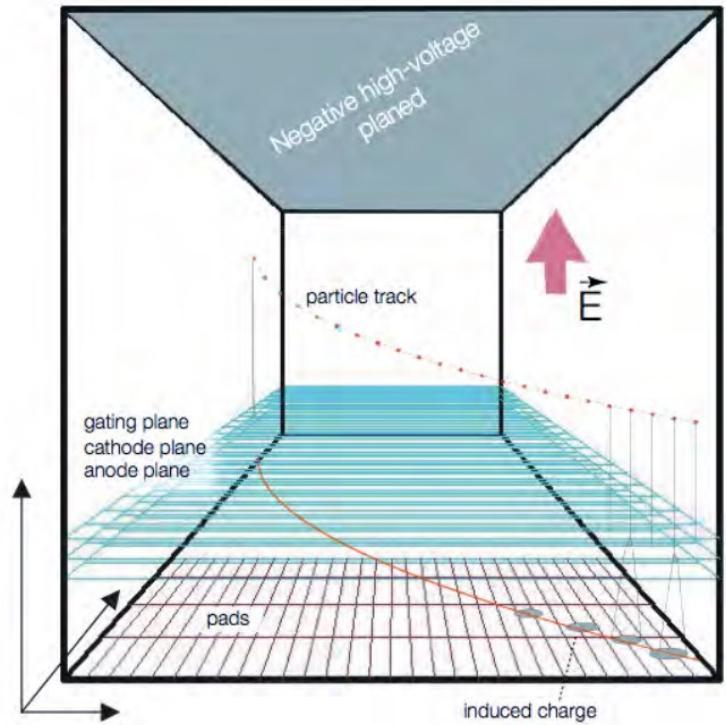
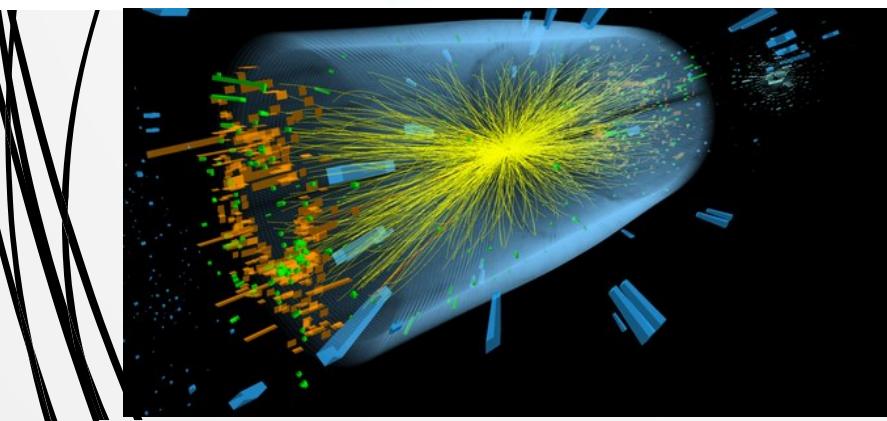
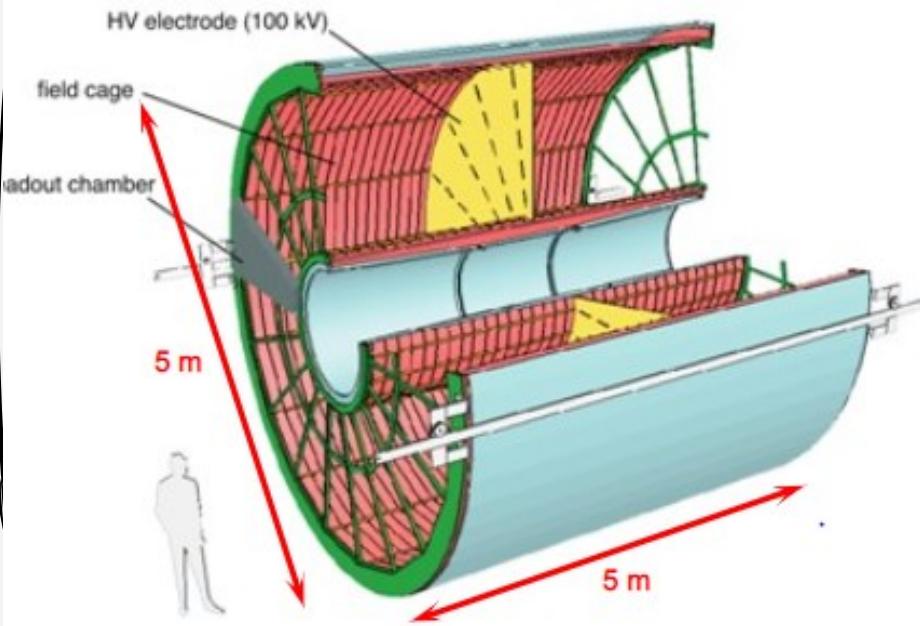
Duuże komory dryfowe



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

30

Duuże komory dryfowe (ALICE)



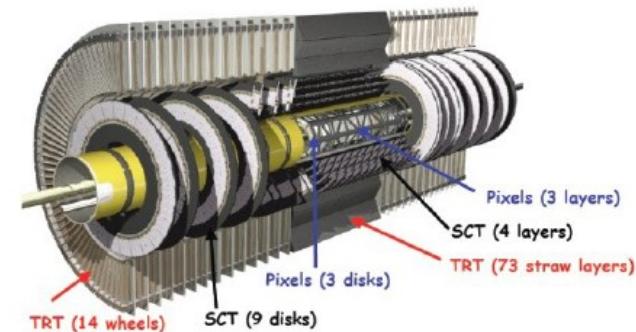
pomiar dE/dx umożliwia:
wyznaczenie trajektorii cząstki,
Identyfikację,
Rezolucja: $z, y \sim mm$, $x \sim 150 - 300 \mu m$

Detektory półprzewodnikowe

ATLAS

Strips: 61 m^2 of silicon, 4088 modules, 6×10^6 channels

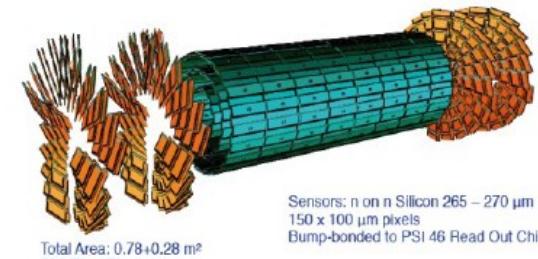
Pixels: 1744 modules, 80×10^6 channels



CMS

the world largest silicon tracker
 200 m^2 of strip sensors (single sided)
 11×10^6 readout channels

$\sim 1 \text{ m}^2$ of pixel sensors, 60×10^6 channels

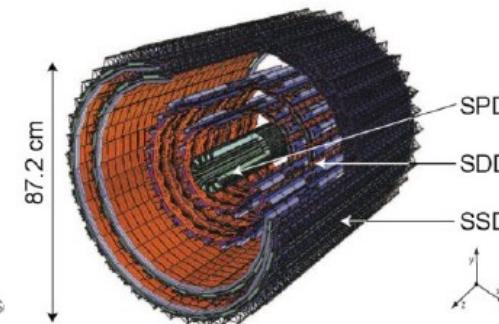


ALICE

Pixel sensors
Drift detectors
Double sided strip detectors

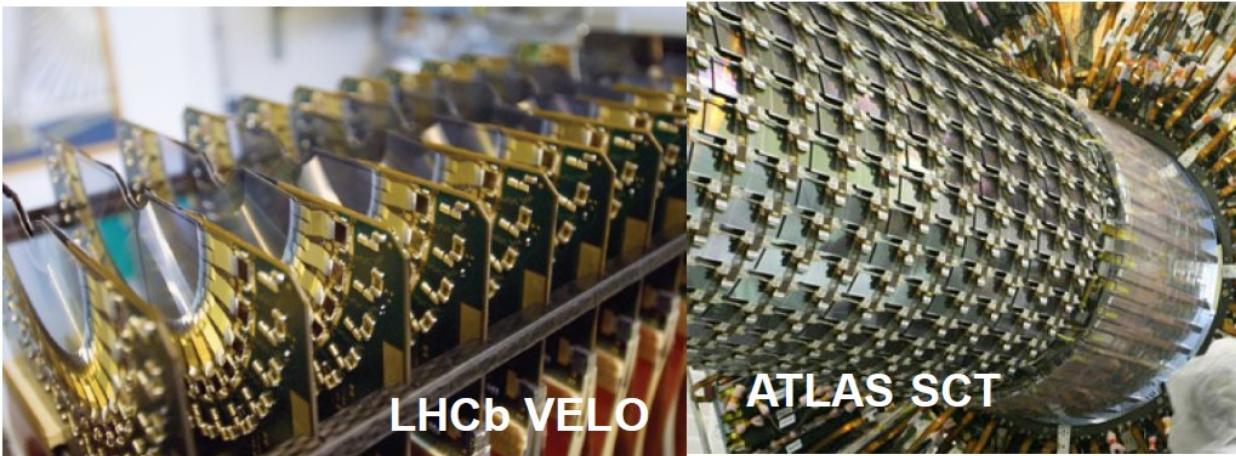
LHCb

VELO: Si Strips



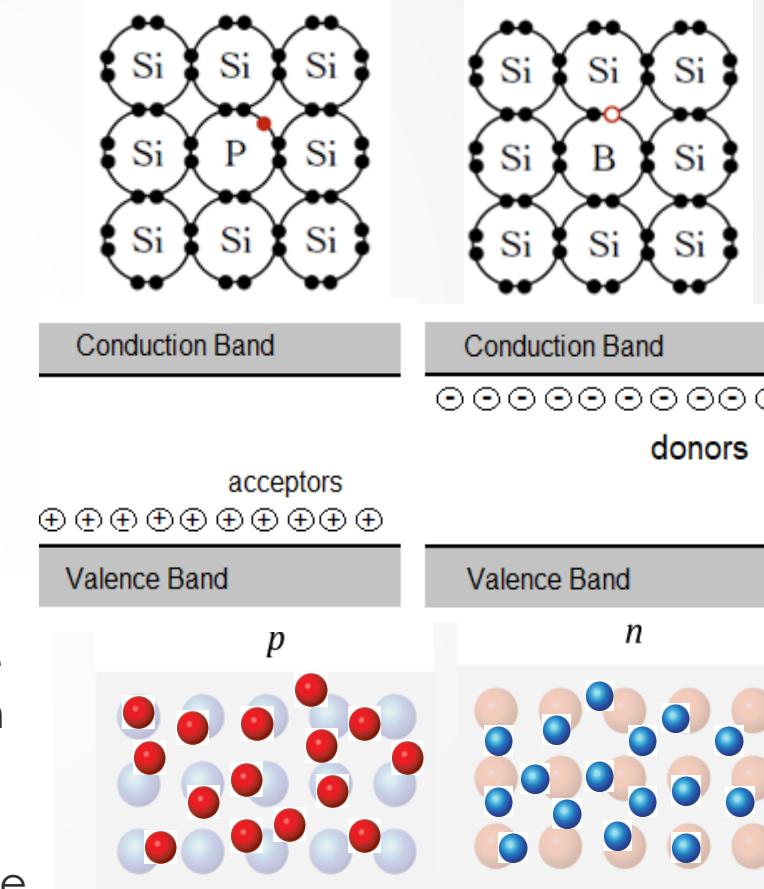
Detektory półprzewodnikowe

- 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.



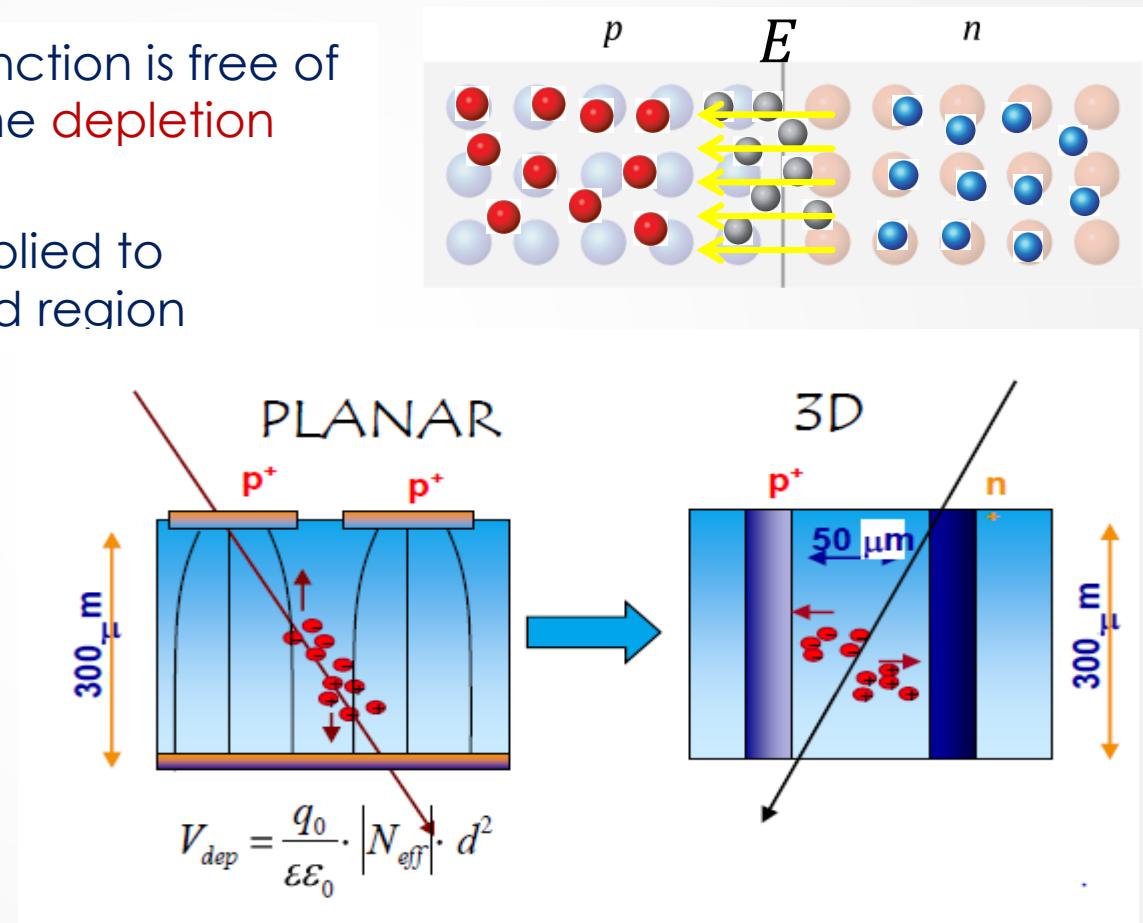
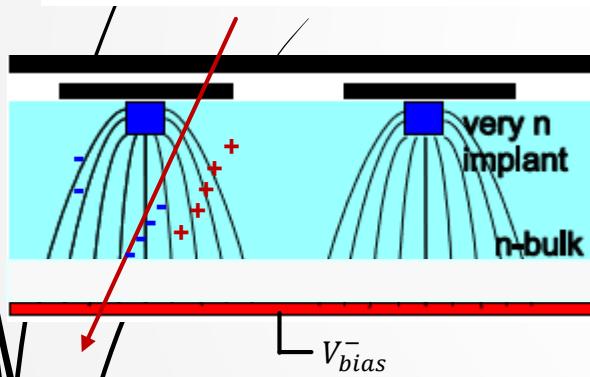
Detektory krzemowe

- 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.



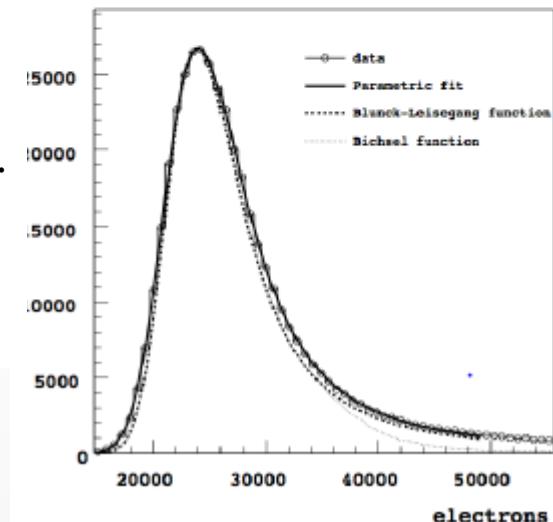
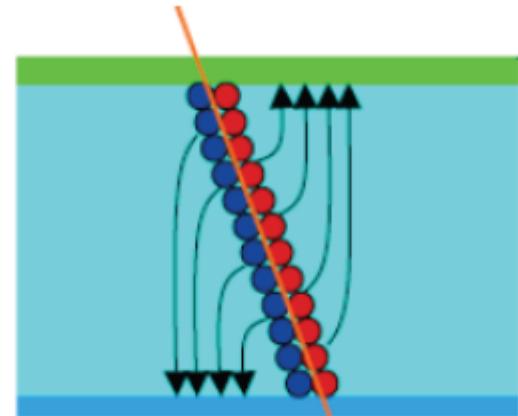
Detektory krzemowe

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

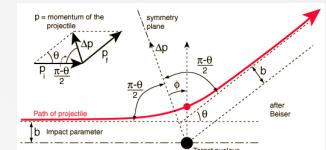


Detektory krzemowe

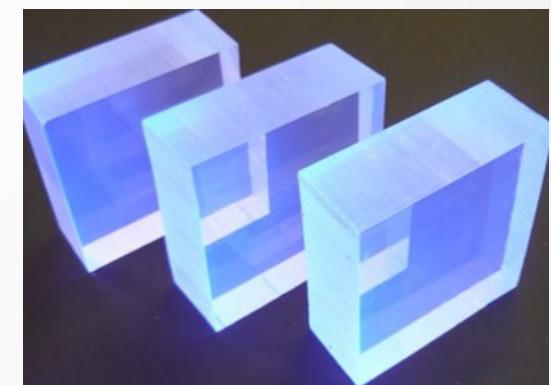
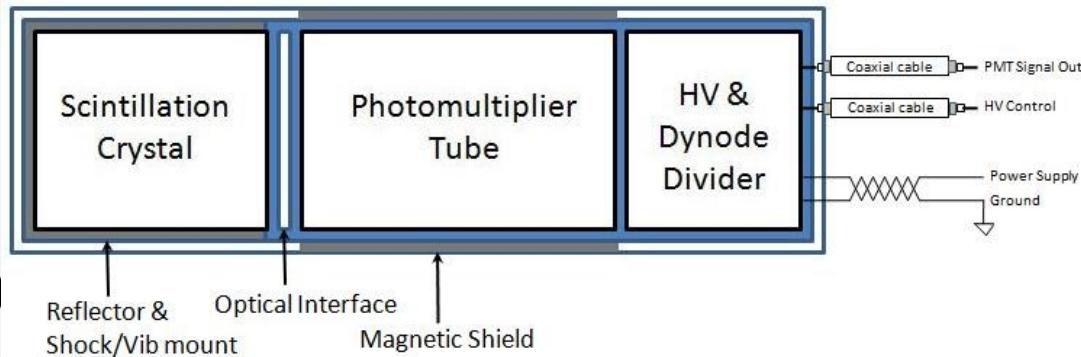
- Sygnał z detektorów krzemowych zależy od szerokości strefy zubożenia.
- Średnia strata energii MIP to 3.87 MeV/cm
- Rozkład Landaua i MPV = 0.7 max
- Dla $300 \mu\text{m}$ sensora, MPV to ok. 23 400 par e/h.
- Szum w detektorach krzemowych zależy od wielu parametrów: geometrii, napięcia, elektroniki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



Scyntylatory



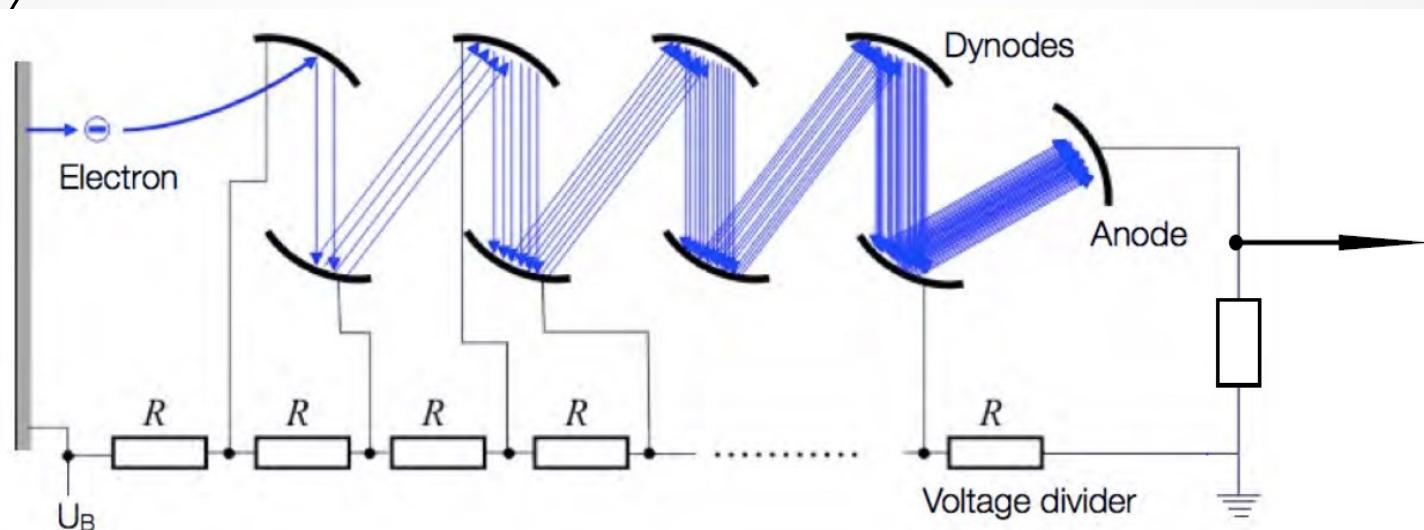
- Bardzo popularne detektory do detekcji przejścia cząstek naładowanych
 - Ograniczona czułość dotycząca krotności
 - Niezwykle użyteczne, gdy **nie potrzebna** jest **dokładna** informacja dotycząca **położenia cząstek**
 - Również użyteczne w budowaniu układów koincydencyjnych
- Materiały scyntylacyjne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



Fotopowielacze



- Detektory światła
- Fotony są absorbowane na fotokatodzie, wybito 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



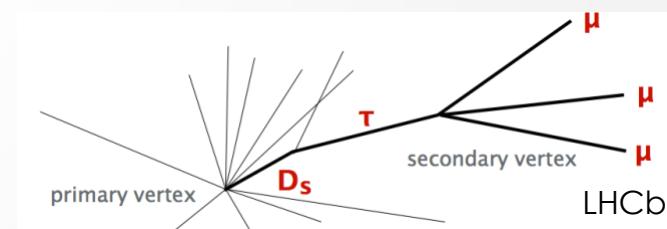
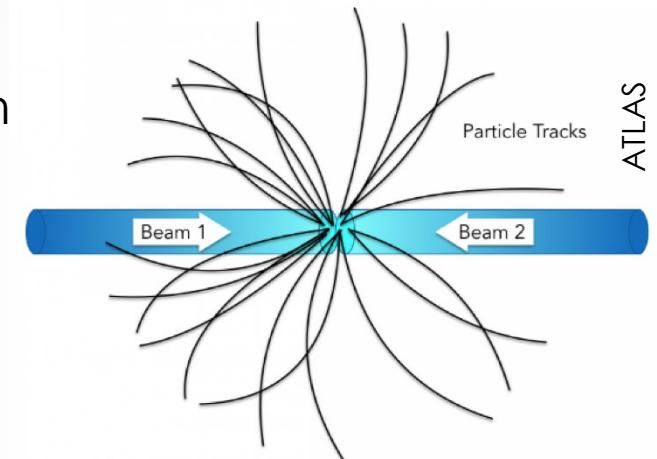
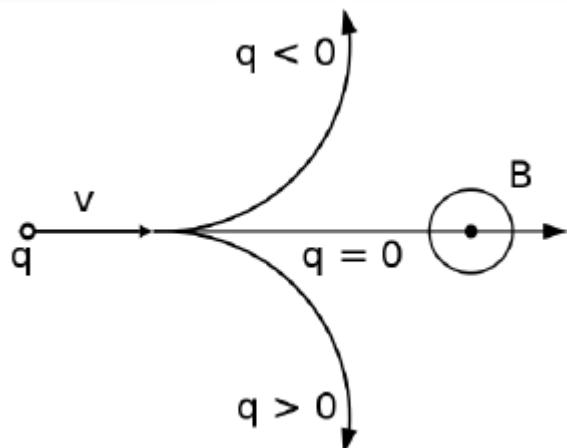
Układy śladowe i wierzchołki

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

Pomiar pędu w polu magnetycznym

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

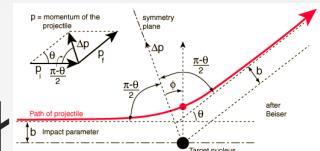
$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$



ATLAS

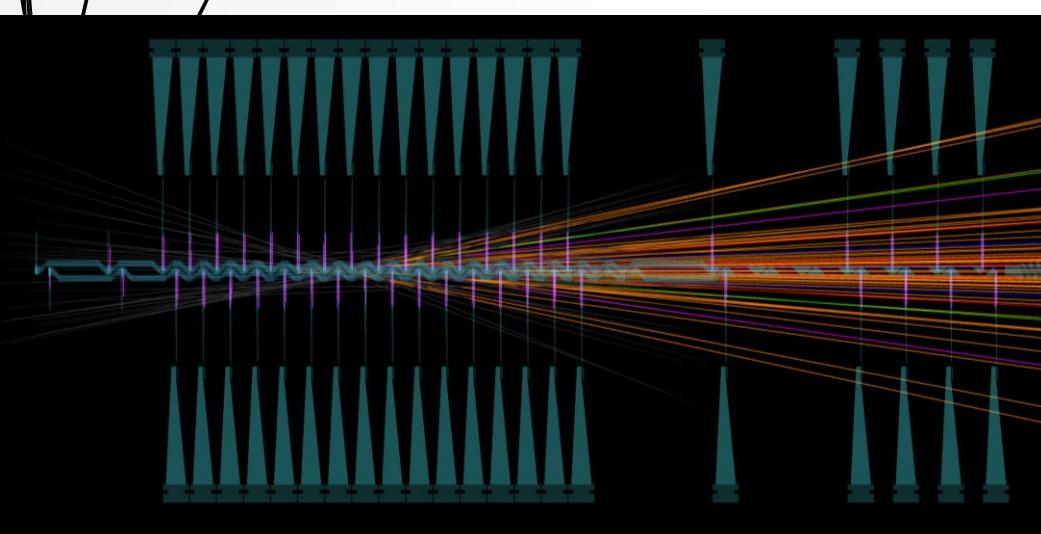
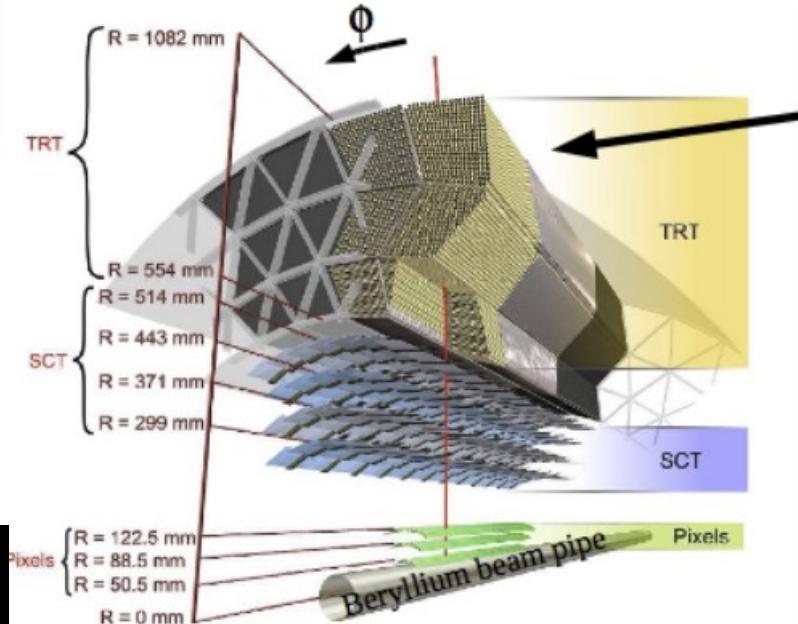
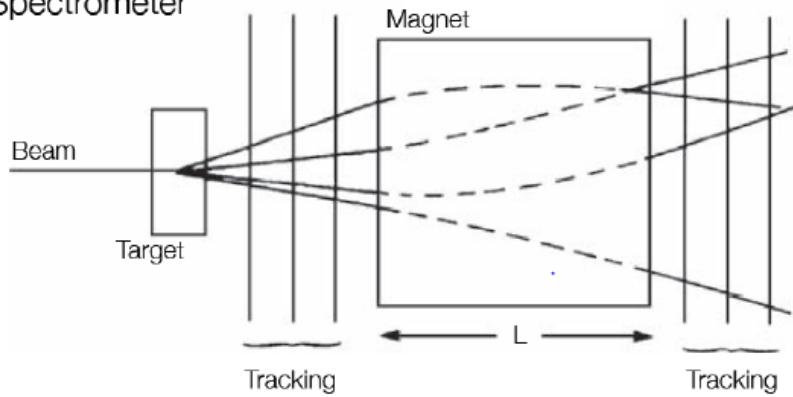
LHCb

Układy śladowe i wierzchołek



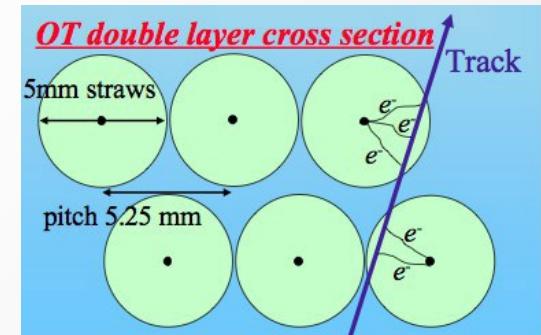
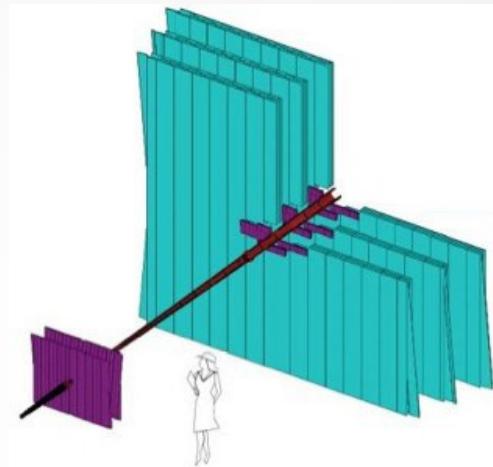
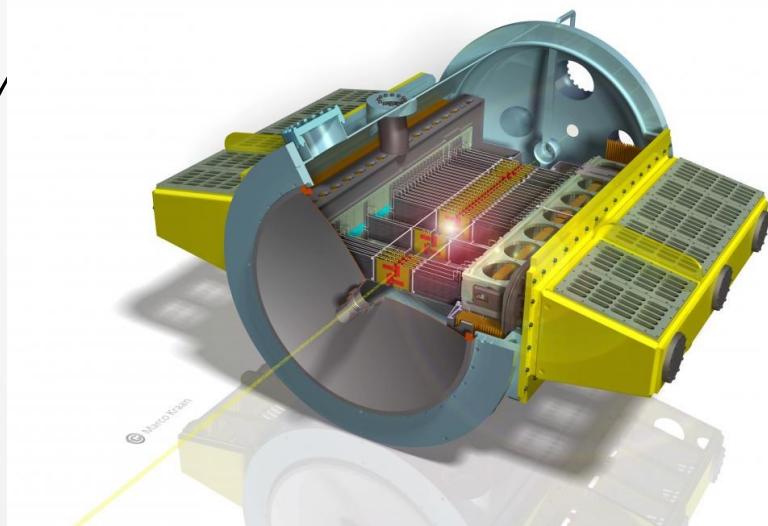
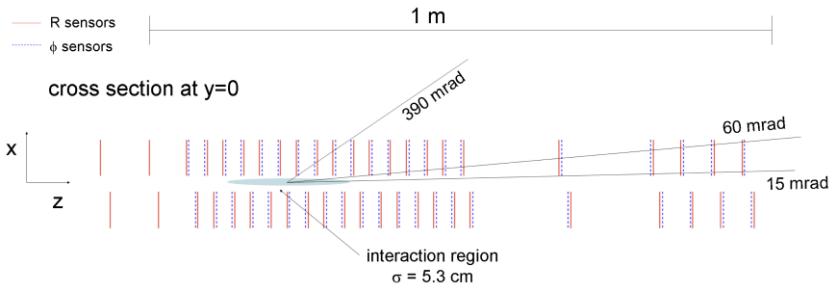
Praktycznie zawsze stosowane są warstwy detektorów

Schematics of a Spectrometer

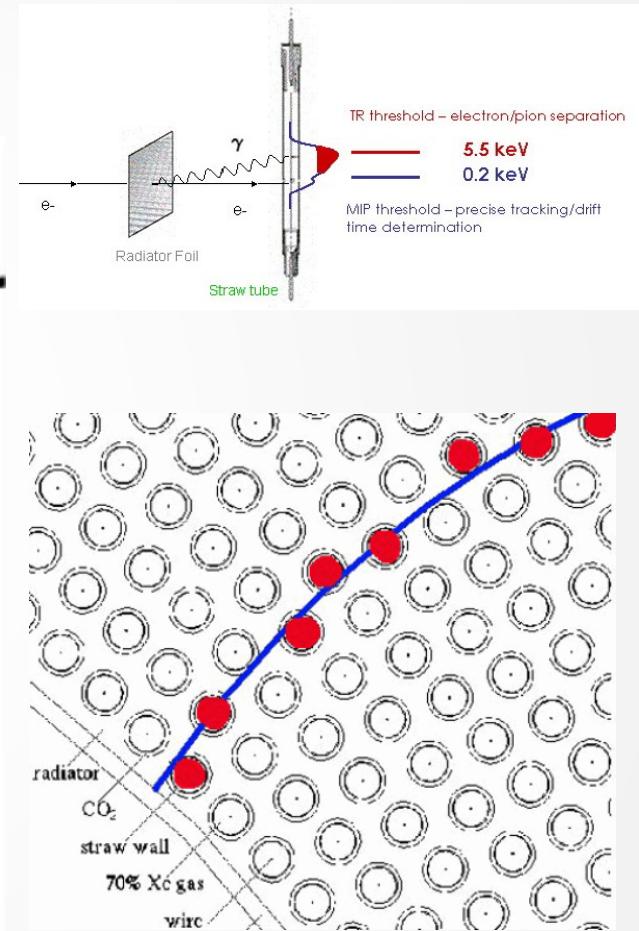
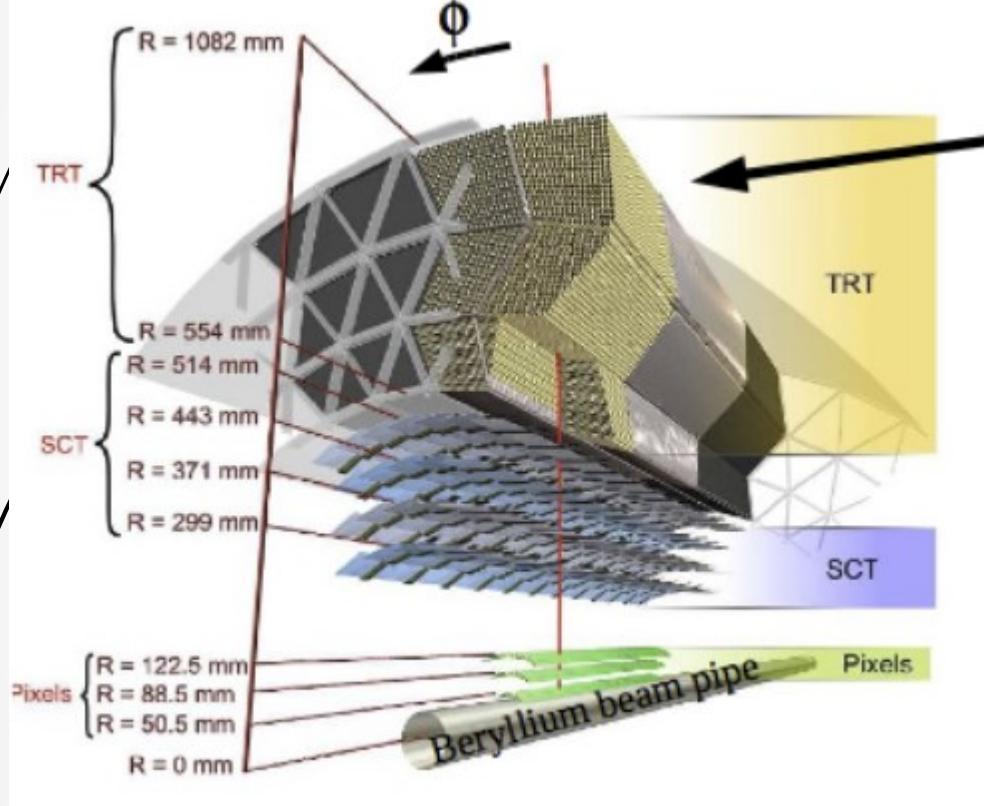


40

Układy śladowe (II)



Układy śladowe (III)



Atlas TRT – Transition Radiation Tracker