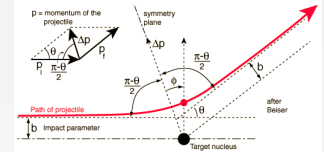


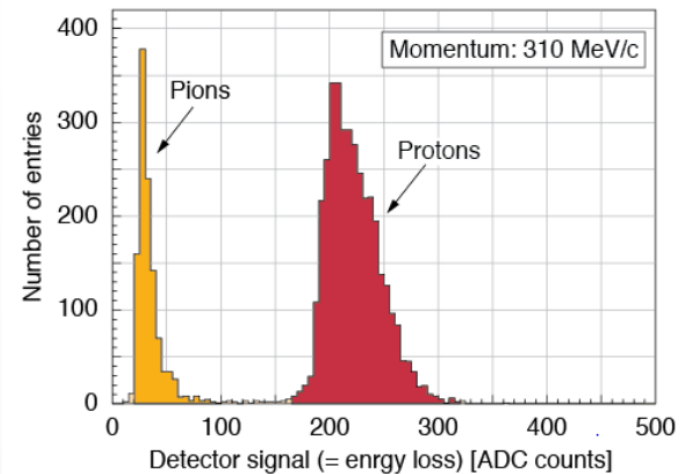
Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Pomiary jonizacji

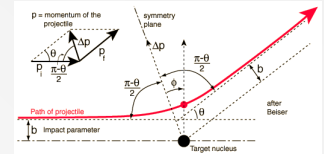


- ❑ Nasze piękne równania opisujące straty jonizacyjne mogą zostać użyte do wyznaczenia **średniej** liczby par **jon-elektron** generowanych na drodze cząstki jonizującej
- ❑ **UWAGA** – należy zawsze używać sformułowań jak poniżej
 - ❑ Cząstka naładowana deponuje energię (nie ładunek!!)
 - ❑ Deponowanie 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

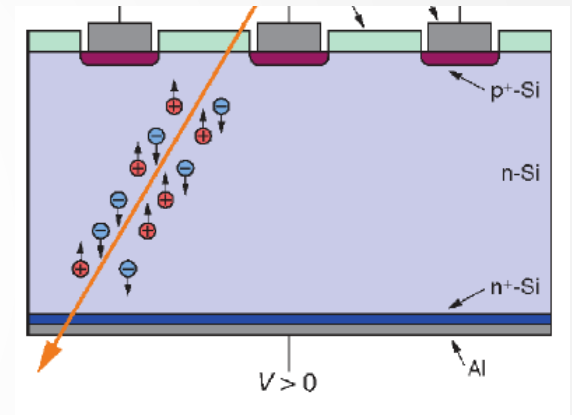


- ❑ W praktyce rozpatrujemy **dwa typy detektorów**, które wykorzystujemy do „pomiarów jonizacji”: **materiał czynny**, w którym dochodzi do jonizacji może być:

- Gazem
- Ciałem stałym (solid-state)

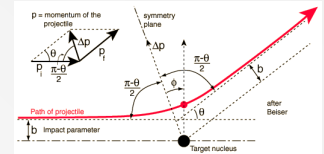
- ❑ Całkowita jonizacja, N_T , (liczba par nośników, które zostały wygenerowane) wynosi:

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



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

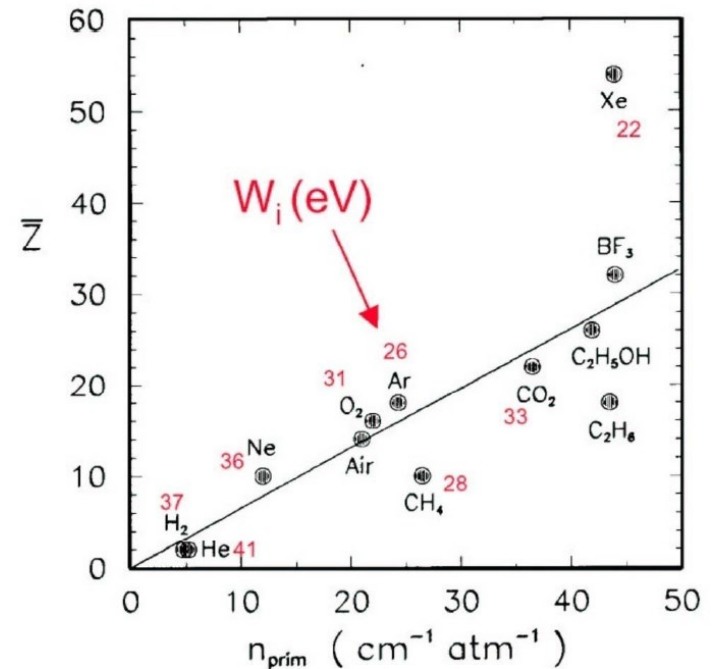
Jonizacja pierwotna



Straty energii:

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

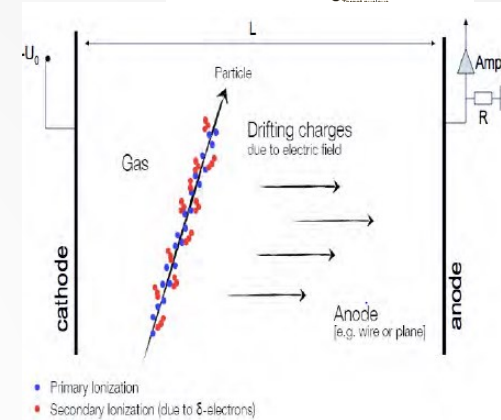
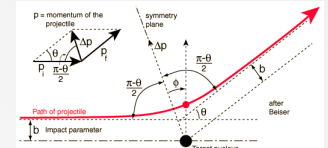
❑ Jonizacja pierwotna: naładowana cząstka wybija elektron z atomu, również wzbudzenia.



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

Jonizacja wtórna

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

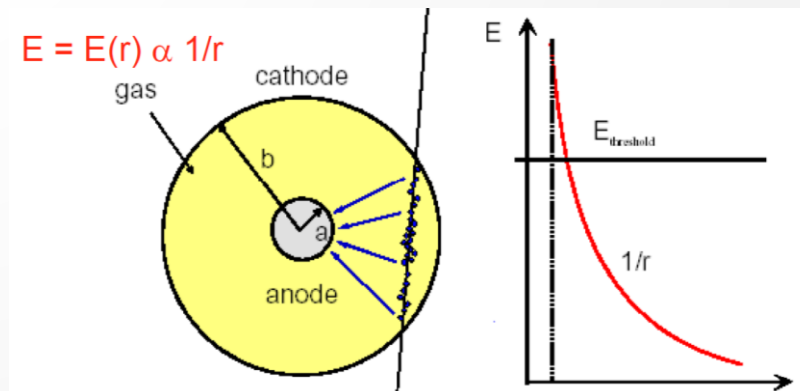


120 par elektron-jon wytworzy puls o amplitudzie:

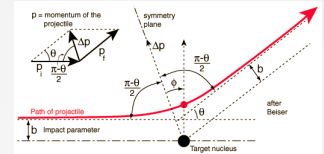
$$V = \frac{ne}{C} = 2 \text{ mV}, \text{ przy } C = 10 \text{ pF}.$$

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)



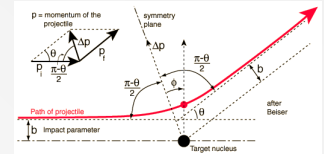
Jonizacja



- ❑ 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 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

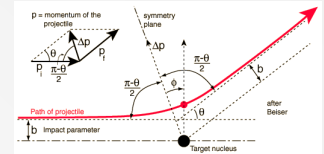


- ❑ Całkowita jonizacja, N_T , (liczba par nośników, które zostały wygenerowane) wynosi:

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

- ❑ 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:

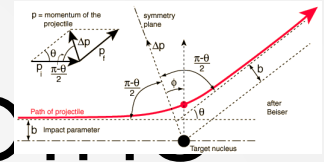
$$\sigma^2 = F \cdot \langle N \rangle$$

Absorber	F
Ar + 10% CH ₄	≈ 0.2
Si	0.12
Ge	0.13
GaAs	0.10
Diamond	0.08

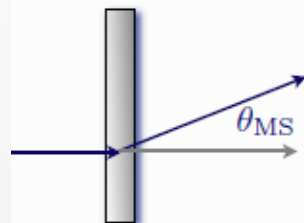
- ❑ Pamiętajmy ciągle o zdarzających się bardzo dużych stratach energii, zwłaszcza w cienkich absorberach (p. rozkład Landaua)

- ❑ **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

Rozpraszania wielokro



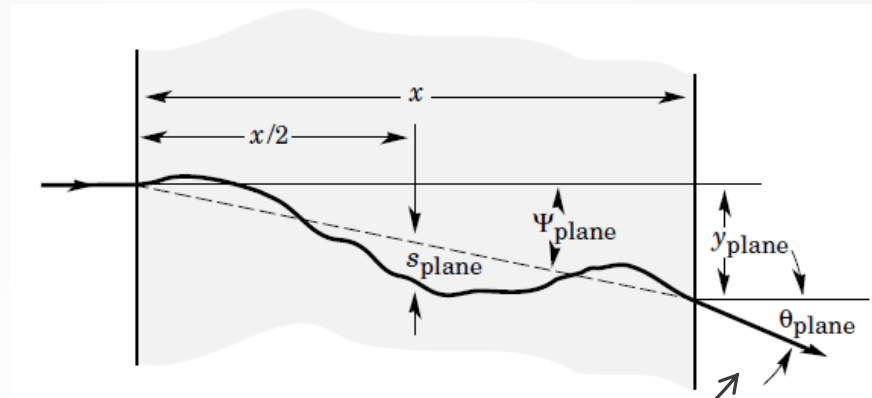
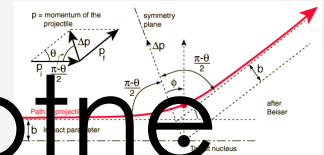
- ❑ To „koszmar” dla **detektorów pozycjo-czułych**!
- ❑ Naładowana cząstka przechodząc przez materię jest rozpraszana przez „Kolumbowski” **potencjał jądra** i innych elektronów (niewielki wpływ na cząstki ciężkie)
- ❑ Rozpraszanie **elastyczne** – nie obserwujemy **strat energii** cząstek jonizujących – **zmiany pędu**
- ❑ Głównie oddziaływanie typu **Coulomba** cząstka – jądro
 - ❑ Dla hadronów możliwy również wkład od oddziaływań silnych
- ❑ Cząstka podlega bardzo wielu zderzeniom z bardzo małym odchyleniem w każdym procesie (dlaczego?).
- ❑ Rozkład kąta rozproszenia jest gaussowski wokół $\theta = 0$



300 micron Si : RMS = 0.9 mrad / βp

1 mm Be : RMS = 0.8 mrad / βp

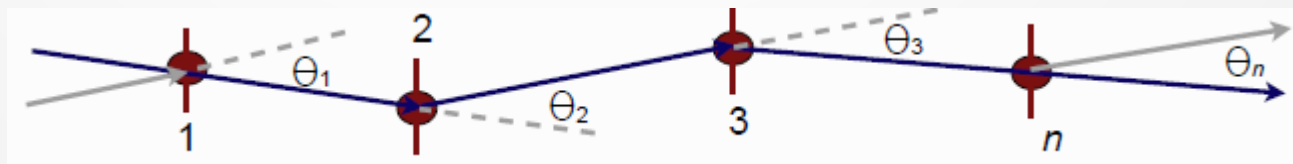
Rozpraszania wielokrotne



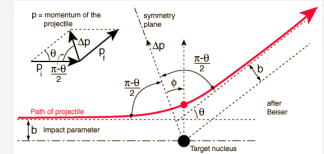
szerokość rozkładu kąta rozproszenia θ

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \cdot \ln \frac{x}{X_0} \right]$$

grubość medium rozpraszającego w jednostkach długości radiacyjnej X_0



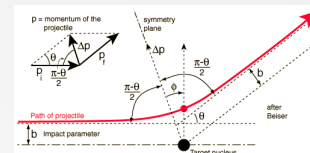
Co chcemy zrobić?



- ❑ 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 **saturacja** dla dużych strumieni cząstek związane z **czasem martwym**)
 - ❑ Pomiar energii (np. detektory krzemowe)
 - ❑ Pomiar położenia, trajektorii oraz pędu
 - ❑ Identyfikację 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

12

Małe i duże

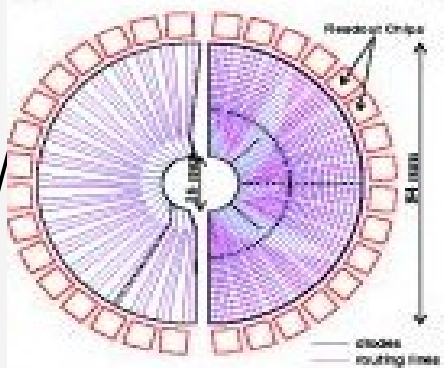


$$\sim O(a \cdot 10) \text{ cm}$$

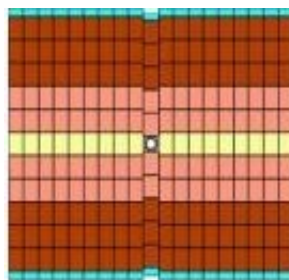


$$\sim O(a \cdot 10) \text{ cm}$$

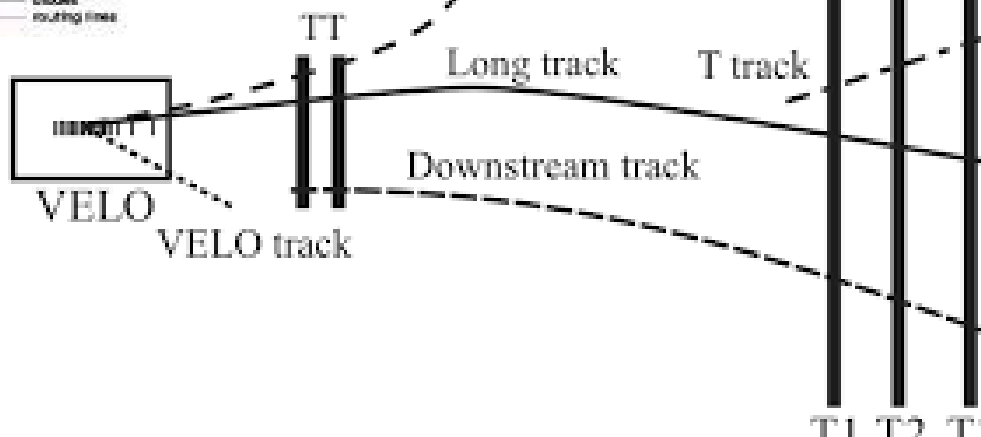
$$\sim O(10) \text{ cm}$$



$$\sim O(1) \text{ m}$$



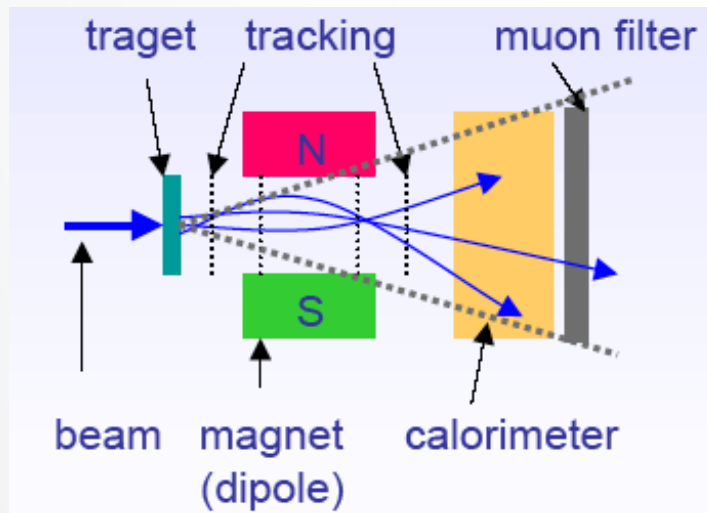
$$\sim O(a \cdot 1) \text{ m}$$



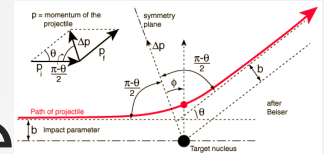
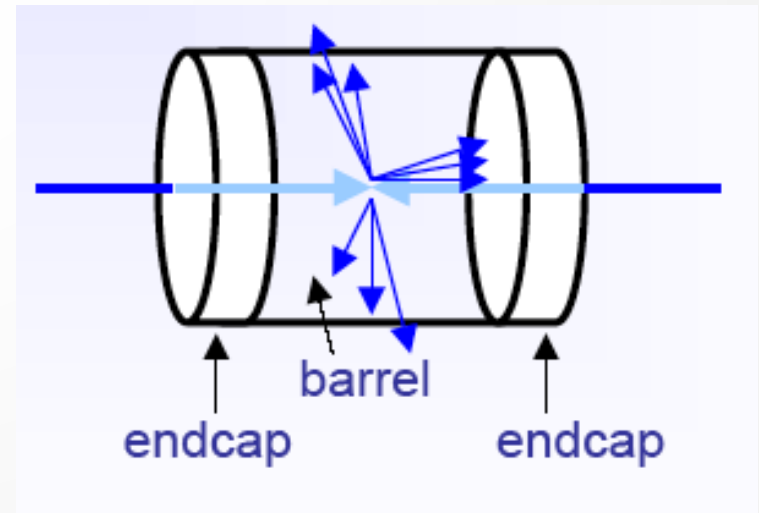
I bardzo skomplikowane

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

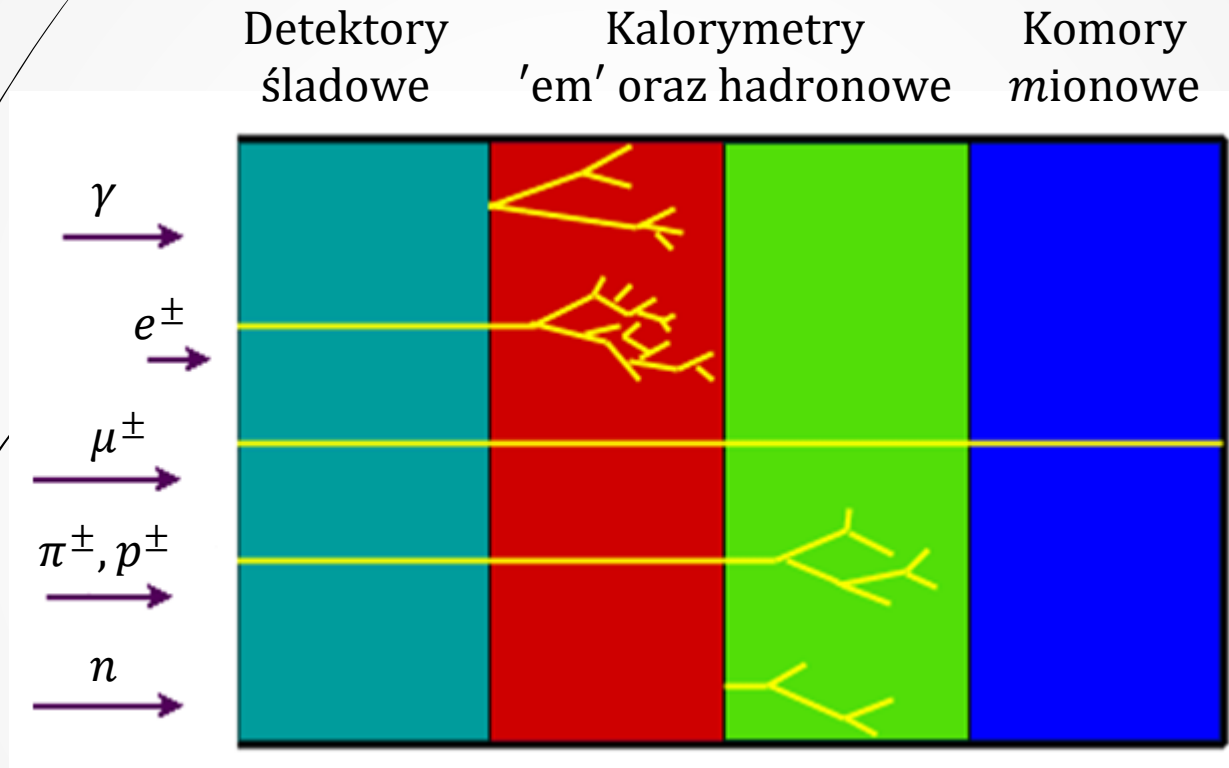
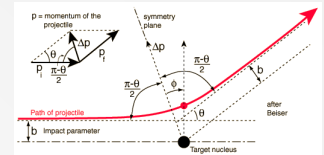
Geometria typu spektroskop



Geometria typu 4π



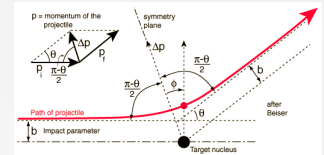
Eksperymenty FWE



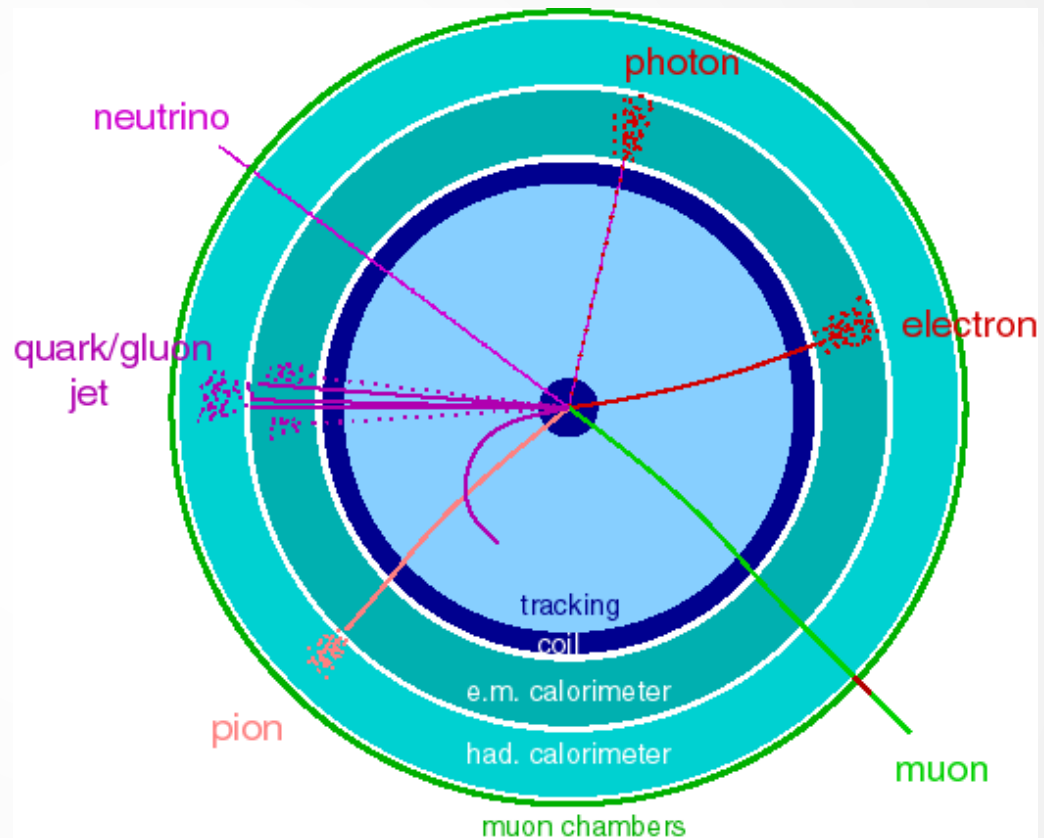
blisko źródła → daleko od źródła

- ❑ 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)



$p = \text{momentum of the projectile}$

θ

Δp

p_i

p_f

$\frac{\pi - \theta}{2}$

$\frac{\pi - \theta}{2}$

$\frac{\theta}{2}$

b

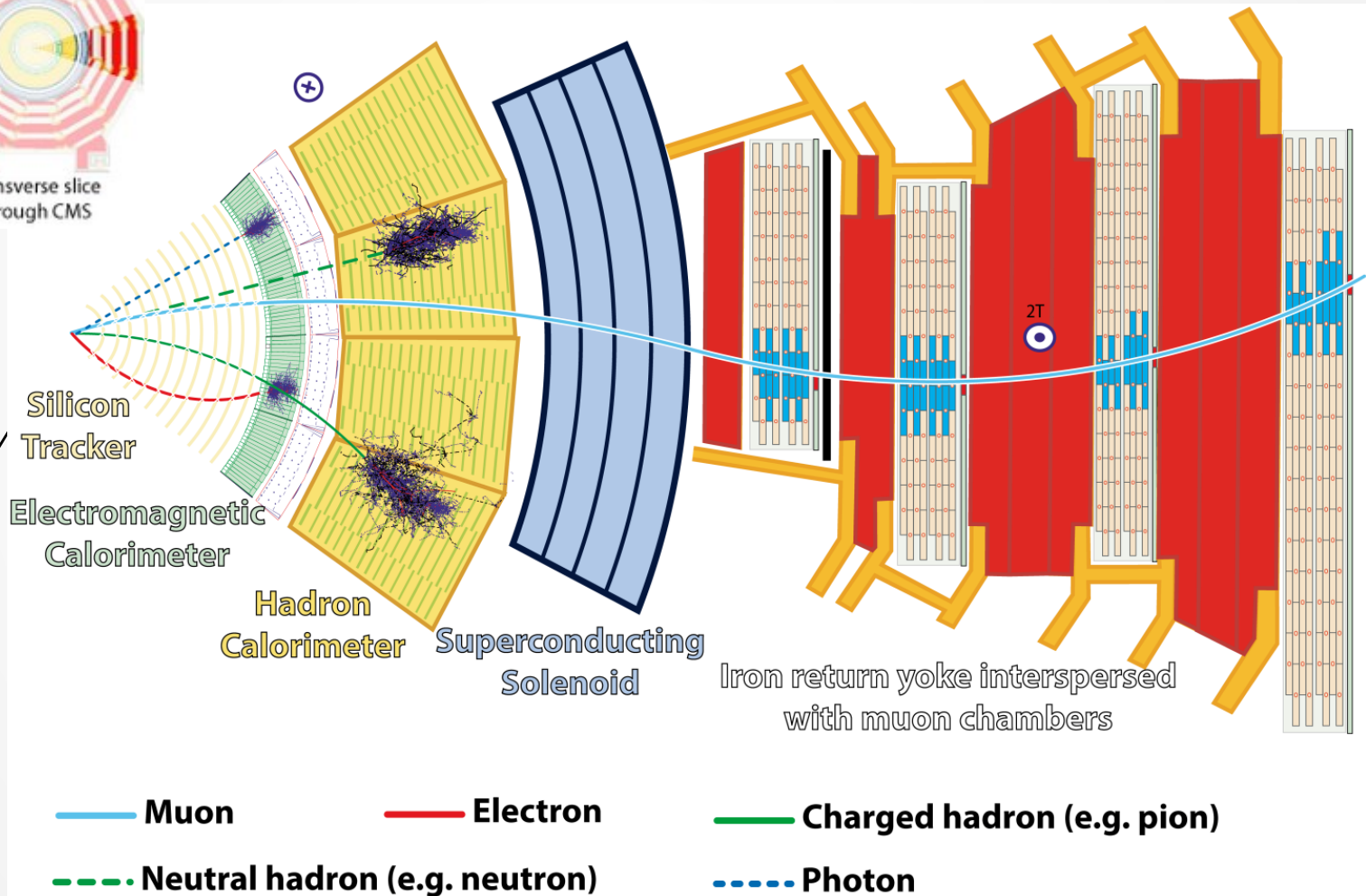
b

Path of projectile

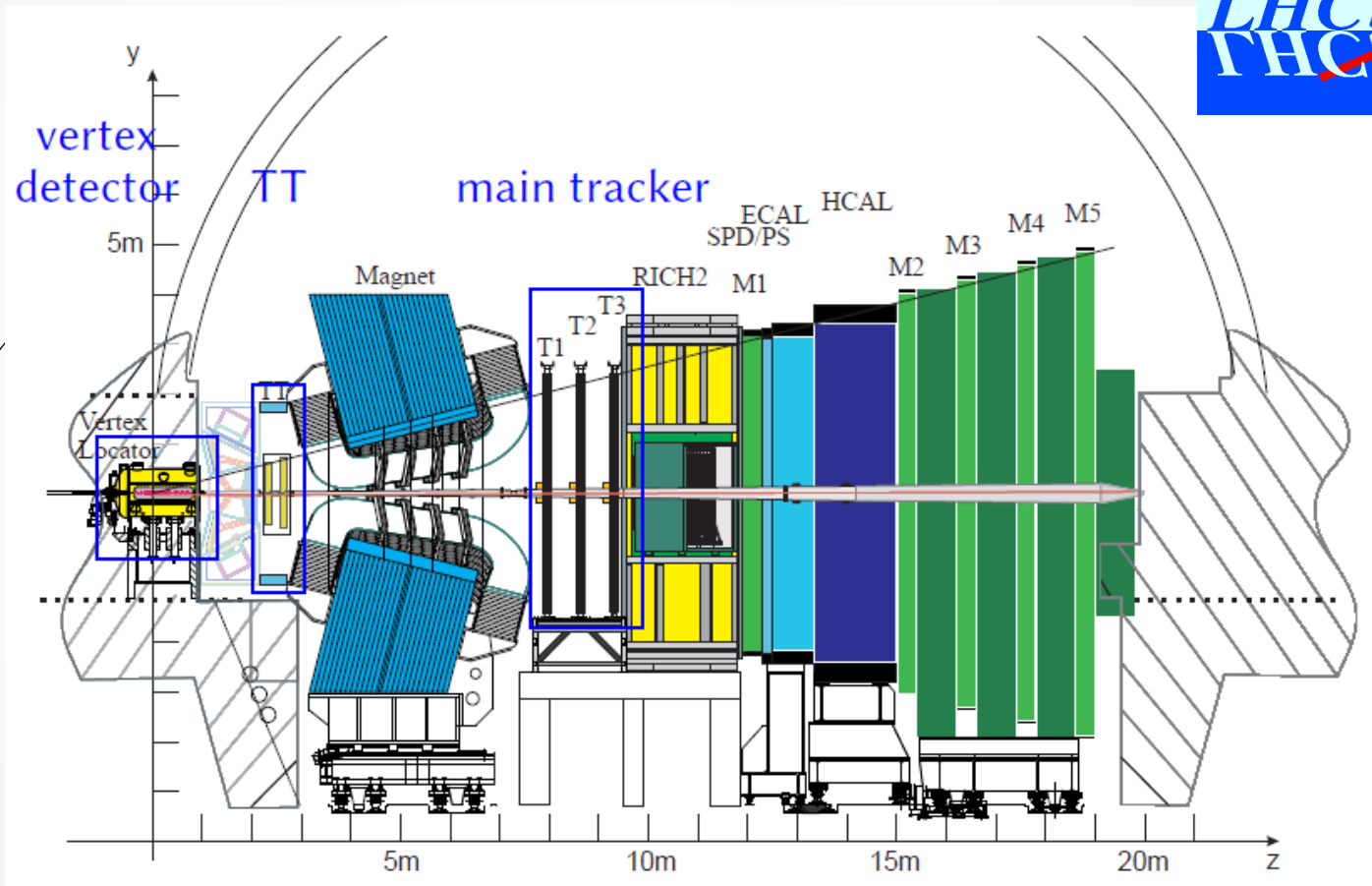
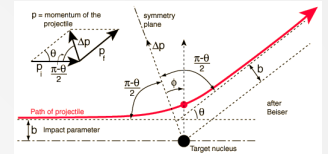
impact parameter

Target nucleus

after Bessel



Eksperymenty FWE

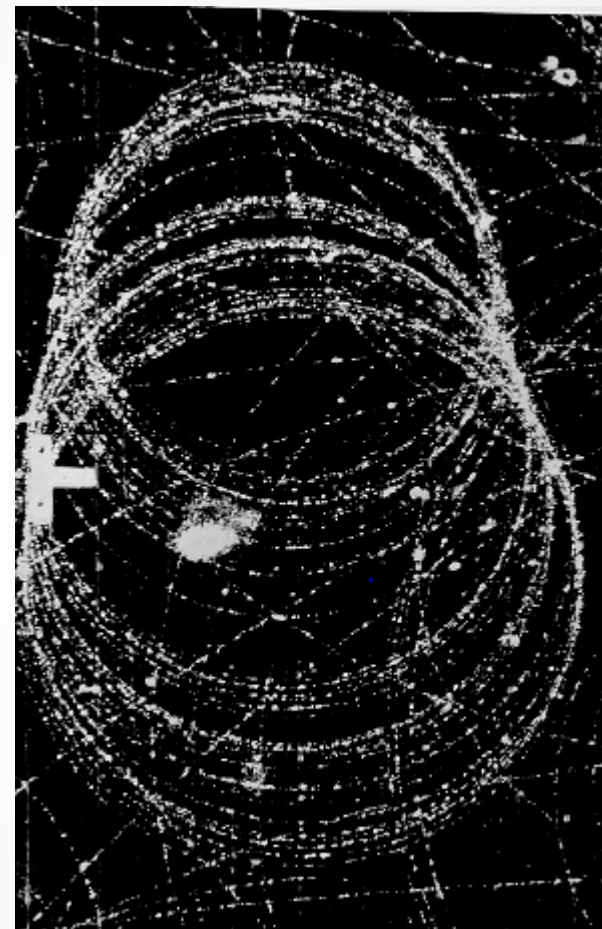
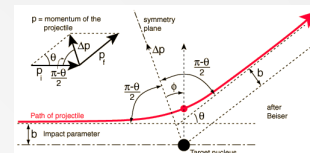


Układy śladowe (I)

- ❑ **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

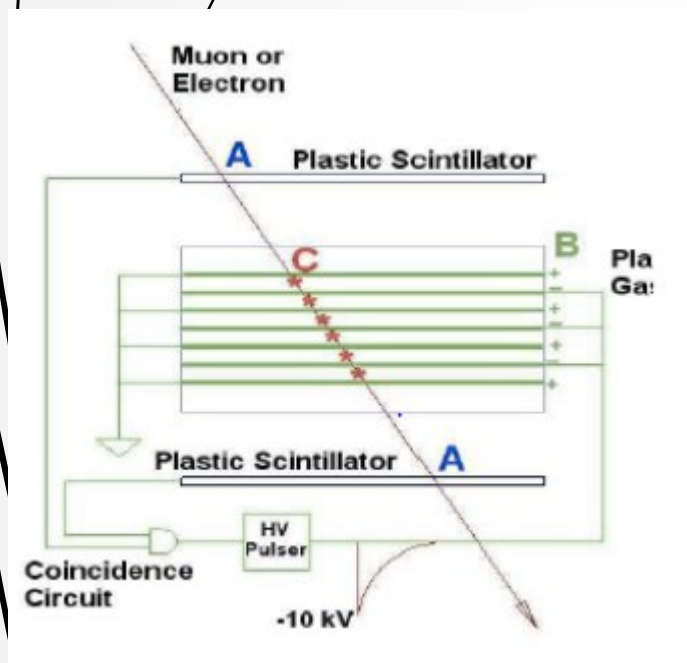
Elektron w polu magnetycznym (1940).

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

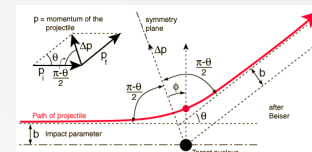
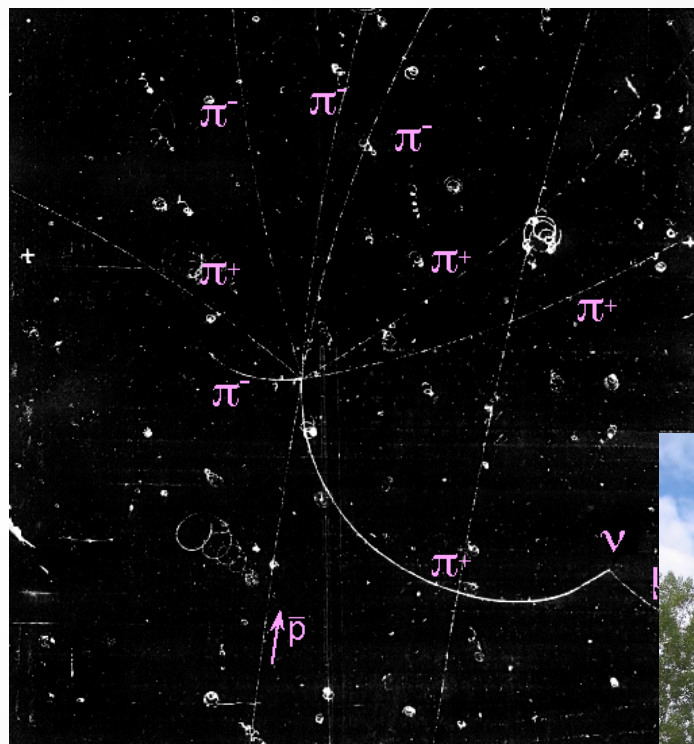


Układy śladowe (I)

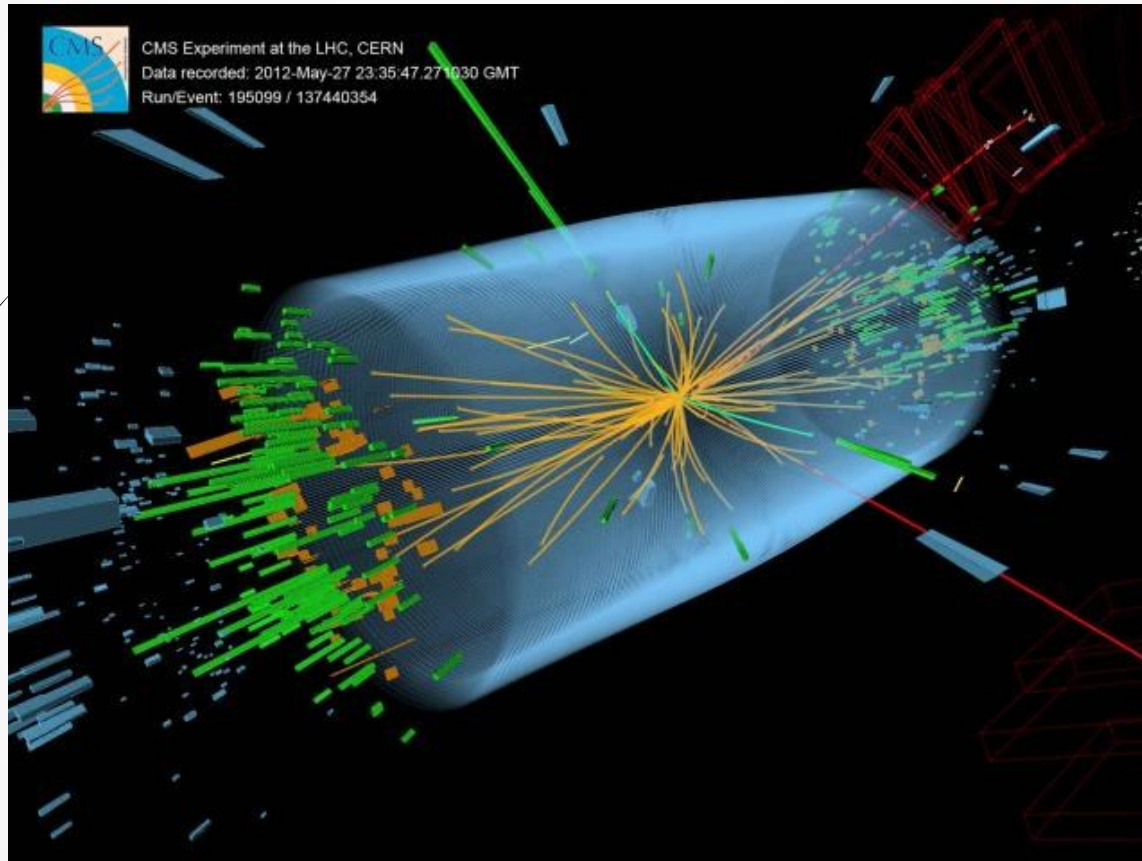
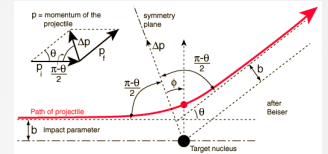
Komora iskrowa (~1960)



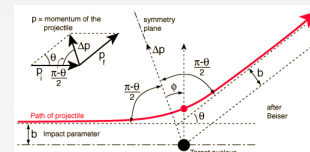
Komora pęcherzykowa



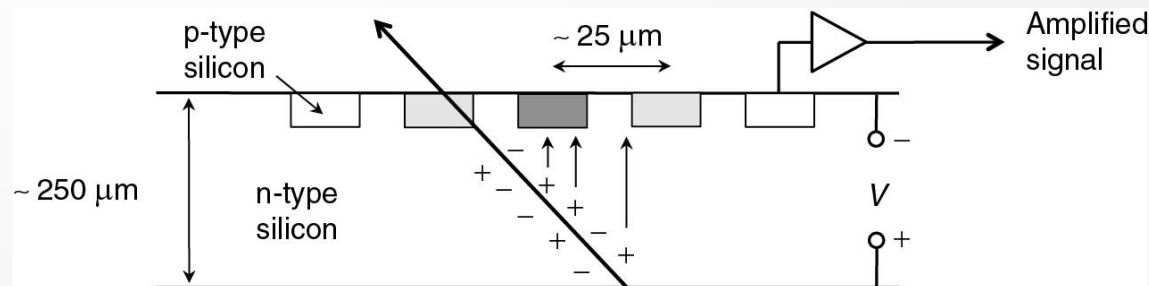
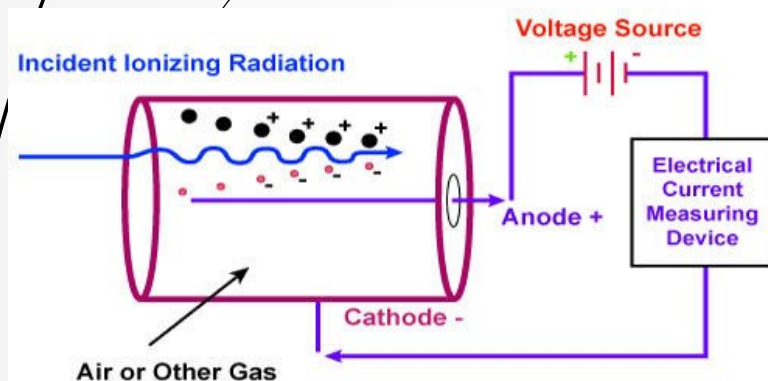
Układy śladowe (2010)



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



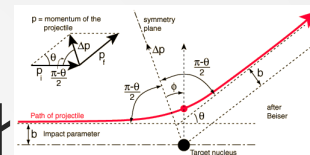
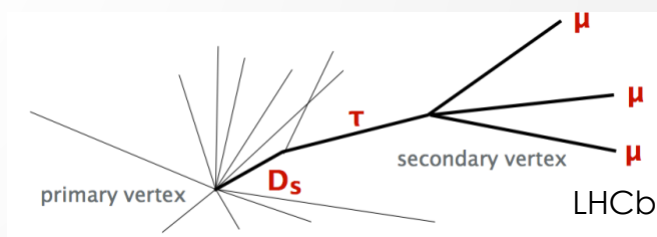
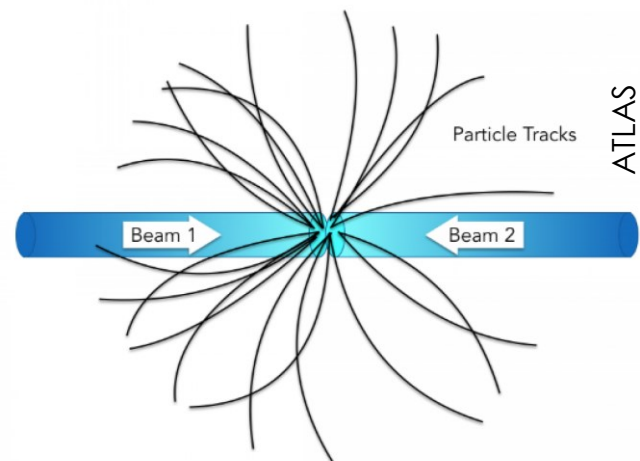
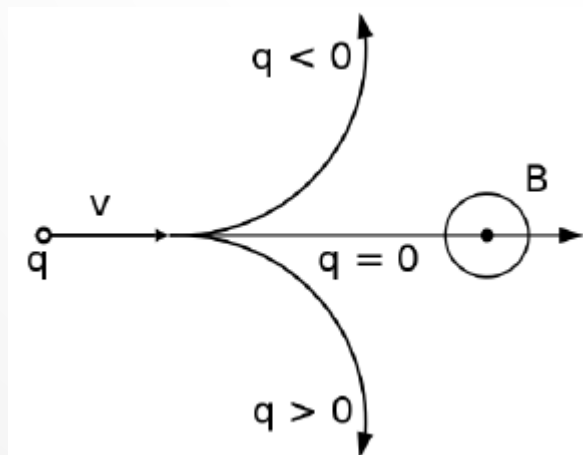
Układy śladowe i wierzchołki

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

Pomiar pędu w polu magnetycznym

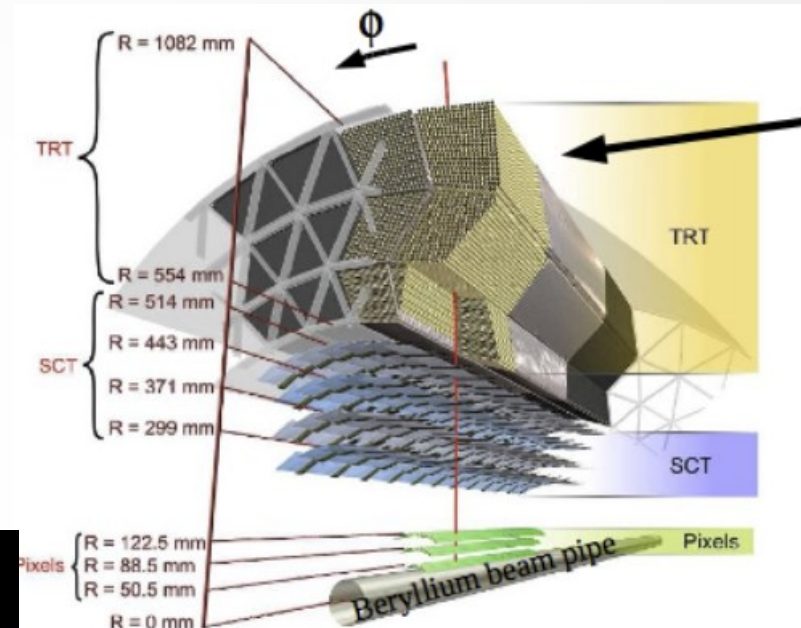
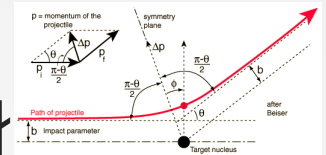
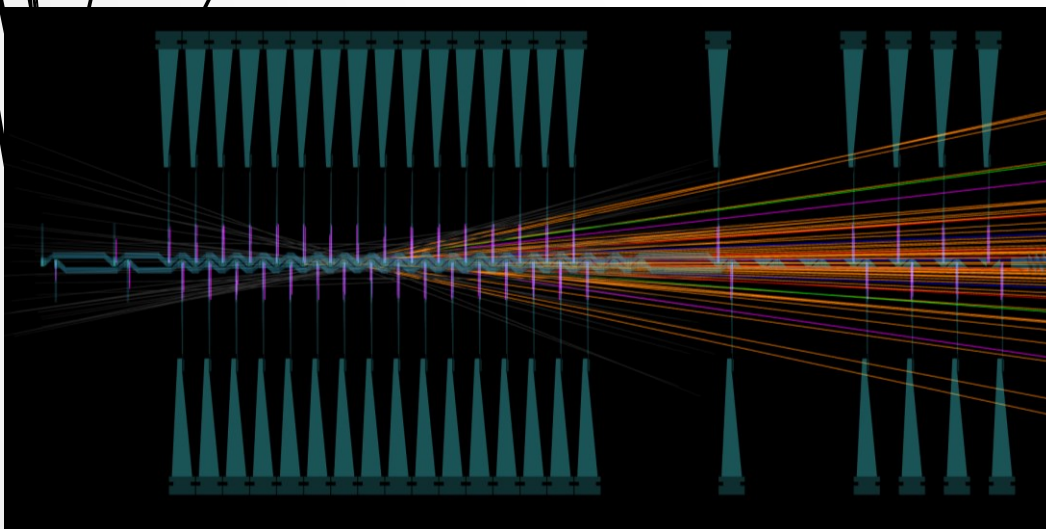
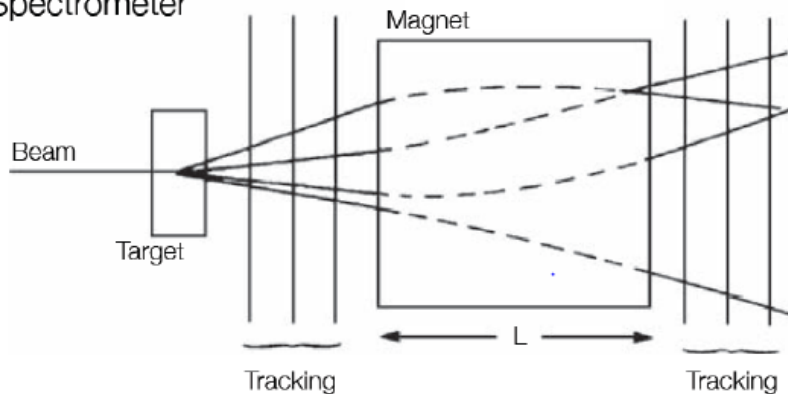
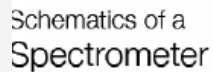
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

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

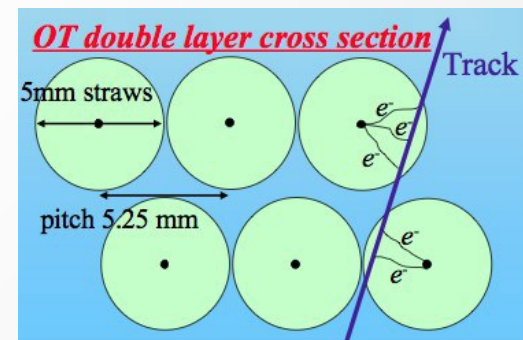
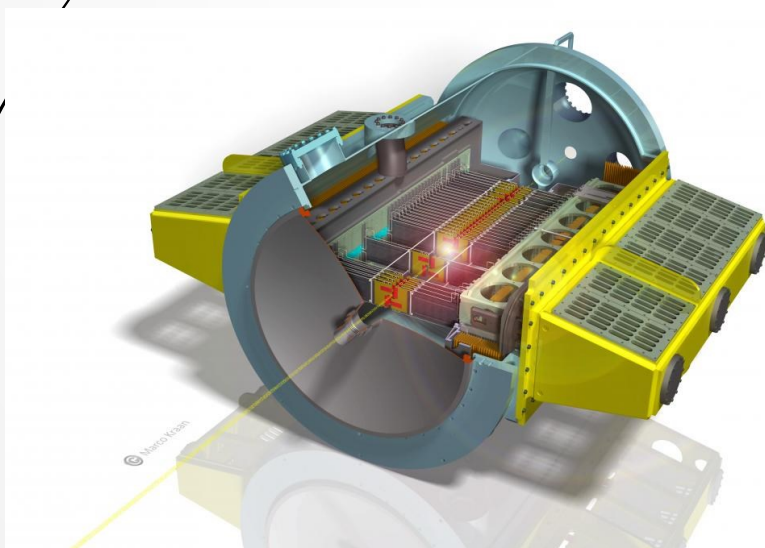
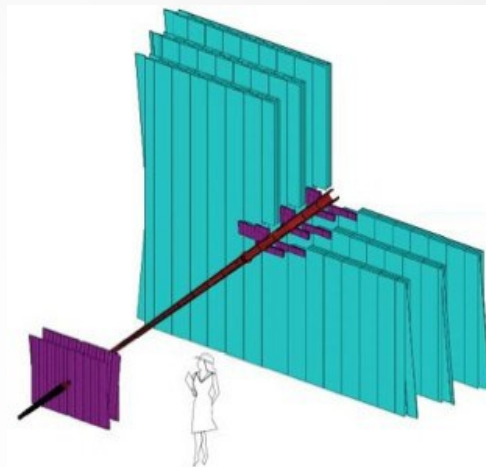
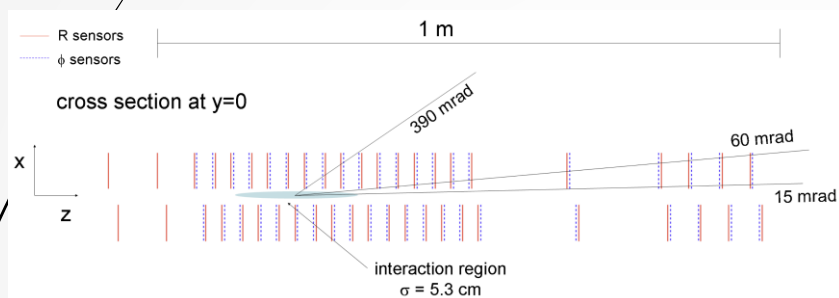
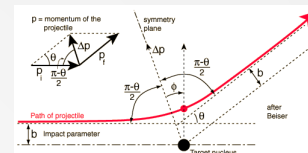


Układy śladowe i wierzchołki

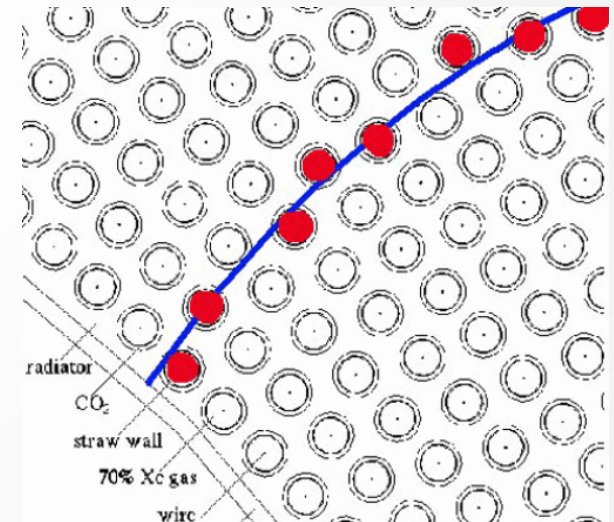
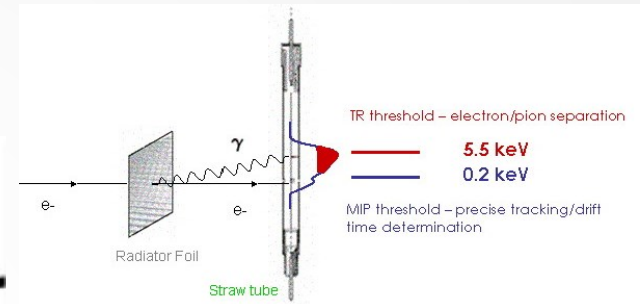
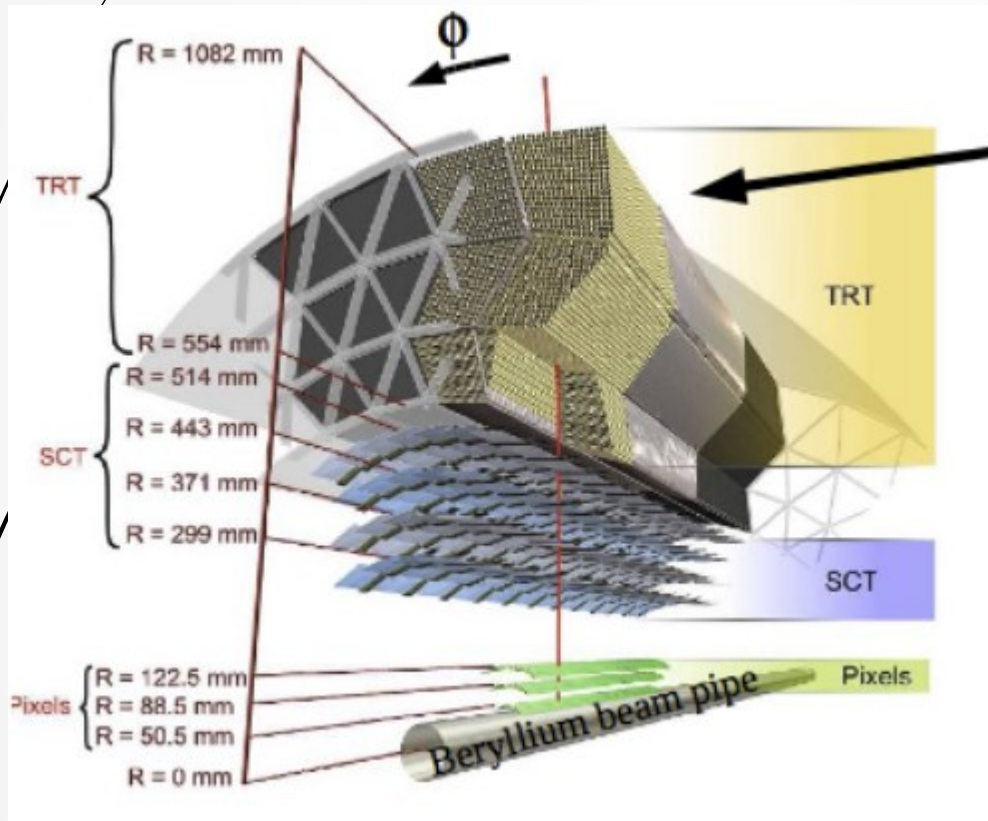
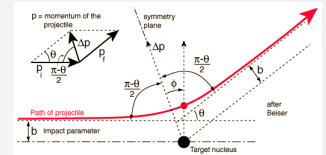
Praktycznie zawsze stosowane są warstwy detektorów



Układy śladowe (II)



Układy śladowe (III)



Atlas TRT – Transition Radiation Tracker