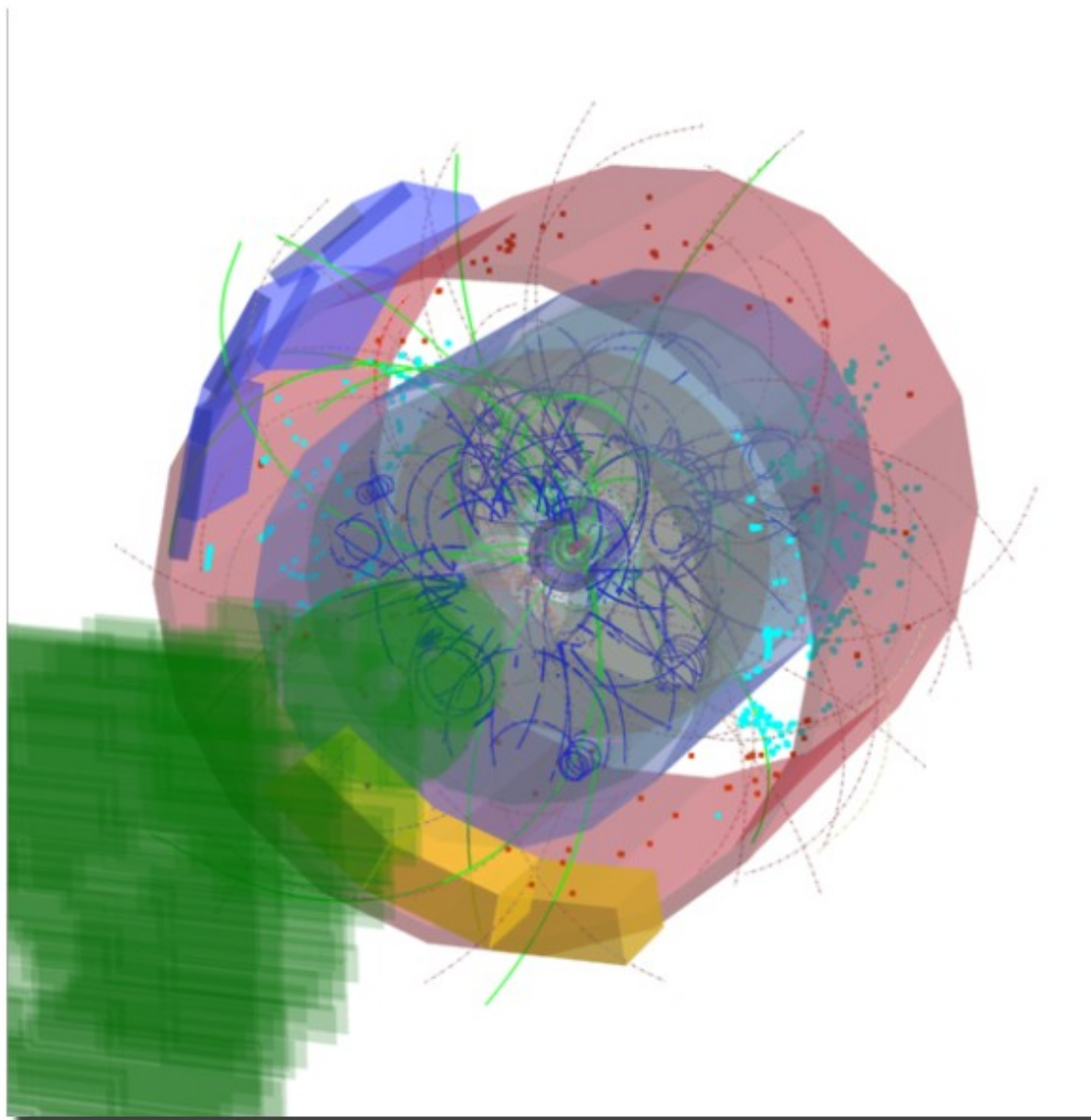


Budowa i działanie detektorów



Autor: Rafał Sarnecki

Plan prezentacji:

1. licznik proporcjonalny;
2. wielodrutowa komora proporcjonalna
3. komora iskrowa i strumieniowa
4. komora dryfowa
5. komora projekcji czasowej (Time Projection Chamber)
6. kalorymetry
 - kalorymetry elektromagnetyczne
 - kalorymetry jako trygery przypadku (Kal. VETO – energia spektatorów, RING – energia poprzeczna)
7. licznik scyntylicyjny
8. detektor Czerenkowa (progowy i różniczkowy licznik Czerenkowa)
9. komora pęcherzykowa
10. detektory półprzewodnikowe

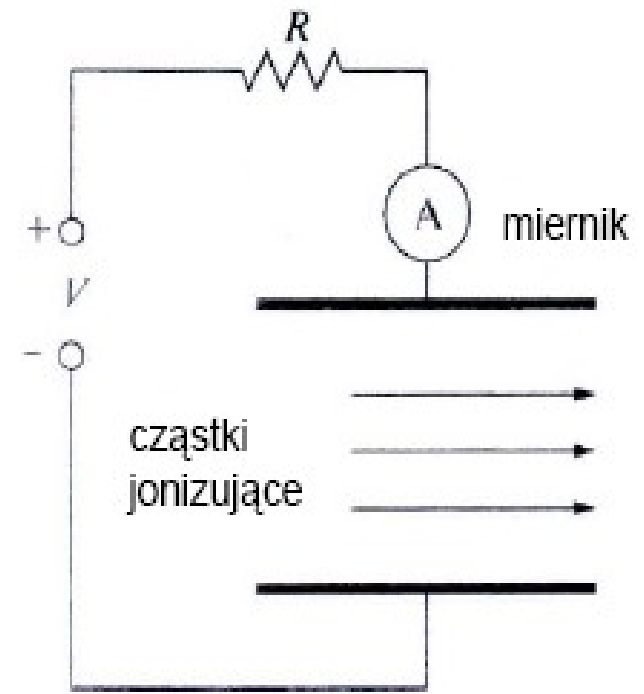
Detektory gazowe.

Cząstki naładowane, przechodząc przez detektor, jonizują gaz, który jest materiałem roboczym detektora.

W dalszym etapie cząstki te docierają do anody, co skutkuje nagromadzeniem się na niej ładunków i powstanie sygnału elektrycznego.

Najważniejsze cechy detektora gazowego:

- jonizacja pojedynczego atomu gazu zachodzi dla ok. 30 eV (w powietrzu 34 eV)
- w skład detektora wchodzi komora wypełniona gazem, katoda oraz anoda
- wzmocnienie sygnału na anodzie rzędu 10000 razy na skutek wysokiego napięcia przyłożonego na katodę i anodę
- wzmocnienie gazowe-powielenie pierwotnych elektronów w silnym polu elektrycznym.
- dokładność położenia rzędu 100 μm (wyznacza się z pozycji drutu, czasu dryfu)



Licznik proporcjonalny.

Licznik proporcjonalny jest detektorem gazowym cząstek naładowanych, do efektywnej pracy tego detektora potrzebne są wysokie napięcia przy których powstaje wzmocnienie gazowe (proporcjonalny wzrost ładunku na elektrodzie względem ładunku jonizacji pierwotnej). Wzmocnienie takie występuje wokół anody i charakteryzuje się występowaniem silnego pola elektrycznego. Przyspieszając w takim polu elektrony, uzyskujemy energię potrzebną do osiągnięcia wtórnej jonizacji.

$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

gdzie:

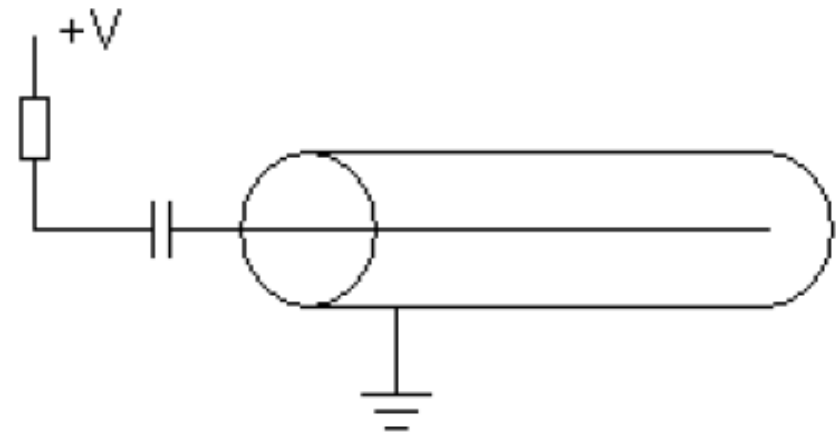
r – odległość od anody

V – napięcie przyłożone do anody

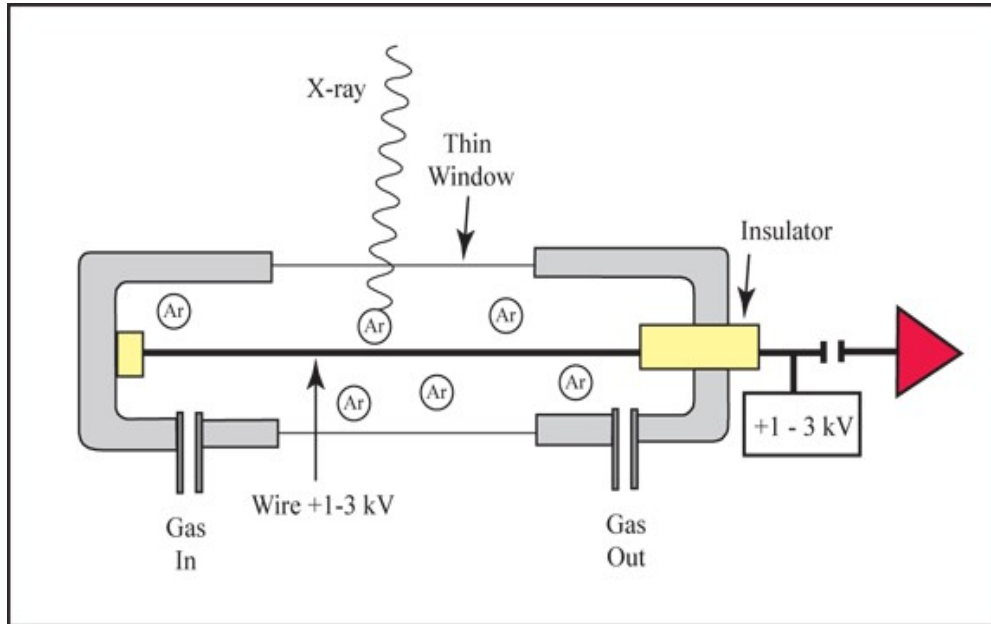
b – wewnętrzna średnica cylindra

a – średnica drutu anody

Ruch elektronów od katody do anody.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

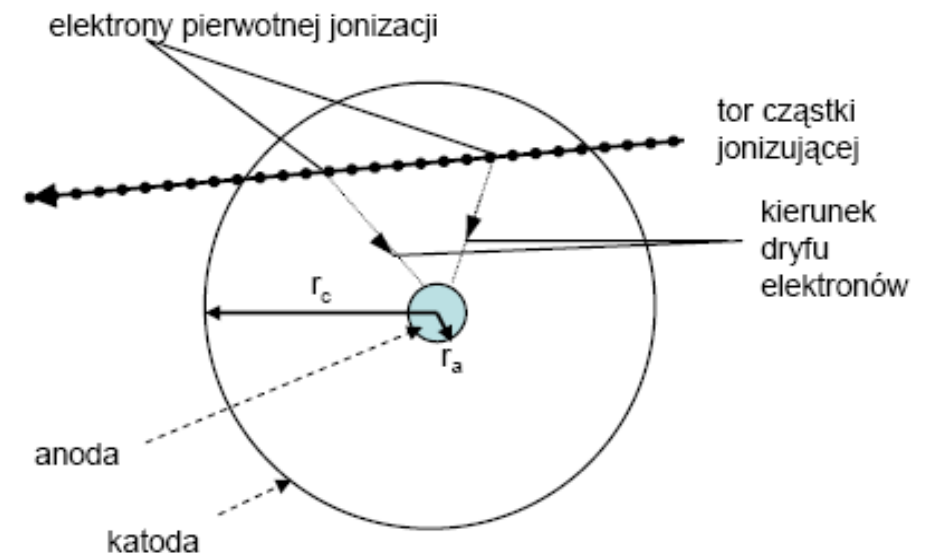


Anoda wykonana najczęściej ze stali nierdzewnej lub wolframu.

Katoda wykonana najczęściej z miedzi, aluminium lub grafitu.

Dobór gazu zależy od promieniowania, zazwyczaj gaz szlachetny np. Argon.

Gaz gaszący pochłaniający fotony, i dysocjujący cząstki.
Najczęściej węglowodory.

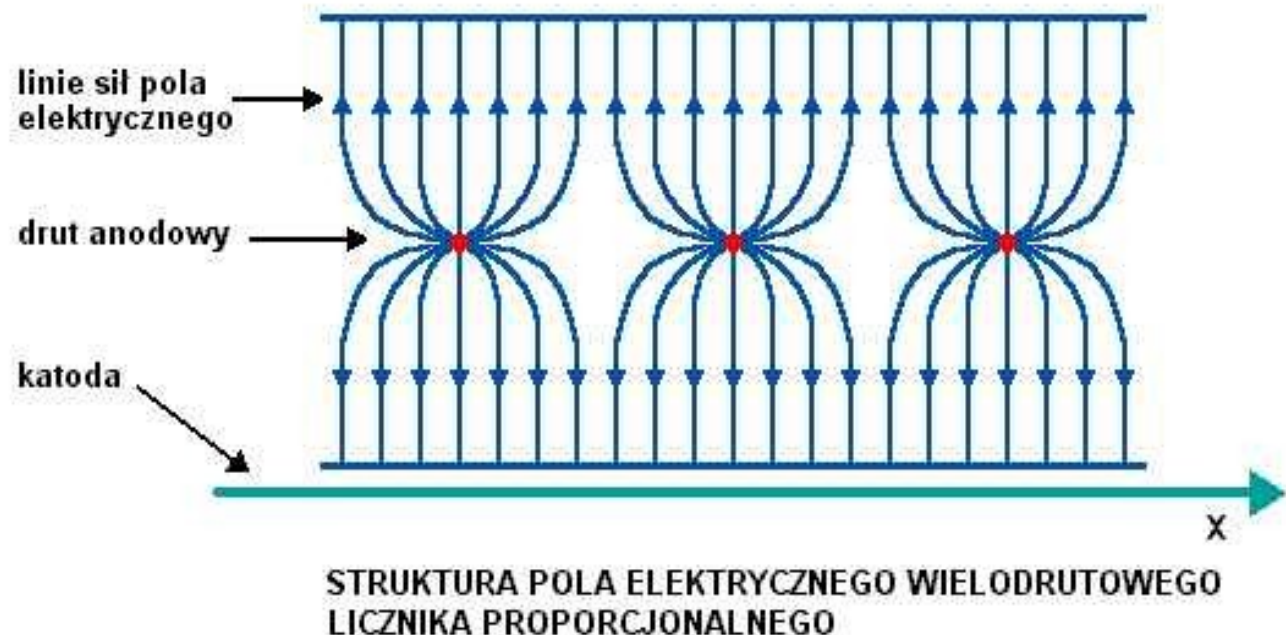
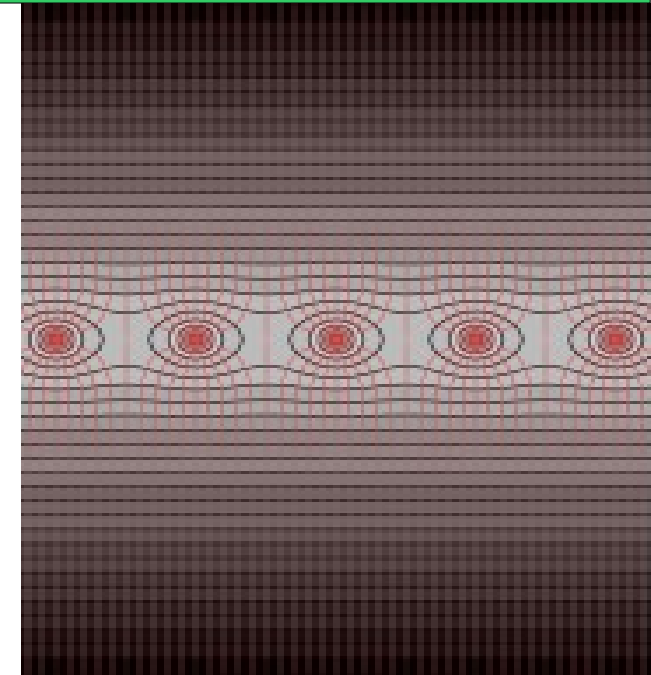


Wielodrutowa komora proporcjonalna. (Multiwire Proportional Chamber)

Rodzaj detektora gazowego, pozwala określić tor cząstki
Czas dryfu elektronów w powietrzu w polu o gradencji 100 V/cm wynosi $20 \mu\text{s}$

Powietrze używane tylko do pomiarów prądów,
a gazy szlachetne (Ar, He) do pomiaru impulsów

MWPC zawiera wiele, blisko siebie, równo rozmieszczonych, znajdujących się w jednej płaszczyźnie drutów anodowych centralnie rozmieszczonych między dwoma płaszczyznami katod. Każdy drut pełni funkcję niezależnego licznika proporcjonalnego i posiada własną elektronikę.

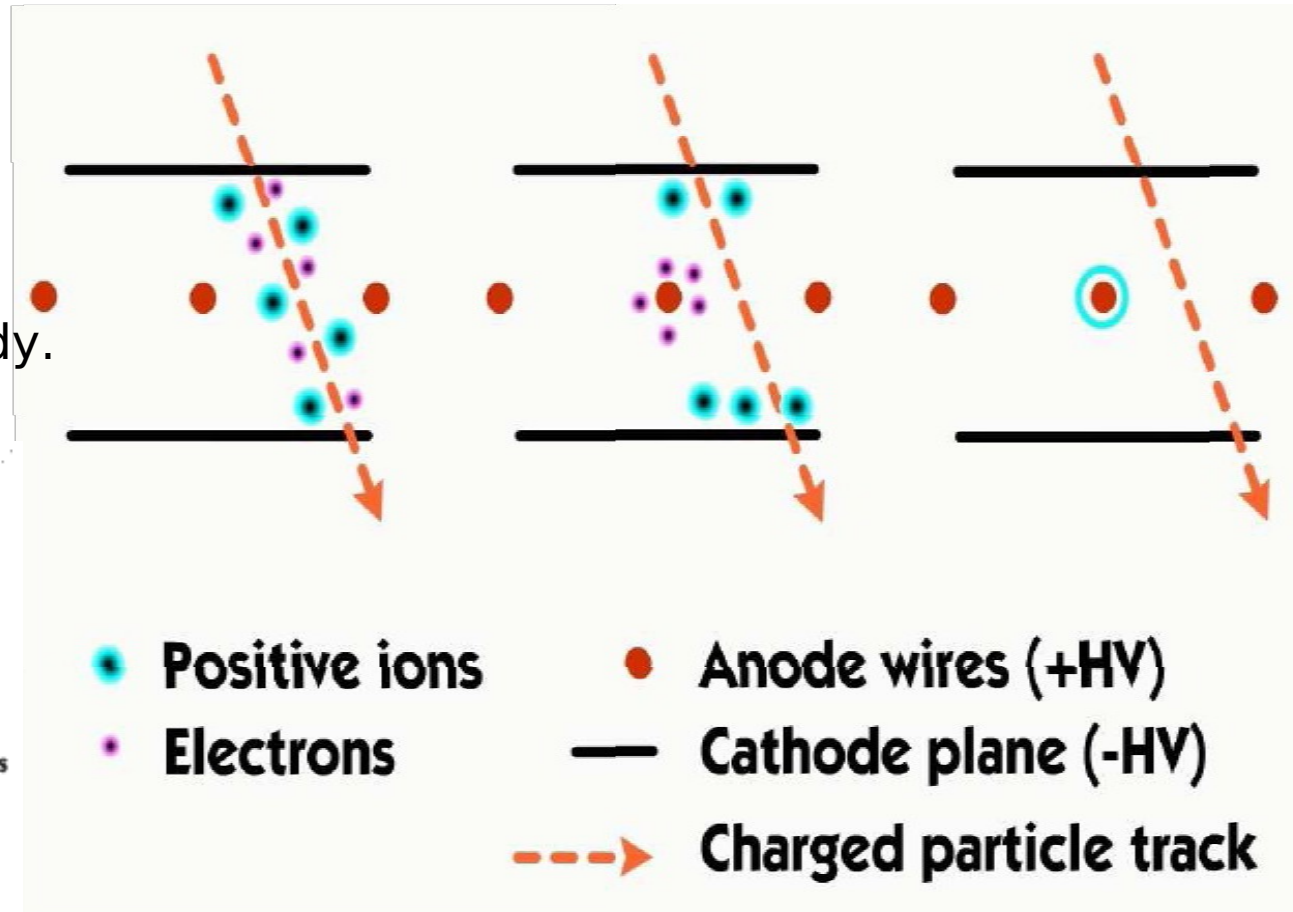
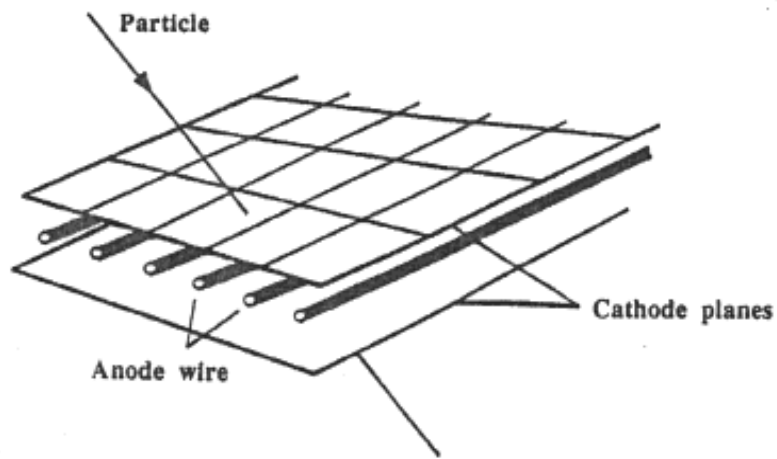


Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Pole elektryczne najsilniejsze jest przy drutach anodowych.

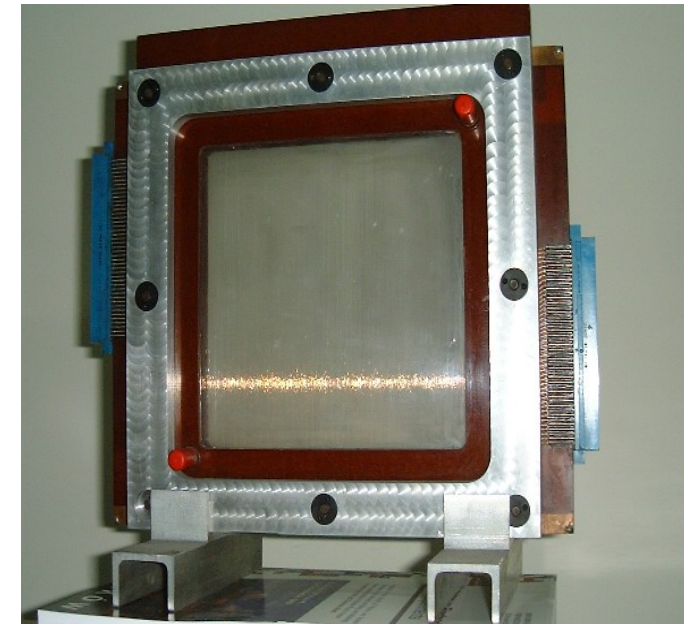
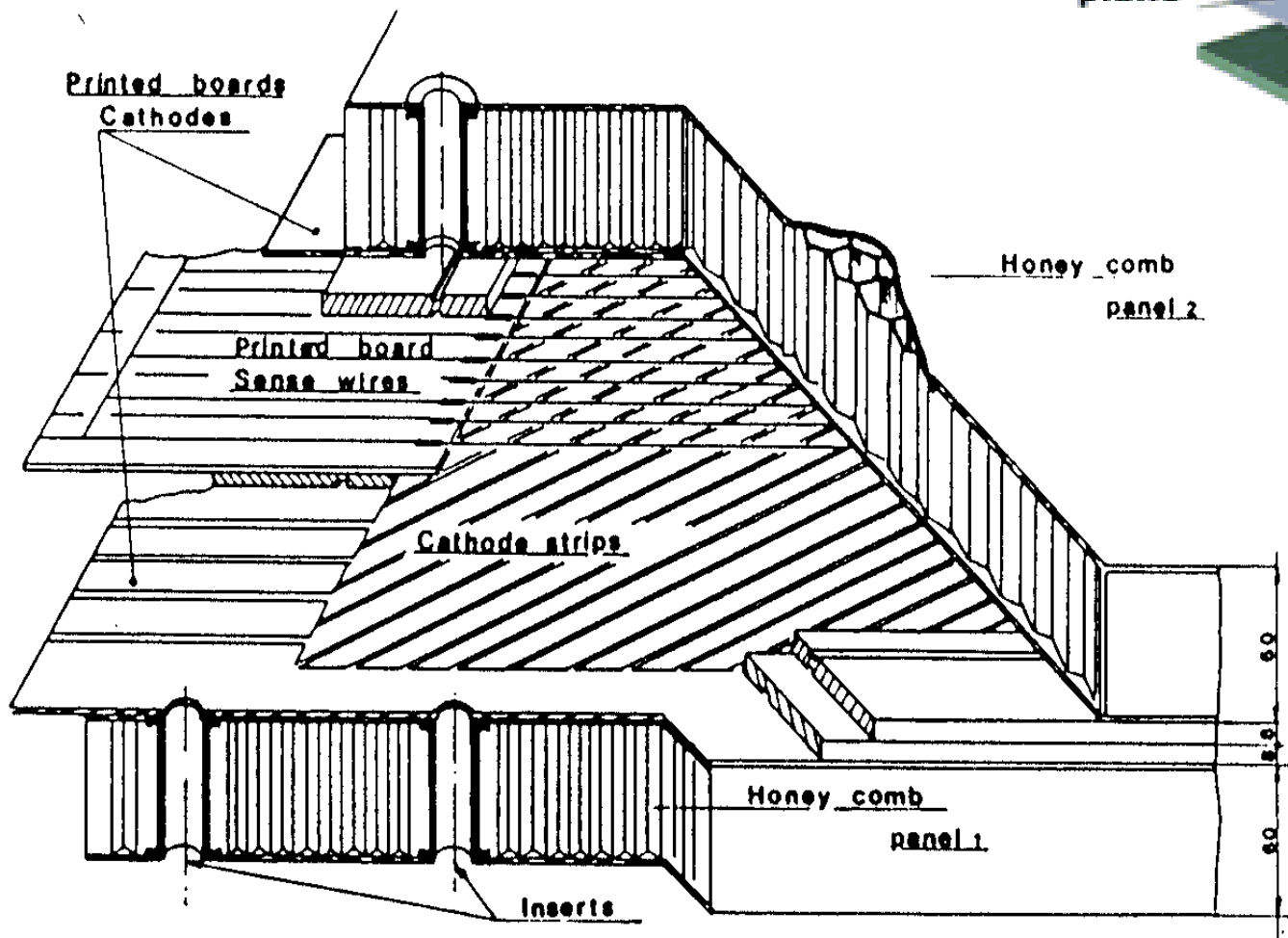
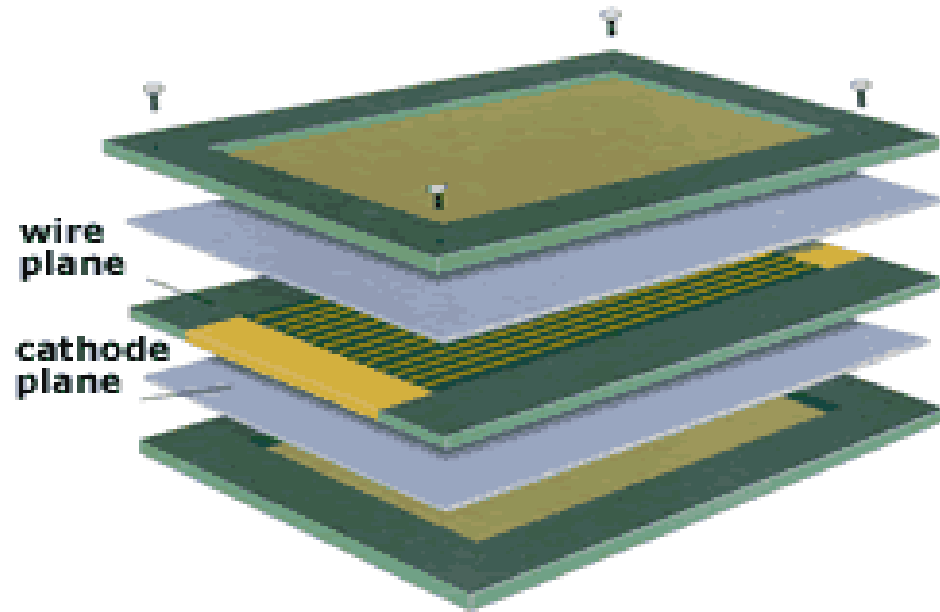
Wzmocnienie gazowe: przy odpowiednim doborze napięcia może dojść do kaskadowego powielania ładunków.

W wyniku jonizacji powstają jony i elektrony swobodne, które dryfują w kierunku elektrody.



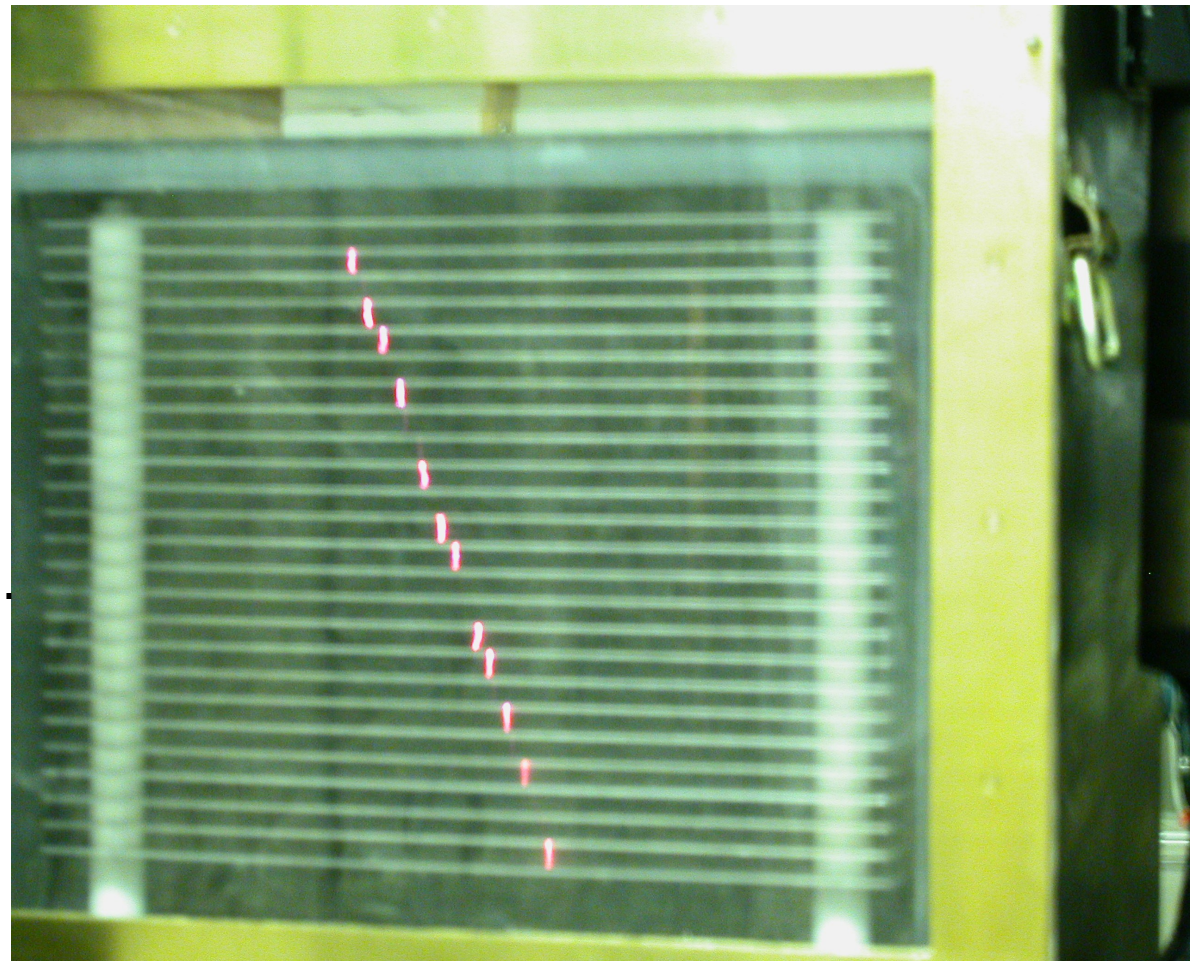
Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Sygnały z poszczególnych drutów anodowych pozwalają określić położenie w płaszczyźnie x.



Komora iskrowa.

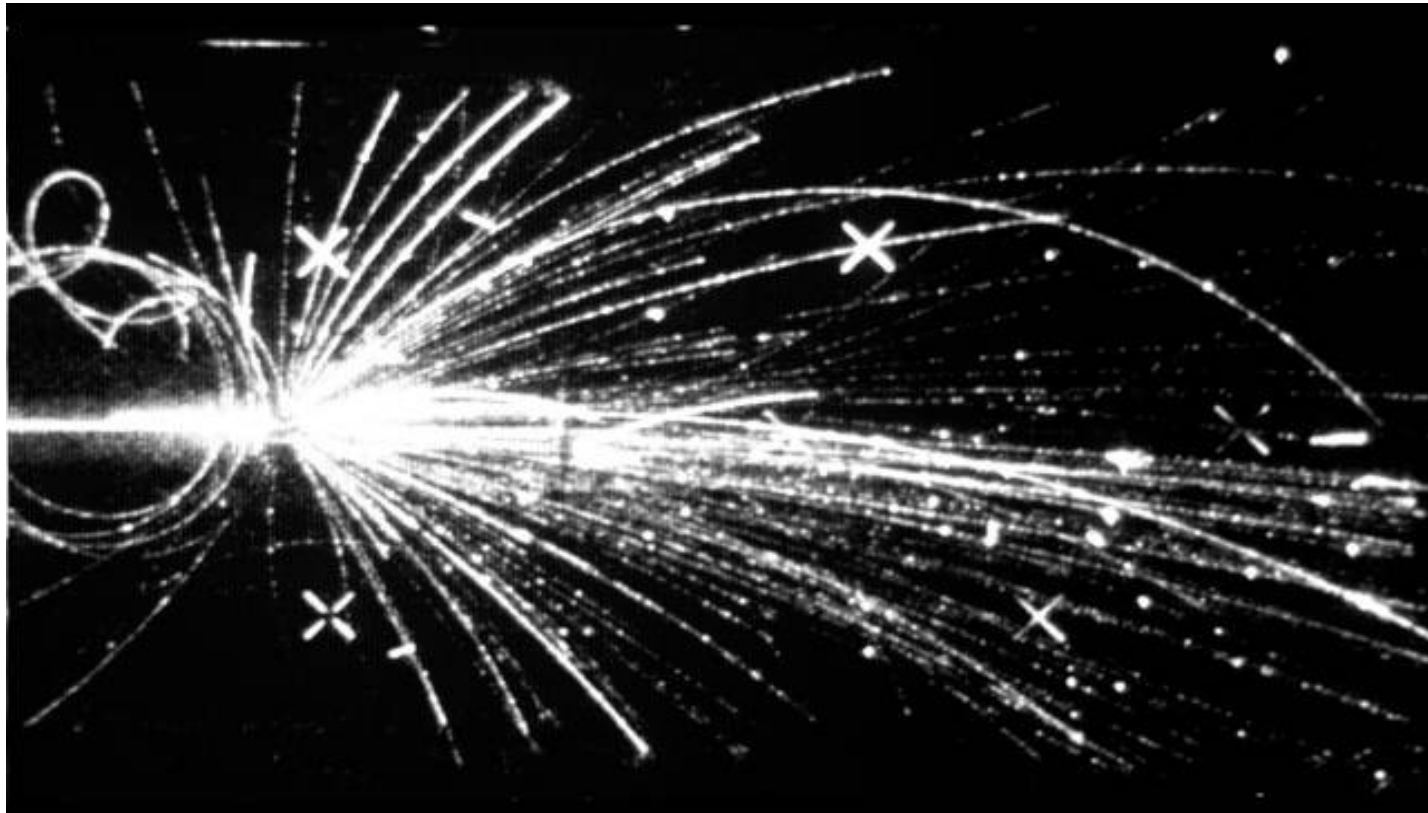
- śladowy gazowy detektor promieniowania jonizującego, zbudowany z baterii liczników iskrowych, które są zasilane impulsowo;
- gdy podamy wysokie napięcie, w obszarach zjonizowanych następuje przeskok iskry (Efekt ten rejestrowany jest następnie na zdjęciu lub przez zespół mikrofonów);
- możemy zrekonstruować tory cząstek;
- różnica potencjałów $\sim 5\text{kV}$;
- powyżej 5 kV wyładowania elektryczne w gazie;
- ładunek przestrzenny w kaskadzie wystarczająco duży, aby ekranować pole zewnętrzne.
- kolumna jonów połączy się z katodą i nastąpi przeskok iskry.



Komora strumieniowa.

Przykładamy do równoległych płyt krótki impuls, około 10 ns wysokiego napięcia. Przelatująca cząstka pozostawi ślad o długości około 2-3 mm.

Uzyskujemy bezpośredni ślad toru lotu cząstki, dzięki błyskom uzyskanym w gazie wypełniającej komorę, poprzez przyłożenie do jej elektrod wysokiego napięcia.

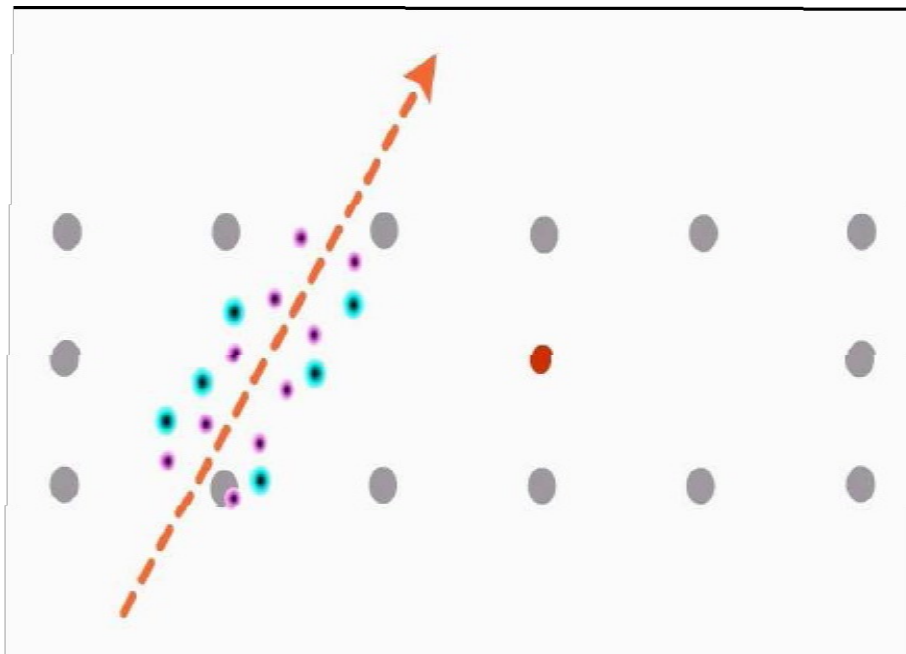


Komora dryftowa.

Komora dryftowa jest zbudowana podobnie jak licznik proporcjonalny.

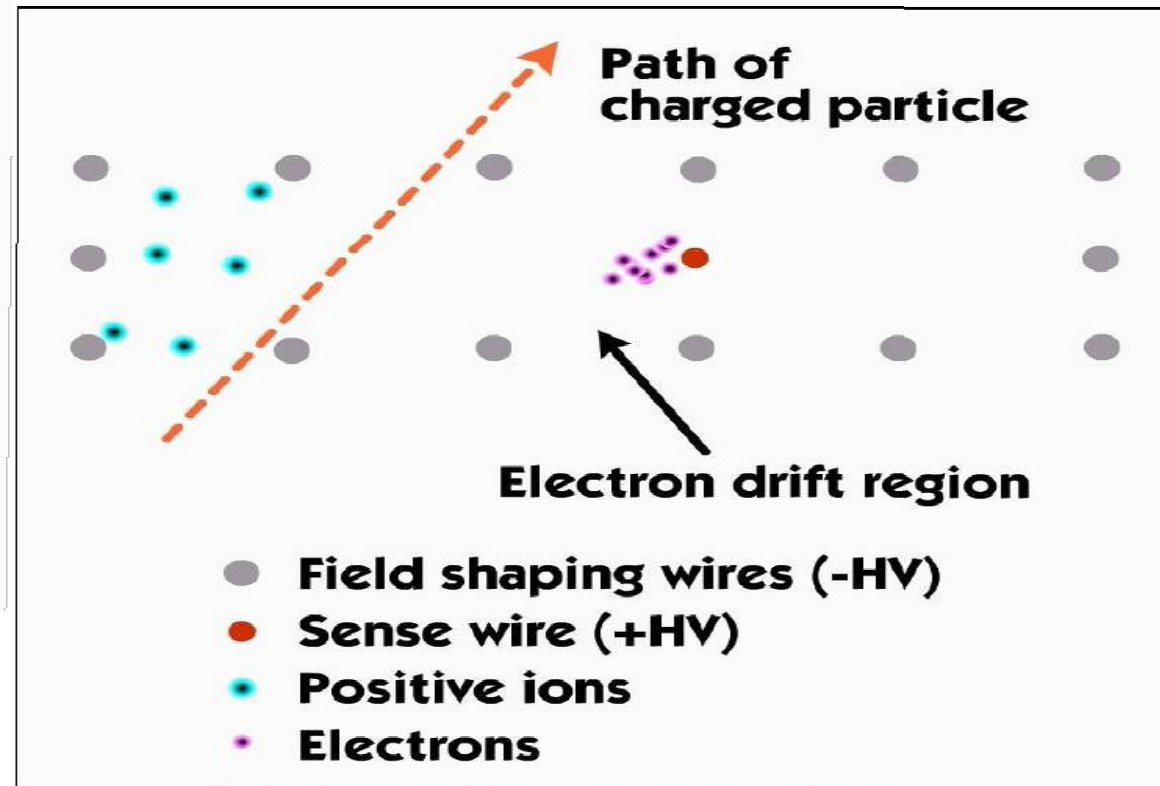
W stosunku do komory proporcjonalnej ma wydłużony obszar dryftu.

Położenie cząstki wyznaczamy z prędkości dryftu elektronu, i opóźnienia sygnału.



Prędkość dryftu $\sim v_d = 10^5$

Pomiar czasu $\sim 1\text{ns}$.



The Time Projection Chamber (TPC) Komora projekcji czasowej.

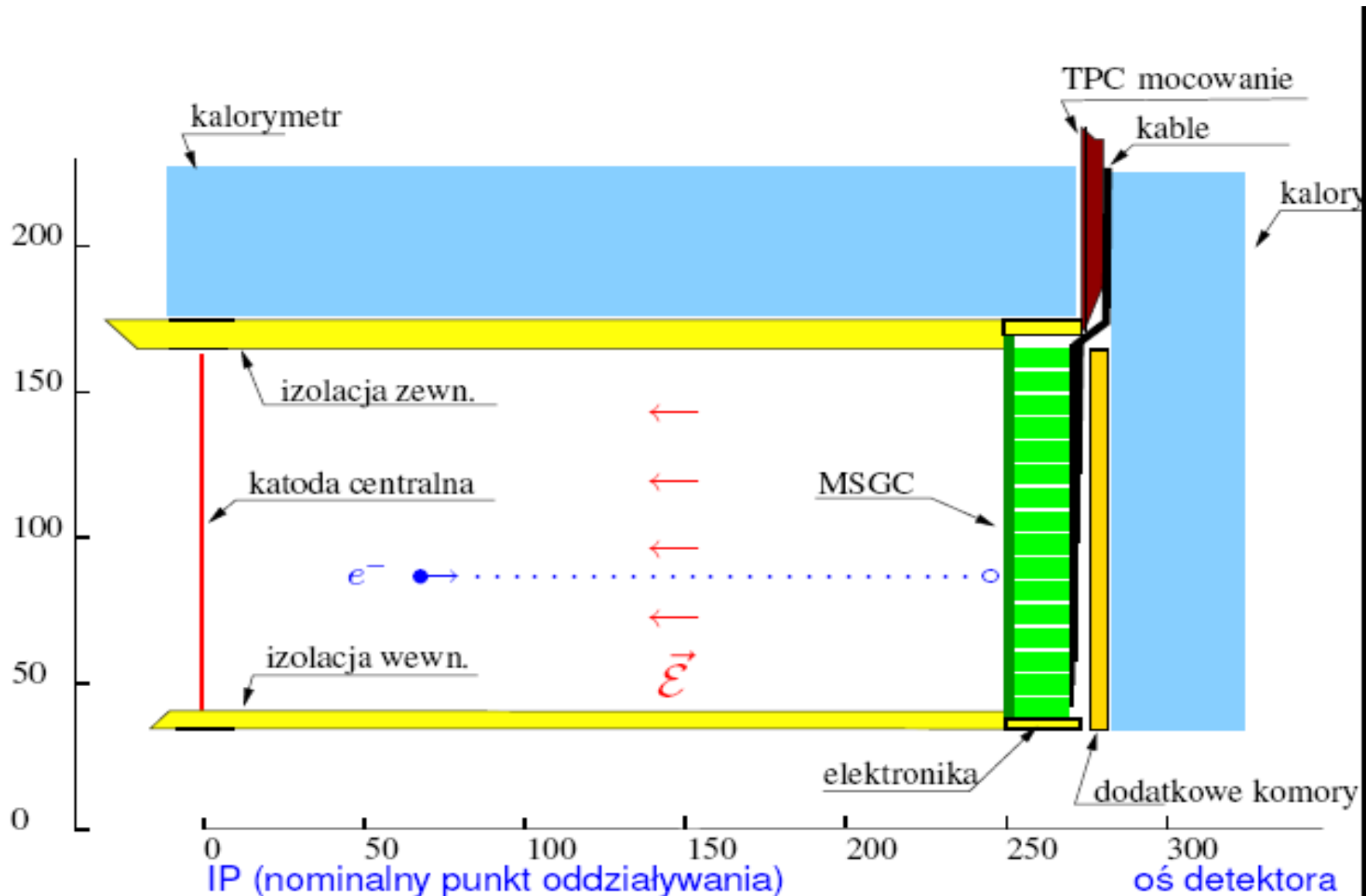
- jeden z najbardziej interesujących detektorów stosowanych w eksperymentach wysokich energii
- Cząstka jonizująca po przejściu przez objętość traci pewną ilość energii na jednostkę długości (dE/dx) produkując tzw. elektrony pierwotne.
- możliwość odtworzenia torów cząstek w trzech wymiarach

Znając pęd , oraz jednocześnie wyznaczając masę z dE/dx możemy zidentyfikować cząstkę.



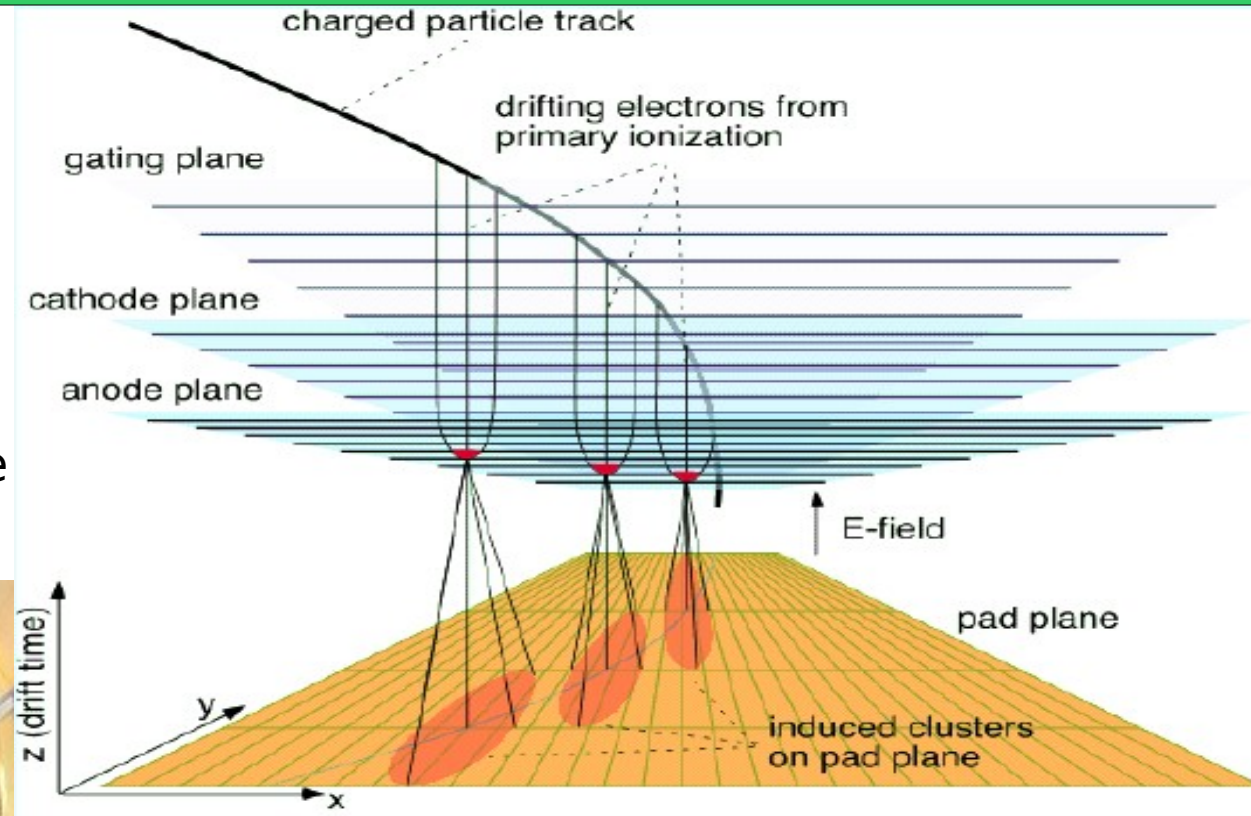
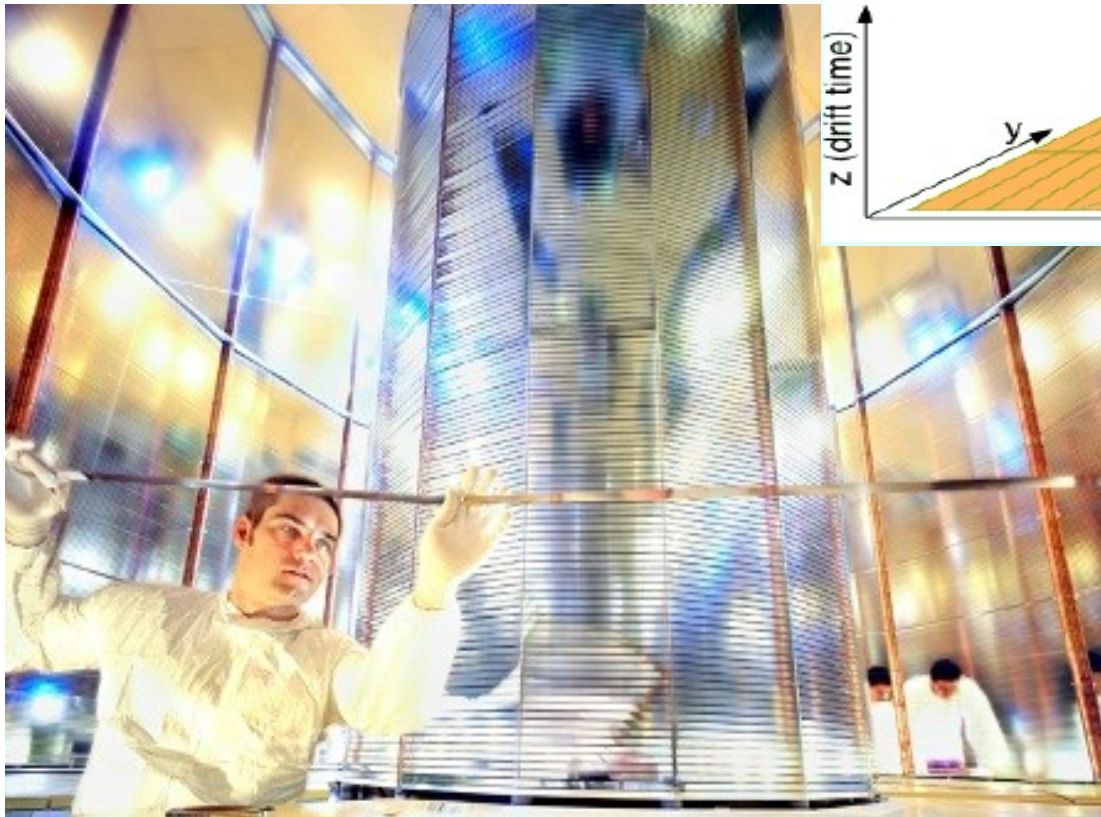
Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

TPC pozwala na pełną rekonstrukcję toru lotu cząstki, na podstawie czasu dryftu elektronu, i miejsca rejestracji.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Wnętrze detektora TPC w czasie montażu.

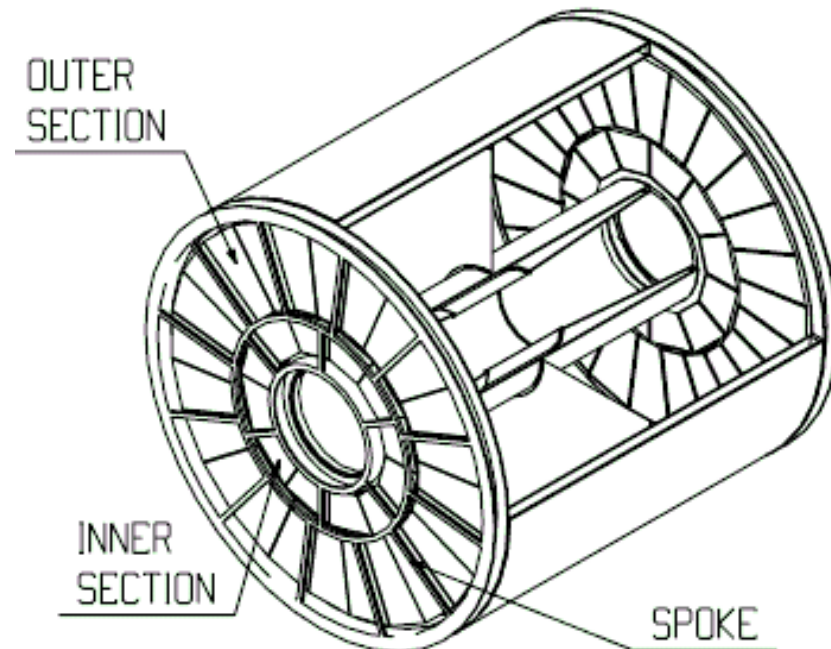
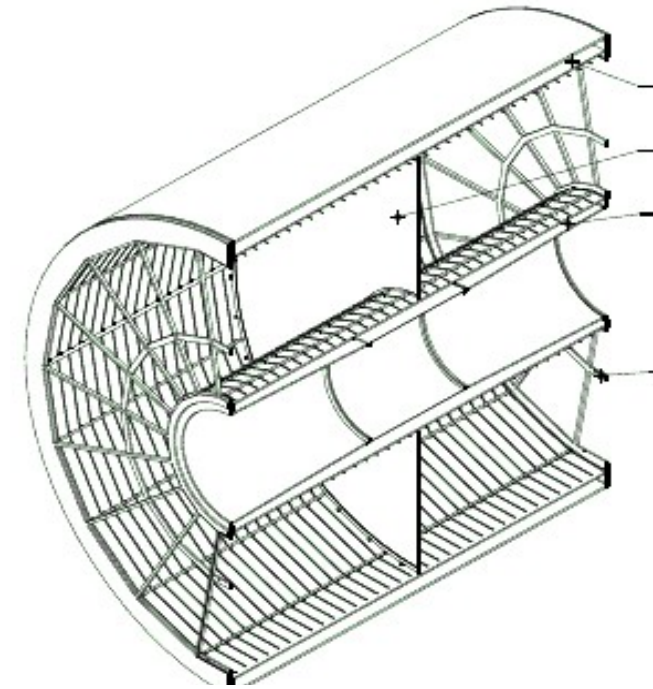


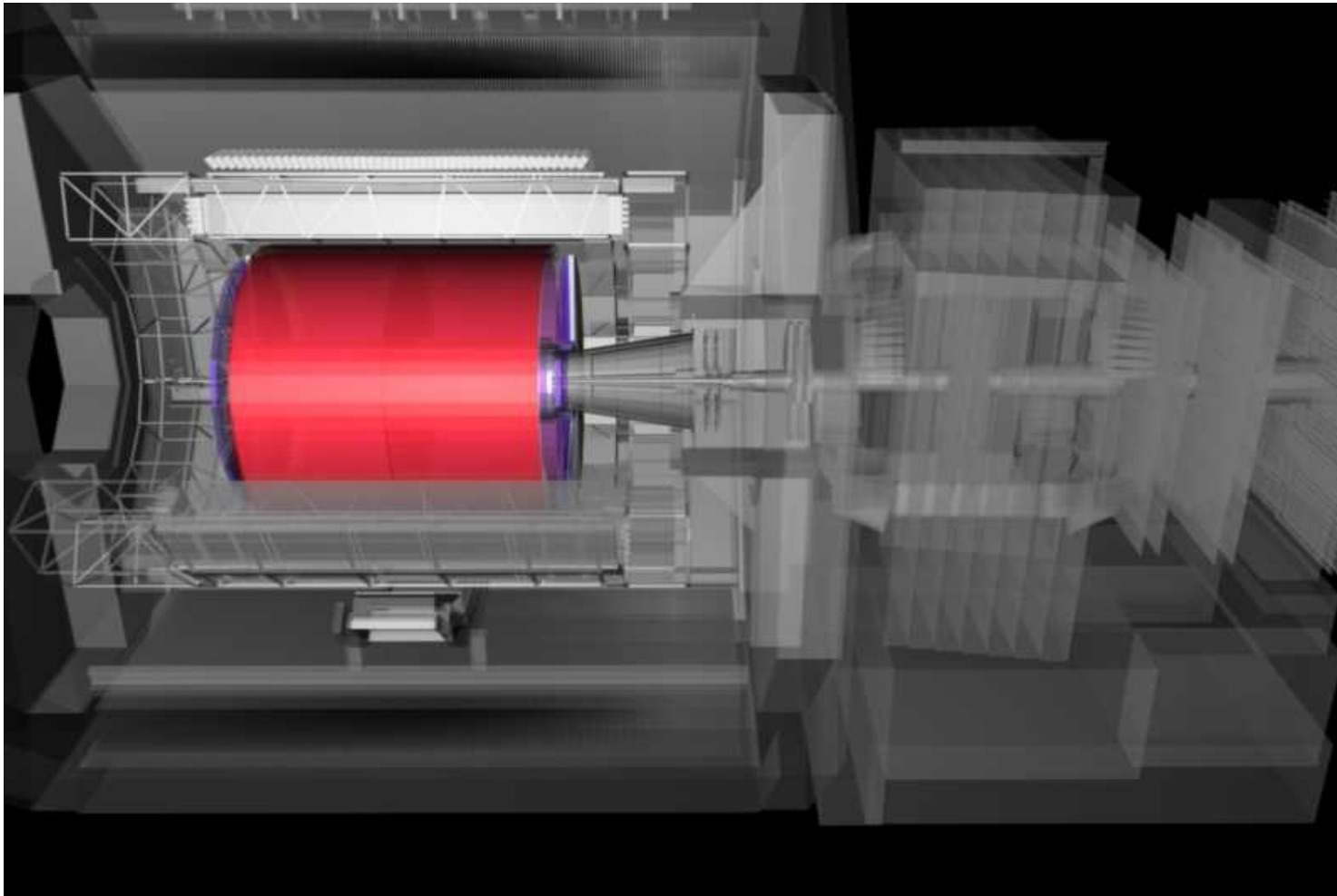
- Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek oddziałuje Kulumbowsko z elektronami i oddaje im część swojej energii wybijając je z atomów..

Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

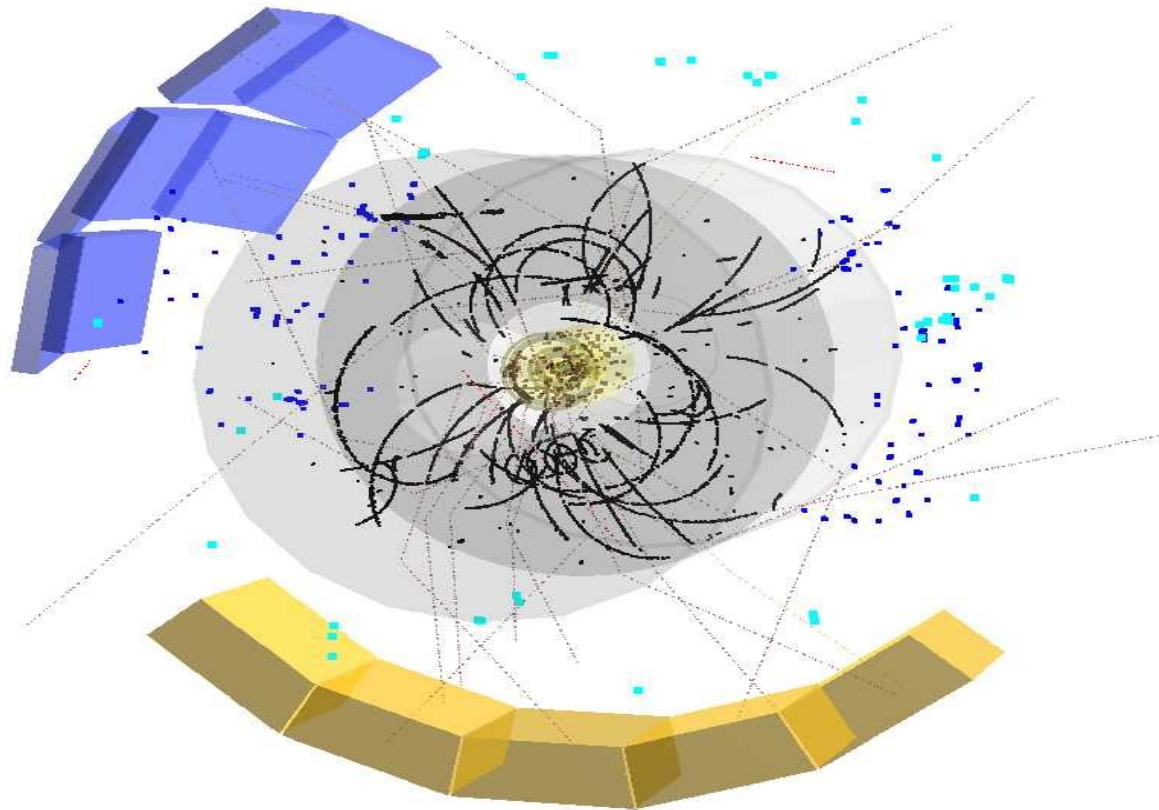
TPC na przykładzie komory zastosowanej w detektorze ALICE.

- Długość: 5100 mm
- Wypełnienie: mieszanina Ne, Co₂ (90/10)
- Promień wewnętrzny: 845 mm
- Promień zewnętrzny: 2466 mm
- 18 segmentów zawierających 557 568 padów:
- Objętość gazu: 85 m³
- Pole elektryczne: 400V/cm
- Czas dryfu elektronów do ścianek bocznych 100 ms czyli 2.5 cm/ms;





Umieszczenie detektora TPC wewnątrz ALICE



TPC (w detektorze ALICE) i zarejestrowane ślady cząstek

Widoczny TPC (szary), HMPID (niebieski), PHOS (żółty), oraz ślady zarejestrowanych cząstek. Jest to wizualizacja rzeczywistego zderzenia protonów przy energii 2,36 TeV na parę protonów (szóste zderzenie pochodzące z „runu” 104068). Rysunek wykonany z pomocą środowiska AliRoot.

Kalorymetry.

Cząstki neutralne nie oddziałują w detektorach śladowych.

Pomiar energii i położenia cząstek wtórnych powstających przy oddziaływaniach przy bardzo wysokich energiach można w niektórych przypadkach mierzyć metodą pełnej absorpcji.

Proces absorpcji polega na oddziaływaniu z materiałem detektora podczas, którego wytwarzane są cząstki wtórne, które z kolei wytwarzają cząstki, wtórne w trzeciej już generacji. Dzieje się tak dopóki cała energia padającej cząstki przejdzie w jonizację lub wzbudzenie ośrodka.

Kalorymetr mierzy całą energię przekazaną do ośrodka.

Dzięki takim właściwościom możemy poznać energię cząstek neutralnych, a także pęków(jetów).

Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

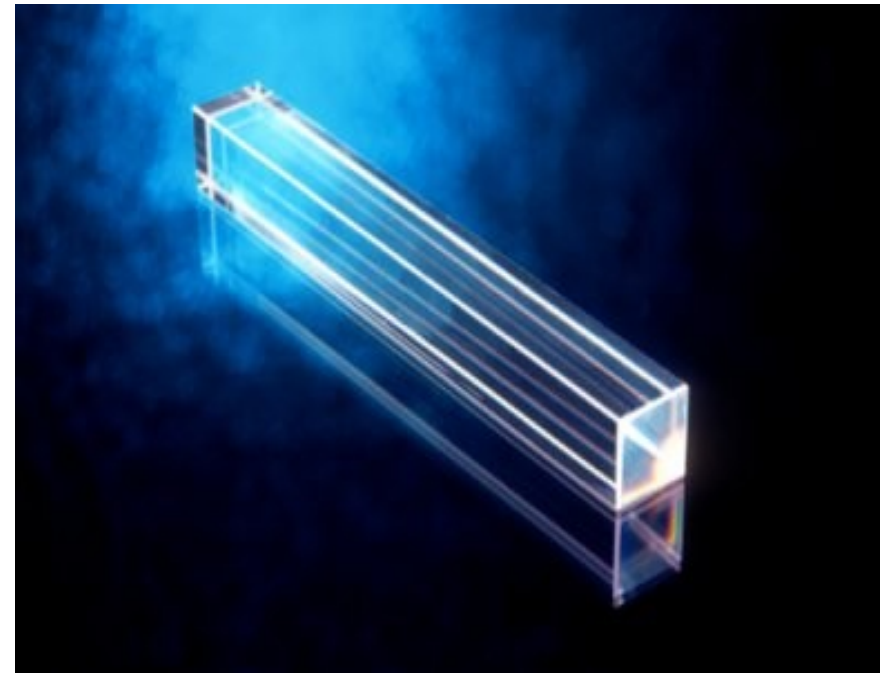
Przykład kalorymetru elektromagnetycznego: PHOS

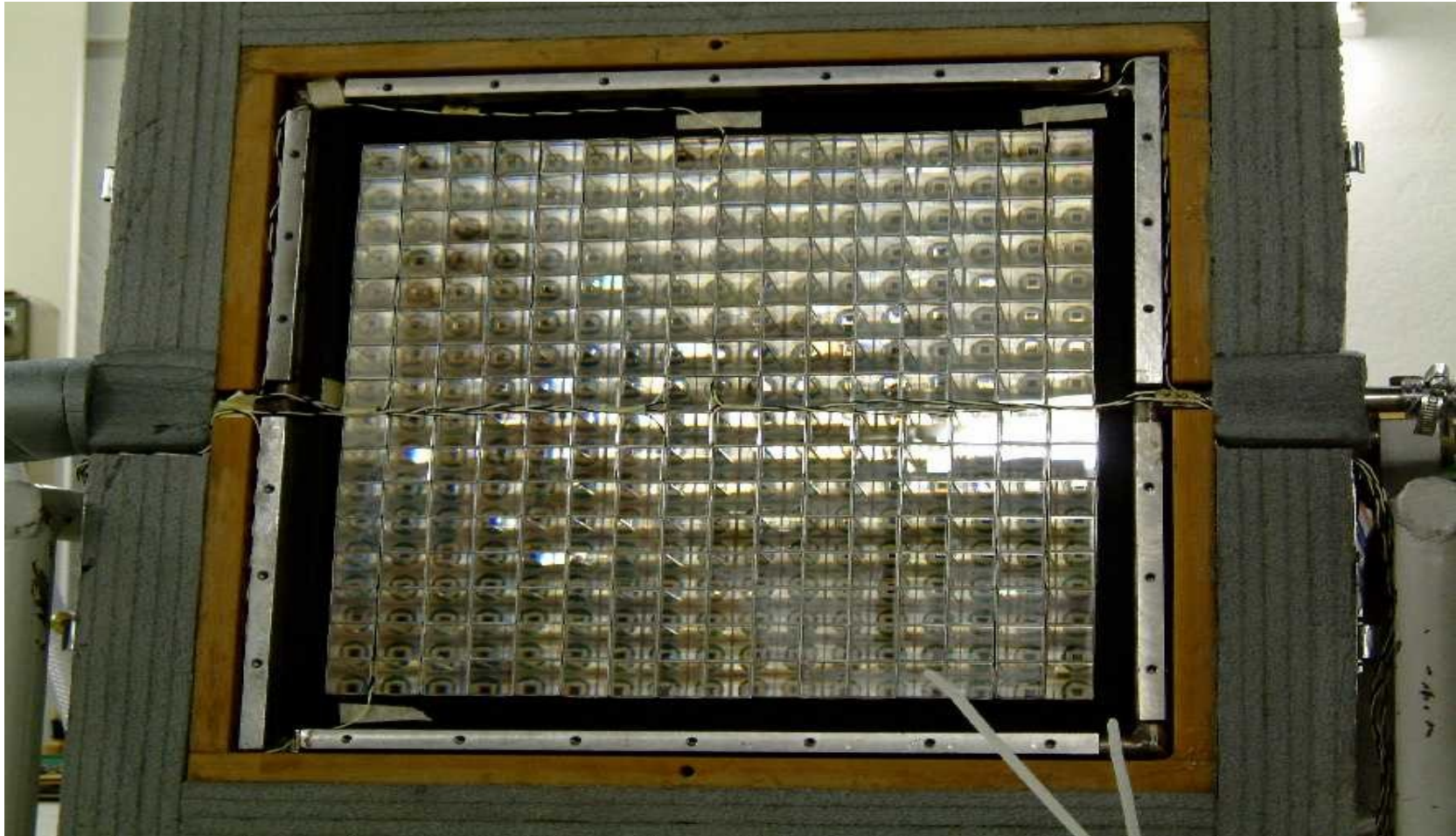
Dane Techniczne:

- 5 modułów, każdy moduł zawiera 56 x 64 kryształów PWO co razem daje 17920 kryształów
- rozmiar kryształu 22 x 22 x 180 mm²
- całkowita powierzchnia 8 m²
- całkowita waga kryształów 12.5t
- temperatura pracy -250 C



Przykład kalorymetru jednorodnego.





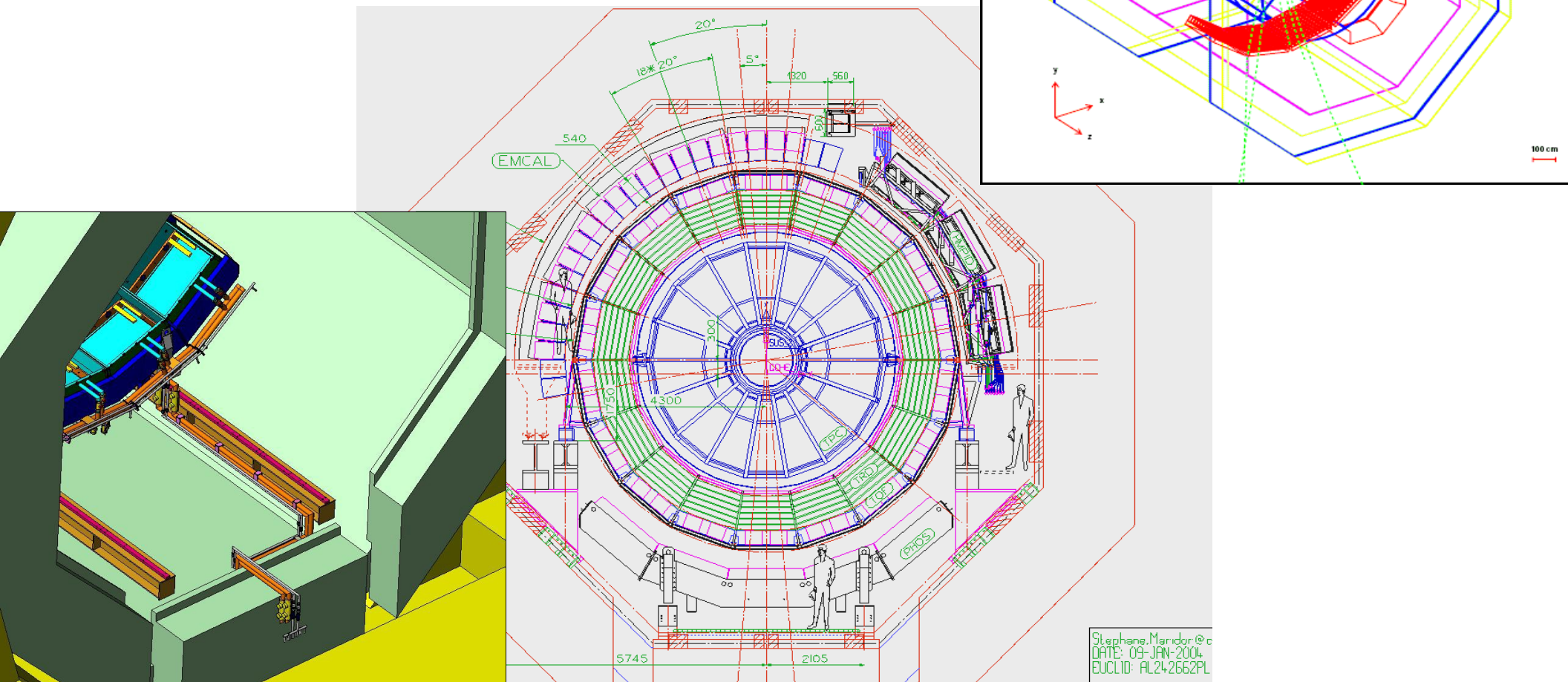
PHOS

Pojedynczy moduł PHOS przed zamontowaniem w detektorze ALICE. Zdjęcie pobrano ze strony: <http://cdsweb.cern.ch/>

Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Moduły detektora rozmieszczone co 20 stopni.

Całkowita powierzchnia 8 metrów kwadratowych.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Kalorymetry jako trygery przypadku (Kal. VETO – energia spektatorów, RING – energia poprzeczna).

Kalorymetr RING jest kalorymetrem niejednorodnym składającym się z warstw płyt żelaza przekładanych scyntylatorem.

Służy do wyznaczania energii poprzecznej: $E_t = \sum E_i \sin \phi_i$

Kalorymetr VETO (ZDC – Zero Degree Calorimeter) ma identyczną budowę, różni się umiejscowieniem.

Przy jego pomocy wyznaczmy energię spektatorów.

Zarówno VETO jak i RING służą do pomiaru centralności zderzenia.



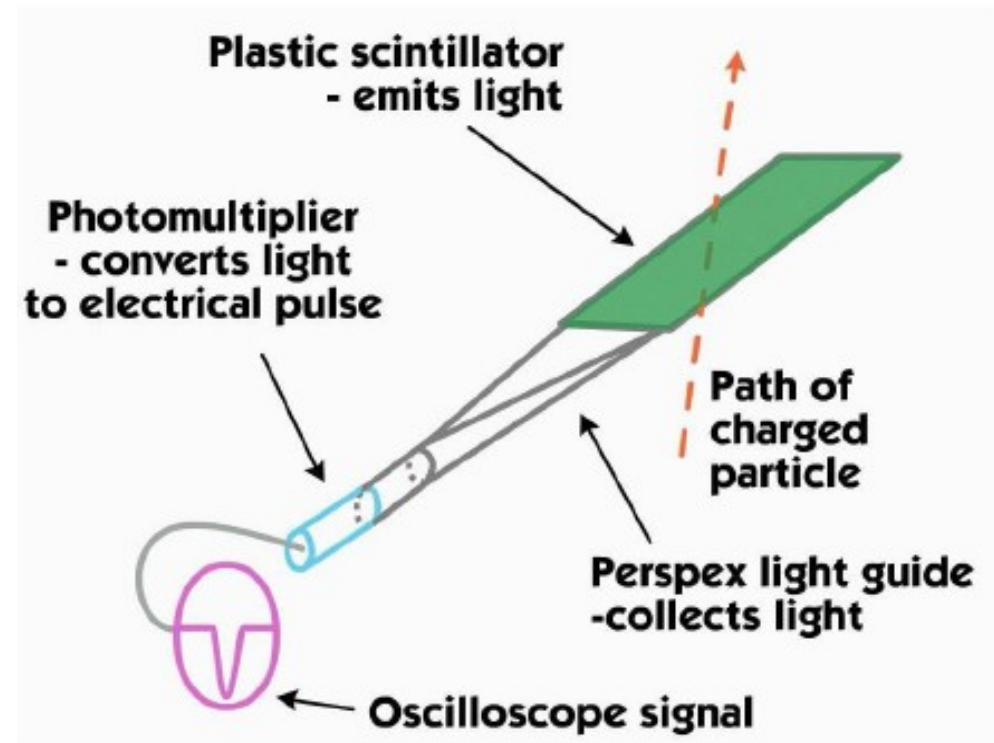
Licznik scyntylicyjny.

Działanie licznika scyntylicyjnego polega na zamianie promieniowania pierwotnego, tj. promieniowania jonizującego, na sygnał pośrednio, tj. promieniowanie świetlne.

Wykorzystuje się do tego zjawisko scyntytacji.

Światło scyntyлятора rejestrowane jest za pomocą fotopowielaczy.

Światło rozchodzące się w scyntylatorze jest kierowane do fotopowielacza za pomocą plastikowego światłowodu.

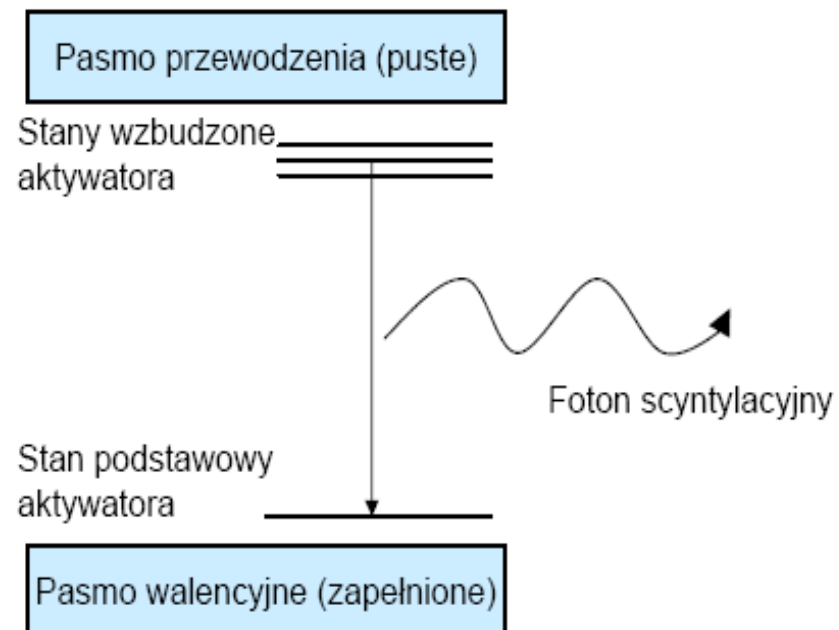
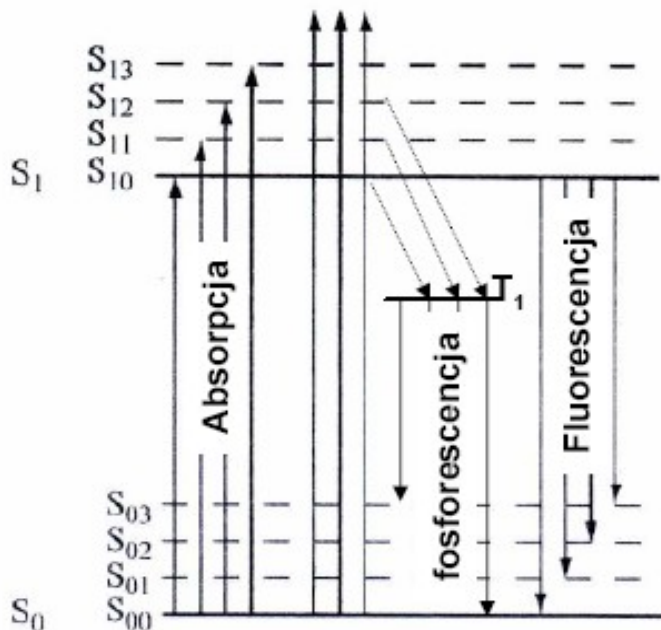


Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

W scyntylatorach **organicznych** energie wzbudzenia \gg energie wibracyjne stanów elektronowych ~ 0.1 eV. Ich wzbudzenie wywołuje jonizację.

Oscylatory organiczne są przezroczyste dla światła.

W scyntylatorach **nieorganicznych** następuje przenoszenie elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

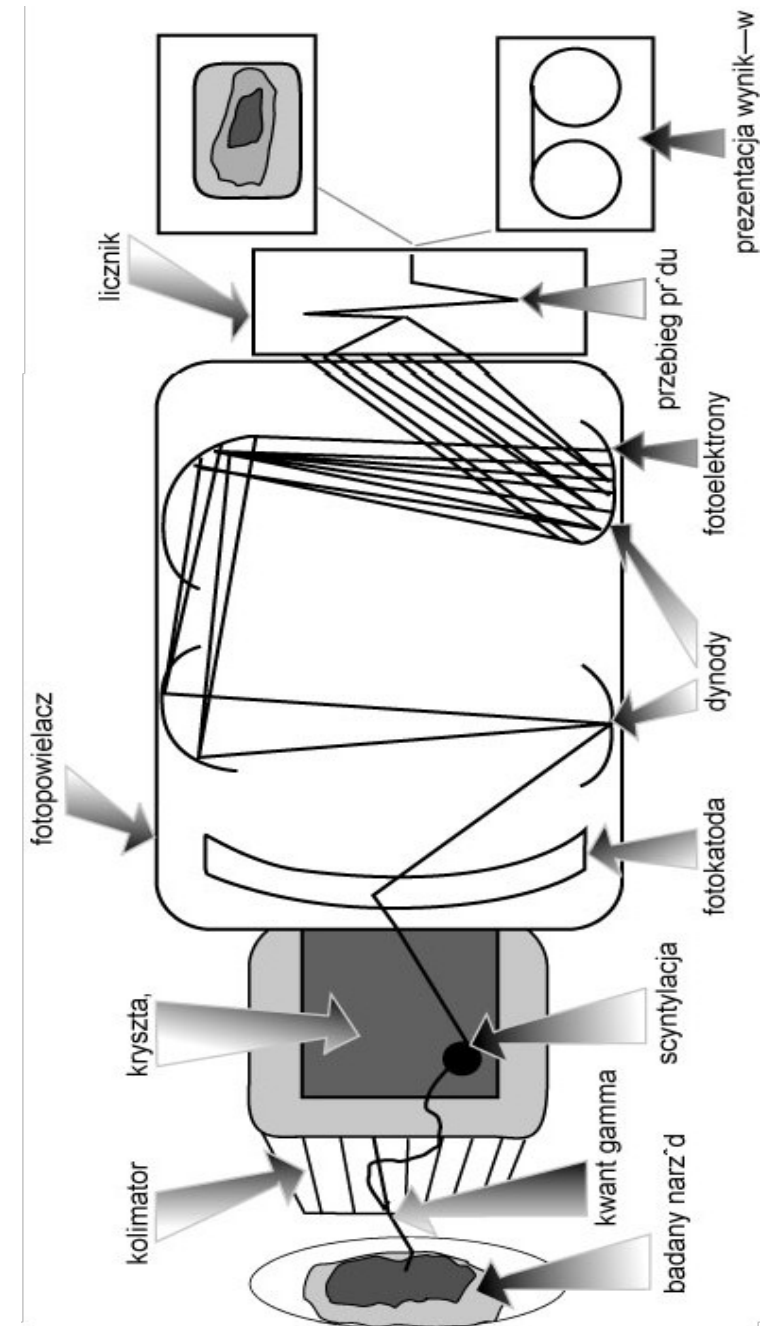
Scyntylatory			
Nieorganiczne	τ	Plastikowe	τ
NaJ(Tl)	250 ns	NATON 136	1.6 ns
CsJ(Tl)	1100 ns	Pilot B	1.8 ns
LiJ(Eu)	1200 ns	NE 102A	2.4 ns
Organiczne		Ciekłe	
ZnS Ag	200 ns	NE 211	2.6 ns
Antracen	27 ns	NE 218	3.9 ns
Stilben	4.5 ns	NE 223	7.1 ns

Obudowa przedwzmacniacza z dyskrminatorem

Obudowa fotopowielacza

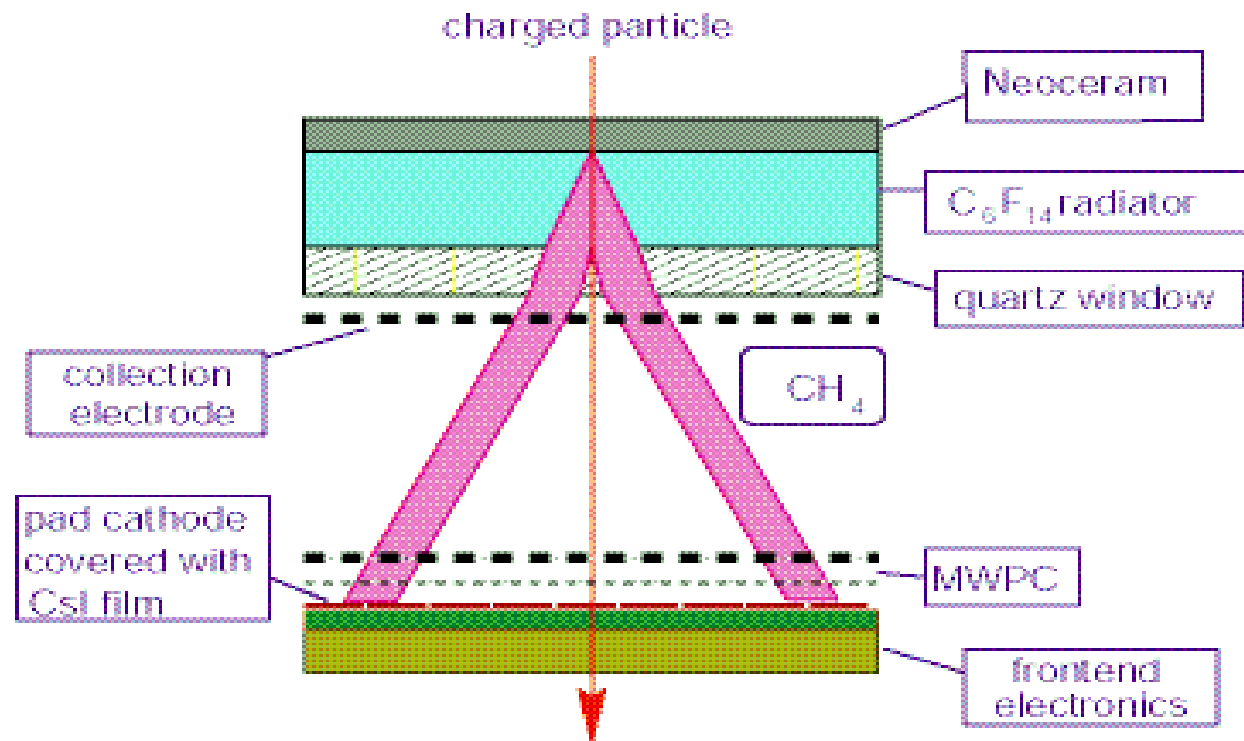
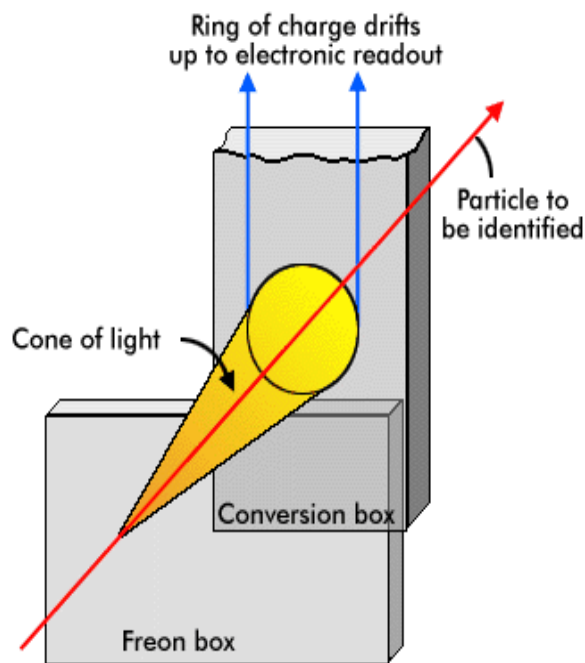


Kryształ NaI(Tl)



Detektor Czerenkowa (progowy i różniczkowy licznik Czerenkowa)

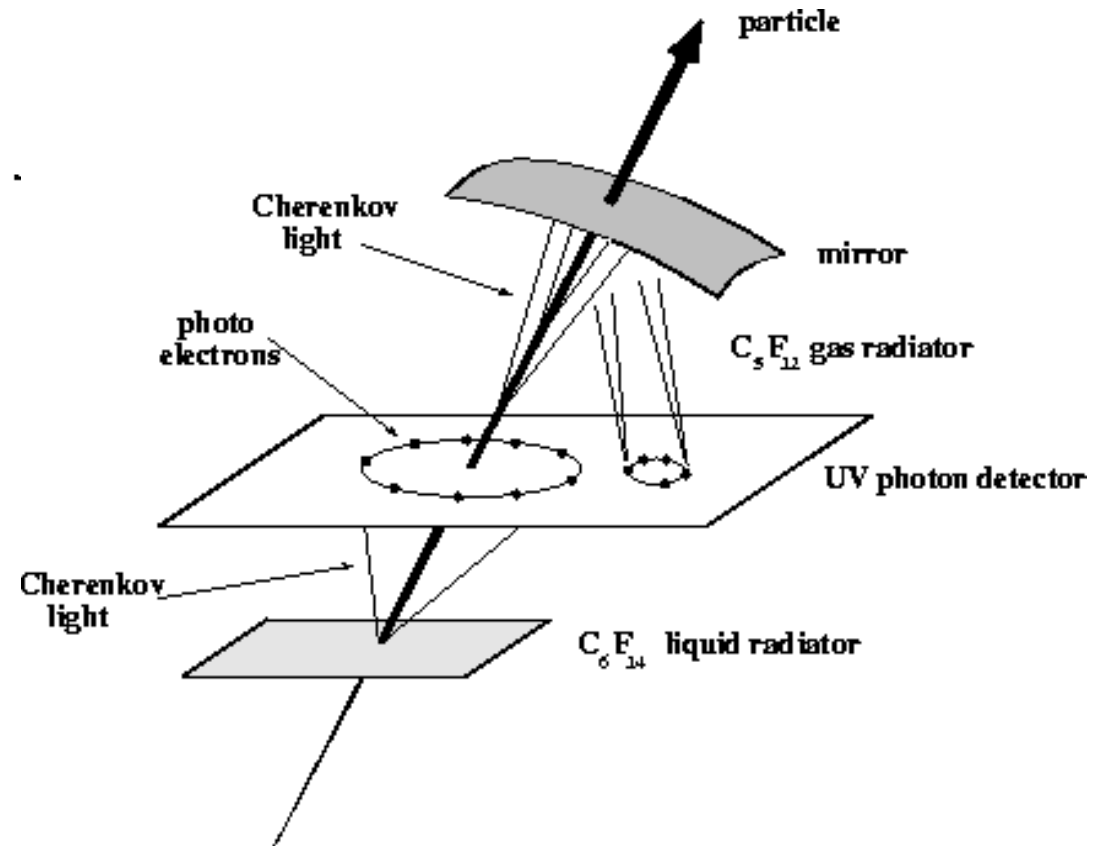
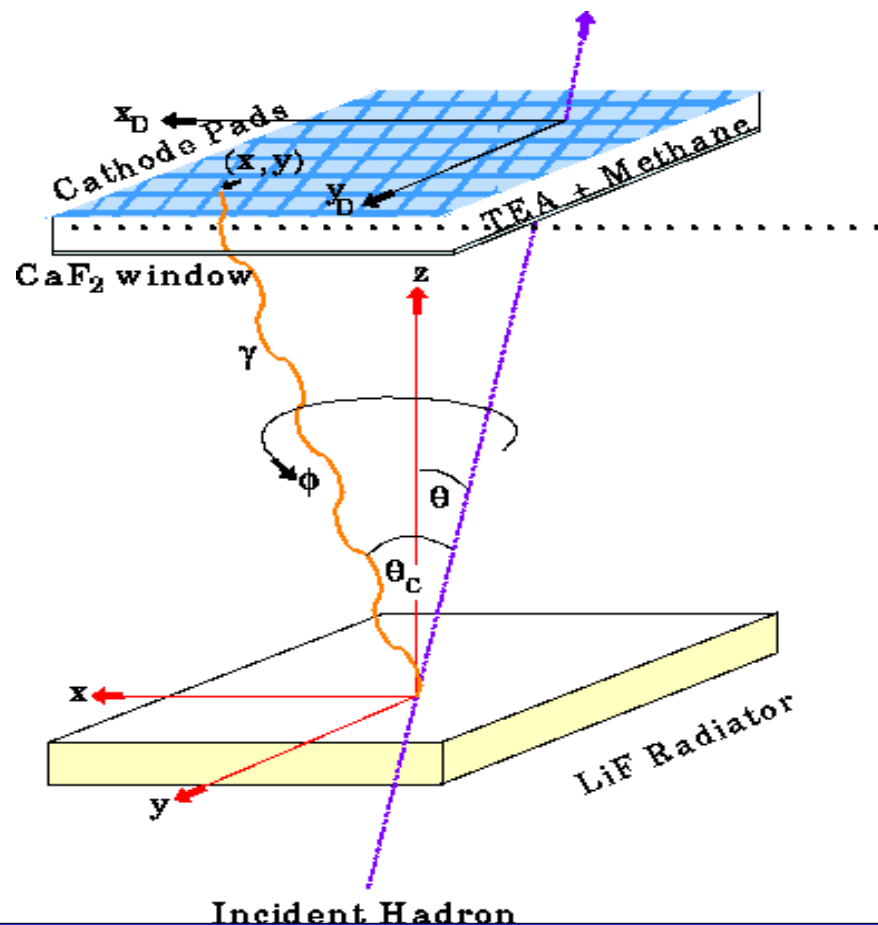
- Detekcja cząstek o dużym pędzie .
- Promieniowanie Czerenkowa emitowane jest, gdy naładowana cząstka przechodzi przez ośrodek z prędkością $\beta > \beta_{th} = 1/n$ (większą niż c w tym ośrodku).



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Progowy licznik Czerenkowa stosujemy do odróżniania cząstek relatywistycznym o tym samym pędzie, ale różnych masach.

Różniczkowy licznik Czerenkowa służy do identyfikacji cząstek poprzez pomiar kąta promieniowania Czerenkowa.

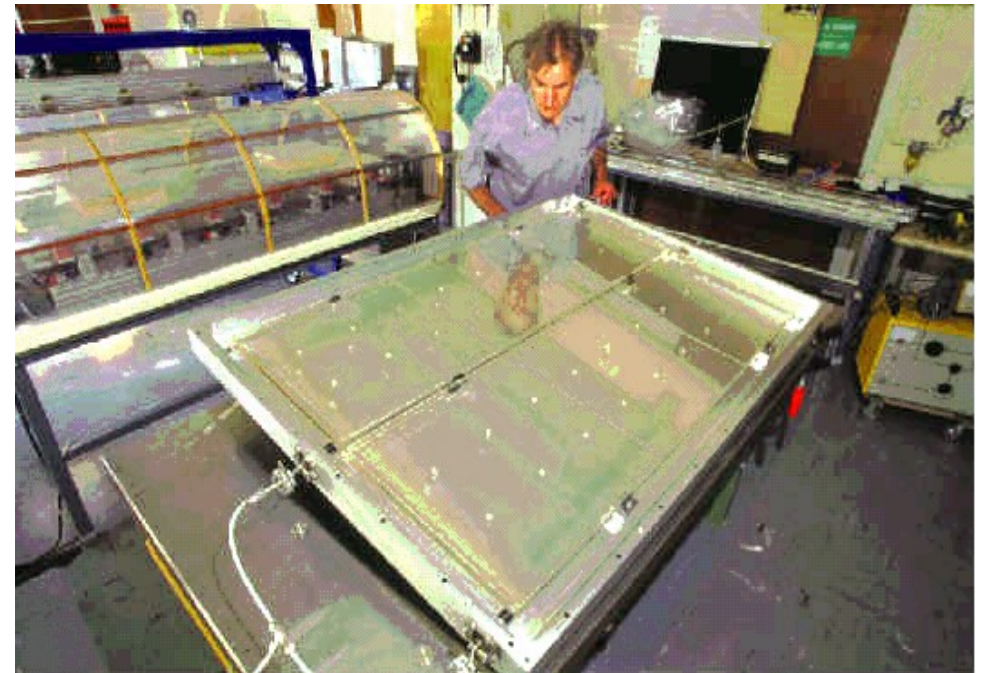
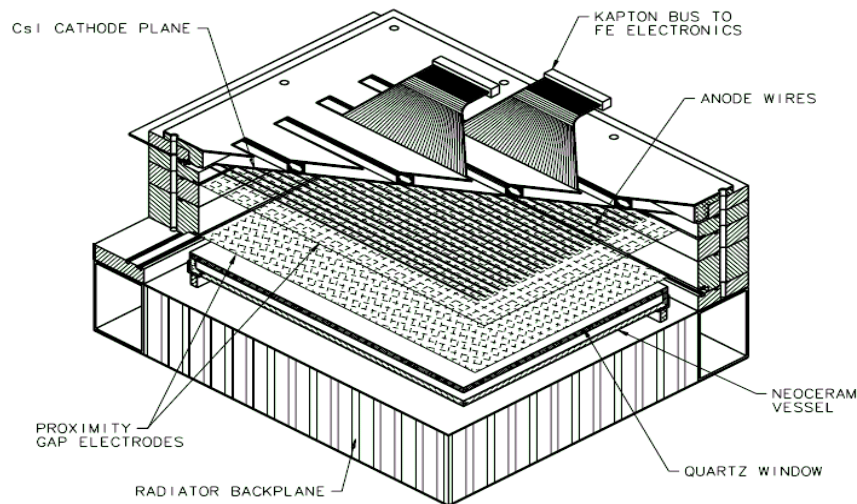


Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Detektor Czerenkowa na przykładzie High Momentum Particle Identification (HMPID)/(PID)

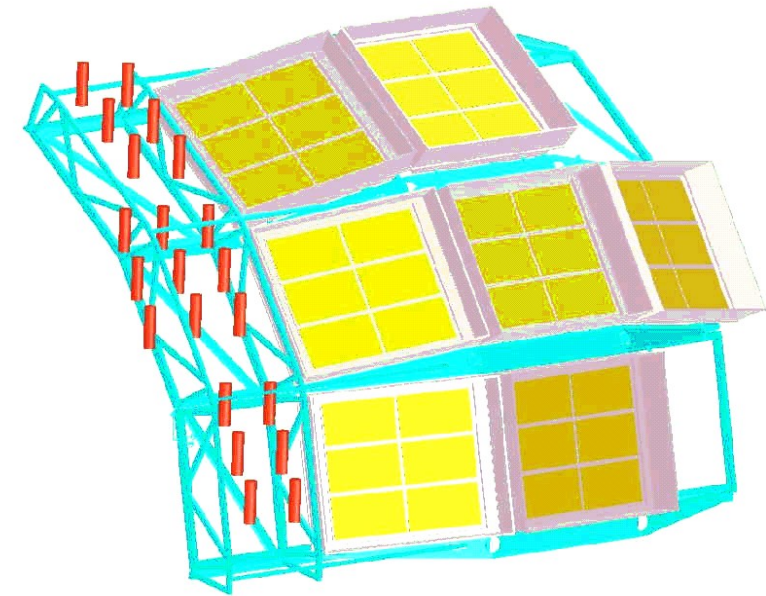
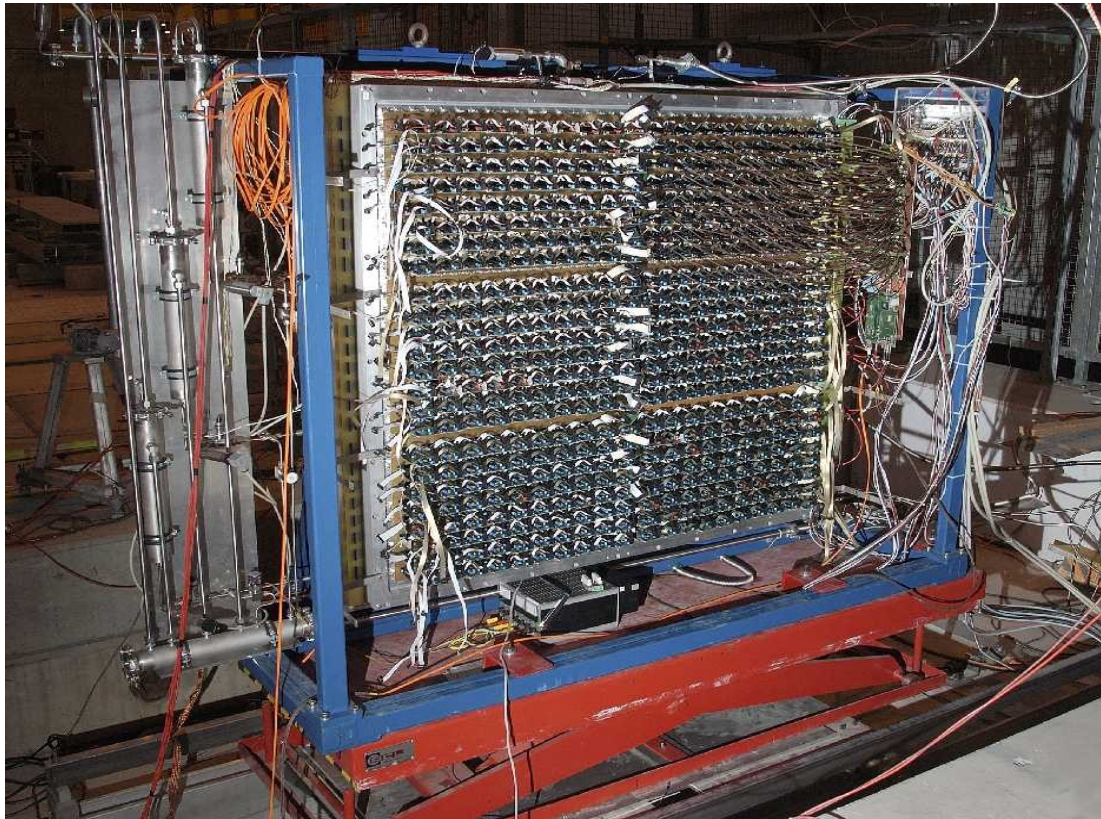
- Czynnikiem roboczym jest ciekiły C₆F₁₄ perfluorohexan.

- Do detekcji używa się sześciu fotopowielaczy.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

- HMPID rozszerza możliwości identyfikacji detektora PID[PPC (Parallel Plate Chamber)], o możliwość rejestracji hadronów o energiach nawet do 3GeV.



HMPID

Pojedynczy moduł HMPID przed zamontowaniem w detektorze ALICE. Zdjęcie pobrano ze strony: <http://cdsweb.cern.ch/record/780070>

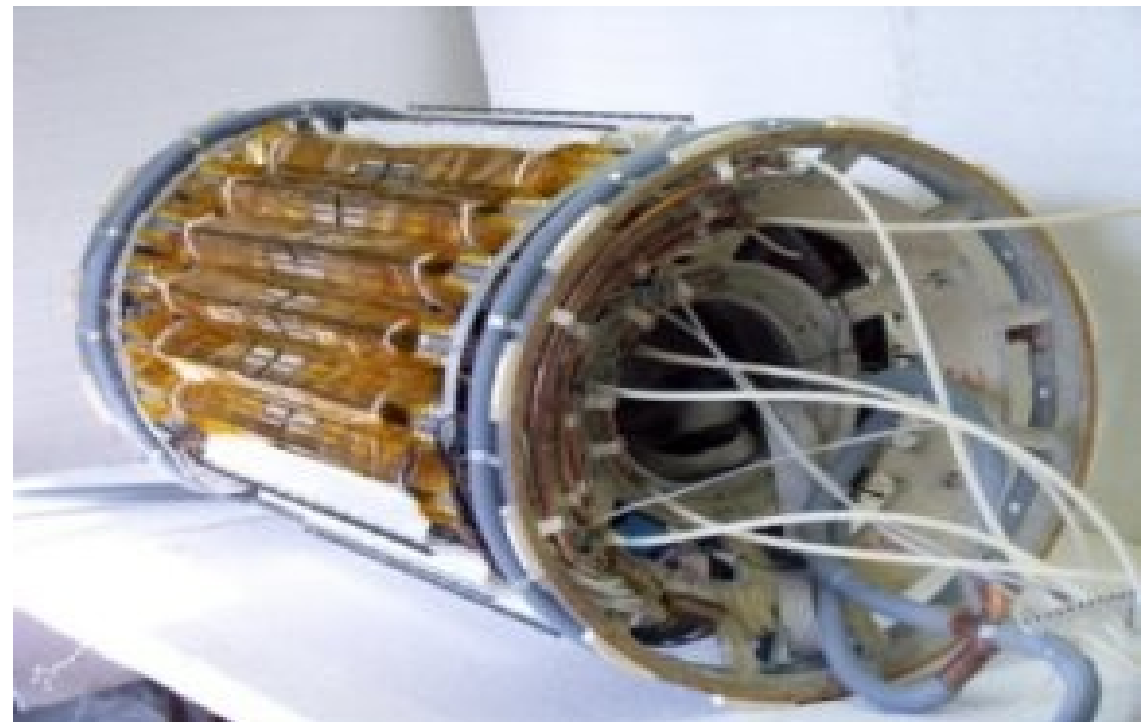
Detektory półprzewodnikowe.

Detekcja wtórnego wierzchołka rozpadów hiperonów, oraz identyfikacja i rekonstrukcja torów cząstek o małych pędach poprzecznych, tych które nie dotrą do TPC.

Detektor składa się z sześciu warstw detektorów krzemowych, tzn:

- dwóch pikselowych;
- dwóch dryftowych;
- dwóch paskowych;

Pęd poprzeczny to składowa pędu cząstki prostopadła do kierunku wiązki.



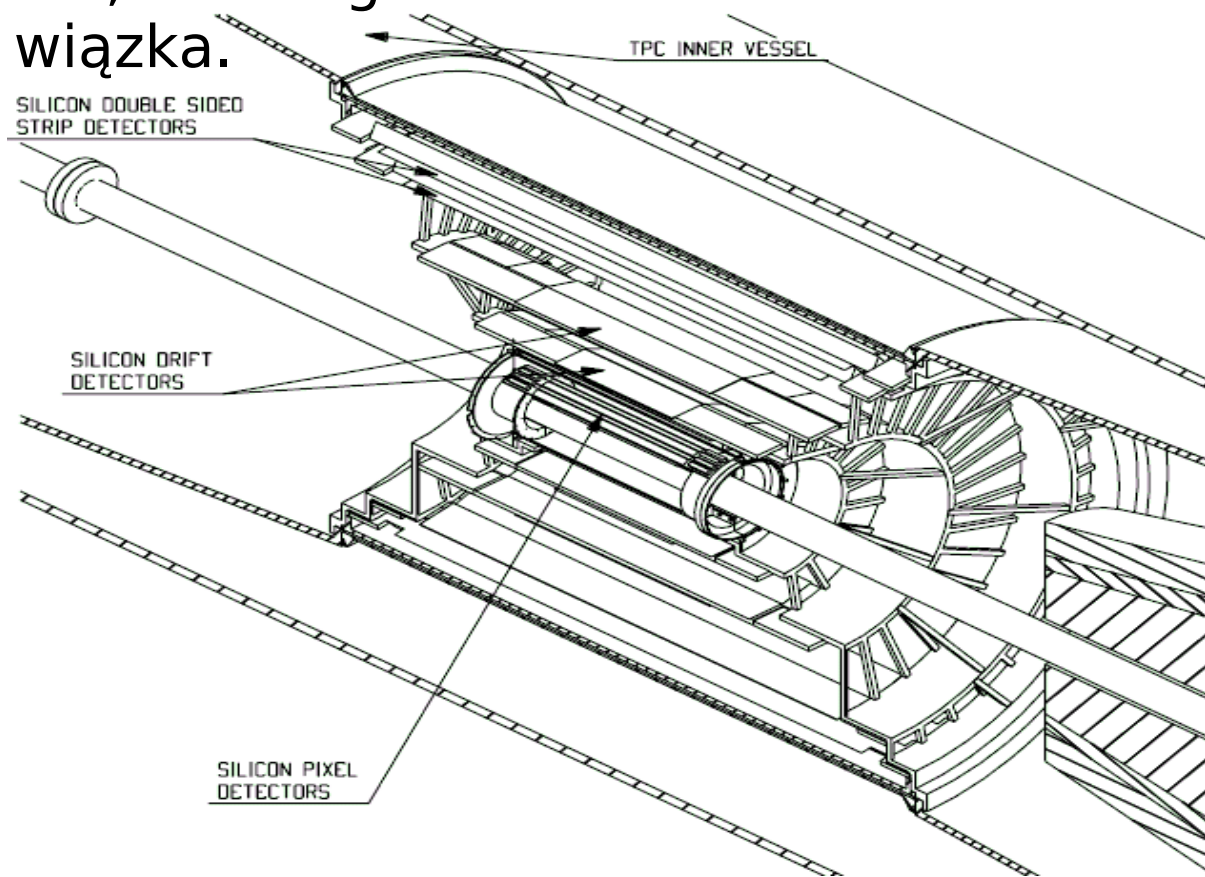
Layer	Type	r (cm)	$\pm z$ (cm)	Area (m ²)
1	pixel	3.9	12.25	0.06
2	pixel	7.6	16.3	0.17
3	drift	14	21.1	0.37
4	drift	24	29.6	0.89
5	strip	40	45.1	2.27
6	strip	45	50.4	2.85
Total area = 6.61 m ²				

Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Wewnętrzna część detektora jest dopasowana do promienia kanału, z którego rozchodzą się wiązki.

Detektor otacza TPC.

Liczba warstw została dobrana tak aby możliwa była detekcja rodzaju cząstki, a także toru. W tym celu potrzeba co najmniej cztery warstwy do pomiaru dE/dx .



Parametry detektorów :

Type	Spatial precision (μm)		Two-track resolution (μm)		Cell size (μm)	Module size (mm)	Channels per module	Electr. channels total (k)	Power dissipated	
	$r\phi$	z	$r\phi$	z					barrel (W)	end-caps (W)
Pixel	15	90	100	600	50×300	13.3×81	65536	14420	450	-
Drift	20	30	200	420	-	70×87	2×384	192	350	1950
Si Strip	30	860	200	7000	95×41000	75×42	2×768	2620	<3000	<1000

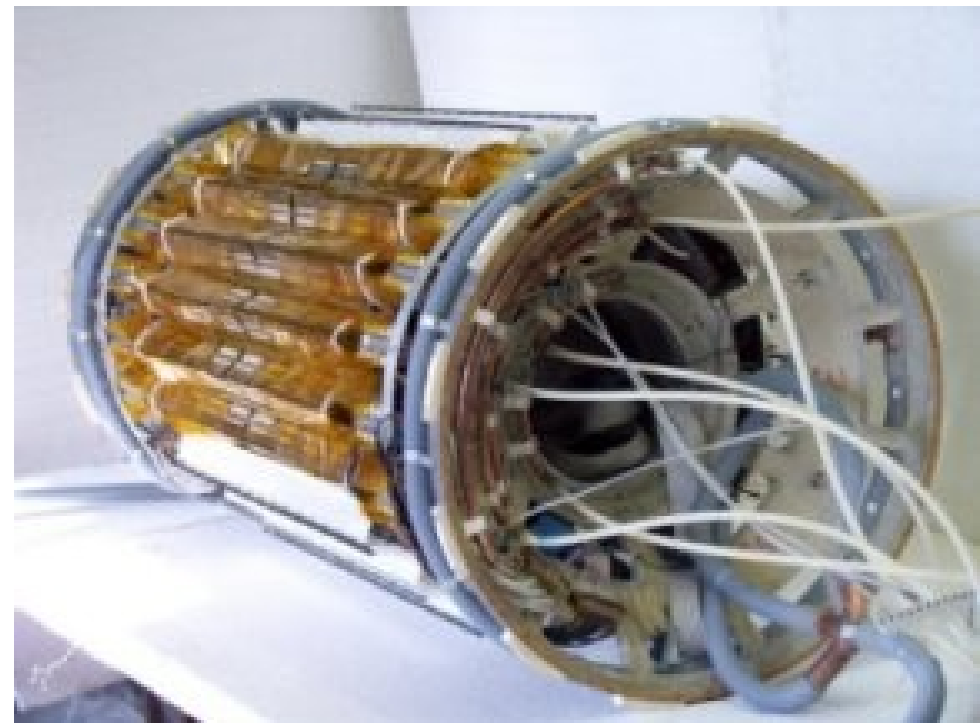
Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Podczas eksperymentów dla czterech wewnętrznych warstw gęstość cząstek jest tak duża, że muszą być to detektory naprawdę dwuwymiarowe ($r < 24\text{cm}$).

Zastosowano do tego celu detektory pikselowe (silicon pixel detector, SPD) oraz (silicon drift detector SDD).

W warstwach zewnętrznych zastosowano detektory paskowe (Silicon Strip Detector SSD).

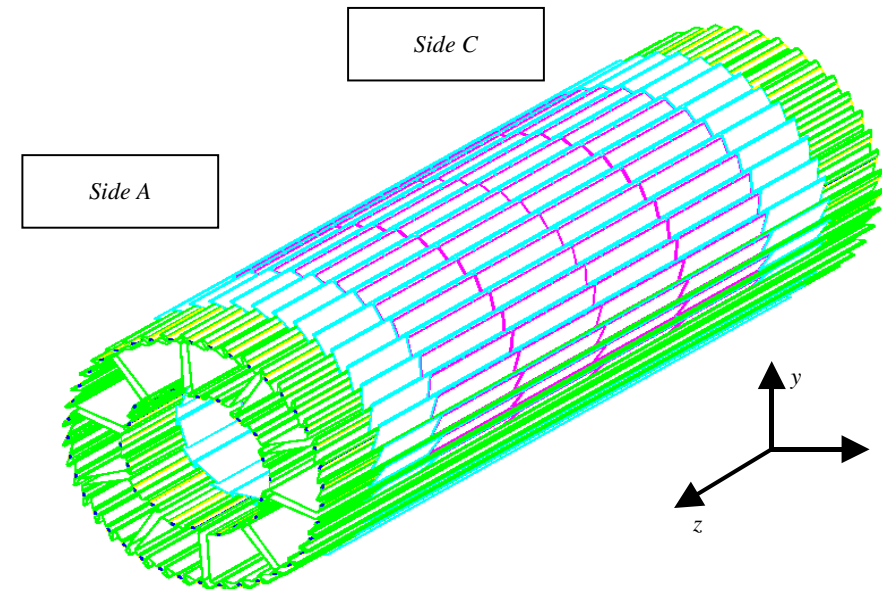
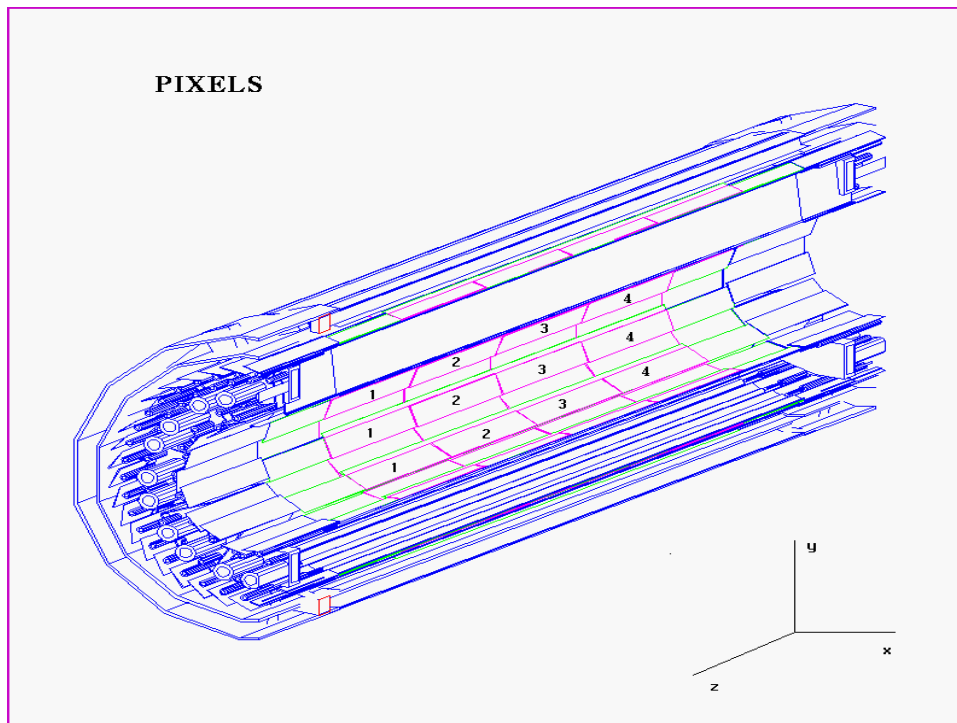
Za wyjątkiem dwóch wewnętrznych warstw detektory mają analogowe złącze służące do zbierania danych identyfikacji cząstek, poprzez pomiary rozkładu dE/dx w zakresie nierelatywistycznym, co umożliwi zastosowanie ITS jako spektrometru cząstek o małym pędzie.



Detektor Pikselowy Silicon Pixel Detector (SPD)

Detektor zbudowany jest z dwóch warstw osadzonych na lekkich elementach zwanych “klepkami”, na których umieszczone są zarówno elektronika, jak i same detektory.

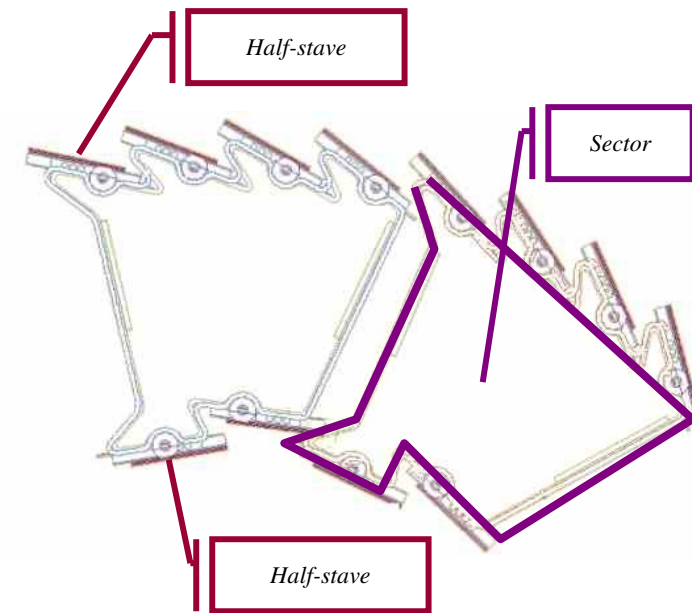
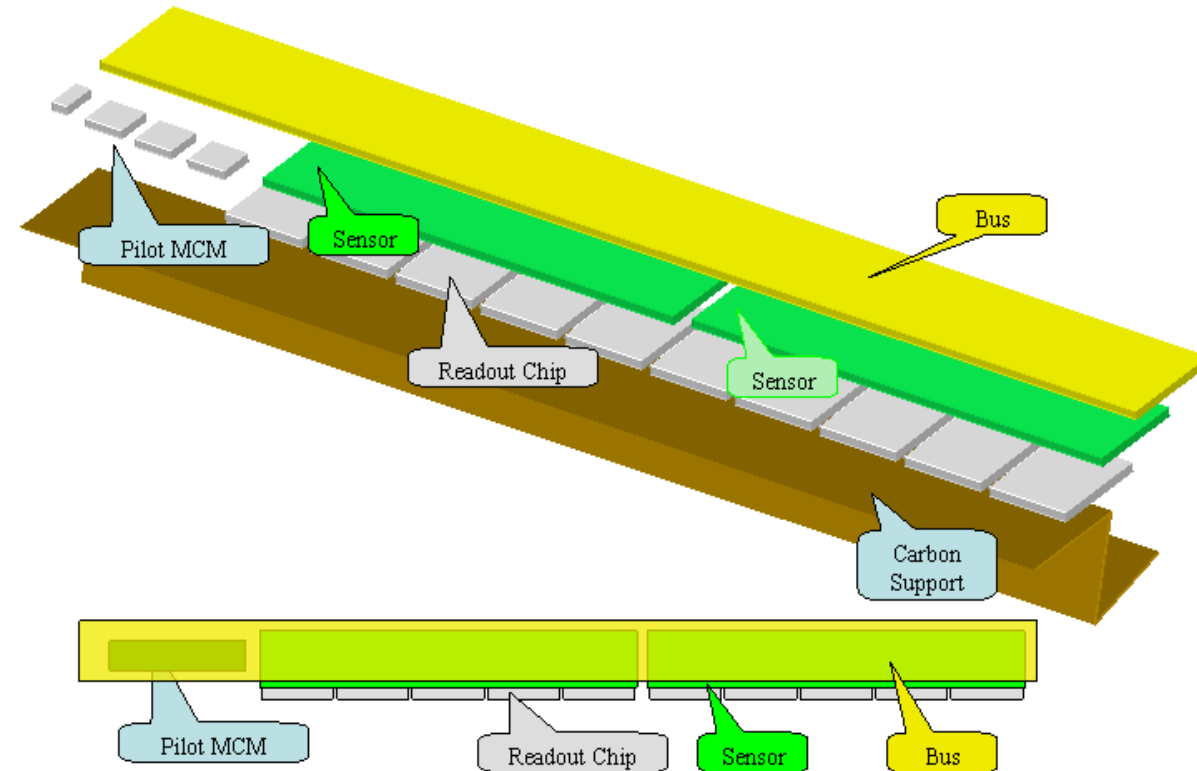
Warstwy z znajdują się odpowiednio 3.9cm oraz 7.6cm.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Budowa "klepki".

Na każdej klepce znajdują się matryce czujników pikselowych 256x256 komórek, oraz specjalizowane układy elektroniczne ALICE1 dla każdej matrycy, razem dziesięć.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

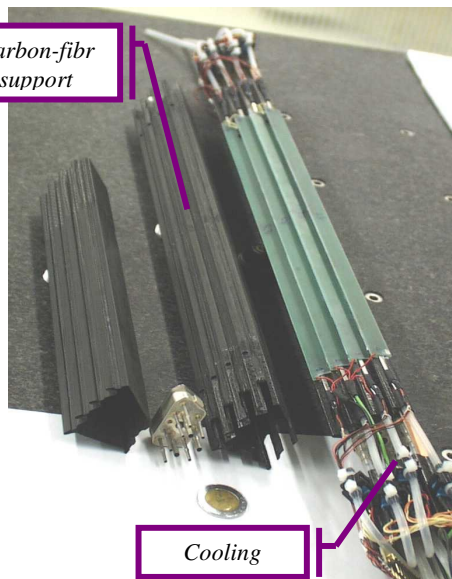
W sumie w detektorze znajduje się 60 "klepek".

Kleпки pogrupowane są w grupy po 4 w każdej.

Detektor SPD zawiera:
60 "klepek",
240 drabinek
i 9,8 miliona komórek



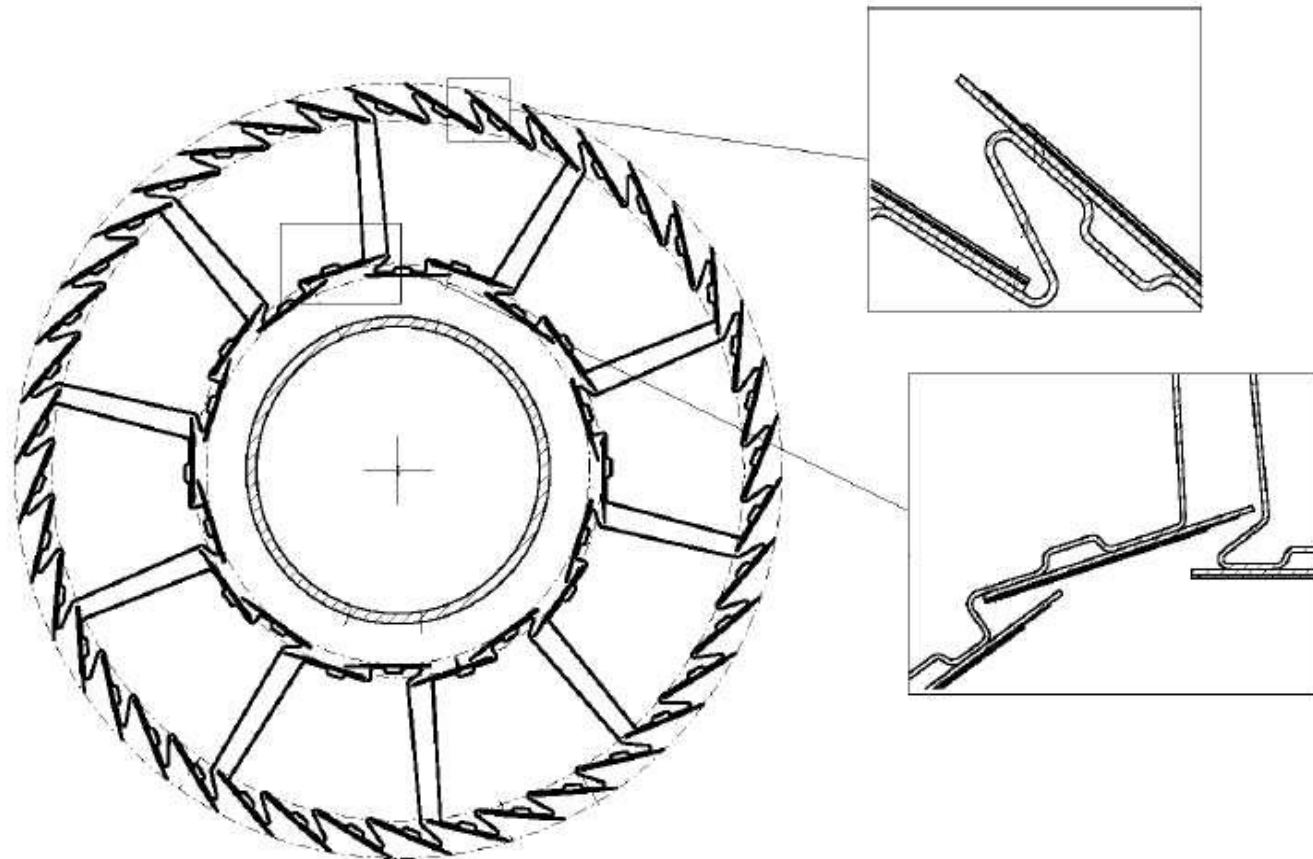
ITS SPDs w detektorze ALICE
Montaż detektorów pikselowych SPD (zielone płytki umieszczone). Zdjęcie pobrano ze strony:
<http://cdsweb.cern.ch/record/1110754>



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

W sumie w detektorze znajduje się 60 “klepek”.

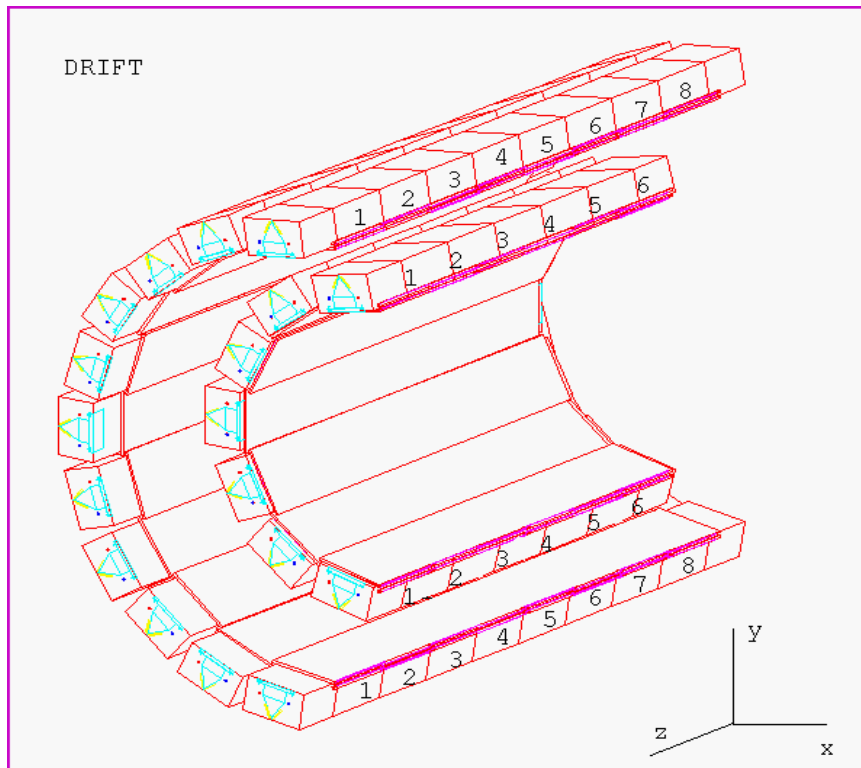
Kleпки pogrupowane są w grupy po 4 w każdej.



ITS SPDs w detektorze ALICE
Sposób montażu dwóch warstw detektorów
pikselowych SPD. Rycina pochodzi z Technical Design
Report: Inner
Tracking System.

Detektor dryftowy Silicon Drift Detector(SDD)

Dzięki SDD możemy wyznaczać naładowanych cząstek, a także szacować straty energii poniesionych przez nie w trakcie przechodzenia przez detektor, dzięki czemu możemy je zidentyfikować.

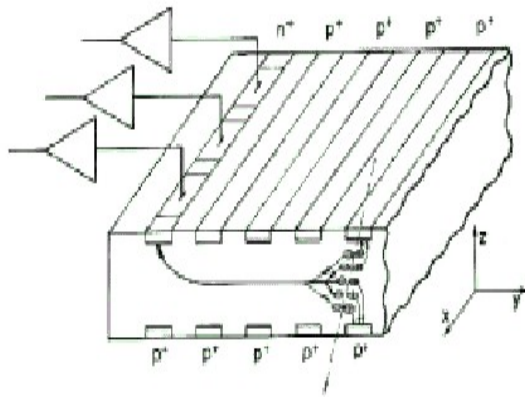


Jedna warstwa zawiera w rzędzie po odpowiednio 6 i 8 detektorów.

Składają się z 14 i 22 drabinek.

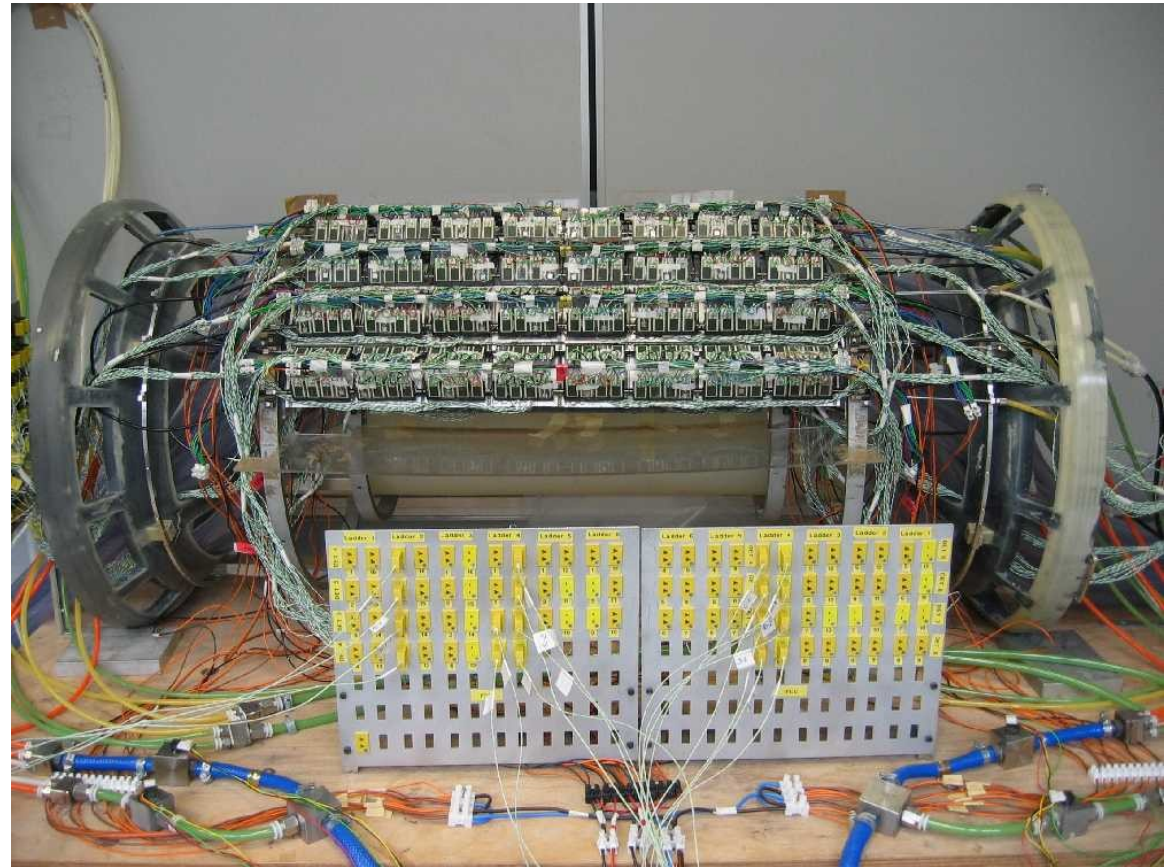
Obszar aktywny to $7.25 \times 7.53 \text{cm}^2$

Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.



Przelatująca cząstka wytwarza elektron, który transportowany jest do anody.

Budowa SSD w ITS:
-260 modułów SDD,
każdy o wymiarach 75x73 mm;
- każdy moduł zawiera 34 miliony komórek o powierzchni 130x300 μm i grubości 300 μm



ITS SDDs w detektorze ALICE
Widoczna jest zewnętrzna warstwa detektorów dryftowych umieszczonych na stelażu. Zdjęcie pochodzi ze strony: <http://cdsweb.cern.ch/>

Detektor Paskowy **SSD Silicon Strip Detector**

Ten typ detektora został umieszczony na zewnątrz ITS. Jego zadaniem jest rejestracja krótko życiowych cząstek. Zwiększa rejestrację pędów strat energii.

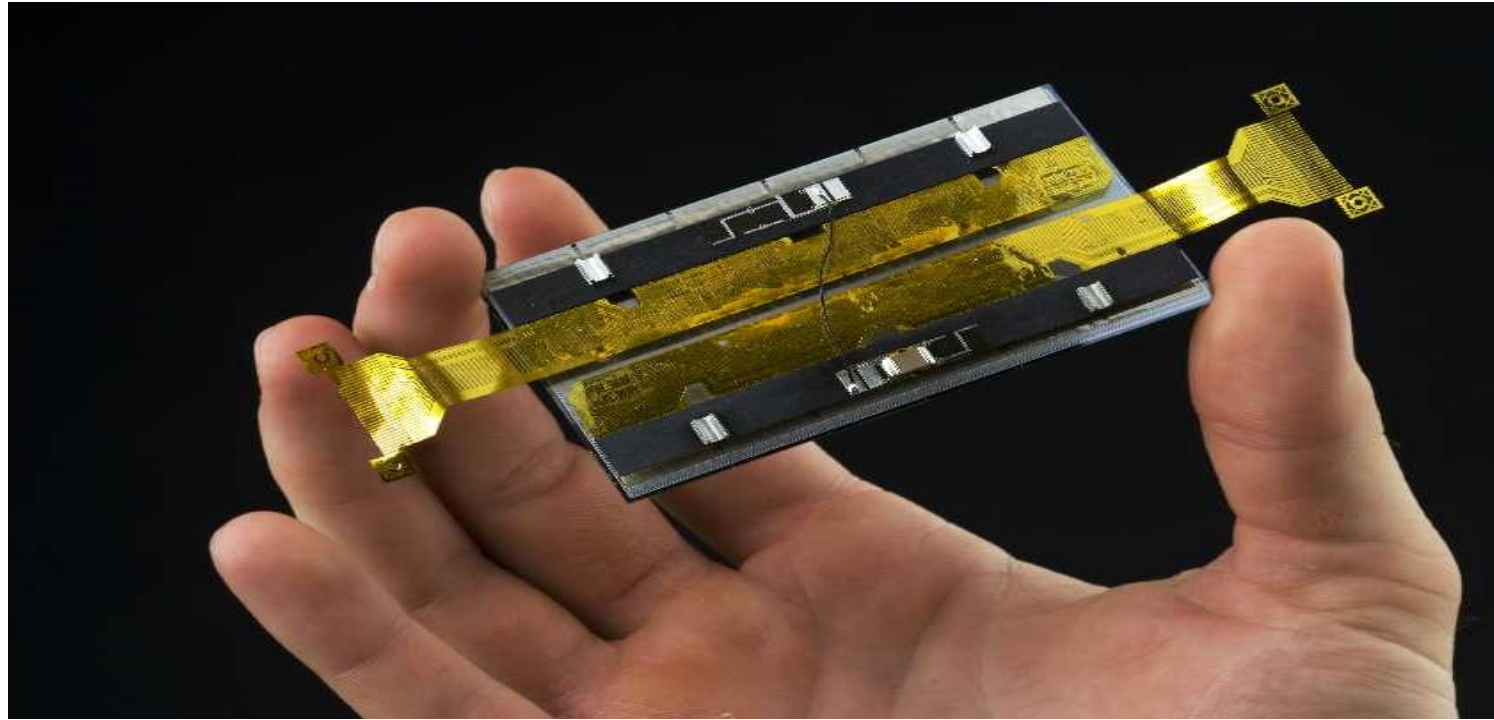


Dwie zewnętrzne warstwy:

- piąta składająca się z 786 elementów (40cm od osi wiązki);
- szósta składająca się z 988 elementów (40cm od osi wiązki);

ITS SSDs w detektorze ALICE
Widoczna jest zewnętrzna warstwa detektorów paskowych umieszczonych na stelażu. Zdjęcie pochodzi ze strony:

<http://cdsweb.cern.ch/>



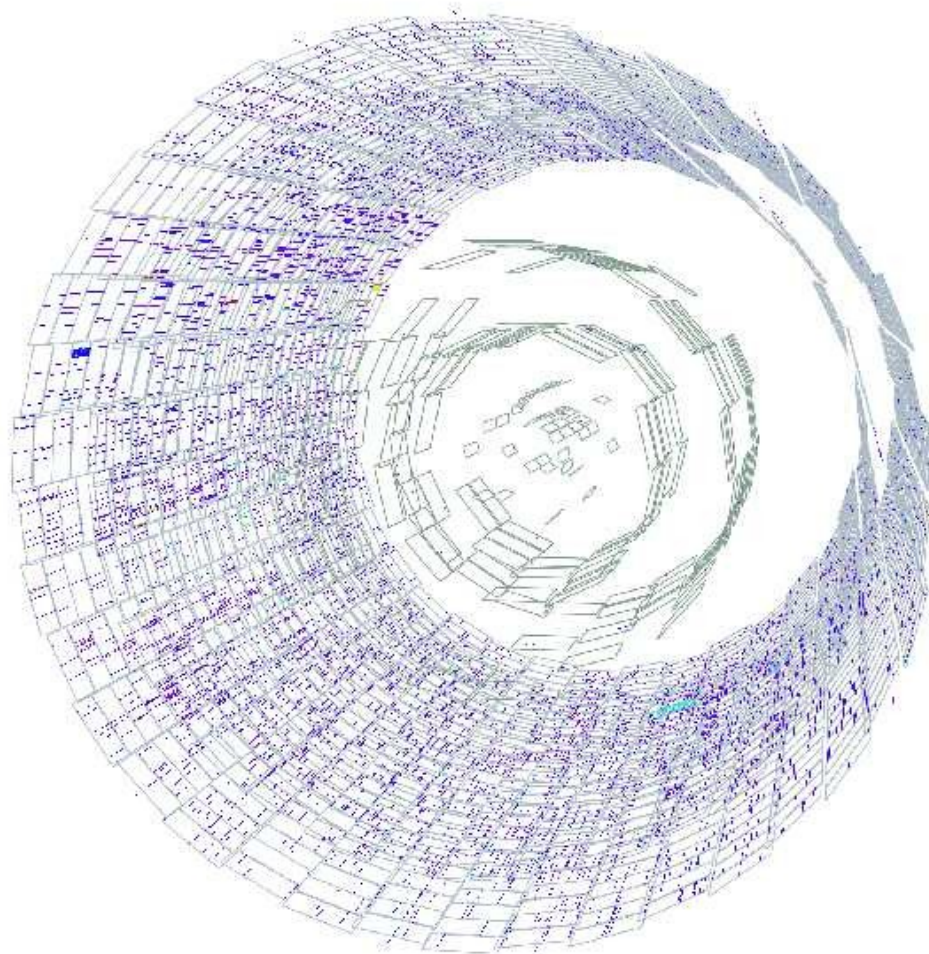
ITS SSD w detektorze ALICE

Widoczny jest pojedynczy segment detektora paskowego. Zdjęcie pochodzi ze strony: <http://cdsweb.cern.ch/>

Elektrony i dziury elektronowe powstają w wyniku przejścia cząstki naładowanej i trafiając do pasków po przeciwnych stronach modułu detektora.

Dla konkretnych położeń i numerów pasków, można ustalić, którą przeszła dana cząstka.

Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.



Wyniki pomiaru przy pomocy detektora ITS w detektorze ALICE
Widoczne jest sześć warstw detektora (licząc os środka): pierwsza i druga to SPD, trzecia i czwarta to SDD, piąta i szósta to SSD. Niebieskie punkty to zarejestrowane sygnały. Jest to wizualizacja wyniku pomiaru jednej wiązki krążącej w LHC („run” 101235).

Komora pęcherzykowa.

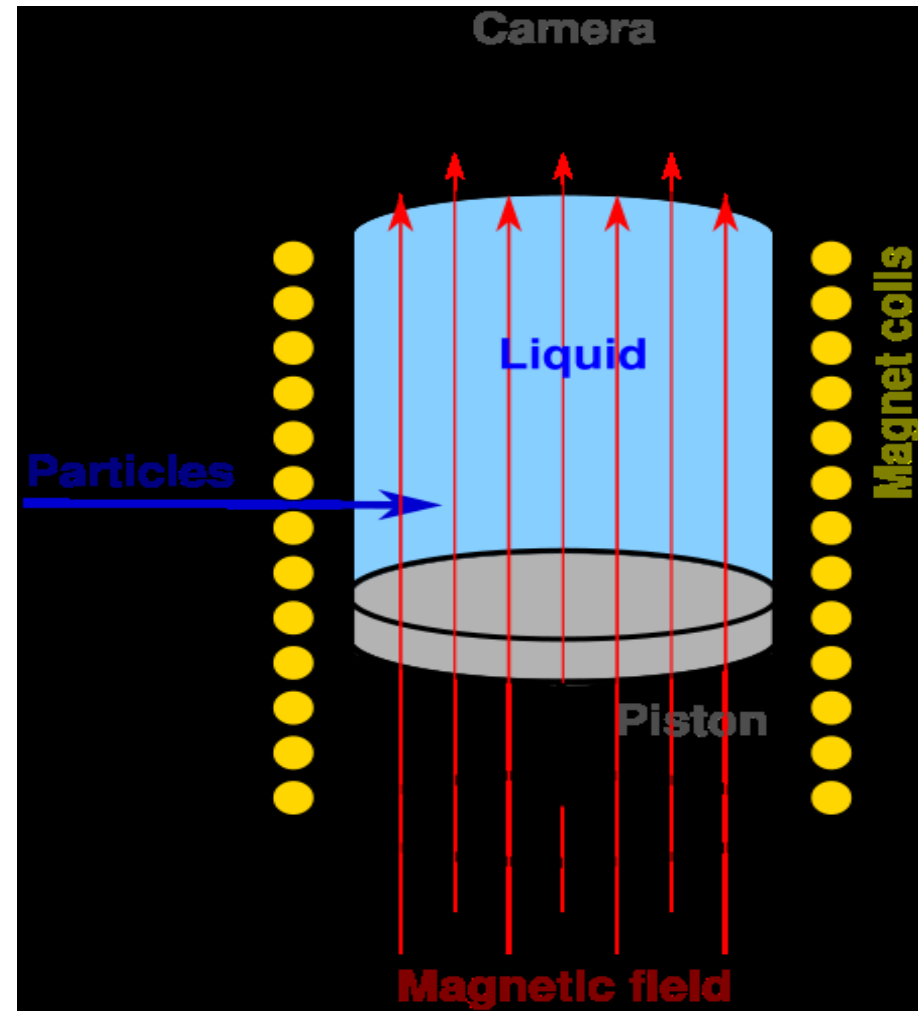
Komora pęcherzykowa wynaleziona przez Glasera w 1952 roku.

Bardzo przydatna przy oddziaływań z dużą liczbą cząstek wtórnych. Wrzenie przegrzanej cieczy zaczyna się od powstawania zarodki na bąbelkach gazu, które z kolei powstają w wyniku przejścia naładowanej cząstki.

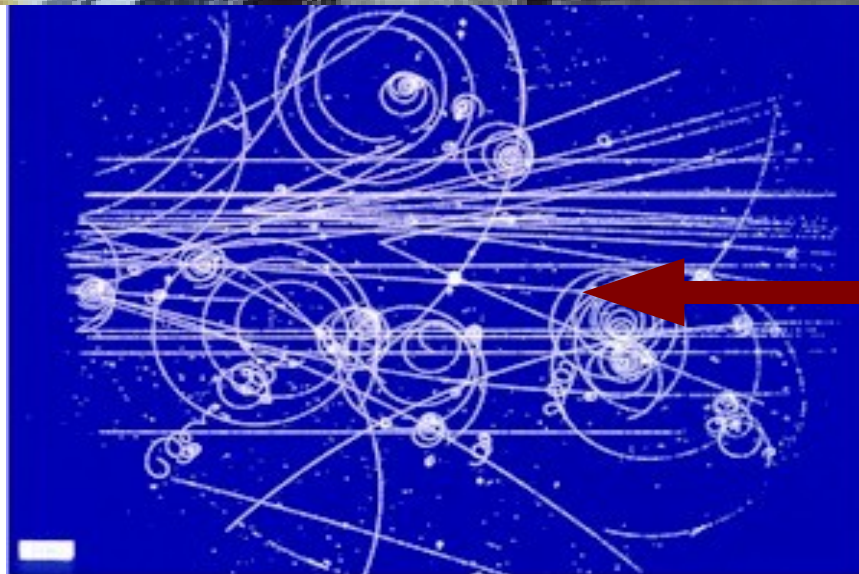
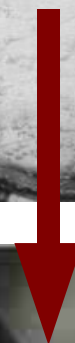
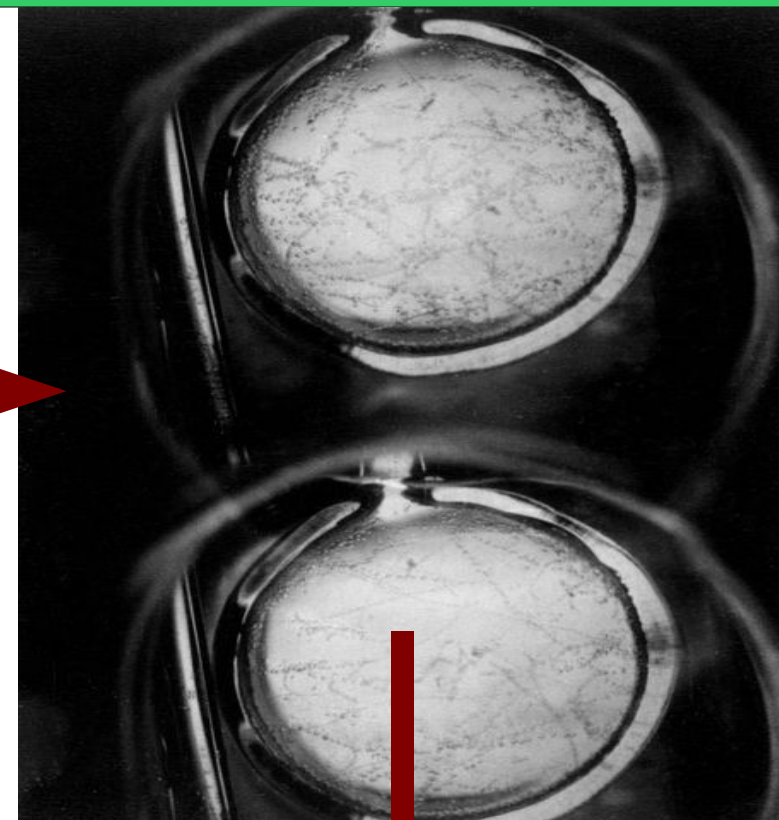
Bąbelki powstają na jonach.

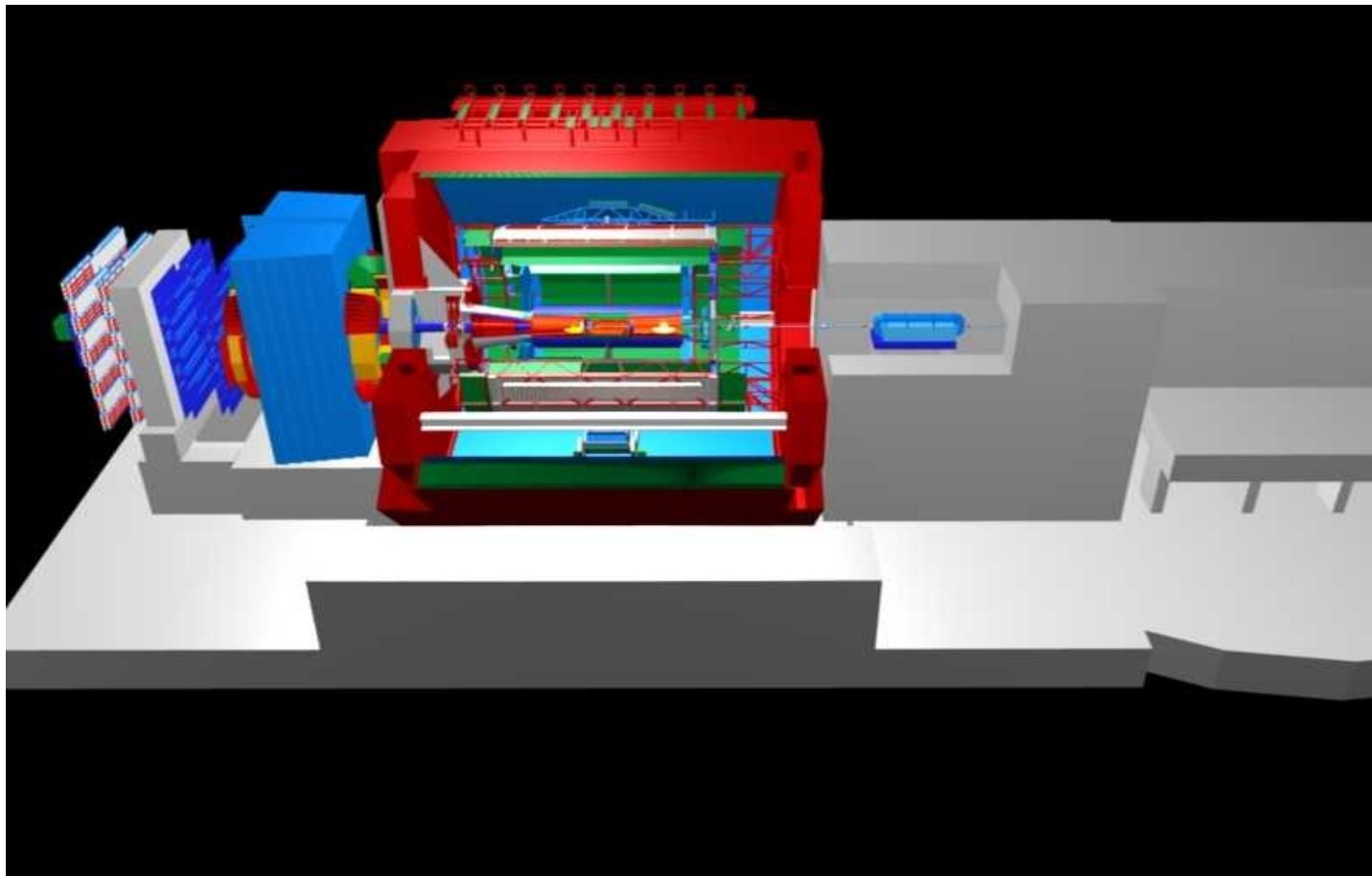
W cieczy wypełniającej ciśnienie wynosi od 5 do 20 atmosfer.

Jako ciecz roboczą najczęściej stosuje się wodór, deuter, czasem też ciecze cięższe takie jak np. mieszanina neonu z wodorem, propan lub freon.



Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.





Detektor ALICE

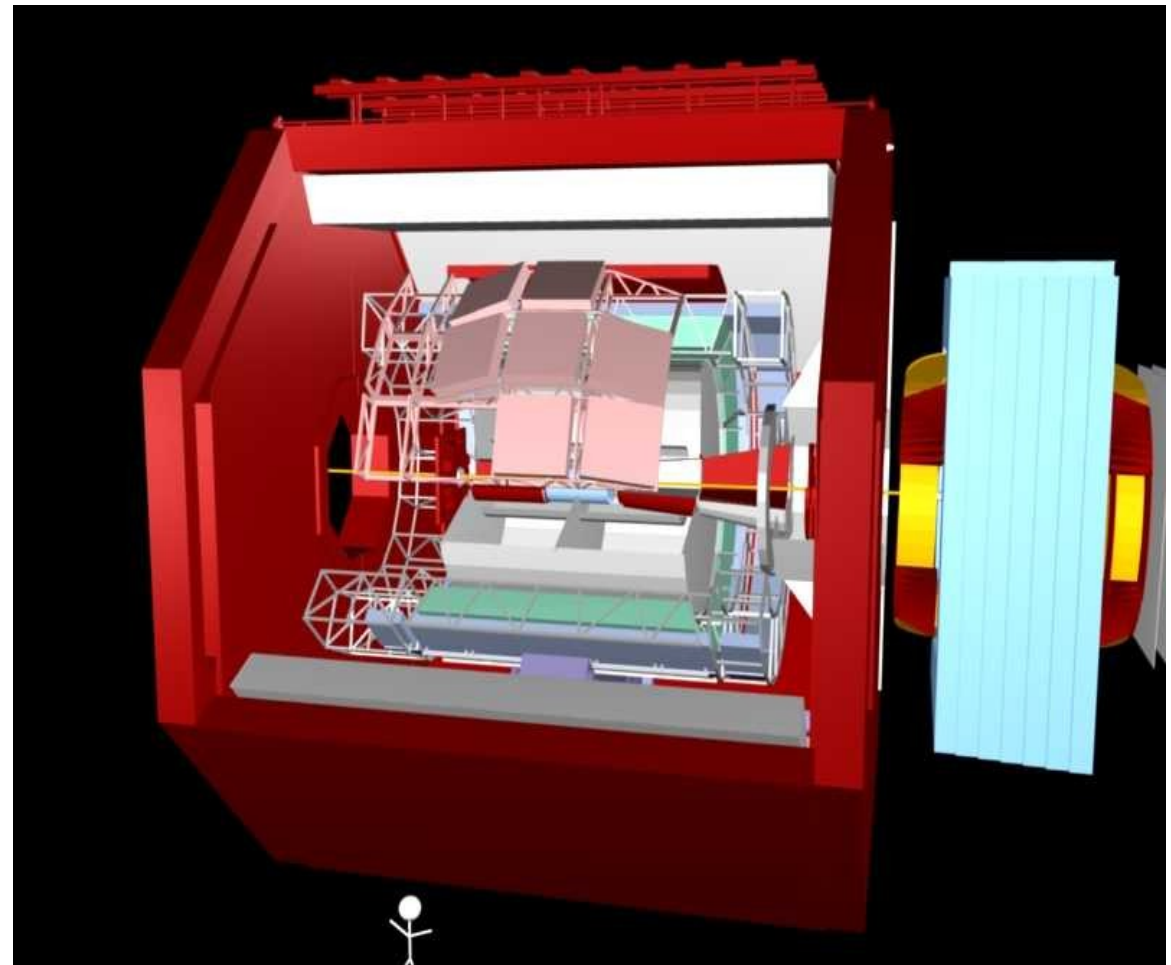
Widoczna jest centralna część detektora, ramię mionowe (po lewej stronie), magnes ustawiający wiązkę (niebieski, po lewej stronie) i obudowa detektora z betonu (szara)

Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych.

Podsumowanie

Obecnie w fizyce wysokich energii używamy złożonych systemów detektorowych, składających się z sub-detektorów, które z kolei zbudowane są z wielu warstw.

Taka złożoność detektorów wynika z dokładności, jaka jest konieczna by móc badać procesy procesy jądrowe, zwłaszcza wtedy, gdy zderzane są ciężkie jony.



Detektor ALICE

Widoczne są wszystkie podsystemy umieszczone w centralnej części detektora (Central Barrel)

Literatura:

M. Bujok "Budowa i działanie detektorów cząstek elementarnych"
P. Dębski „Opracowanie dokumentacji oraz wizualizacja budowy i działania detektora ALICE z wykorzystaniem środowiska AliRoo”- praca inżynierska

Dziękuję za uwagę.