

Wszechświat cząstek elementarnych

Detekcja cząstek

Wykład Ogólnouniwersytecki
Wydział Fizyki U.W.



prof. A.F.Żarnecki

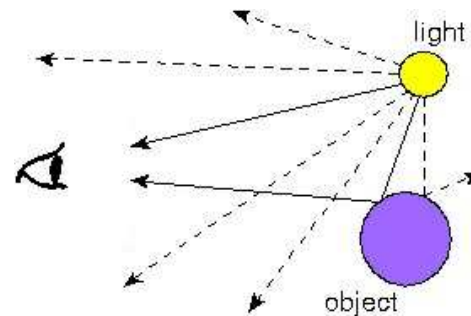
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych, Instytut Fizyki Doświadczalnej

Detekcja cząstek

- Wprowadzenie
 - Istota obserwacji w świecie cząstek
- Podstawowe procesy fizyczna
 - jonizacja
 - efekt fotoelektryczny
 - scyntylacja
 - promieniowanie Czerenkowa
- Metody detekcji cząstek
 - detektory śladowe
 - kalorymetry
- Współczesne eksperymenty

Detekcja cząstek

Istota obserwacji



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca obserwowanego procesu



Detekcja cząstek

Istota obserwacji

Cząstek nie możemy "zobaczyć" nie zakłócając ich stanu.

W świecie cząstek każdy pomiar wiąże się z jakimś **oddziaływaniem**.

Obserwujemy nie cząstki, ale (efekty) ich **oddziaływania z materią**.

Nie można zaobserwować cząstki, która nie oddziałuje!

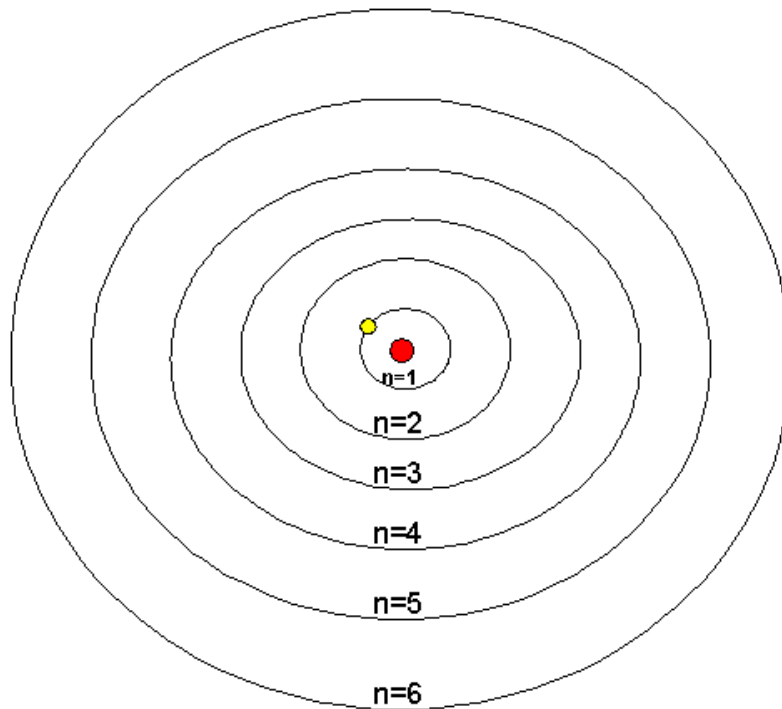
Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

- jonizacja i scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

Detekcja cząstek

Struktura materii

Atom wodoru: opis klasyczny
 Stan podstawowy ($n=1$)

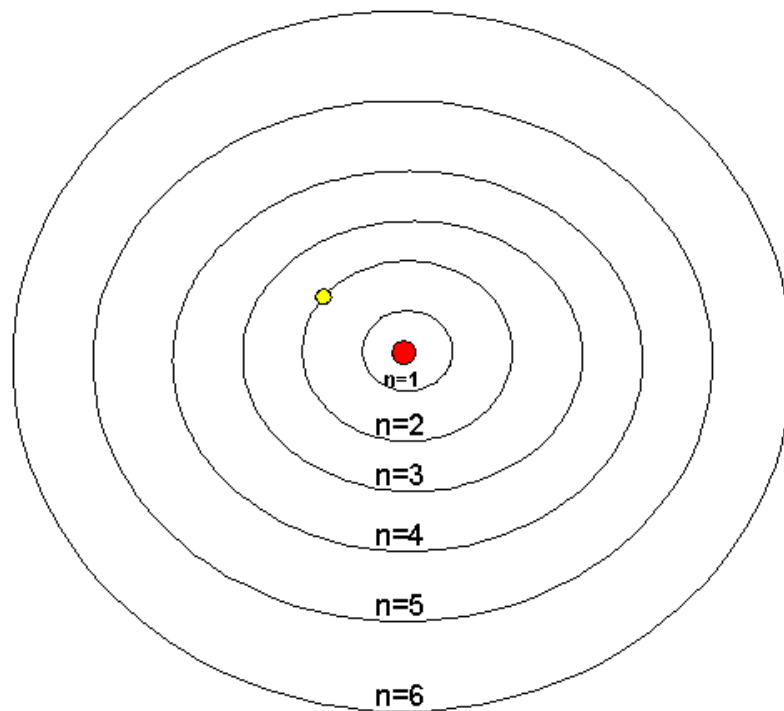


Każdy atom składa się z jądra atomowego, w przypadku wodoru jest to pojedynczy proton, i elektronów rozmieszczonych na powłokach.

Detekcja cząstek

Struktura materii

Atom wodoru: opis klasyczny
Stan wzbudzony ($n=2$)



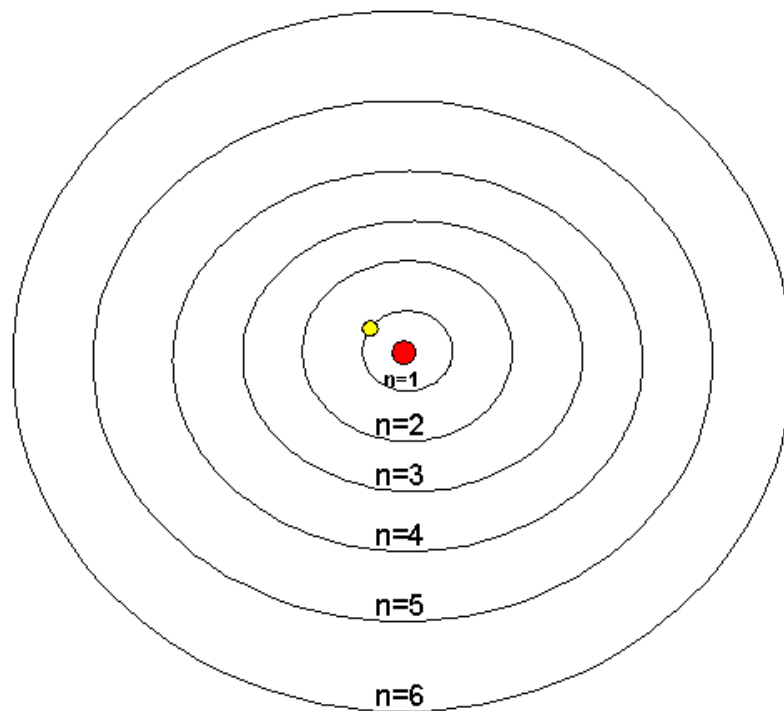
W **stanie podstawowym** atomu elektrony wypełniają najniższe dostępne powłoki.

Wzbudzenie atomu polega na przeniesieniu elektronu na wyższą powłokę. **Wymaga dostarczenia energii...**

Detekcja cząstek

Struktura materii

Atom wodoru: opis klasyczny
Stan podstawowy ($n=1$)



Opis kwantowy
Stan 1s

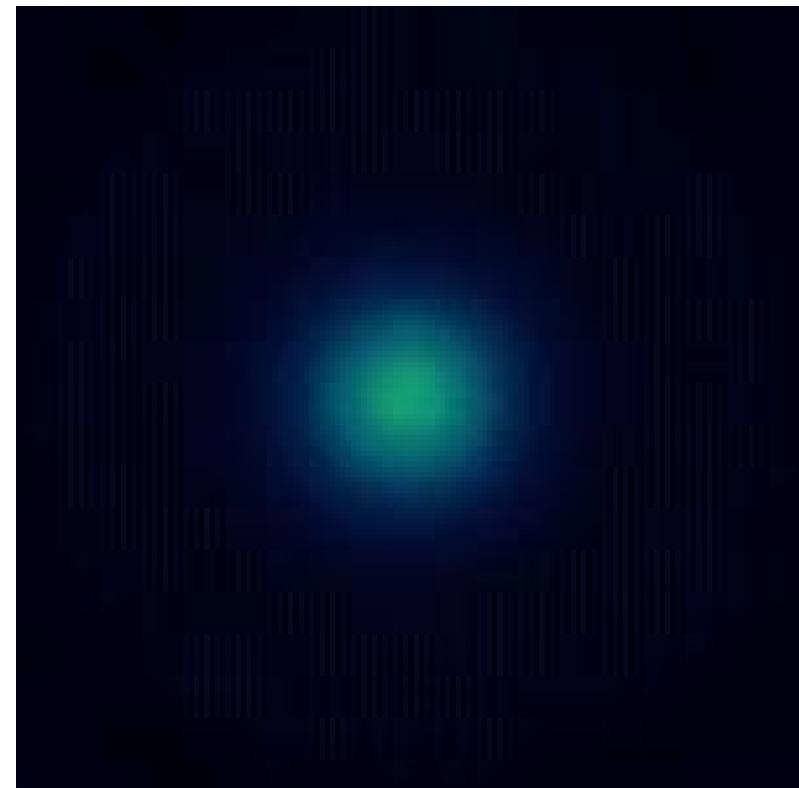
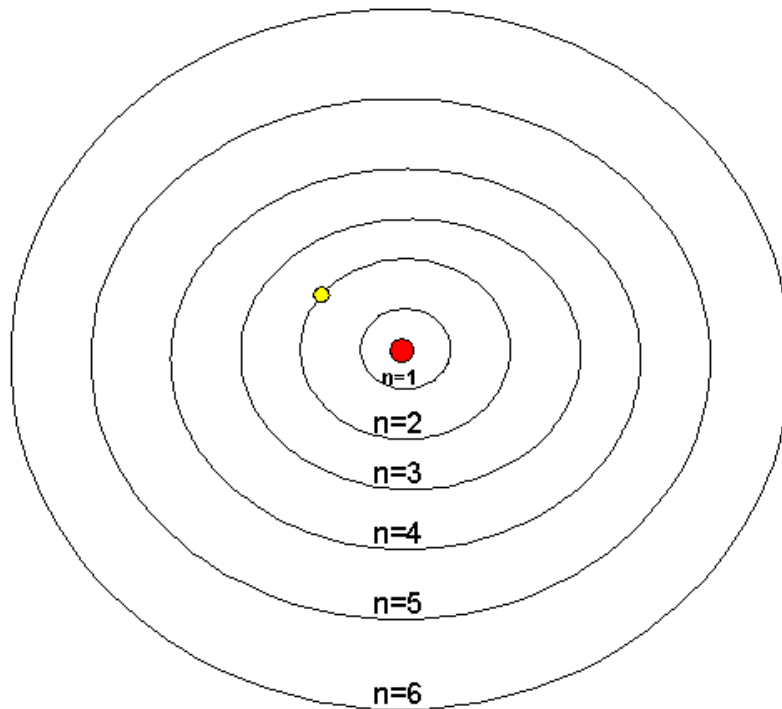


Detekcja cząstek

Struktura materii

Atom wodoru: opis klasyczny
Stan wzbudzony ($n=2$)

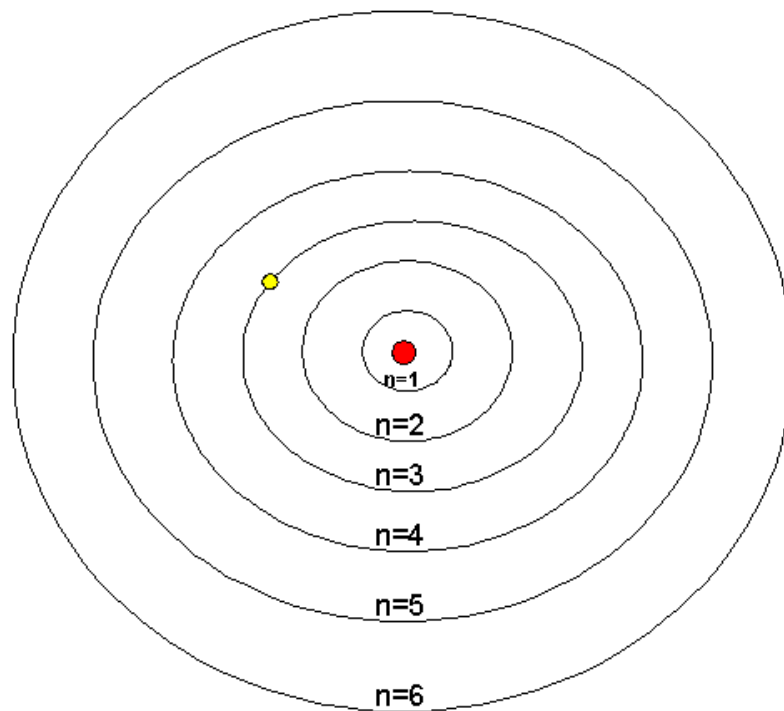
Opis kwantowy
Stan 2s



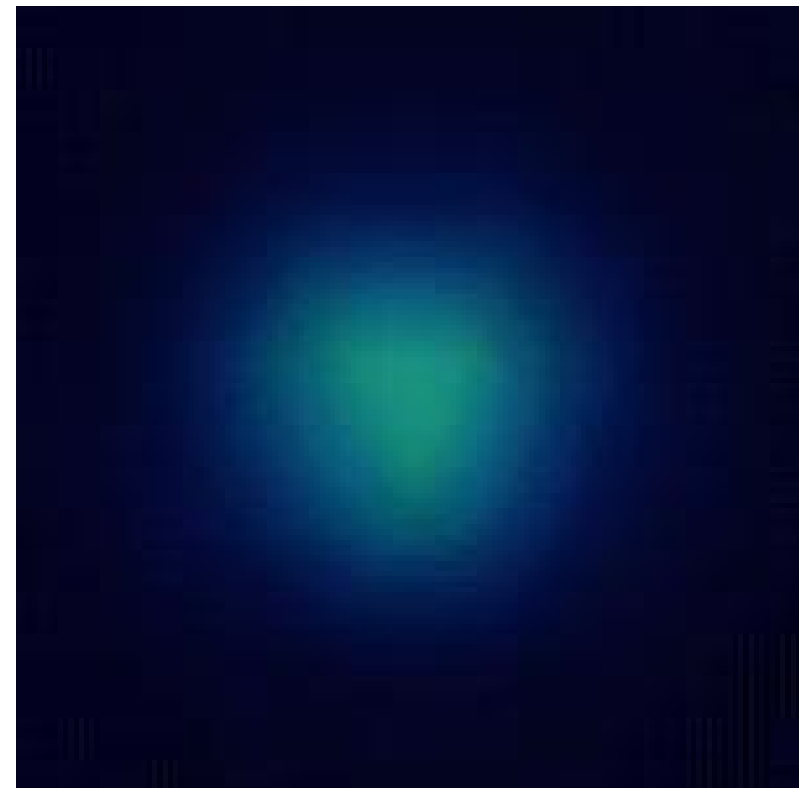
Detekcja cząstek

Struktura materii

Atom wodoru: opis klasyczny
Stan wzbudzony ($n=3$)



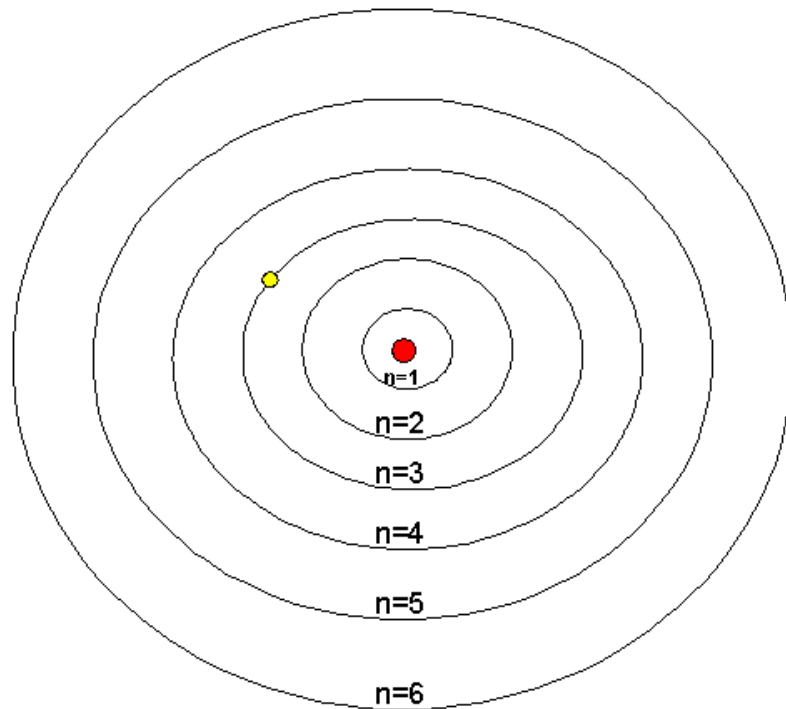
Opis kwantowy
Stan 3s



Detekcja cząstek

Struktura materii

Atom wodoru: opis klasyczny
Stan wzbudzony ($n=3$)



Opis kwantowy
Stan $3d_1$



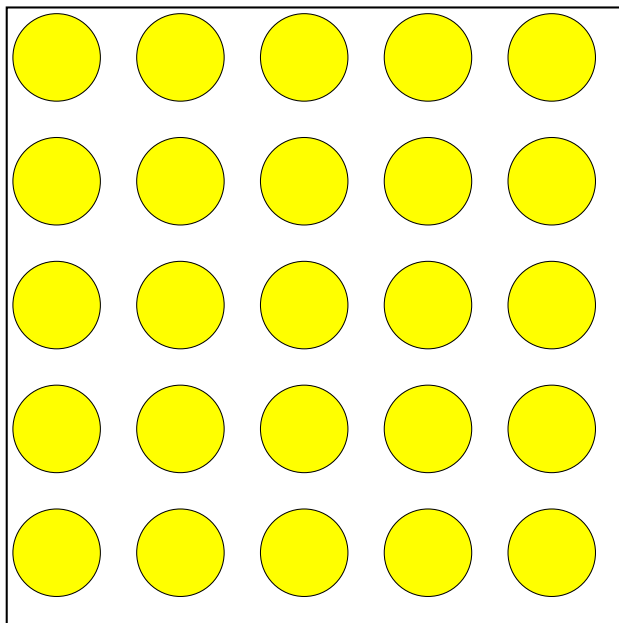
Detekcja cząstek

Struktura materii

Własności różnych substancji zależą od tego jak silnie związane są najbardziej “zewnątrzne” elektrony (walencyjne)

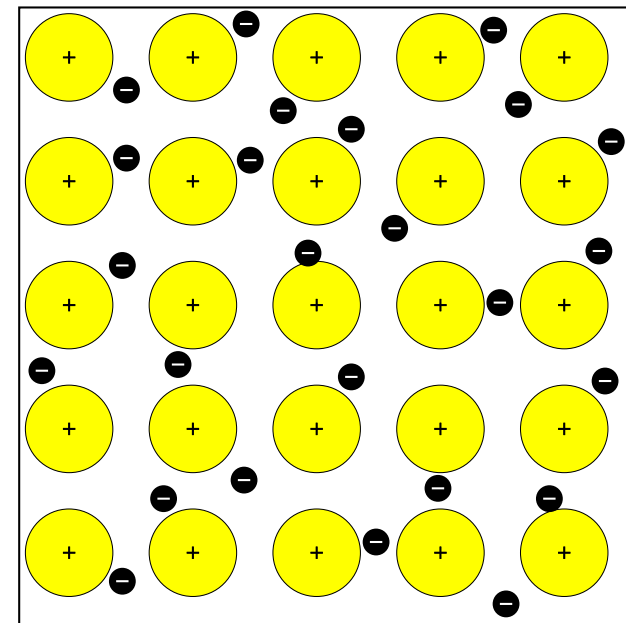
Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami



Przewodnik

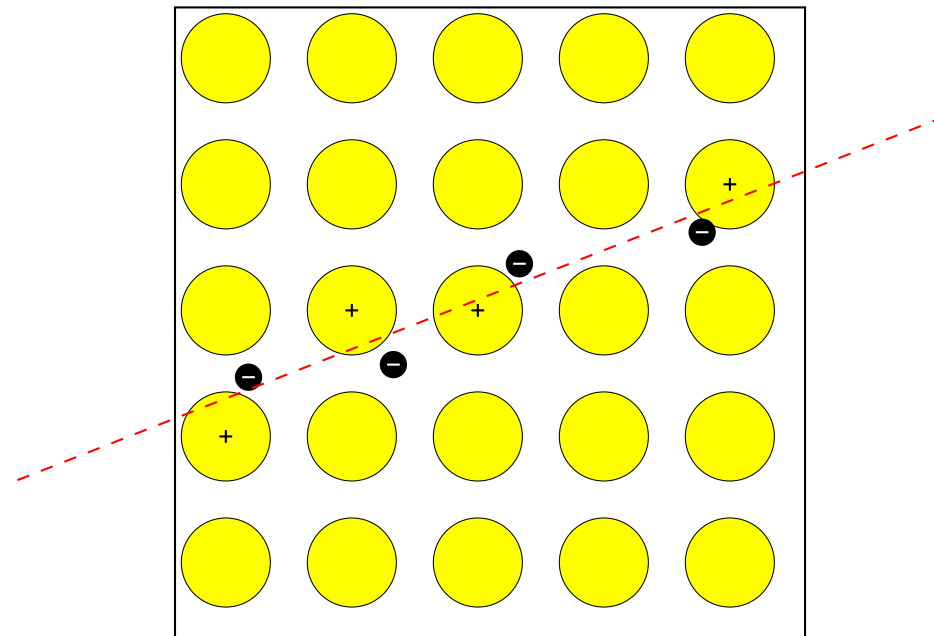
Elektrony walencyjne są “**uwspólnione**”, mogą swobodnie się przemieszczać



Detekcja cząstek

Jonizacja

U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:



Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów. **Pojawiają się swobodne nośniki ładunku**

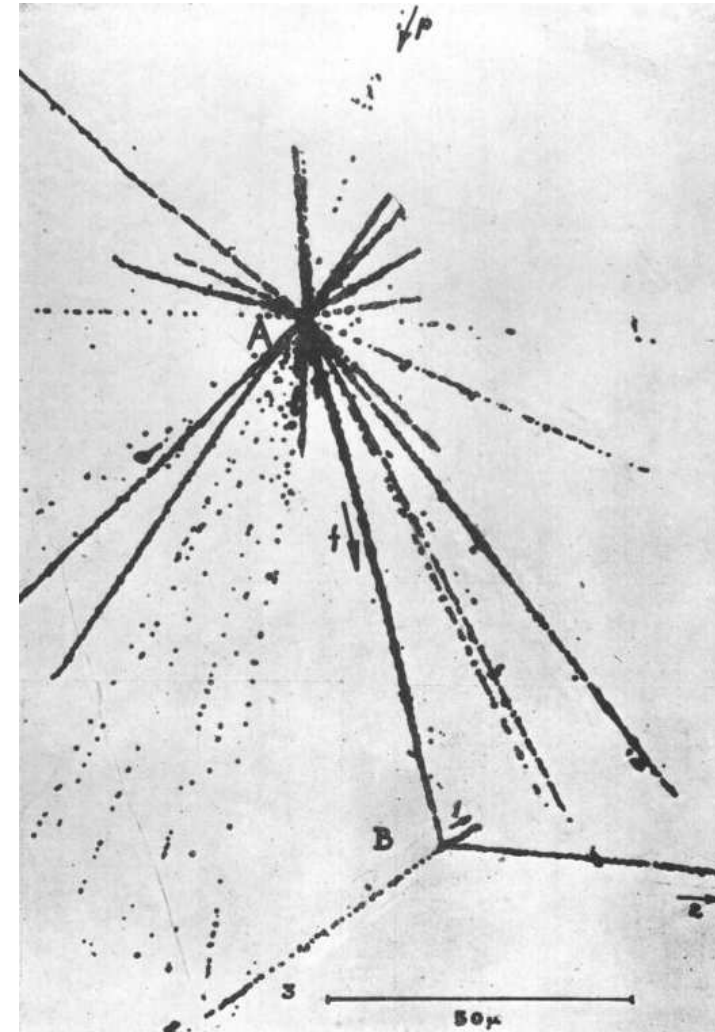
Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

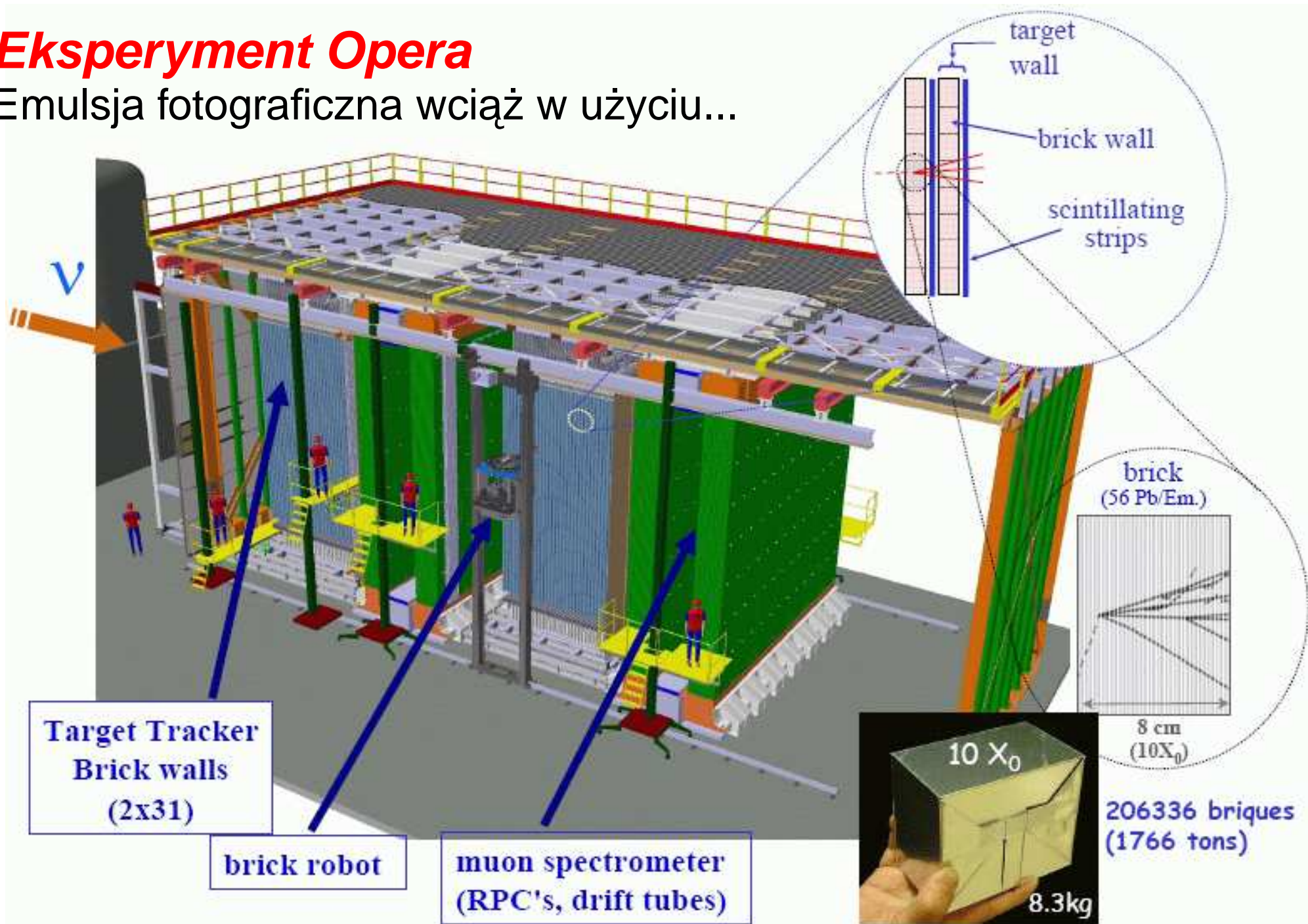
wzbudzone atomy
⇒ reakcja chemiczna



M. Danysz i J. Pniewski, 1953

Eksperyment Opera

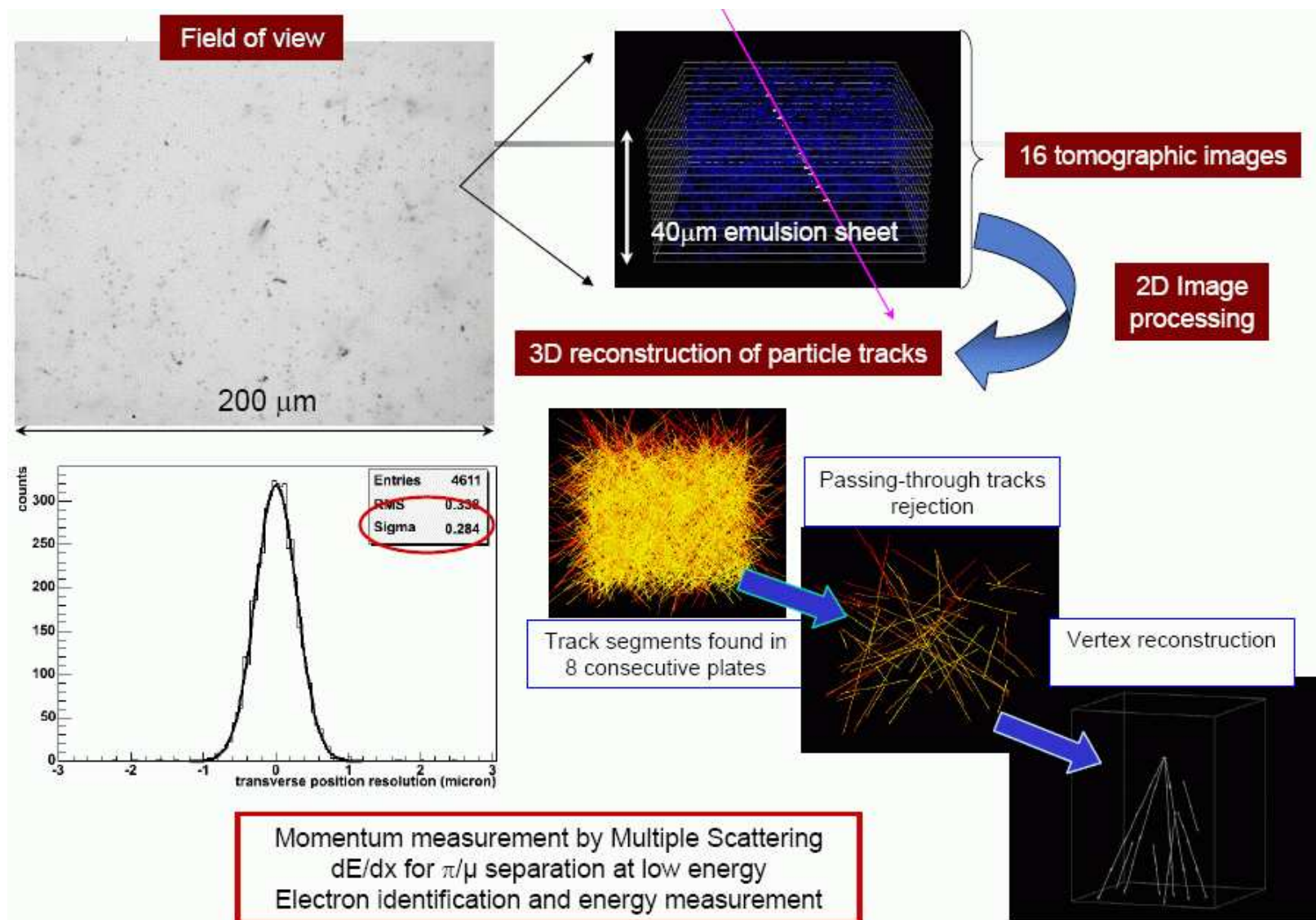
Emulsja fotograficzna wciąż w użyciu...



Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna

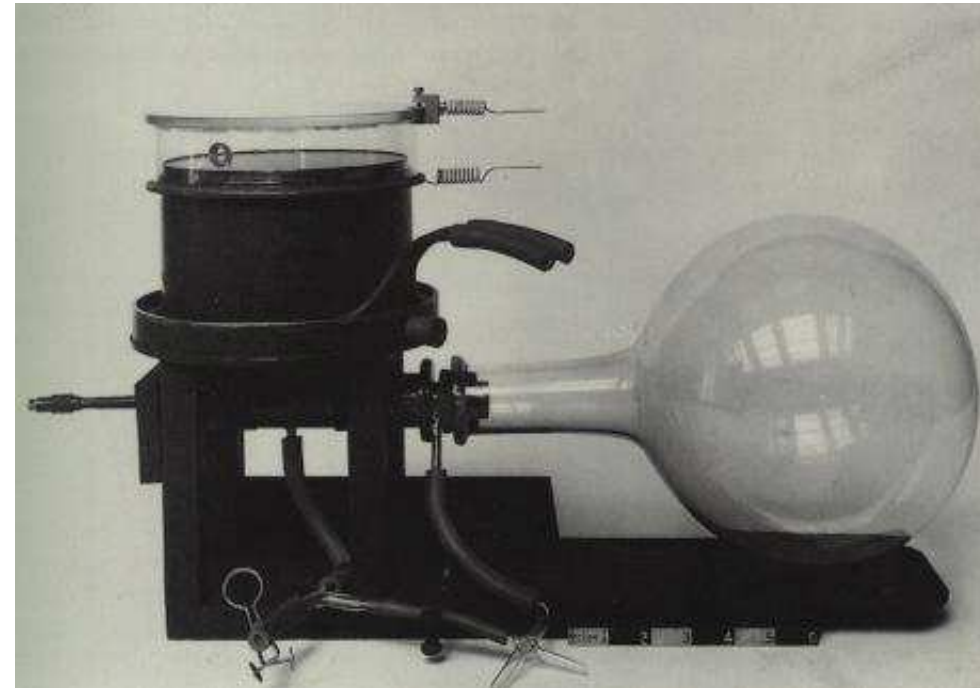
eksperyment OPERA



Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

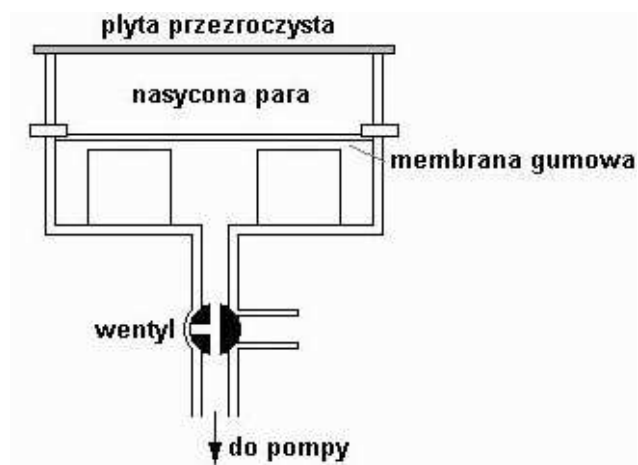


jonizacja

⇒ jony

⇒ kondensacja pary

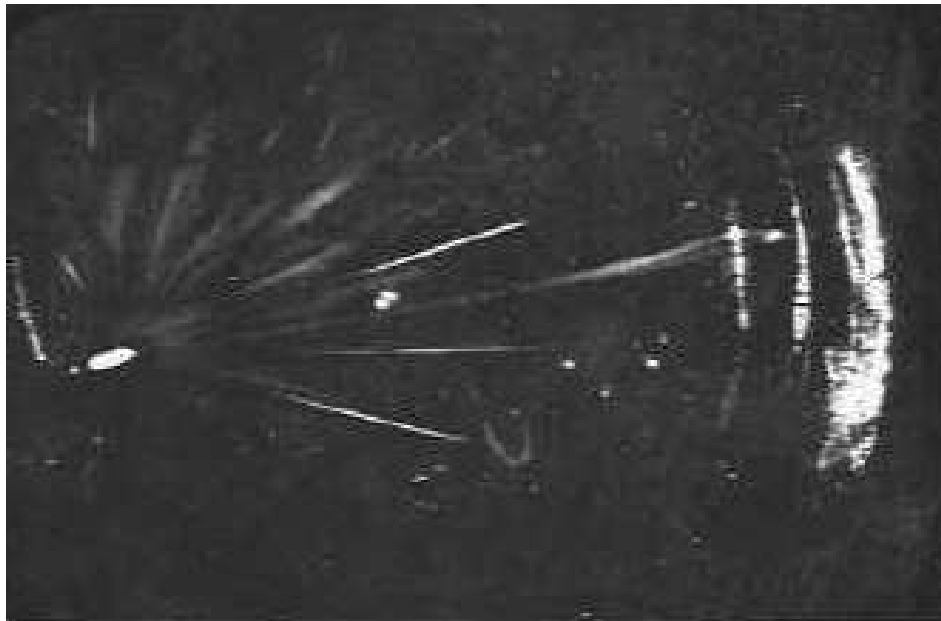
⇒ ślad w postaci mgły



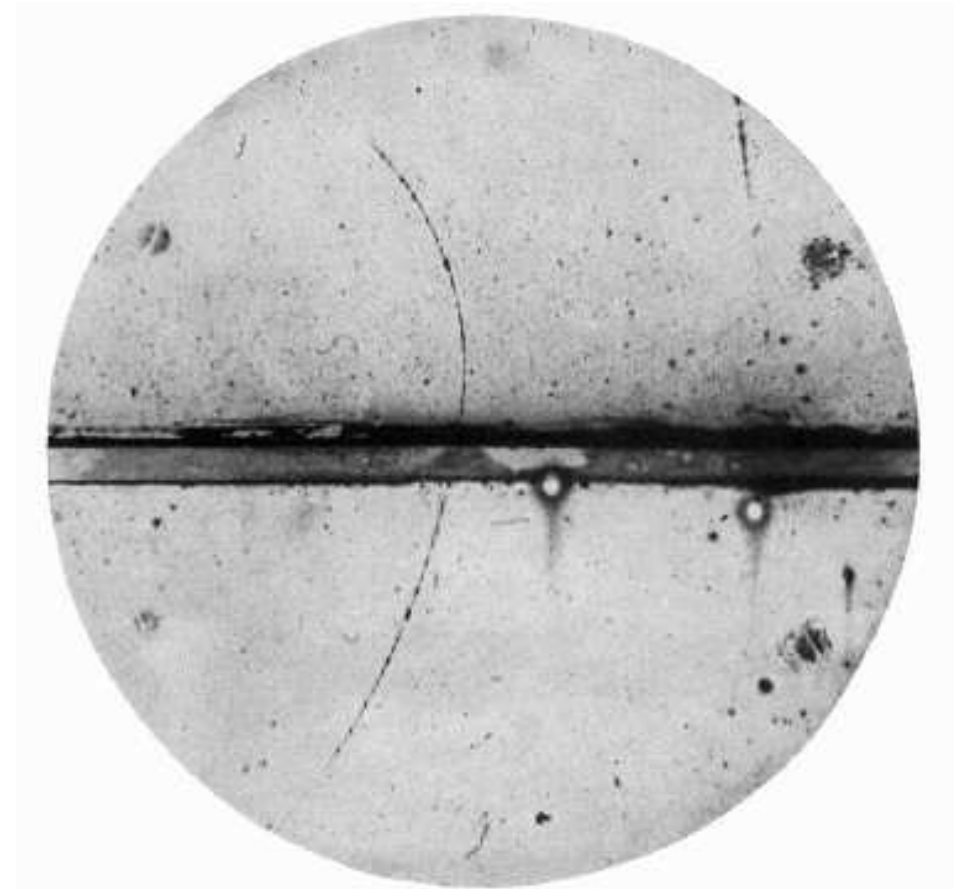
Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



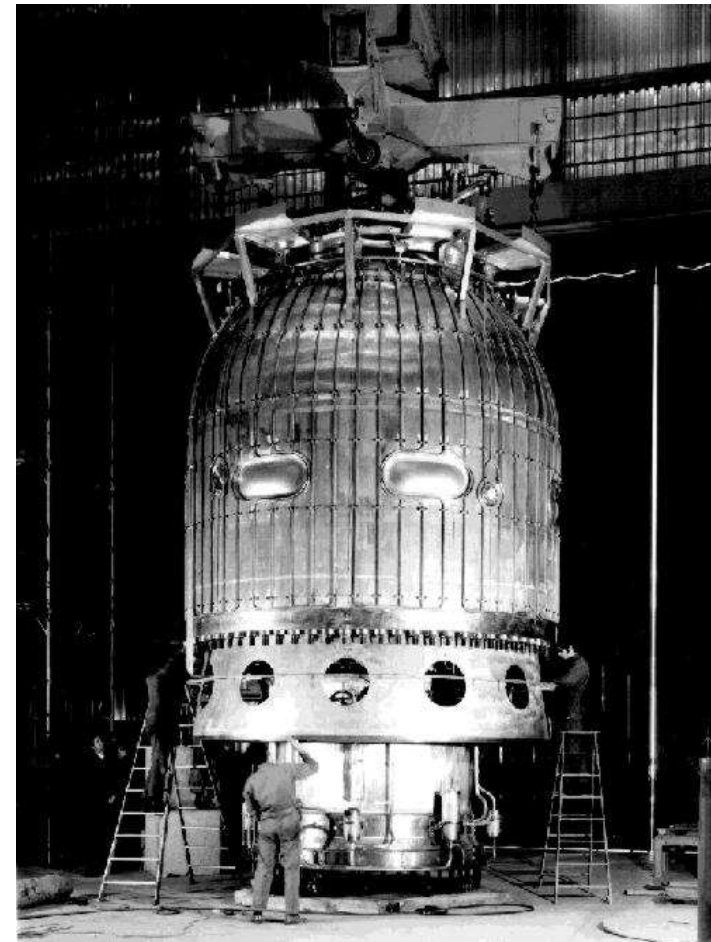
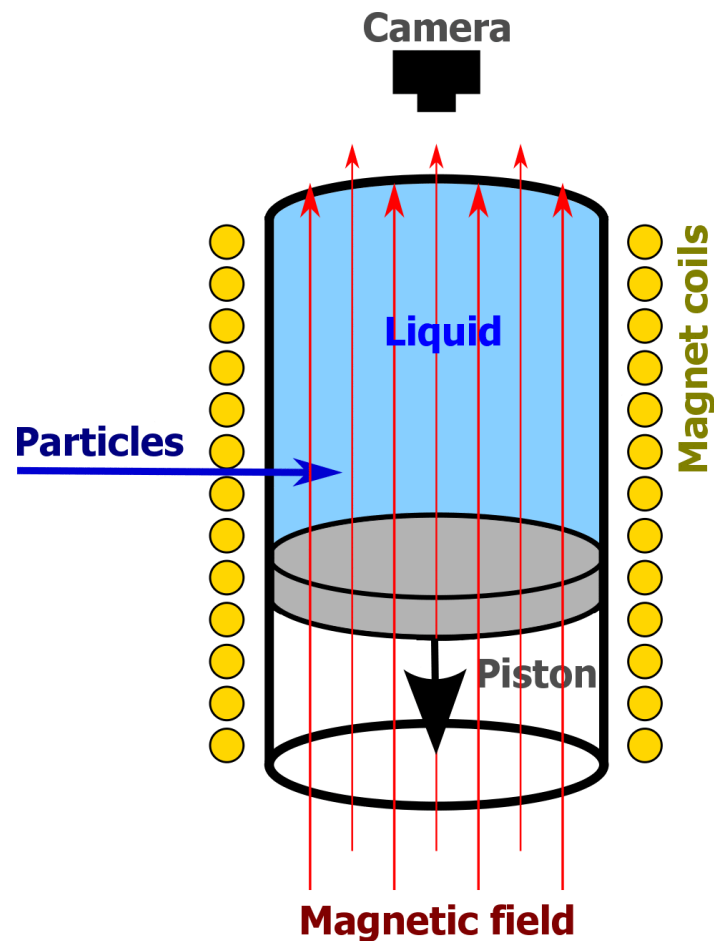
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa, 1952

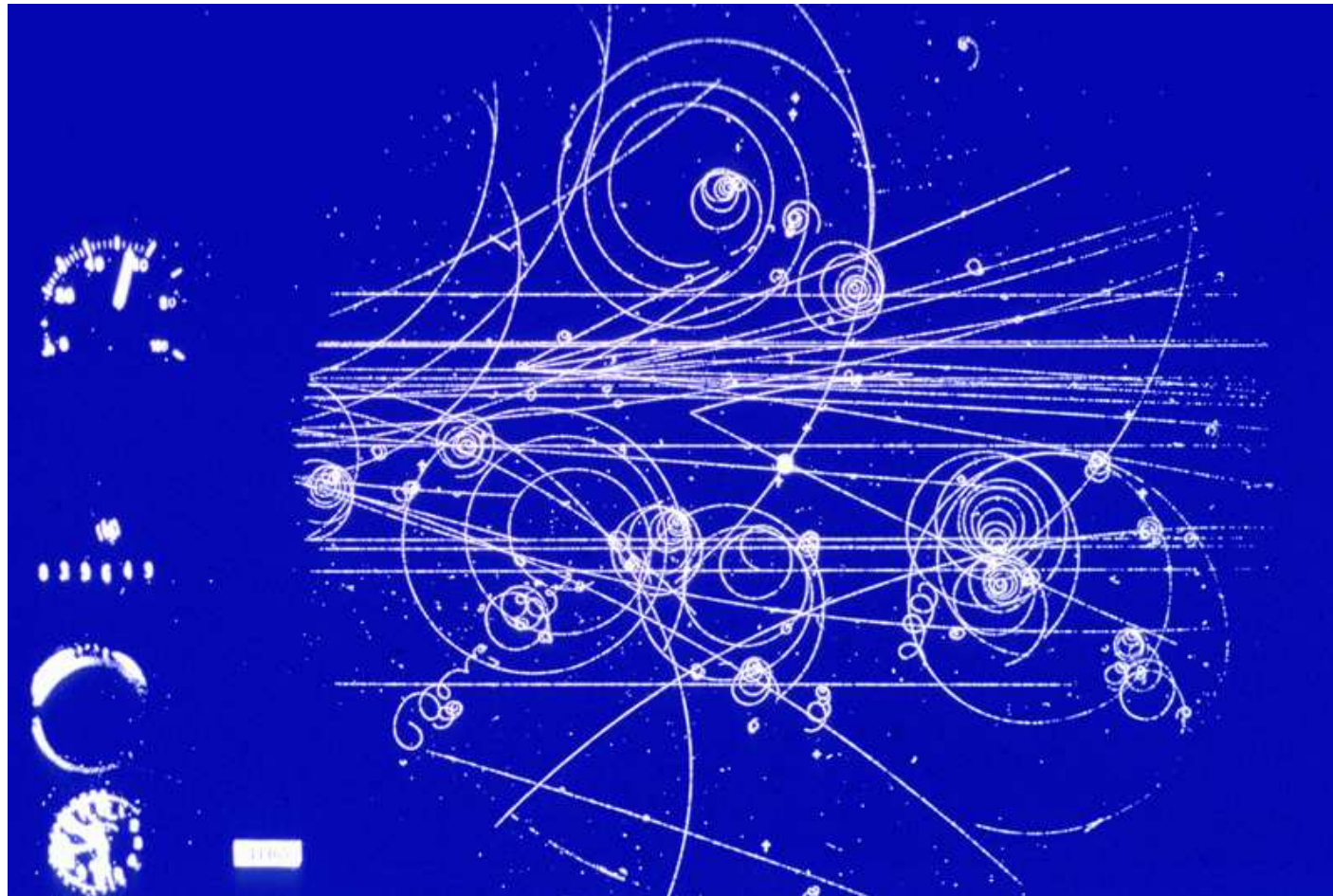


jonizacja \Rightarrow wrzenie przegrzanej cieczy



Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa



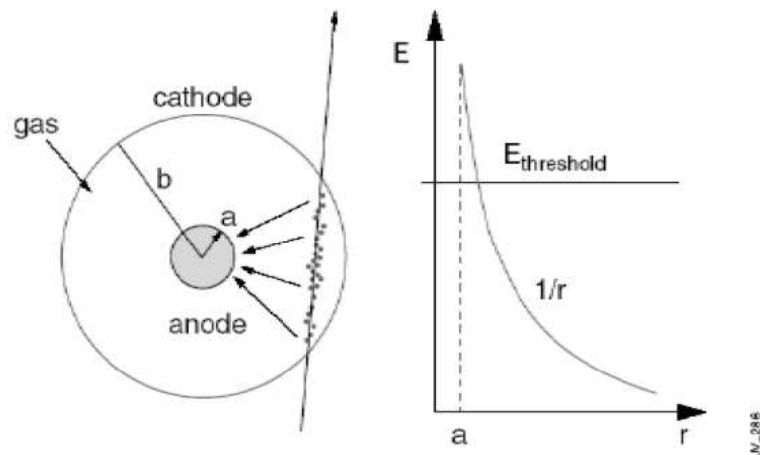
Ciecz pełni też rolę “tarczy”, z którą oddziałują cząstki wiązki

Detekcja cząstek

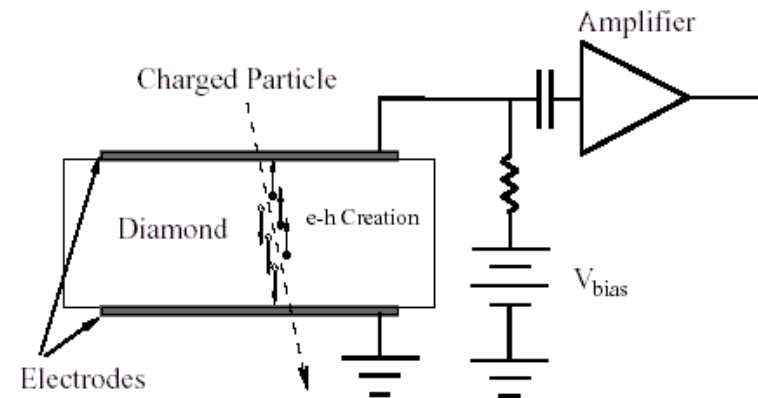
Pomiar jonizacji

Jonizacja ośrodka oznacza powstanie w nim **swobodnych ładunków**:
możliwy jest **przepływ prądu**.

w gazie



w półprzewodniku



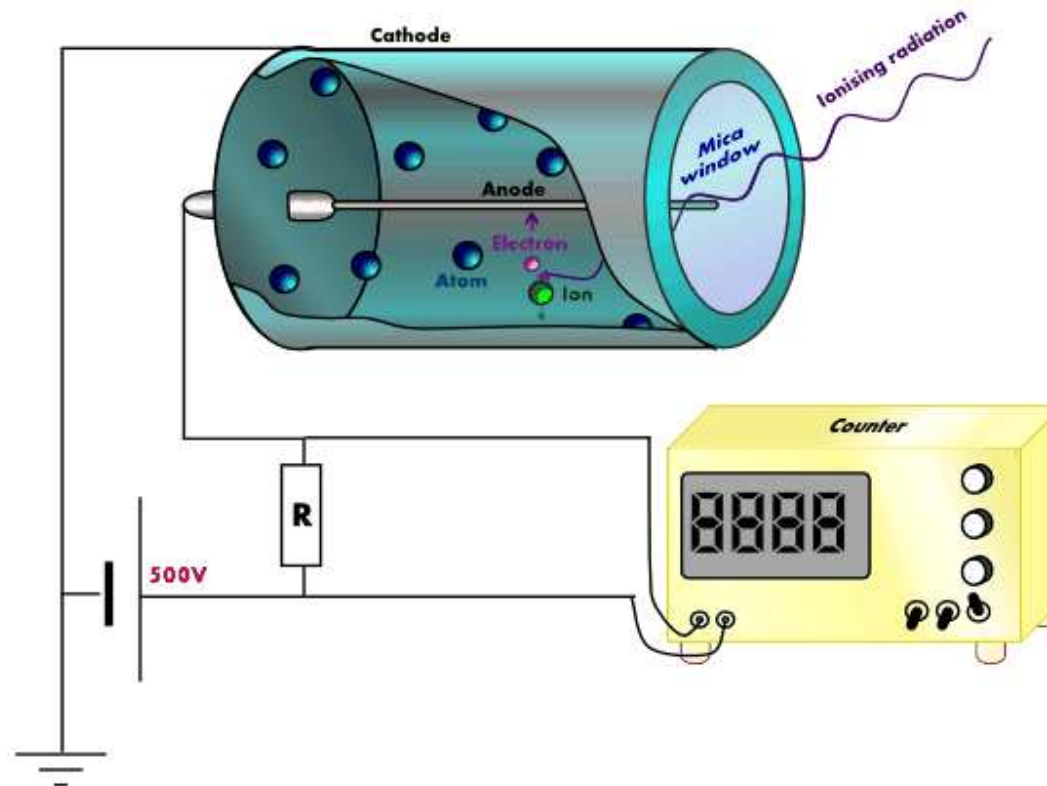
Przeptywający ładunek jest na ogół bardzo mały,
ale czuła elektronika pozwala go wzmocnić i zmierzyć.

Na tej zasadzie opiera się **większość współczesnych detektorów**.

Detekcja cząstek

Licznik Geigera-Müllera

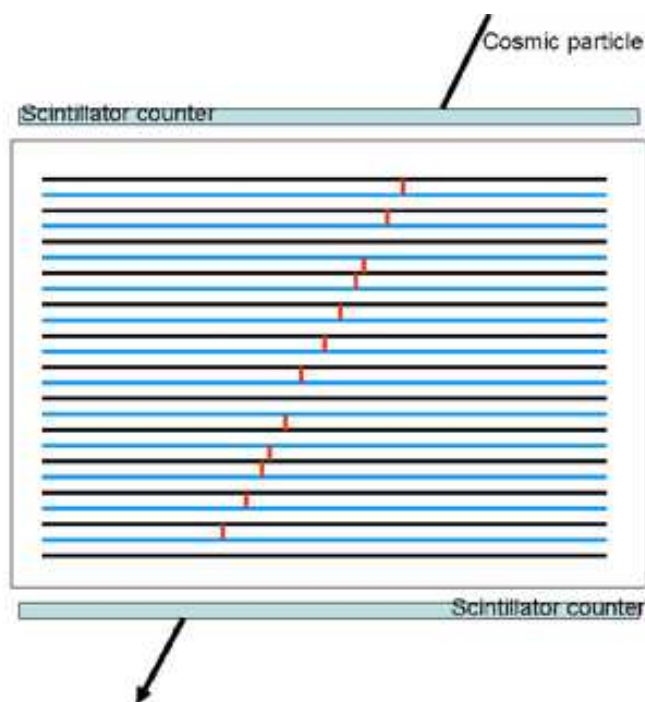
Przykładając odpowiednio wysokie napięcie powodujemy, że powstałe w wyniku jonizacji elektrony zderzając się z atomami wybijają kolejne elektrony - powielanie ładunku.



Detekcja cząstek

Komora iskrowa

Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



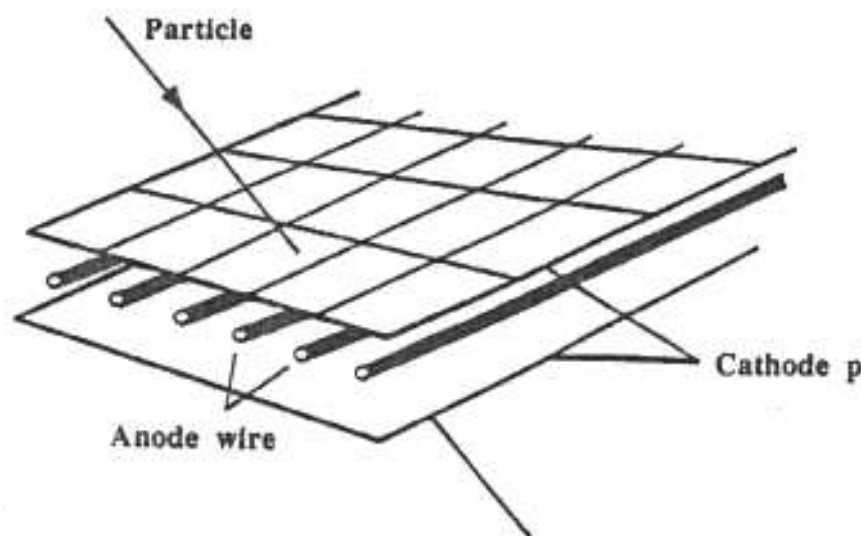
Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)



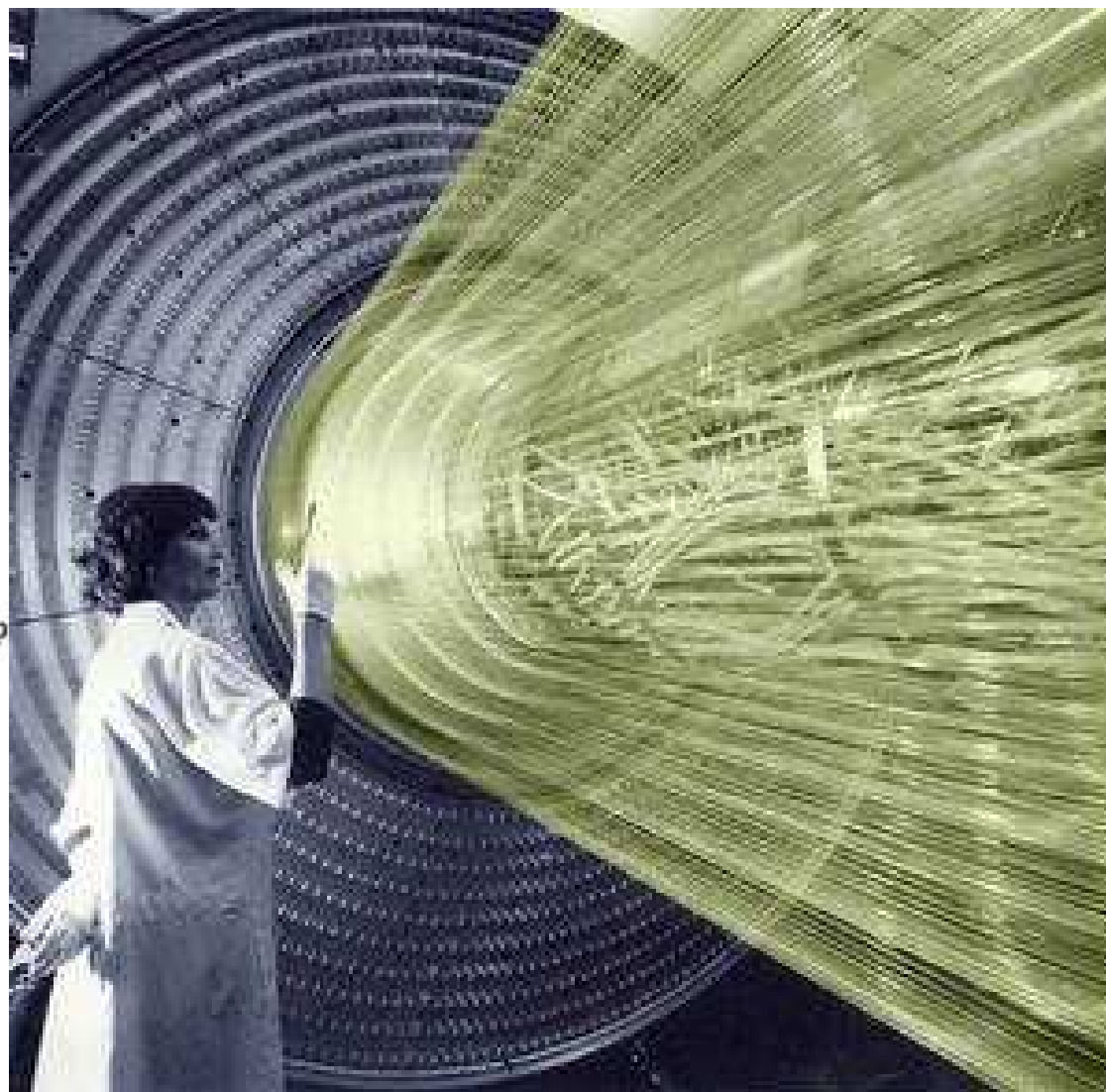
Detekcja cząstek

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



Tanie!
Odczyt w pełni elektroniczny!
elektronika+komputer
⇒ rewolucja



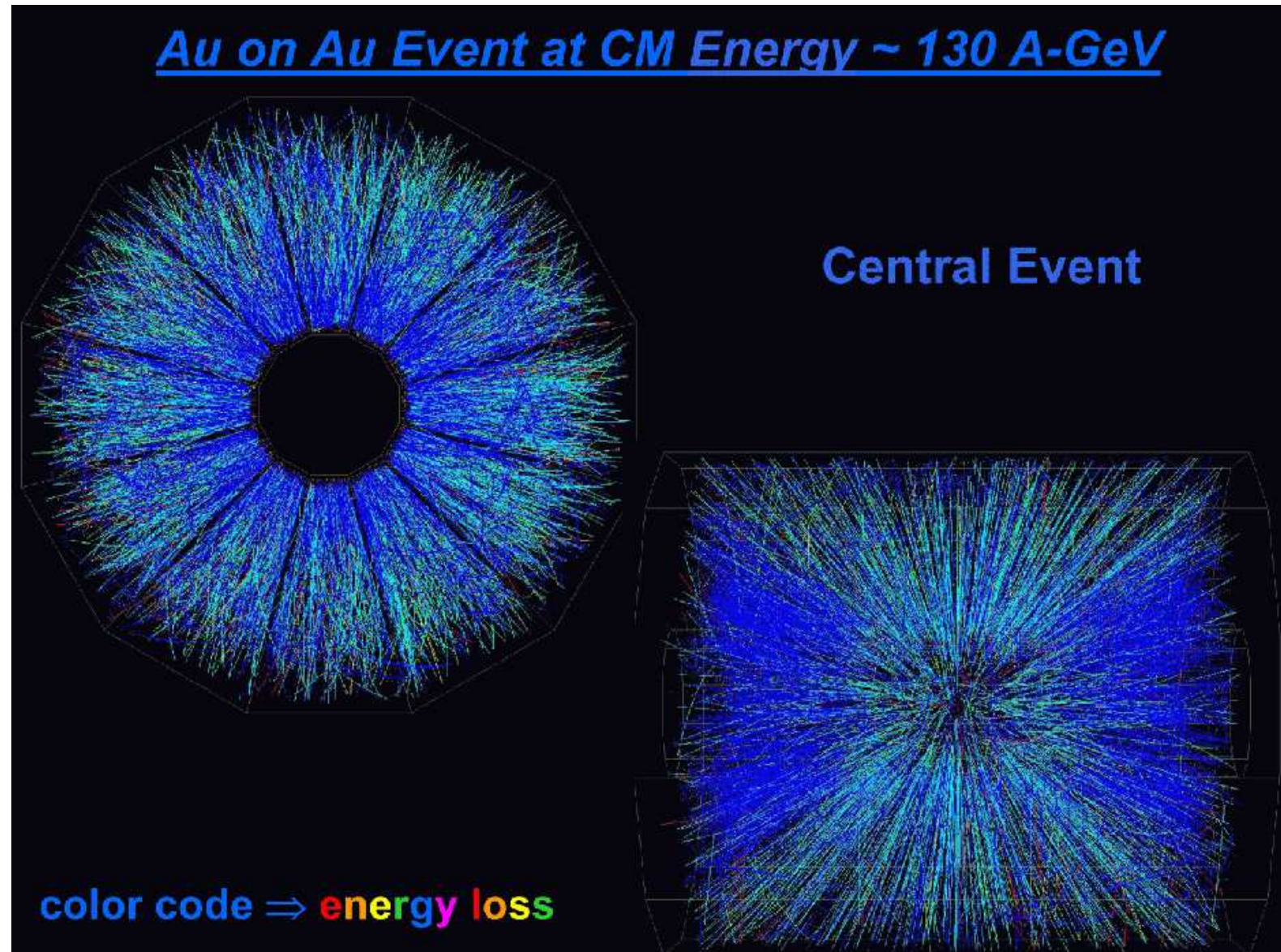
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

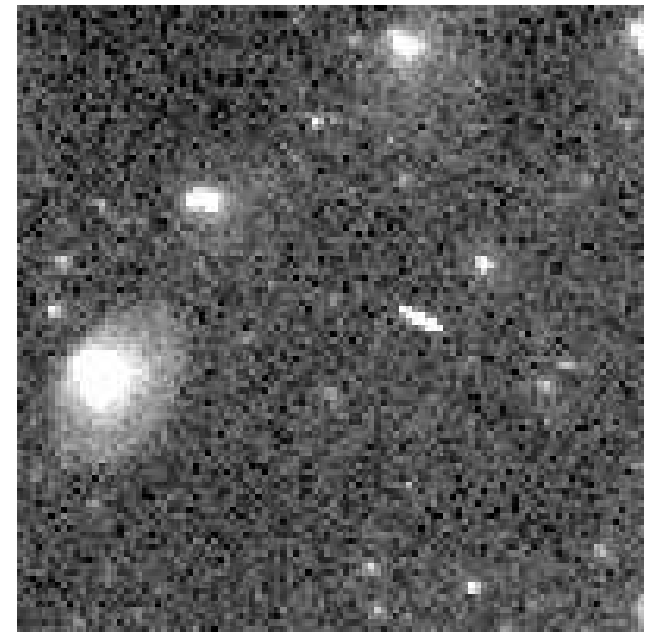
Bardzo różne technologie, m.in. CCD (używane w fotografii cyfrowej)

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



Wycinek:



To nie UFO. To ślad cząstki...

Detekcja cząstek

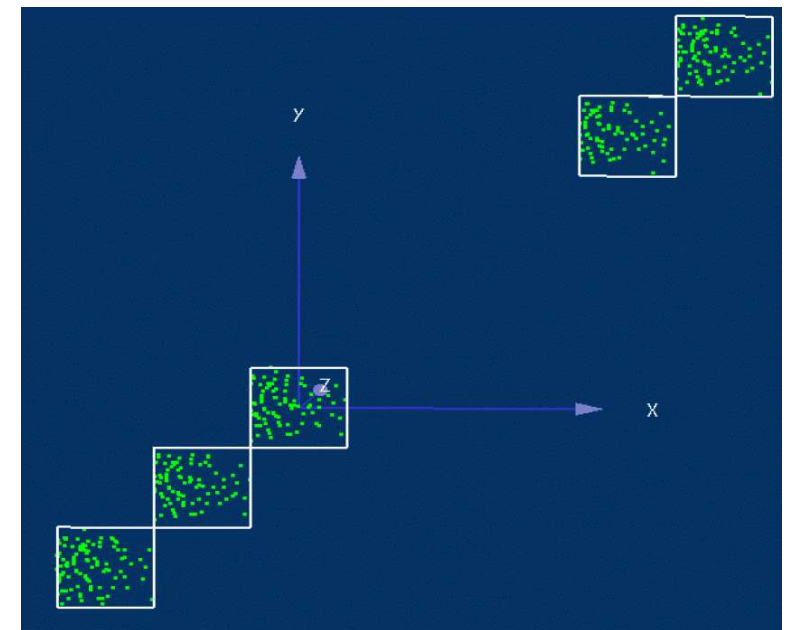
Detektory półprzewodnikowe
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar
pozycji cząstek (rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek
przez pięć warstw detektora testowego:

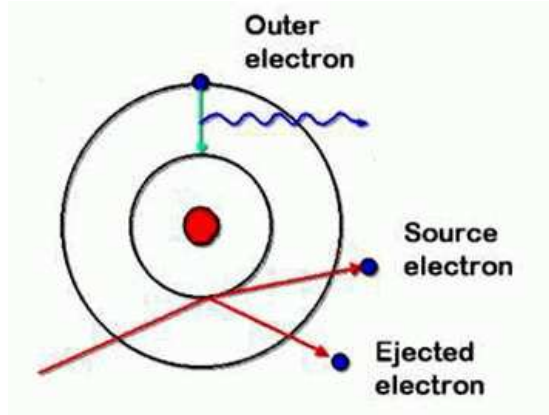


Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy zrekonstruować tor.

Detekcja cząstek

Scyntyłacja

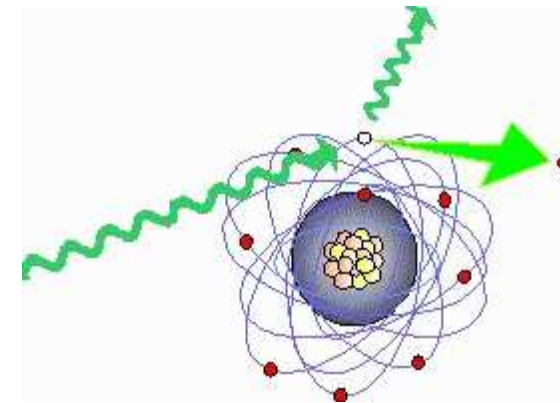
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



Powrotowi atomu do stanu podstawowego może towarzyszyć wyświecanie fotonów: **scyntyłacja**

Fotony

Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).



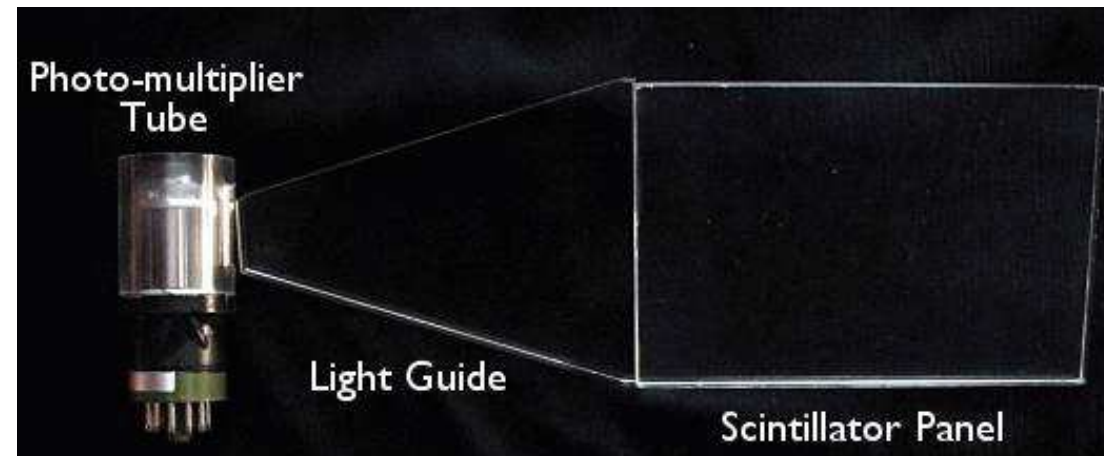
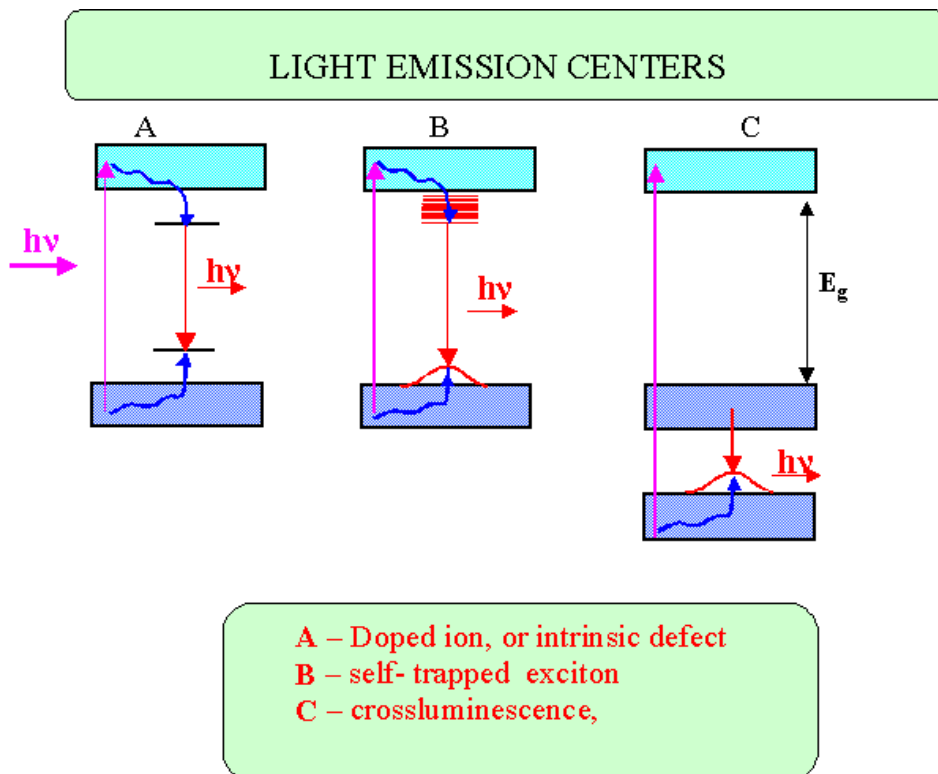
W obu przypadkach elektron może zostać “wyrwany” z atomu.

Detekcja cząstek

Scyntyłacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza

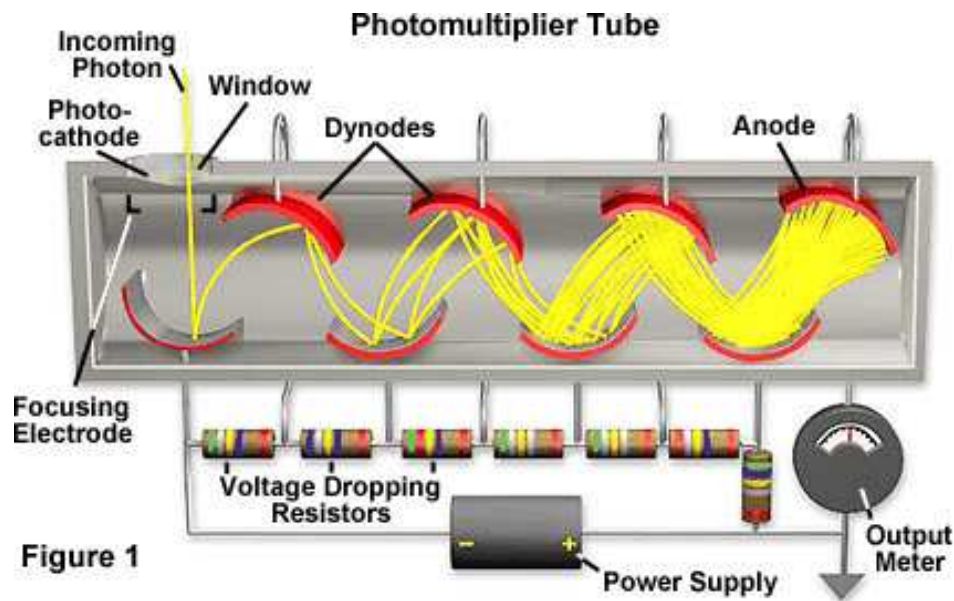


Brak pomiaru pozycji
Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki

Detekcja cząstek

Fotopowielacz

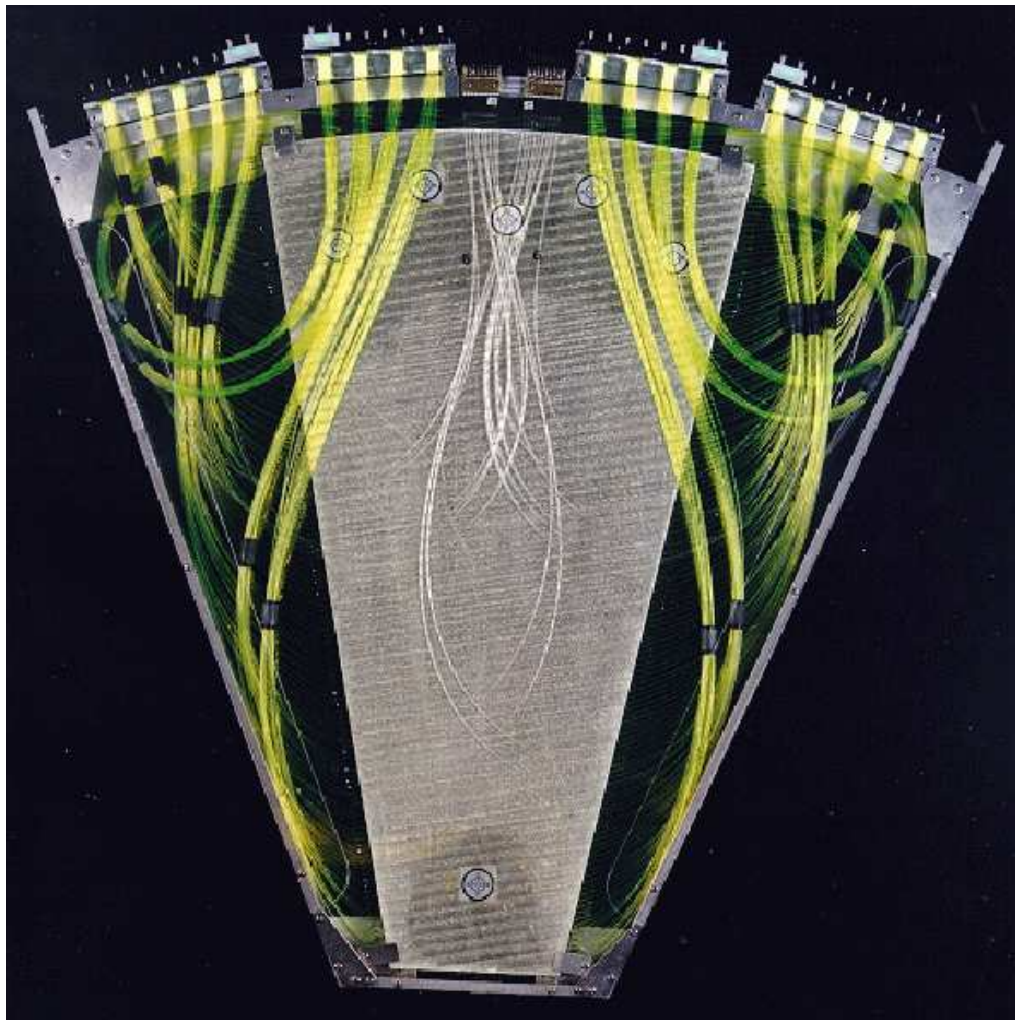
Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek. Na kolejnych elektrodach (tzw. dynodach) każdy elektron wybija kilka elektronów wtórnych - powstaje lawina



Jeden foton, jeśli tylko uda mu się wybić pierwszy elektron (efekt fotoelektryczny) powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detekcja cząstek

Detektory scyntylacyjne

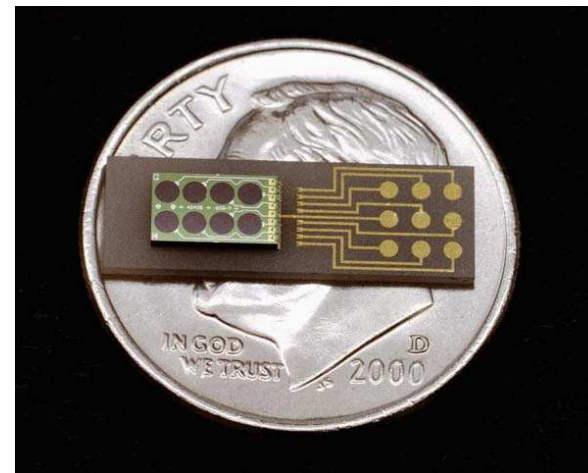


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

← włókna scyntylujące,

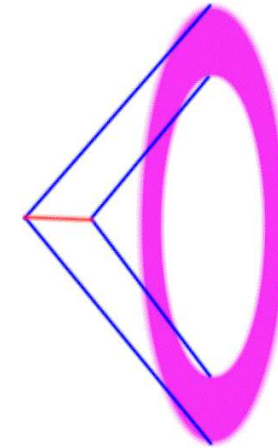
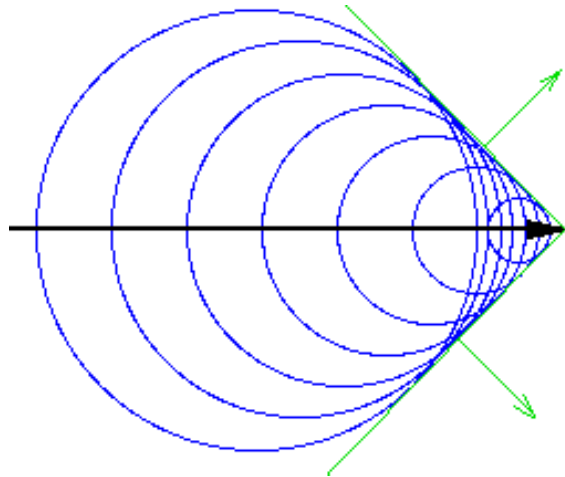
⇓ fotopowielacze krzemowe.



Detekcja cząstek

Promieniowanie Czerenkowa

Emitowane przez cząstkę poruszającą się w ośrodku z prędkością większą niż prędkość światła w tym ośrodku.



Światło emitowane na pewnym odcinku widoczne jest w postaci charakterystycznych pierścieni

Zachodzi w wodzie, lodzie, powietrzu...

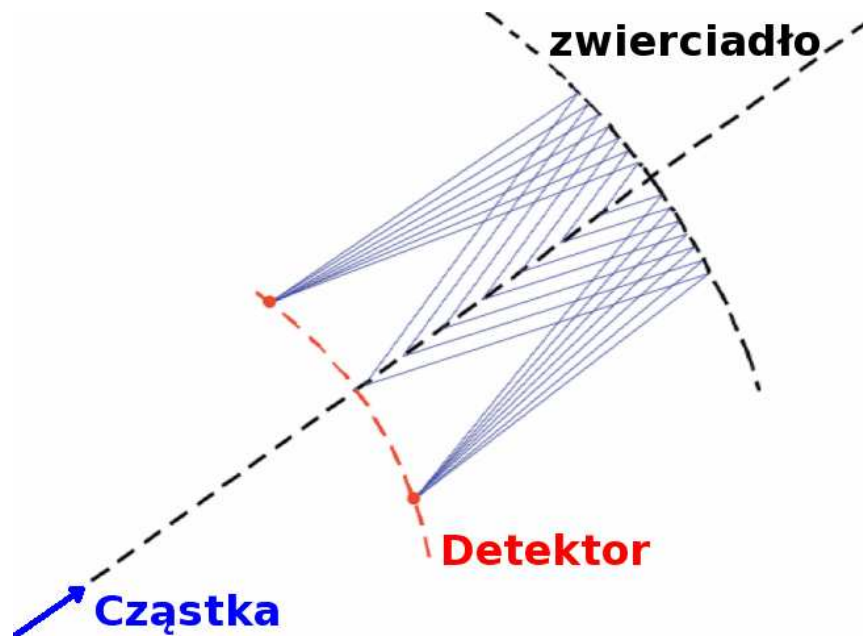
Tania technologia dla dużych detektorów!

Detekcja cząstek

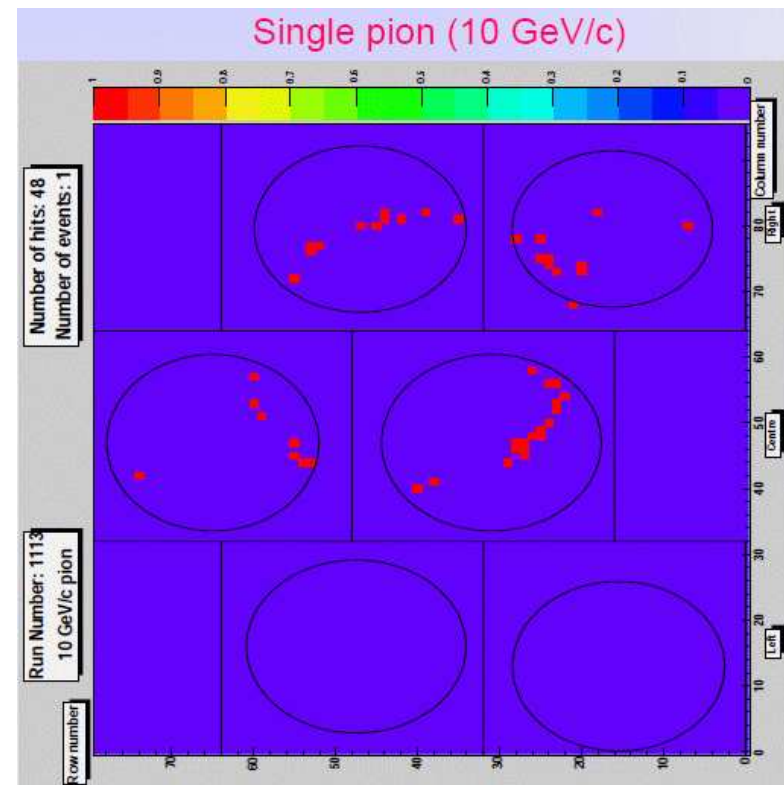
Promieniowanie Czerenkowa

Jeśli droga cząstki przez ośrodek jest dłuższa, możemy zastosować specjalne zwierciadła, żeby skupić emitowane światło

Schemat



Obraz w detektorze

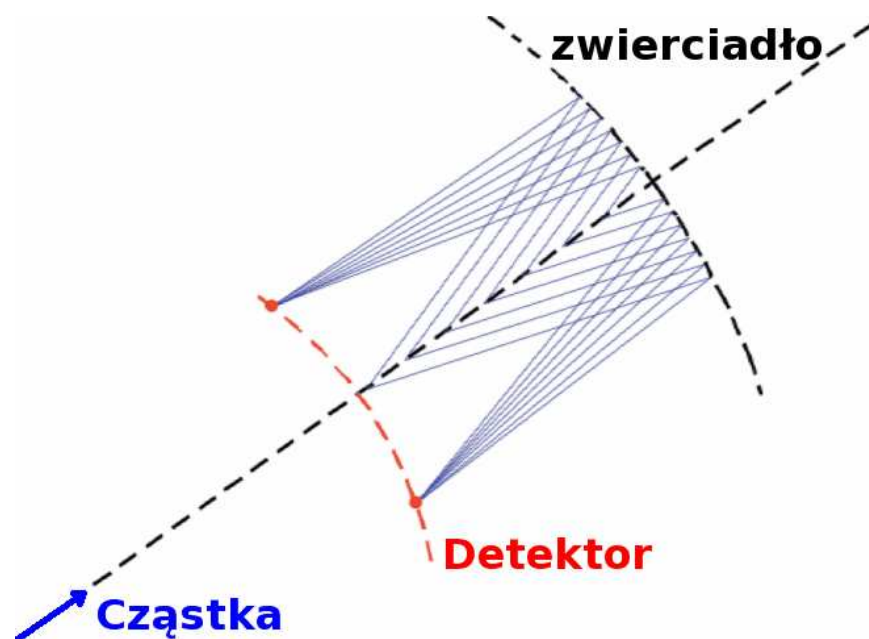


Detekcja cząstek

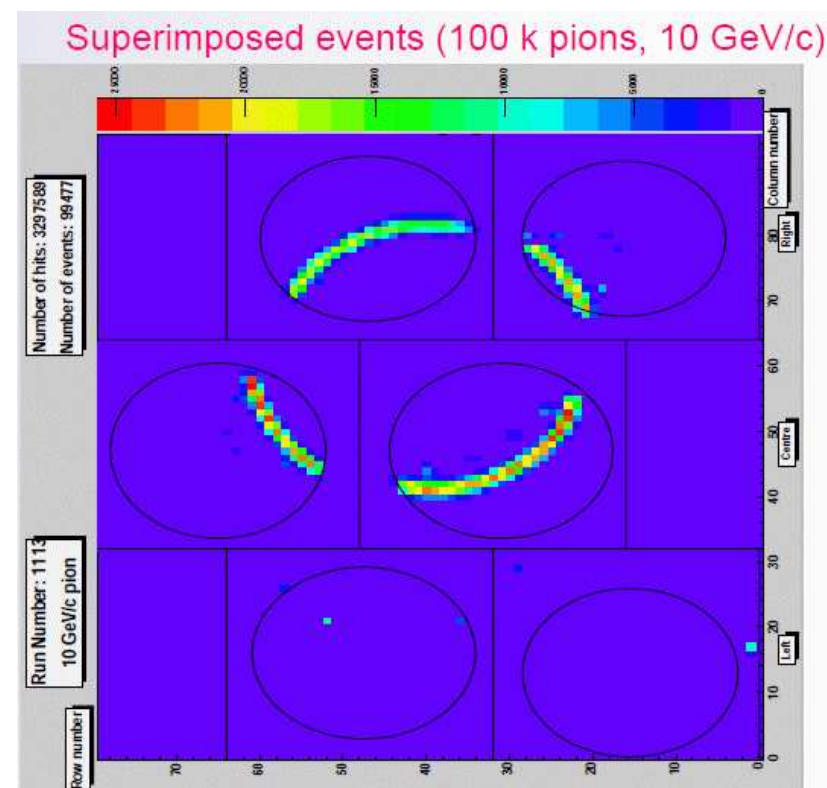
Promieniowanie Czerenkowa

Jeśli droga cząstki przez ośrodek jest dłuższa, możemy zastosować specjalne zwierciadła, żeby skupić emitowane światło

Schemat



Obraz w detektorze



Współczesne eksperymenty

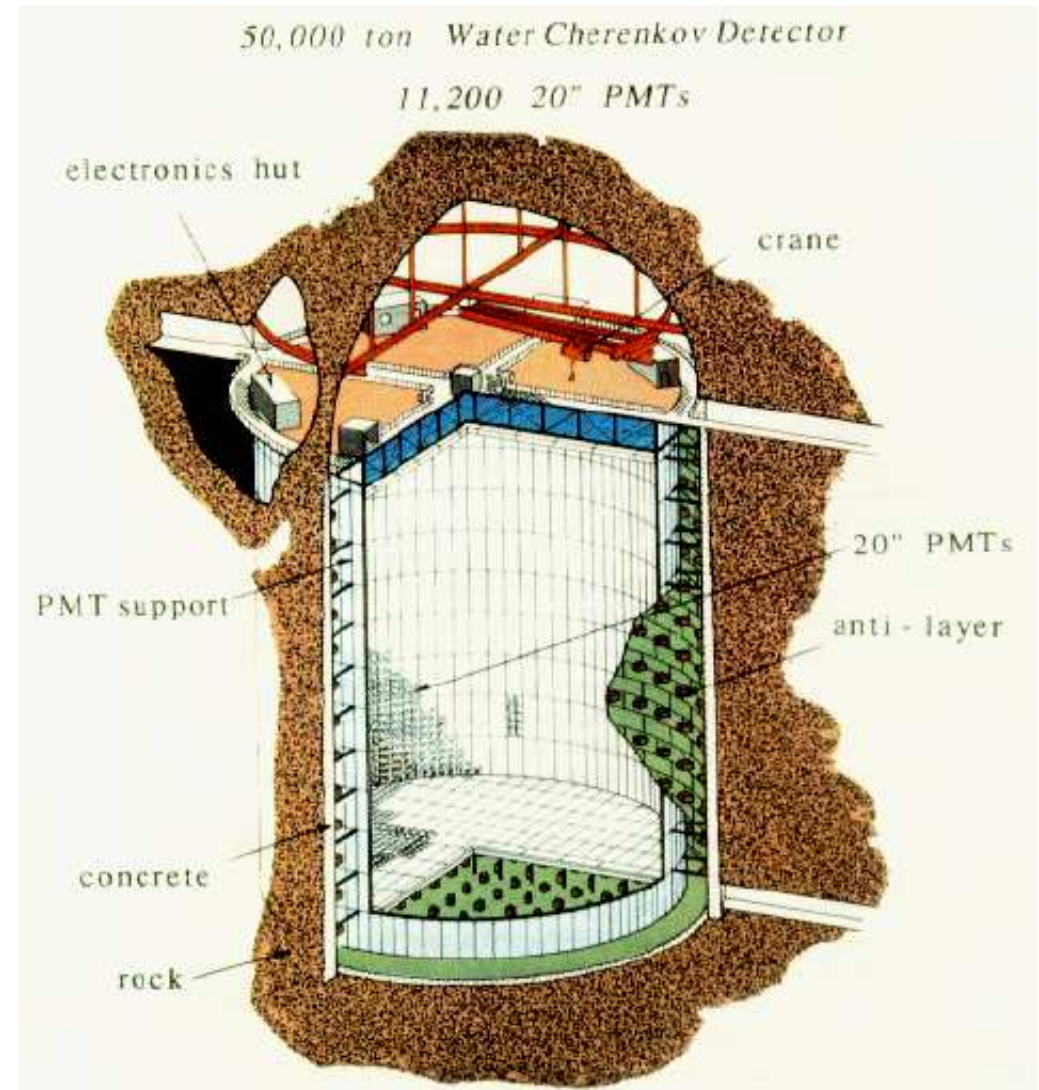
Super-Kamiokande

eksperyment neutrinowy

Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

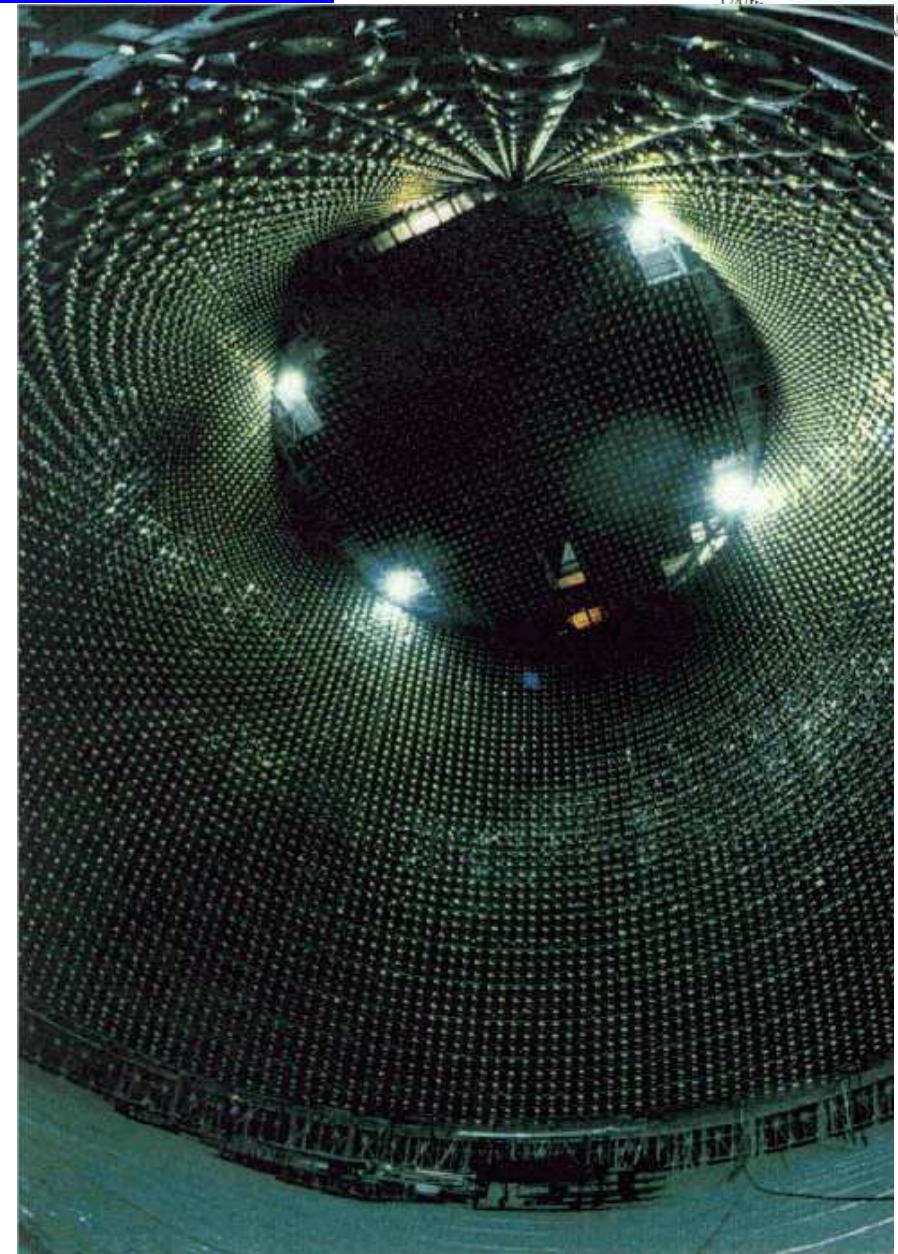
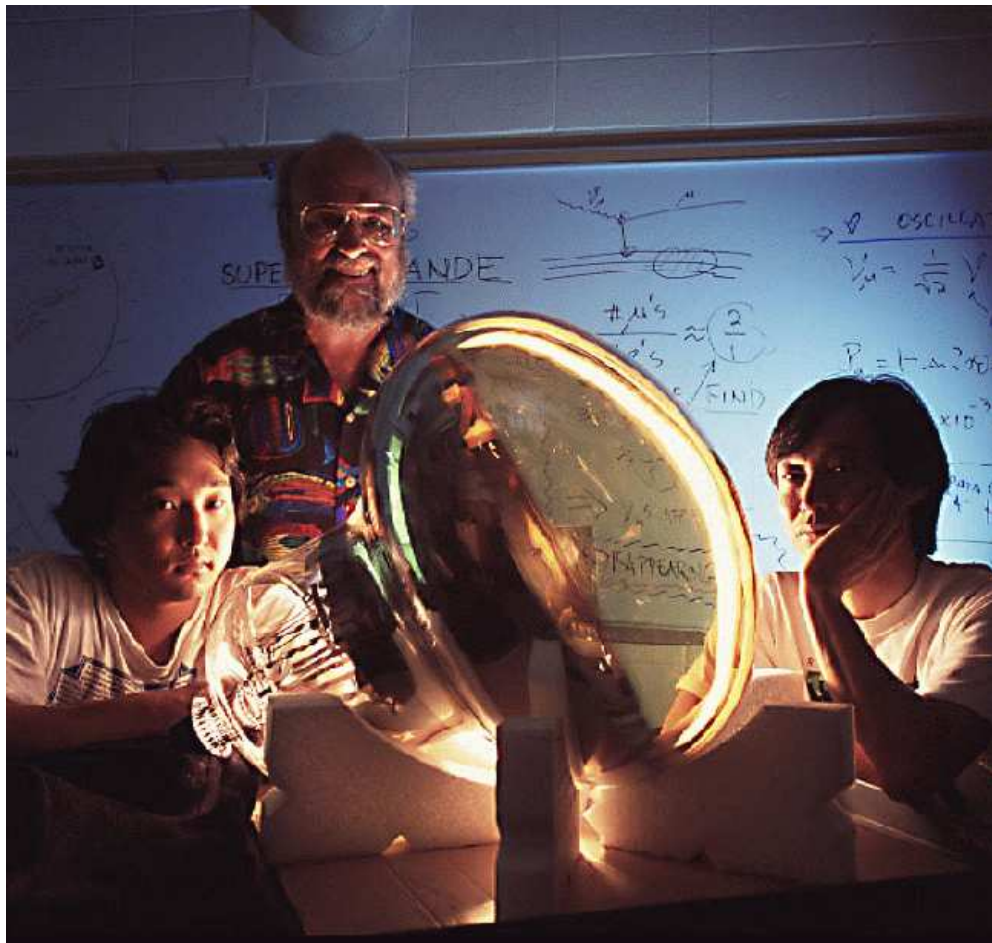
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

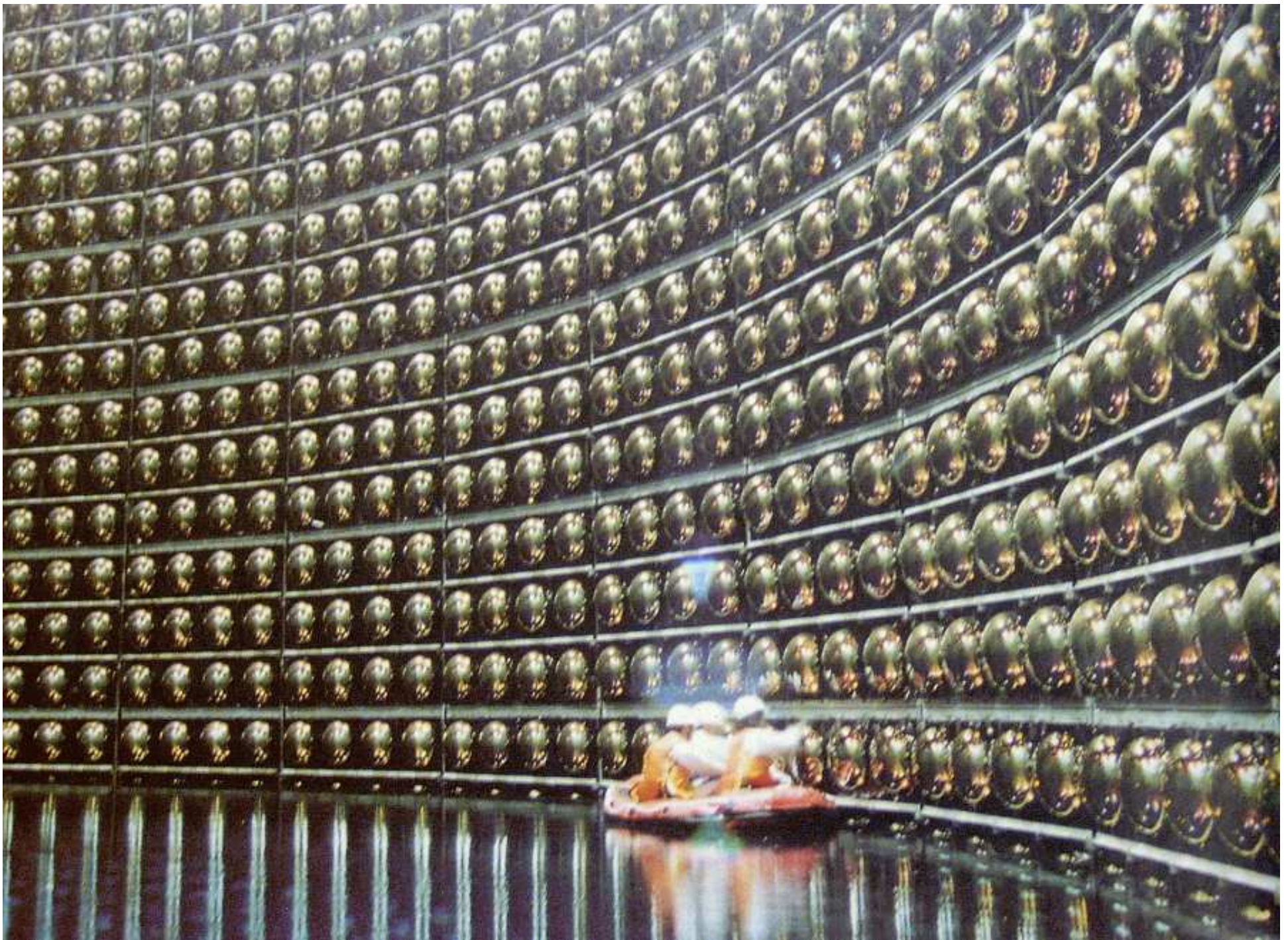
rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande





17
4



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

Przypadek $\nu_e n \rightarrow e^- p$

Krótki zasięg elektronu

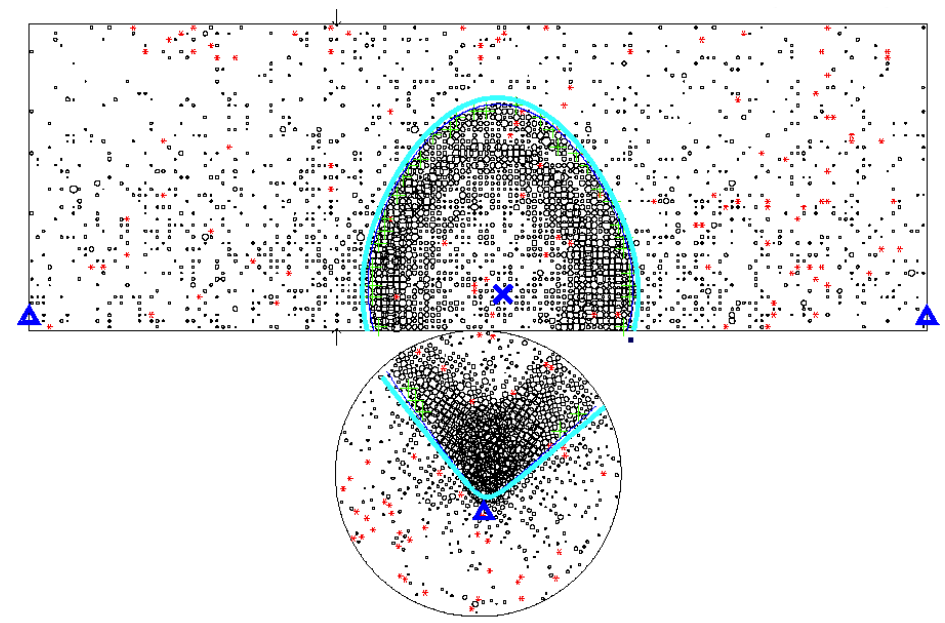
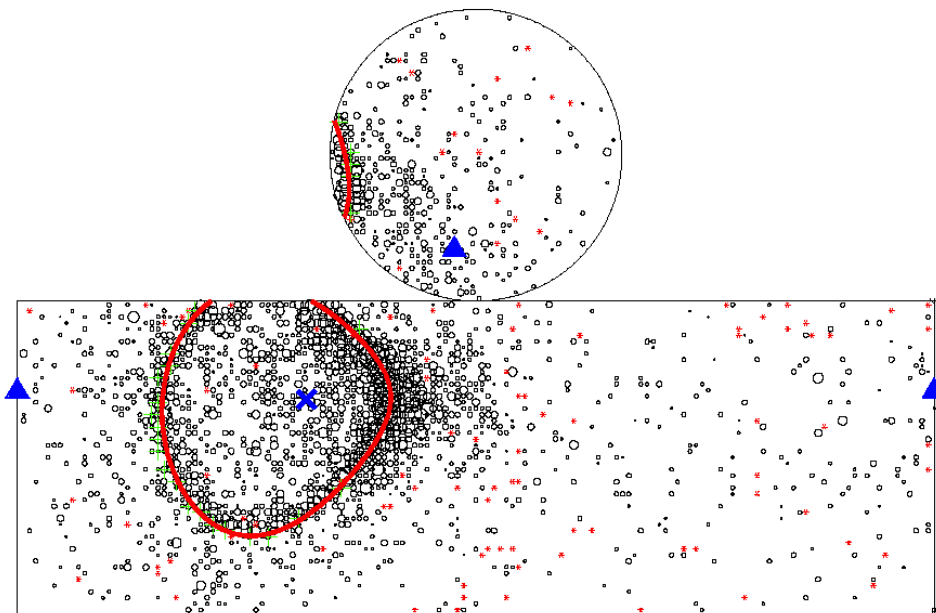
“cienki” pierścień

Neutrino mionowe

Przypadek $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$

Długa droga mionu w wodzie

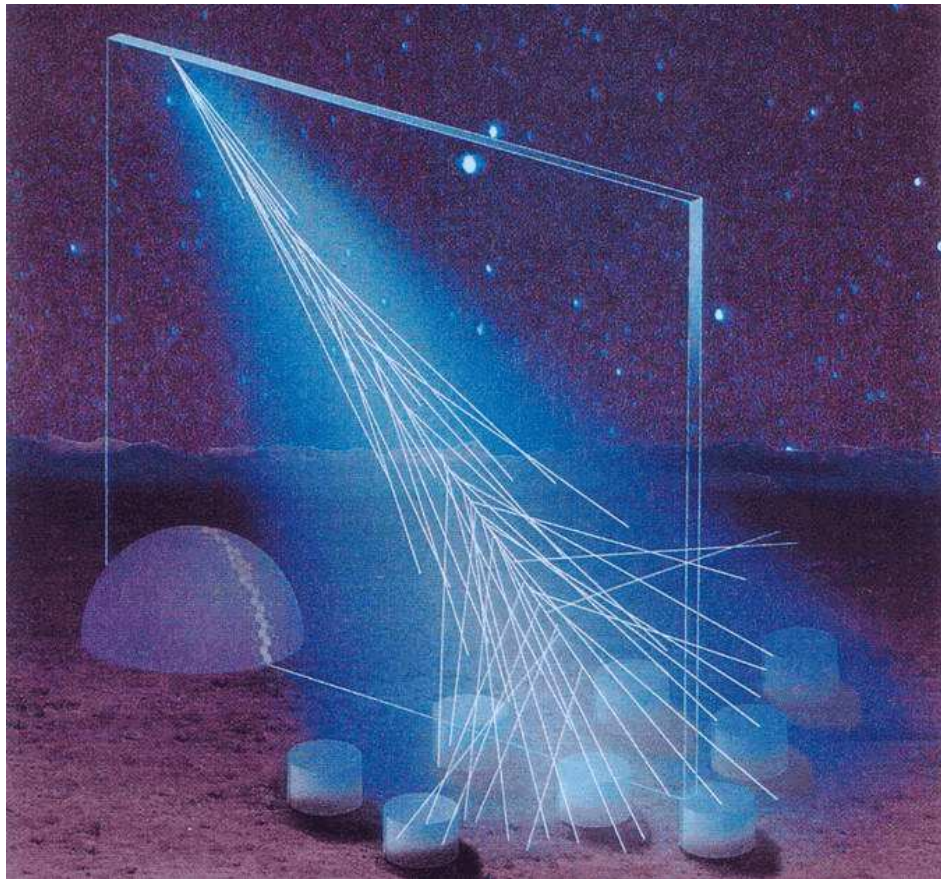
“gruby” pierścień



Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Obserwacja wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego.

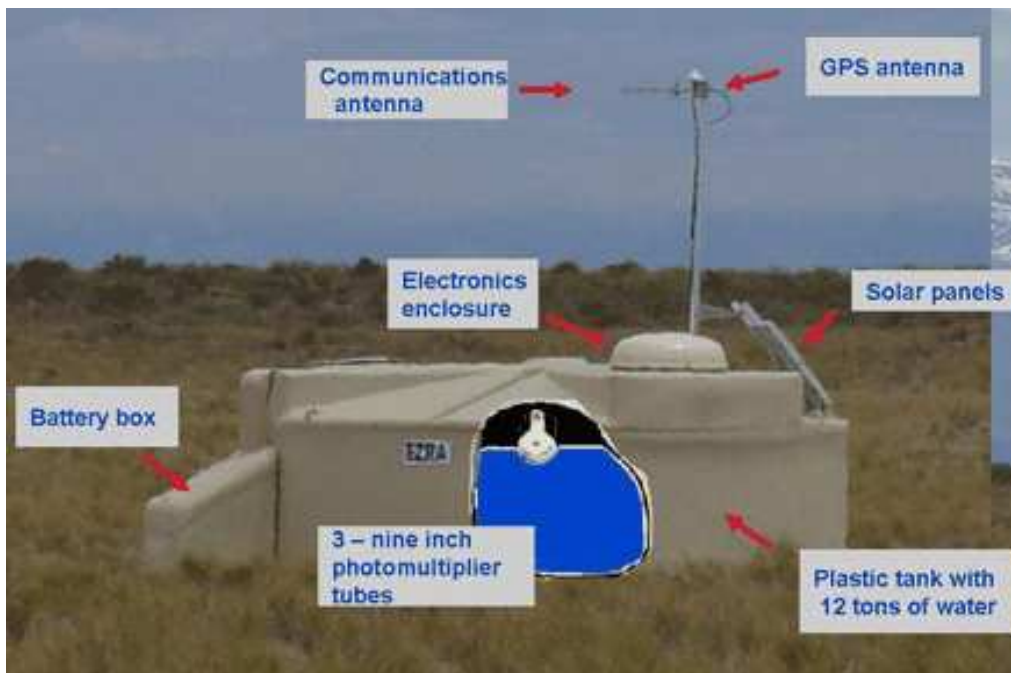


Scyntyllacja w powietrzu.
Promieniowanie Czerenkowa w
detektorach na powierzchni.

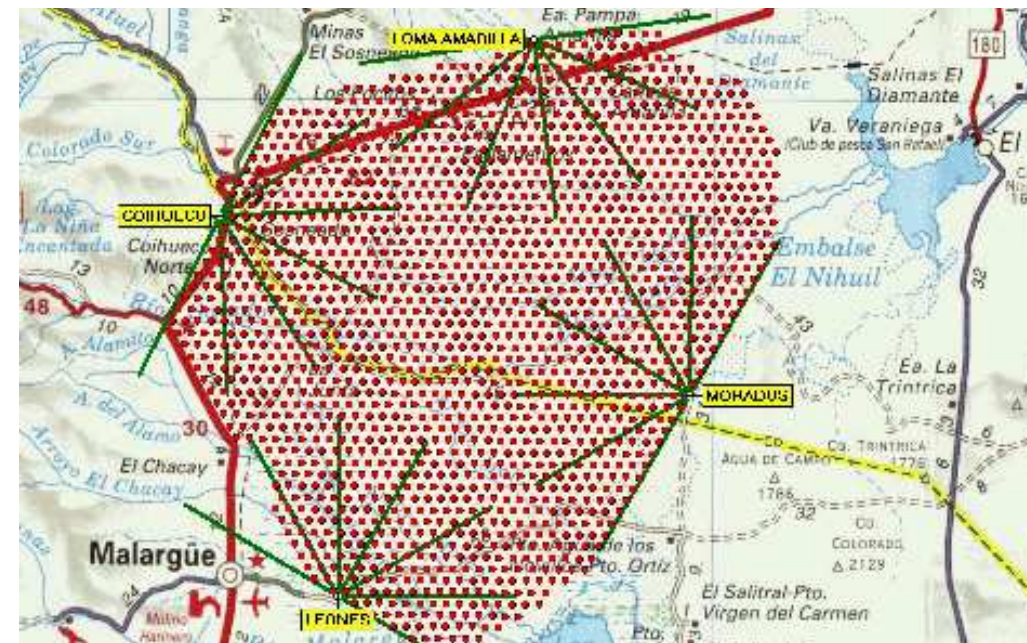
Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Detektor powierzchniowy



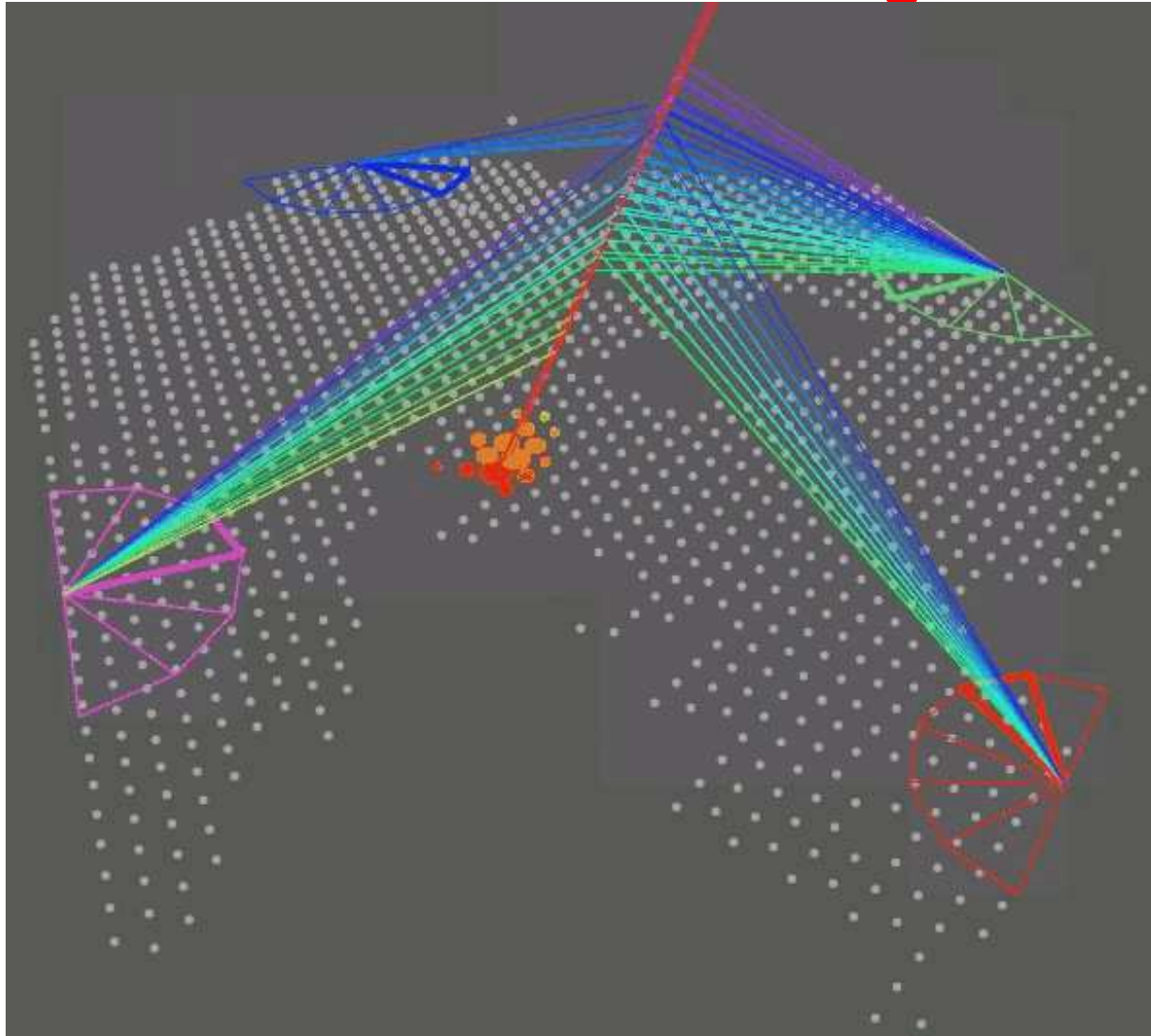
Mapa obserwatorium:



4 stacje po 6 teleskopów obserwujących świecenie w atmosferze (UV)
1600 detektorów powierzchniowych rozstawionych na 3000 km² !!!

Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger



Schemat obserwacji
"pęku atmosferycznego":
4 "zdjęcia" z teleskopów
+ "ślady" na powierzchni

Na podstawie pomiaru
"pęku" cząstek wtórnych
wnioskujemy o energii
cząstki pierwotnej

Detekcja cząstek

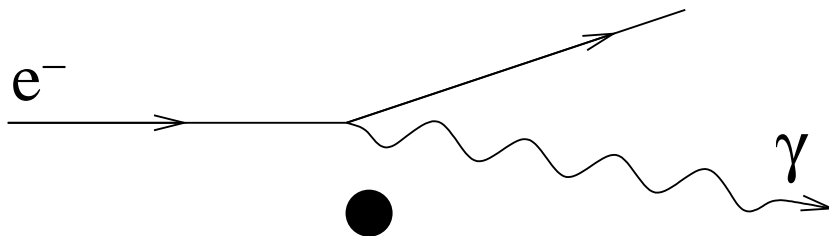
Kalorymetry

Wszystkie przedstawione do tej pory detektory rejestrowały przejście cząstki, ślad cząstki w materii \Rightarrow detektory śladowe.

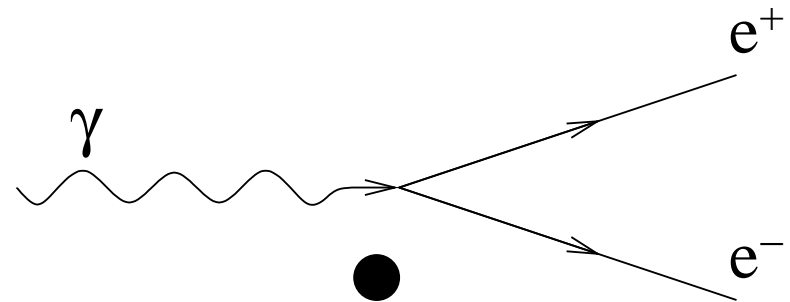
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi.

Kalorymetr elektromagnetyczny

Wysokoenergetyczne elektrony tracą energię prawie wyłącznie na **promieniowanie hamowania**



Wysokoenergetyczne fotony ulegają **konwersji na pary $e^+ e^-$**



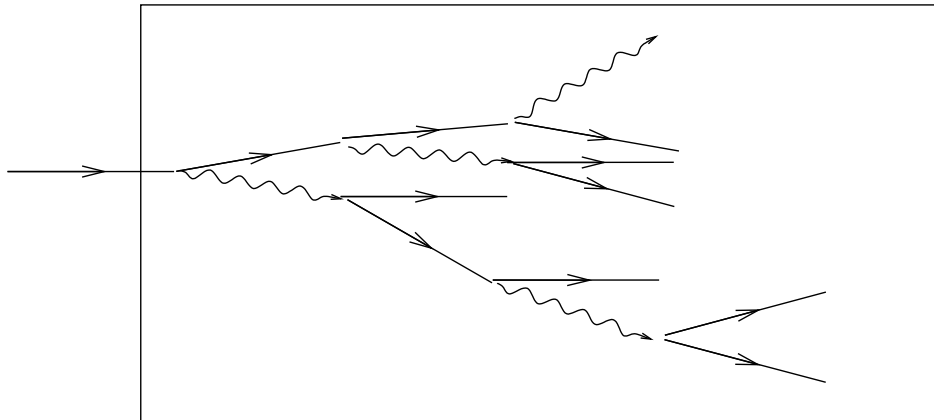
Detekcja cząstek

Kalorymetry

Wysokoenergetyczny **elektron lub foton** wpadając do detektora wywołuje **kaskadę** składającą się z $N \sim E$ cząstek

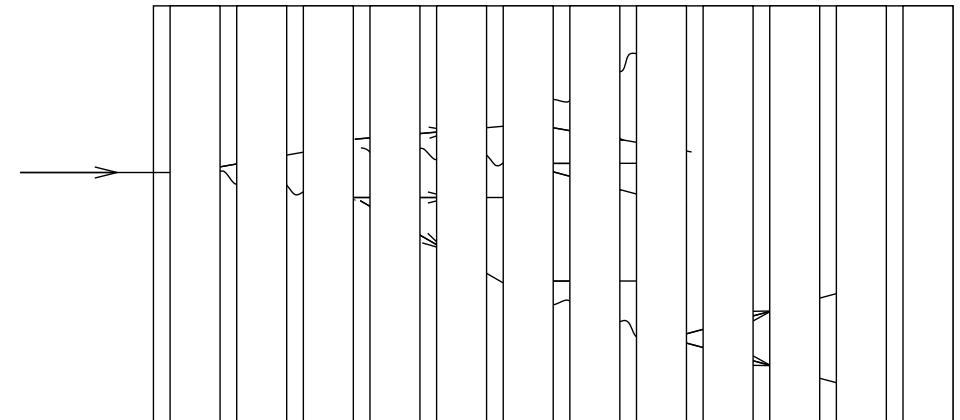
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitzą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylnatora

Kalorymetr próbkujący

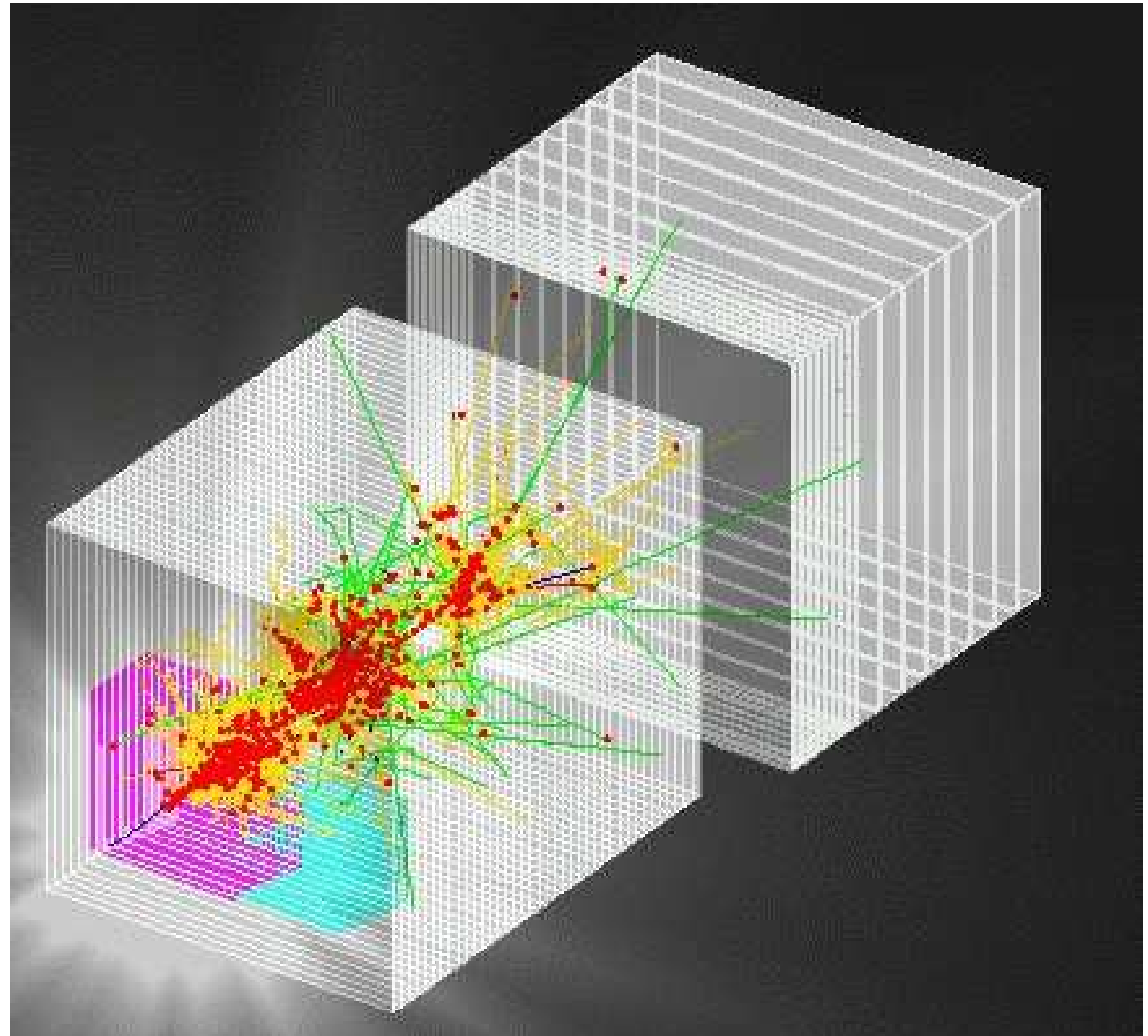


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

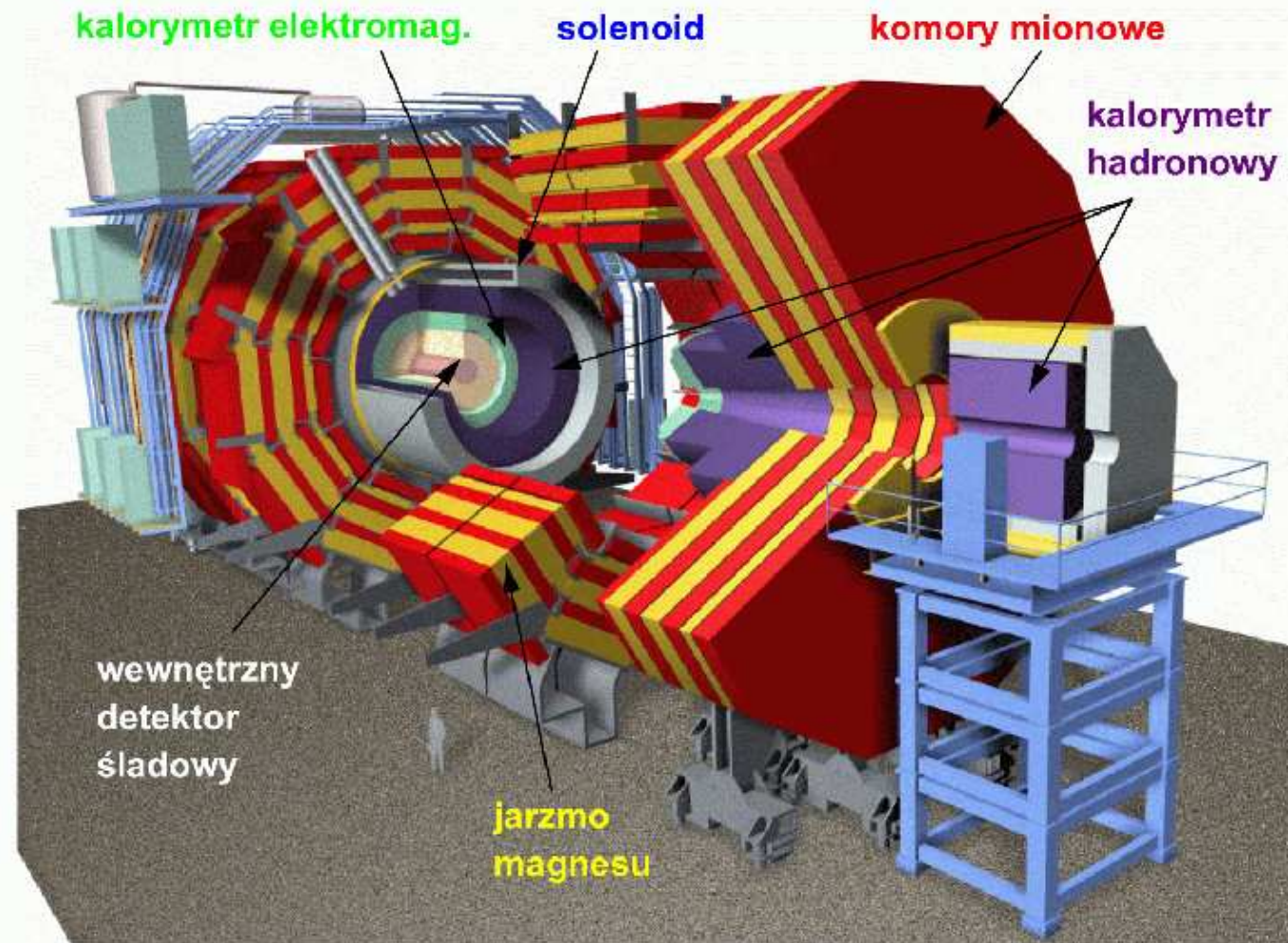
Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)



Detektor przy LHC

Compact Muon Solenoid



Compact Muon Solenoid

