

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Detekcja cząstek

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

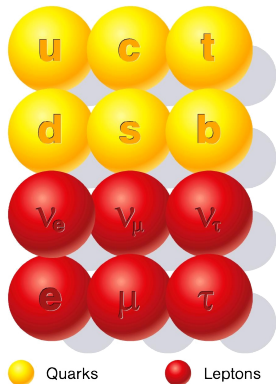


Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

24 października 2017

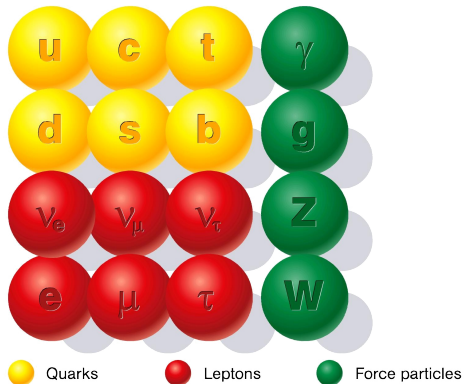
Cząstki fundamentalne

- cząstki materii
kwarki i leptyony



Cząstki fundamentalne

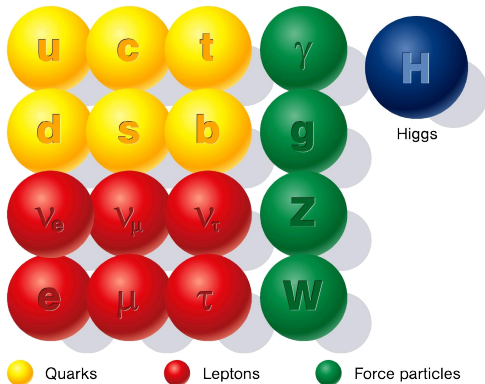
- cząstki materii
kwarki i leptyony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0



Cząstki fundamentalne

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa
konieczny dla
spójności modelu

Będziemy to jeszcze
szczegółowo omawiać...



Dualizm korpuskularno-falowy

Tak jak fotony (światło), wszystkie cząstki przejawiają zarówno własności korpuskularne (mają masę, ładunek, niosą określoną energię i pęd) jak i falowe (podlegają dyfrakcji i interferencji, ich zachowanie nie jest deterministyczne). Wszystko zależy od warunków obserwacji/pomiaru...

Dualizm korpuskularno-falowy

Tak jak fotony (światło), wszystkie cząstki przejawiają zarówno własności korpuskularne (mają masę, ładunek, niosą określoną energię i pęd) jak i falowe (podlegają dyfrakcji i interferencji, ich zachowanie nie jest deterministyczne). Wszystko zależy od warunków obserwacji/pomiaru...

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa", które potrafimy opisać odpowiednimi równaniami.

Amplituda tej fali opisuje prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

Dopiero dedykowany pomiar może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...

Nie możemy dowolnie dokładnie poznać stanu cząstki, np. jednocześnie zmierzyć położenie i pęd - zasada nieoznaczoności.

1 Obserwacje w świecie cząstek

2 Detektory jonizacyjne

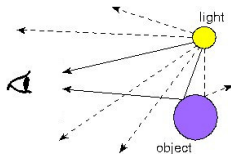
- Emulsja fotograficzna
- Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
- Detektory gazowe
- Detektory półprzewodnikowe

3 Inne procesy fizyczne

- Scyntyłacja
- Efekt fotoelektryczny
- Promieniowanie Czerenkowa

4 Współczesne eksperymenty

Istota obserwacji



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca obserwowanego procesu



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**.

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!

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:

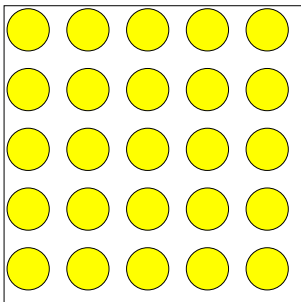
- jonizacja i scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

Struktura materii

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

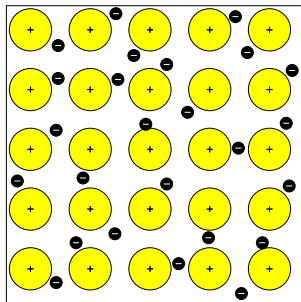
Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami



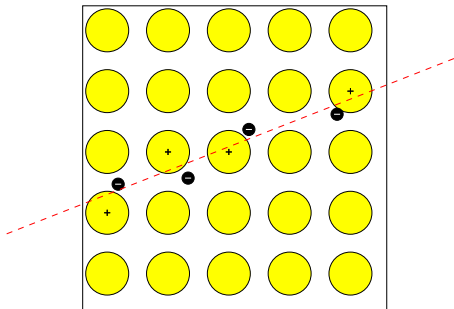
Przewodnik

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



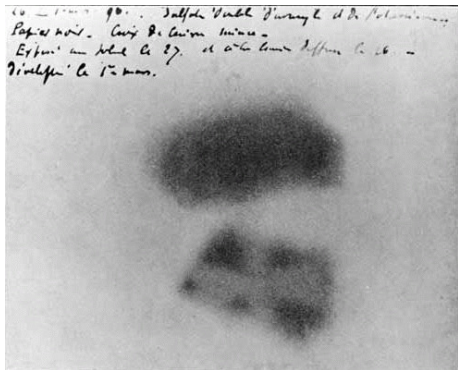
Jonizacja

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**

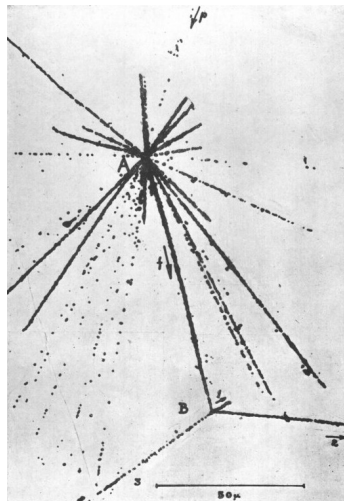
Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy

⇒ reakcja chemiczna

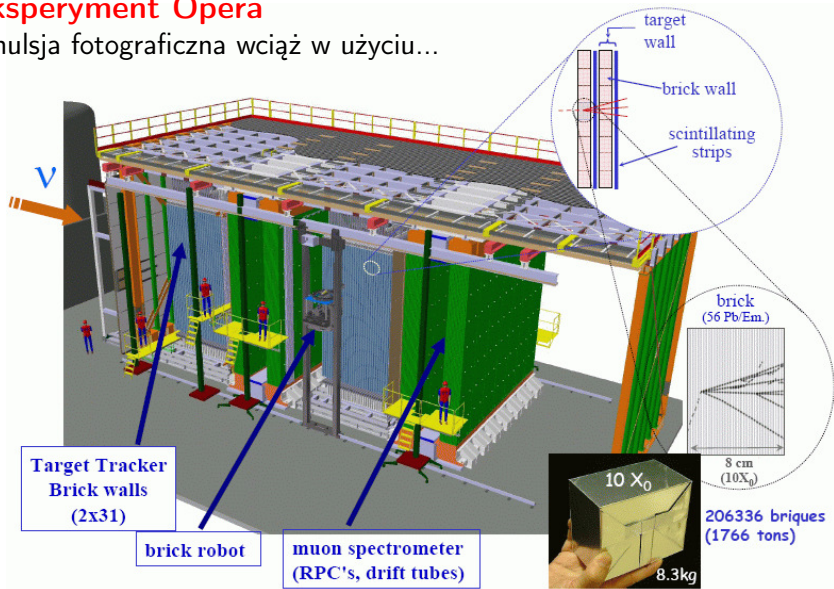


M.Danysz i J.Pniewski, 1953

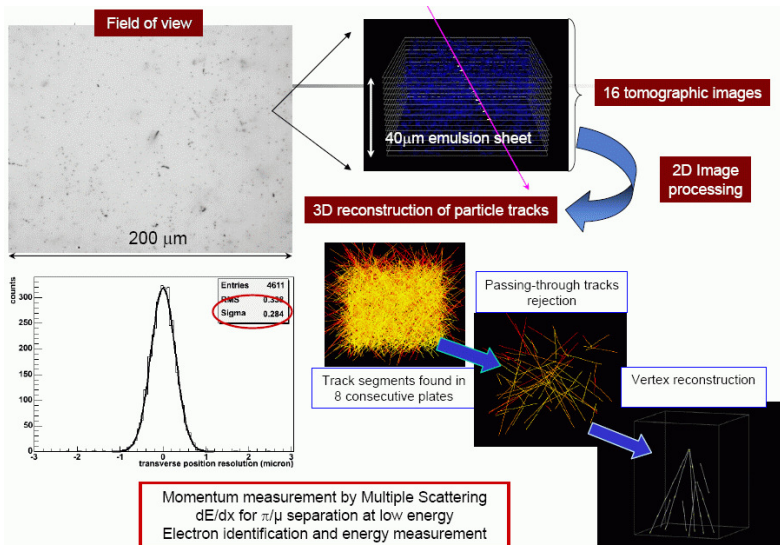
Detekcja cząstek

Eksperyment Opera

Emulsja fotograficzna wciąż w użyciu...

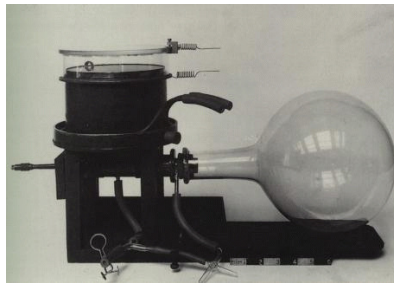


Emulsja fotograficzna eksperyment OPERA



Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

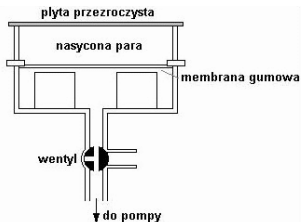


jonizacja

⇒ jony

⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

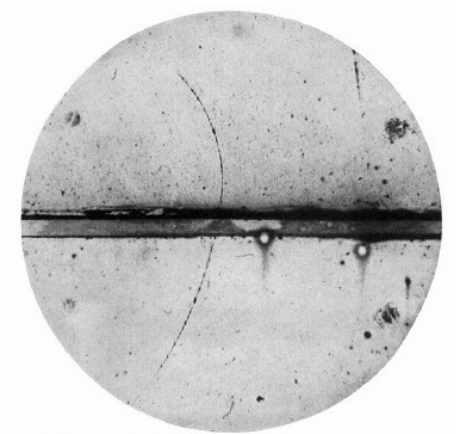


Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

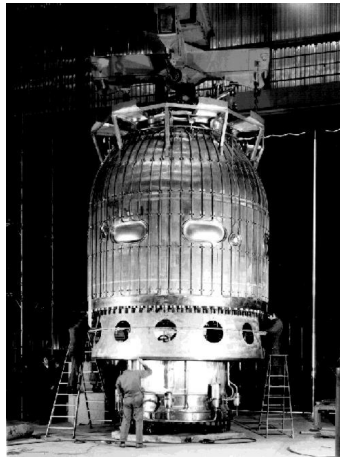
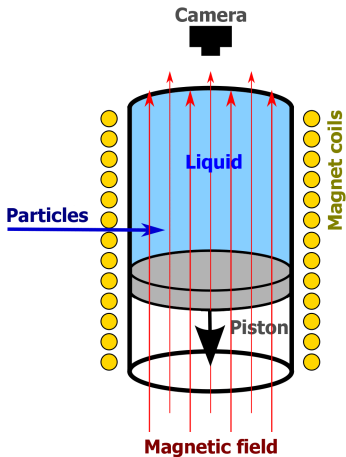


Carl Anderson, 1932



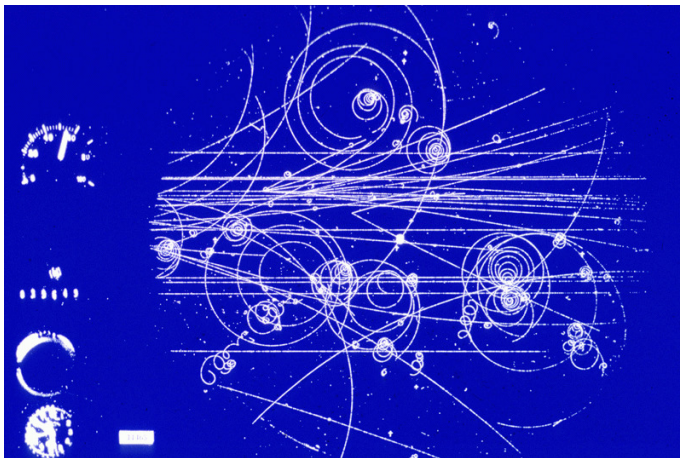
odkrycie pozytonu

Komora pęcherzykowa, 1952



jonizacja \Rightarrow wrzenie przegrzanej cieczy

Komora pęcherzykowa

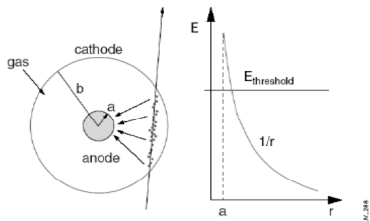


Ciecz pełni też rolę “tarczy”, z którą oddziałują cząstki wiązki

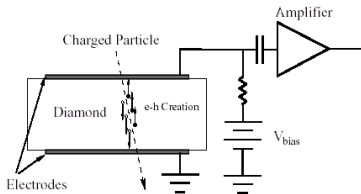
Pomiar jonizacji

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

w gazie



w półprzewodniku

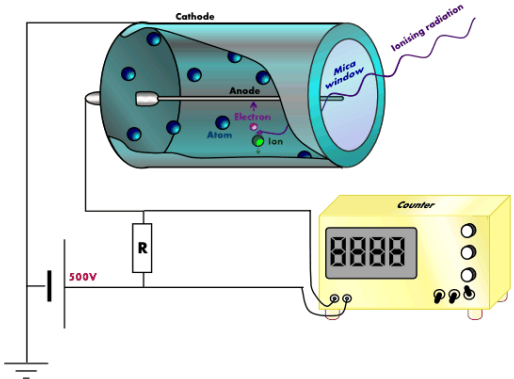


Przeptywający ładunek jest na ogół bardzo mały,
ale czuła elektronika pozwala go wzmocnić i zmierzyć.
Na tej zasadzie opiera się **większość współczesnych detektorów**.

Detekcja cząstek

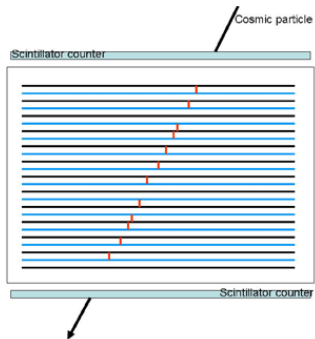
Licznik Geigera-Müllera

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



Komora iskrowa

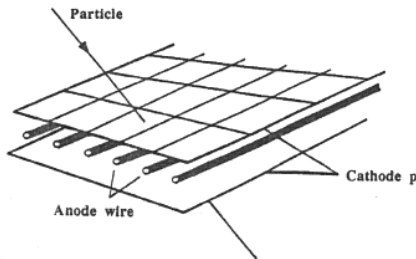
Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



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

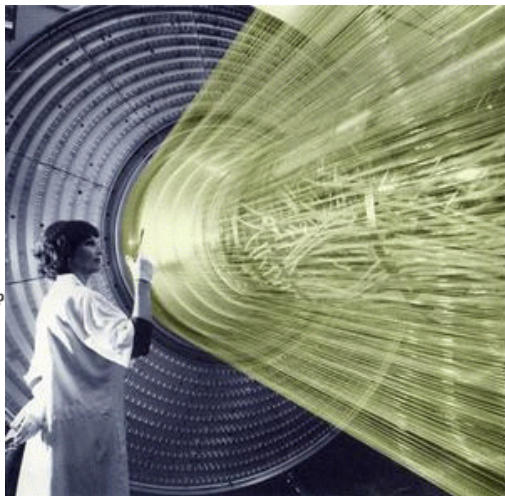


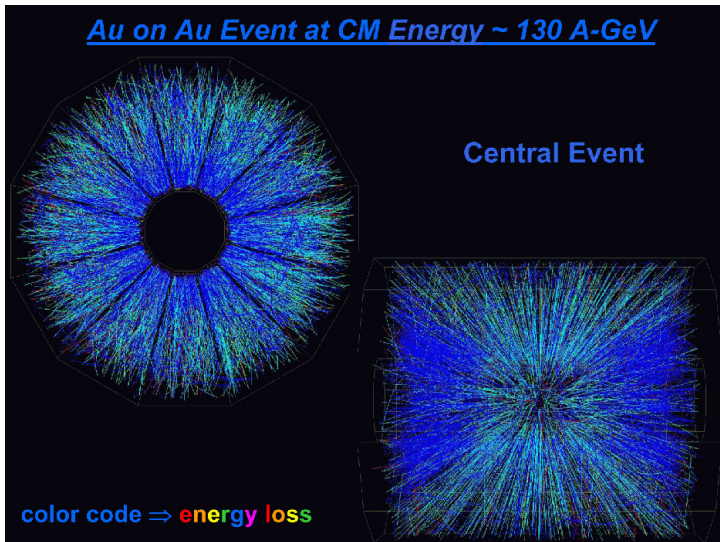
Photo: SLAC, USA

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich jonów

detektor STAR
przy RHIC



Detektory półprzewodnikowe

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

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



Wycinek:

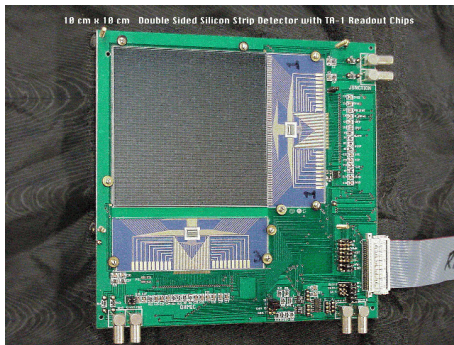


To nie UFO. To ślad cząstki...

Detektory półprzewodnikowe

Coraz powszechniej używane.

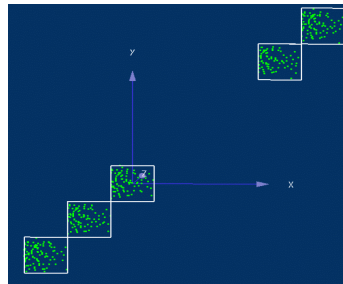
Element detektora krzemowego



Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy zrekonstruować tor.

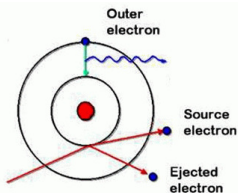
Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek przez pięć warstw detektora testowego:



Scyntyłacja

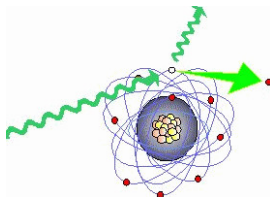
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



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).

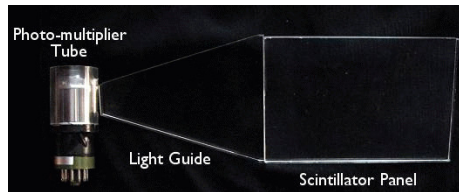
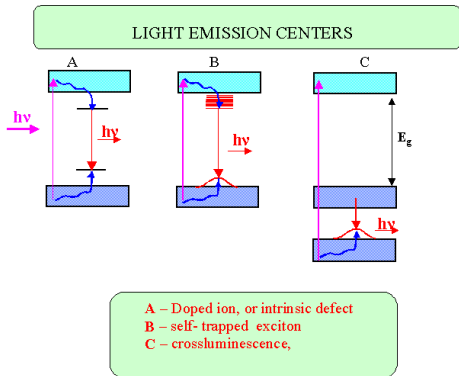


W obu przypadkach elektron może zostać “wyrwany” z atomu.

Scyntyłacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

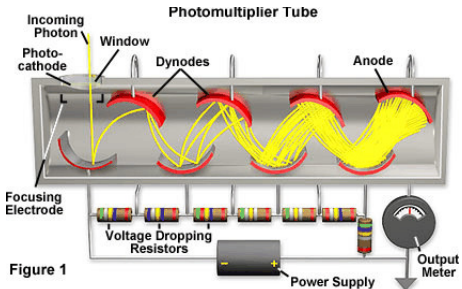
Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza



Brak pomiaru pozycji
Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki

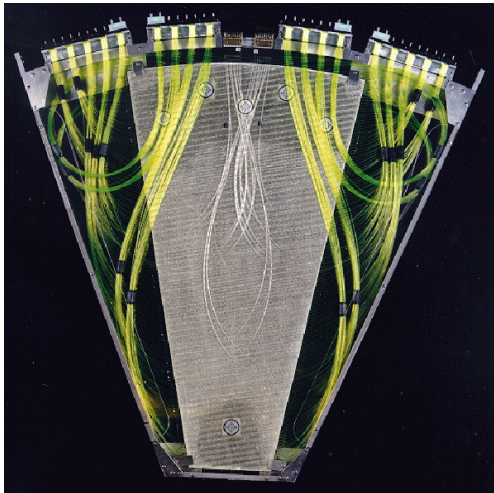
Fotopowielacz

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.

Detektory scyntylacyjne

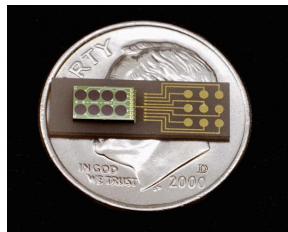


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

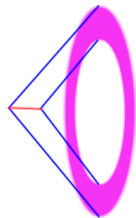
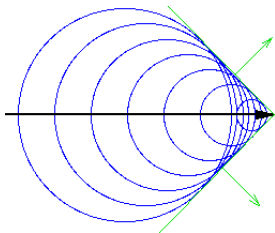
⇐ włókna scyntylujące,

fotopowielacze krzemowe ↓



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...

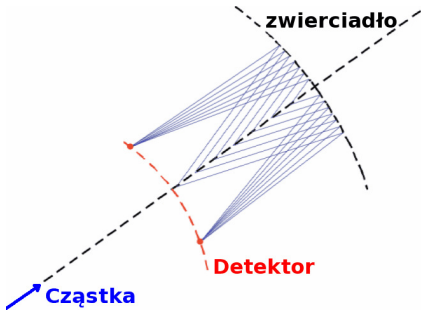
Tania technologia dla dużych detektorów!

Detekcja cząstek

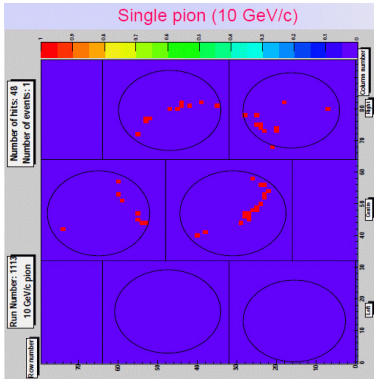
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



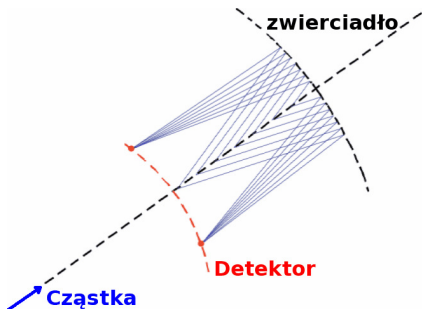
Obraz w detektorze



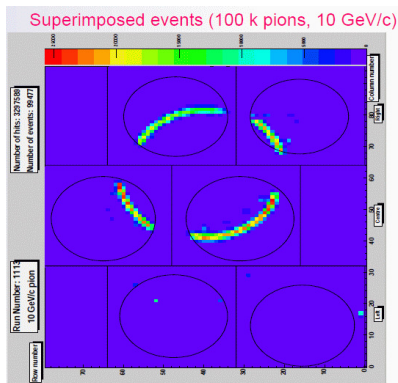
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



Obraz w detektorze

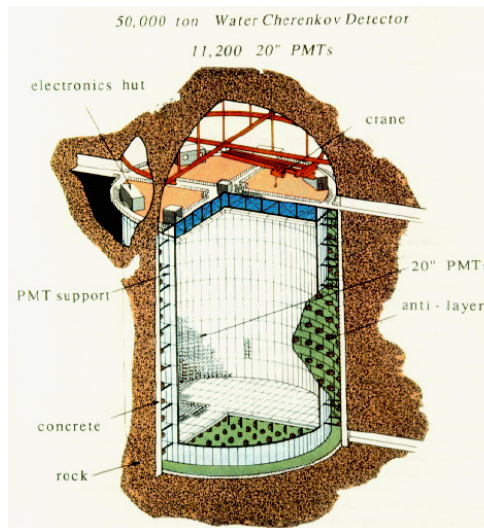


Super-Kamiokande eksperyment neutronowy

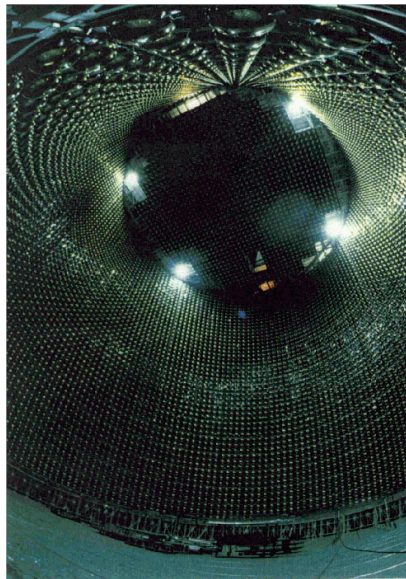
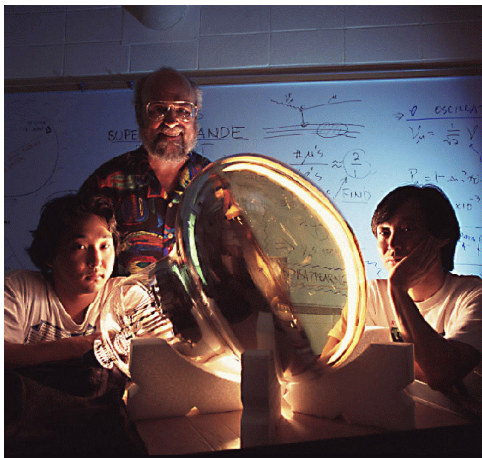
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

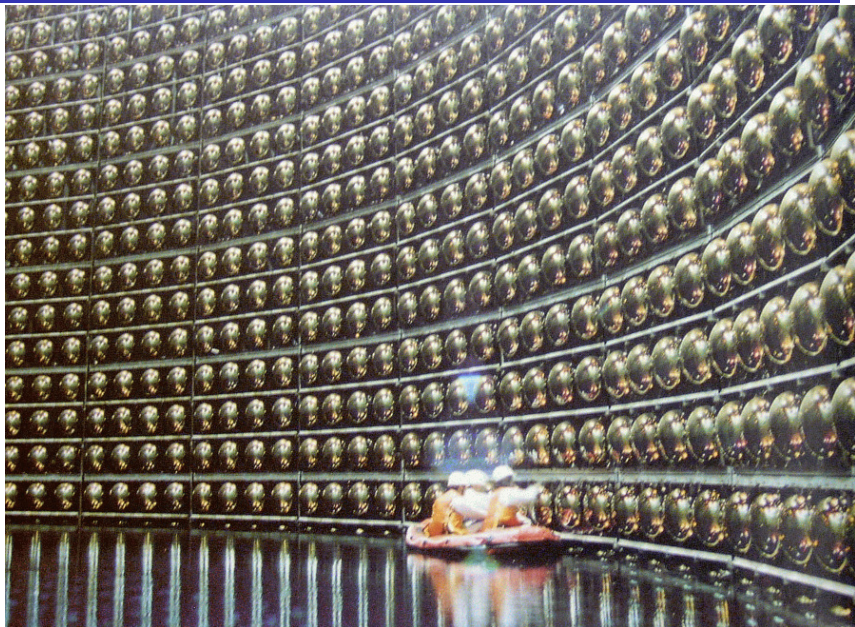
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Super-Kamiokande





Super-Kamiokande

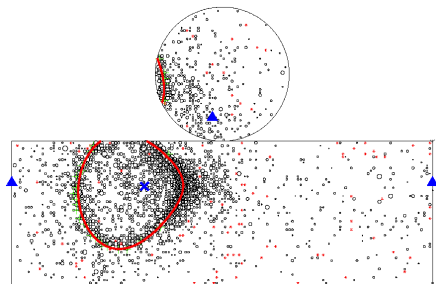
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

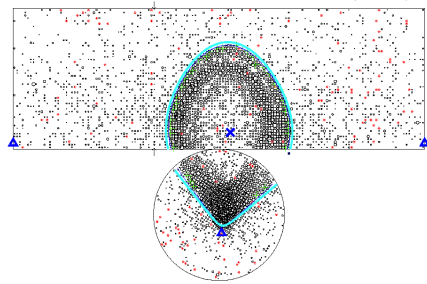


Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

“gruby” pierścień.



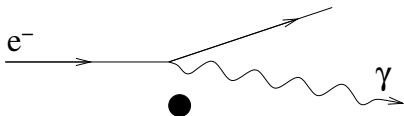
Kalorymetry

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

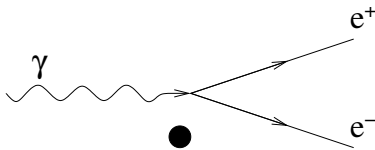
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi \Rightarrow kalorymetry.

Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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

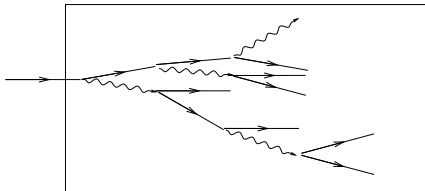


Kalorymetry

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

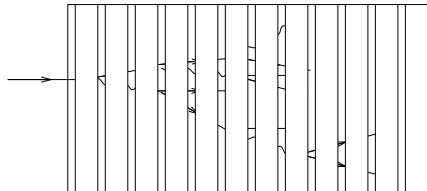
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntyлятора

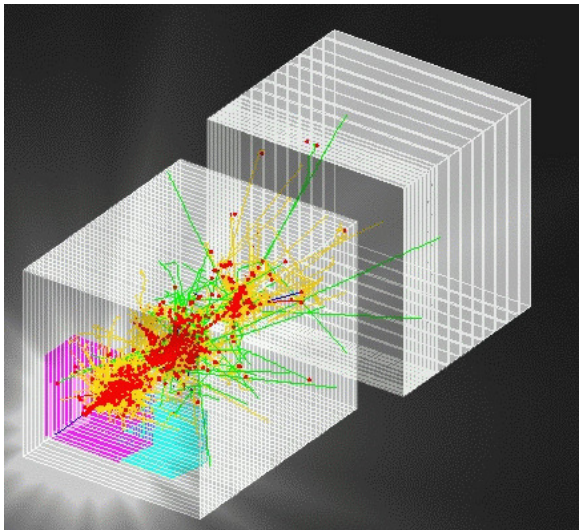
Kalorymetr próbkujący



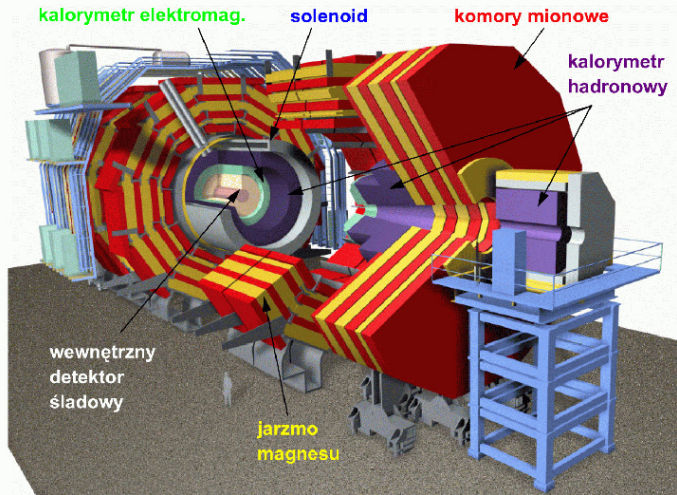
warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Kalorymetry

Symulacja rozwoju kaskady hadronowej (pomiar energii protonu)



Compact Muon Solenoid



- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania

- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe

- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
 - Scyntylację
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa

- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
 - Scyntyłację
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
 - Powstawanie kaskad cząstek wtórnych
 - ⇒ kalorymetry

- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
 - Scyntyłację
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
 - Powstawanie kaskad cząstek wtórnych
 - ⇒ kalorymetry

O tym jak z tych elementów zbudowane są współczesne eksperymenty opowiemy na kolejnych wykładach...