

Wszystkie Cząstki Elementarne dla Humanistów

Detekcja cząstek

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



30 października 2018

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
- 5 Pomiar energii

1 Obserwacje w świecie cząstek

2 Detektory jonizacyjne

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

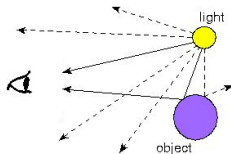
3 Inne procesy fizyczne

- Scyntyłacja
- Efekt fotoelektryczny
- Promieniowanie Czerenkowa

4 Współczesne eksperymenty

5 Pomiar energii

Istota obserwacji



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca (w zauważalny sposób) obserwowanego procesu

Możemy założyć, że obserwowane obiekty są całkowicie odizolowane...

Wahadło Foucaulta w Panteonie w Paryżu



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!

a każde oddziaływanie wpływa na stan cząstki...

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!

a każde oddziaływanie wpływa na stan cząstki...

Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

- jonizacja i scyntyłacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

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

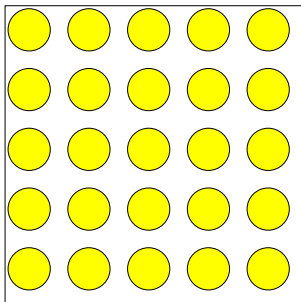
5 Pomiar energii

Struktura materii

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

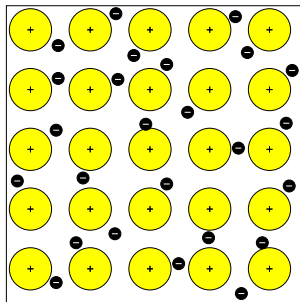
Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami



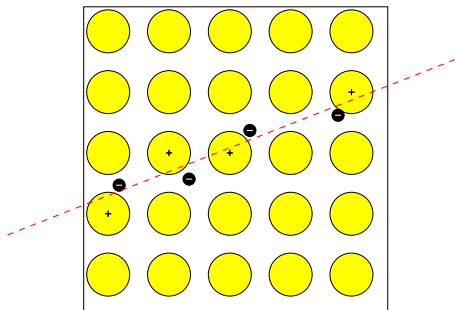
Przewodnik

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



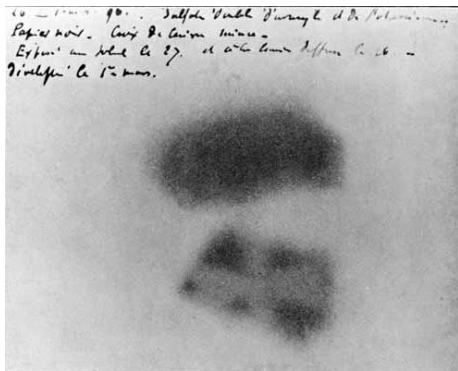
Jonizacja

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 wzbudzone atomy i swobodne nośniki ładunku...**

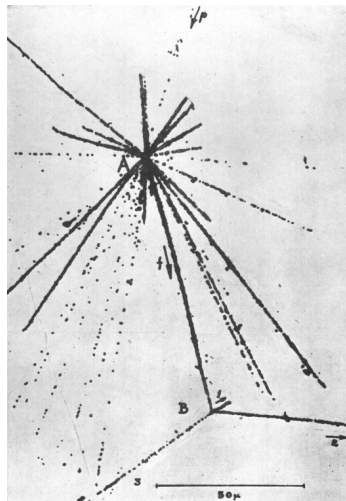
Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy

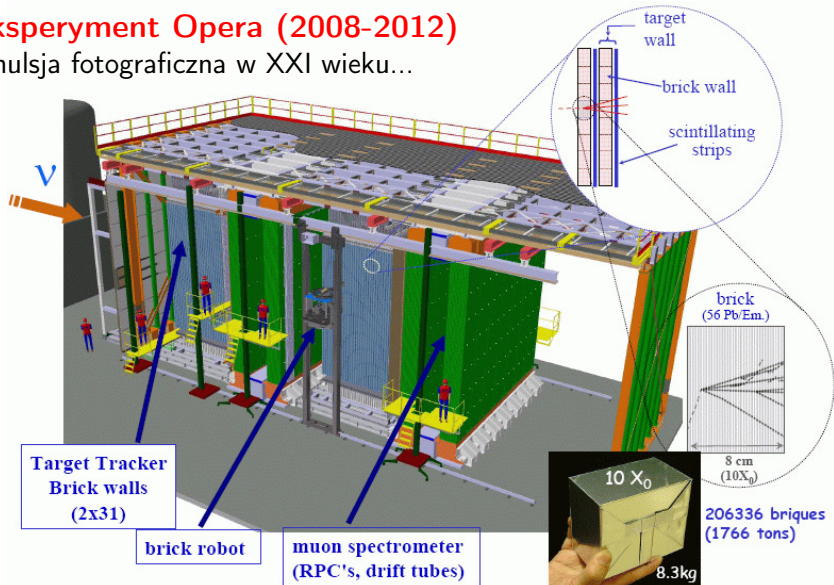
⇒ reakcja chemiczna



M. Danysz i J. Pniewski, 1953

Eksperyment Opera (2008-2012)

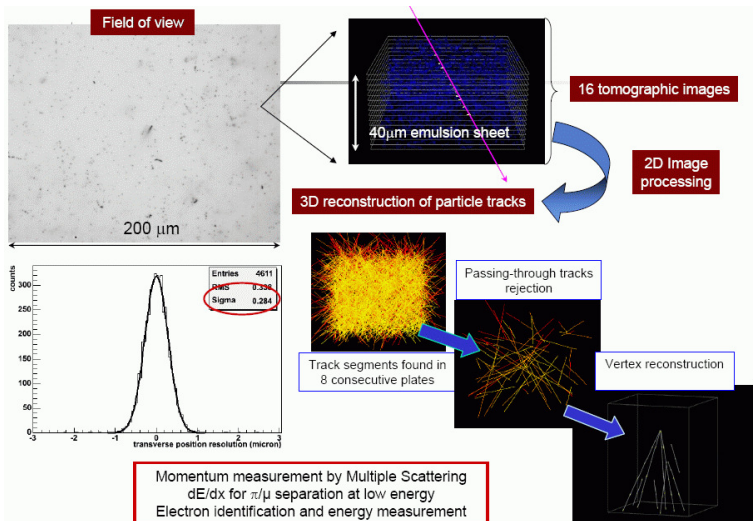
Emulsja fotograficzna w XXI wieku...



Ponad 200 000 "cegiał" z emulsją fotograficzną

Emulsja fotograficzna

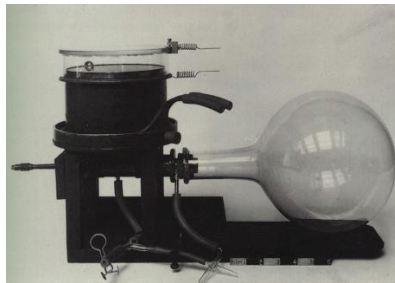
Eksperyment OPERA (2008-2012)



Całkowicie zautomatyzowana i zkomputeryzowana obróbka emulsji...

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

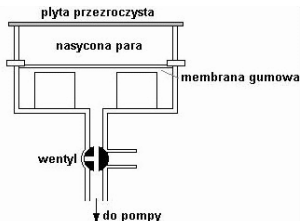


jonizacja

⇒ jony

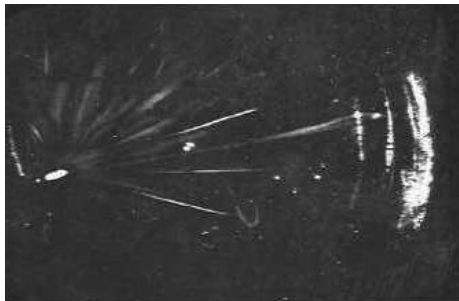
⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

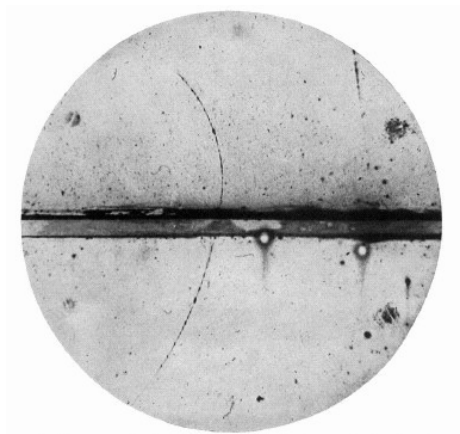


Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

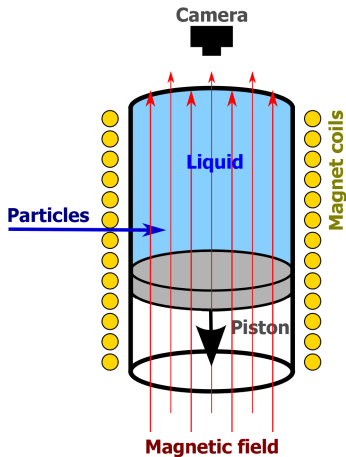


Carl Anderson, 1932

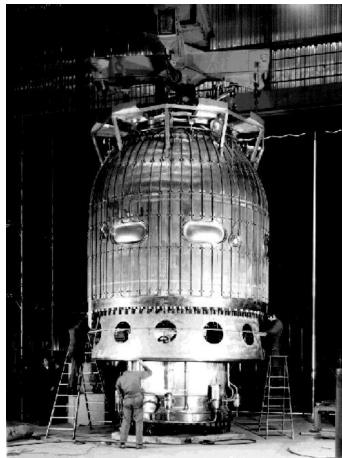


odkrycie pozytonu

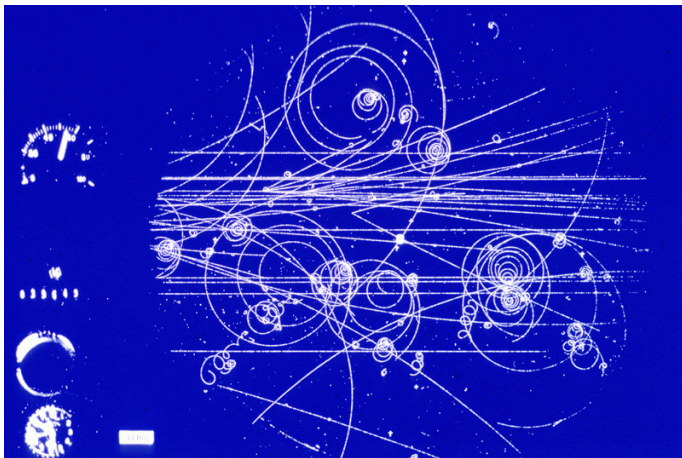
Komora pęcherzykowa, 1952



jonizacja \Rightarrow wrzenie przegrzanej cieczy



Komora pęcherzykowa

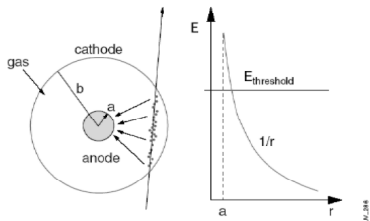


Ciecz pełni też rolę “tarczy”, z którą oddziałują cząstki wiązki

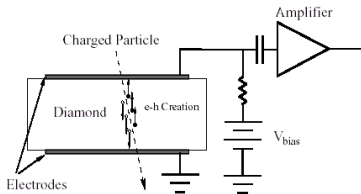
Pomiar jonizacji

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

w gazie



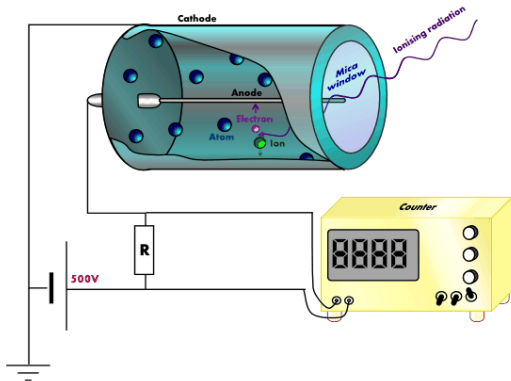
w półprzewodniku



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

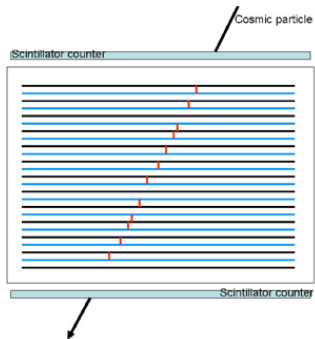
Licznik Geigera-Müllera

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



Komora iskrowa

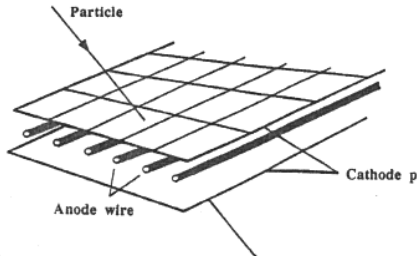
Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)

Komora wielodrutowa

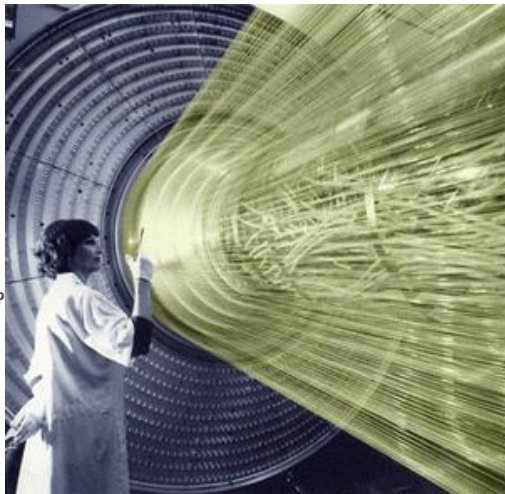
Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



Tanie!
Odczyt w pełni elektroniczny!

elektronika+komputer

⇒ rewolucja w możliwościach zbierania i przetwarzania danych...



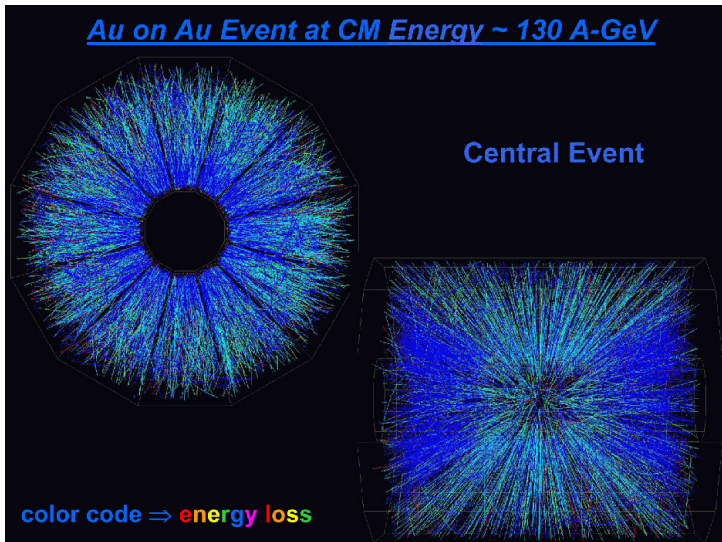
TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich jonów

detektor STAR
przy RHIC

produkcja
~ 6000 cząstek
naładowanych



Detektory półprzewodnikowe

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

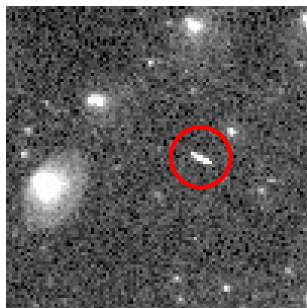
Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek! (nie tylko fotonów)

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



sensor $30 \times 30 \text{ mm}^2$

Wycinek:

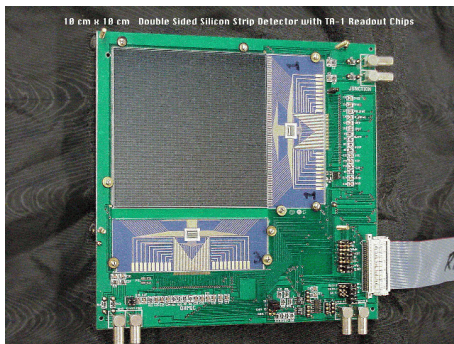


To nie UFO. To ślad cząstki...

Detektory półprzewodnikowe

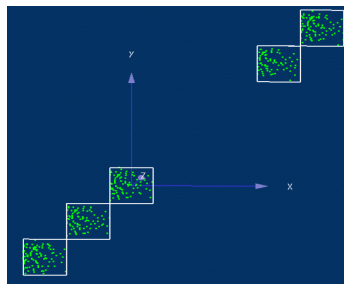
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar
pozycji cząstek (rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki
cząstek przez pięć warstw
detektora testowego:

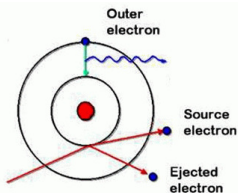


Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy precyzyjnie zrekonstruować tor.

- 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
- 5 Pomiar energii

Scyntyłacja

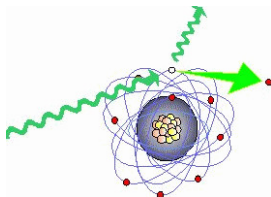
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



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

Fotony

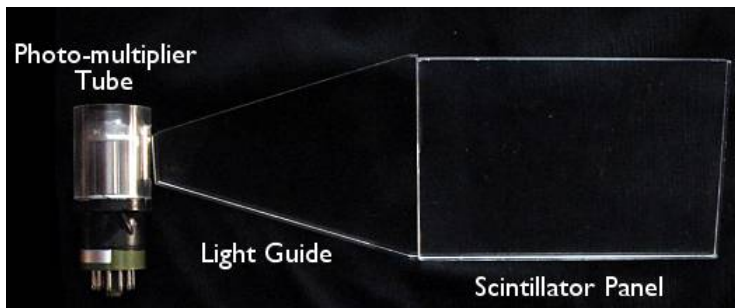
Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).



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

Scyntyłacja

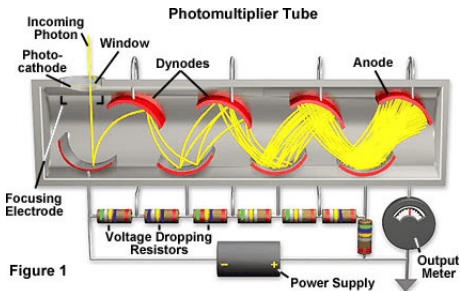
W tradycyjnych licznikach scyntylicyjnych stosujemy duże płaszczyzny (lub bloki) scyntyлятора, z których światło przesyłane jest specjalnymi światłowodami do fotopowielaczy.



- + **Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki** (błysk jest bardzo krótki)
- **Brak pomiaru pozycji** (duża powierzchnia aktywna)

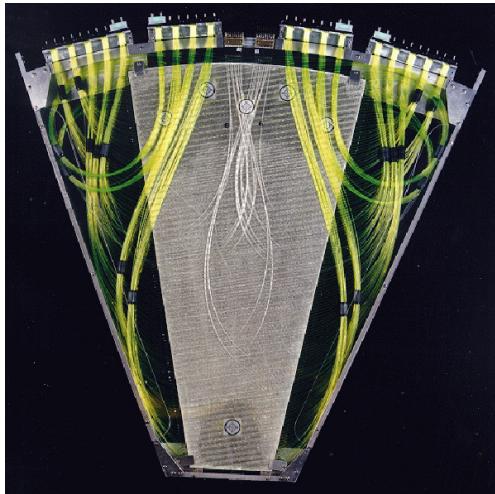
Fotopowielacz

Pojedynczy foton wybija z fotokatody pojedynczy elektron! Aby móc zliczyć przychodzące fotony musimy **powielić** pojawiający się **ładunek**. Elektrony przyspieszane są pomiędzy kolejnymi elektrodami (tzw. **dynodami**), tak że każdy elektron wybija kilka elektronów wtórnych - powstaje lawina.



⇒ Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detektory scyntylacyjne

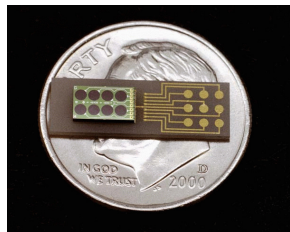


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

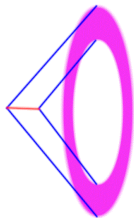
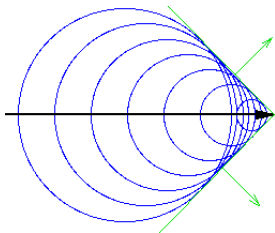
⇐ włókna scyntylujące,

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

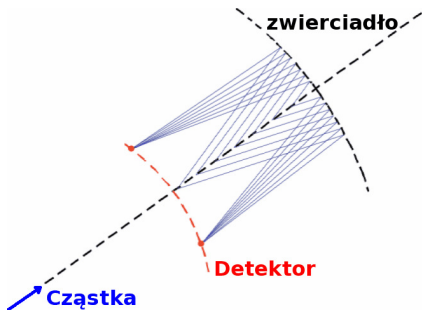
Zachodzi w wodzie, lodzie, powietrzu...

Tania technologia dla dużych detektorów!

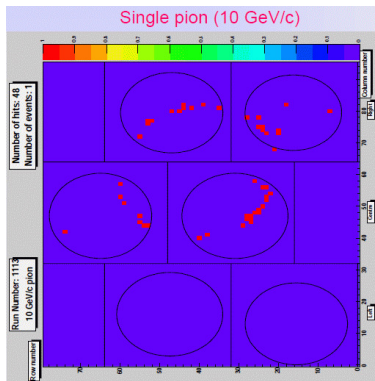
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



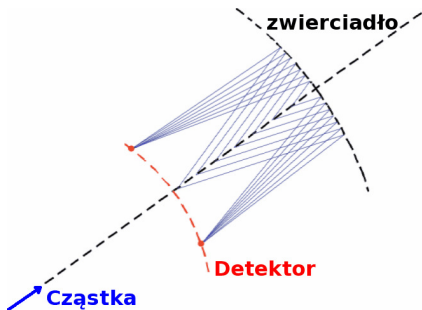
Obraz w detektorze (jedna cząstka)



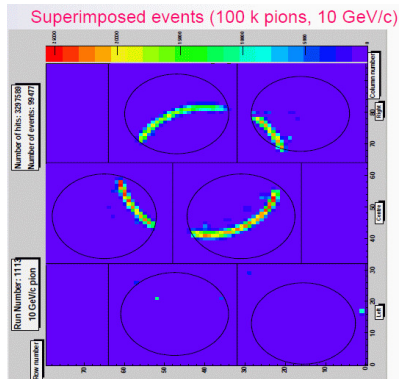
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



Obraz w detektorze (po uśrednieniu)



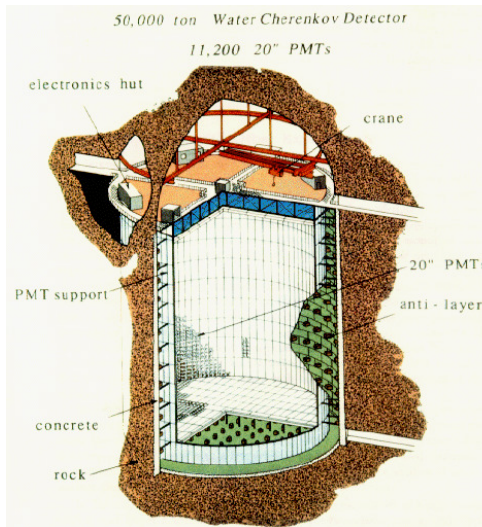
- 1 Obserwacje w świecie cząstek
- 2 Detektory jonizacyjne
 - Emulsja fotograficzna
 - Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
 - Detektory gazowe
 - Detektory półprzewodnikowe
- 3 Inne procesy fizyczne
 - Scyntyłacja
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
- 4 Współczesne eksperymenty
- 5 Pomiar energii

Super-Kamiokande eksperyment neutronowy

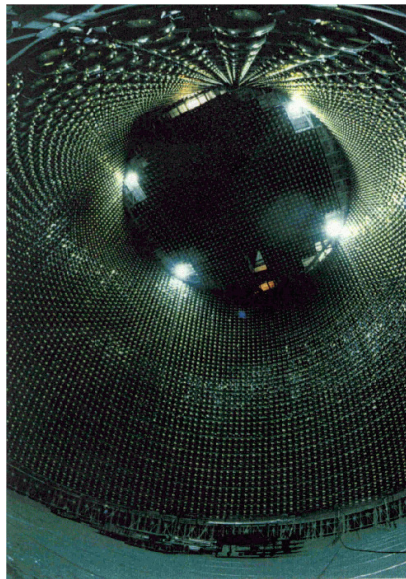
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

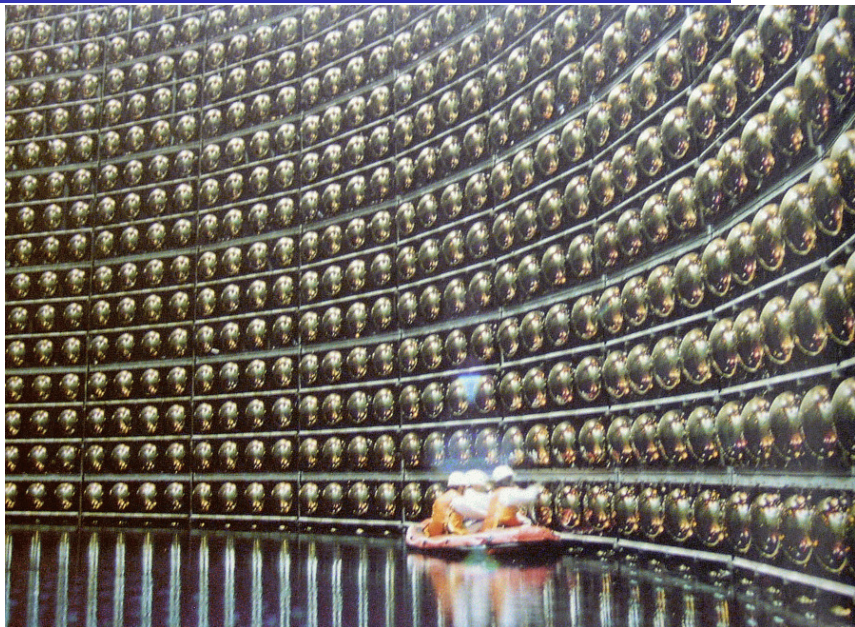
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Super-Kamiokande

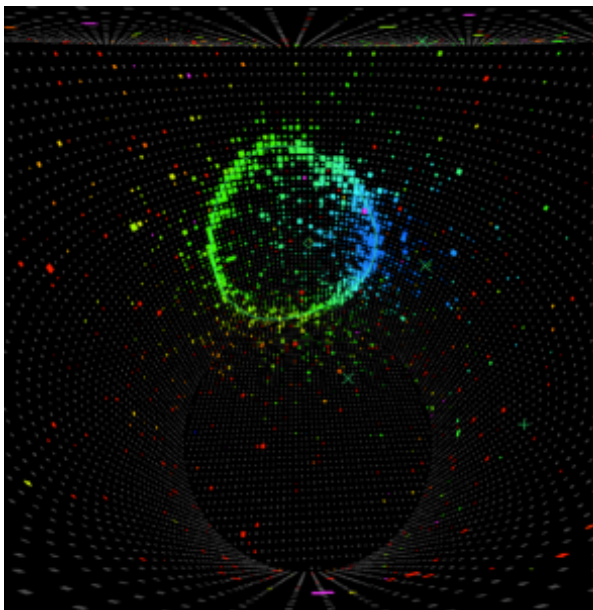




Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutronów.

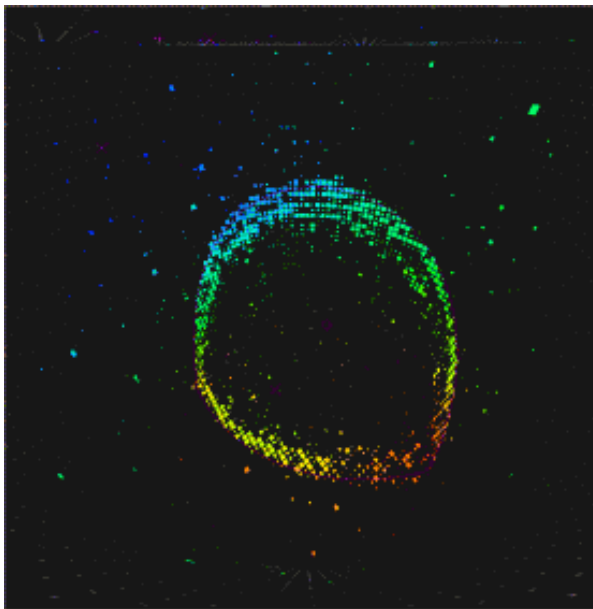
Widok perspektywiczny
Rozmiar punktu: sygnał
Kolor punktu: czas



Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Widok perspektywiczny
Rozmiar punktu: sygnał
Kolor punktu: czas



Super-Kamiokande

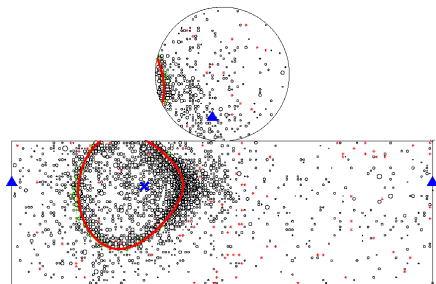
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

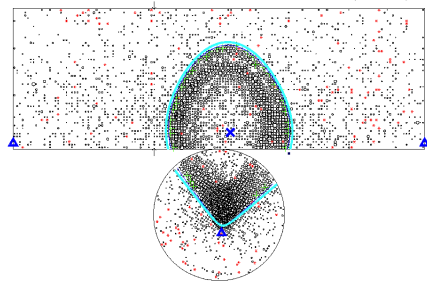


Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

“gruby” pierścień.



- 1 Obserwacje w świecie cząstek
- 2 Detektory jonizacyjne
 - Emulsja fotograficzna
 - Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
 - Detektory gazowe
 - Detektory półprzewodnikowe
- 3 Inne procesy fizyczne
 - Scyntylacja
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
- 4 Współczesne eksperymenty
- 5 Pomiar energii

Detektory śladowe

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

Ograniczenia:

- Nie możemy zmierzyć cząstek neutralnych
- Nie możemy bezpośrednio zmierzyć energii cząstki

Wykorzystując zakrzywienie w polu magnetycznym możemy wyznaczyć pęd cząstki...

Detektory śladowe

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

Ograniczenia:

- Nie możemy zmierzyć cząstek neutralnych
- Nie możemy bezpośrednio zmierzyć energii cząstki

Wykorzystując zakrzywienie w polu magnetycznym możemy wyznaczyć pęd cząstki...

Kalorymetry

Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "przekazała ją" w całości ośrodkowi, w którym możemy mierzyć jej oddziaływania.

Dla **wysokich energii** cząstek ($E \gg mc^2$) przekazanie energii następuje w wyniku wielu oddziaływań, w których produkowane są liczne cząstki wtórne przejmujące część energii cząstki początkowej \Rightarrow **kaskada cząstek**

Kalorymetry

Rozwój kaskady w ośrodku bardzo zależy od rodzaju wpadającej cząstki i w ogólnym przypadku musi także uwzględniać procesy zachodzące w ośrodku (np. wzbudzenie lub rozszczepienie jąder atomów)

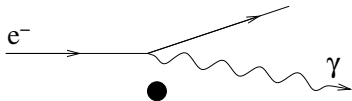
Kalorymetry

Rozwój kaskady w ośrodku bardzo zależy od rodzaju wpadającej cząstki i w ogólnym przypadku musi także uwzględniać procesy zachodzące w ośrodku (np. **wzbudzenie lub rozszczepienie jąder atomów**)

Kalorymetr elektromagnetyczny

Jednak dla fotonów i elektronów sytuacja bardzo się upraszcza, bo są **tylko dwa procesy**, które dają istotny wkład w rozwój kaskady

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



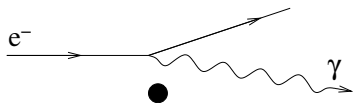
Kalorymetry

Rozwój kaskady w ośrodku bardzo zależy od rodzaju wpadającej cząstki i w ogólnym przypadku musi także uwzględniać procesy zachodzące w ośrodku (np. **wzbudzenie lub rozszczepienie jąder atomów**)

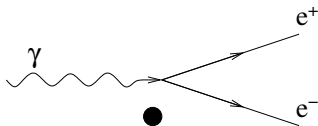
Kalorymetr elektromagnetyczny

Jednak dla fotonów i elektronów sytuacja bardzo się upraszcza, bo są **tylko dwa procesy**, które dają istotny wkład w rozwój kaskady

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



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



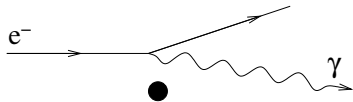
Kalorymetry

Rozwój kaskady w ośrodku bardzo zależy od rodzaju wpadającej cząstki i w ogólnym przypadku musi także uwzględniać procesy zachodzące w ośrodku (np. wzbudzenie lub rozszczepienie jąder atomów)

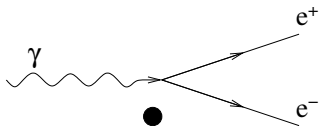
Kalorymetr elektromagnetyczny

Jednak dla fotonów i elektronów sytuacja bardzo się upraszcza, bo są **tylko dwa procesy**, które dają istotny wkład w rozwój kaskady

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



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



Produkowane fotonu i elektrony/pozytony dalej podlegają tym samym procesom...

Kalorymetr elektromagnetyczny

Rozwój kaskady trwa tak długo jak długo energia pojedynczej cząstki nie spadnie poniżej pewnej wartości progowej E_0 (rzędu MeV).

⇒ kaskada składają się z $N \sim E/E_0$ cząstek

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

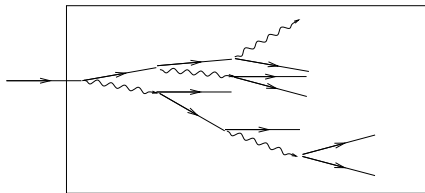
Kalorymetr elektromagnetyczny

Rozwój kaskady trwa tak długo jak długo energia pojedynczej cząstki nie spadnie poniżej pewnej wartości progowej E_0 (rzędu MeV).

⇒ kaskada składają się z $N \sim E/E_0$ cząstek

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

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntyлятора

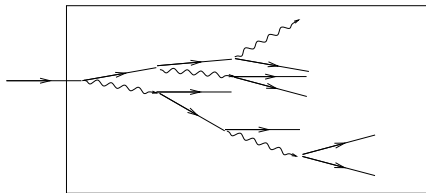
Kalorymetr elektromagnetyczny

Rozwój kaskady trwa tak długo jak długo energia pojedynczej cząstki nie spadnie poniżej pewnej wartości progowej E_0 (rzędu MeV).

⇒ kaskada składają się z $N \sim E/E_0$ cząstek

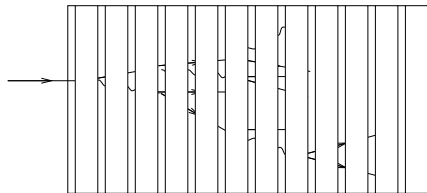
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowaną jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntyлятора

Kalorymetr próbkujący



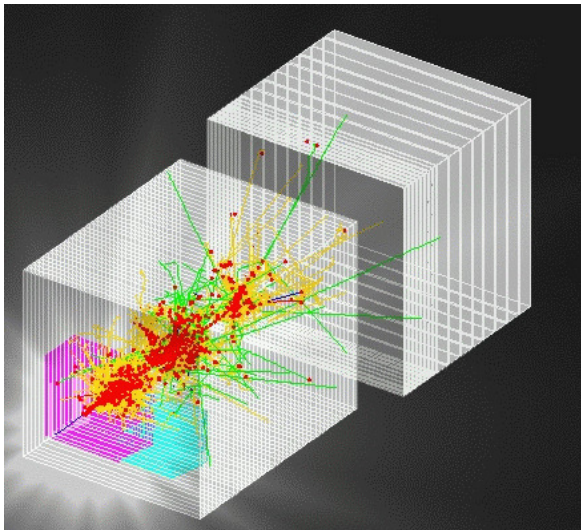
warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Kalorymetry hadronowe

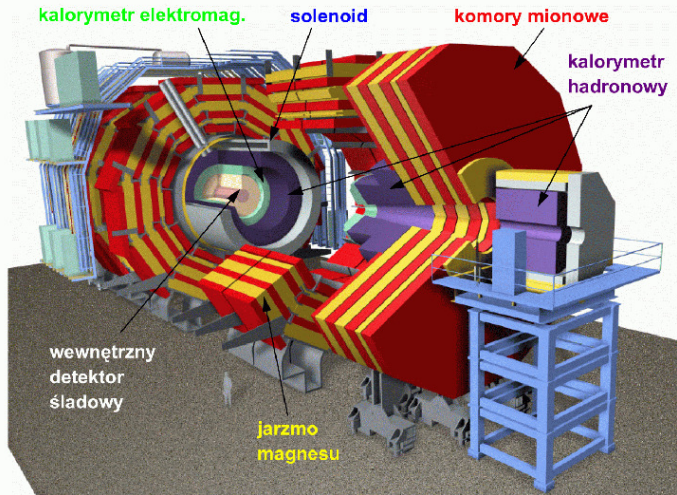
Gdy w blok materii wpada wysokoenergetyczny proton lub pion, mamy do czynienia z wieloma różnymi procesami i produkcją wielu różnych cząstek...

Opis jest dużo bardziej skomplikowany, ale zasada ta sama: im wyższa energia tym więcej cząstek

Symulacja rozwoju kaskady hadronowej (pomiar 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
 - Scyntylację
 - 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
 - Scyntylację
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
 - Powstawanie kaskad cząstek wtórnych
 - ⇒ kalorymetry

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