

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Detekcja cząstek

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



15 lipca 2021

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"...

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

1 Obserwacje w świecie cząstek

2 Detektory jonizacyjne

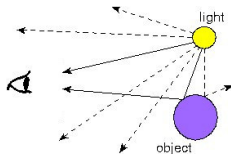
- Emulsja fotograficzna
- Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
- Detektory gazowe
- Detektory półprzewodnikowe

3 Inne procesy fizyczne

- Scyntylacja
- Efekt fotoelektryczny
- Promieniowanie Czerenkowa

4 Współczesne eksperymenty

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

- Scyntylacja
- Efekt fotoelektryczny
- Promieniowanie Czerenkowa

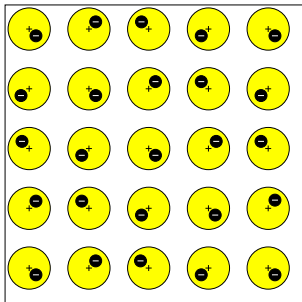
4 Współczesne eksperymenty

Struktura materii

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

Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami, brak swobodnych ładunków

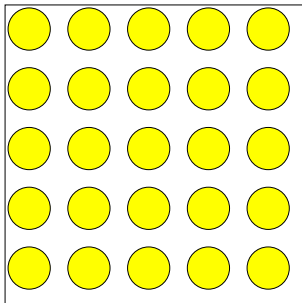


Struktura materii

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

Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami, brak swobodnych ładunków

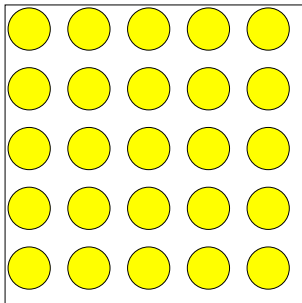


Struktura materii

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

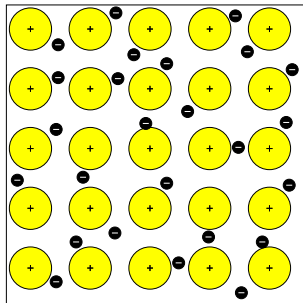
Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami, brak swobodnych ładunków



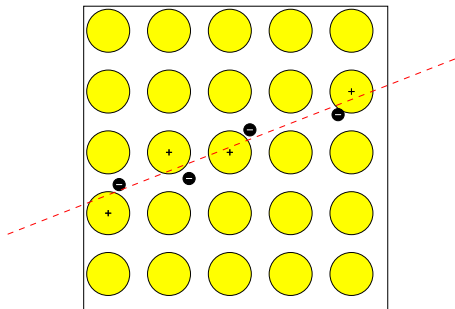
Przewodnik

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



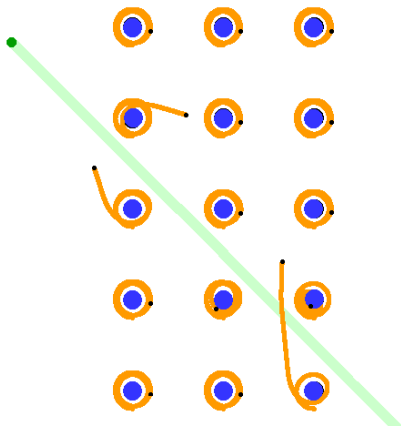
Jonizacja

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

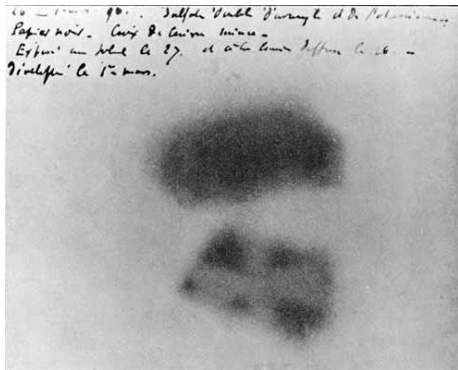


Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z **elektronami** i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów. **Pojawiają się wzbudzone atomy i swobodne nośniki ładunku...**

Jonizacja - model



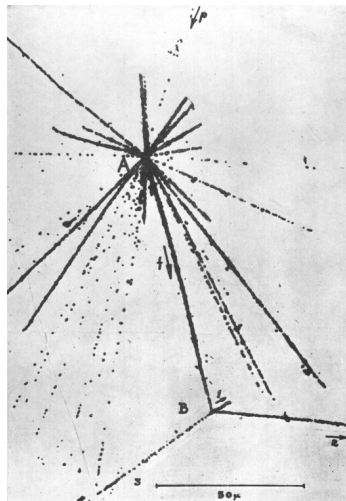
Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy

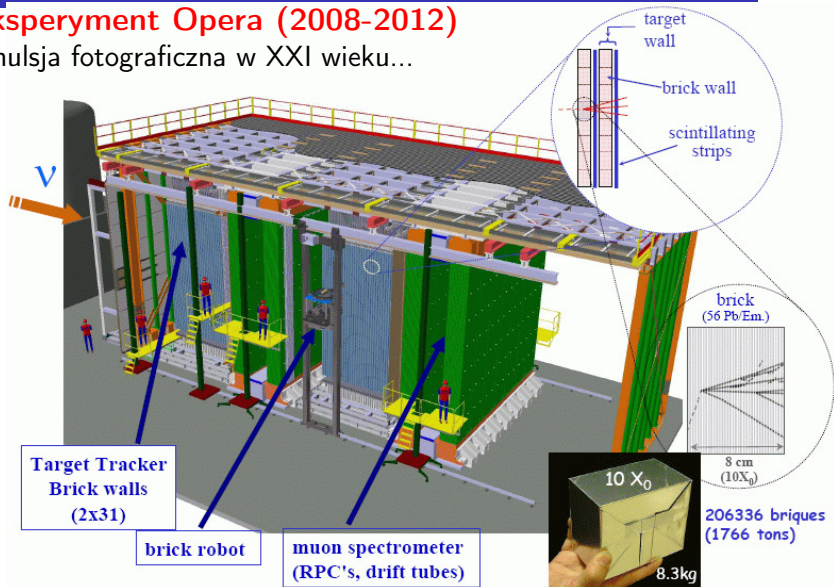
⇒ reakcja chemiczna



M.Danysz i J.Pniewski, 1953

Eksperyment Opera (2008-2012)

Emulsja fotograficzna w XXI wieku...



Ponad 200 000 "cegiał" z emulsją fotograficzną

Emulsja fotograficzna

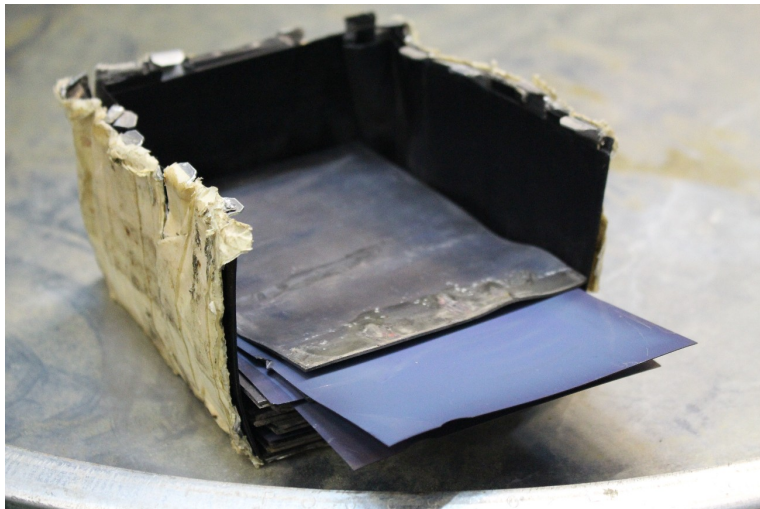
Eksperyment OPERA (2008-2012)



Paleta z cegłami...

Emulsja fotograficzna

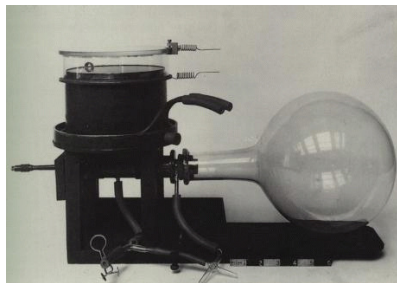
Eksperyment OPERA (2008-2012)



Struktura “cegły”

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

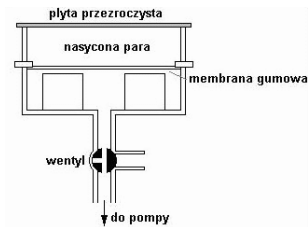


jonizacja

⇒ jony

⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

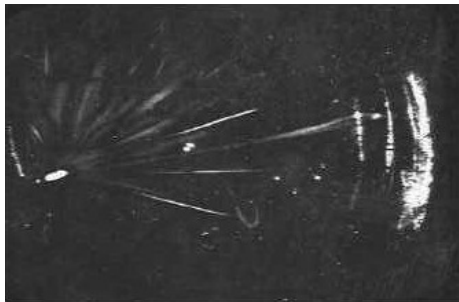


Komora mgłowa - pokaz

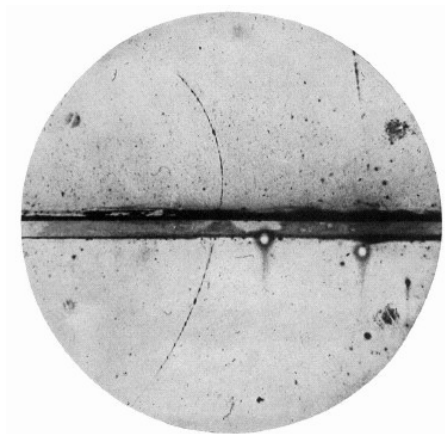


Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



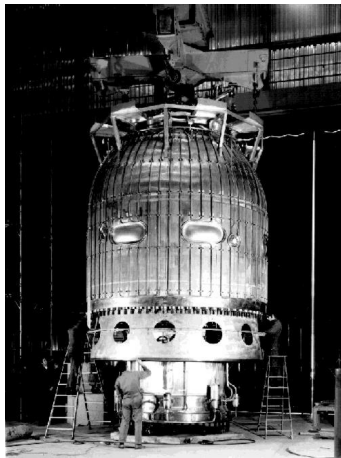
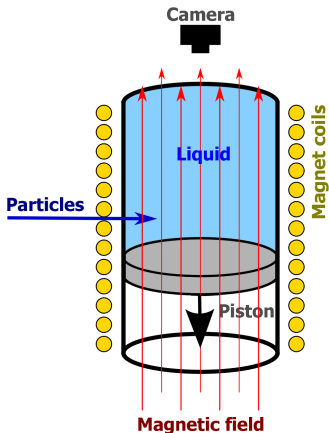
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

Komora pęcherzykowa, 1952

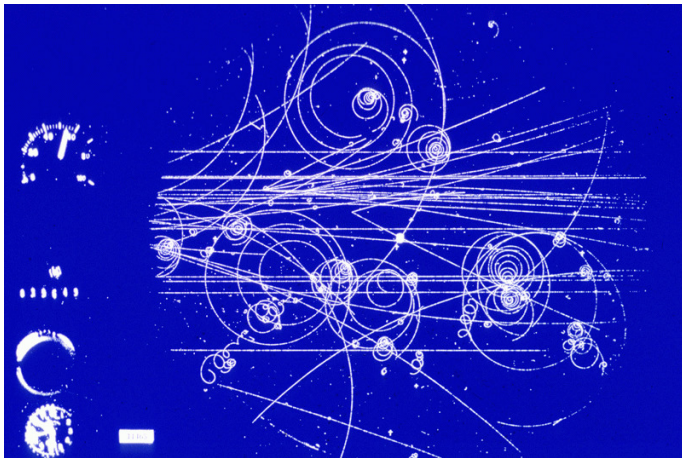
Ciecz (np. ciekły wodór) utrzymywana jest blisko punktu wrzenia, a następnie gwałtownie rozprężana



jonizacja \Rightarrow wrzenie przegrzanej cieczy rozpoczyna się wzdłuż toru cząstki

Komora pęcherzykowa

tory widoczne w świetle lampy błyskowej



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

Jonizacja

W wyniku przejścia cząstki naładowanej przez materię następuje **jonizacja i wzbudzenia** atomów/cząsteczek ośrodka.

Może to prowadzić do **różnorodnych procesów**:

- reakcji chemicznych ⇒ emulsja fotograficznej
- przemian fizycznych ⇒ komora mgłowa, komora pęcherzykowa

Jonizacja

W wyniku przejścia cząstki naładowanej przez materię następuje **jonizacja i wzbudzenia** atomów/cząsteczek ośrodka.

Może to prowadzić do **różnorodnych procesów**:

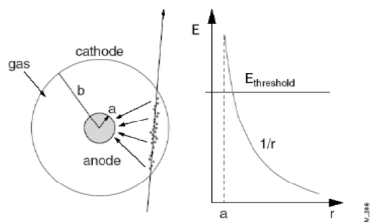
- reakcji chemicznych ⇒ emulsja fotograficznej
- przemian fizycznych ⇒ komora mgłowa, komora pęcherzykowa
- przepływu prądu
 - w gazie ⇒ detektory gazowe
 - w półprzewodniku ⇒ detektory półprzewodnikowe
 - w ciekłych gazach szlachetnych
- scyntytacji ⇒ liczniki scyntyacyjne

Scyntyłacja jest efektem wzbudzenia atomów/cząsteczek ośrodka, a nie jonizacji. Ale te procesy są ściśle powiązane.

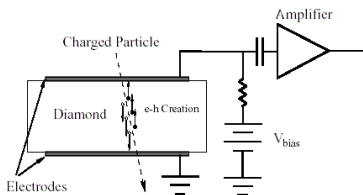
Pomiar jonizacji

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

w gazie



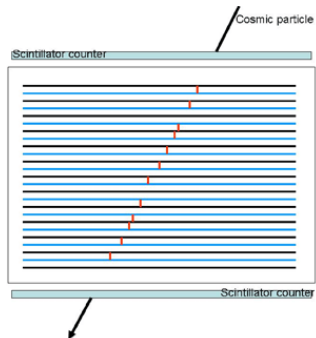
w półprzewodniku



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

Komora iskrowa

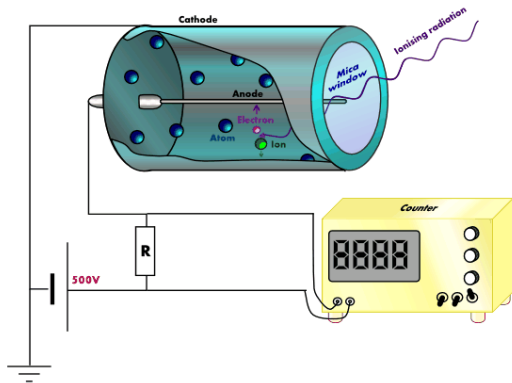
Jonizacja gazu przez cząstkę inicjuje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



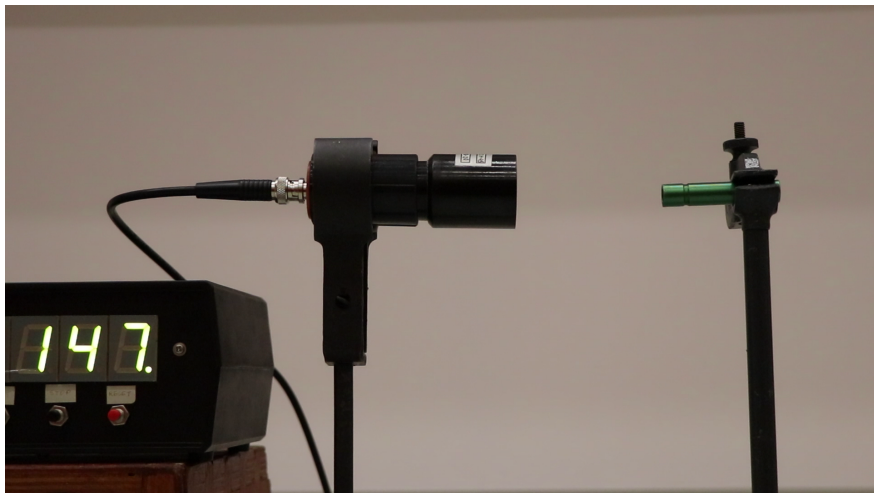
Możliwość wyboru zdarzeń
(poprzez sterowanie napięciem)

Licznik Geigera-Müllera

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



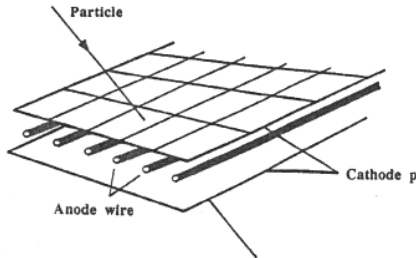
Licznik Geigera-Müllera - pokaz



Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970

(Nobel 1992)

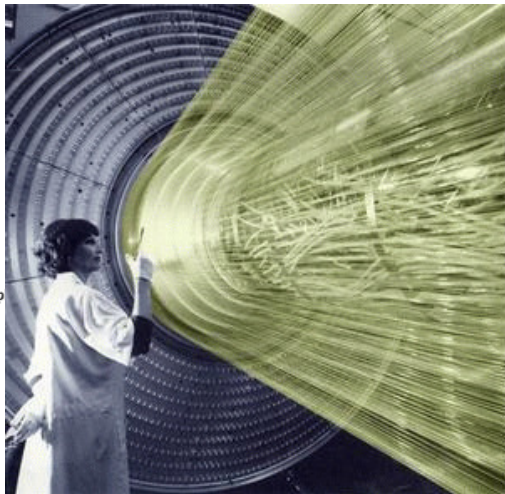


Tanie!

Odczyt w pełni elektroniczny!

elektronika+komputer

⇒ rewolucja w możliwościach zbierania i przetwarzania danych...



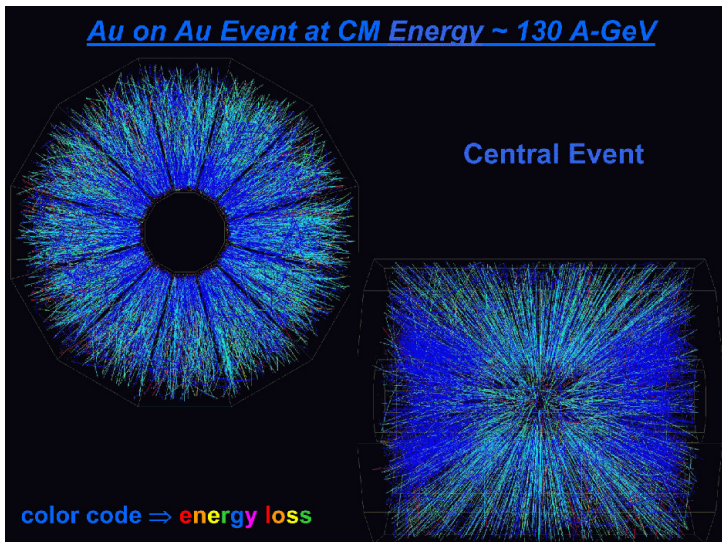
TPC

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)

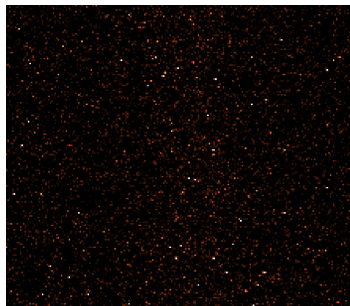
Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek! (nie tylko fotonów)

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



sensor $30 \times 30 \text{ mm}^2$ FOV: $20^\circ \times 20^\circ$

Powiększenie wycinka



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 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ FOV: $20^\circ \times 20^\circ$

Następne zdjęcie



To nie UFO. To ślad cząstki...

Detektory półprzewodnikowe

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

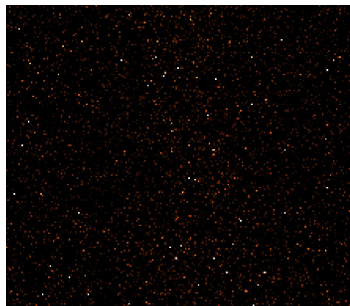
Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek! (nie tylko fotonów)

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



sensor $30 \times 30 \text{ mm}^2$ FOV: $20^\circ \times 20^\circ$

Kolejne...



Każdy smartfon jest detektorem cząstek...



CREDO Detector

CREDO Science Edukacja

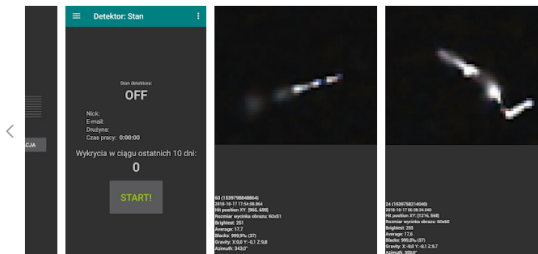
★★★★★ 208

PEGI 3

Aplikacja jest zgodna z Twoim urządzeniem.

Dodaj do listy życzeń

Zainstaluj



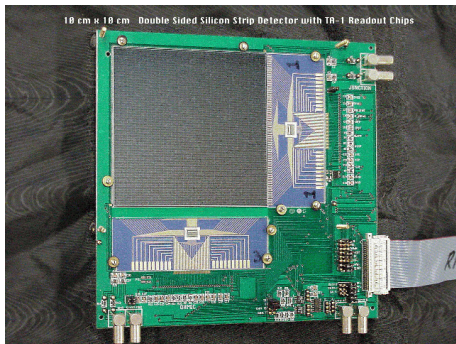
Czym jest CREDO Science?

Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory (CREDO) - międzynarodowy projekt Citizen Science, który umożliwia globalną analizę promieniowania kosmicznego w celu osiągnięcia wrażliwości na ekstremalnie rozszerzone zjawiska promieniowania kosmicznego, nazywane zespołami promieniowania kosmicznego (CRE), niewidoczne dla poszczególnych detektorów lub obserwatoriów.

Detektory półprzewodnikowe

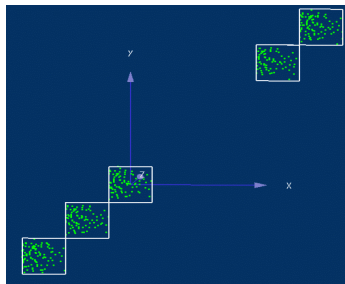
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek przez pięć warstw detektora testowego:

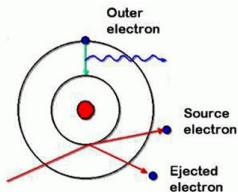


Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy precyzyjnie zrekonstruować tor.

- 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

Scytylacja

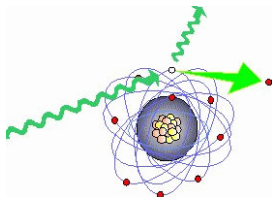
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



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

Fotony

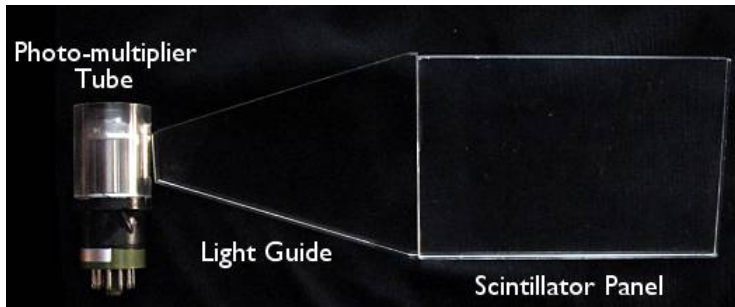
Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).



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

Scyntyłacja

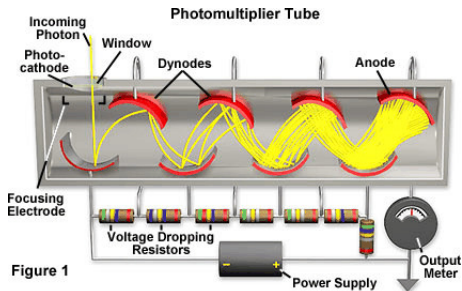
W tradycyjnych licznikach scyntyacyjnych stosujemy duże płaszczyzny (lub bloki) scytlatora, z których światło przesyłane jest specjalnymi światłowodami do fotopowielaczy.



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

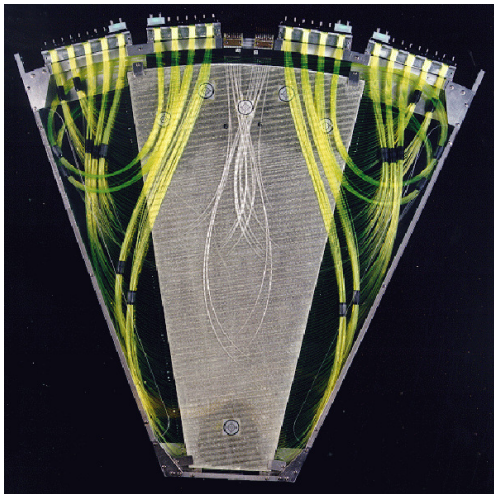
Fotopowielacz

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.

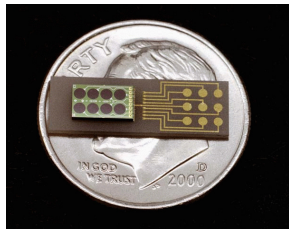
Detektory scyntylacyjne



Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

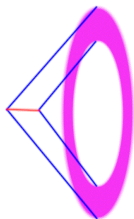
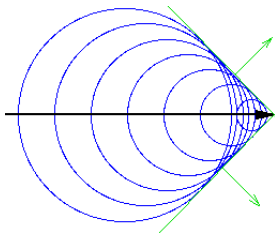
Nowe koncepcje:
← włókna scyntylujące,

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

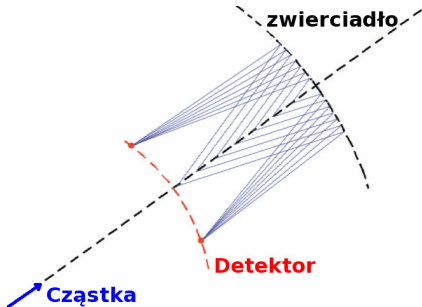
Zachodzi w wodzie, lodzie, powietrzu...

Tania technologia dla dużych detektorów!

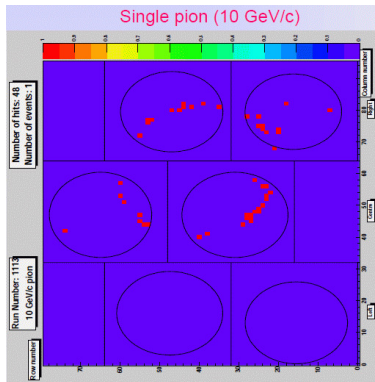
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



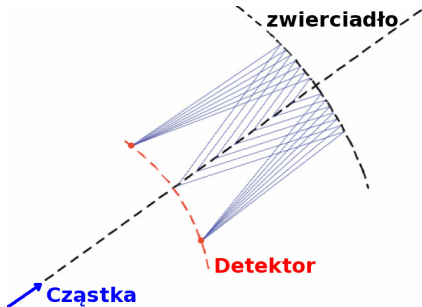
Obraz w detektorze (jedna cząstka)



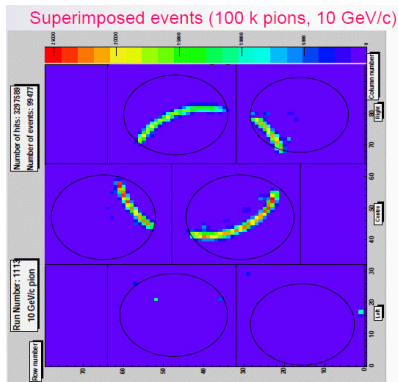
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



Obraz w detektorze (po uśrednieniu)



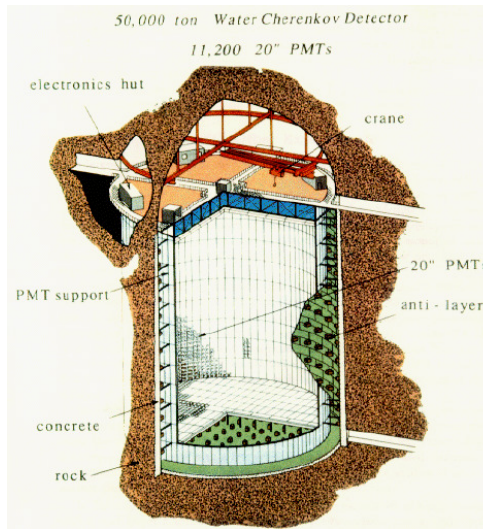
- 1 Obserwacje w świecie cząstek
- 2 Detektory jonizacyjne
 - Emulsja fotograficzna
 - Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
 - Detektory gazowe
 - Detektory półprzewodnikowe
- 3 Inne procesy fizyczne
 - Scyntylacja
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
- 4 Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande eksperyment neutronowy

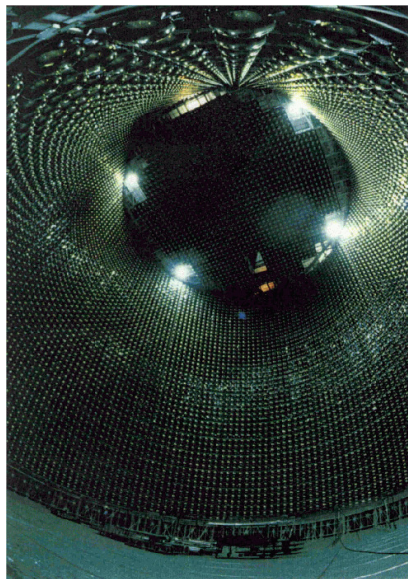
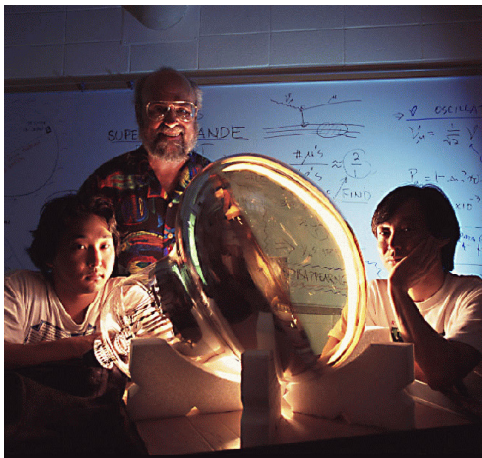
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

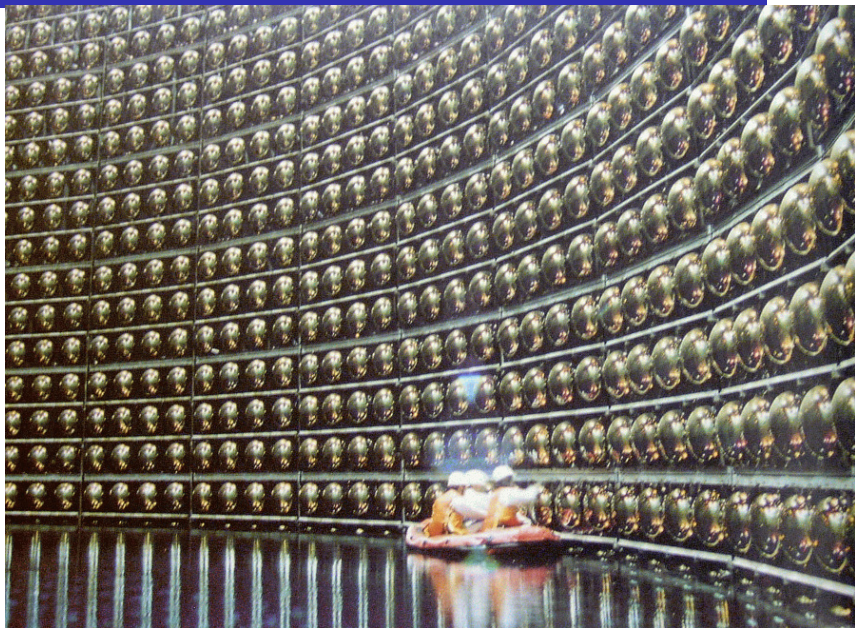
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Super-Kamiokande

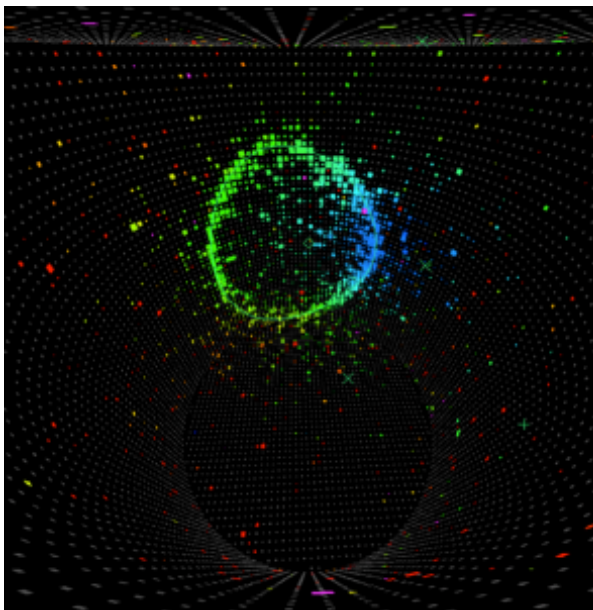




Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

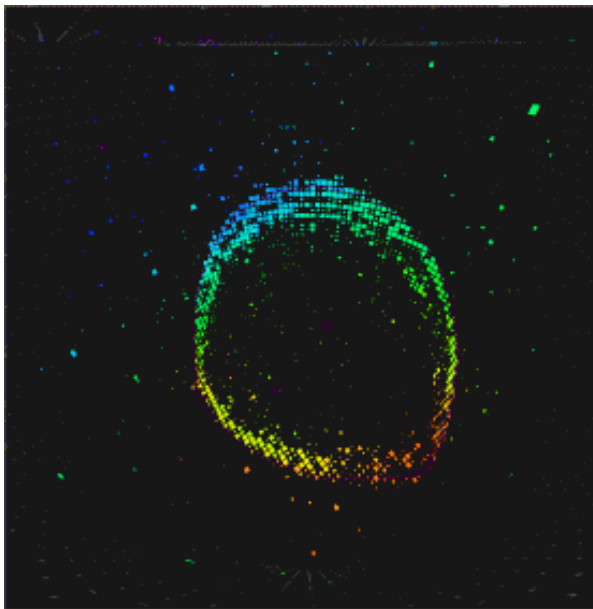
Widok perspektywiczny
Rozmiar punktu: sygnał
Kolor punktu: czas



Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Widok perspektywiczny
Rozmiar punktu: sygnał
Kolor punktu: czas



Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin

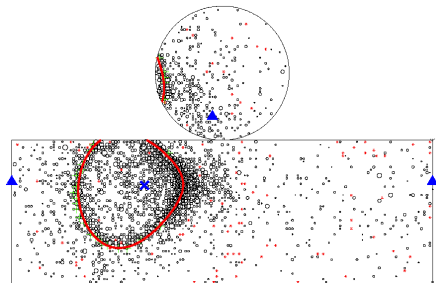
W zależności od rodzaju neutrina produkowane są różne cząstki

Produkcja elektronu

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

Krótki zasięg elektronu

Rozmyty pierścień

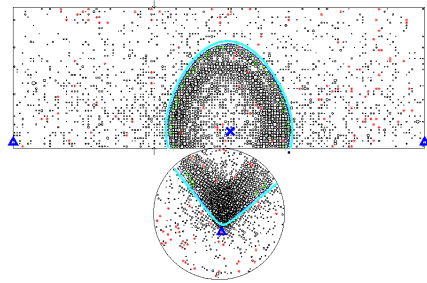


Produkcja mionu

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

Długa droga mionu w wodzie

Wyraźny pierścień



Super-Kamiokande - konserwacja detektora latem 2018



Źródło: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/tankopen2018/video-e.html>