

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Detekcja cząstek

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



8 listopada 2022

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", której zachowanie potrafimy opisać odpowiednimi równaniami.

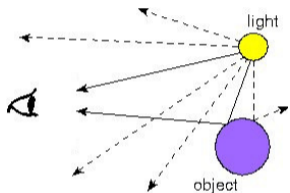
Amplituda tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu. **Możliwe są różne zachowania cząstki...**

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
 - Scyntyłacja
 - 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
 - Scyntyłacja
 - 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 scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

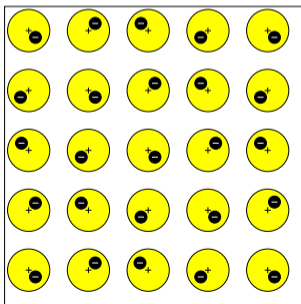
- 1 Obserwacje w świecie cząstek
- 2 Detektory jonizacyjne
 - Emulsja fotograficzna
 - Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
 - Detektory gazowe
 - Detektory półprzewodnikowe
- 3 Inne procesy fizyczne
 - Scyntyłacja
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
- 4 Współczesne eksperymenty

Struktura materii

Właściwości elektryczne 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

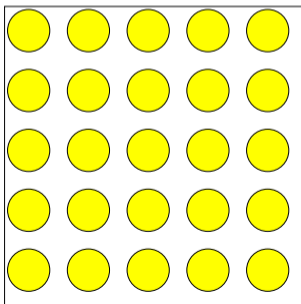


Struktura materii

Własności elektryczne 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

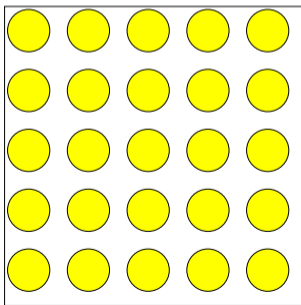


Struktura materii

Właściwości elektryczne różnych substancji zależą od tego jak silnie związane są najbardziej "zewnętrzne" elektrony (tzw. elektrony walencyjne)

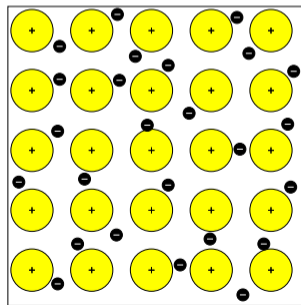
Izolator

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



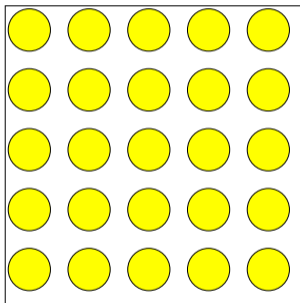
Przewodnik

Elektrony walencyjne są "**uwspólnione**", mogą swobodnie się przemieszczać w całej objętości



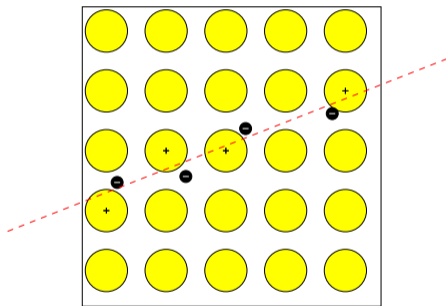
Jonizacja

U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży [zjawisko jonizacji](#). W izolatorze nie ma swobodnych nośników ładunku:



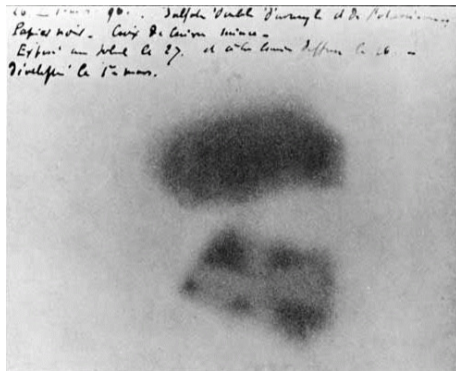
Jonizacja

U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**. W izolatorze nie ma swobodnych nośników ładunku:



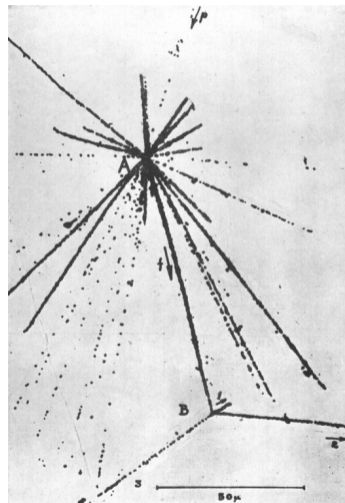
Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z **elektronami** i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów. **Pojawiają się wzbudzone atomy** i **swobodne nośniki ładunku...**

Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896
wzbudzone atomy

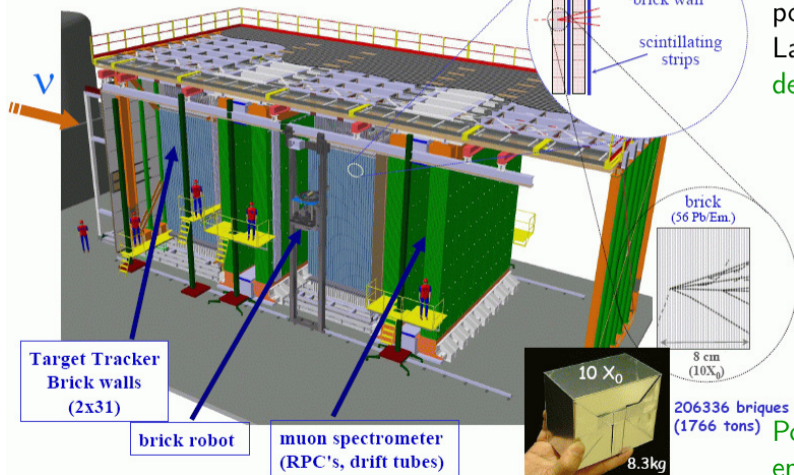
⇒ reakcja chemiczna



M.Danysz i J.Pniewski, 1953

Eksperyment Opera (2008-2012)

Emulsja fotograficzna w XXI wieku...



Eksperyment ulokowany w podziemnym Gran Sasso Laboratory (**Laboratori Nazionali del Gran Sasso**) we Włoszech

Target Tracker
Brick walls
(2x31)

brick robot

muon spectrometer
(RPC's, drift tubes)

206336 briques
(1766 tons)

Ponad 200 000 "cegół" z emulsją fotograficzną

Emulsja fotograficzna

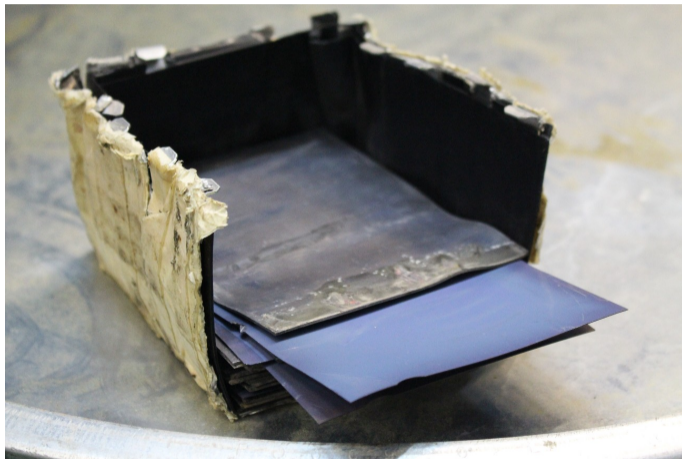
Eksperyment OPERA (2008-2012)



Paleta z cegłami...

Emulsja fotograficzna

Eksperyment OPERA (2008-2012)



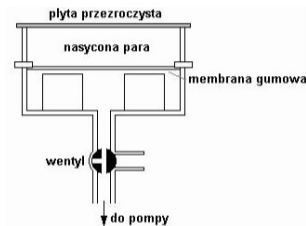
Struktura “cegły”

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

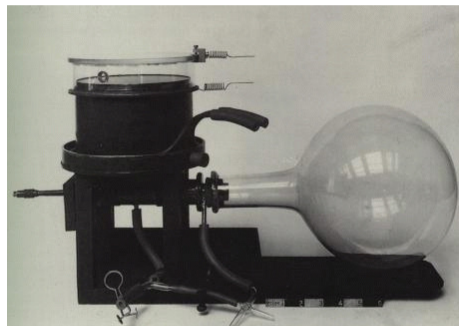


Schemat budowy:



Ruch membrany
sterowany ciśnieniem

Gotowe urządzenie:



jonizacja

⇒ jony

⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

Komora mgłowa - pokaz

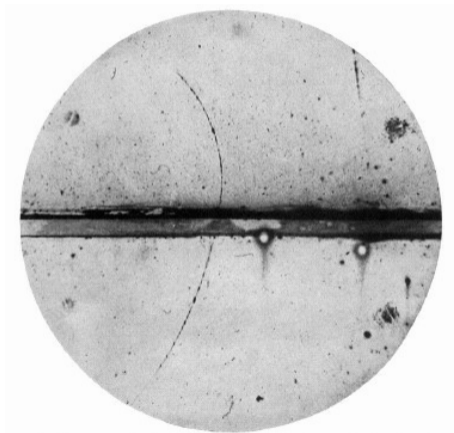


Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



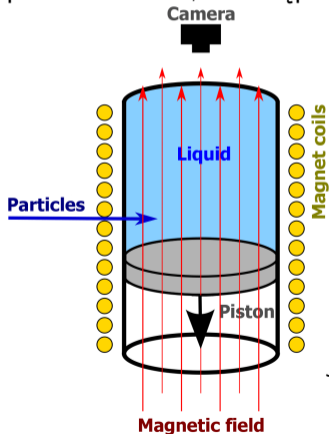
Carl Anderson, 1932



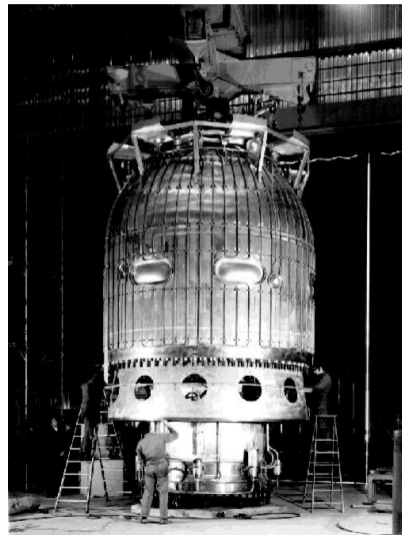
odkrycie pozytonu

Komora pęcherzykowa, 1952

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

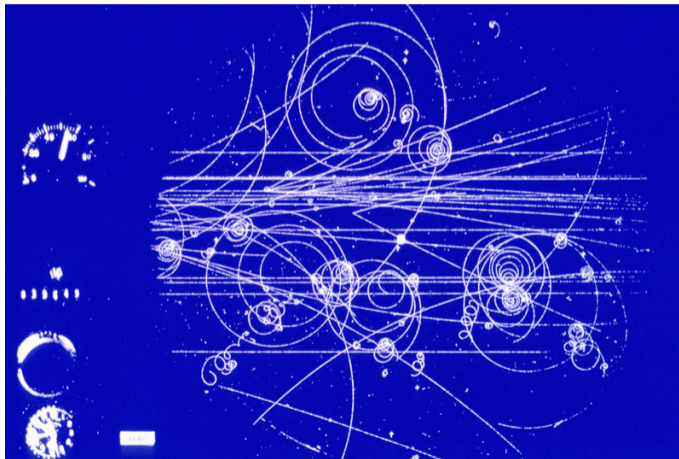


jonizacja \Rightarrow wrzenie przegrzanej ciecży wzdłuż toru cząstki



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**:

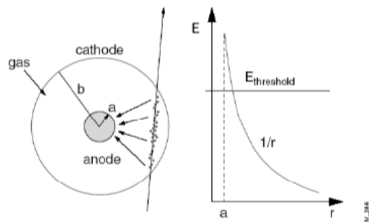
- reakcji chemicznych ⇒ emulsja fotograficznej
- przemian fizycznych ⇒ komora mgłowa, komora pęcherzykowa
- przepływu prądu
 - w gazie ⇒ detektory gazowe
 - w półprzewodniku ⇒ detektory półprzewodnikowe
 - w ciekłych gazach szlachetnych
- scyntylacji ⇒ liczniki scyntylacyjne

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

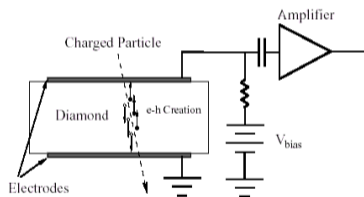
Pomiar jonizacji

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

w gazie



w półprzewodniku

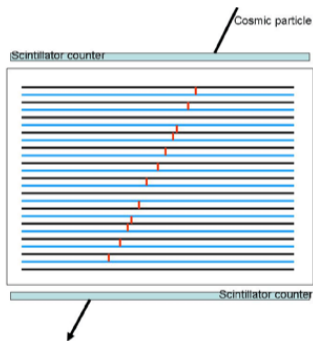


Przepływający ładunek jest na ogół bardzo mały, ale czuła elektronika pozwala go wzmocnić i zmierzyć.

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

Komora iskrowa

Jonizacja gazu przez cząstkę inicjuje przeskoczenie iskry pomiędzy elektrodami



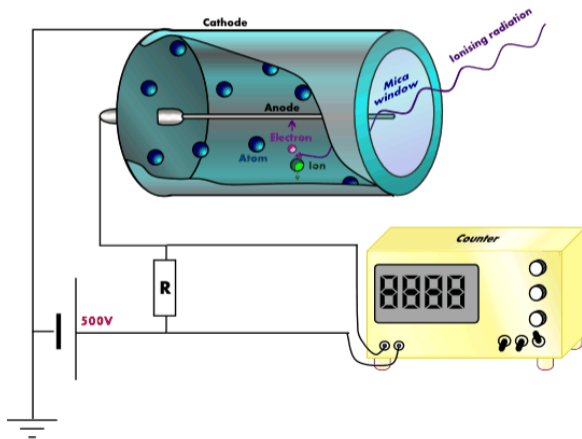
Możliwość wyboru zdarzeń
(poprzez sterowanie napięciem)



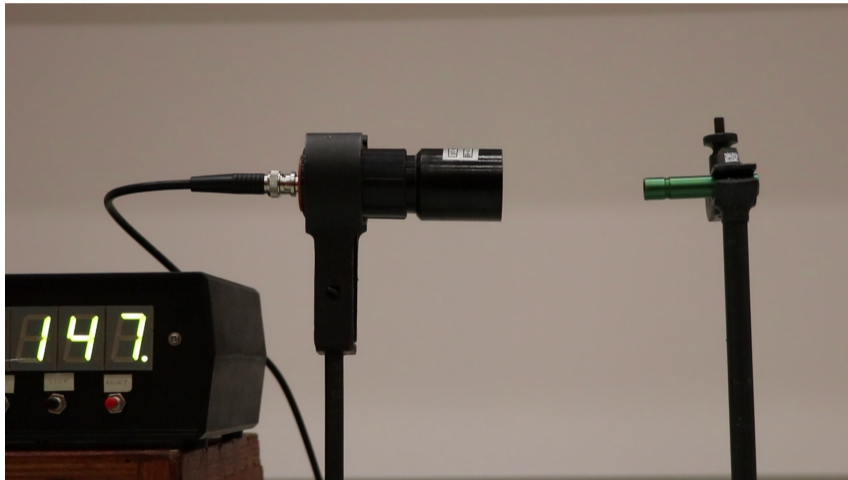
Na początku wciąż fotografowaliśmy tory...

Licznik Geigera-Müllera

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



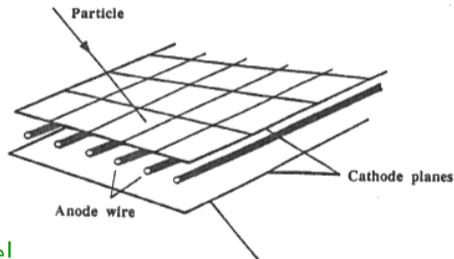
Licznik Geigera-Müllera - pokaz



Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970

(Nobel 1992)



Tanie!
Odczyt w pełni elektroniczny!

elektronika+komputer

⇒ rewolucja w możliwościach zbierania i przetwarzania danych...

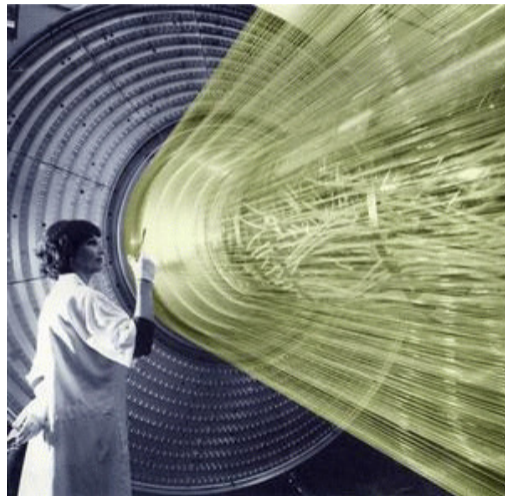


Photo: SLAC, USA

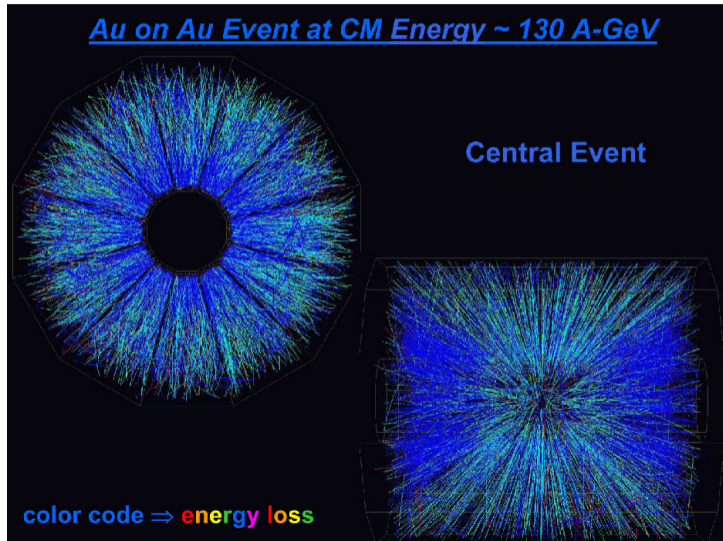
TPC

Komora projekcji czasowej

Przypadek zderzenia ciężkich jonów (złoto-złoto) w RHIC

zarejestrowany przez detektor STAR

zrekonstruowano tory ~ 6000 cząstek naładowanych



Detektory półprzewodnikowe

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

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

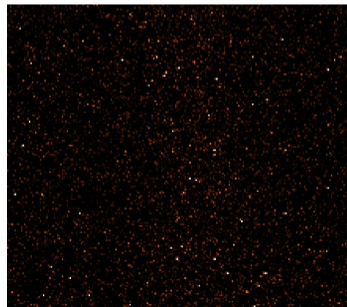
(nie tylko fotonów)

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!

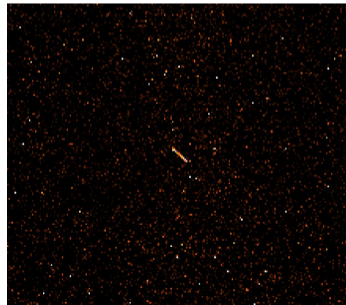
(nie tylko fotonów)

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



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

Następne zdjęcie (12 sekund później)



To nie UFO. To ślad cząstki...

Detektory półprzewodnikowe

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

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

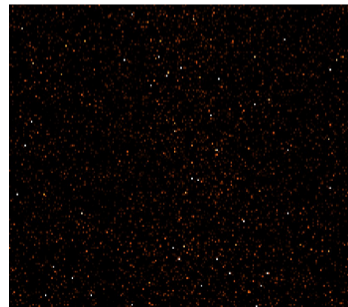
(nie tylko fotonów)

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



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

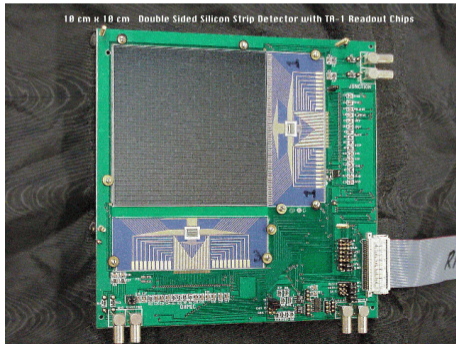
Kolejne...



Detektory półprzewodnikowe

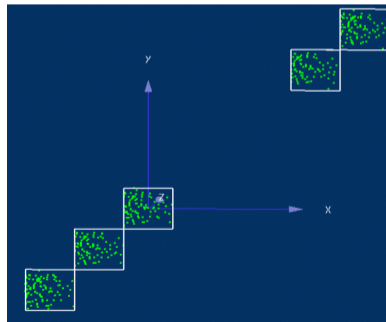
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek
(rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek przez
pięć warstw detektora testowego:

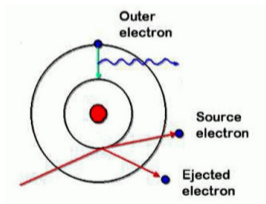


Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy precyzyjnie zrekonstruować tor.

- 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

Scyntyłacja

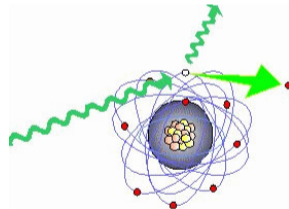
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



Powrotowi atomu do stanu podstawowego może towarzyszyć wyświecanie fotonów: scyntyłacja

Fotony

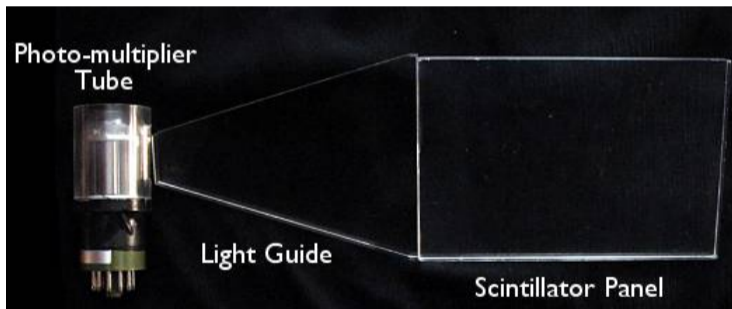
Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).



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

Scyntyłacja

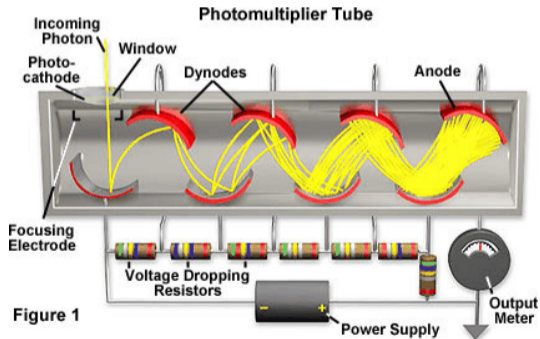
W tradycyjnych licznikach scyntyłacyjnych stosujemy duże płaszczyzny (lub bloki) scyntyłatora, z których światło przesyłane jest specjalnymi światłowodami do fotopowielaczy.



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

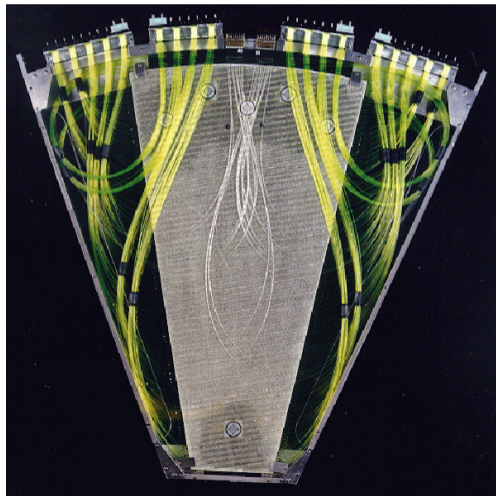
Fotopowielacz

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**), każdy wybija kilka elektronów wtórnych \Rightarrow lawina.



\Rightarrow Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detektory scyntylacyjne

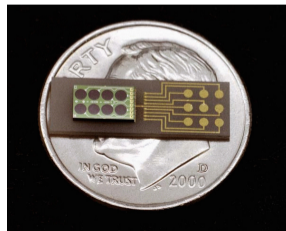


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

← włókna scyntylujące,

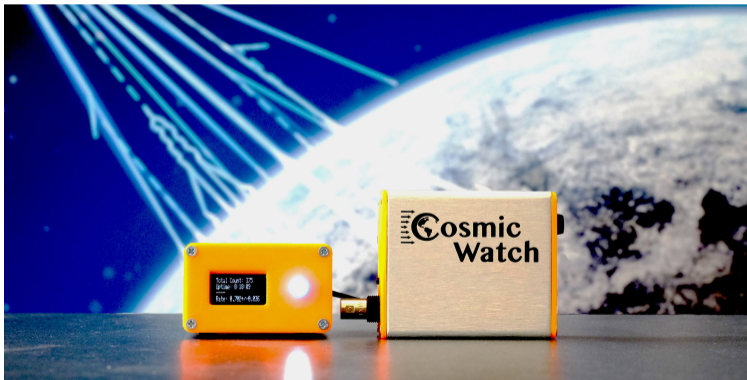
odczytywane przez ↓ fotopowielacze krzemowe



CosmicWatch

Detektory scyntylacyjne są tanie, wykorzystywane w bardzo różnorodnych układach pomiarowych. Fotopowielacze krzemowe \Rightarrow miniaturyzacja.

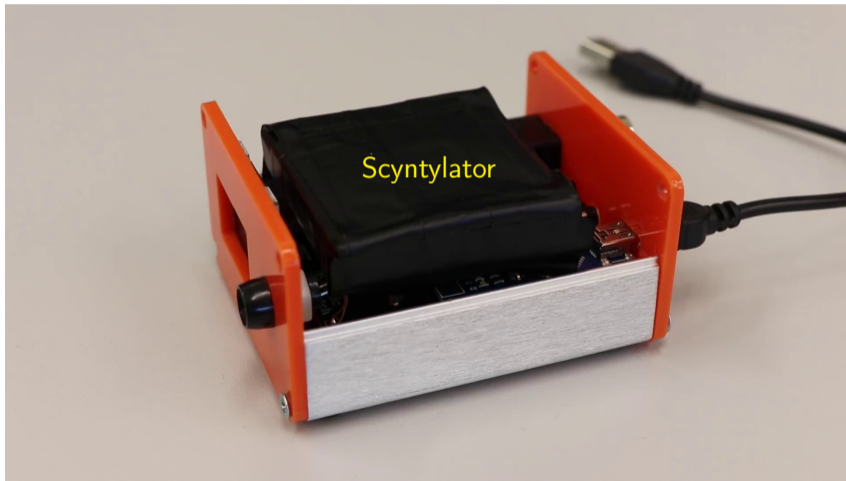
Każdy może mieć w domu obserwatorium promieniowania kosmicznego...



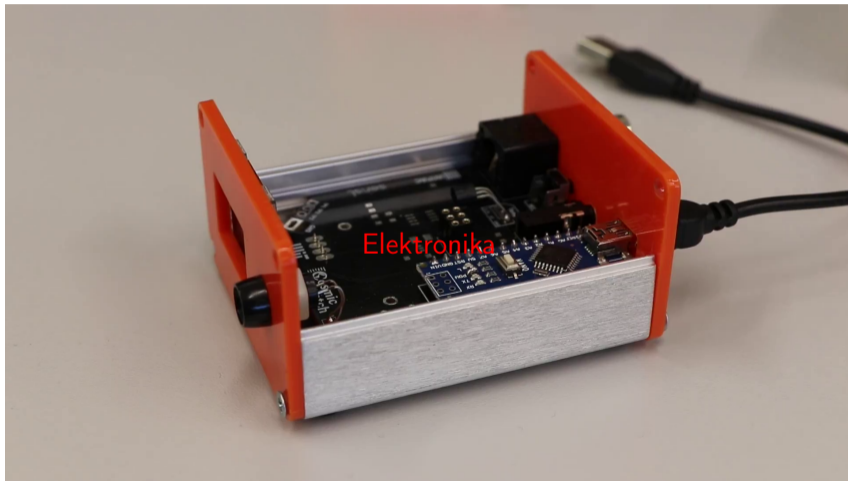
Części do zmontowania detektora to ok. 100\$.

<http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu/>

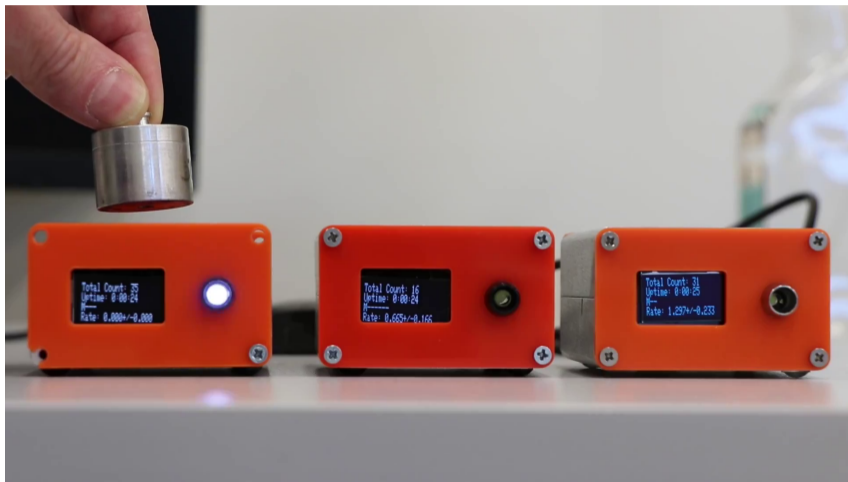
CosmicWatch - budowa



CosmicWatch - budowa

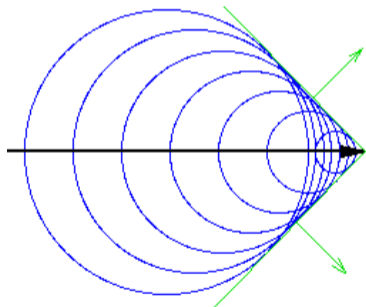


CosmicWatch - pokaz

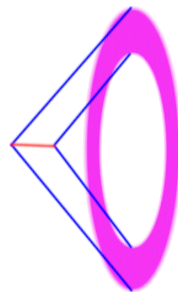


Promieniowanie Czerenkowa

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



Zachodzi w wodzie, lodzie, powietrzu...
Tania technologia dla dużych detektorów!



Światło emitowane na pewnym odcinku widoczne jest w postaci charakterystycznych pierścieni

- 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

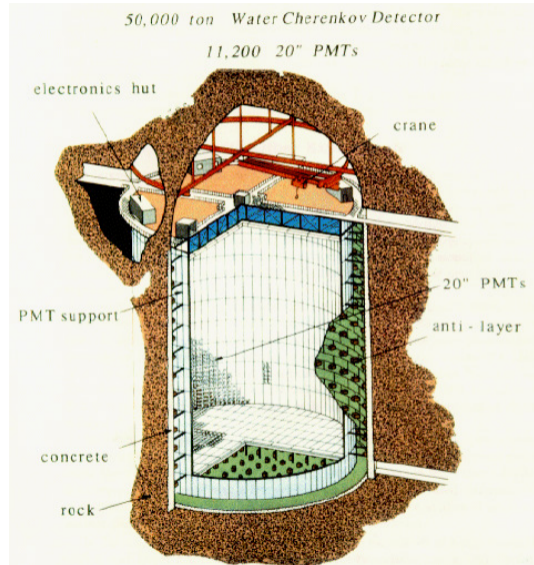
Super-Kamiokande

eksperyment neutrinowy

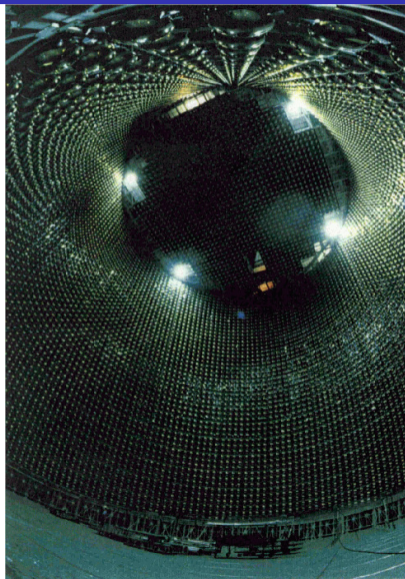
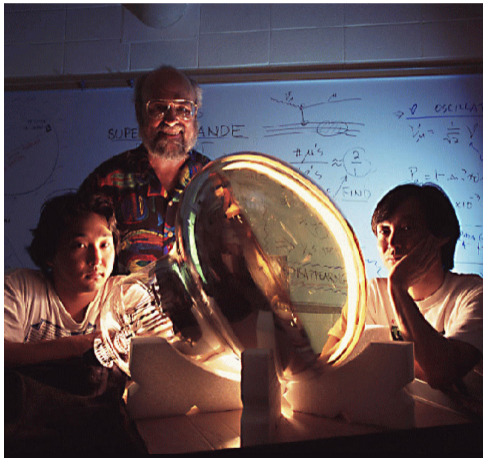
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

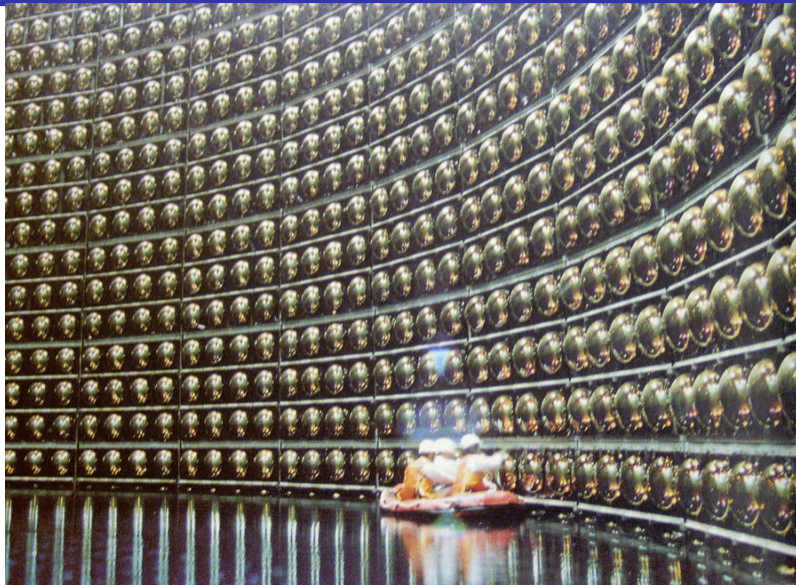
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Super-Kamiokande

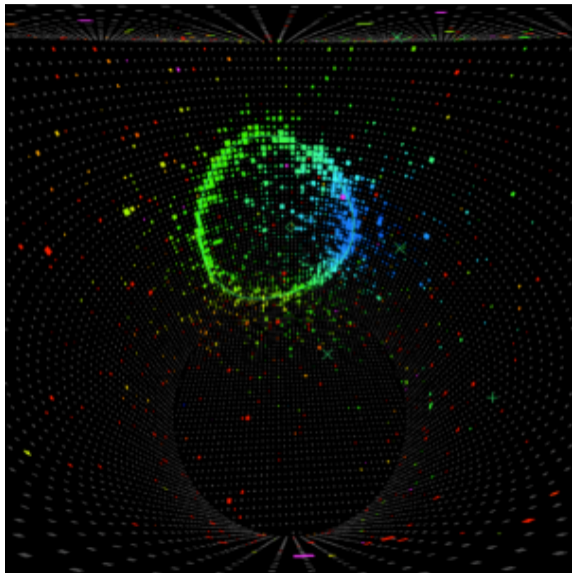




Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań
neutrin.

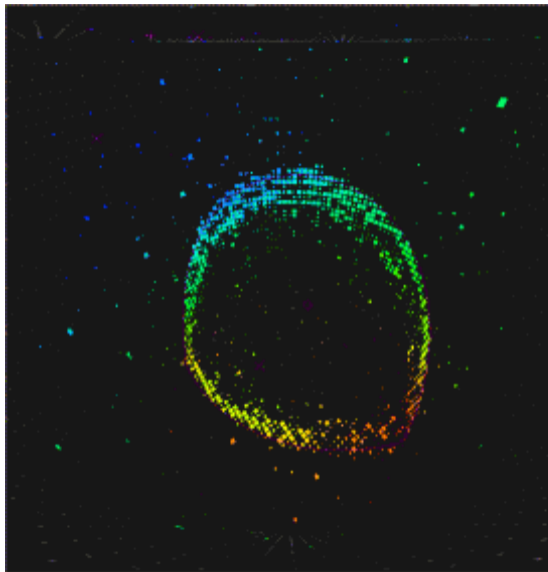
Widok perspektywiczny
Rozmiar punktu: sygnał
Kolor punktu: czas



Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań
neutrino.

Widok perspektywiczny
Rozmiar punktu: sygnał
Kolor punktu: czas



Super-Kamiokande

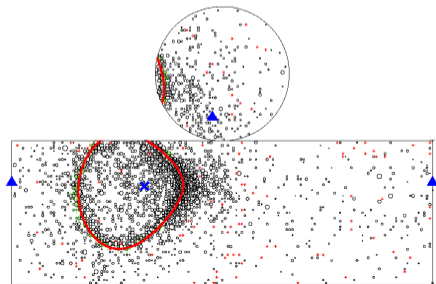
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin

W zależności od rodzaju neutrina produkowane są różne cząstki

Produkcja elektronu

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

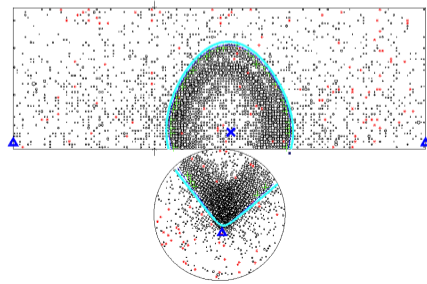
Krótki zasięg elektronu, rozmyty pierścień



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>