

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Detekcja cząstek

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



29 października 2024

## 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...**

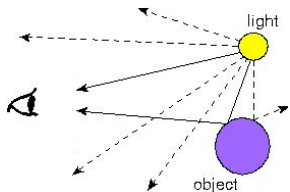
Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

- 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

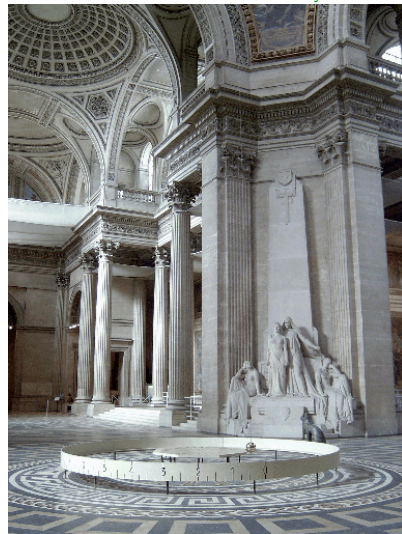
## Istota obserwacji



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

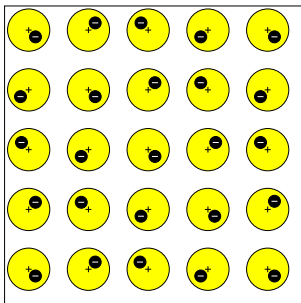
- 1 Obserwacje w świecie cząstek
- 2 Detektory jonizacyjne
  - Emulsja fotograficzna
  - Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
  - Detektory gazowe
  - Detektory półprzewodnikowe
- 3 Inne procesy fizyczne
  - Scyntyłacja
  - Efekt fotoelektryczny
  - Promieniowanie Czerenkowa
- 4 Współczesne eksperymenty

## 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

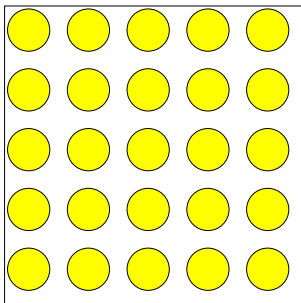


## Struktura materii

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



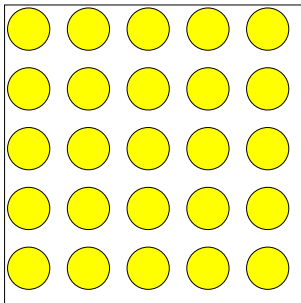


## Struktura materii

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

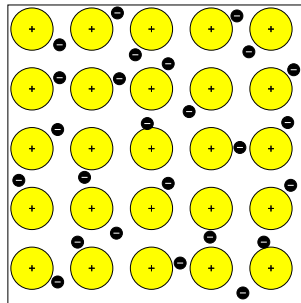
### Izolator

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



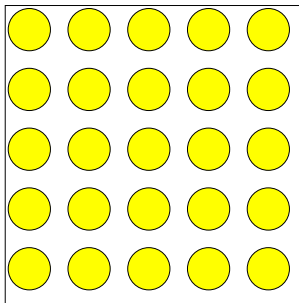
### Przewodnik

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



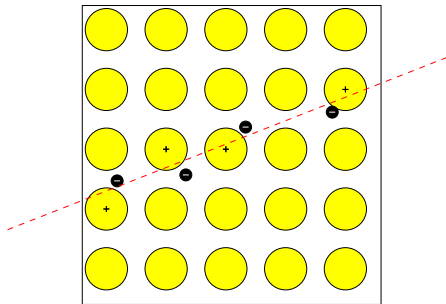
## Jonizacja

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



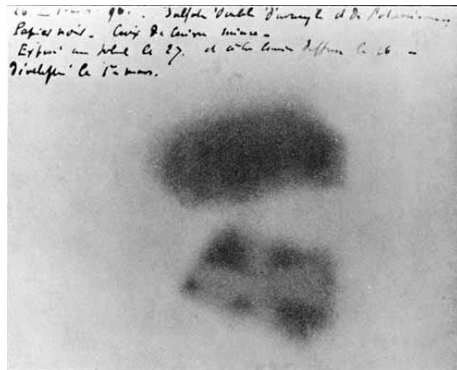
## Jonizacja

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



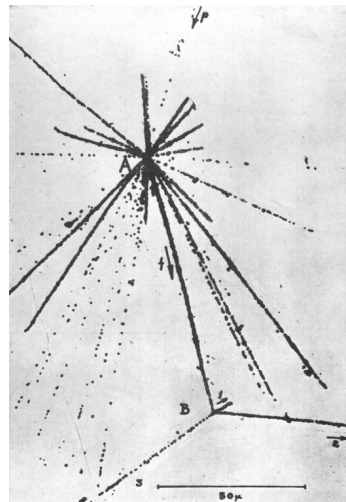
Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z **elektronami** i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów. **Pojawiają się wzbudzone atomy i swobodne nośniki ładunku...**

## Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896  
wzbudzone atomy

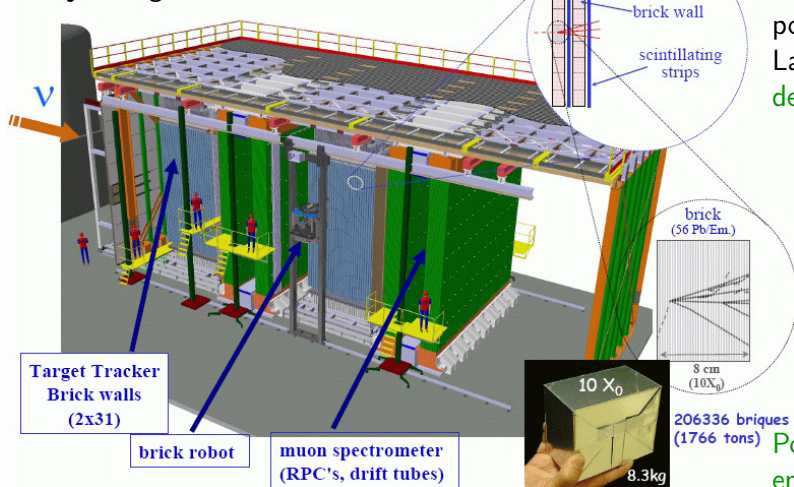
⇒ reakcja chemiczna



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

Ponad 200 000 "cegieł" z emulsją fotograficzną

## Emulsja fotograficzna

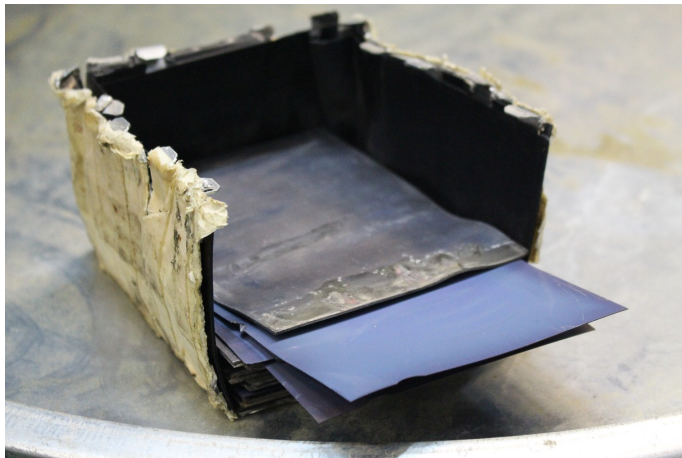
Eksperyment OPERA (2008-2012)



Paleta z cegłami...

## Emulsja fotograficzna

Eksperyment OPERA (2008-2012)



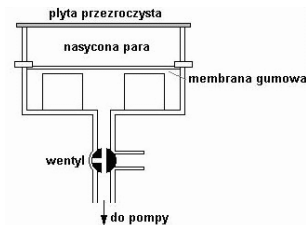
Struktura “cegły”

## Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

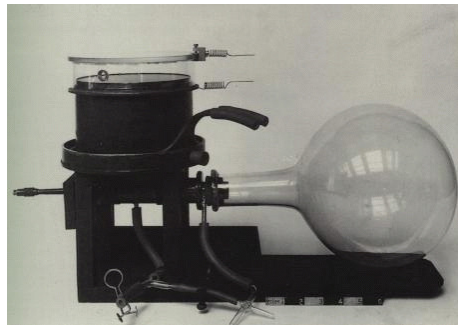


Schemat budowy:



Ruch membrany  
sterowany ciśnieniem

Gotowe urządzenie:



jonizacja

⇒ jony

⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

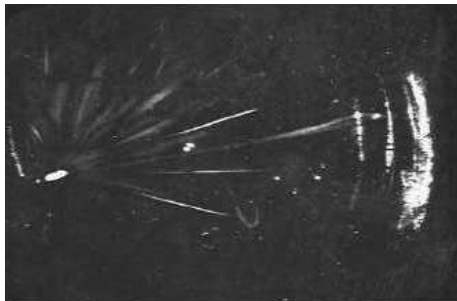


## Komora mgłowa - pokaz

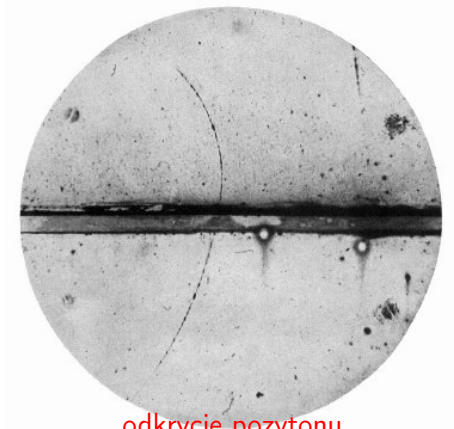


## Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



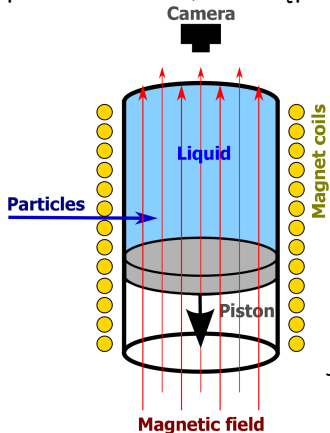
Carl Anderson, 1932



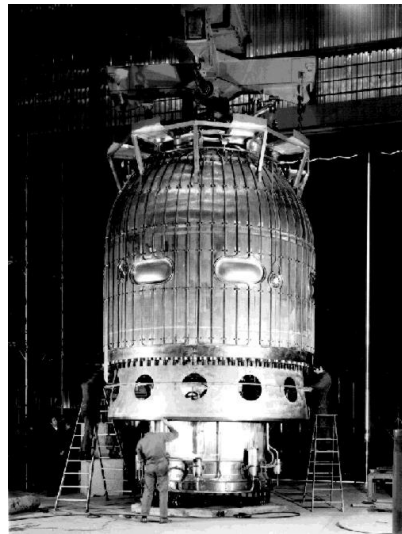
odkrycie pozytonu

## Komora pęcherzykowa, 1952

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

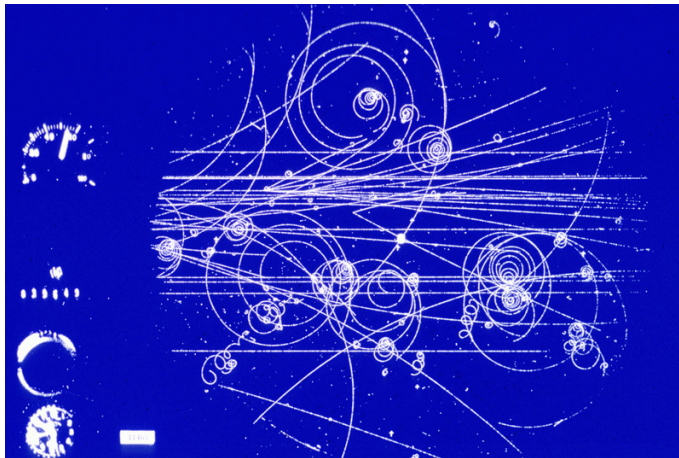


jonizacja  $\Rightarrow$  wrzenie przegrzanej ciecży wzdłuż toru cząstki



## 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**:

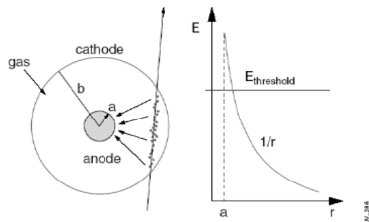
- reakcji chemicznych ⇒ emulsja fotograficznej
- przemian fizycznych ⇒ komora mgłowa, komora pęcherzykowa
- przepływu prądu
  - w gazie ⇒ detektory gazowe
  - w półprzewodniku ⇒ detektory półprzewodnikowe
  - w ciekłych gazach szlachetnych
- scyntytacji ⇒ liczniki scyntyacyjne

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

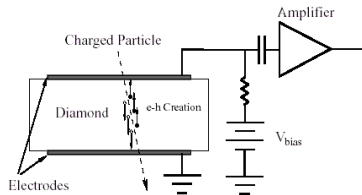
## Pomiar jonizacji

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

w gazie



w półprzewodniku

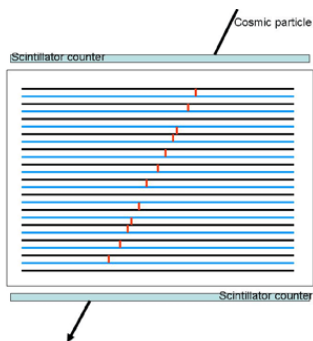


Przepływający ładunek jest na ogół bardzo mały, ale czuła elektronika pozwala go wzmocnić i zmierzyć.

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)

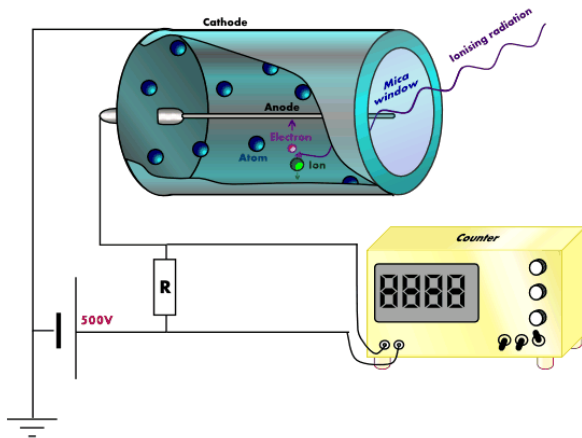


Na początku wciąż fotografowaliśmy tory...

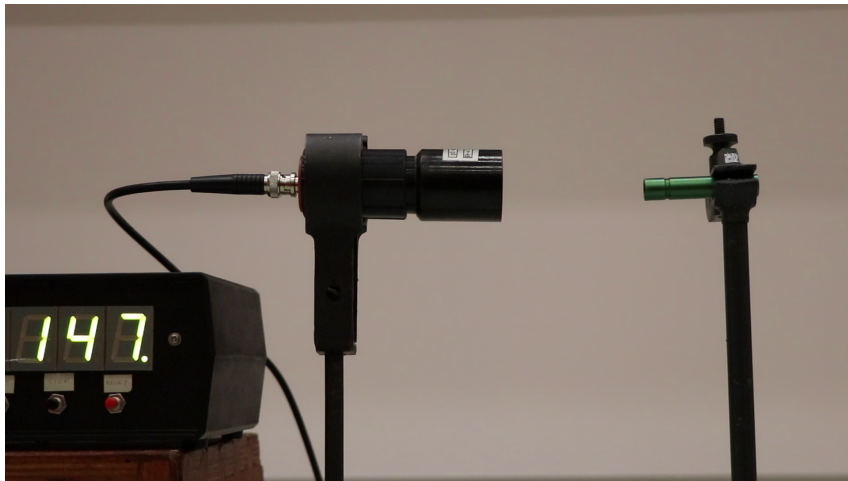


## Licznik Geigera-Müllera

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



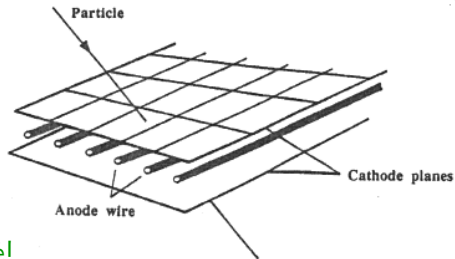
## Licznik Geigera-Müllera - pokaz



## Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970

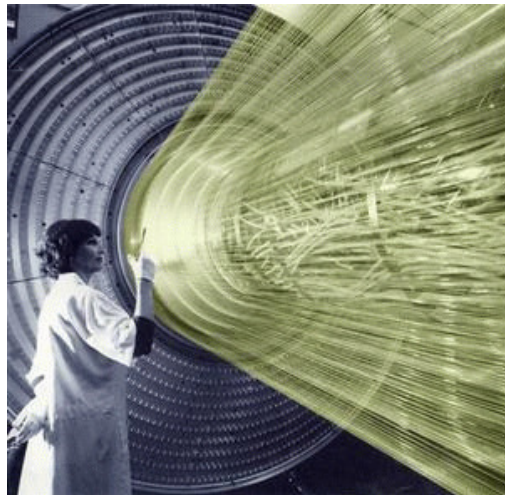
(Nobel 1992)



Tanie!  
Odczyt w pełni elektroniczny!

elektronika+komputer

⇒ rewolucja w możliwościach zbierania i przetwarzania danych...



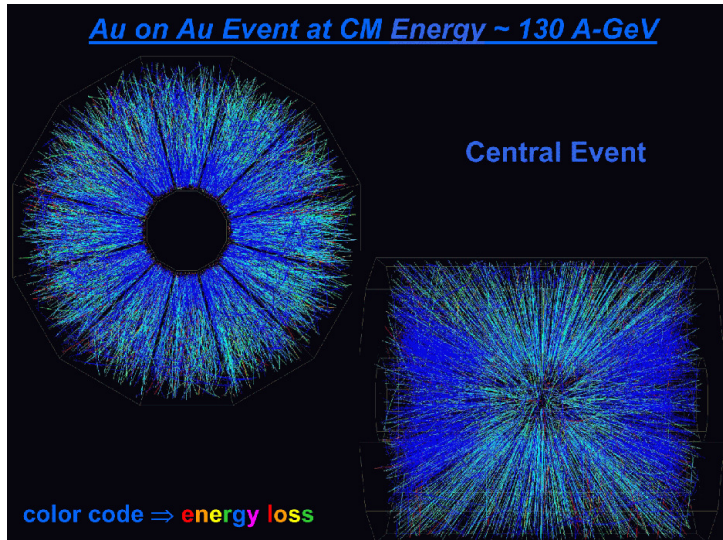
## TPC

Komora projekcji czasowej

Przypadek zderzenia ciężkich jonów (złoto-złoto) w RHIC

zarejestrowany przez detektor STAR

zrekonstruowano tory  $\sim 6000$  cząstek naładowanych



## Detektory półprzewodnikowe

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

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

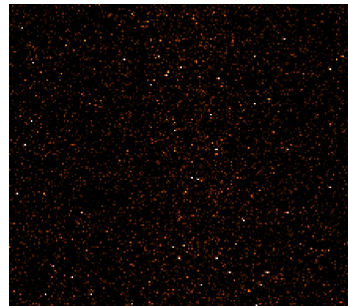
(nie tylko fotonów)

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!

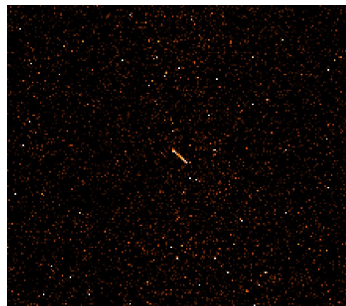
(nie tylko fotonów)

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!

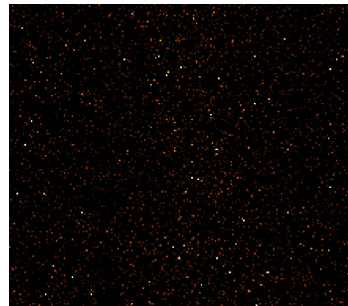
(nie tylko fotonów)

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



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

Kolejne...





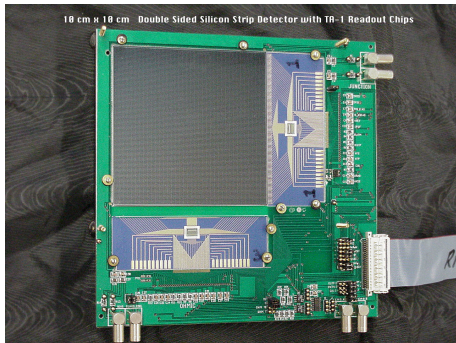


## Detektory półprzewodnikowe

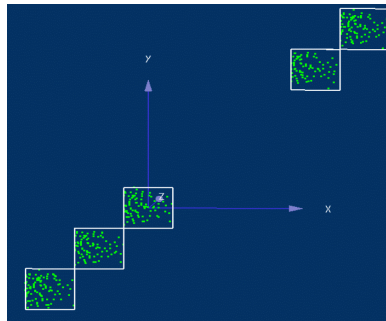
Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu  $\mu\text{m}$ )

Kiedyś bardzo drogie, dziś już powszechnie używane.

Element detektora krzemowego (2005)



Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek przez pięć warstw detektora testowego:



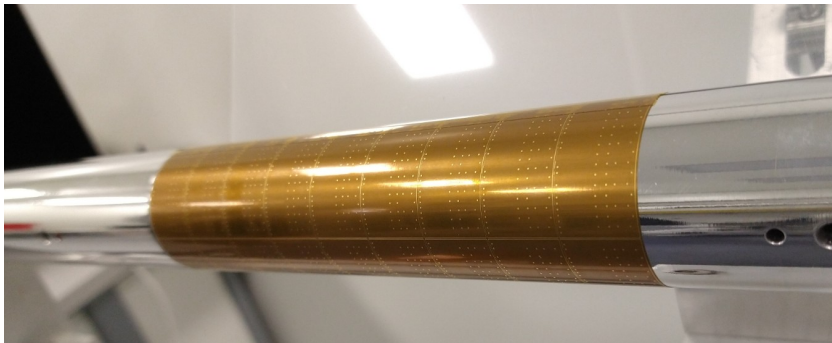
Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy precyzyjnie zrekonstruować tor.

## Detektory półprzewodnikowe

Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu  $\mu\text{m}$ )

Kiedyś bardzo drogie, dziś już powszechnie używane.

Ciągły rozwój technologii, pojawiają się nowe możliwości! Prototyp detektora ITS3 dla ALICE



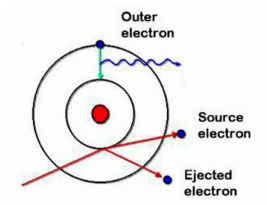
Płytkę krzemu o grubości  $30\ \mu\text{m}$  jest elastyczna, możemy ją wyginać...

Arianna Grisel Torres Ramos  
CERN-THESIS-2023-207

- 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

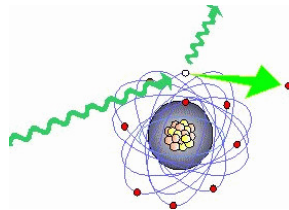
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



Powrotowi atomu do stanu podstawowego może towarzyszyć wyświecanie fotonów: scyntyłacja

## Fotony

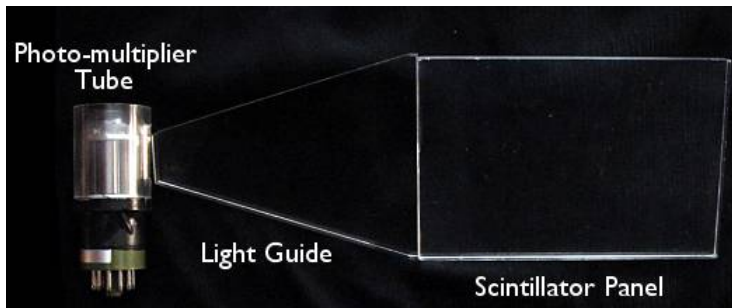
Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).



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

## Scyntyłacja

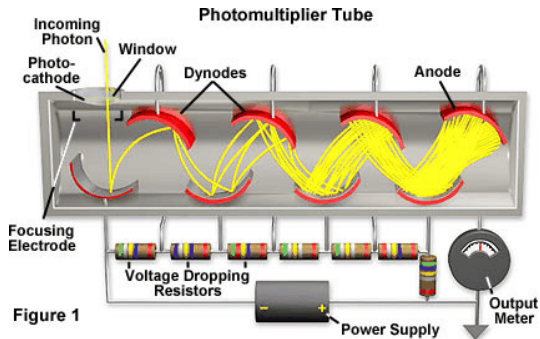
W tradycyjnych licznikach scyntylicyjnych stosujemy duże płaszczyzny (lub bloki) scyntyлятора, z których światło przesyłane jest specjalnymi światłowodami do fotopowielaczy.



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

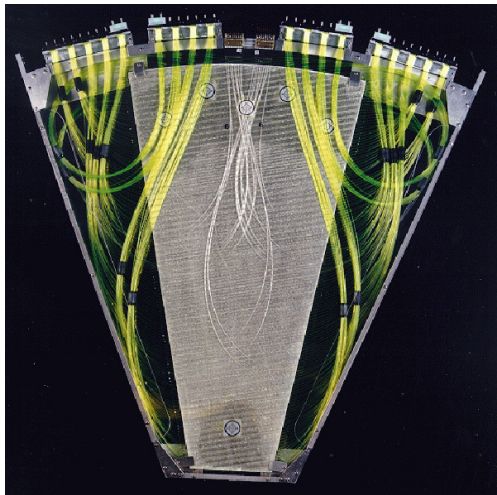
## Fotopowielacz

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



$\Rightarrow$  Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

## Detektory scyntylacyjne

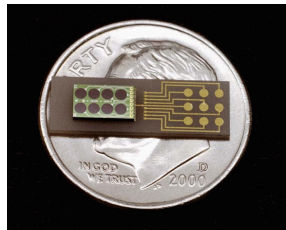


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

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...

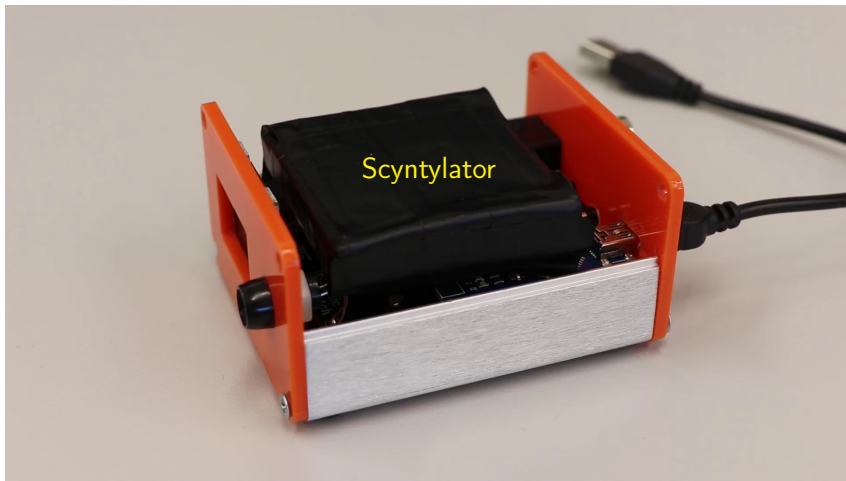


Części do zmontowania detektora to ok. 100\$.

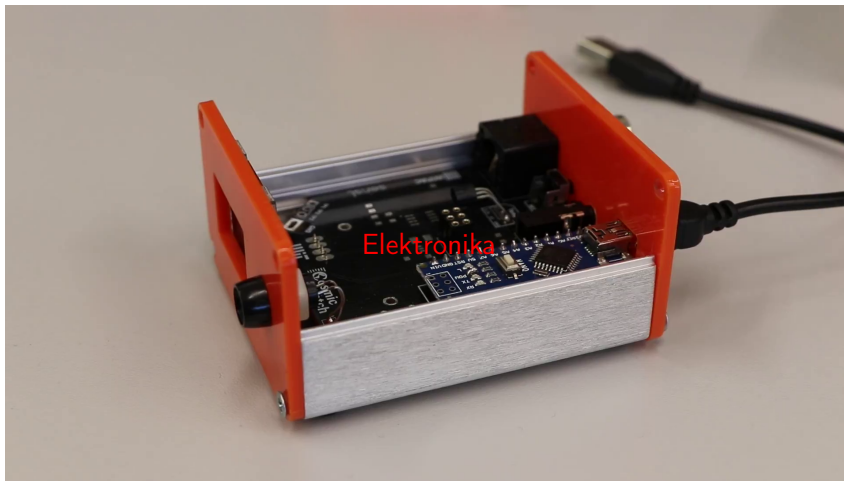
<http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu/>



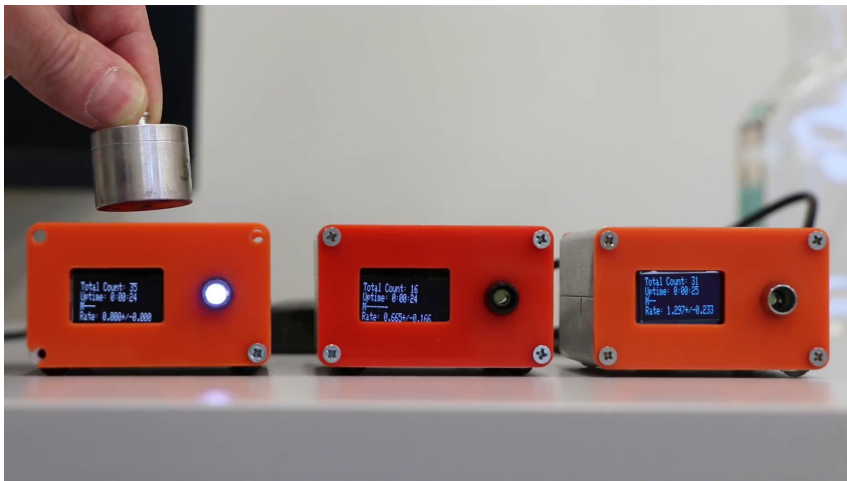
## CosmicWatch - budowa



## CosmicWatch - budowa

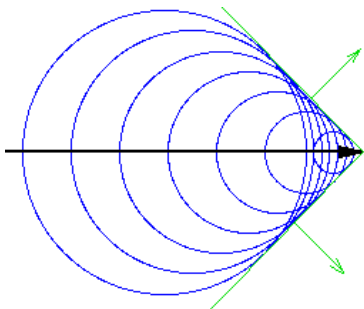


## CosmicWatch - pokaz

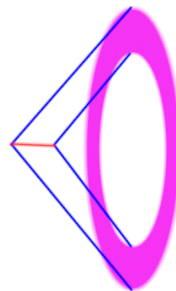


## Promieniowanie Czerenkowa

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

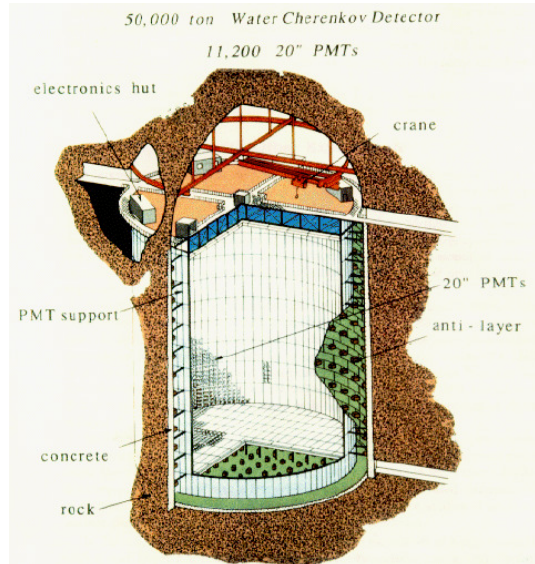
## Super-Kamiokande

eksperyment neutrinowy

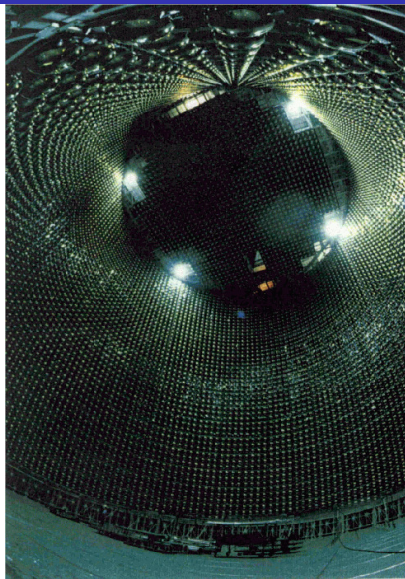
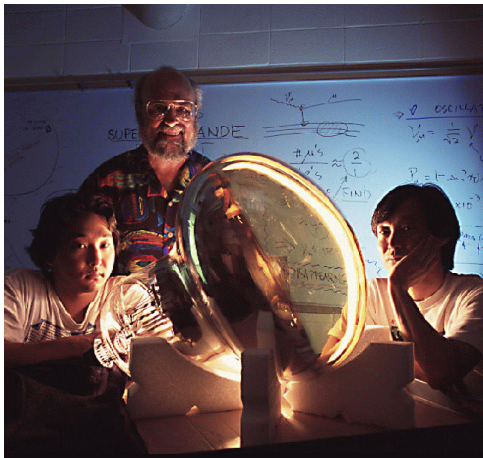
**Japonia**, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

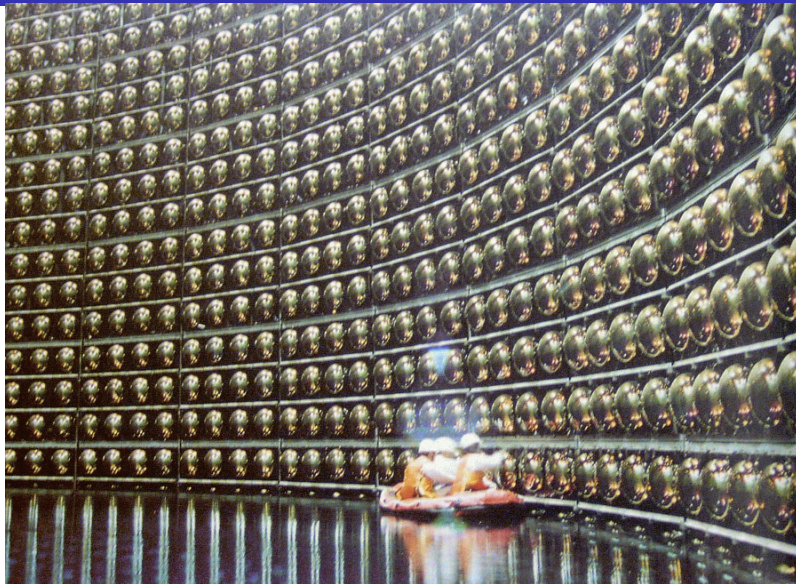
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



## Super-Kamiokande



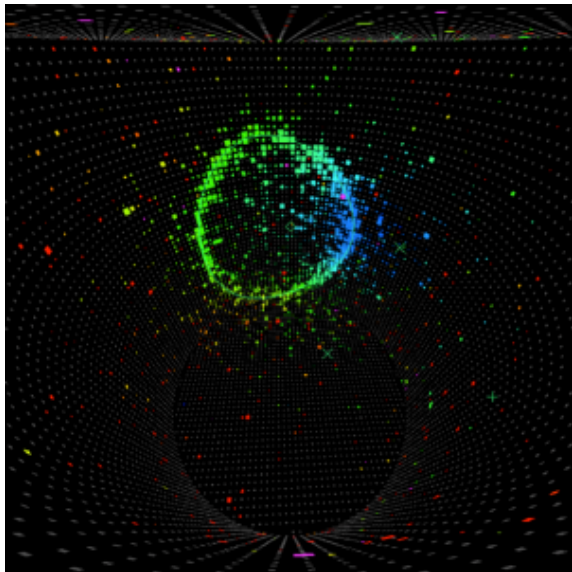




## Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań  
neutrino.

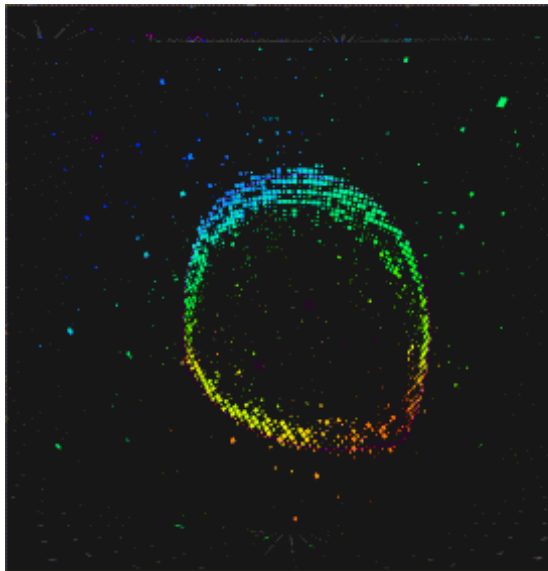
Widok perspektywiczny  
Rozmiar punktu: sygnał  
Kolor punktu: czas



## Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań  
neutrino.

Widok perspektywiczny  
Rozmiar punktu: sygnał  
Kolor punktu: czas



## Super-Kamiokande

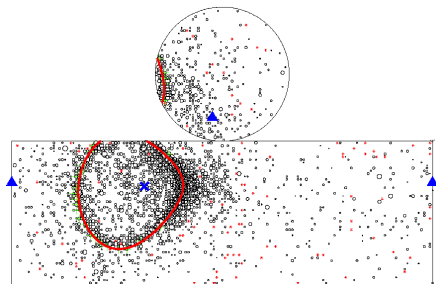
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin

W zależności od rodzaju neutrina produkowane są różne cząstki

### Produkcja elektronu

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

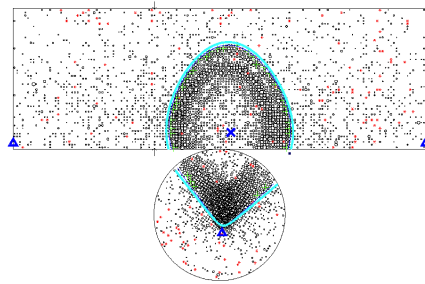
Krótki zasięg elektronu, rozmyty pierścień



### 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>