

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Detekcja cząstek

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



29 października 2019

## 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

## 1 Obserwacje w świecie cząstek

## 2 Detektory jonizacyjne

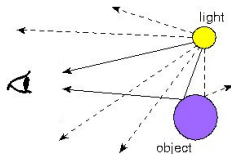
- Emulsja fotograficzna
- Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
- Detektory gazowe
- Detektory półprzewodnikowe

## 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

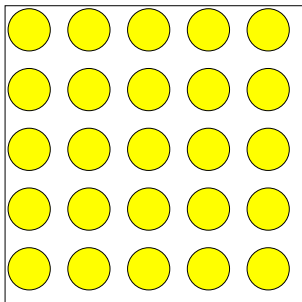
## 4 Współczesne eksperymenty

## Struktura materii

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

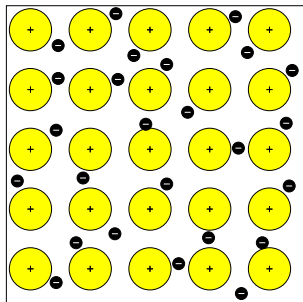
### Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami



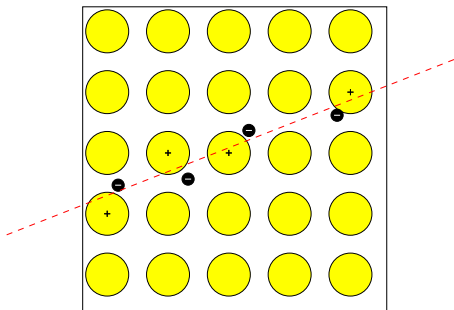
### Przewodnik

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



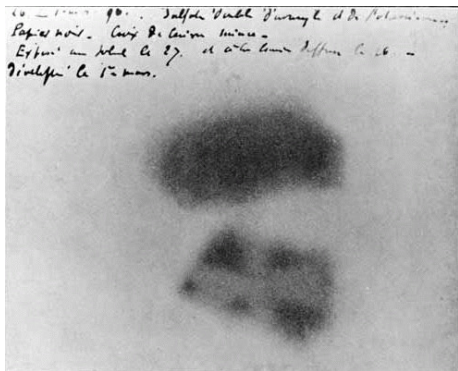
## Jonizacja

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...**

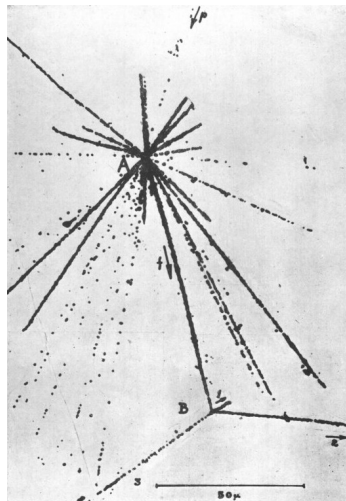
## Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy

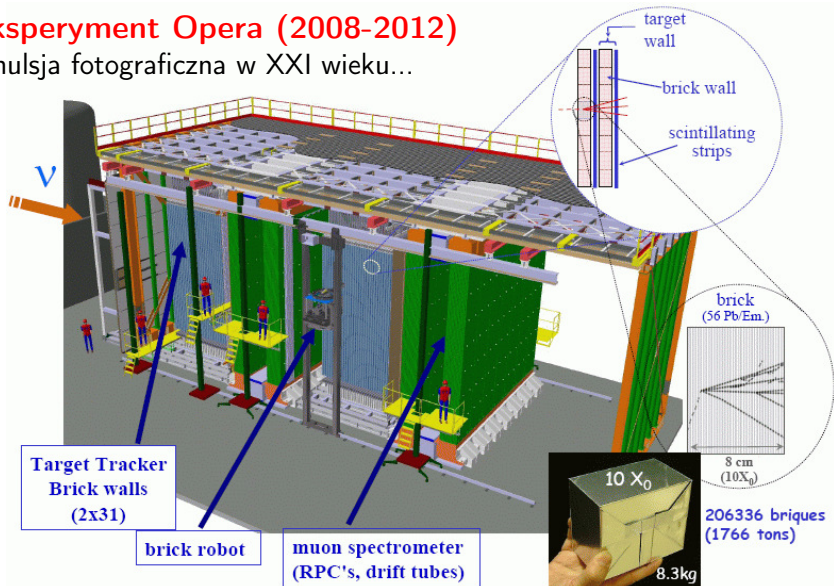
⇒ reakcja chemiczna



M. Danysz i J. Pniewski, 1953

## Eksperyment Opera (2008-2012)

Emulsja fotograficzna w XXI wieku...



Ponad 200 000 "cegiał" z emulsją fotograficzną

## Emulsja fotograficzna

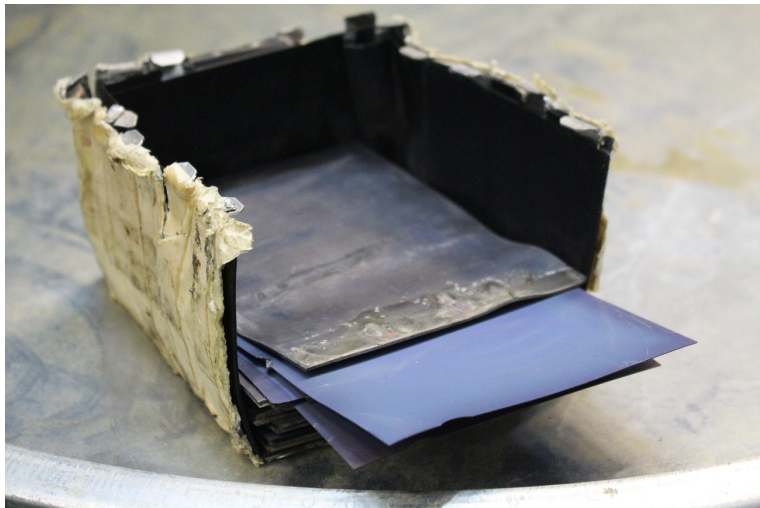
## Eksperyment OPERA (2008-2012)



Paleta z cegłami...

## Emulsja fotograficzna

Eksperyment OPERA (2008-2012)

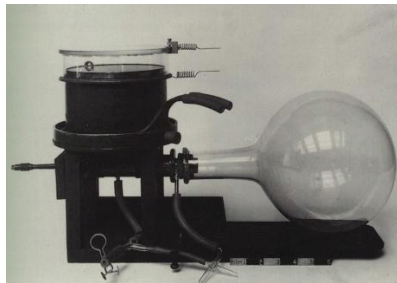


Struktura “cegły”



## Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

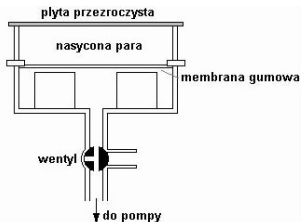


jonizacja

⇒ jony

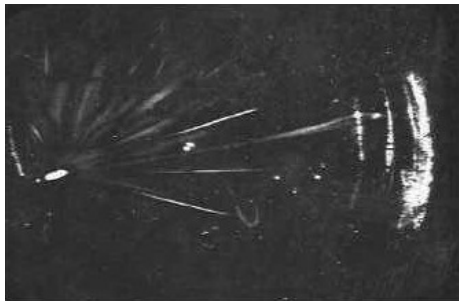
⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

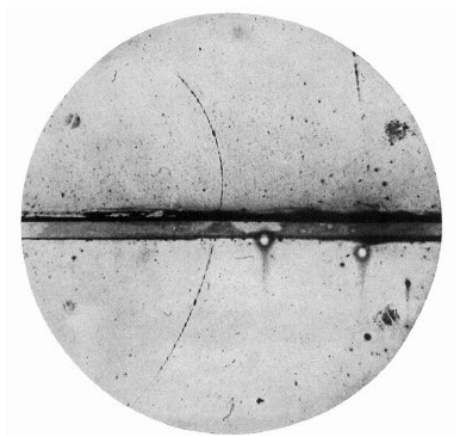


## Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

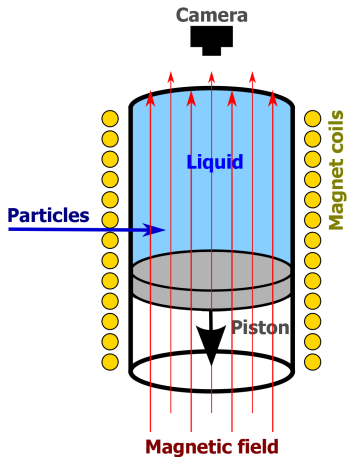


Carl Anderson, 1932

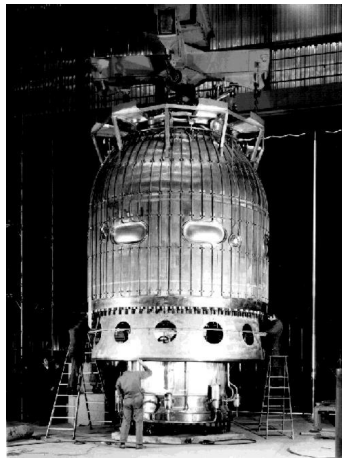


odkrycie pozytonu

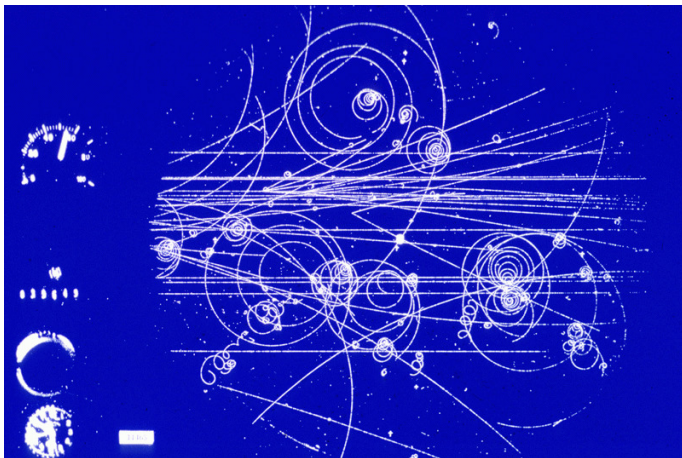
## Komora pęcherzykowa, 1952



jonizacja  $\Rightarrow$  wrzenie przegrzanej cieczy



## Komora pęcherzykowa

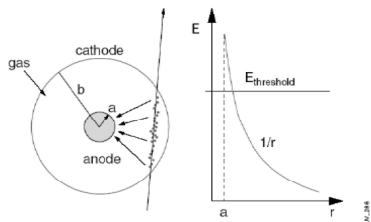


Ciecz pełni też rolę “tarczy”, z którą oddziałują cząstki wiązki

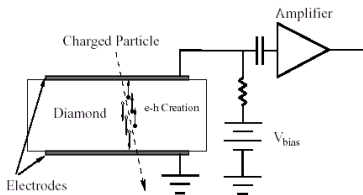
## Pomiar jonizacji

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

w gazie



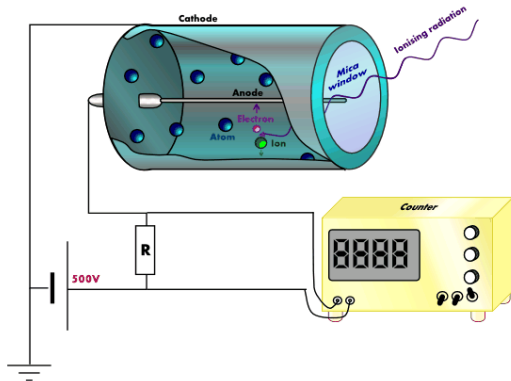
w półprzewodniku



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

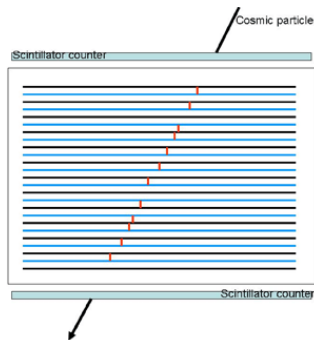
## Licznik Geigera-Müllera

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

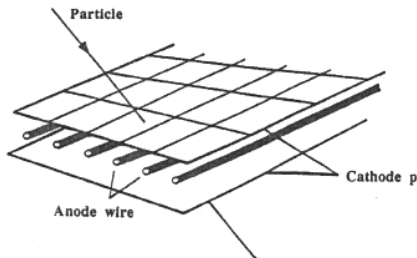


Możliwość wyboru zdarzeń  
(sterowanie napięciem)

## Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970

(Nobel 1992)

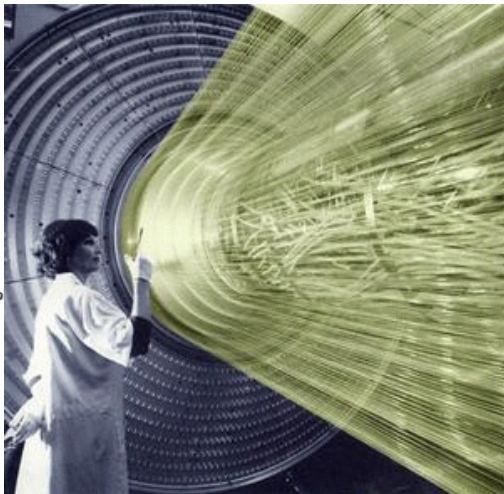


Tanie!

Odczyt w pełni elektroniczny!

elektronika+komputer

⇒ rewolucja w możliwościach zbierania i przetwarzania danych...





## TPC

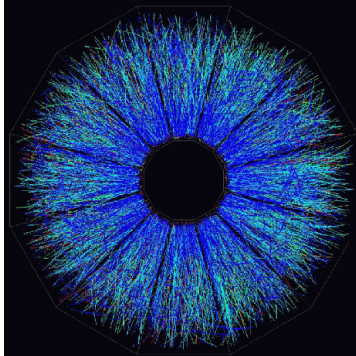
Komora  
projekcji  
czasowej

Przypadek  
zderzenia  
ciężkich jonów

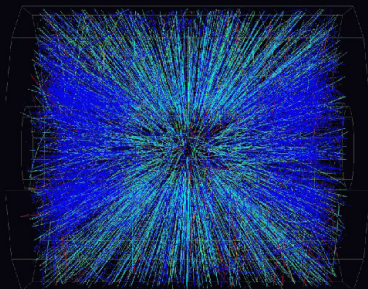
detektor STAR  
przy RHIC

produkcja  
~ 6000 cząstek  
naładowanych

*Au on Au Event at CM Energy ~ 130 A-GeV*



Central Event



color code  $\Rightarrow$  energy loss

## Detektory półprzewodnikowe

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

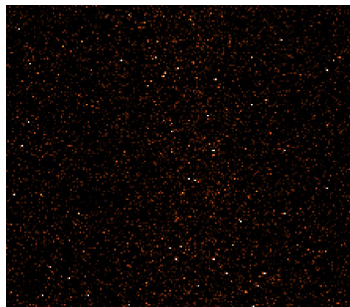
Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek! (nie tylko fotonów)

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)

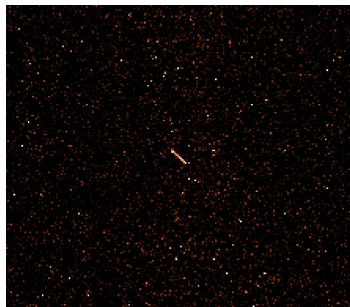
Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek! (nie tylko fotonów)

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)

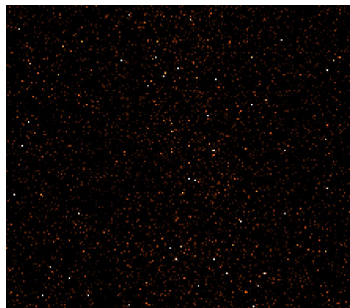
Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek! (nie tylko fotonów)

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



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

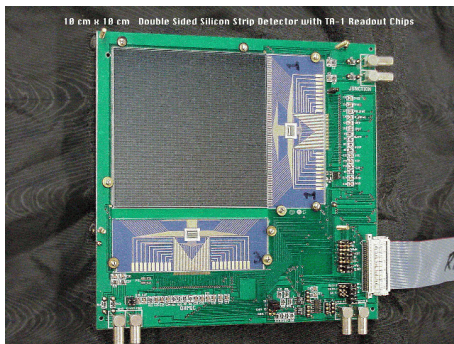
Kolejne...



## Detektory półprzewodnikowe

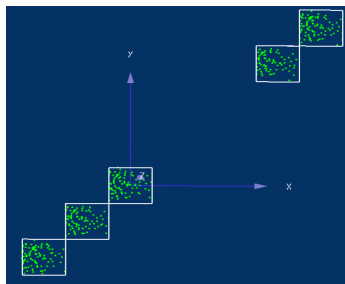
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



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

Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek przez pięć warstw detektora testowego:

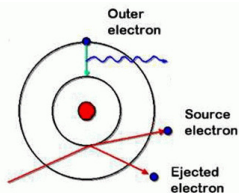


Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy precyzyjnie zrekonstruować tor.

- 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

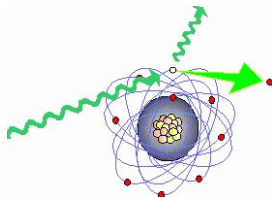
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



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

## Fotony

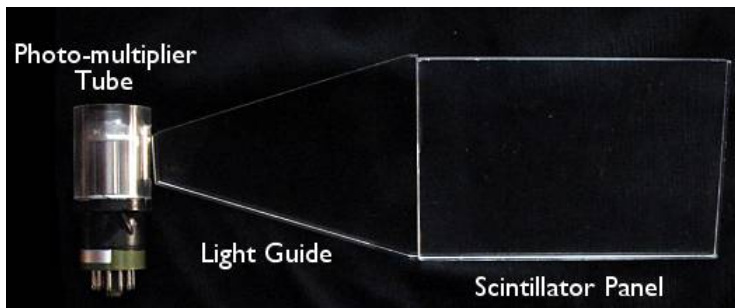
Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).



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

## Scyntyłacja

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

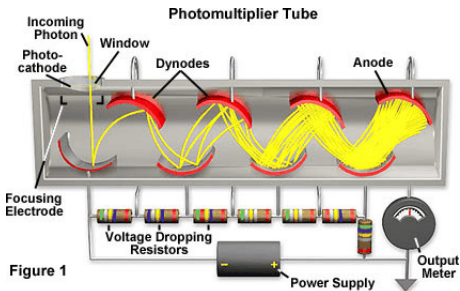


- + **Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki** (błysk jest bardzo krótki)
- **Brak pomiaru pozycji** (duża powierzchnia aktywna)



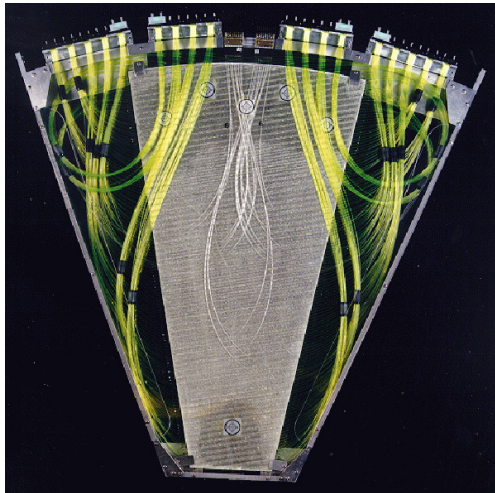
## Fotopowielacz

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

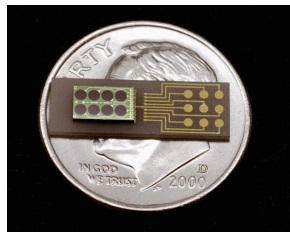


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

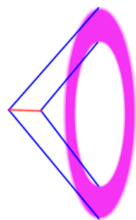
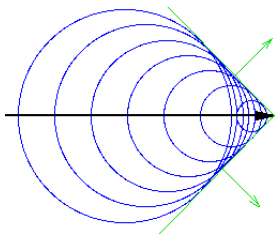
⇐ włókna scyntylujące,

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

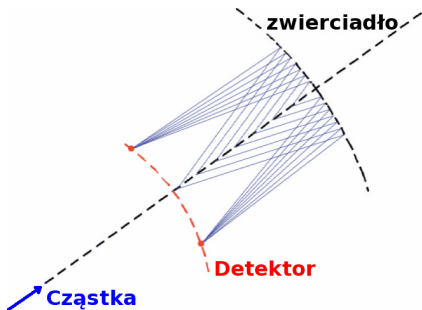
Zachodzi w wodzie, lodzie, powietrzu...

Tania technologia dla dużych detektorów!

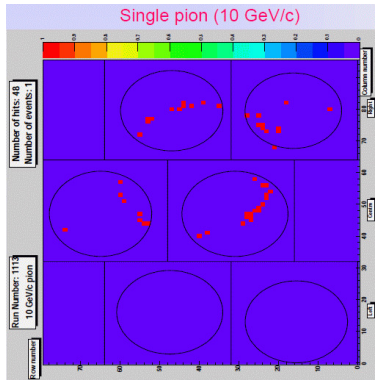
## Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



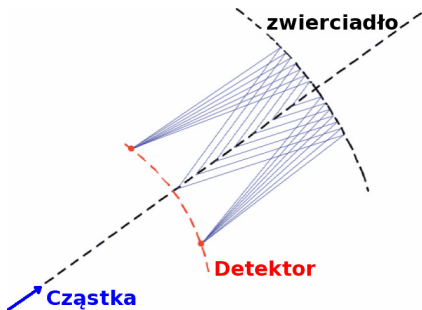
Obraz w detektorze (jedna cząstka)



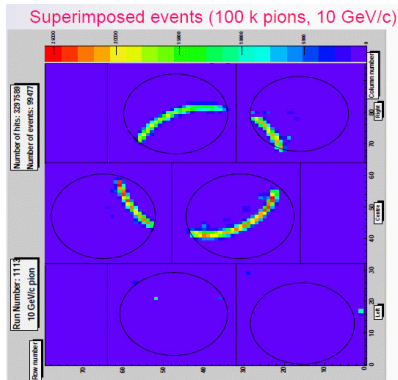
## Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



Obraz w detektorze (po uśrednieniu)



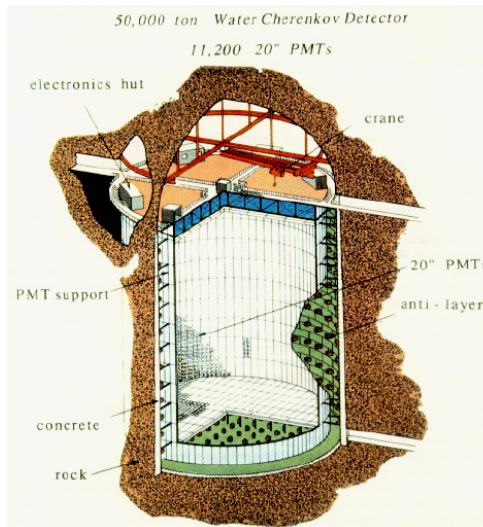
- 1 Obserwacje w świecie cząstek
- 2 Detektory jonizacyjne
  - Emulsja fotograficzna
  - Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
  - Detektory gazowe
  - Detektory półprzewodnikowe
- 3 Inne procesy fizyczne
  - Scyntylacja
  - Efekt fotoelektryczny
  - Promieniowanie Czerenkowa
- 4 Współczesne eksperymenty

## Super-Kamiokande eksperyment neutronowy

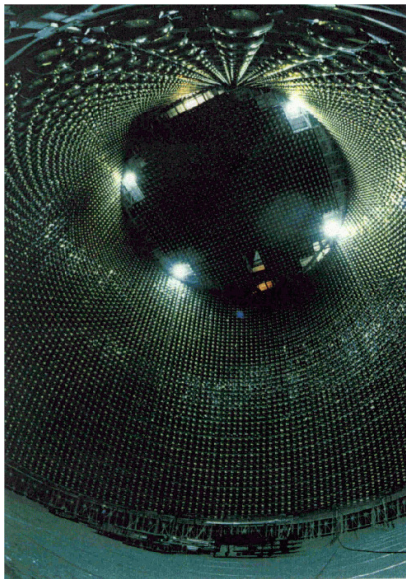
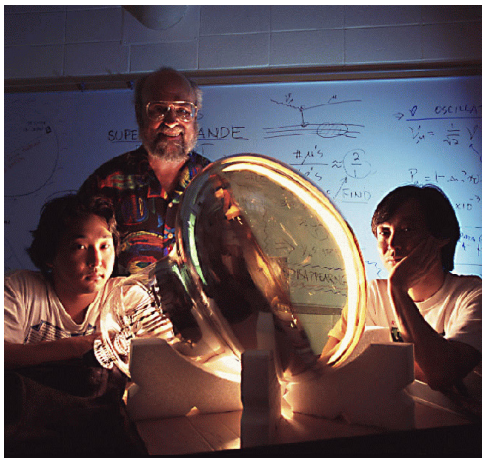
**Japonia**, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

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

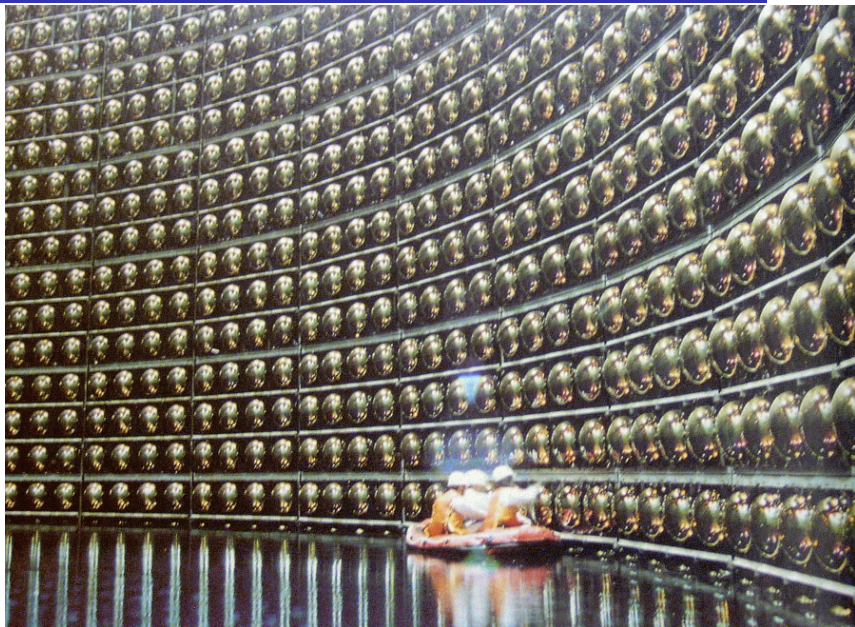
rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



## Super-Kamiokande



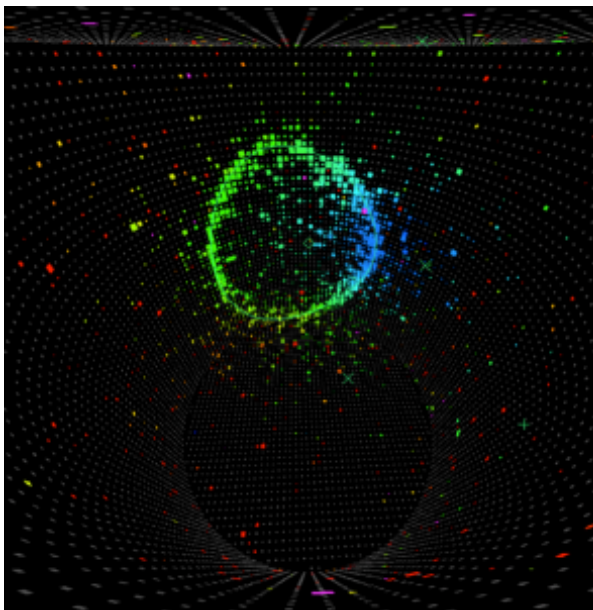




## Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutronów.

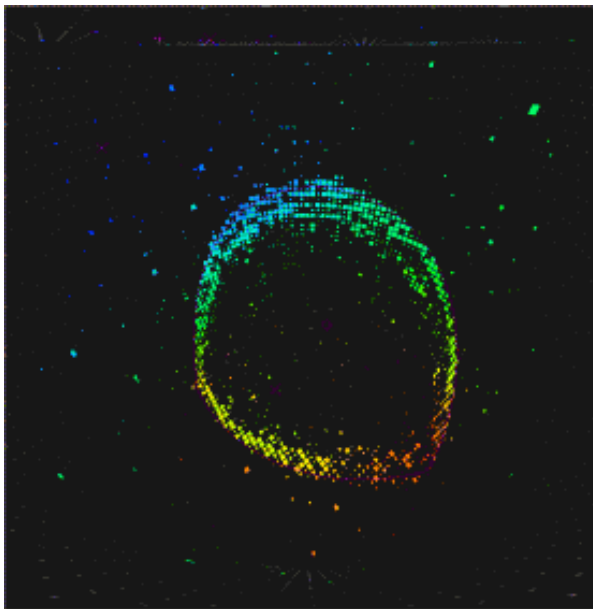
Widok perspektywiczny  
Rozmiar punktu: sygnał  
Kolor punktu: czas



## Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Widok perspektywiczny  
Rozmiar punktu: sygnał  
Kolor punktu: czas



## Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin

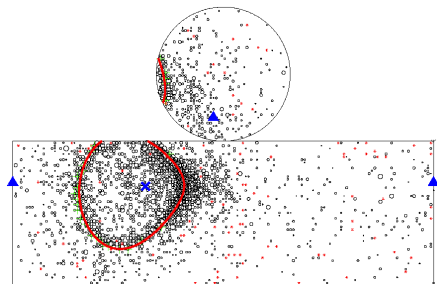
W zależności od rodzaju neutrina produkowane są różne cząstki

### 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

