

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Detekcja cząstek

Maria Krawczyk, Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



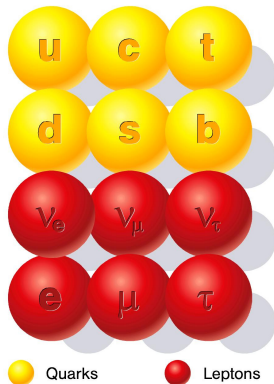
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

27 października 2015

- 1 Wprowadzenie
  - Cząstki i fale
  - Istota obserwacji 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

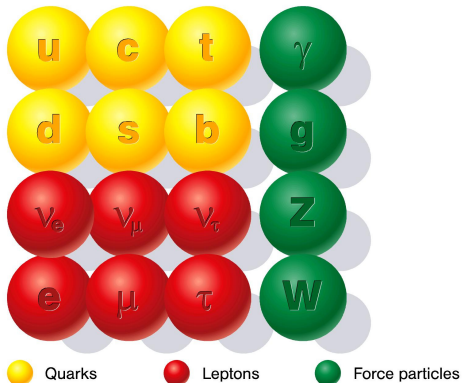
## Przypomnienie

- cząstki materii  
kwarki i leptony



## Przypomnienie

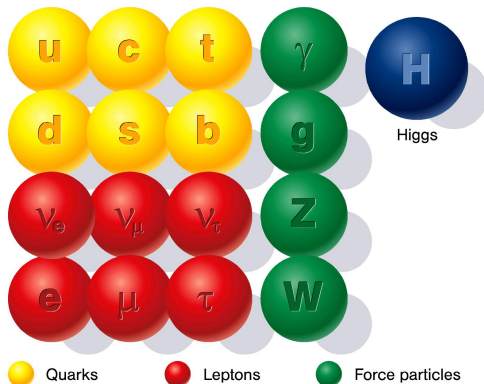
- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$



## Przypomnienie

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
konieczny dla  
spójności modelu

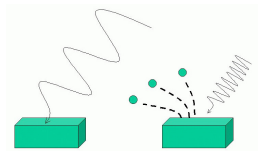
Będziemy to jeszcze  
szczegółowo omawiać...



100 lat temu, w roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych kwantów energii, które dziś nazywamy fotonami.

## Efekt fotoelektryczny

Hipoteza ta wyjaśniła zależność efektu fotoelektrycznego od długości fali światła

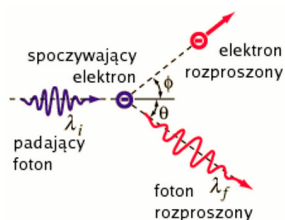


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

## Rozpraszanie Comptona

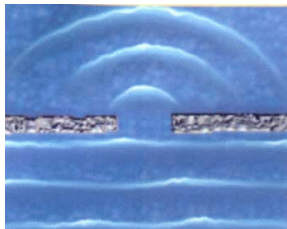
W roku 1923 Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko energię, ale i pęd  $\Rightarrow$  zachowują się jak cząstki



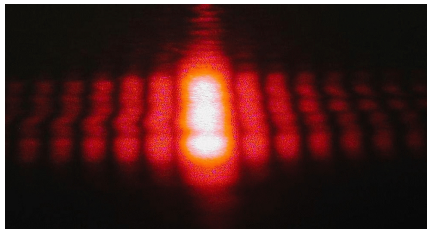
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.  
Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

**Fale na wodzie**



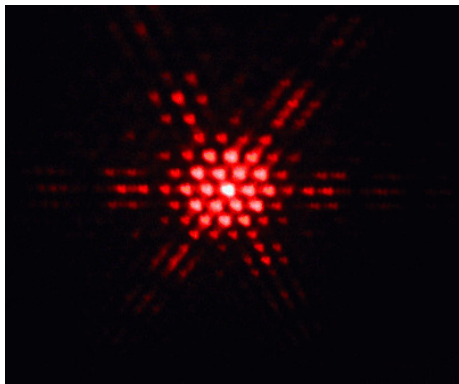
**Światło**



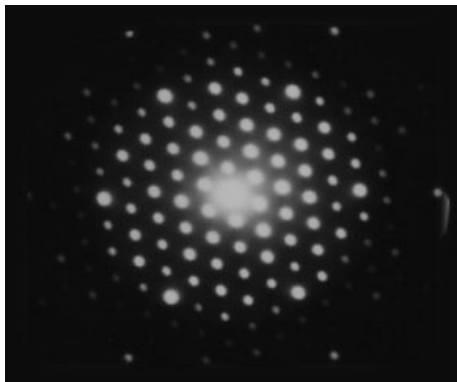
W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

**Światło**



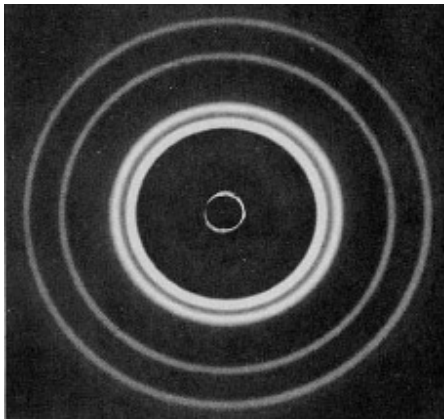
**Elektrony**



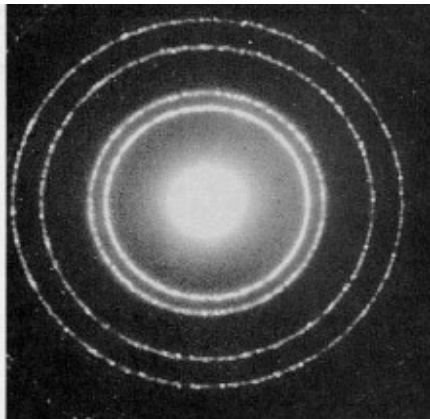


Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

**Promieniowanie X**



**Elektrony**



**Elektrony zachowują się jak fale !**  
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

**Tego typu podejście zawodzi jednak w świecie subatomowym!**

Falowa natura cząstek zmusza nas do rezygnacji z podejścia deterministycznego...

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fali prawdopodobieństwa**”, które potrafimy opisać odpowiednimi równaniami.

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## 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.

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## 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"...**

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. planet w Układzie Słonecznym) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## Mechanika kwantowa

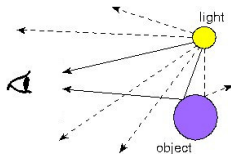
Ruch cząstki to rozchodzenie się **"fali prawdopodobieństwa"**, które potrafimy opisać odpowiednimi równaniami.

**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**.

## Istota obserwacji



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca obserwowanego procesu





## 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!

## 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!

Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

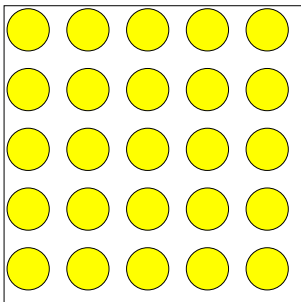
- jonizacja i scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

## Struktura materii

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

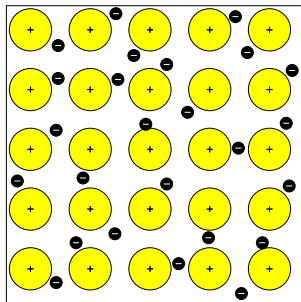
### Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami



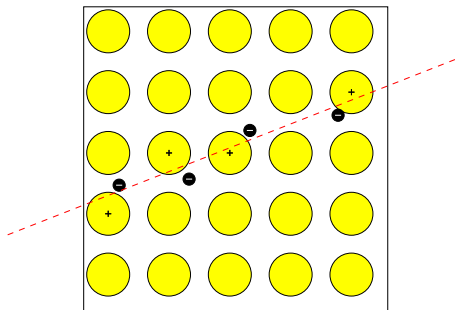
### Przewodnik

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



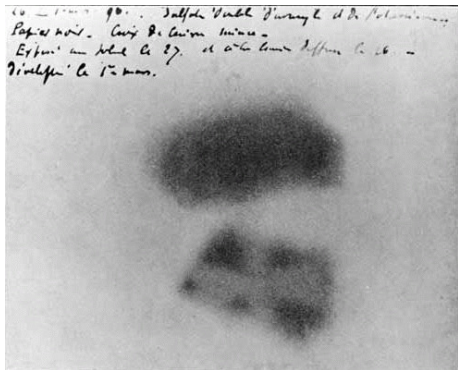
## Jonizacja

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

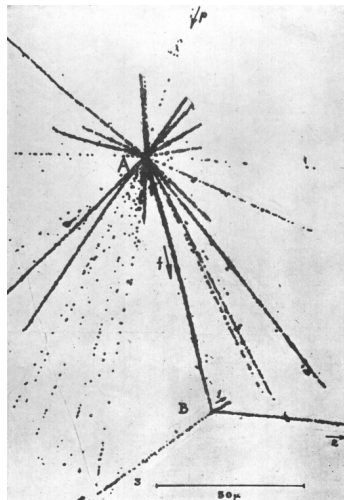


**Cząstka naładowana** przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów. **Pojawiają się swobodne nośniki ładunku**

## Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896  
wzbudzone atomy  
⇒ reakcja chemiczna

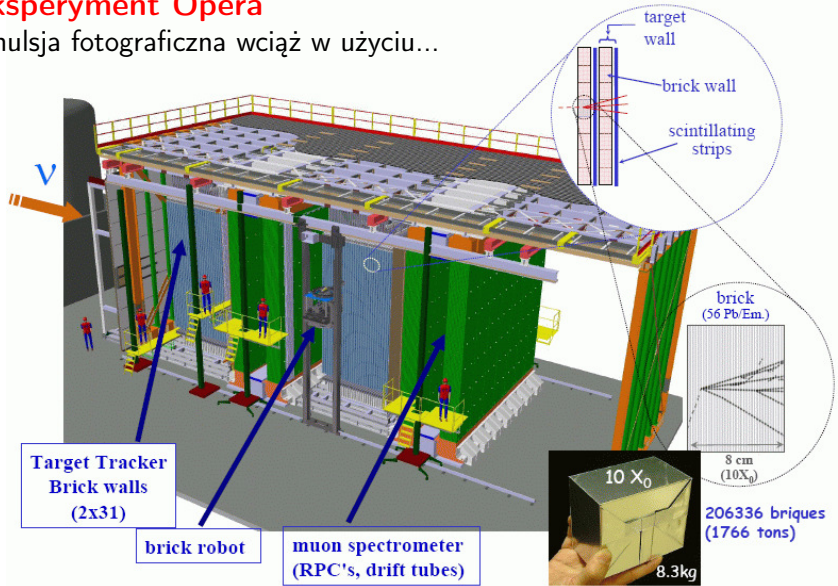


M. Danysz i J. Pniewski, 1953

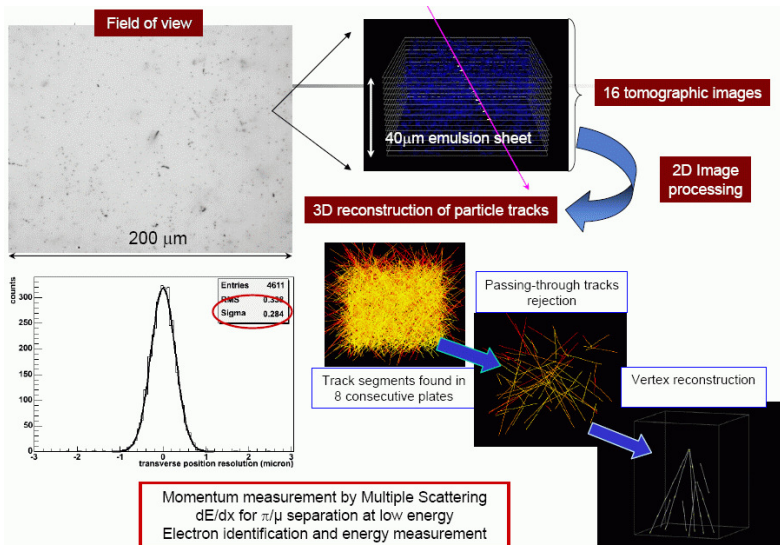
# Detekcja cząstek

## Eksperyment Opera

Emulsja fotograficzna wciąż w użyciu...



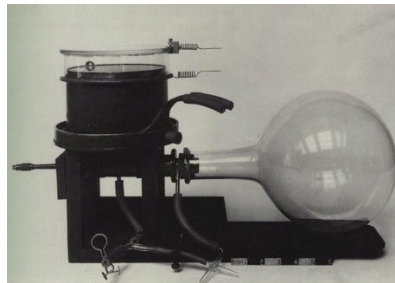
## Emulsja fotograficzna eksperyment OPERA





## Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

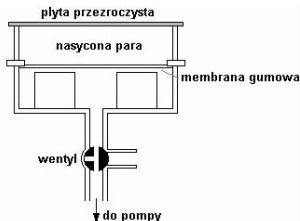


jonizacja

⇒ jony

⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

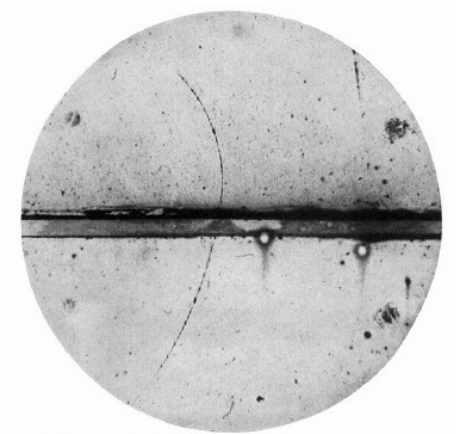


## Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

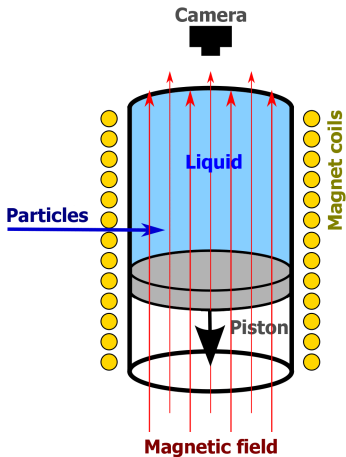


Carl Anderson, 1932

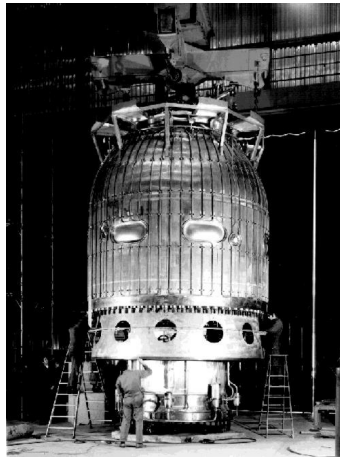


odkrycie pozytonu

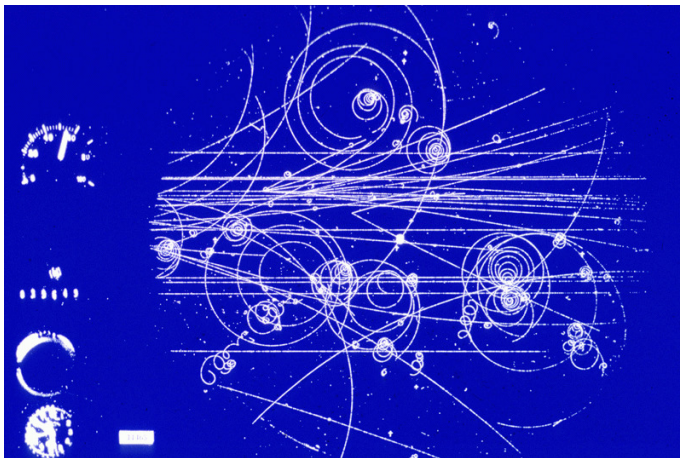
## Komora pęcherzykowa, 1952



jonizacja  $\Rightarrow$  wrzenie przegrzanej cieczy



## Komora pęcherzykowa

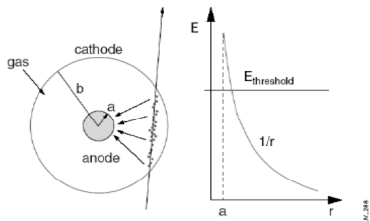


Ciecz pełni też rolę “tarczy”, z którą oddziałują cząstki wiązki

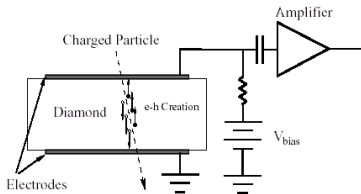
## Pomiar jonizacji

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

w gazie



w półprzewodniku

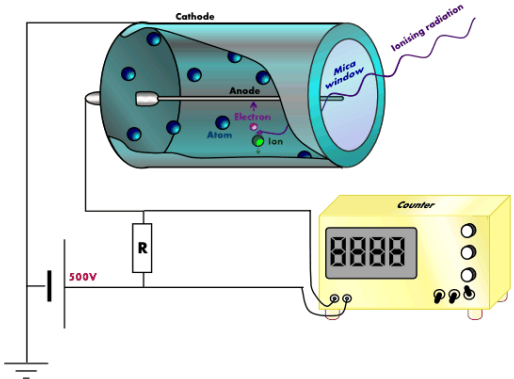


Przepływający ładunek jest na ogół bardzo mały,  
ale czuła elektronika pozwala go wzmocnić i zmierzyć.  
Na tej zasadzie opiera się **większość współczesnych detektorów**.

# Detekcja cząstek

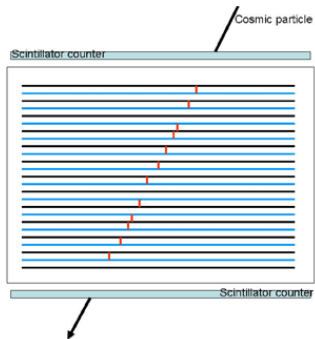
## Licznik Geigera-Müllera

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



## Komora iskrowa

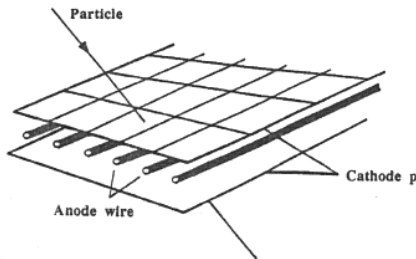
Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



Możliwość wyboru zdarzeń  
(sterowanie napięciem)

## Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970  
(Nobel 1992)



Tanie!  
Odczyt w pełni elektroniczny!  
elektronika+komputer  
⇒ rewolucja

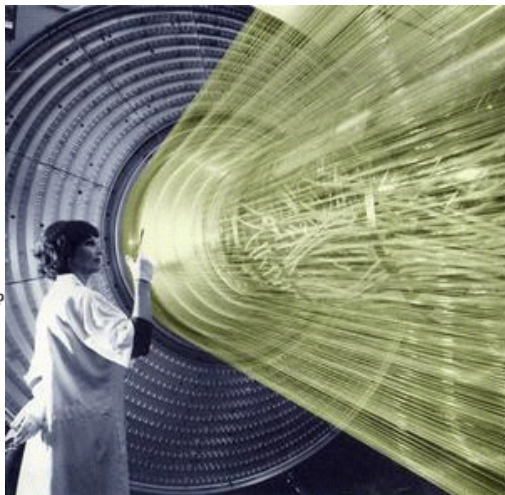


Photo: SLAC, USA

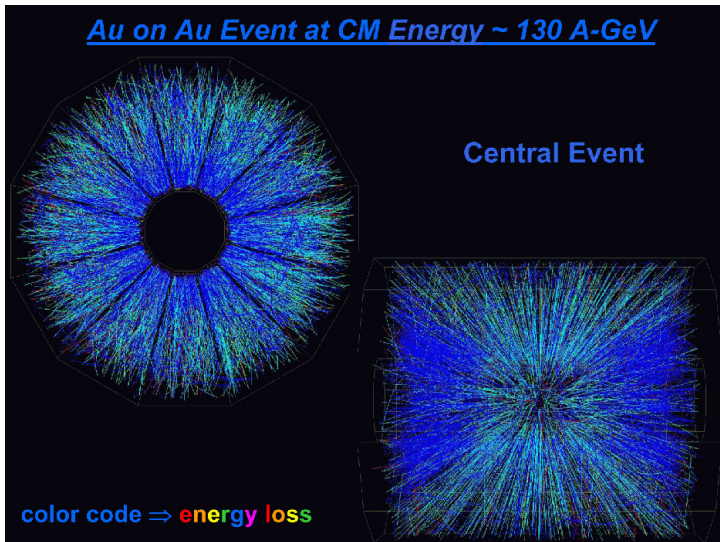


## TPC

Komora  
projekcji  
czasowej

Przypadek  
zderzenia  
ciężkich jonów

detektor STAR  
przy RHIC



## Detektory półprzewodnikowe

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

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



Wycinek:

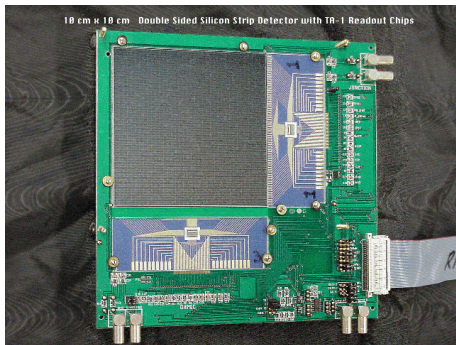


To nie UFO. To ślad cząstki...

## Detektory półprzewodnikowe

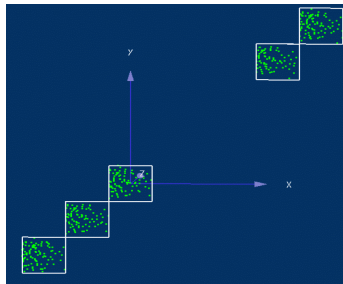
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



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

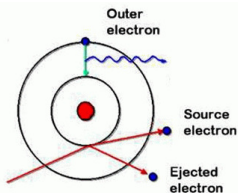
Mierzone punkty przejścia wiązki  
cząstek przez pięć warstw  
detektora testowego:



Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy zrekonstruować tor.

## Scyntyłacja

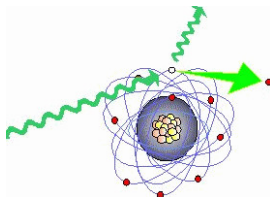
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



**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).

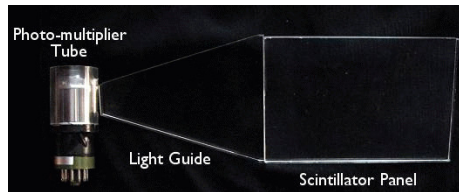
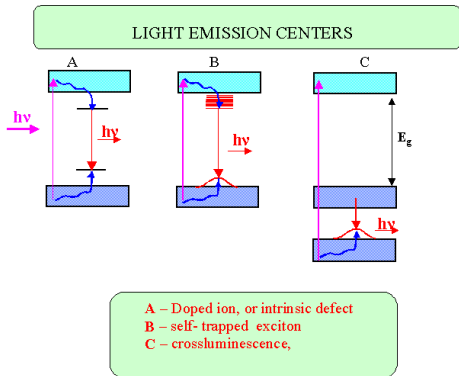


W obu przypadkach elektron może zostać “wyrwany” z atomu.

## Scyntyłacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

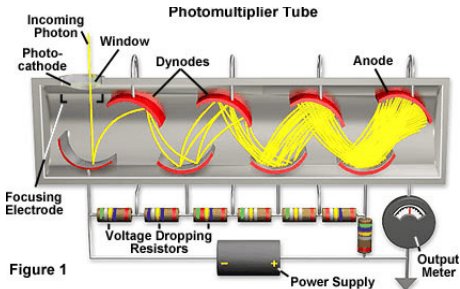
Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza



Brak pomiaru pozycji  
Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki

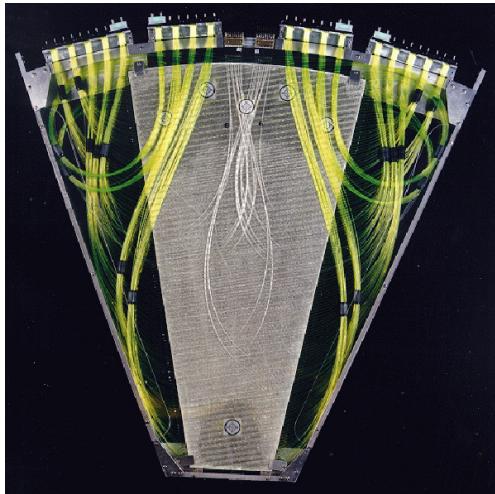
## Fotopowielacz

Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek. Na kolejnych elektrodach (tzw. dynodach) każdy elektron wybija kilka elektronów wtórnych - powstaje lawina



Jeden foton, jeśli tylko uda mu się wybić pierwszy elektron (efekt fotoelektryczny) powoduje przepływ makroskopowego prądu.

## Detektory scyntylacyjne

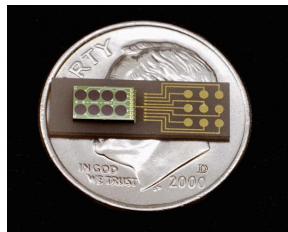


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

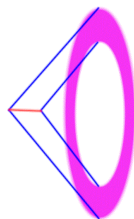
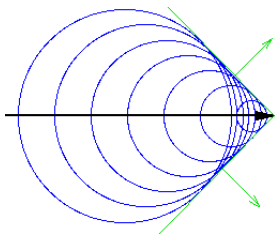
⇐ włókna scyntylujące,

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!

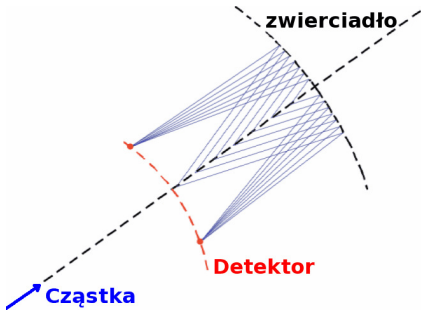


# Detekcja cząstek

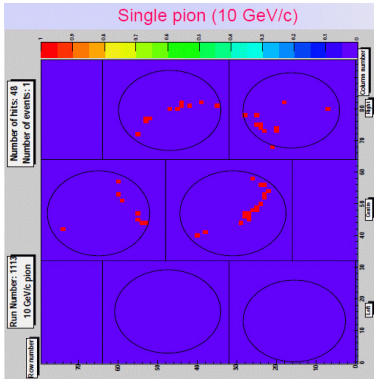
## Promieniowanie Czerenkowa

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

### Schemat



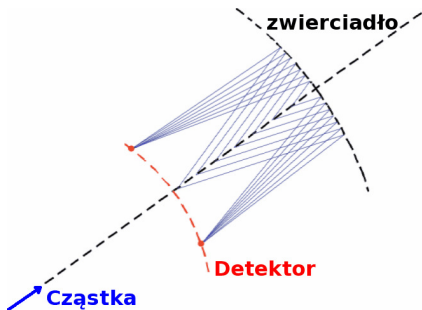
### Obraz w detektorze



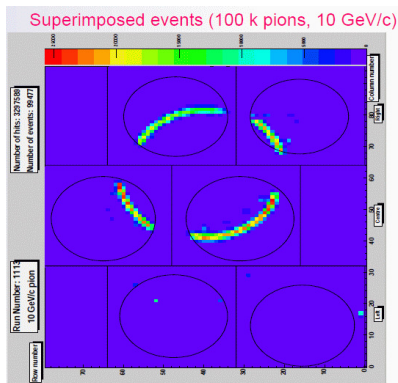
## Promieniowanie Czerenkowa

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

### Schemat



### Obraz w detektorze

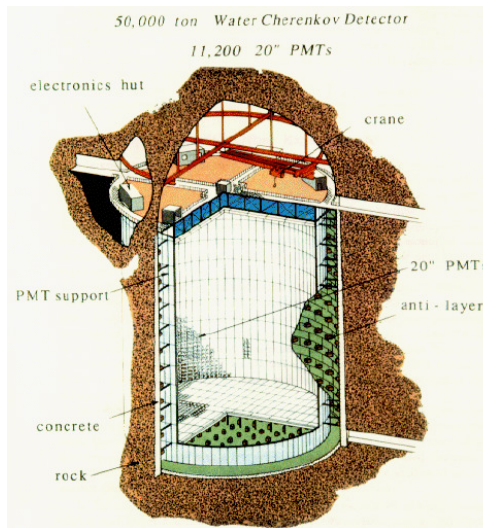


## Super-Kamiokande eksperyment neutronowy

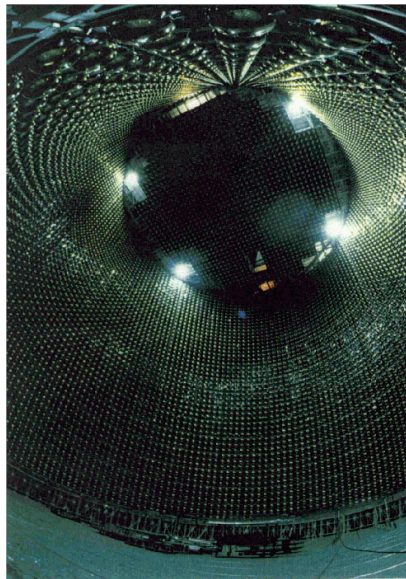
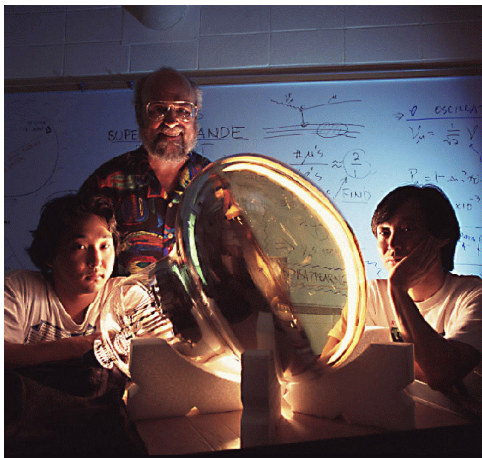
**Japonia**, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

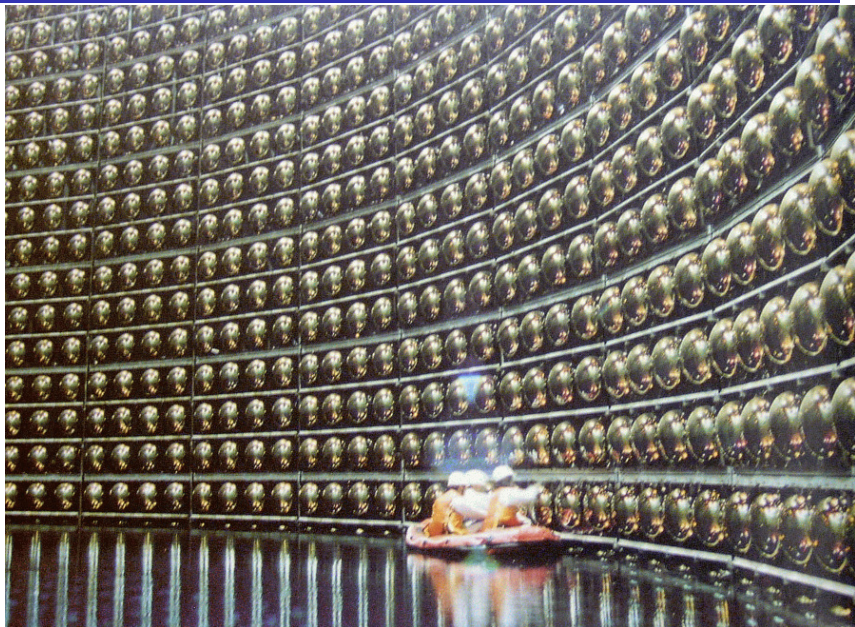
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



## Super-Kamiokande





## Super-Kamiokande

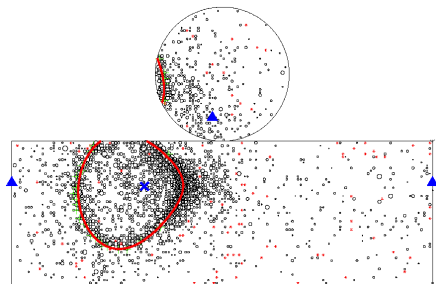
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

### Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

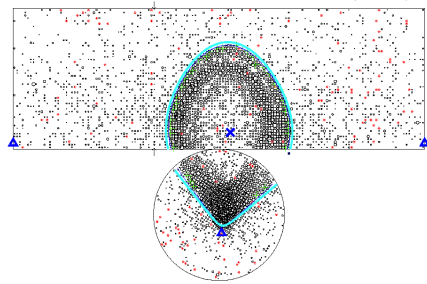


### Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

“gruby” pierścień.



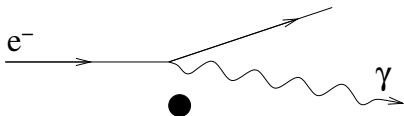
## Kalorymetry

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

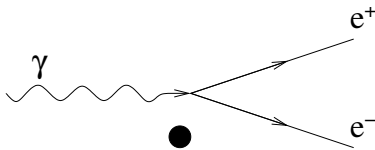
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi  $\Rightarrow$  kalorymetry.

### Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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

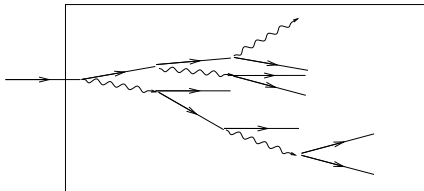


## Kalorymetry

Wysokoenergetyczny **elektron lub foton** wpadając do detektora wywołuje **kaskadę** składającą się z  $N \sim E$  cząstek

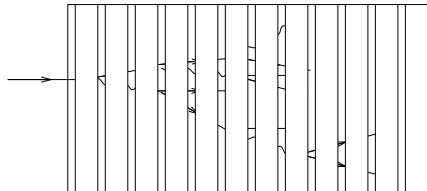
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

Kalorymetr próbkujący

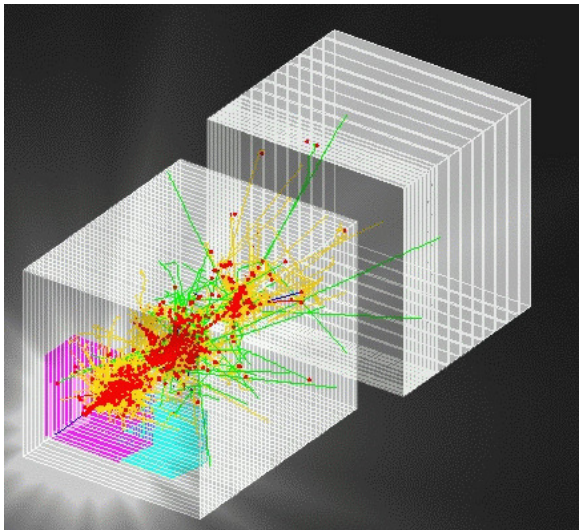


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

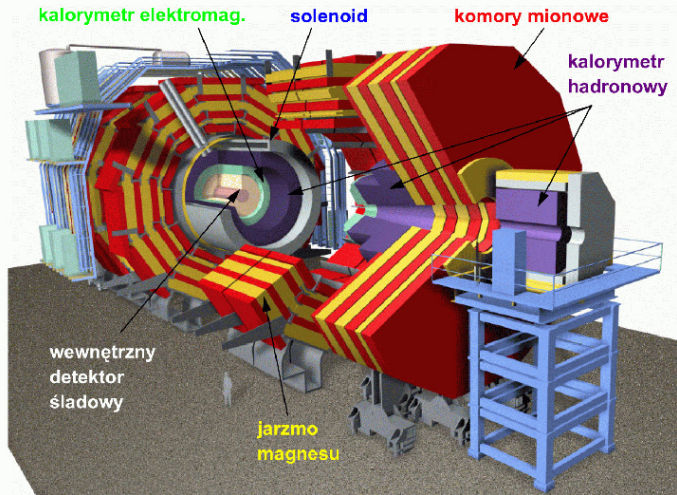


## Kalorymetry

Symulacja rozwoju kaskady hadronowej (pomiar energii protonu)



## Compact Muon Solenoid



- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
  - Jonizację
    - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
  - Jonizację
    - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
  - Scyntyłację
  - Efekt fotoelektryczny
  - Promieniowanie Czerenkowa

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
  - Jonizację
    - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
  - Scyntyłację
  - Efekt fotoelektryczny
  - Promieniowanie Czerenkowa
  - Powstawanie kaskad cząstek wtórnych
    - ⇒ kalorymetry

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
  - Jonizację
    - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
  - Scyntyłację
  - Efekt fotoelektryczny
  - Promieniowanie Czerenkowa
  - Powstawanie kaskad cząstek wtórnych
    - ⇒ kalorymetry

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