

Wszechświat cząstek elementarnych

Detekcja cząstek

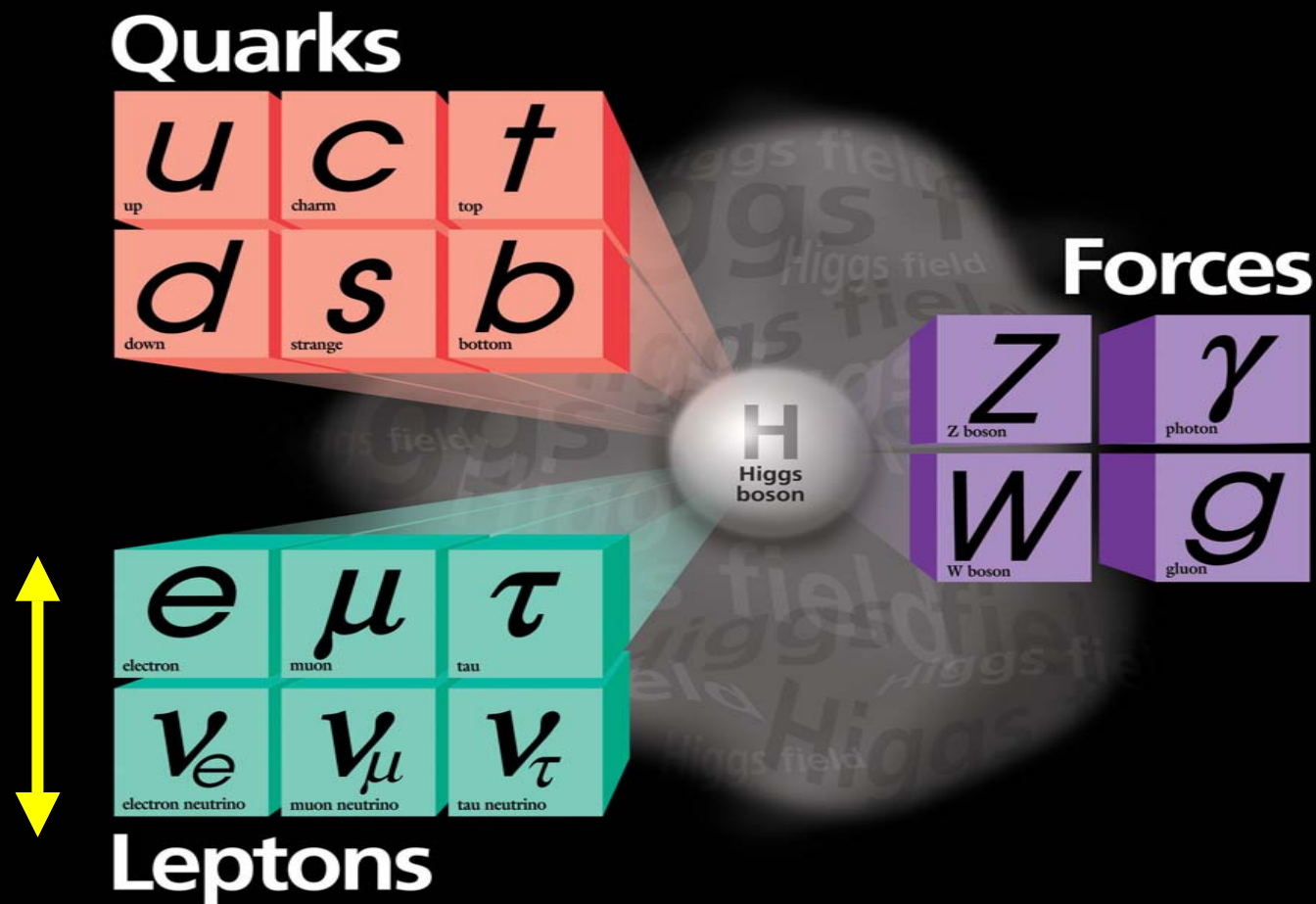
Wykład Ogólnouniwersytecki
Wydział Fizyki U.W.



prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych, Instytut Fizyki Doświadczalnej

Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym



Jak badamy cząstki elementarne?



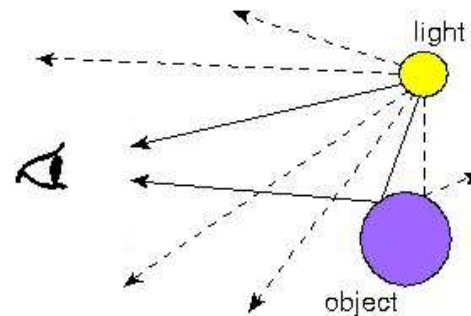
- Przyglądamy się im...
źródło „światła” → obiekt → detektor
- Rozbijamy je...
zderzając cząstka → ← cząstka
Patrzymy jakie są produkty zderzenia
- „Podgrzewamy” ...
Dostarczamy dużej energii do układu wielu cząstek (np. w wyniku zderzenia)
patrzymy co „się ugotuje”
jakie cząstki powstaną na końcu

Detekcja cząstek

- Wprowadzenie
 - Istota obserwacji w świecie cząstek
- Podstawowe procesy fizyczna
 - jonizacja
 - efekt fotoelektryczny
 - scyntylacja
 - promieniowanie Czerenkowa
- Metody detekcji cząstek
 - detektory śladowe
 - kalorymetry
- Współczesne eksperymenty
- Falowa natura cząstek

Detekcja cząstek

Istota obserwacji



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca obserwowanego procesu



Detekcja cząstek

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.

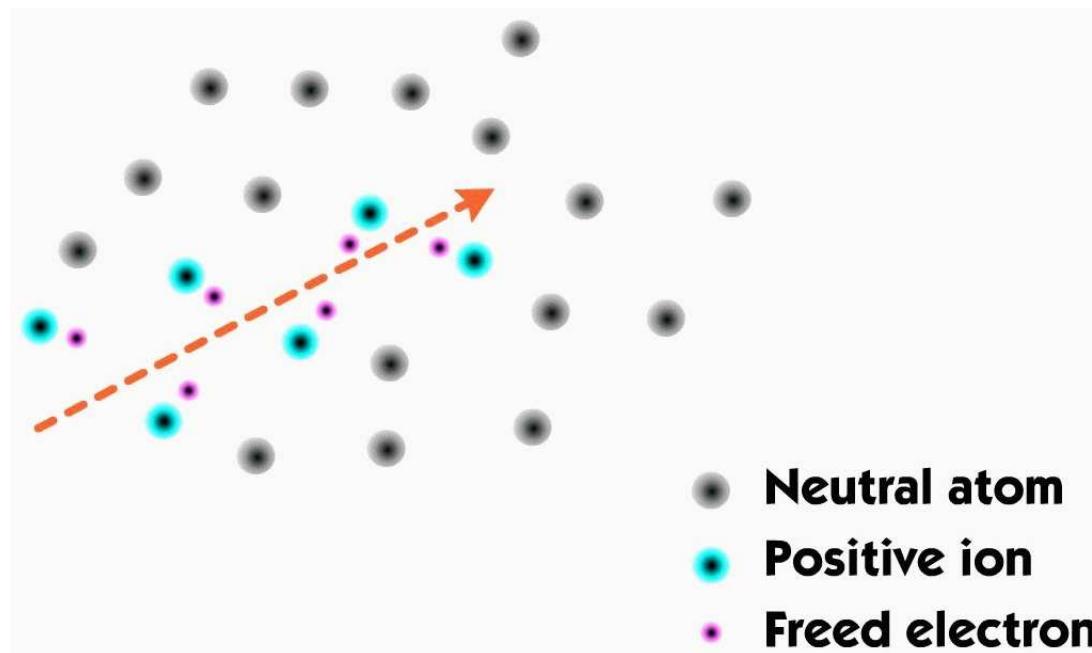
Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

- jonizacja i scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

Detekcja cząstek

Jonizacja

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

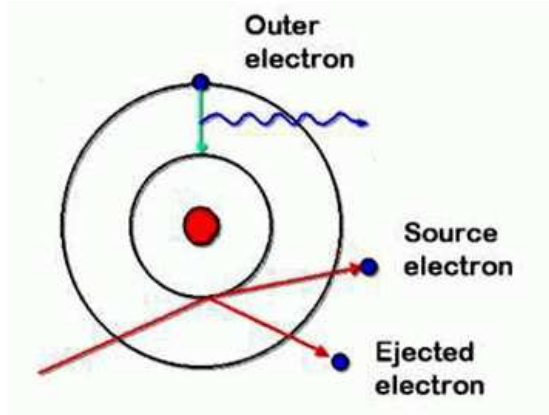


Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów. **Pojawiają się swobodne nośniki ładunku**

Detekcja cząstek

Scyntylacja

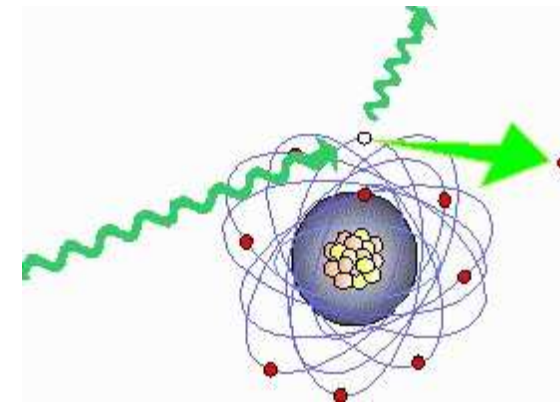
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



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

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.

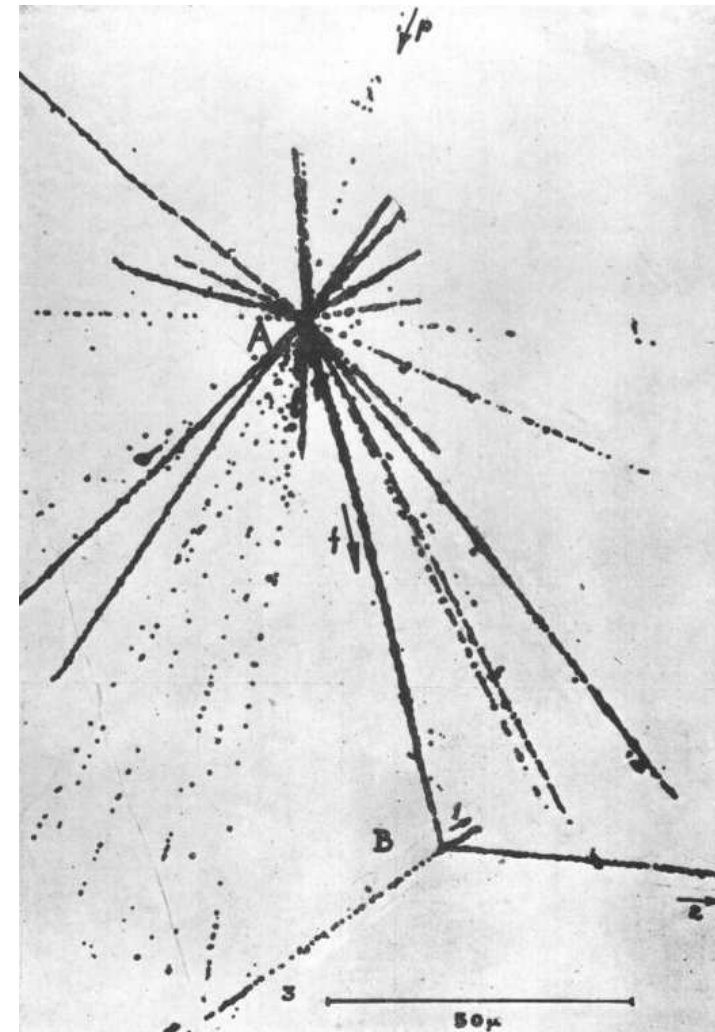
Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna

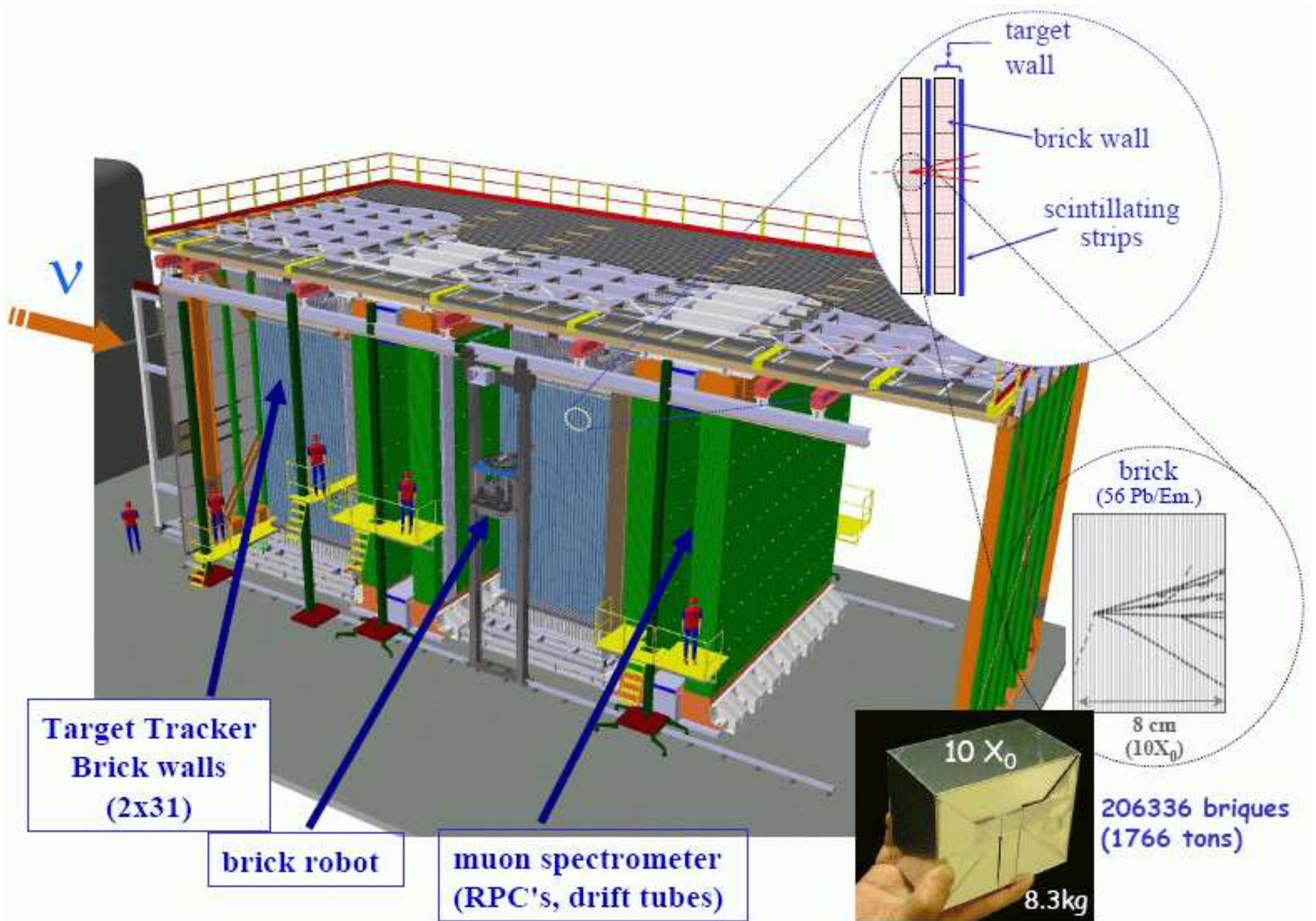


H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy
⇒ reakcja chemiczna



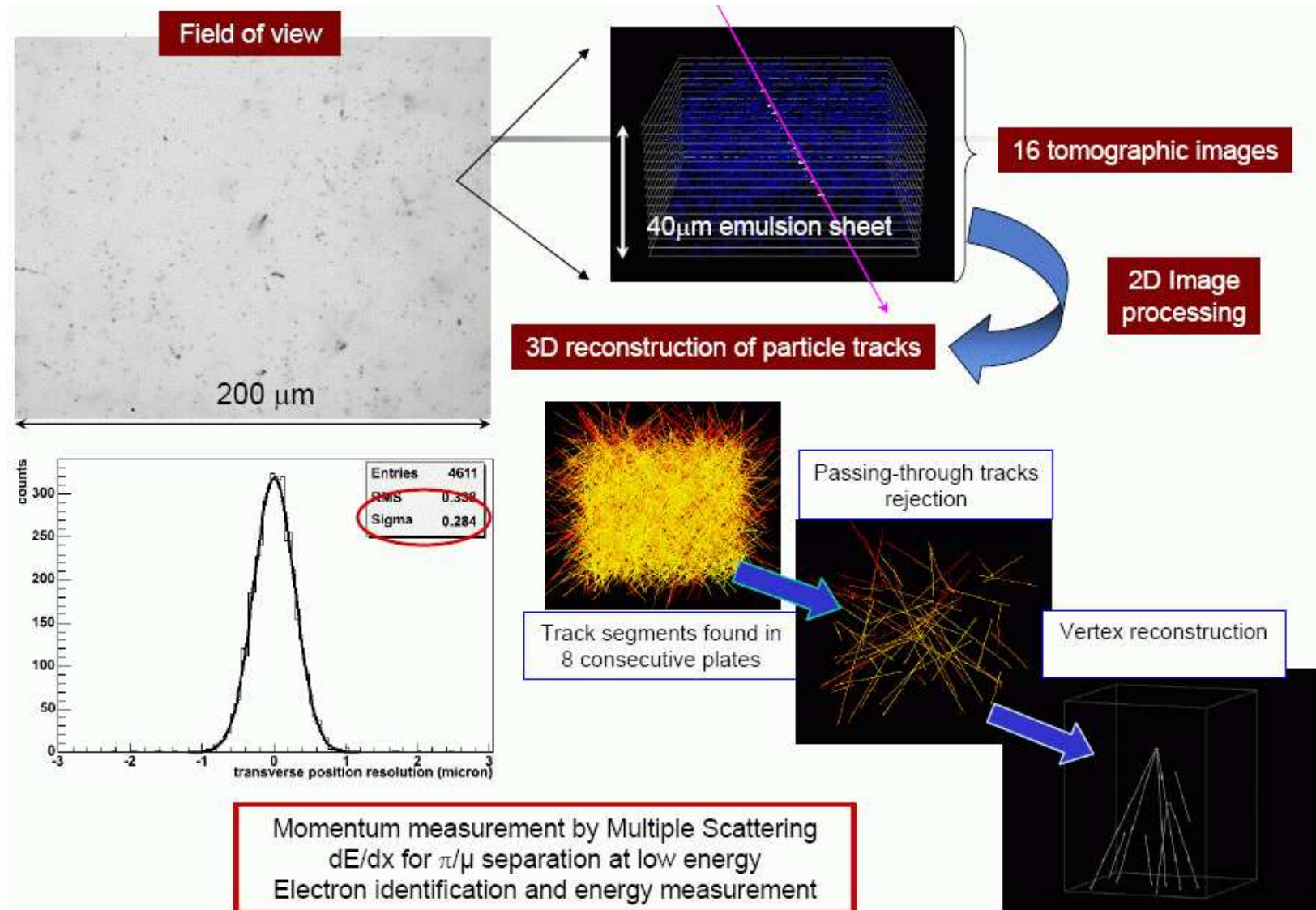
M. Danysz i J. Pniewski, 1953



Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna

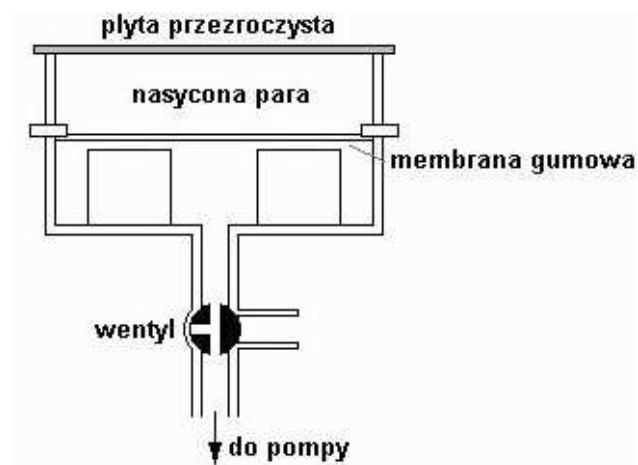
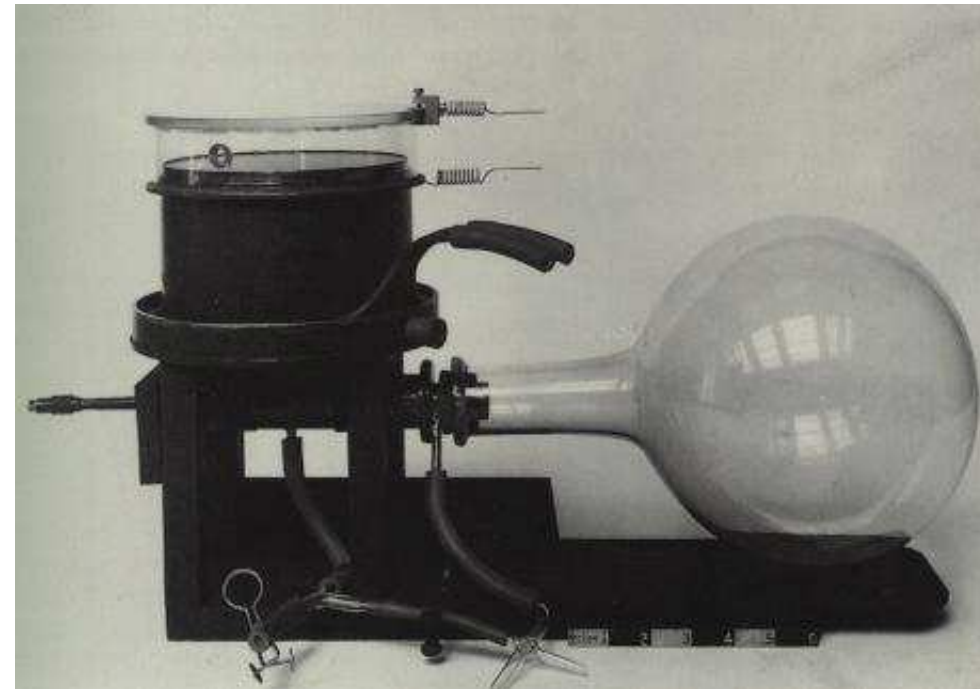
eksperyment OPERA



Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

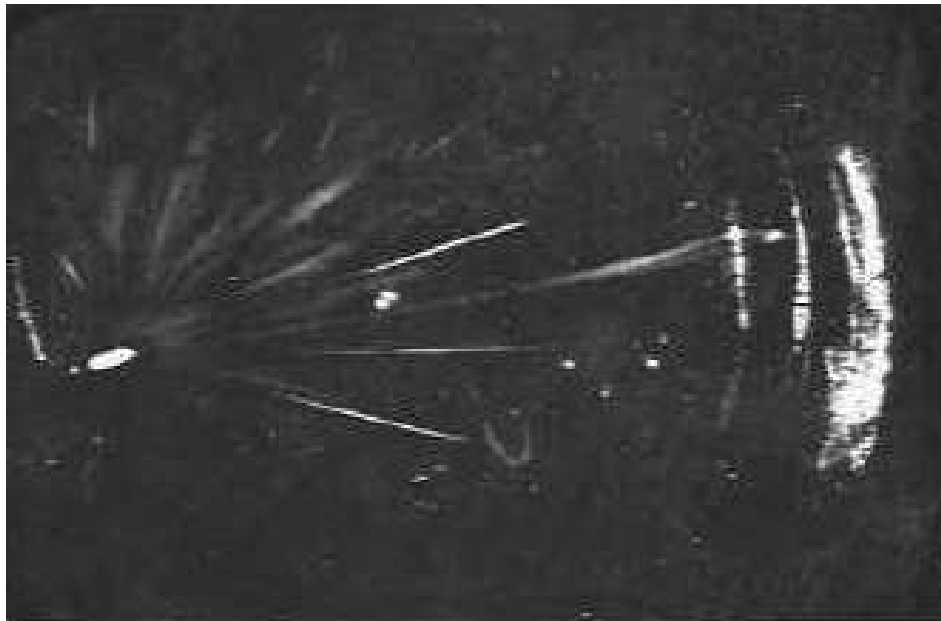


jony
⇒ kondensacja pary

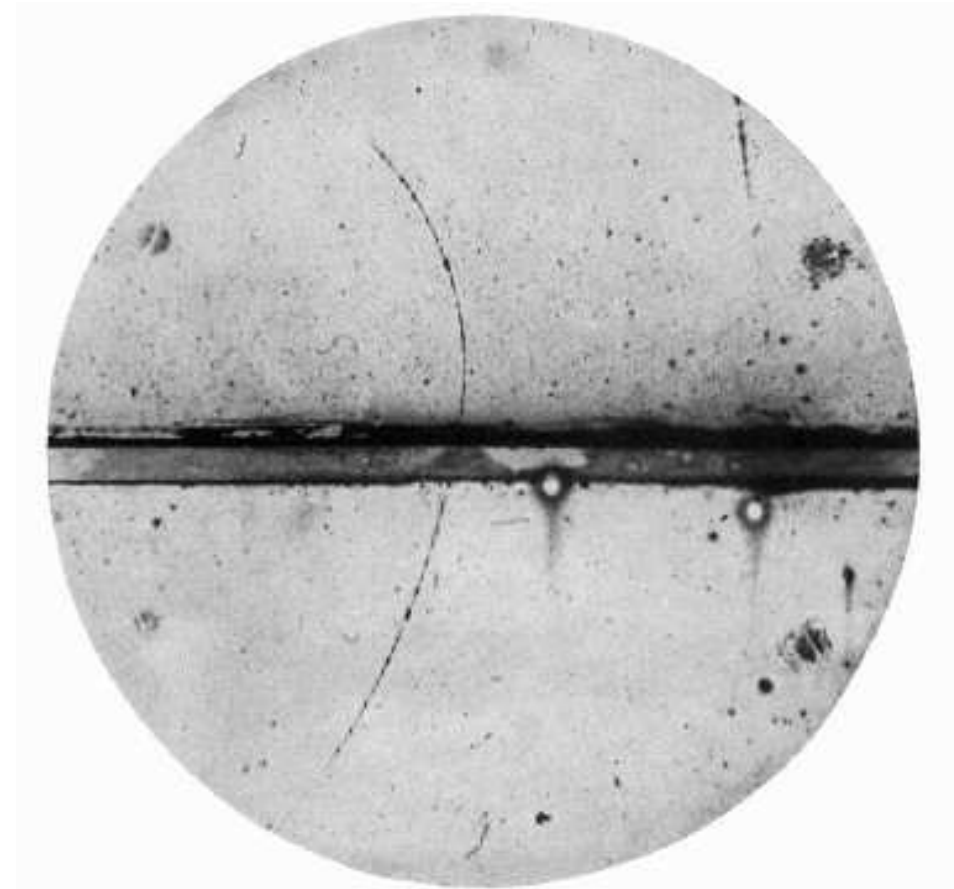
Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



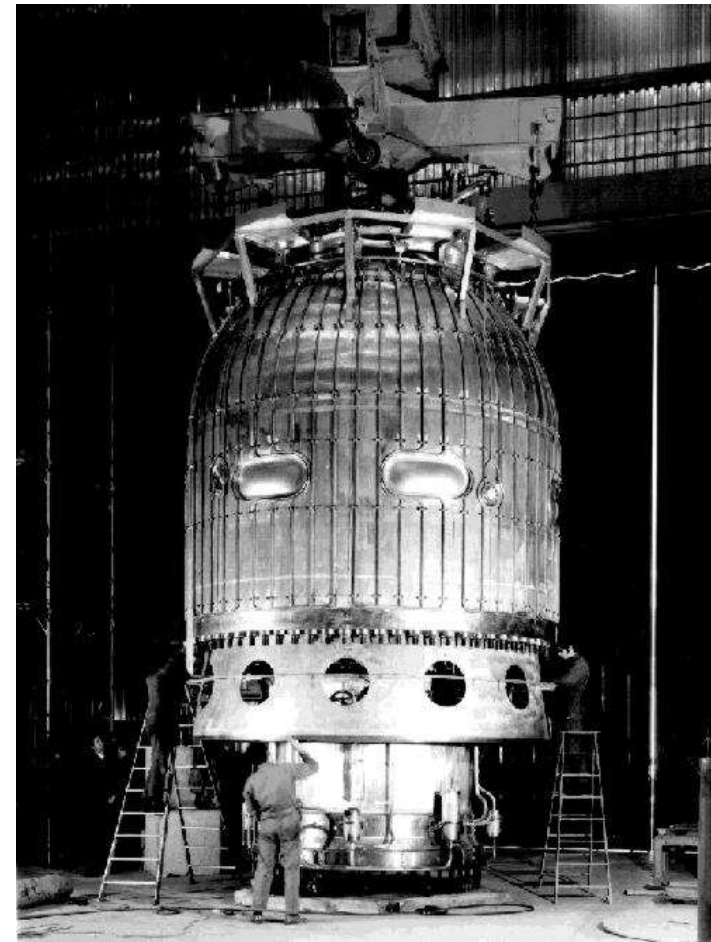
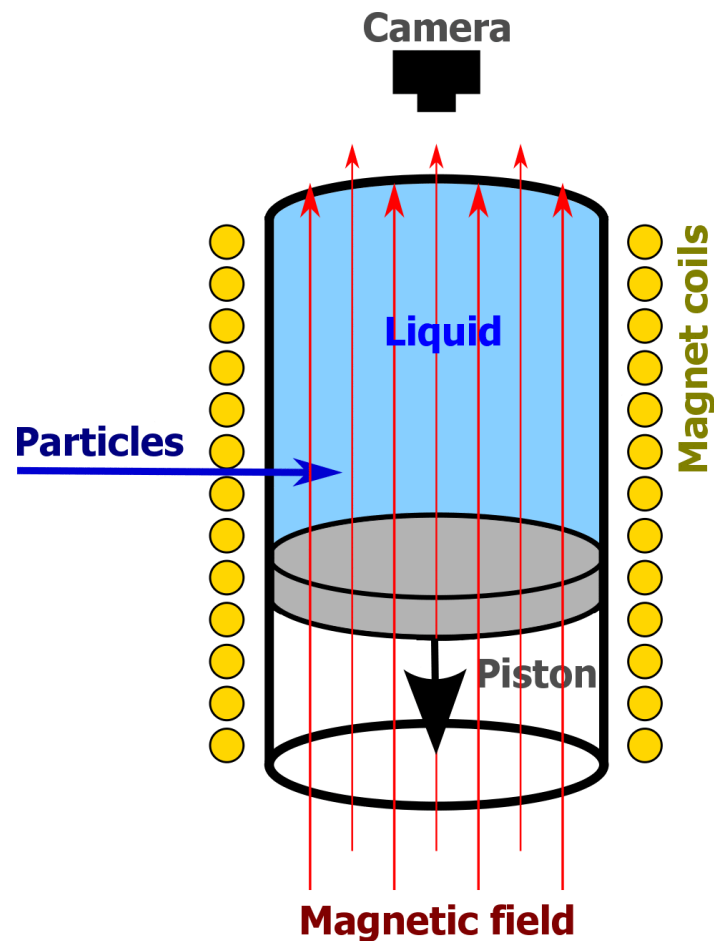
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa, 1952

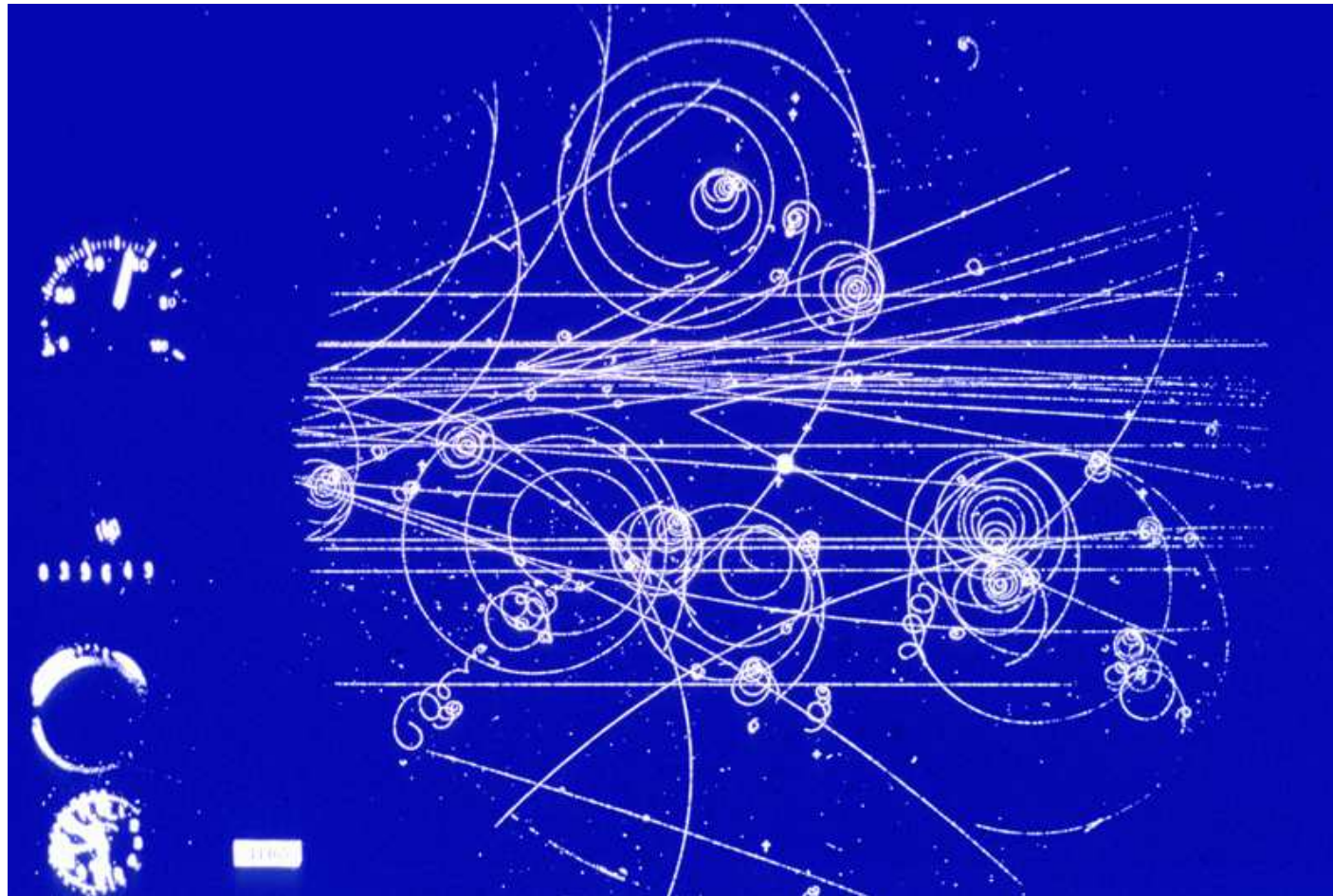


jony \Rightarrow wrzenie ciecży



Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa



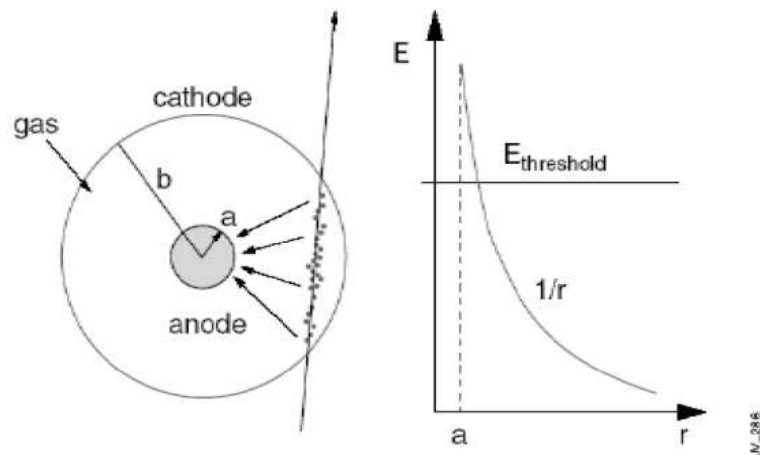
Cząstki wiązki oddziałują z cząstkami cieczy - "tarczy".

Detekcja cząstek

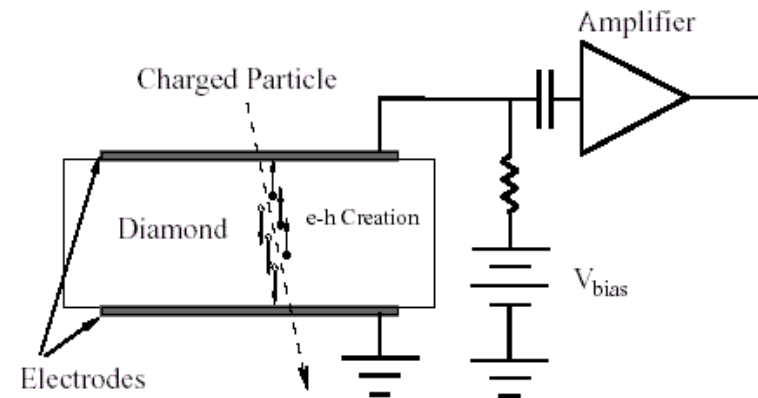
Pomiar jonizacji

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

w gazie



w półprzewodniku

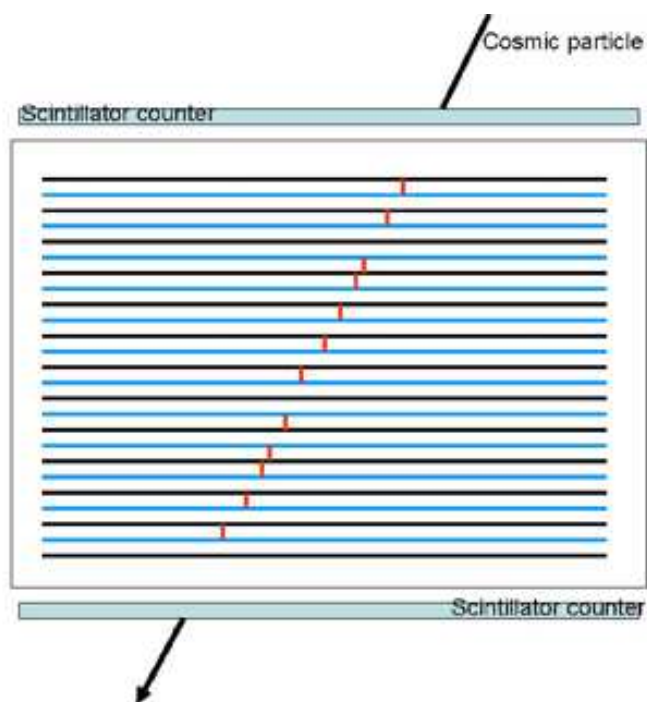


Na tej zasadzie opiera się większość współczesnych detektorów.

Detekcja cząstek

Komora iskrowa

Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



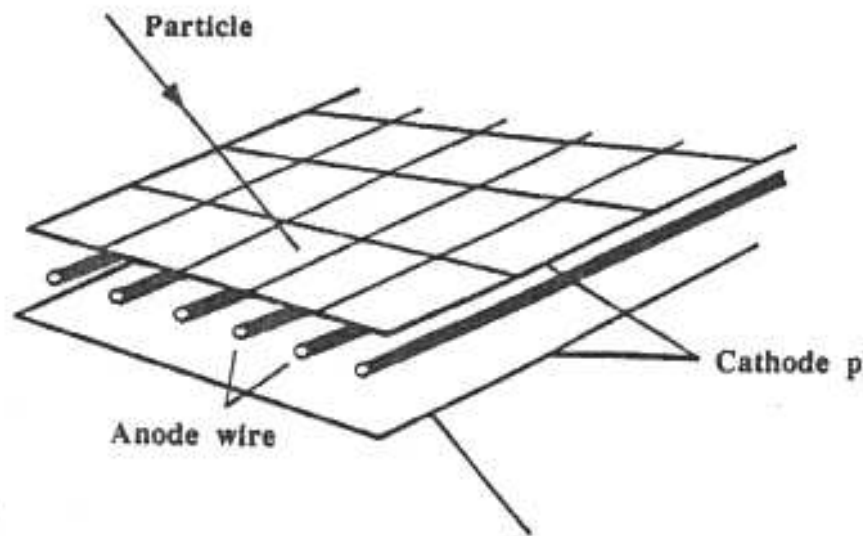
Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)



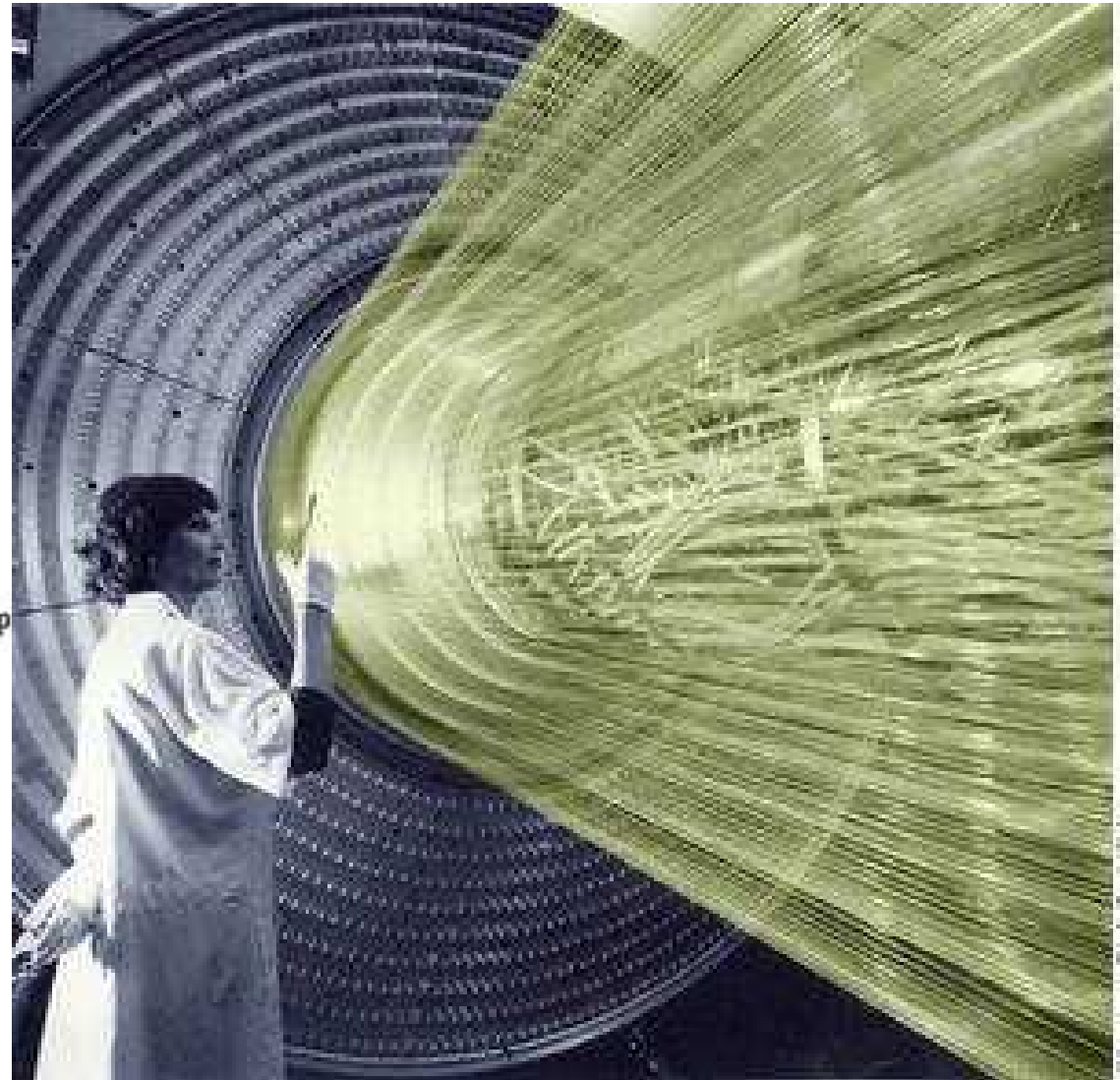
Detekcja cząstek

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



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



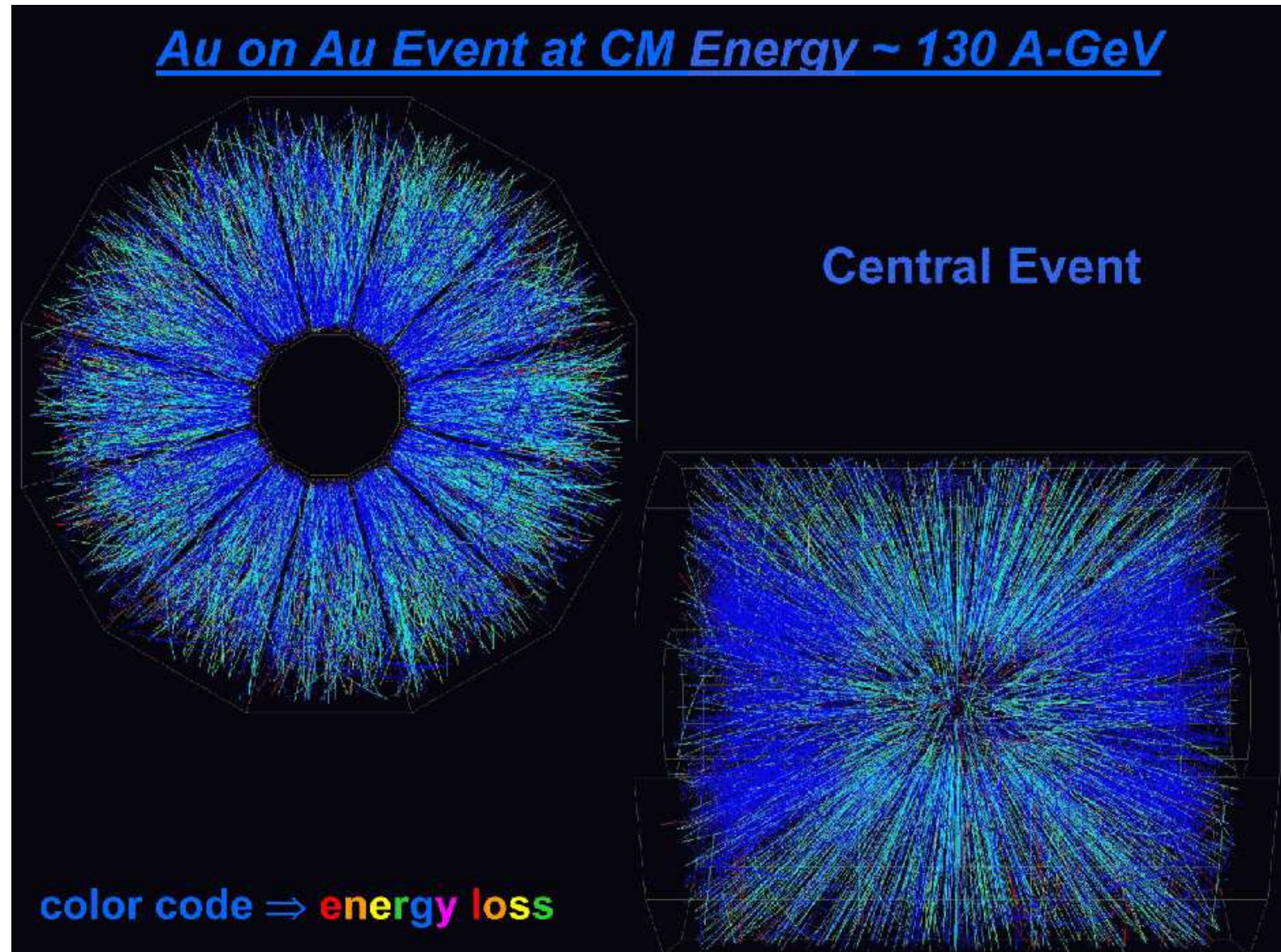
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

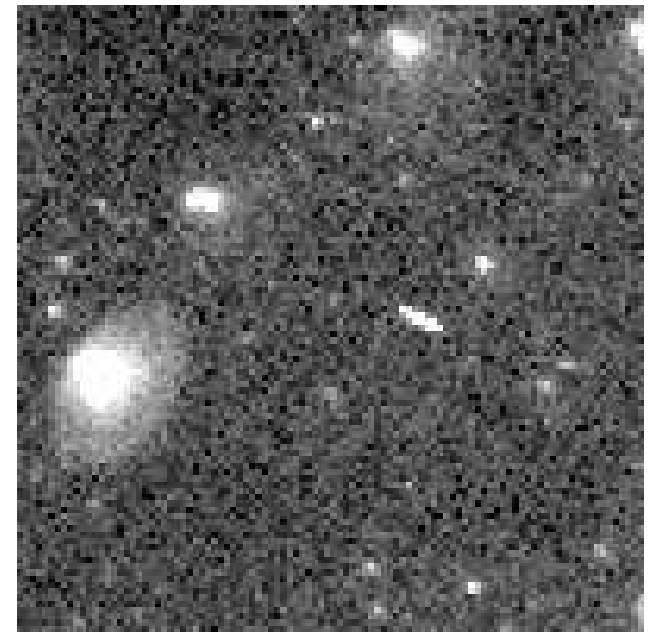
Bardzo różne technologie, m.in. CCD (używane w fotografii cyfrowej)

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



Wycinek:



To nie UFO. To ślad cząstki...

Detekcja cząstek

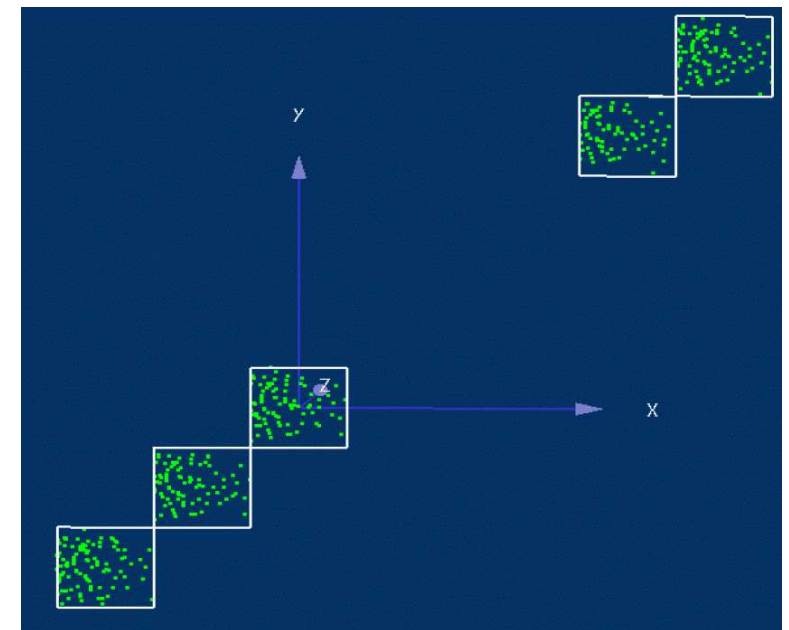
Detektory półprzewodnikowe
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar
pozycji cząstek (rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek
przez pięć warstw "teleskopu":



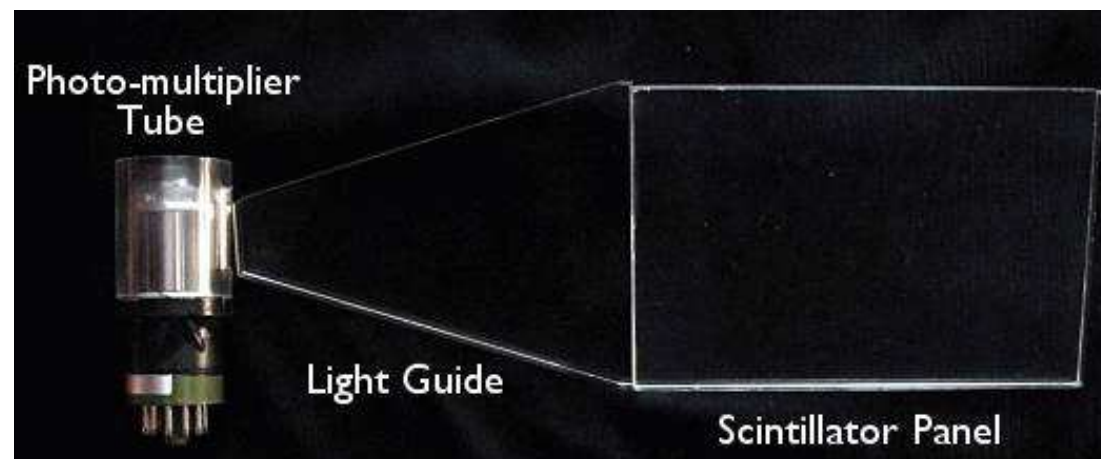
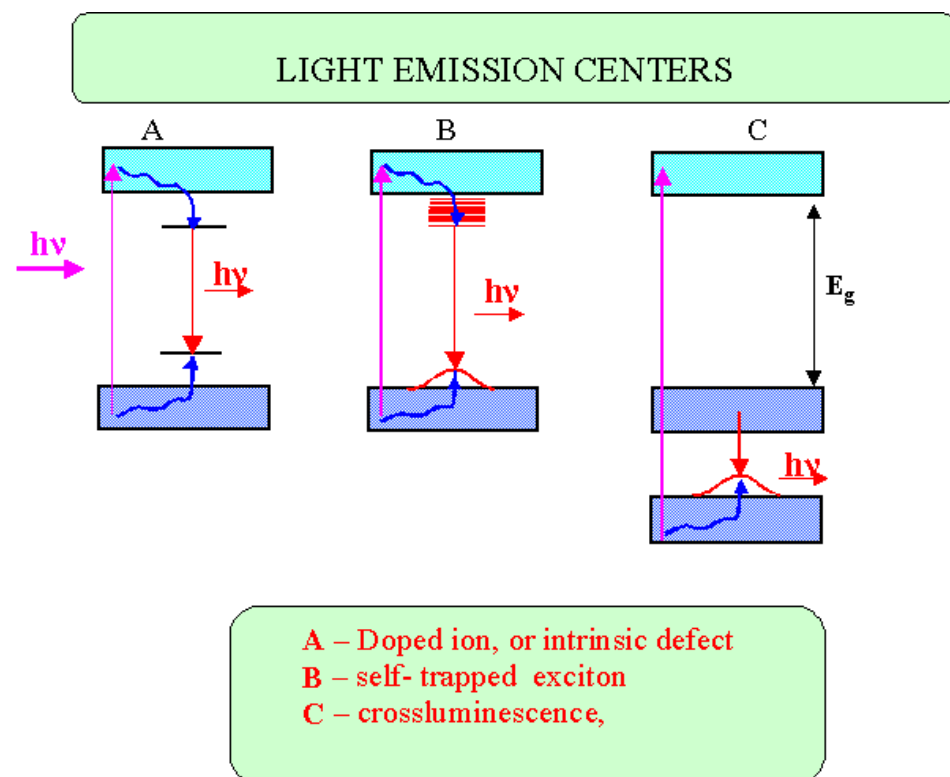
Mierzając pozycje w wielu warstwach możemy zrekonstruować tor.

Detekcja cząstek

Scyntylacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza

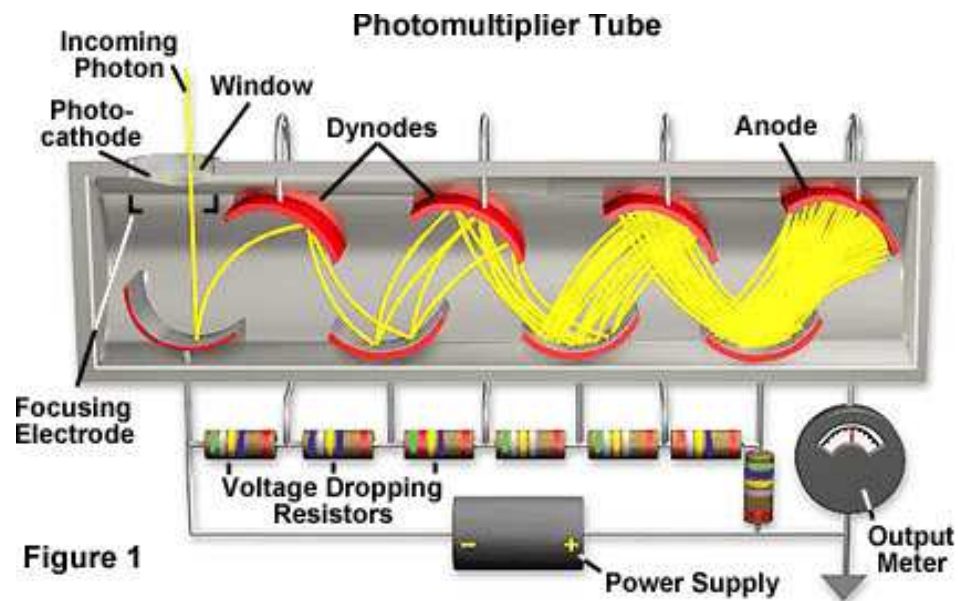


Brak pomiaru pozycji
Bardzo dobry pomiar czasu
przejścia cząstki

Detekcja cząstek

Fotopowielacz

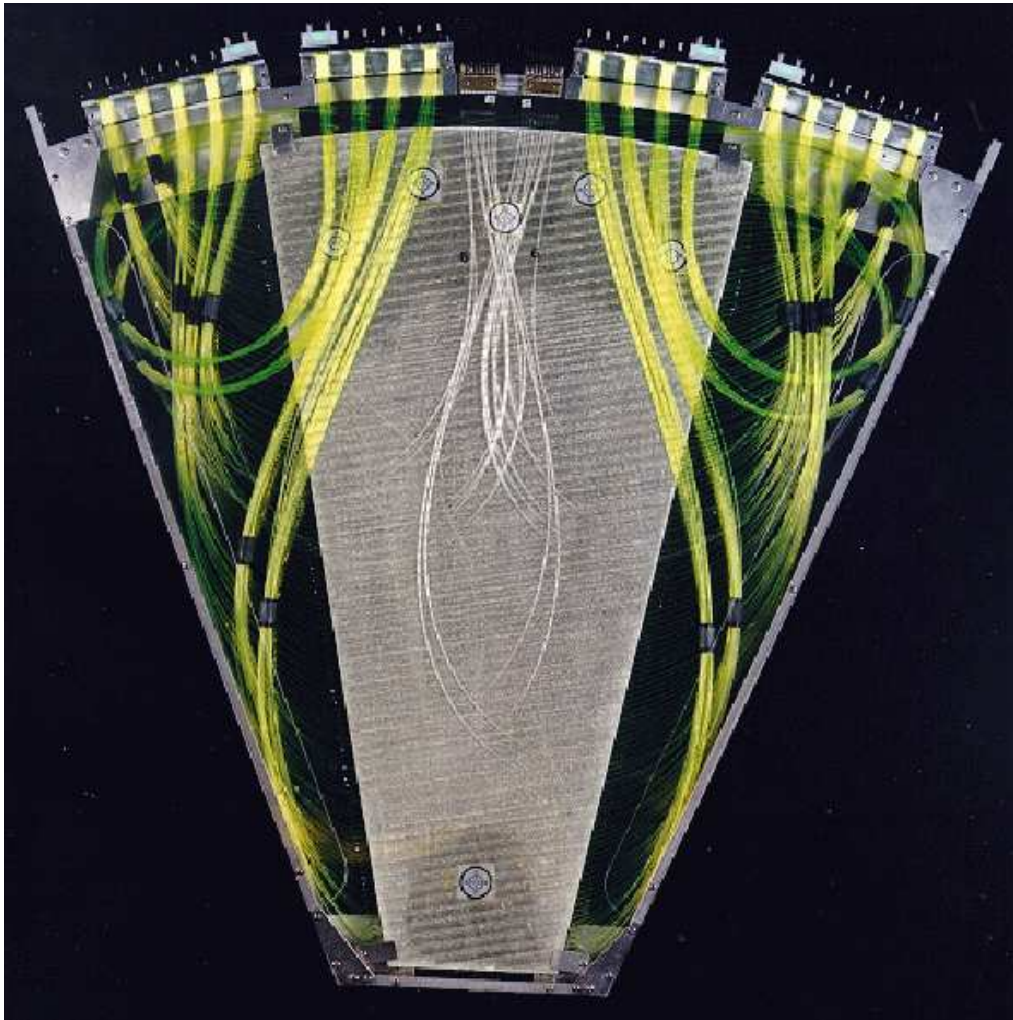
Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek.



Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detekcja cząstek

Detektory scyntylacyjne

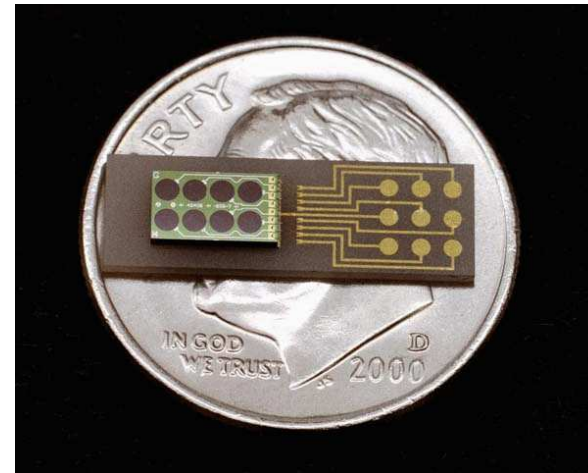


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

← włókna scyntylujące,

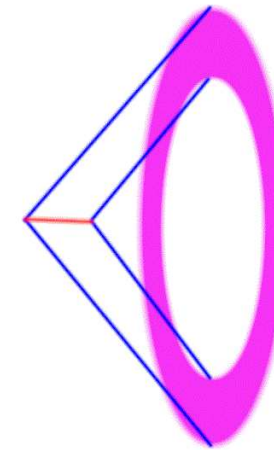
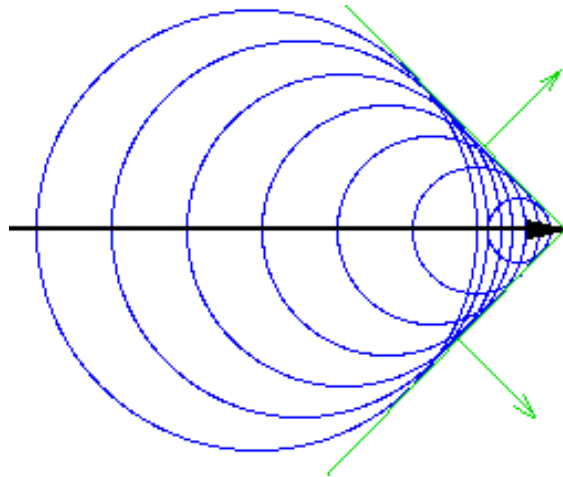
⇓ fotopowielacze krzemowe.



Detekcja cząstek

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!

Współczesne eksperymenty

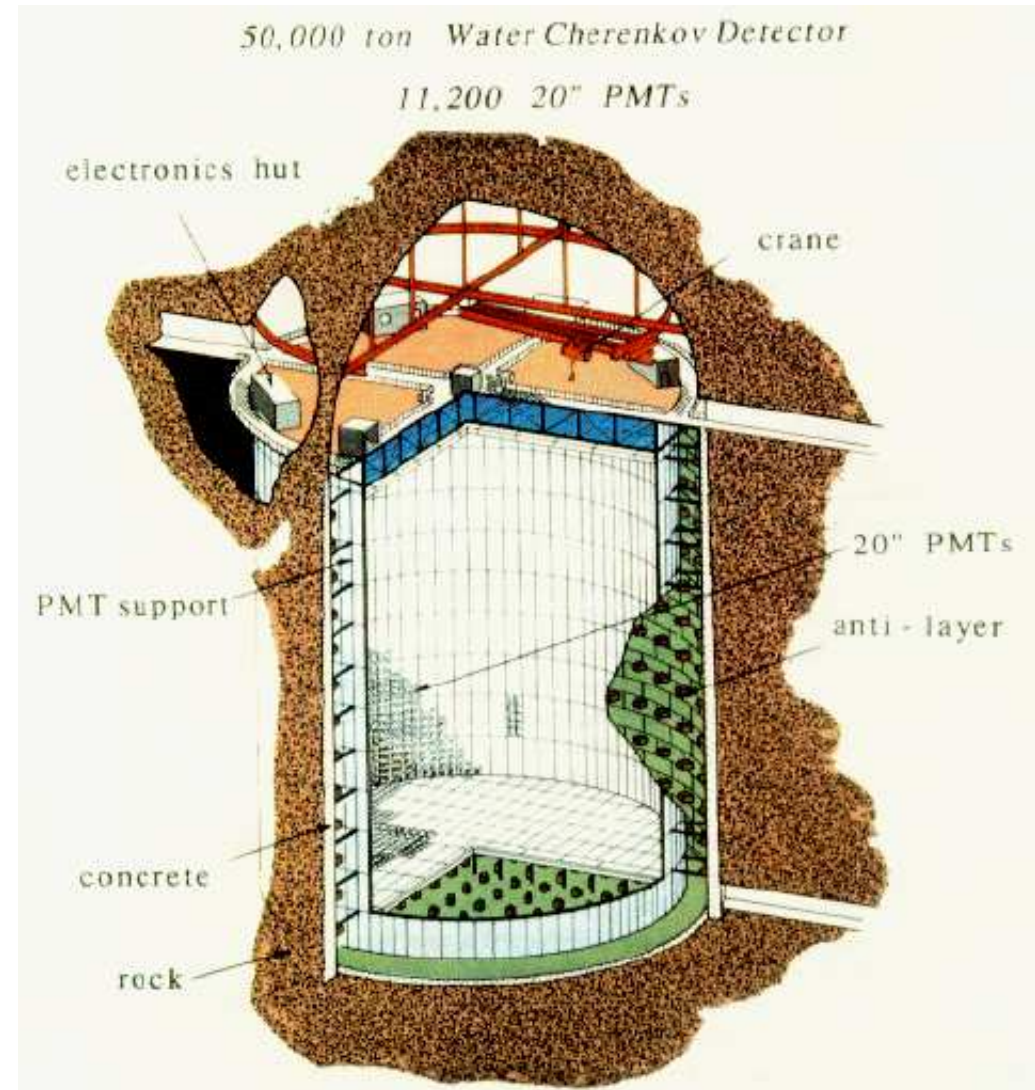
Super-Kamiokande

eksperyment neutrinowy

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

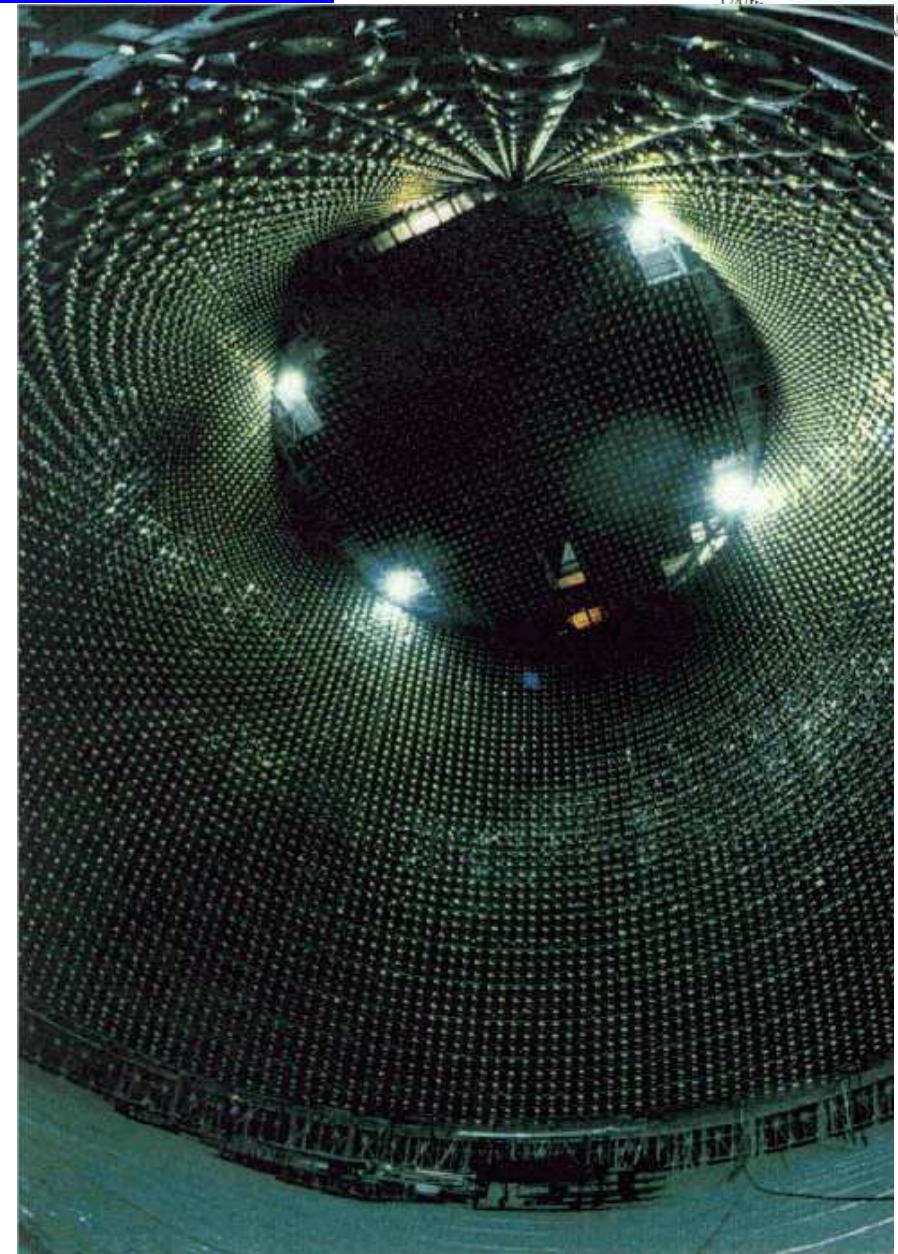
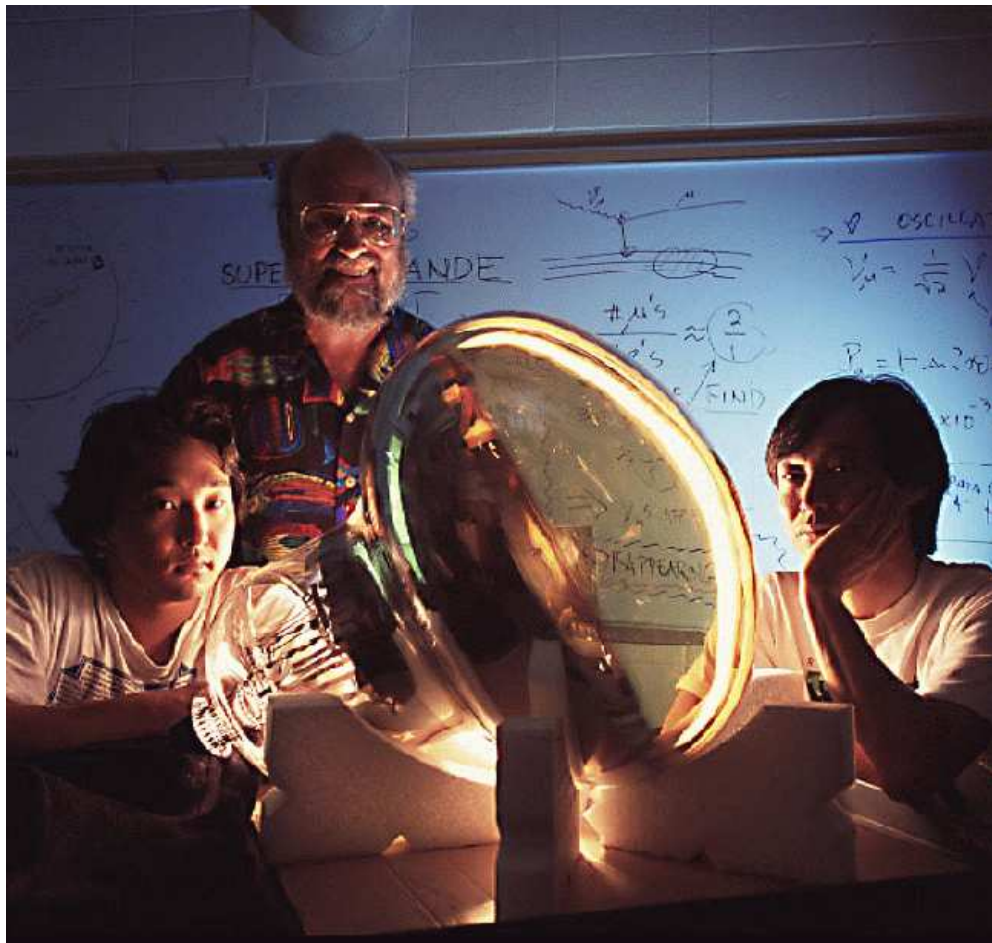
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

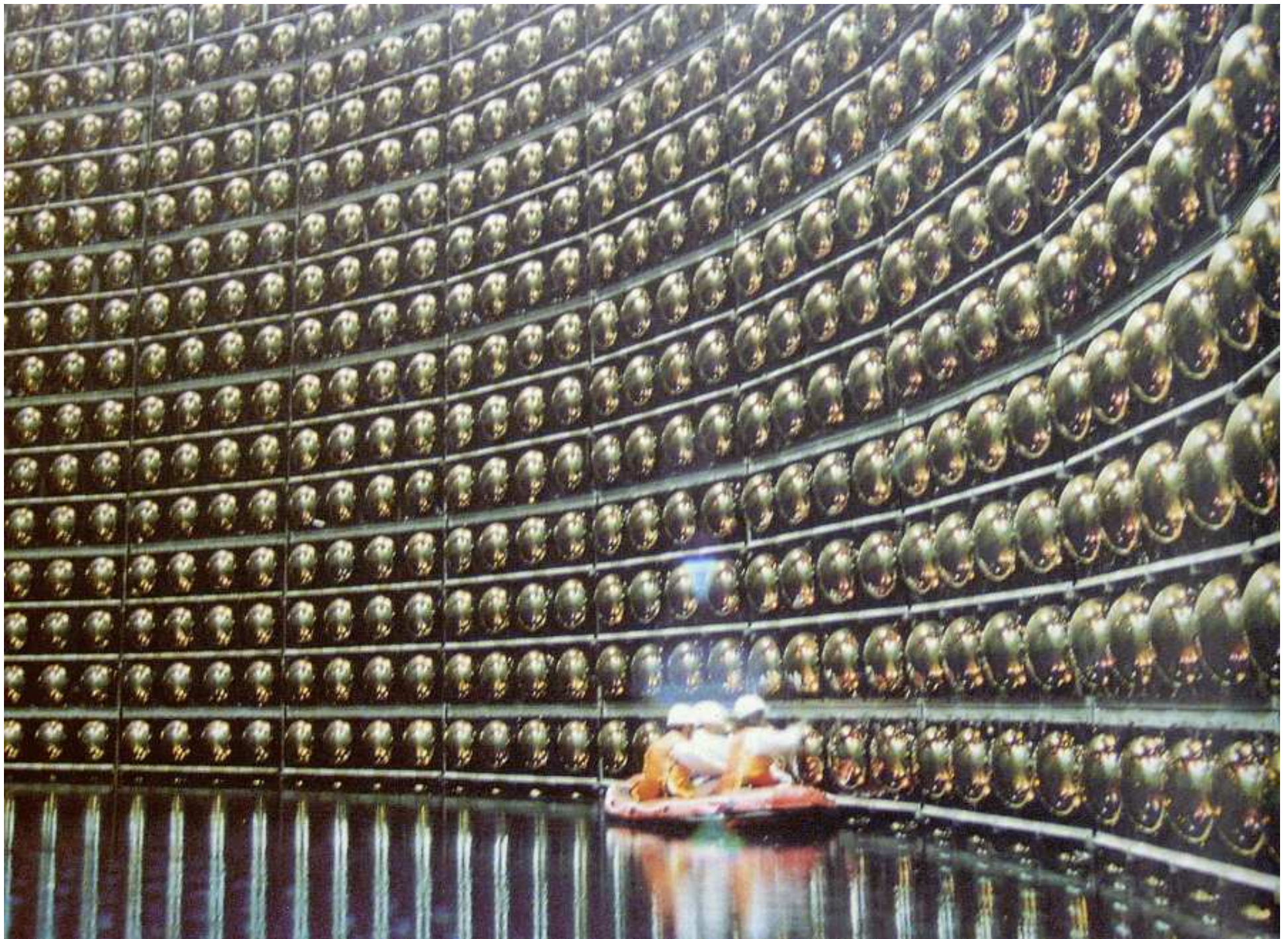
rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



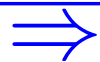
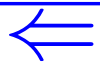
Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande





17
4



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande

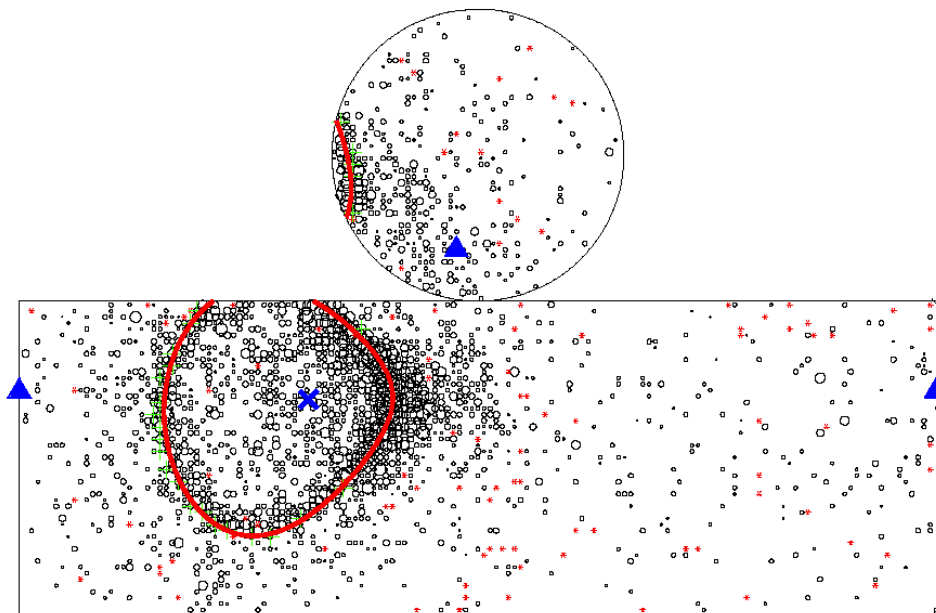
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

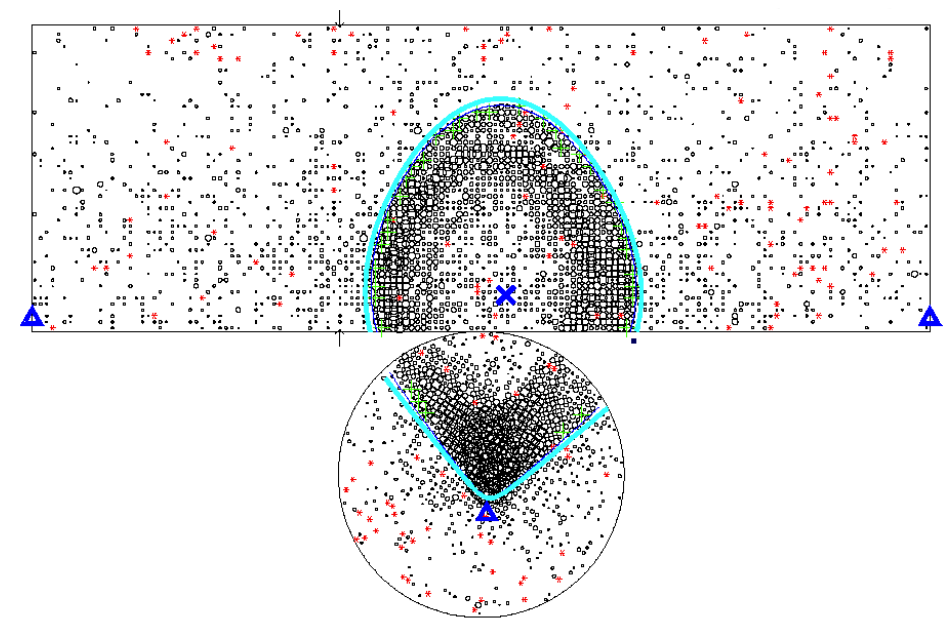


Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

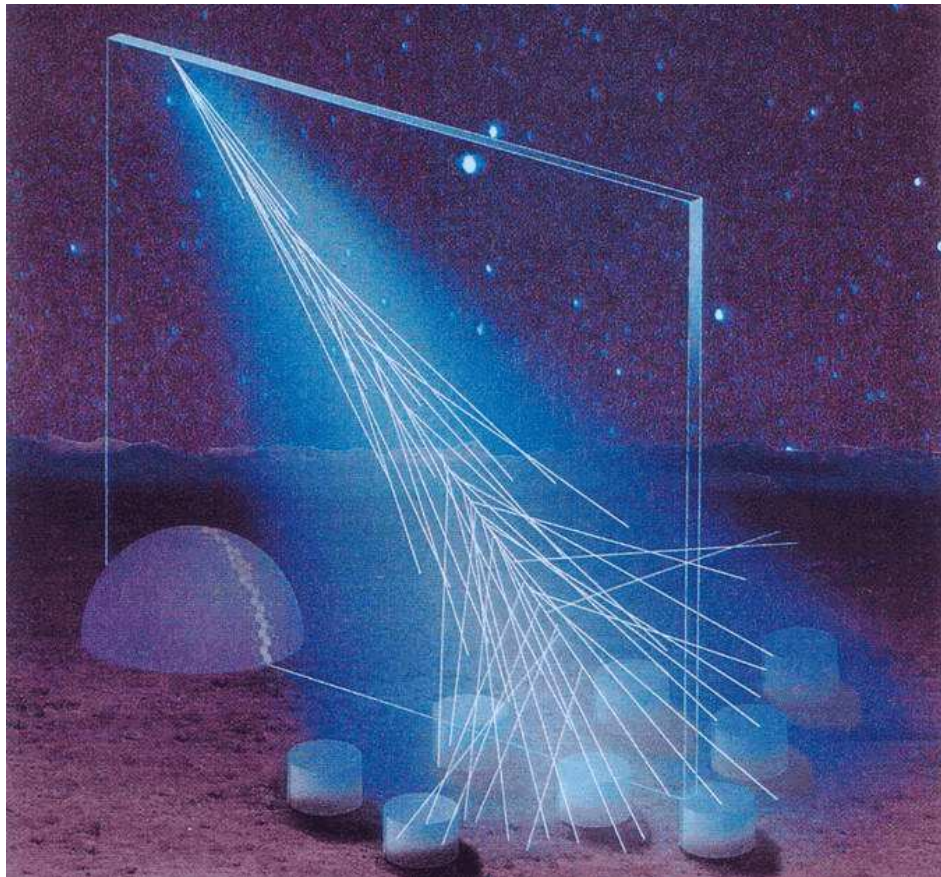
“gruby” pierścień.



Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Obserwacja wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego.

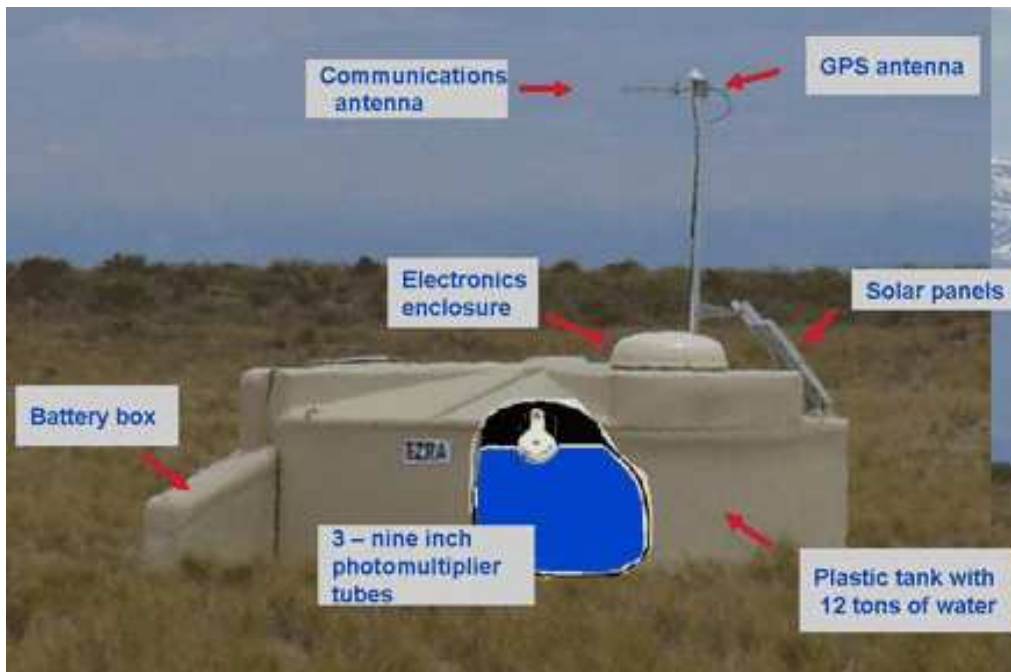


Scyntyllacja w powietrzu.
Promieniowanie Czerenkowa w
detektorach na powierzchni.

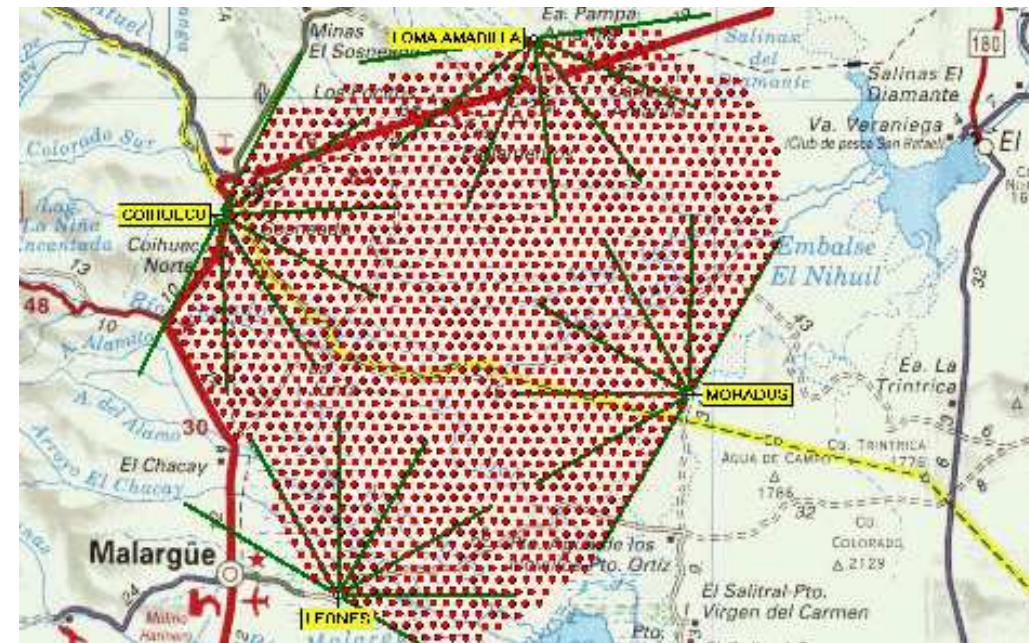
Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Detektor powierzchniowy



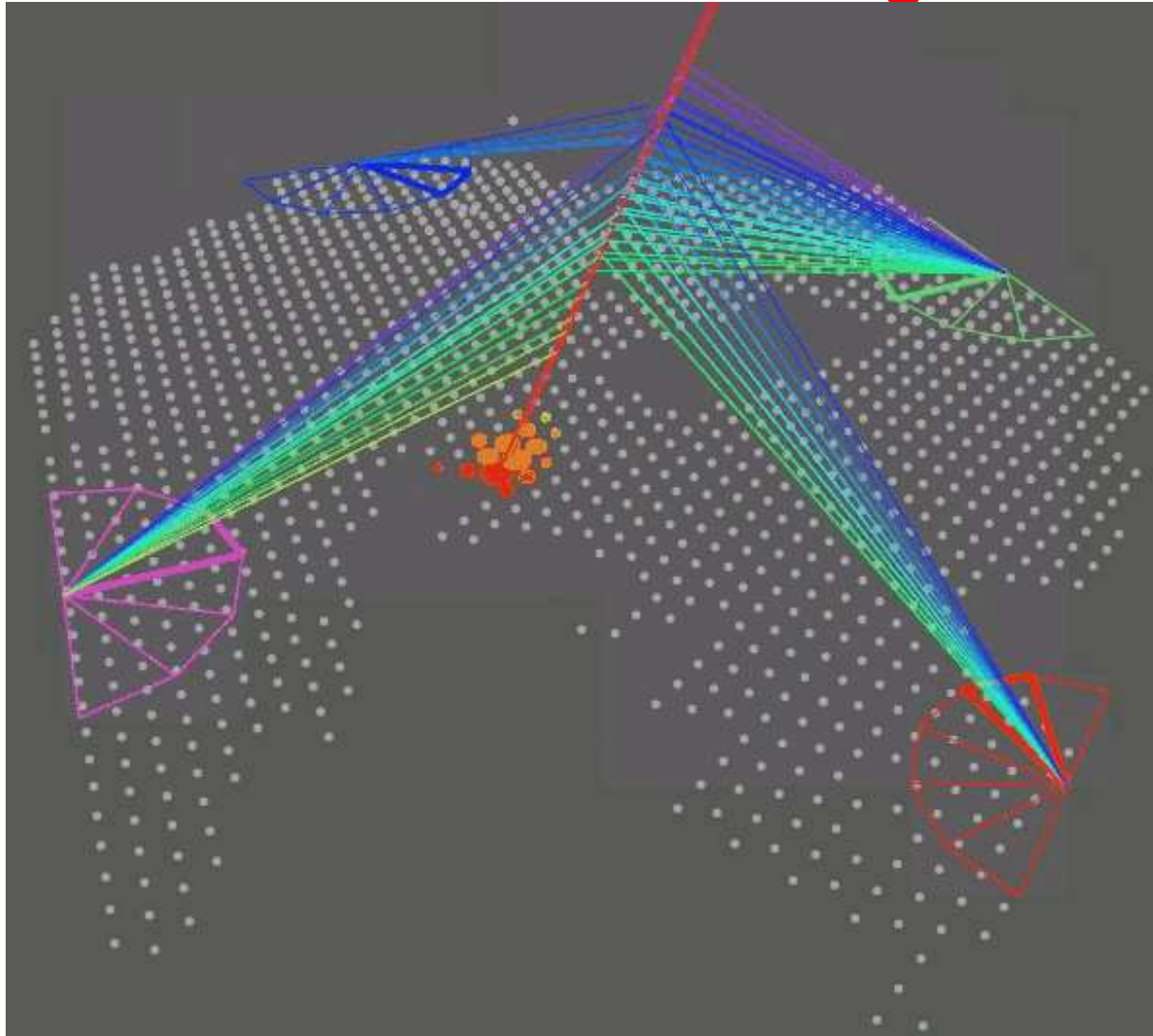
Mapa obserwatorium:



4 stacje po 6 teleskopów obserwujących świecenie w atmosferze (UV)
1600 detektorów powierzchniowych rozstawionych na 3000 km² !!!

Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger



Schemat obserwacji
"pęku atmosferycznego":
4 "zdjęcia" z teleskopów
+ "ślady" na powierzchni

Detekcja cząstek

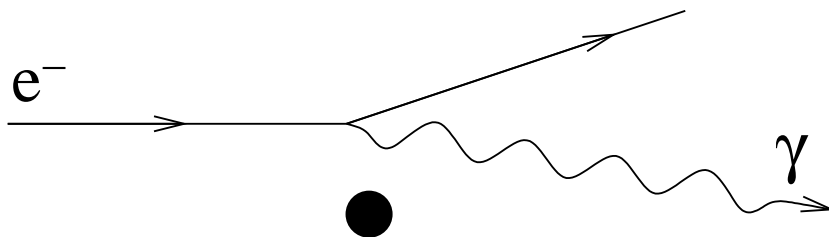
Kalorymetry

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

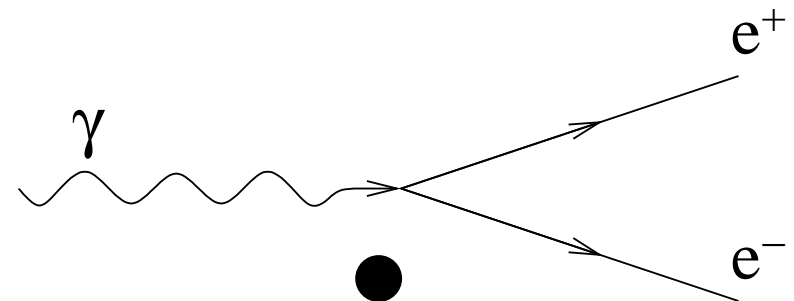
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi.

Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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



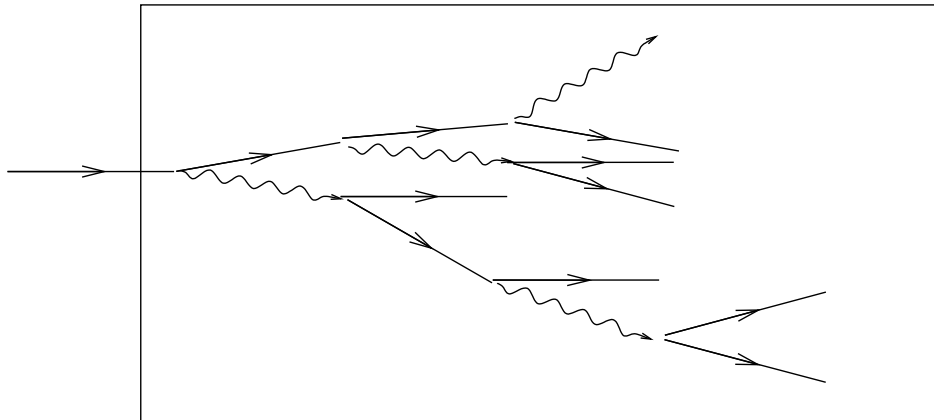
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

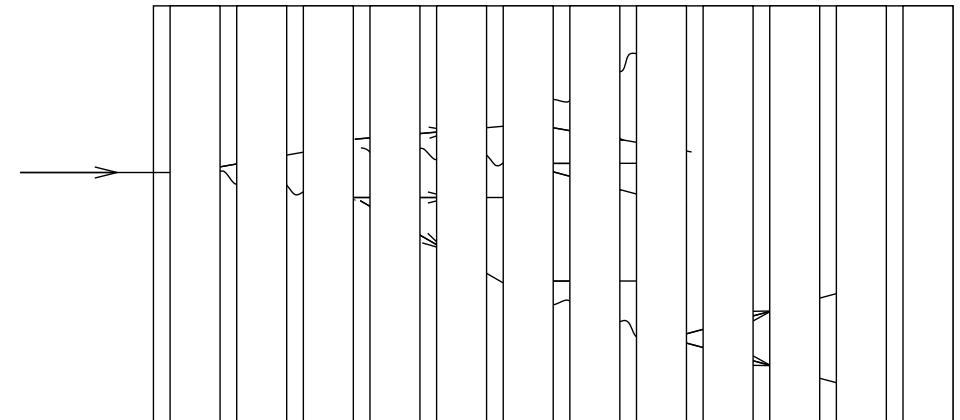
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowaną jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylicatora

Kalorymetr próbkujący

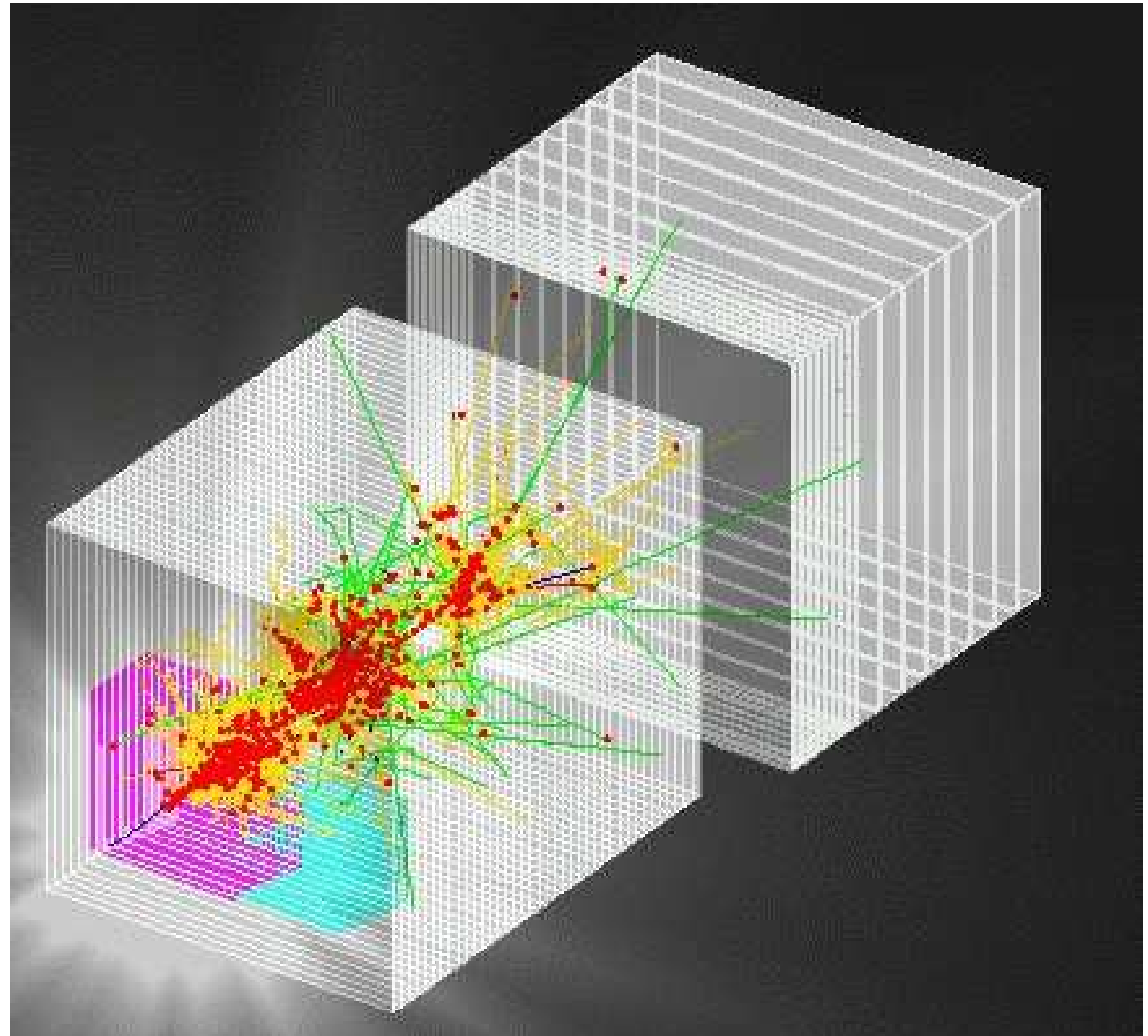


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

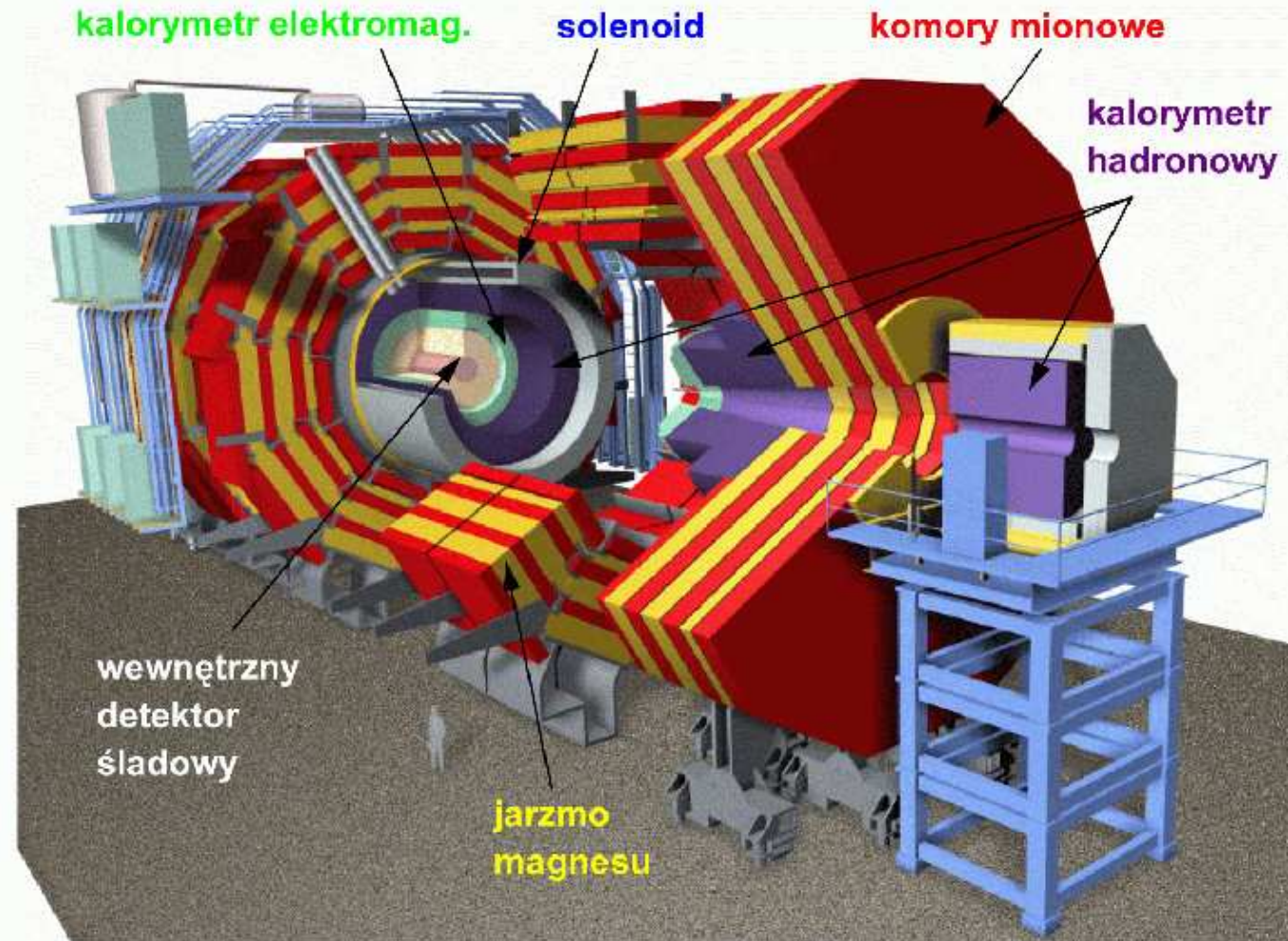
Kalorymetry

Symulacja rozwoju
 kaskady hadronowej
 (pomiar energii protonu)

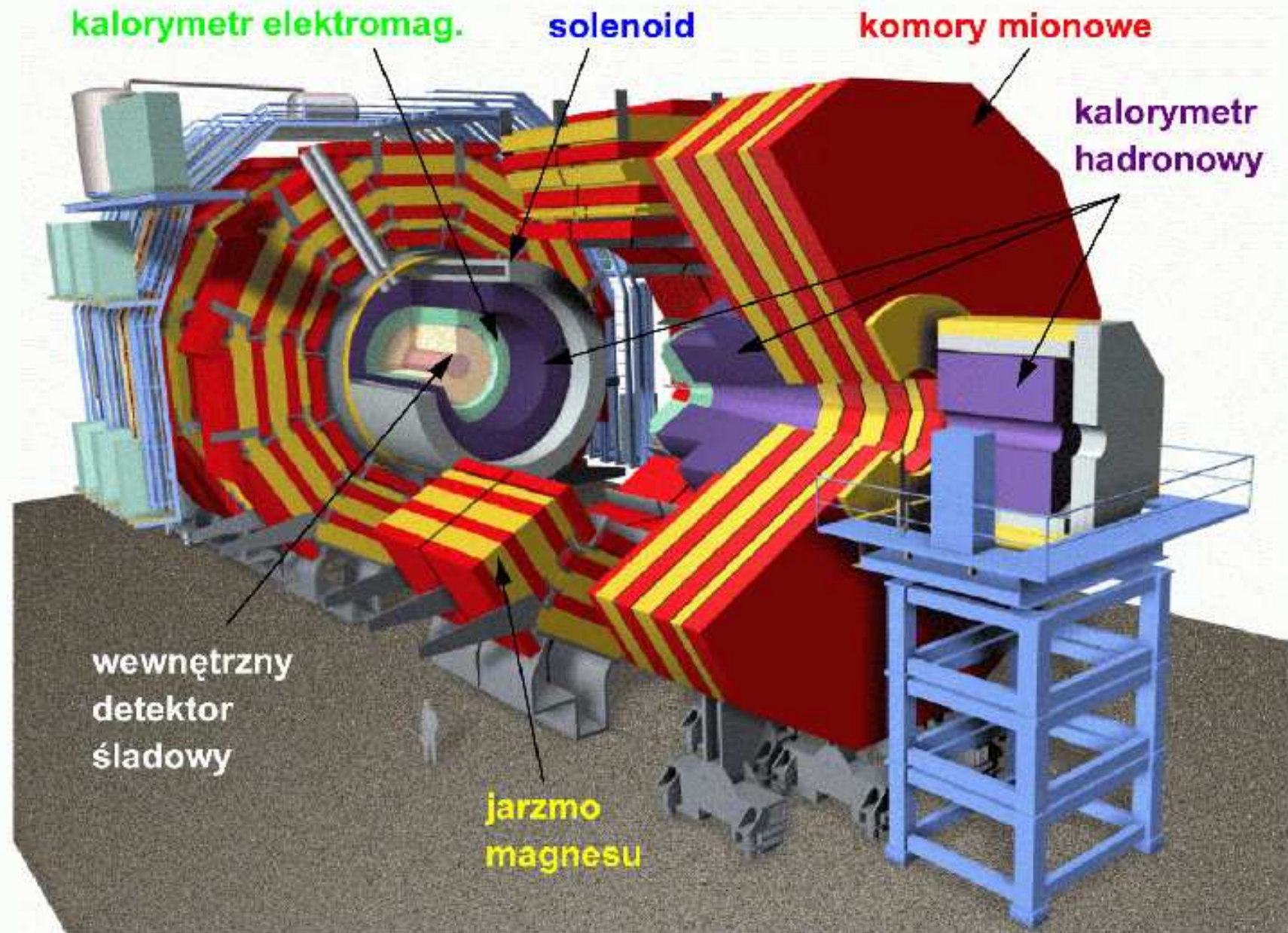


Detektor przy LHC

Compact Muon Solenoid



Compact Muon Solenoid

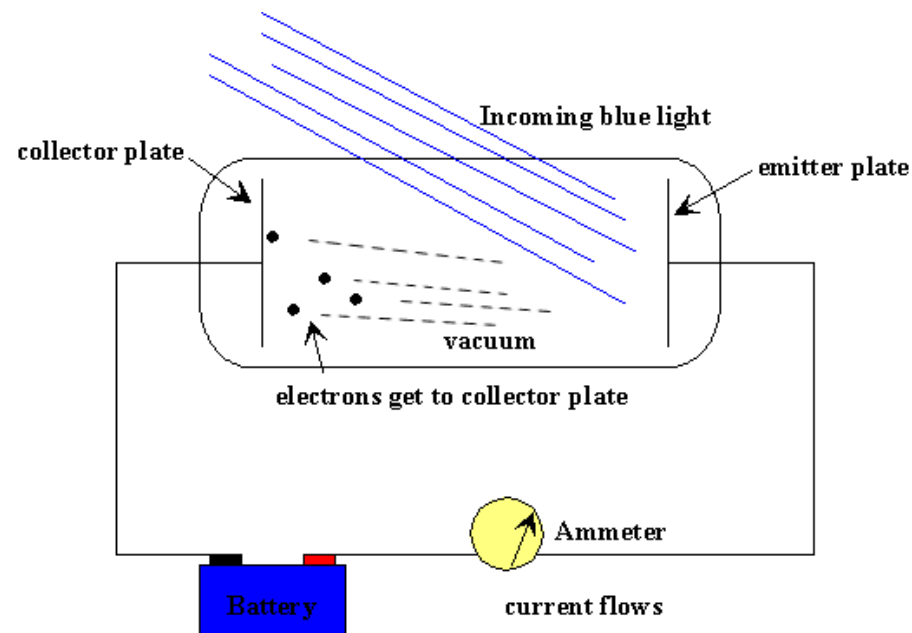


Cząstki i fale

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887

W 1902 Philipp Lenard pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:

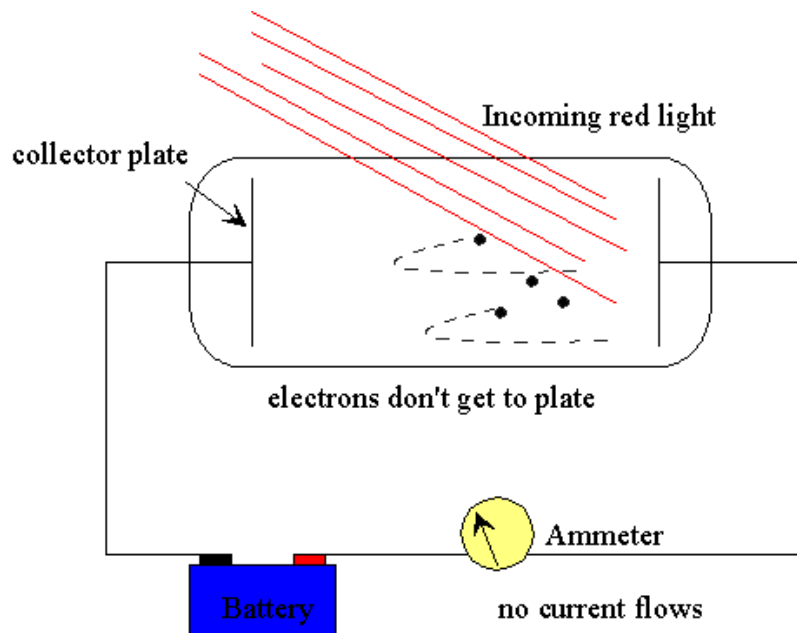


Cząstki i fale

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887

W 1902 Philipp Lenard pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



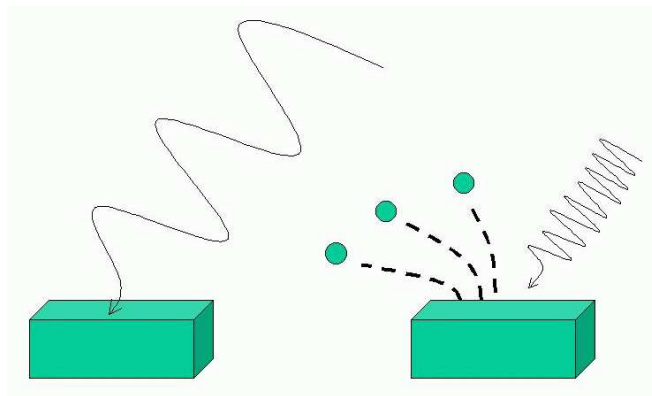
Efektu tego nie można było wytłumaczyć w parciu o falową teorię światła

Cząstki i fale

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

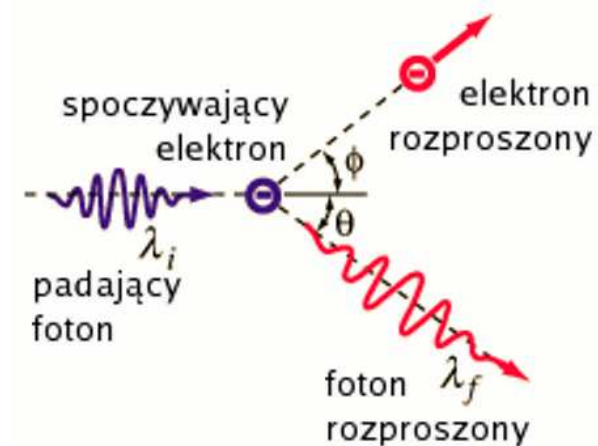


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

Rozpraszanie Comptona

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



Cząstki i fale

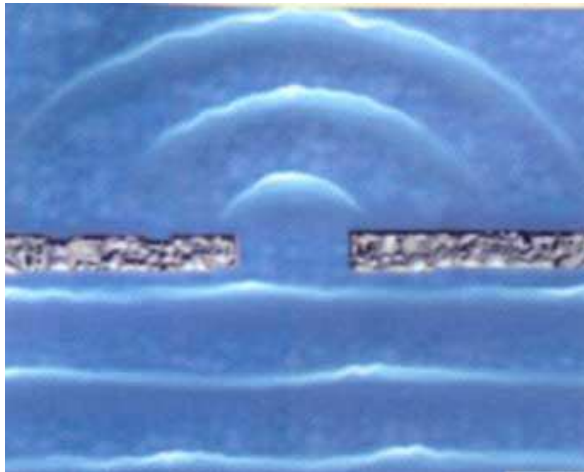
Fotony mają określoną energię i pęd - jak inne cząstki.

Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.

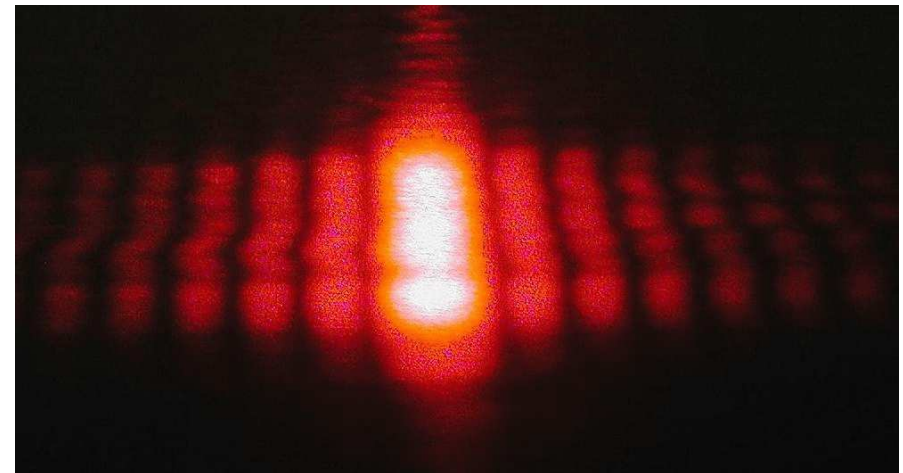
Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



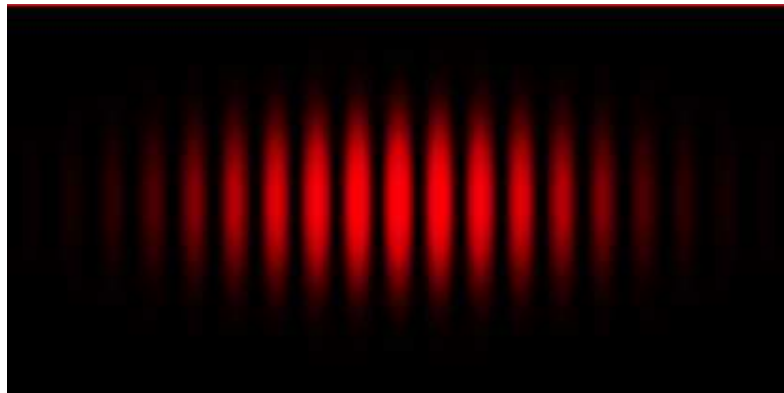
Światło



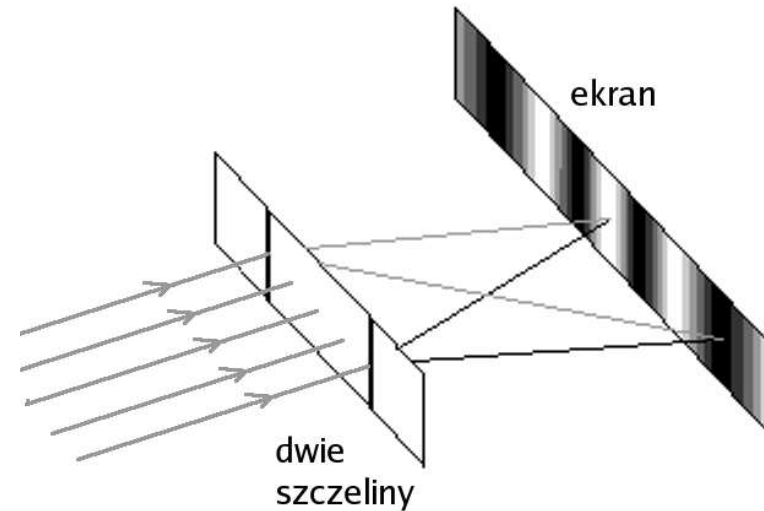
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



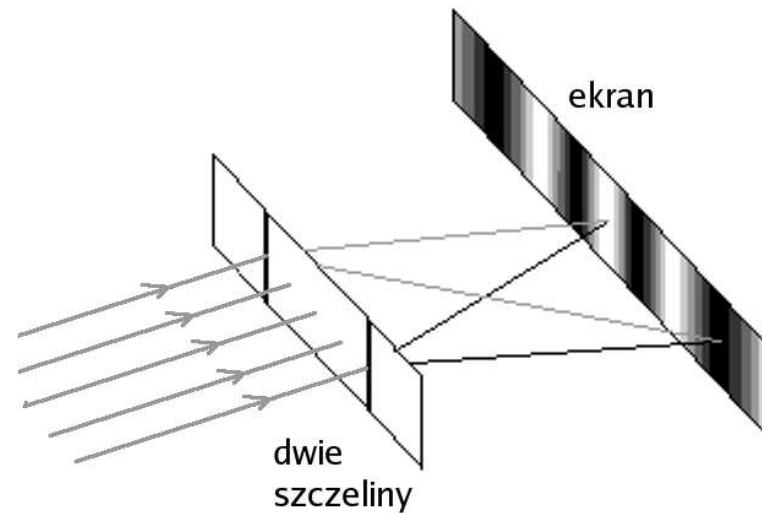
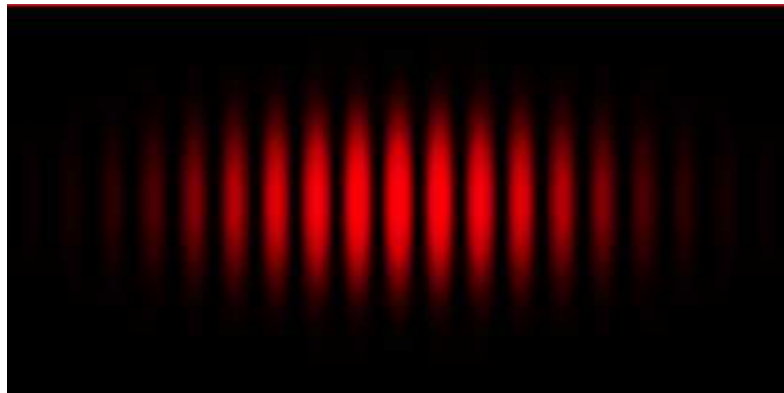
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**



Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



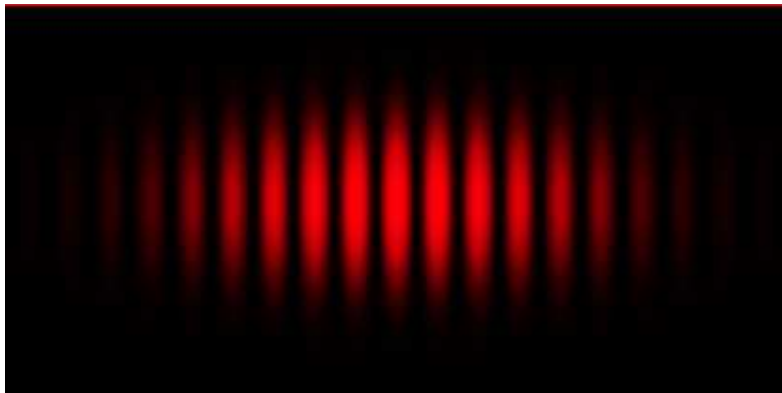
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

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

Cząstki i fale

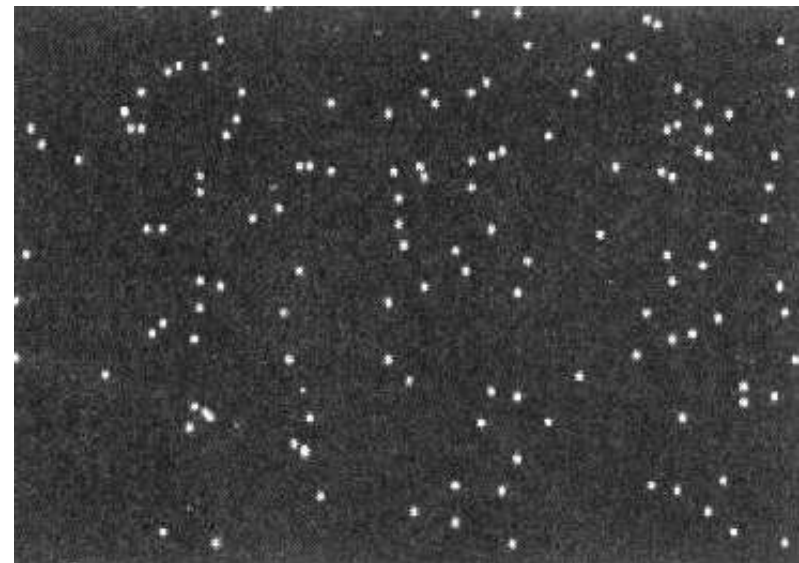
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

Elektrony

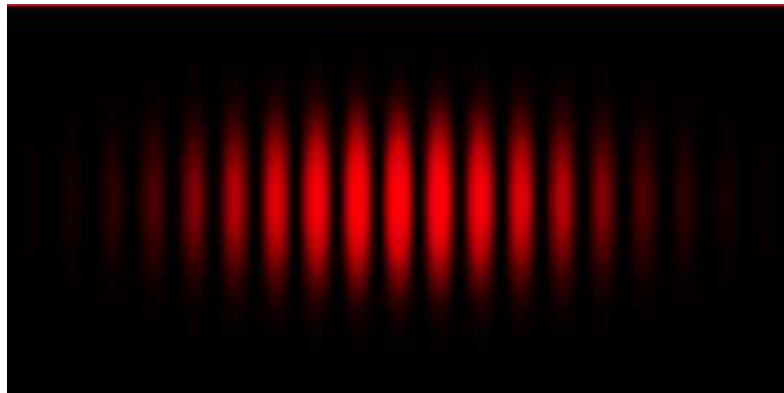


100 elektronów
rozkład przypadkowy ?

Cząstki i fale

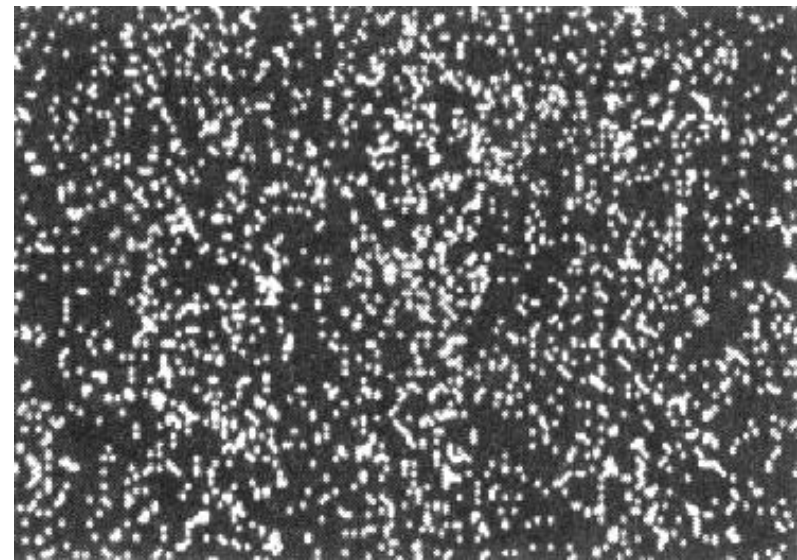
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

Elektrony

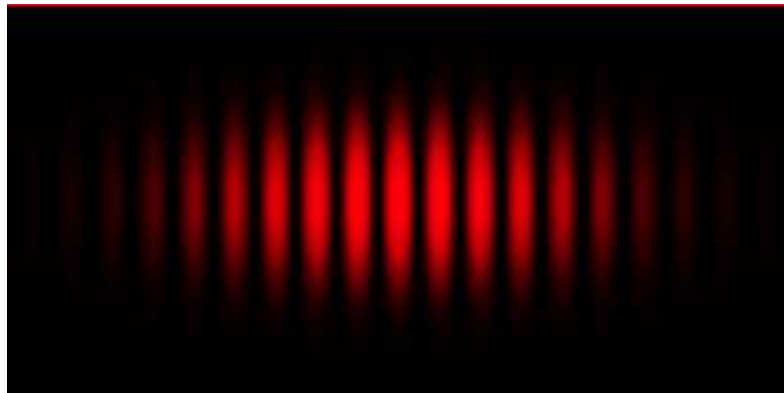


3000 elektronów

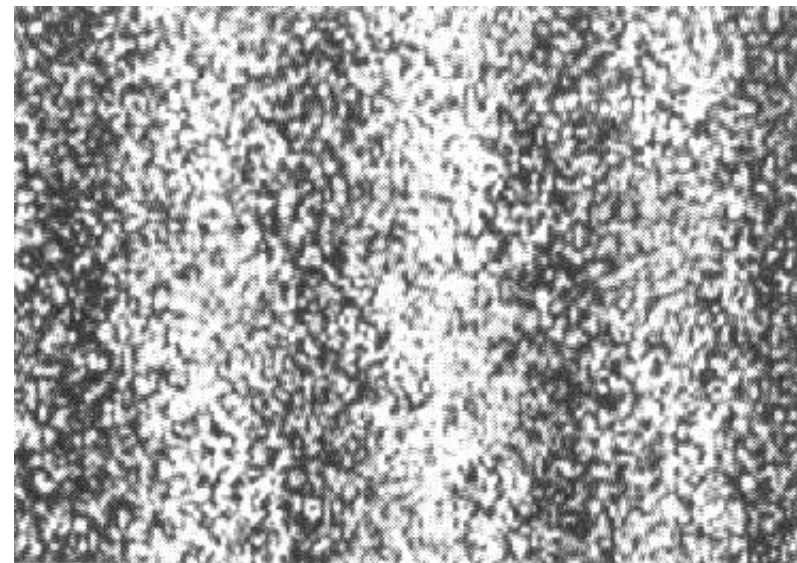
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

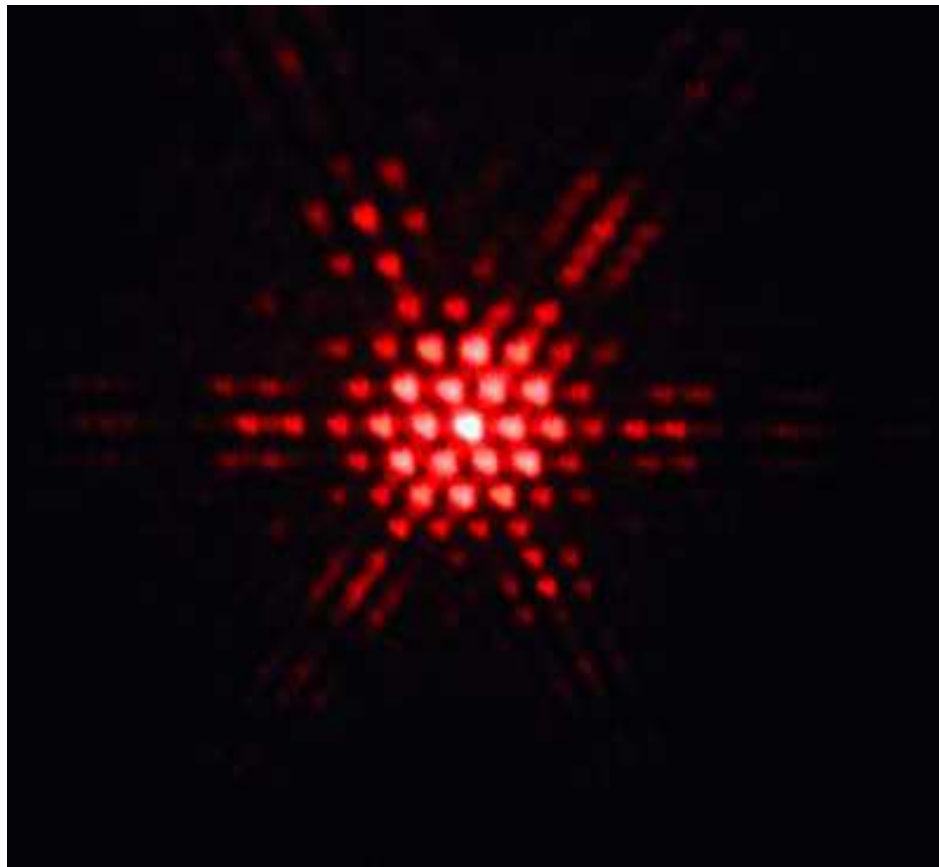
70000 elektronów

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

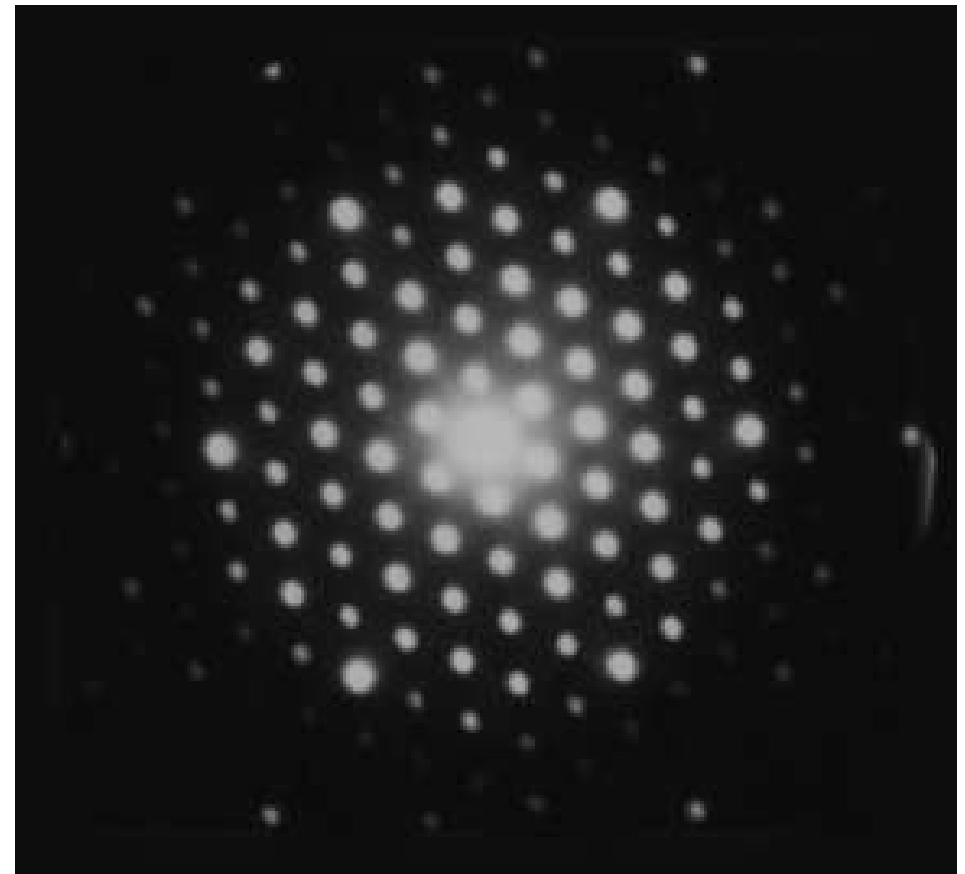
Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło



Elektrony

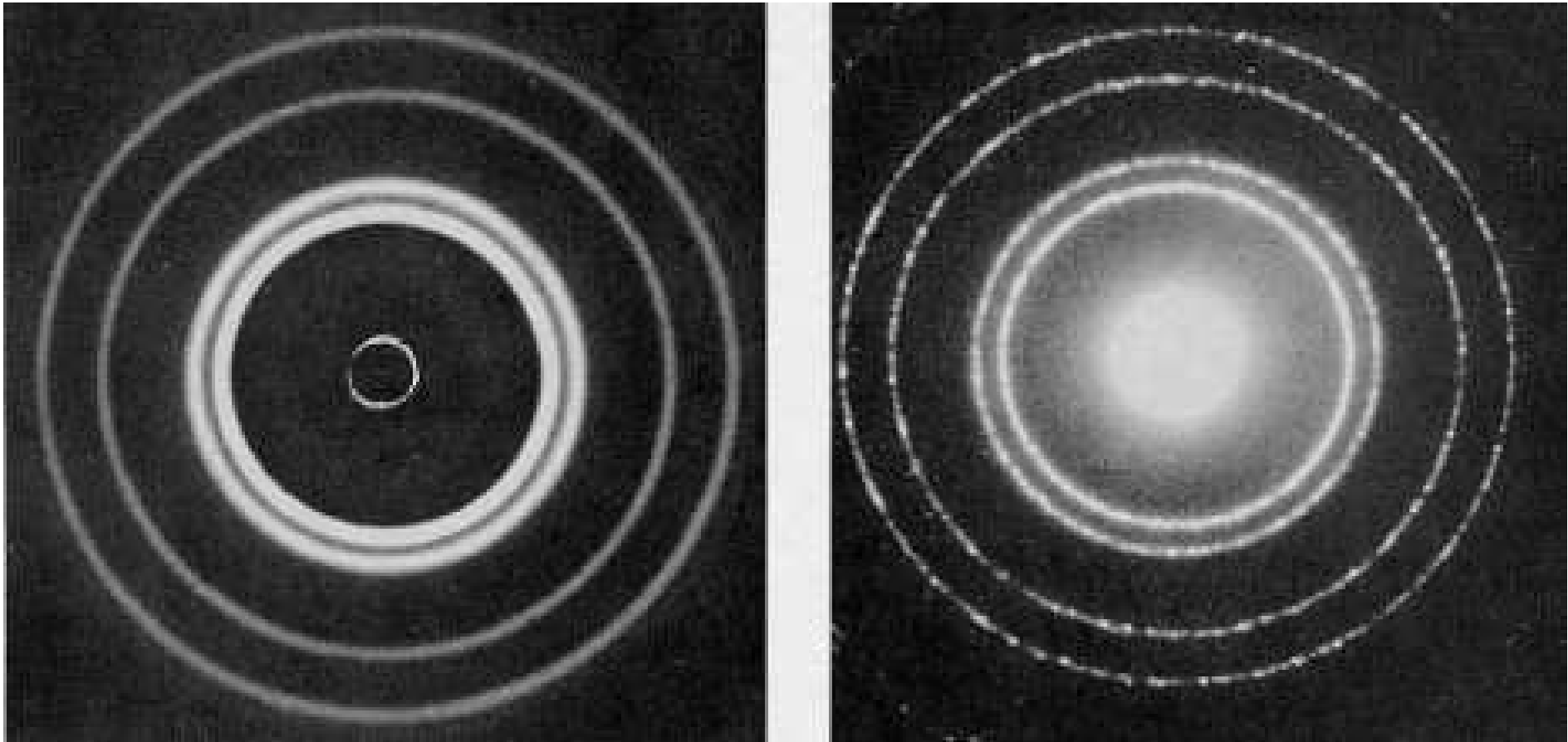


Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



Cząstki i fale

Mechanika Newtona

Klasyczne **równania ruchu** pozwalają na ścisłe wyznaczenie zależności położenia ciała od czasu: $\vec{r}(t)$.

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**.

Cząstki i fale

Mechanika Newtona

Klasyczne **równania ruchu** pozwalają na ścisłe wyznaczenie zależności położenia ciała od czasu: $\vec{r}(t)$.

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...

Zdarzenia

Podjęcie statystyczne

Nasze urządzenia pomiarowe są makroskopowe - musimy z obserwacji makroskopowych wydobywać informacje co się dzieje na poziomie cząstek.

W doświadczeniach z cząstkami el. mamy do czynienia ze **zdarzeniami** (**przypadkami**) - nie możemy przewidzieć ani kontrolować precyzyjnie pojedynczych zderzeń cząstek, wszystko ma charakter przypadkowy.

Musimy mieć **dużą statystykę** zdarzeń (**czasami miliony, a nawet setki milionów przypadków**), aby móc badać i opisywać zachowanie cząstek.

Zdarzenia

Podójście statystyczne

Także rozpady cząstek elementarnych (nawet tych fundamentalnych) są nieprzewidywalne (kiedy i jak zajdą).

Np. neutron żyje średnio około 10 min - rozpada się na proton, elektron i neutrino elektronowe (w jądrze at. jest stabilny)

W opisie kwantowym - precyzyjny opis średnich wielkości, ale nic nie można powiedzieć o szansie indywidualnego zdarzenia

Znikanie cząstek ale też ich powstawanie - to obserwuje się w doświadczeniach przy akceleratorach. Musimy zebrać **dużo przypadków**, aby dobrze mierzyć **rozkłady** różnych wielkości
⇒ wnioskować o teorii