

Wszechświat cząstek elementarnych

Detekcja cząstek

Wykład Ogólnouniwersytecki
Wydział Fizyki U.W.



prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych, Instytut Fizyki Doświadczalnej

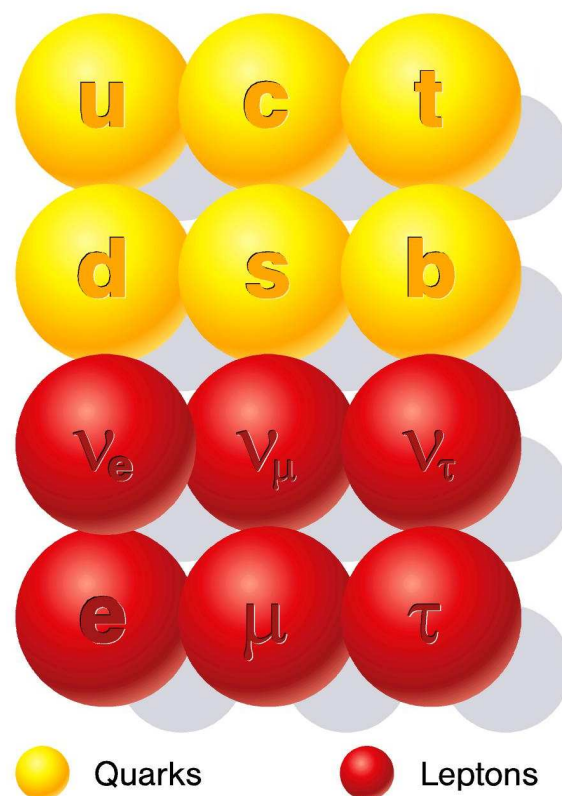
Detekcja cząstek

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

Cząstki fundamentalne

Przypomnienie

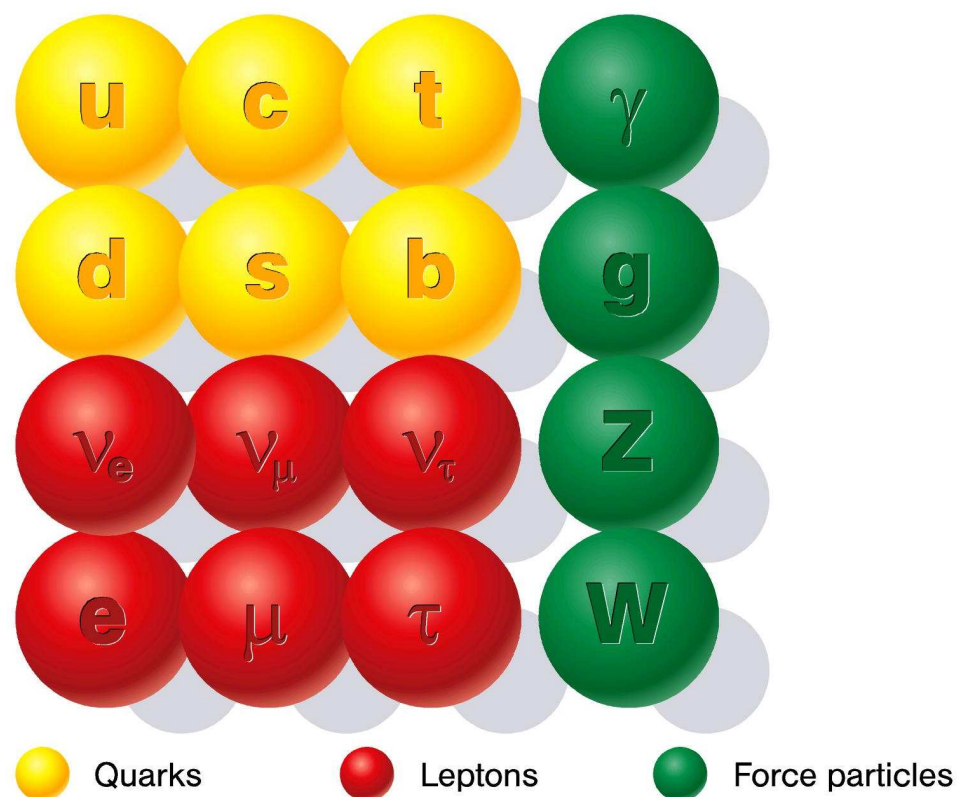
- cząstki materii
kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

Przypomnienie

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

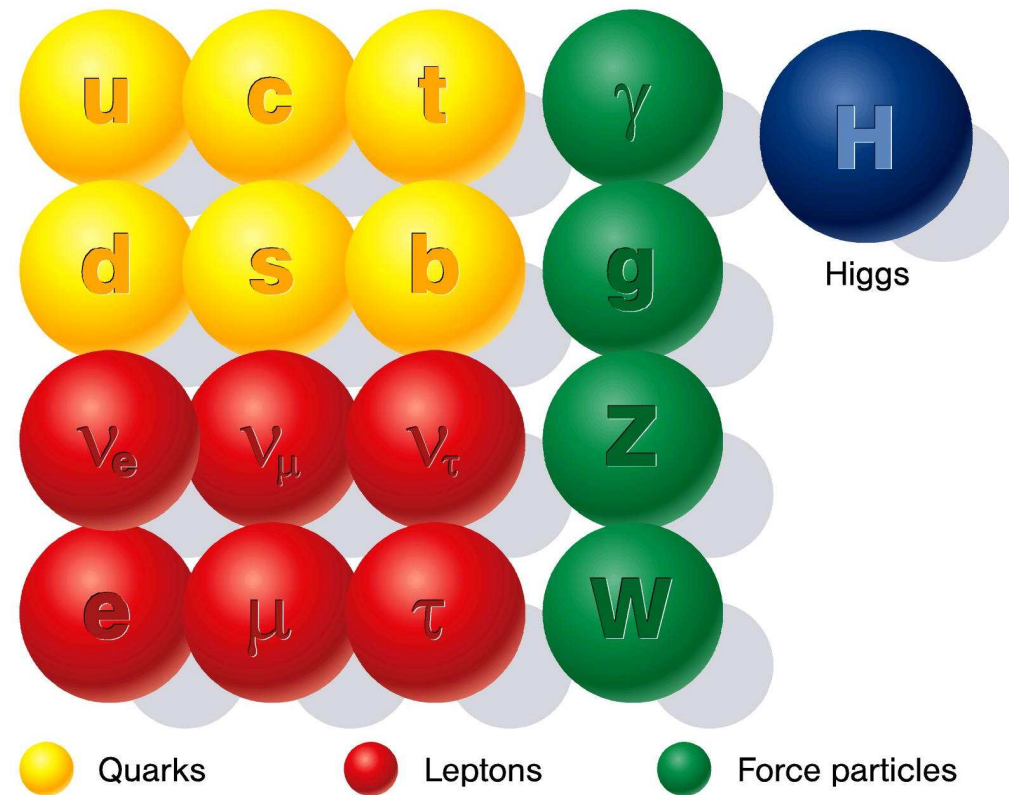


Cząstki fundamentalne

Przypomnienie

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

Będziemy to jeszcze
szczegółowo omawiać...

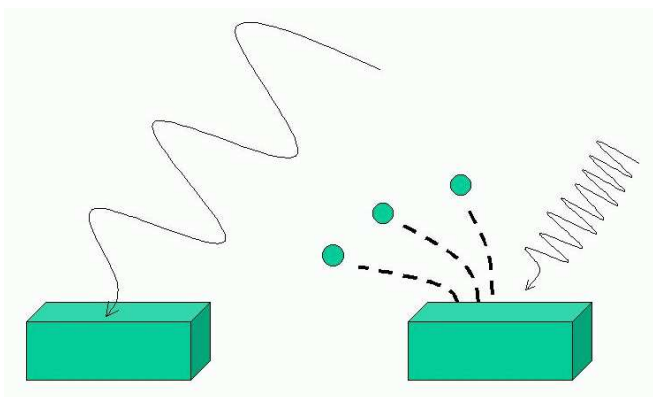


Cząstki i fale

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

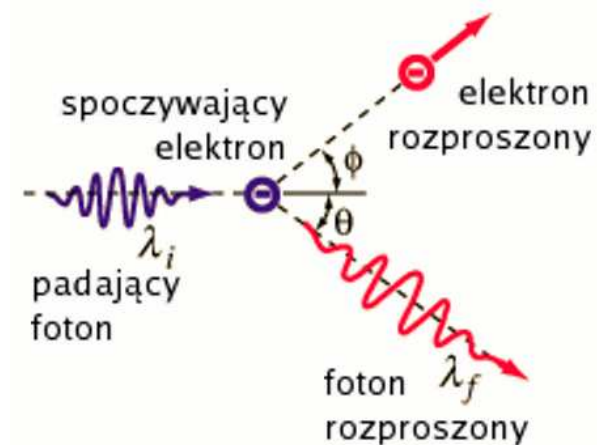


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

Rozpraszanie Comptona

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

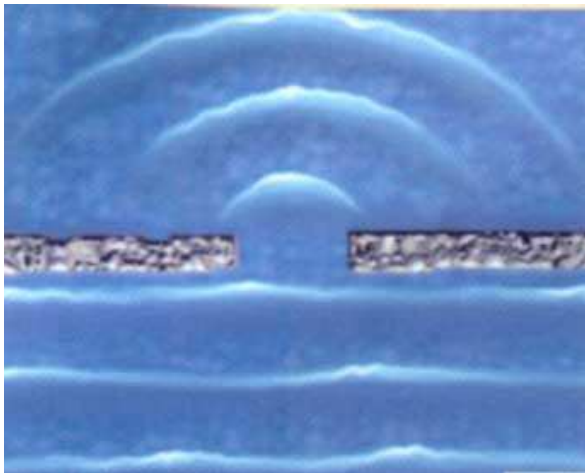


Cząstki i fale

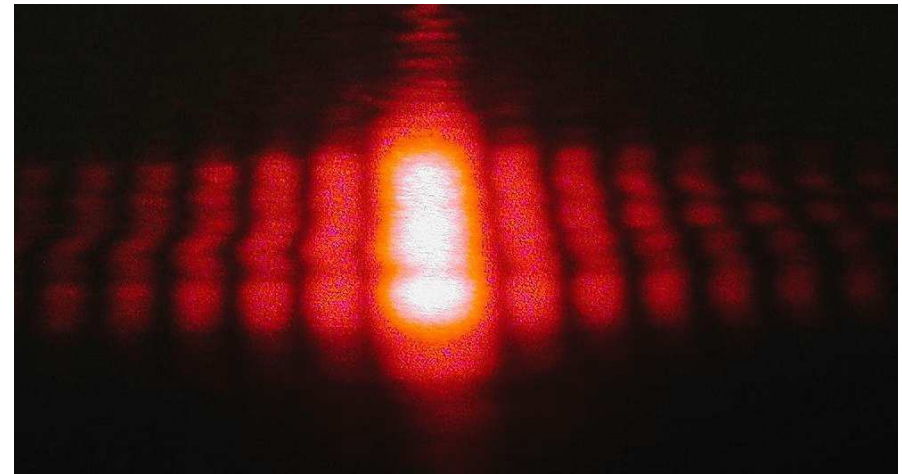
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.
Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



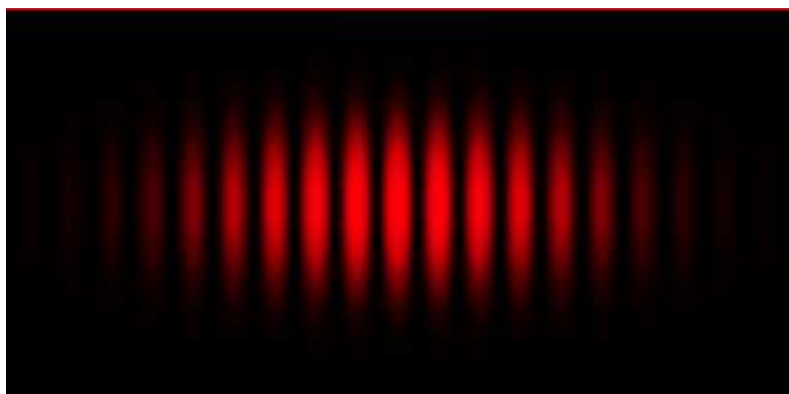
Światło



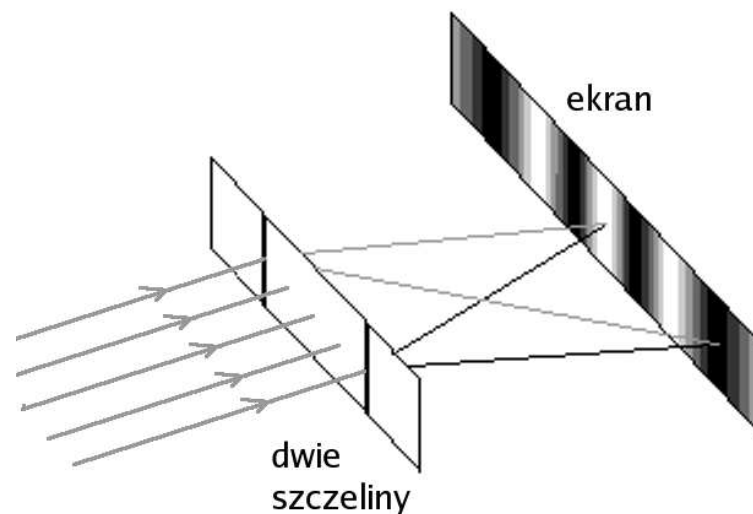
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



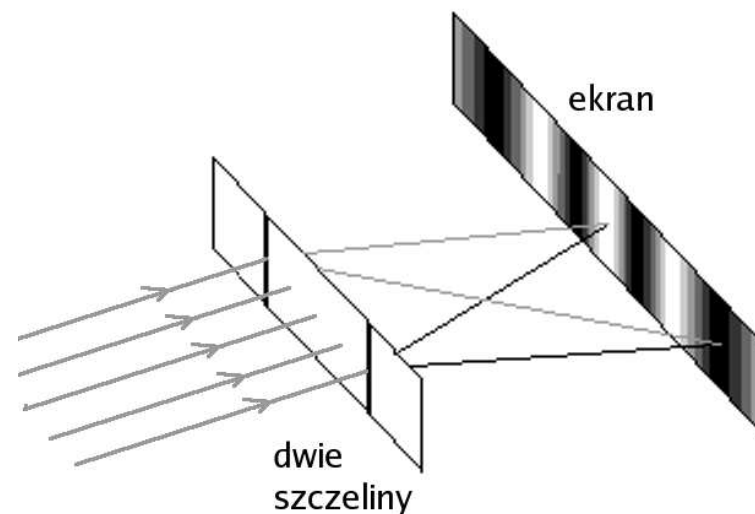
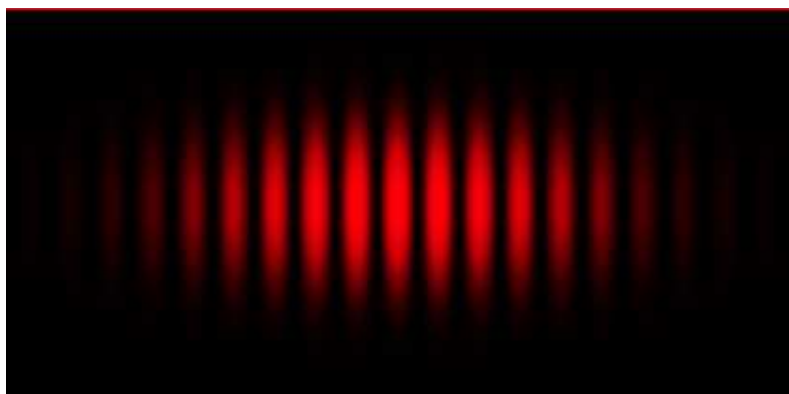
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**



Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



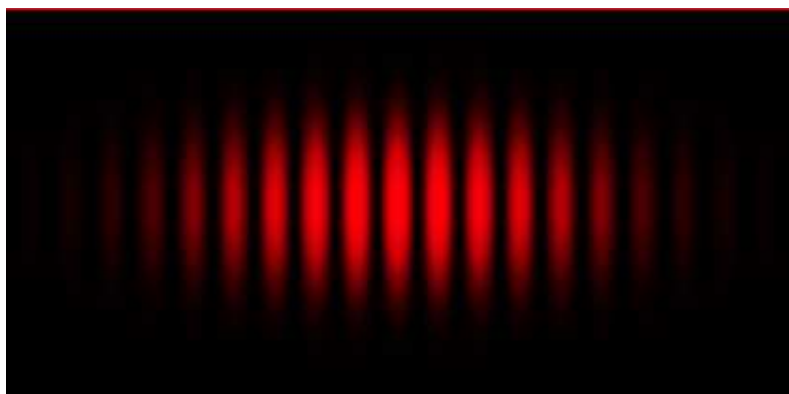
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

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

Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

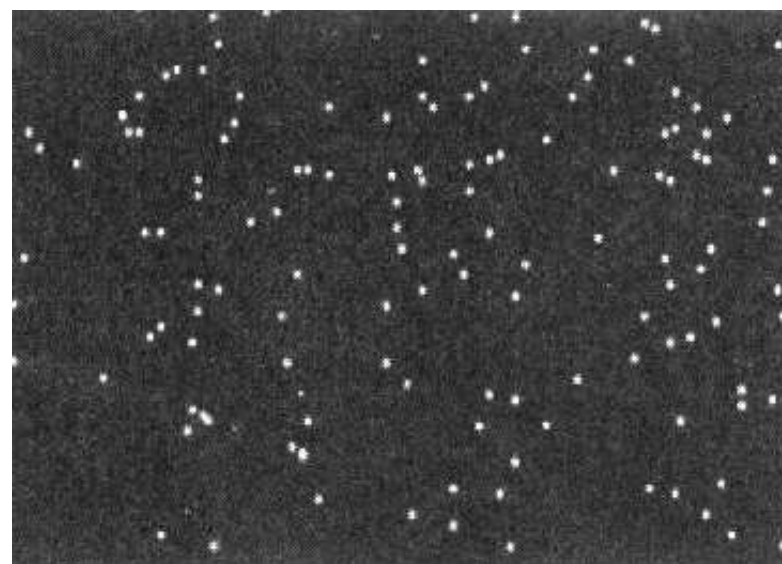
Światło



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

Elektrony

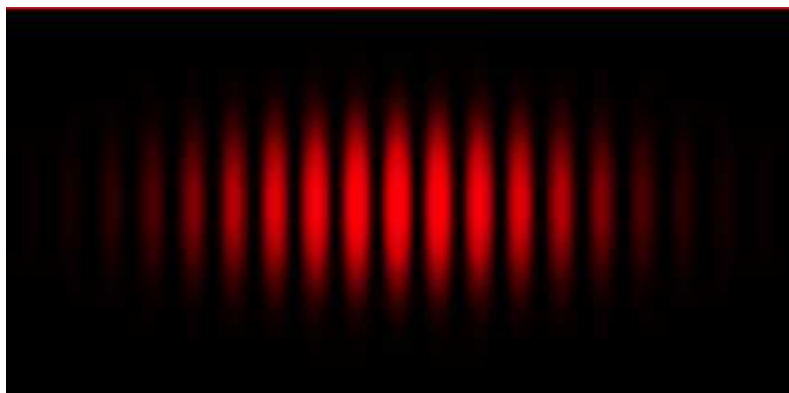


100 elektronów
rozkład przypadkowy ?

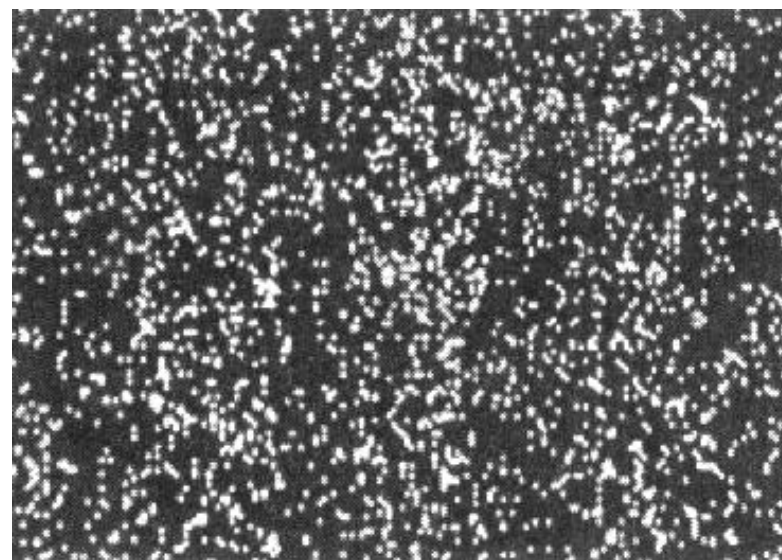
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**

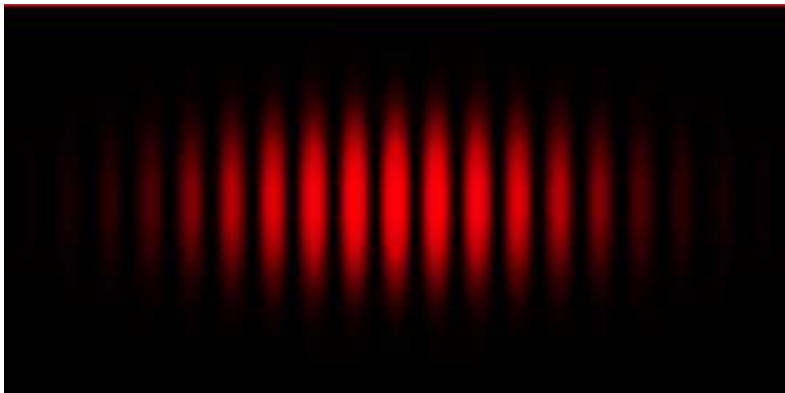
⇒ **prążki interferencyjne**

3000 elektronów

Cząstki i fale

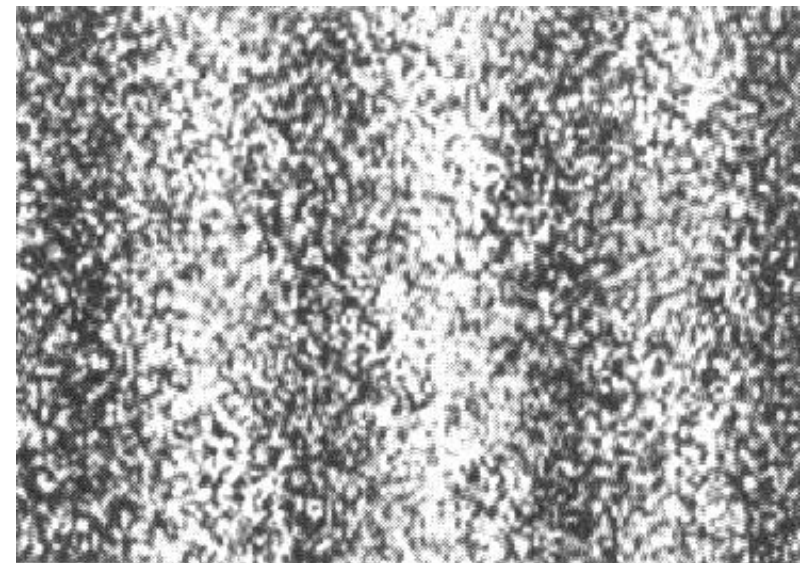
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



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

Elektrony



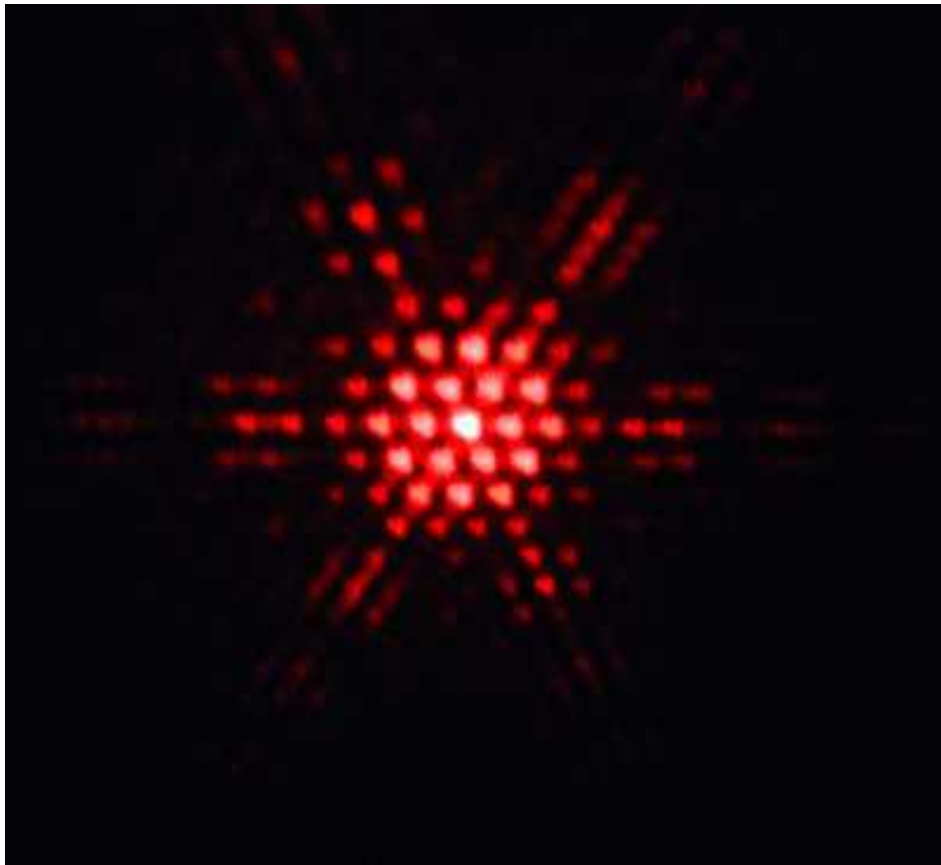
70000 elektronów

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

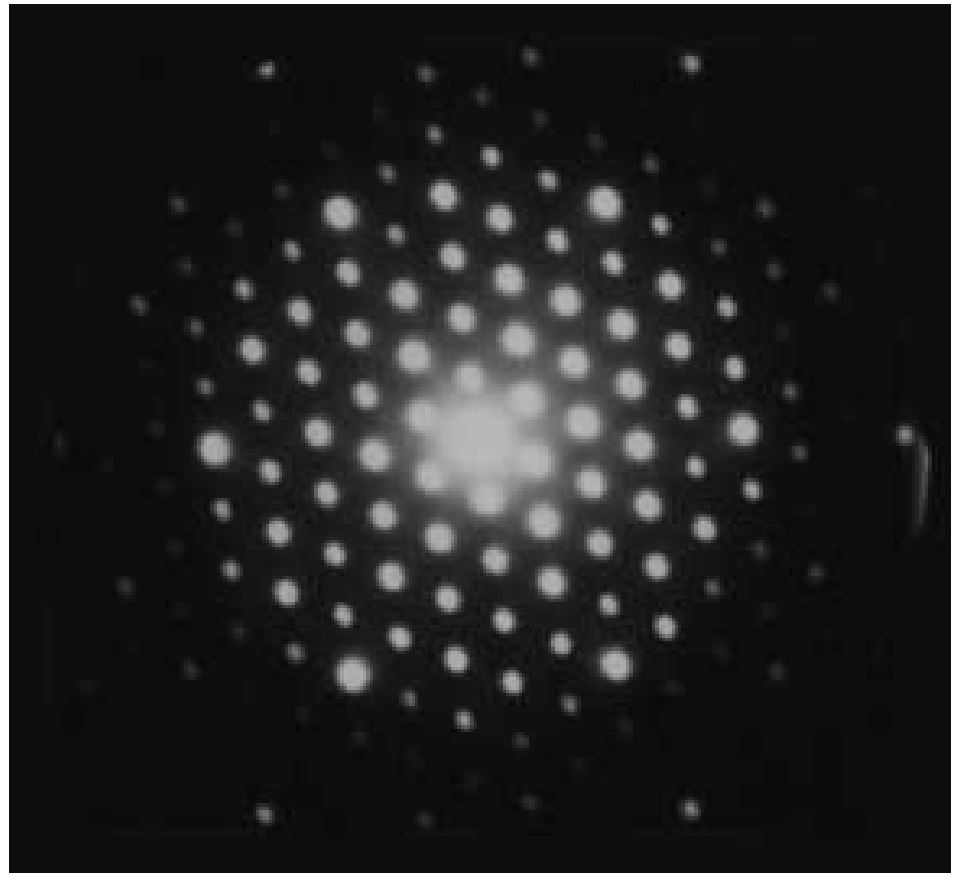
Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło



Elektrony

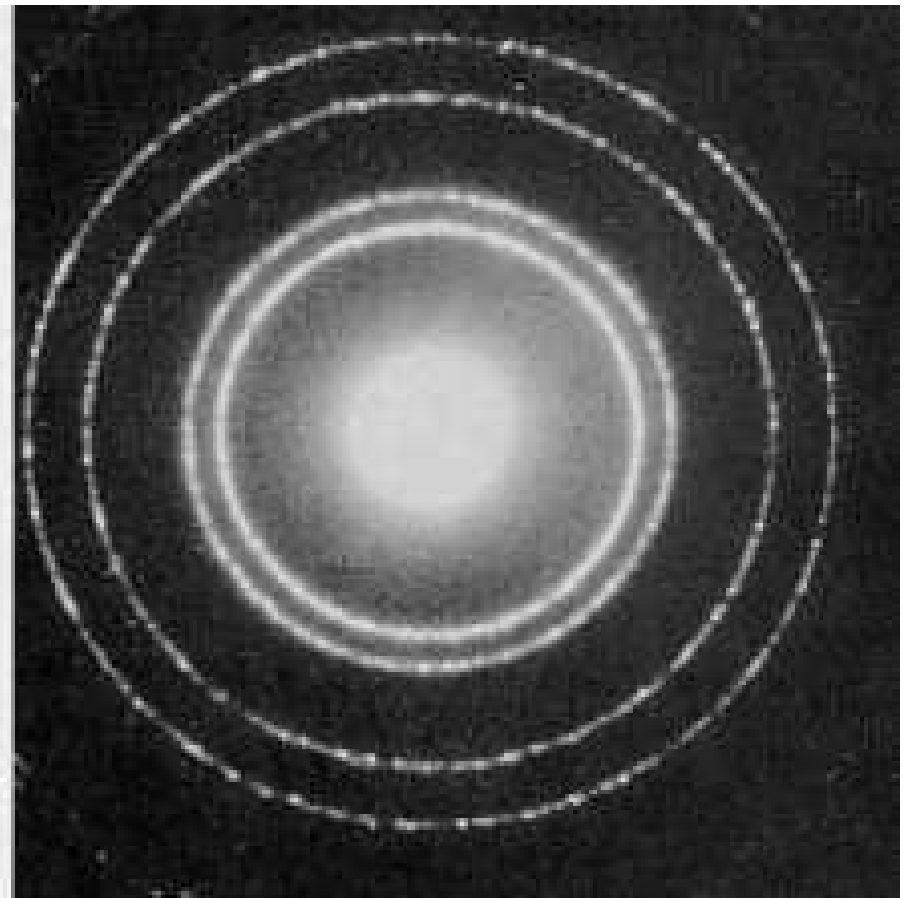
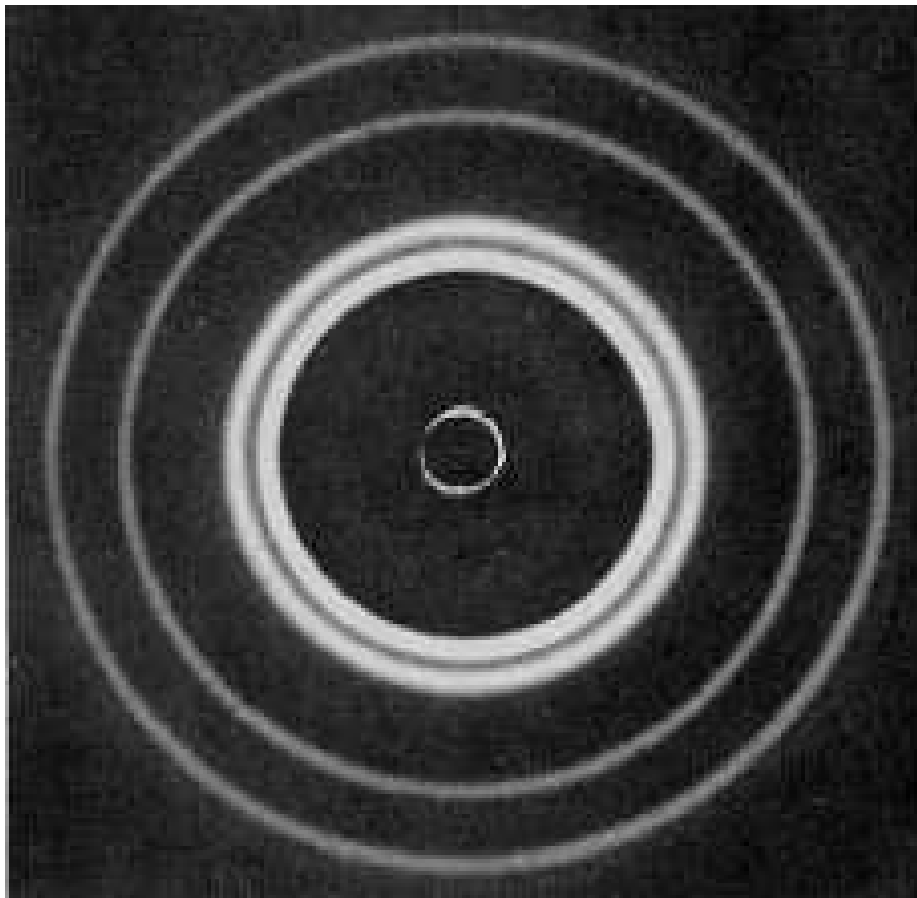


Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



Cząstki i fale



Mechanika 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**.



Cząstki i fale



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...



Cząstki i fale



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.

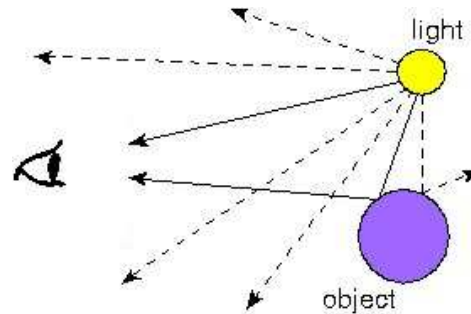
Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

Nie możemy **dowolnie dokładnie** poznać stanu cząstki, np. jednocześnie zmierzyć położenie i pęd - **zasada nieoznaczoności**.



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**.

Nie można zaobserwować cząstki, która nie oddziałuje!

Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

- jonizacja i scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

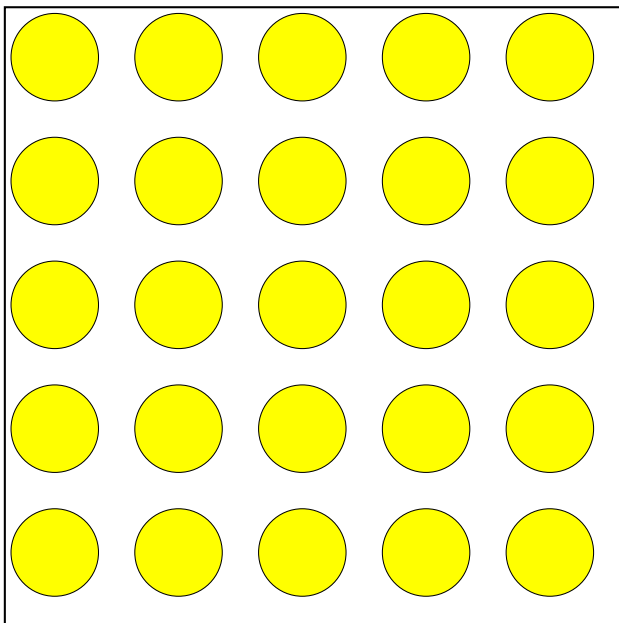


Struktura materii

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

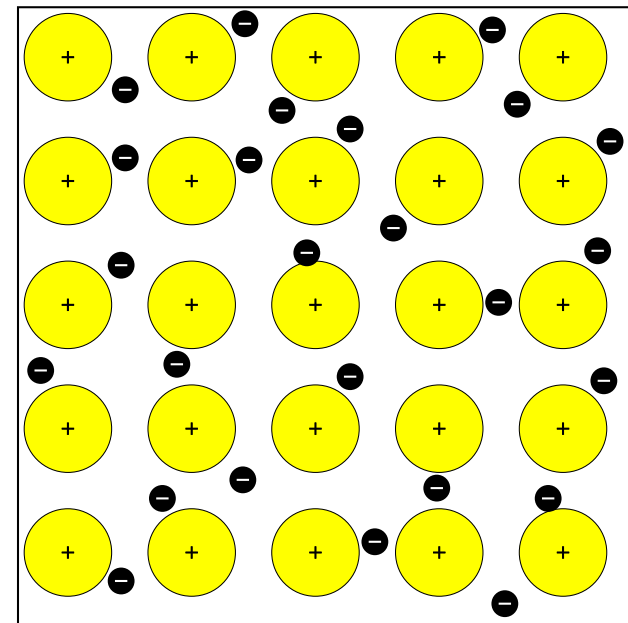
Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami



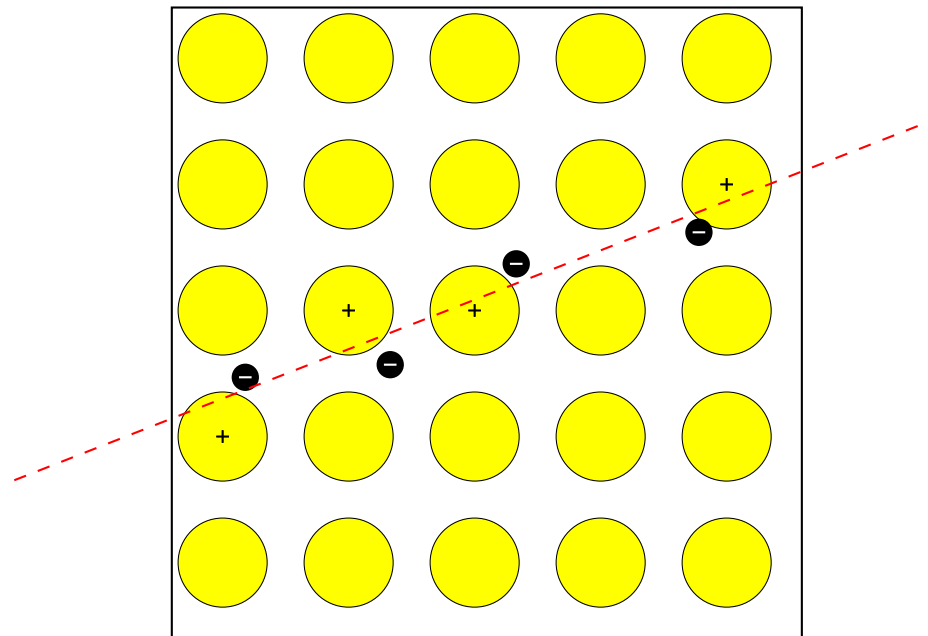
Przewodnik

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



Jonizacja

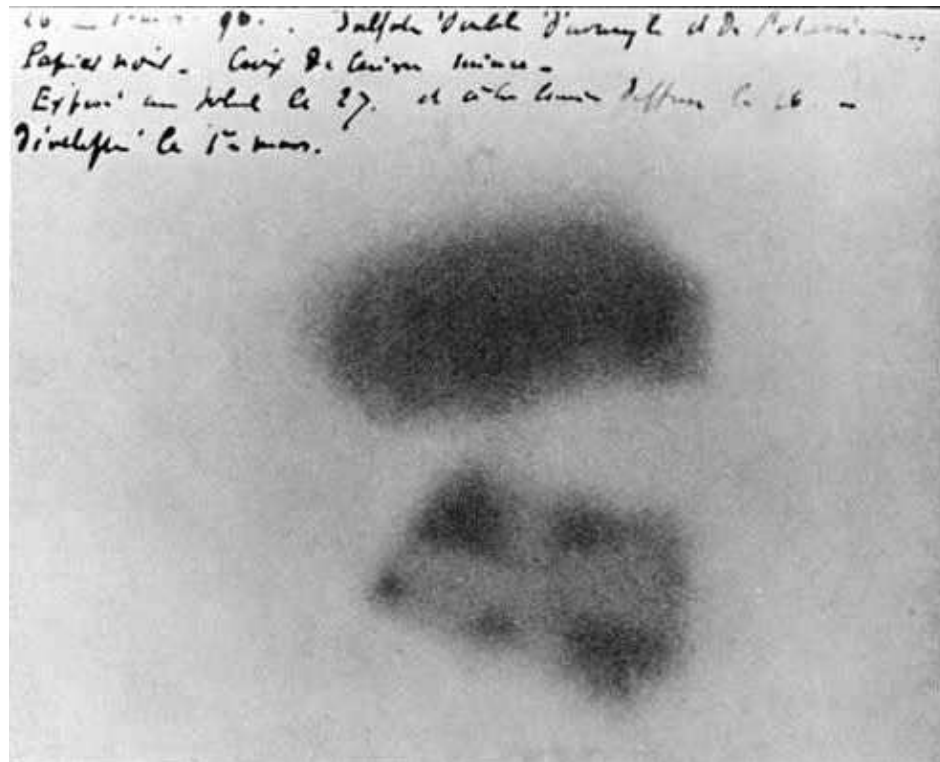
U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:



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

Detekcja cząstek

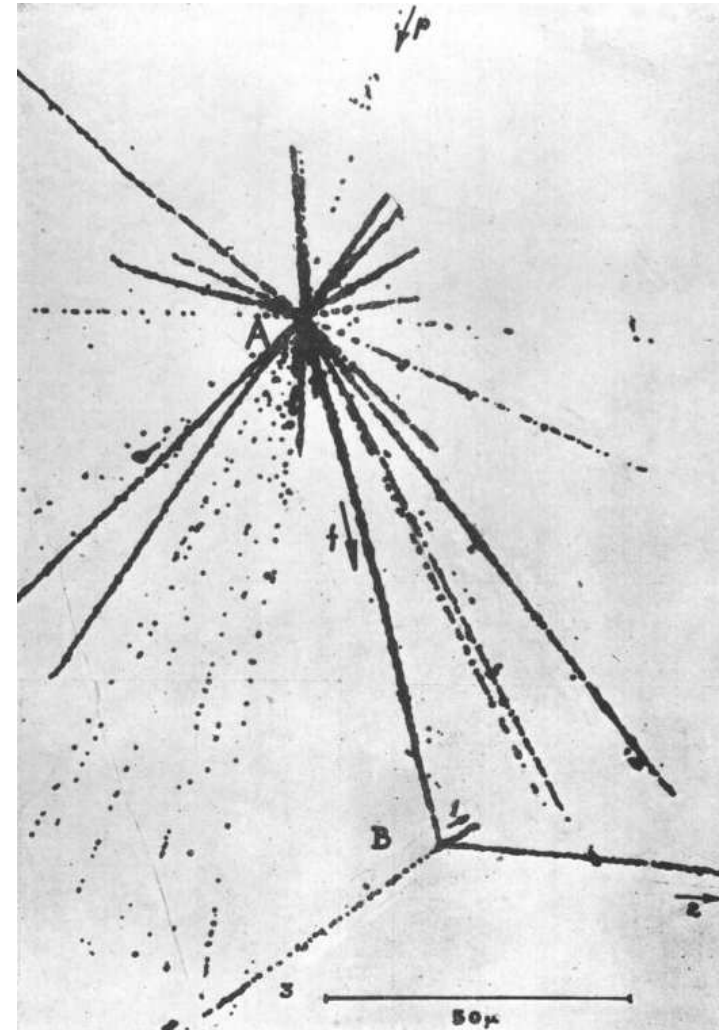
Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy

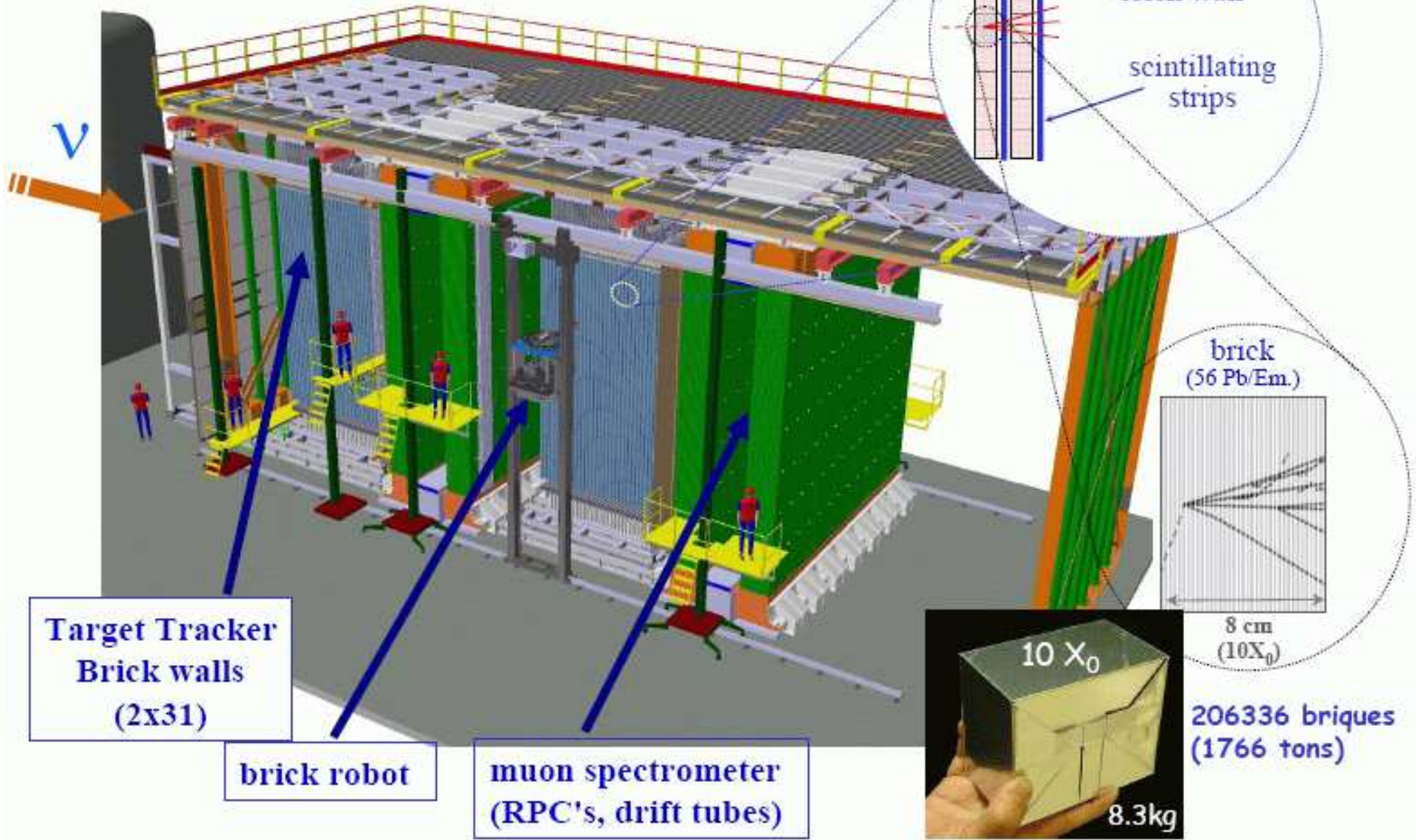
⇒ reakcja chemiczna



M.Danysz i J.Pniewski, 1953

Eksperyment Opera

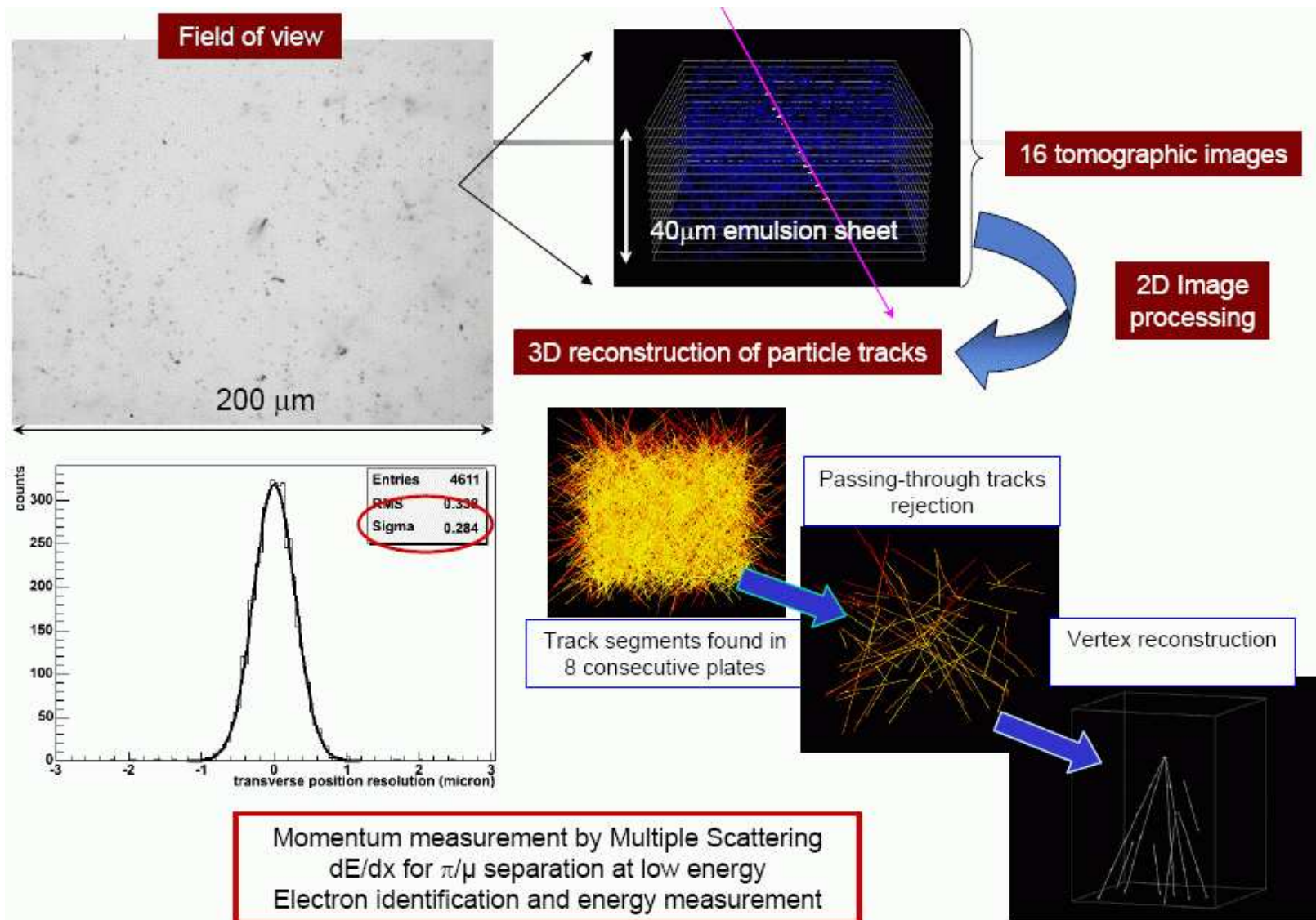
Emulsja fotograficzna wciąż w użyciu...



Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna

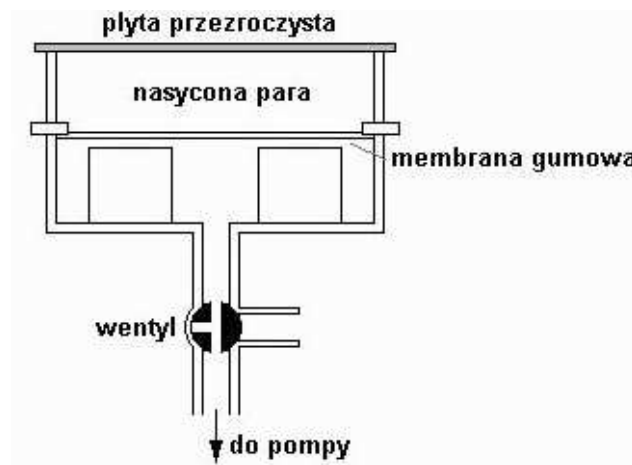
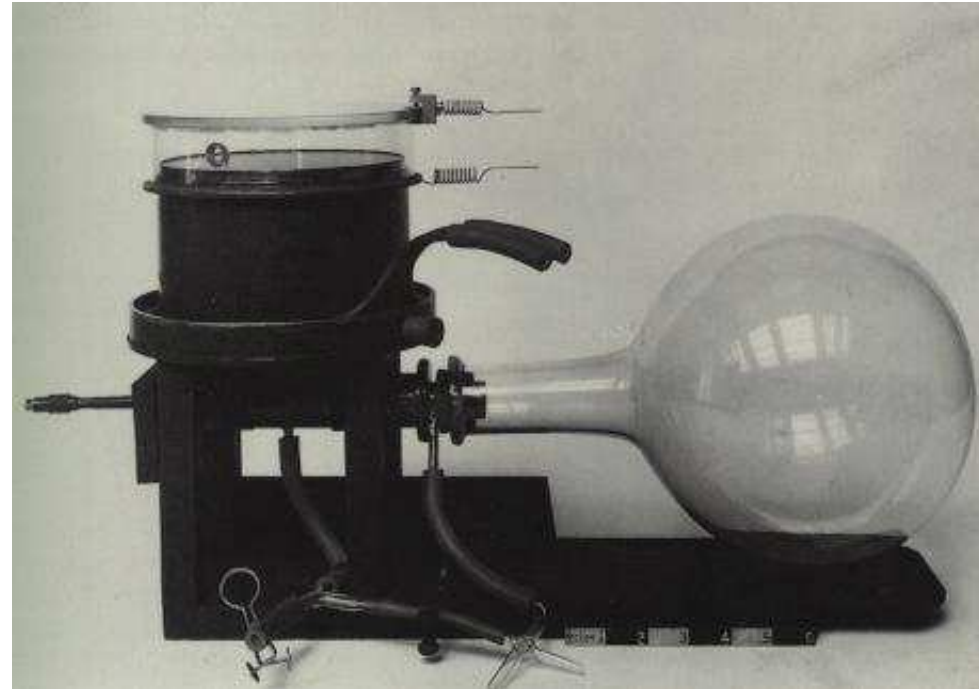
eksperyment OPERA



Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



jonizacja

⇒ jony

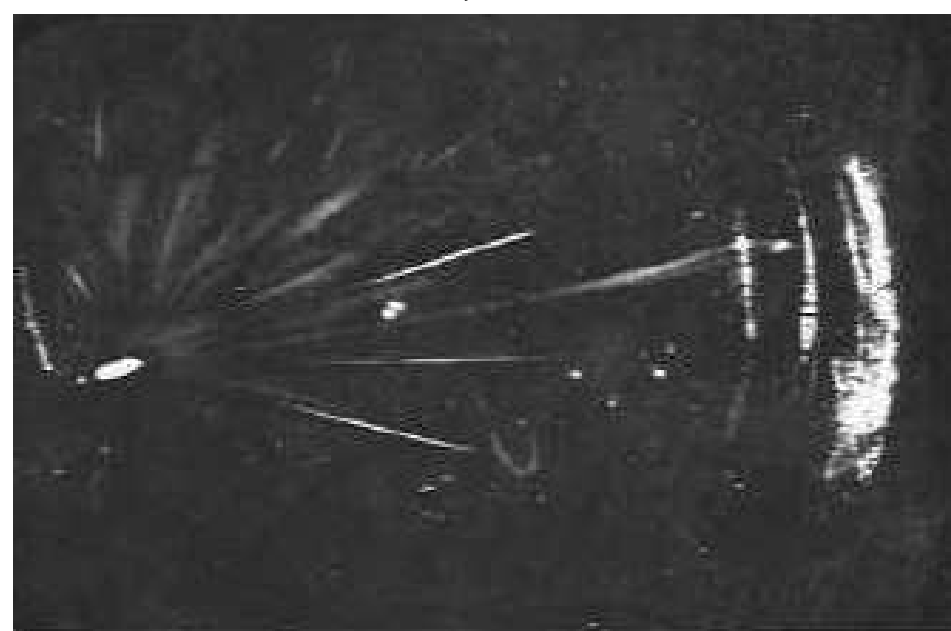
⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

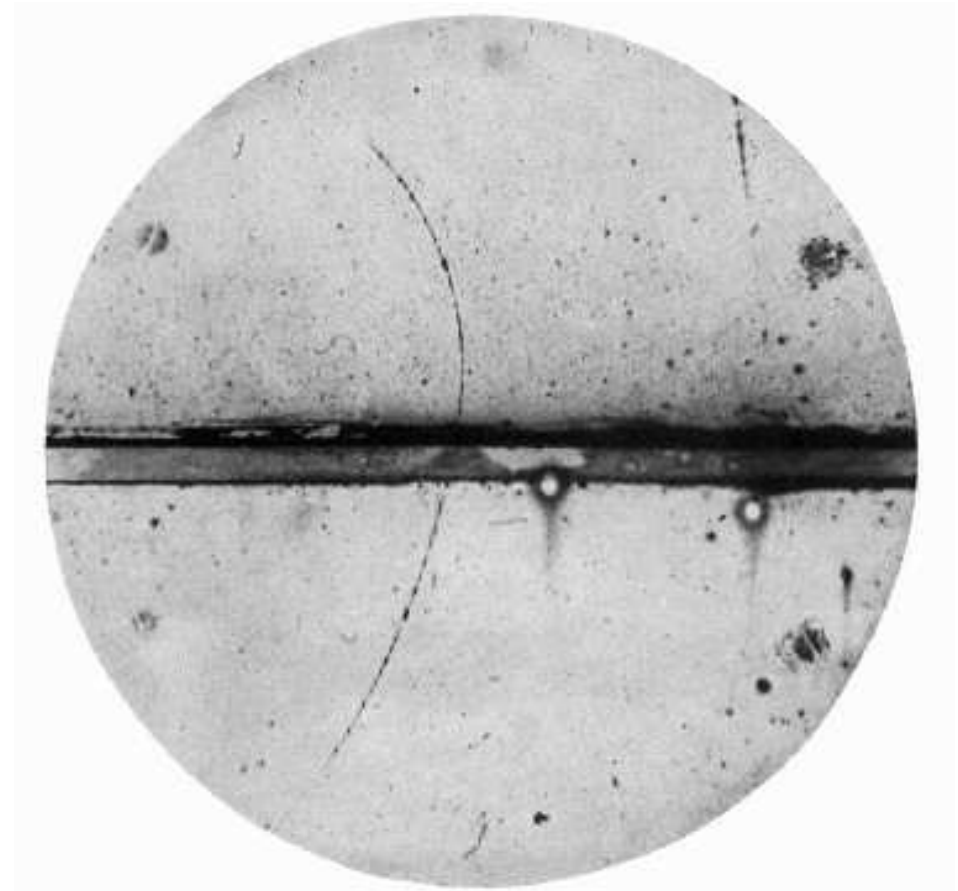
Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



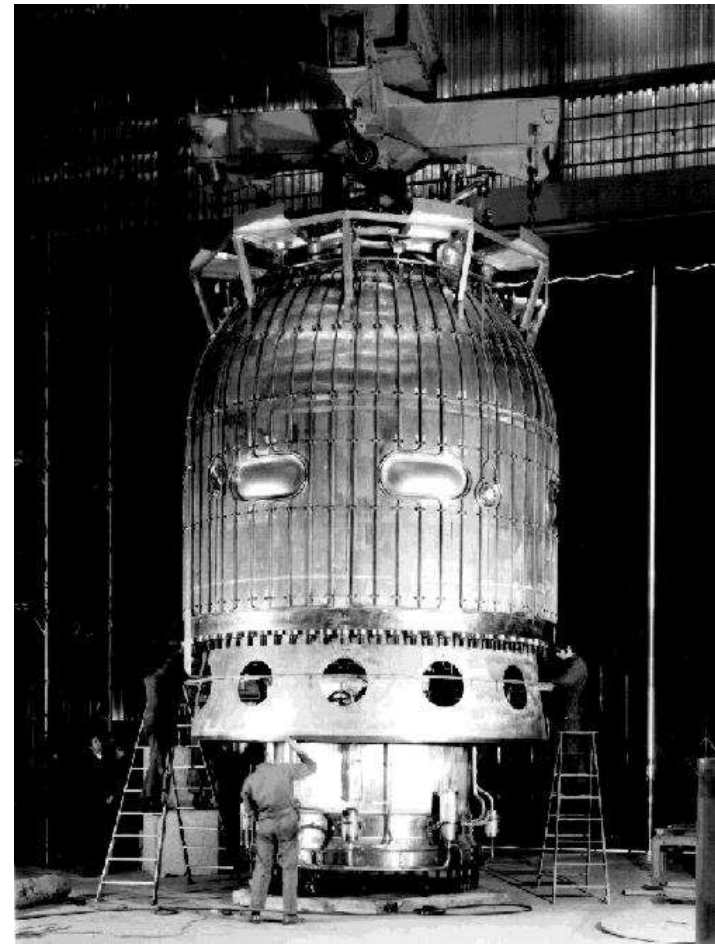
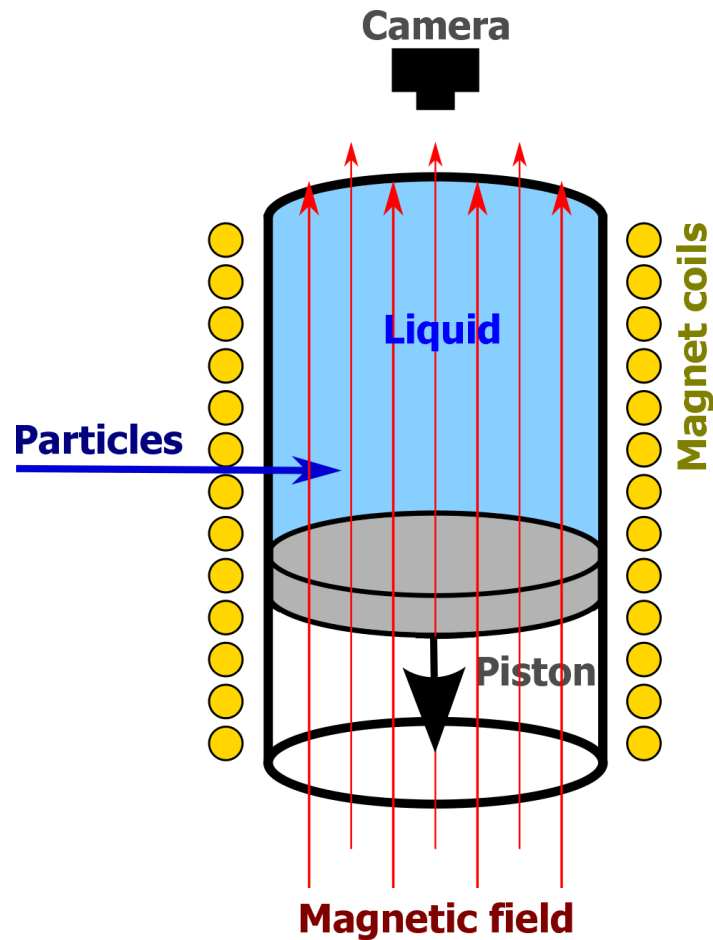
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa, 1952

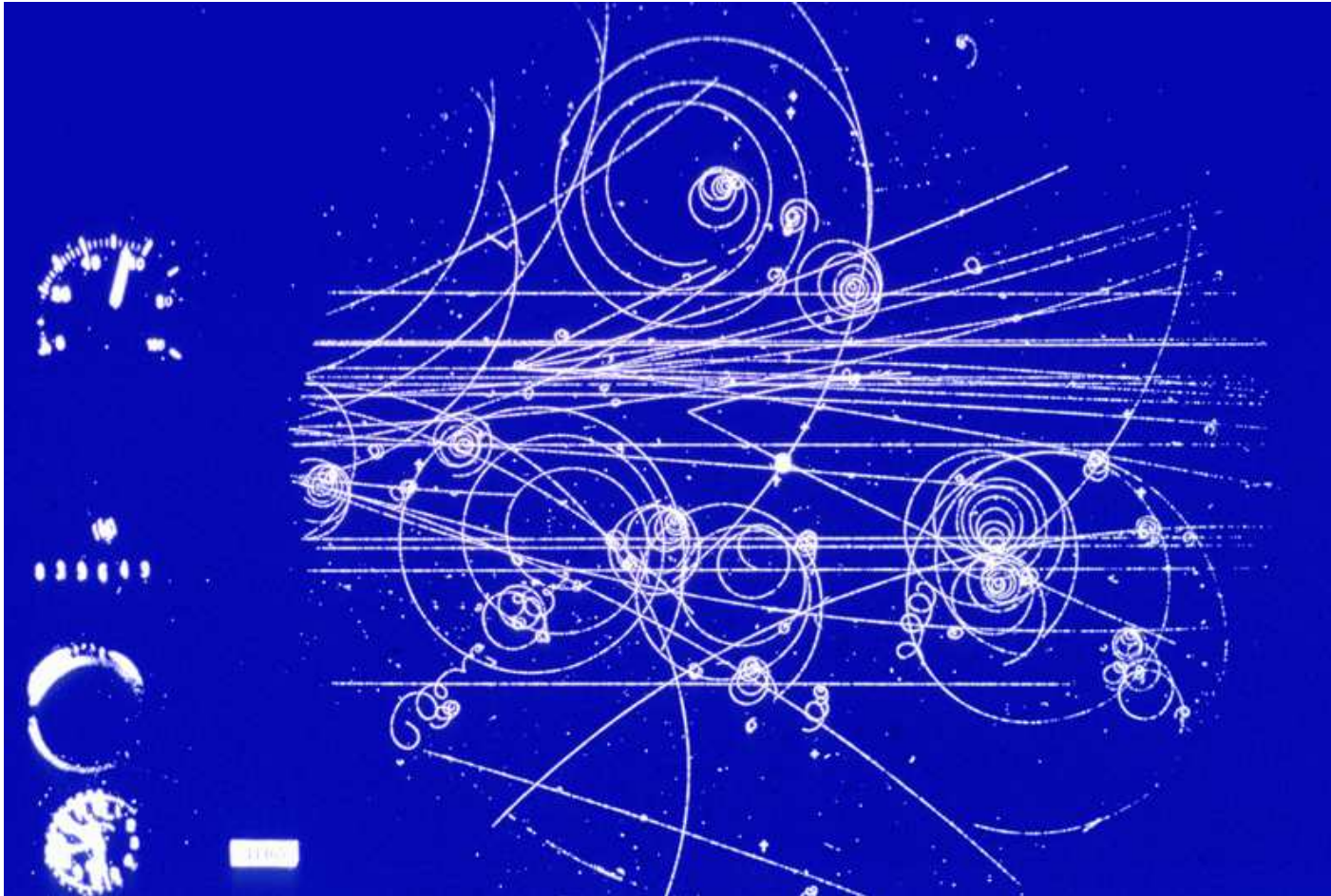


jonizacja \Rightarrow wrzenie przegrzanej cieczy



Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa



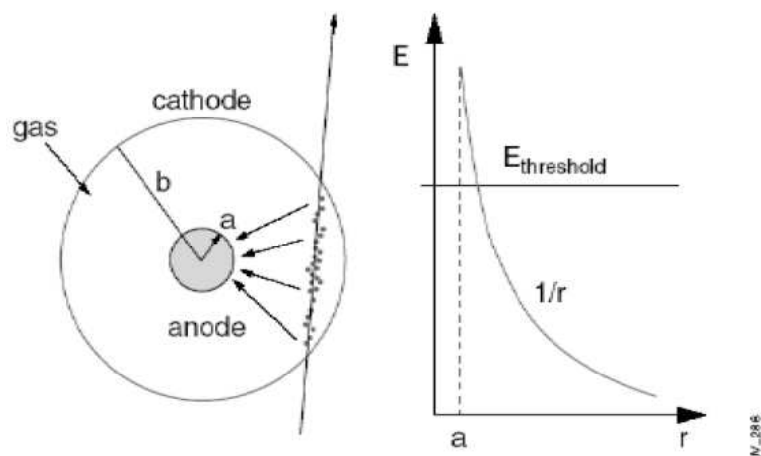
Ciecz pełni też rolę “tarczy”, z którą oddziałują cząstki wiązki

Detekcja cząstek

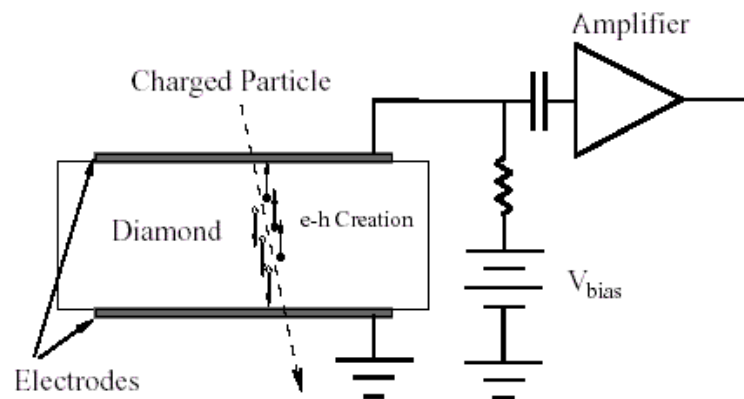
Pomiar jonizacji

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

w gazie



w półprzewodniku



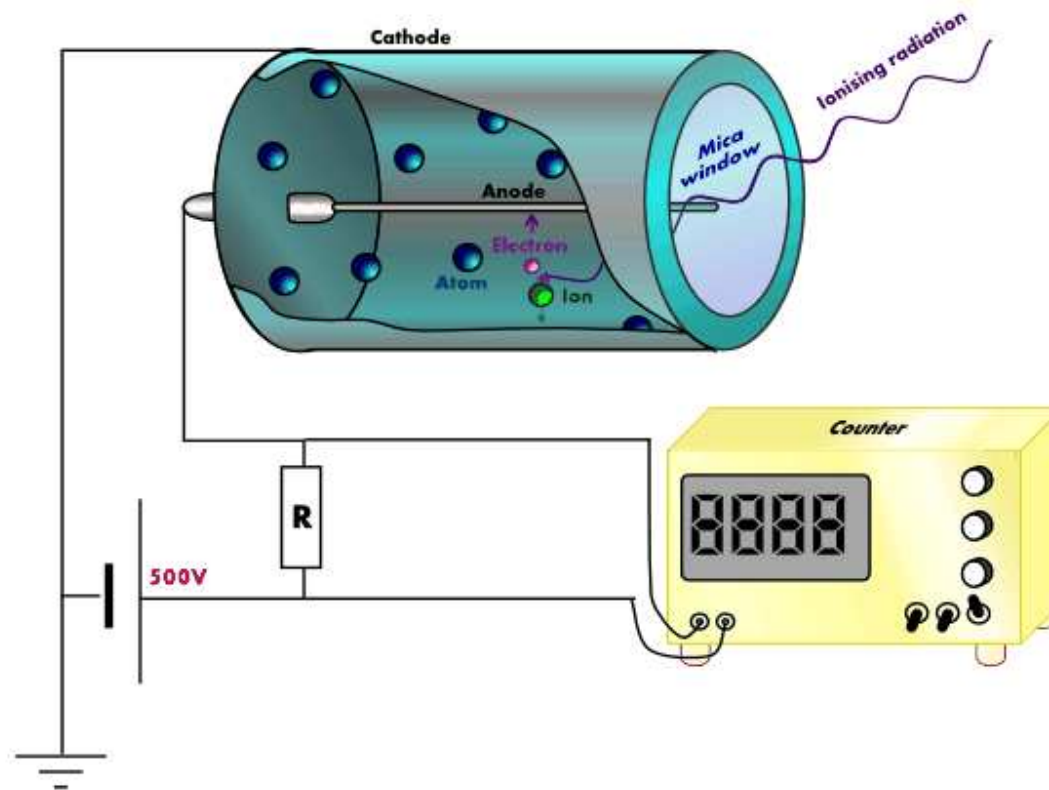
Przeptywający ładunek jest na ogół bardzo mały,
ale czuła elektronika pozwala go wzmocnić i zmierzyć.

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

Detekcja cząstek

Licznik Geigera-Müllera

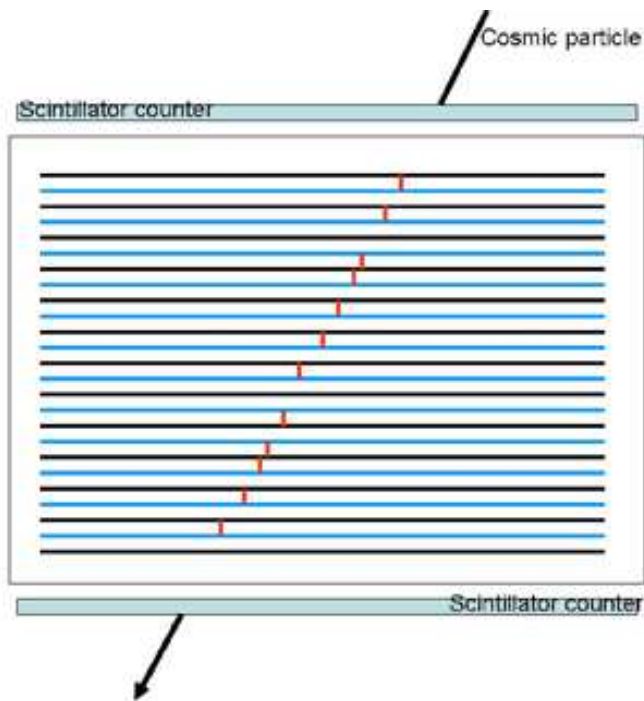
Przykładając odpowiednio wysokie napięcie powodujemy, że powstałe w wyniku jonizacji elektrony zderzając się z atomami wybijają kolejne elektrony - powielanie ładunku.



Detekcja cząstek

Komora iskrowa

Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



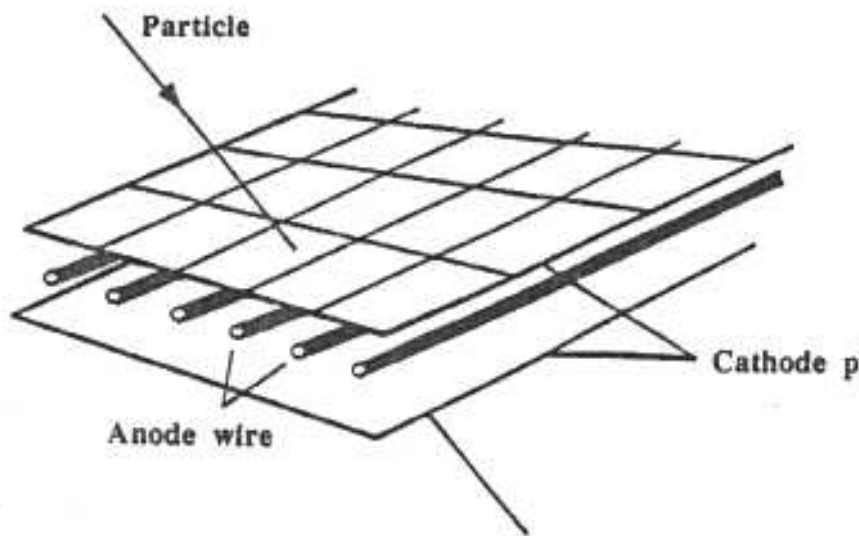
Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)



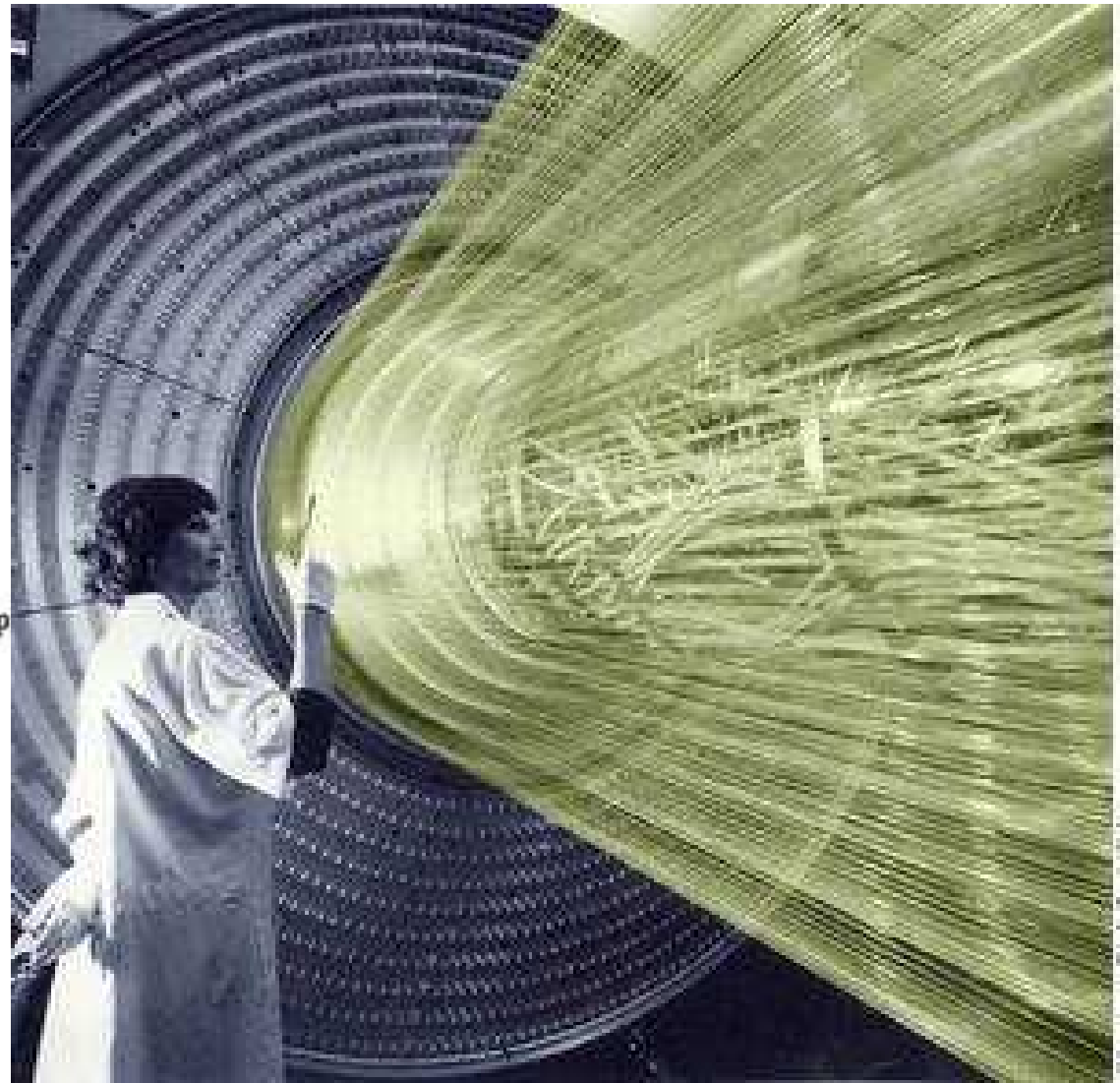
Detekcja cząstek

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



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

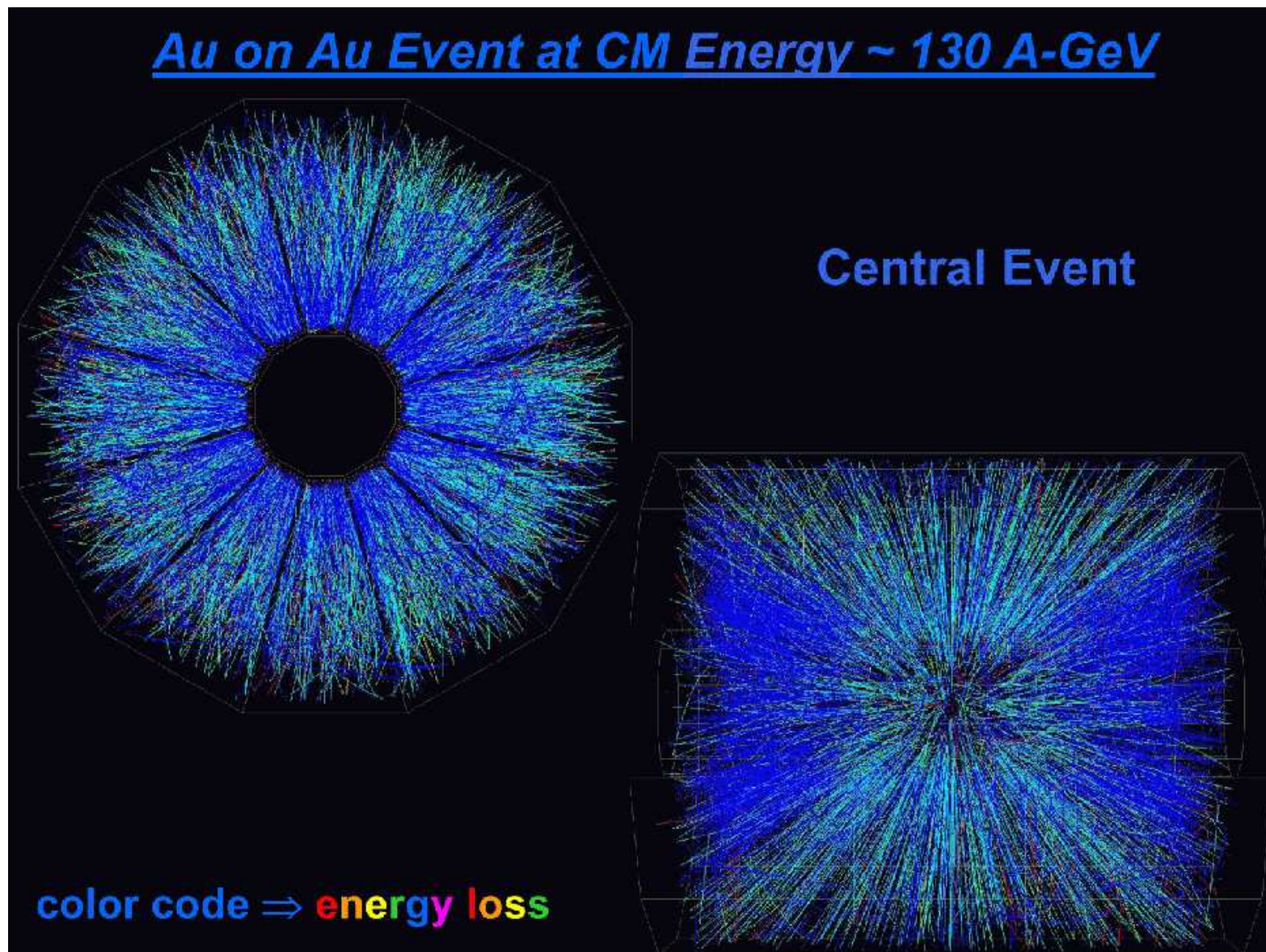


Detekcja cząstek

TPC
Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



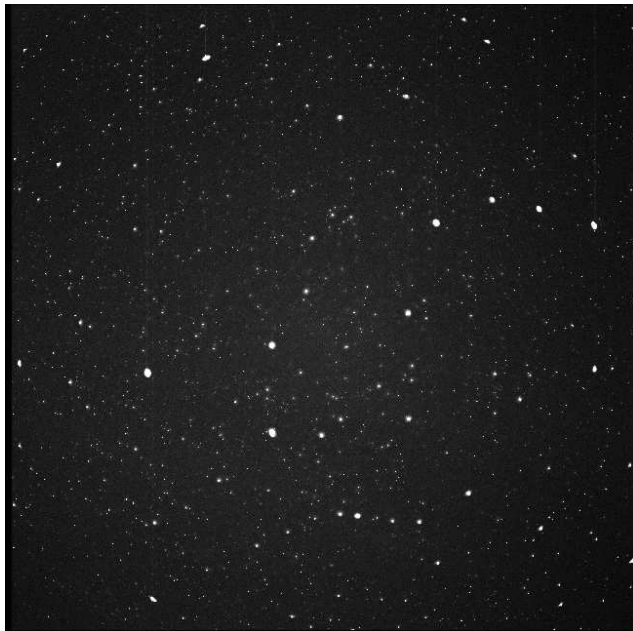
Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

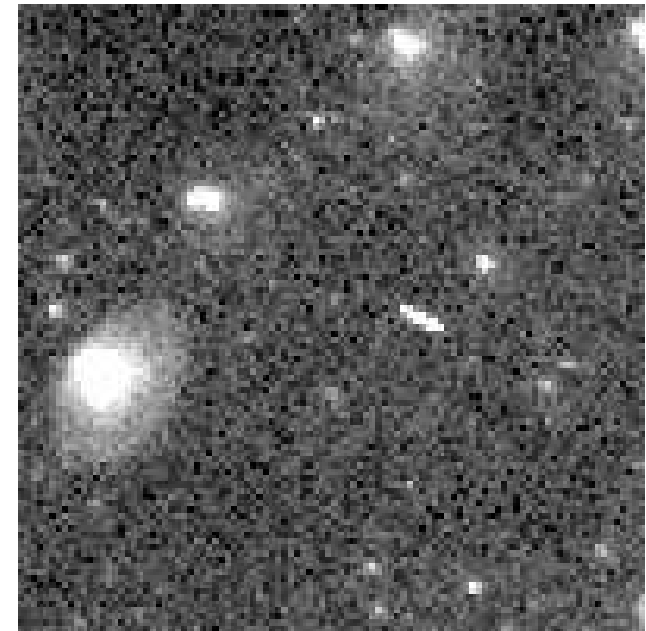
Bardzo różne technologie, m.in. CCD (używane w fotografii cyfrowej)

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



Wycinek:

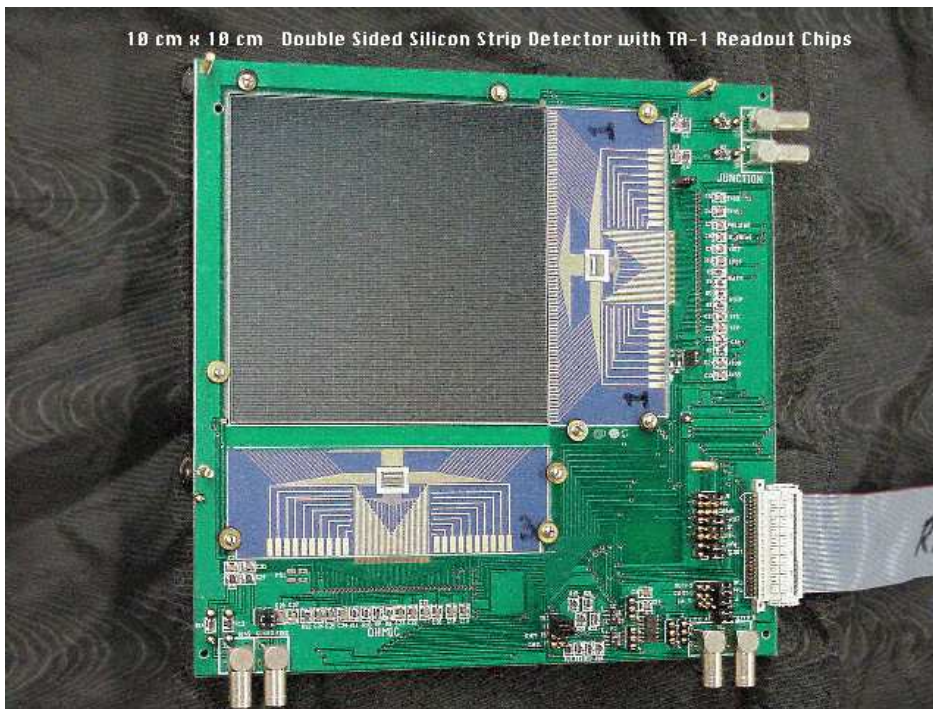


To nie UFO. To ślad cząstki...

Detekcja cząstek

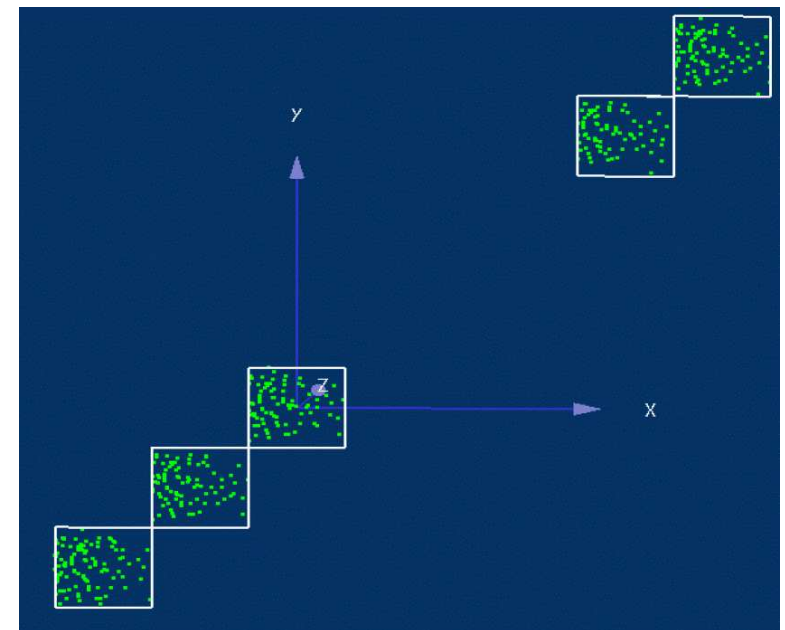
Detektory półprzewodnikowe
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar
pozycji cząstek (rzędu μm)

Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek
przez pięć warstw detektora testowego:

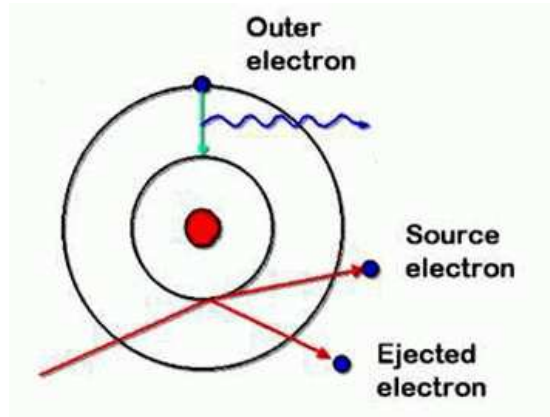


Mierzając pozycje w wielu warstwach możemy zrekonstruować tor.

Detekcja cząstek

Scyntyłacja

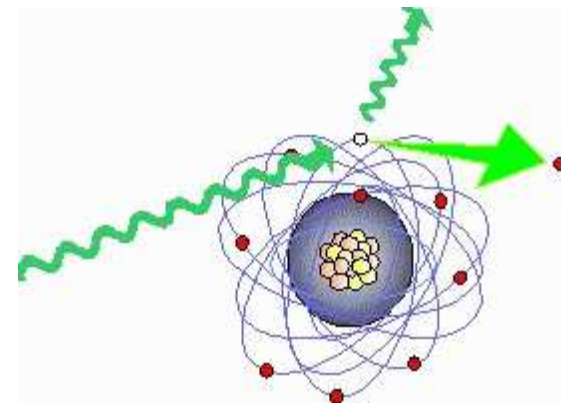
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



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).

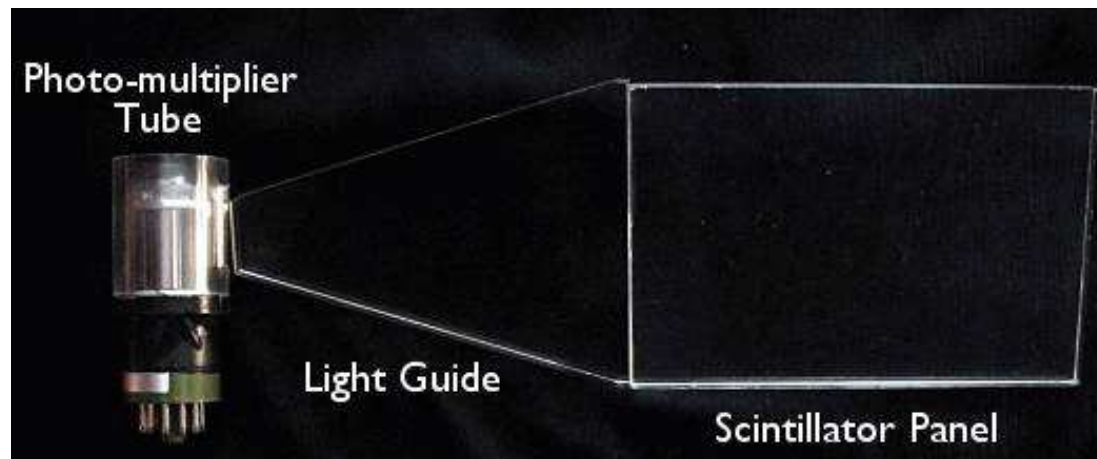
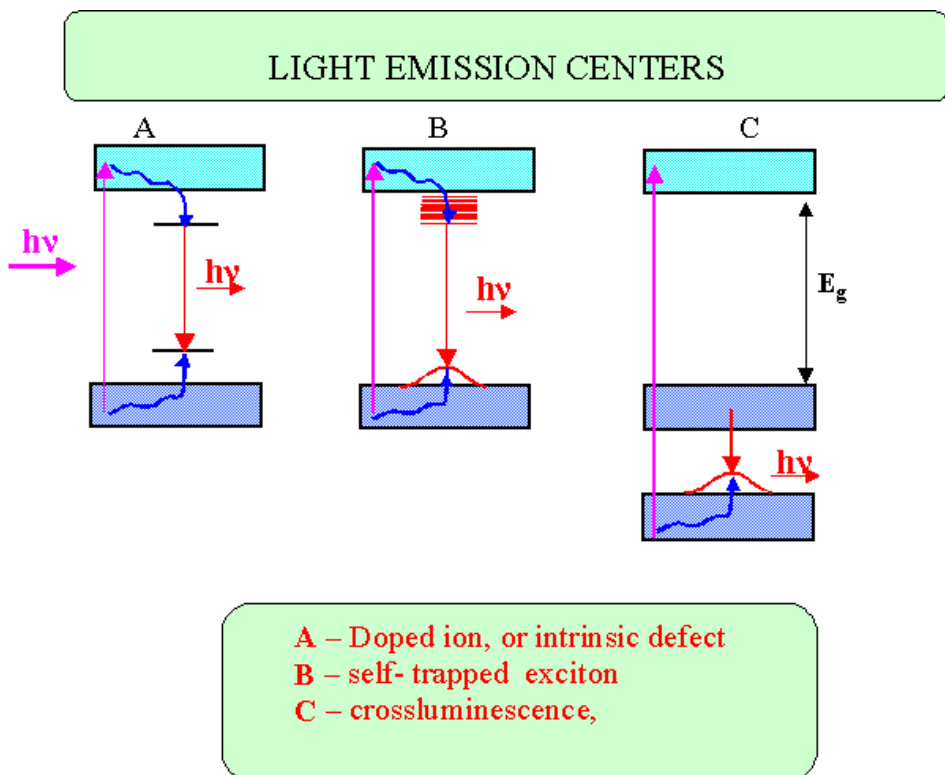


W obu przypadkach elektron może zostać “wyrwany” z atomu.

Scyntylacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza

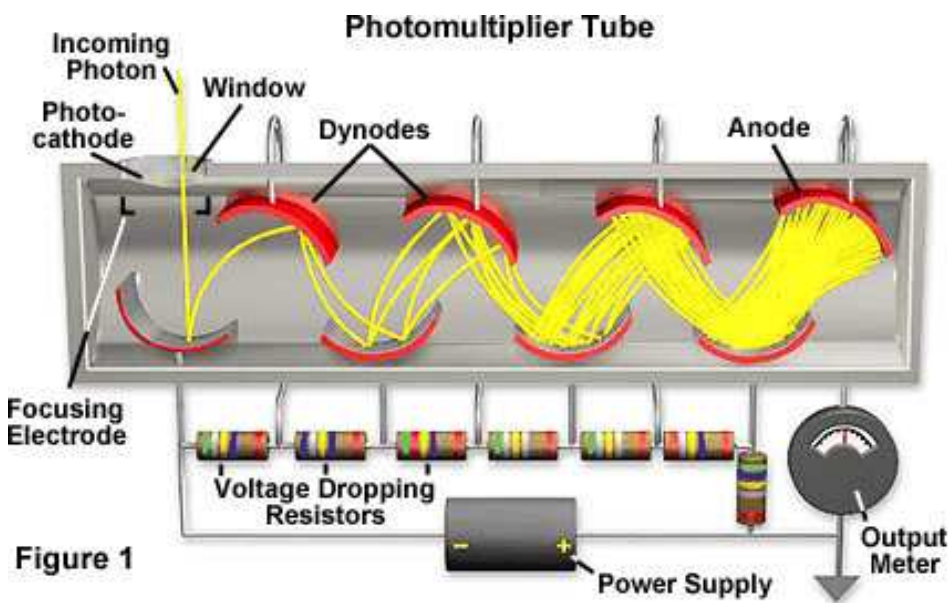


Brak pomiaru pozycji
Bardzo dobry pomiar czasu
przejęcia cząstki

Detekcja cząstek

Fotopowielacz

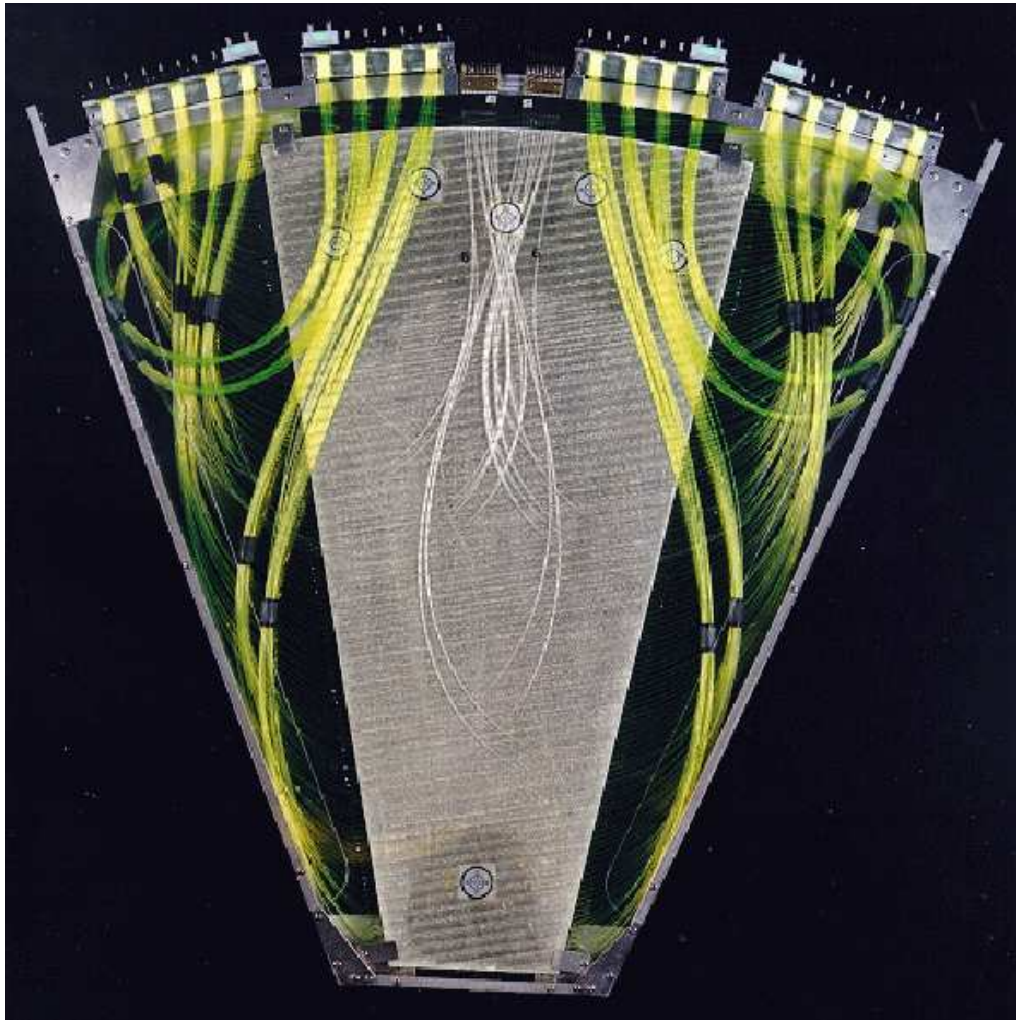
Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek. Na kolejnych elektrodach (tzw. dynodach) każdy elektron wybija kilka elektronów wtórnych - powstaje lawina



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

Detekcja cząstek

Detektory scyntylacyjne

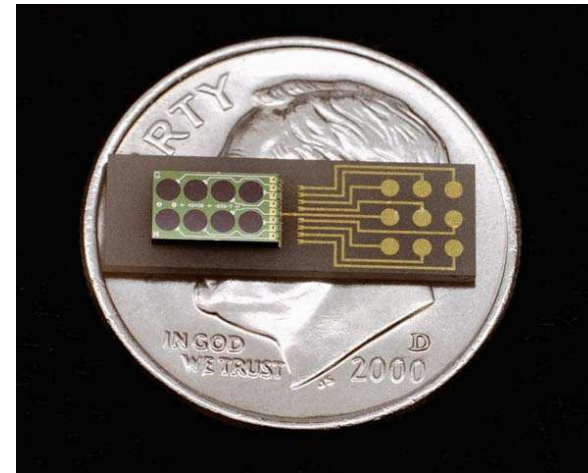


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

⇐ włókna scyntylujące,

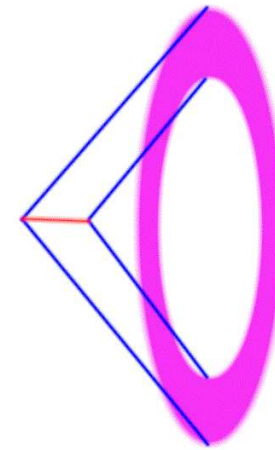
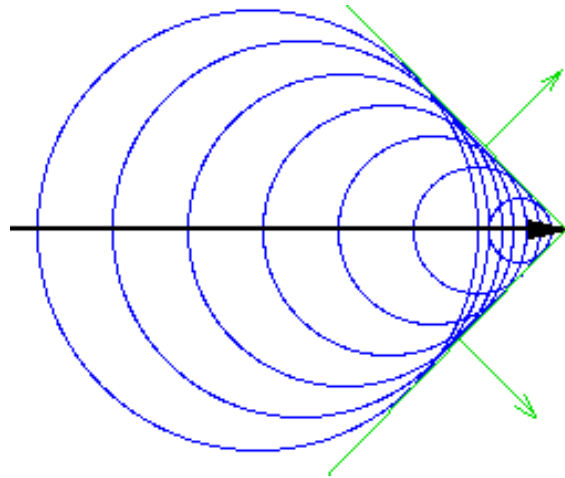
⇓ fotopowielacze krzemowe.



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...

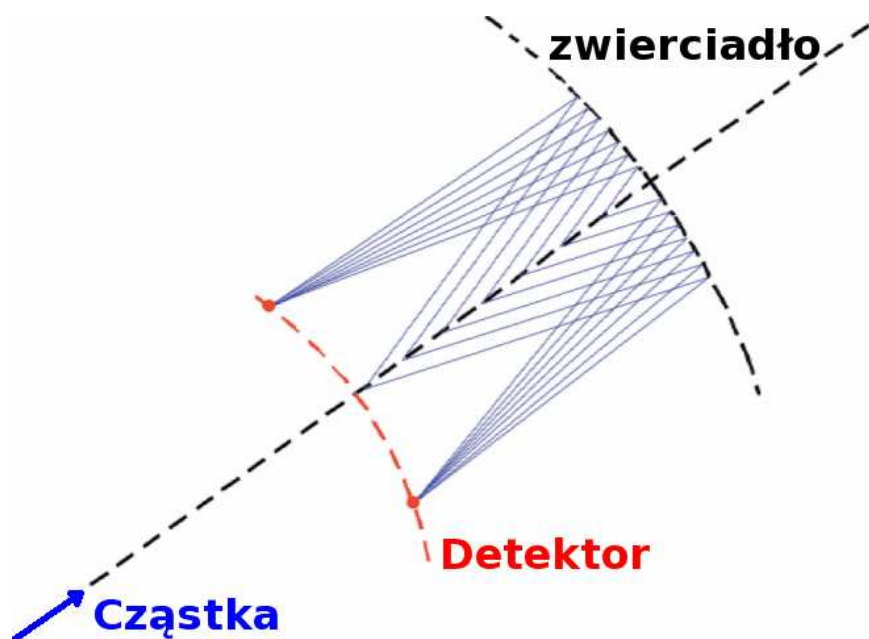
Tania technologia dla dużych detektorów!

Detekcja cząstek

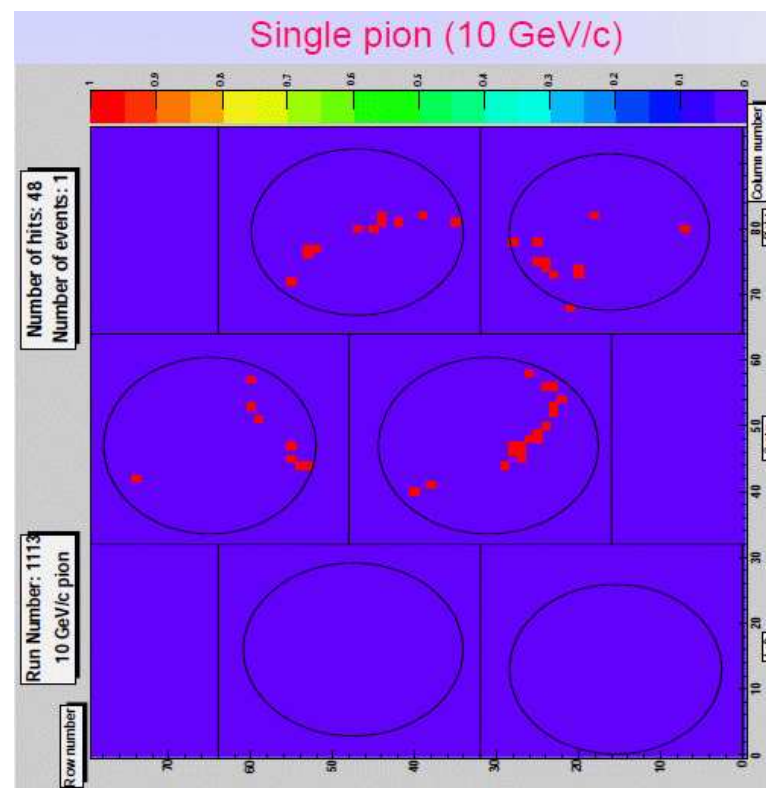
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



Obraz w detektorze

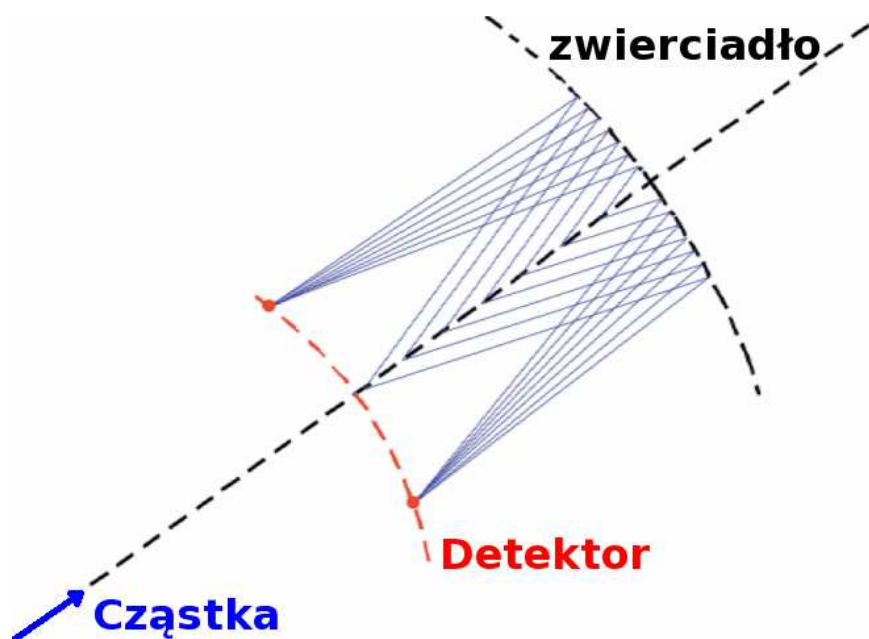


Detekcja cząstek

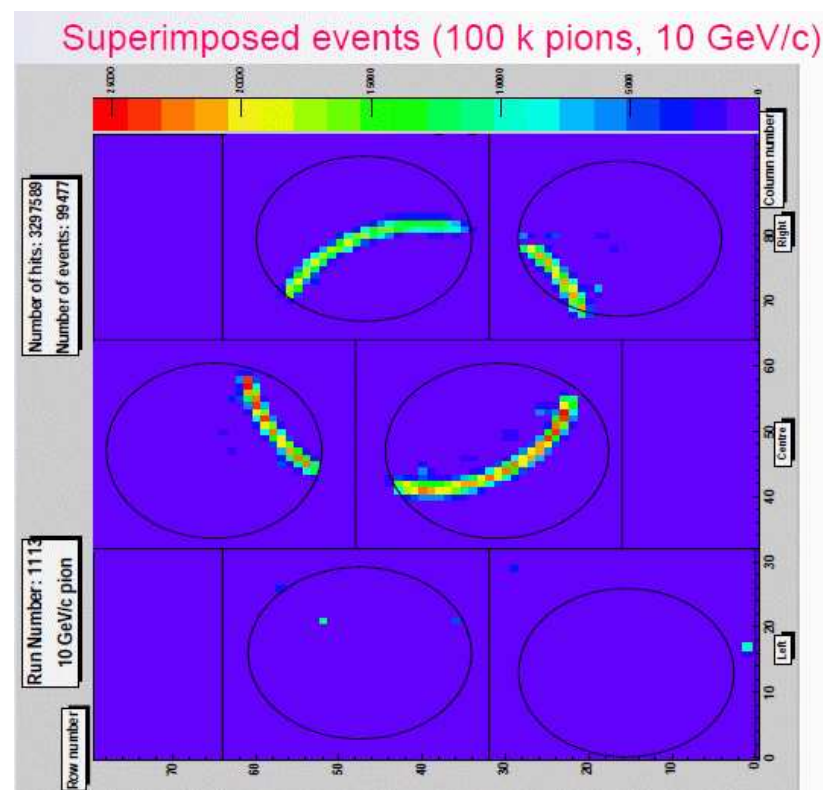
Promieniowanie Czerenkowa

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

Schemat



Obraz w detektorze



Współczesne eksperymenty

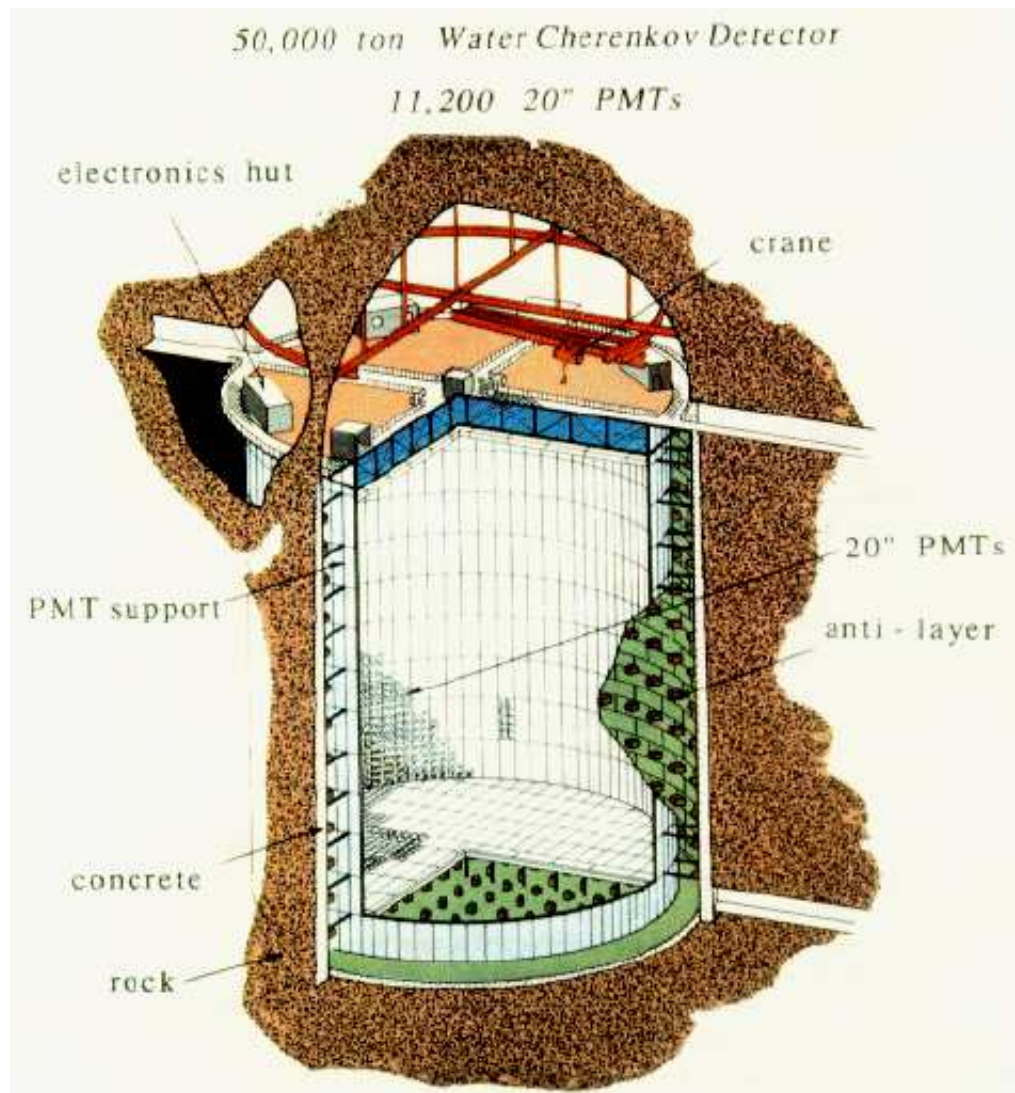
Super-Kamiokande

eksperyment neutrinowy

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

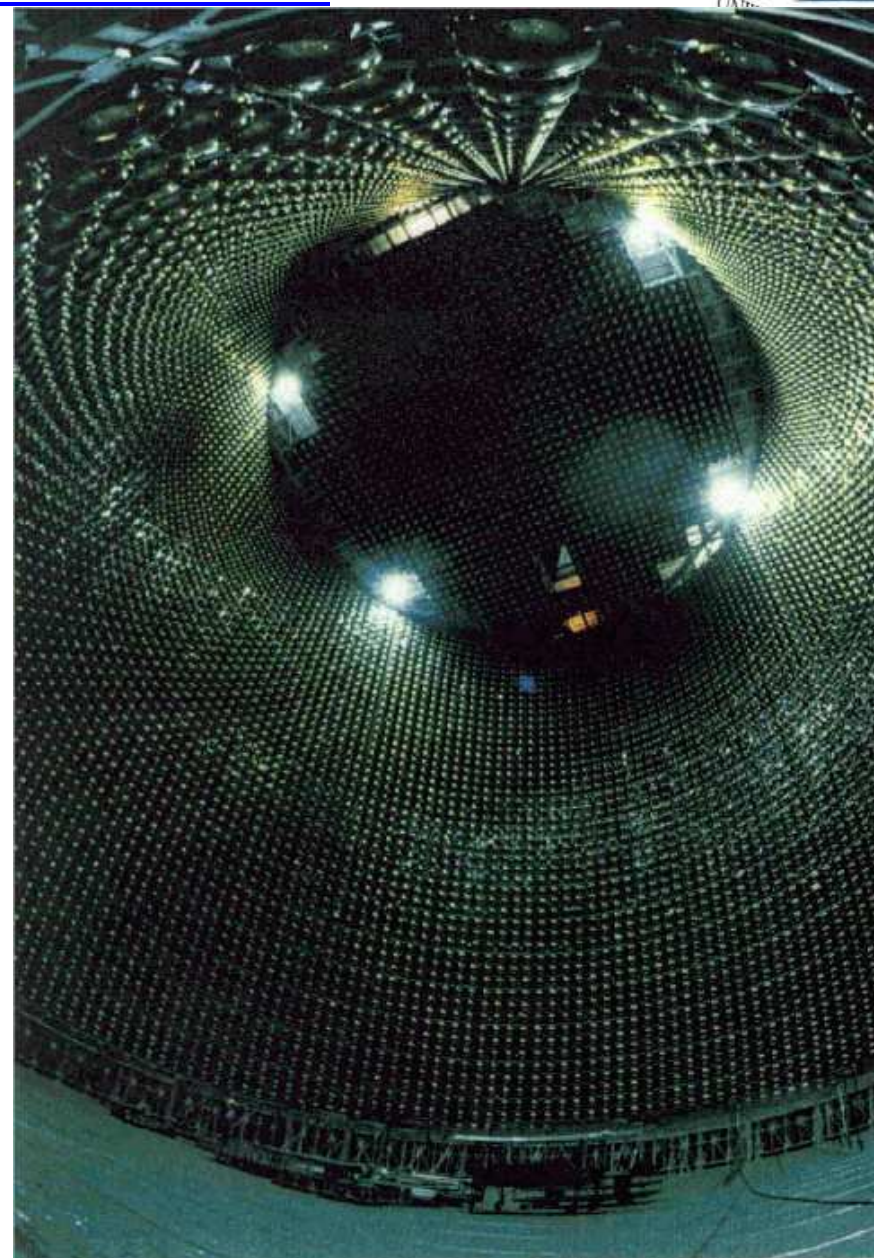
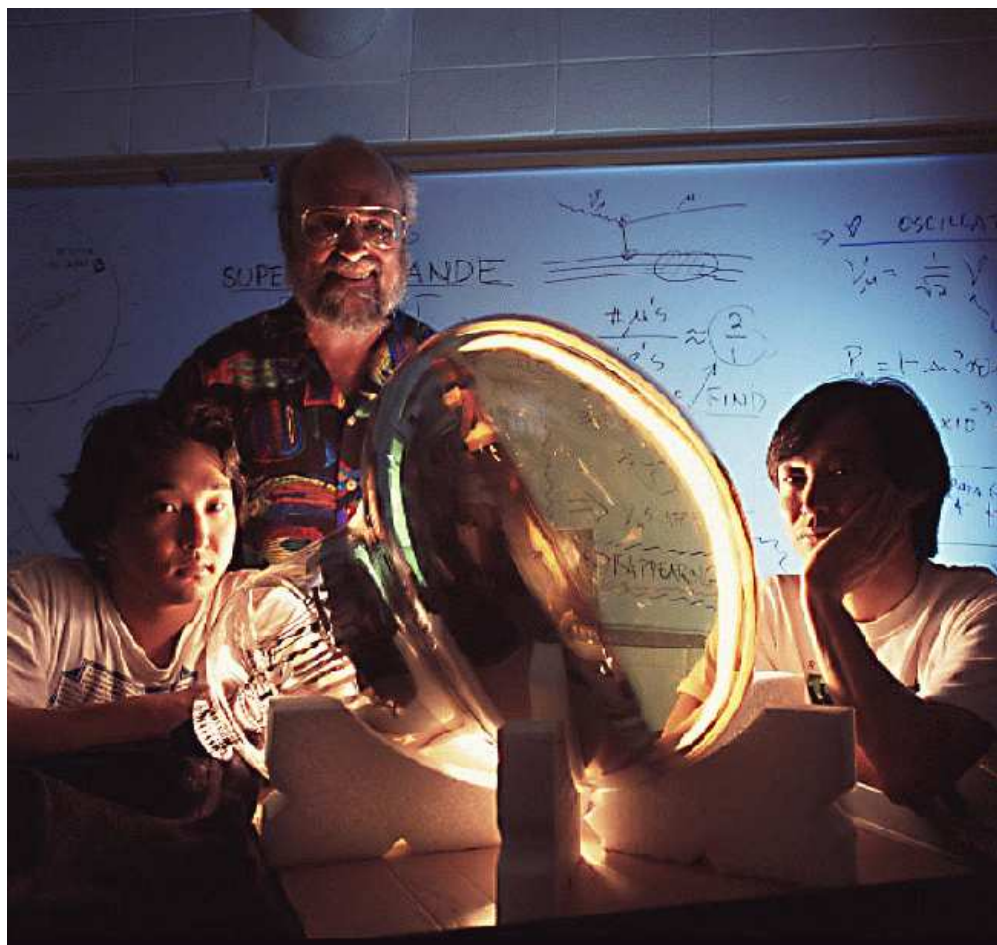
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

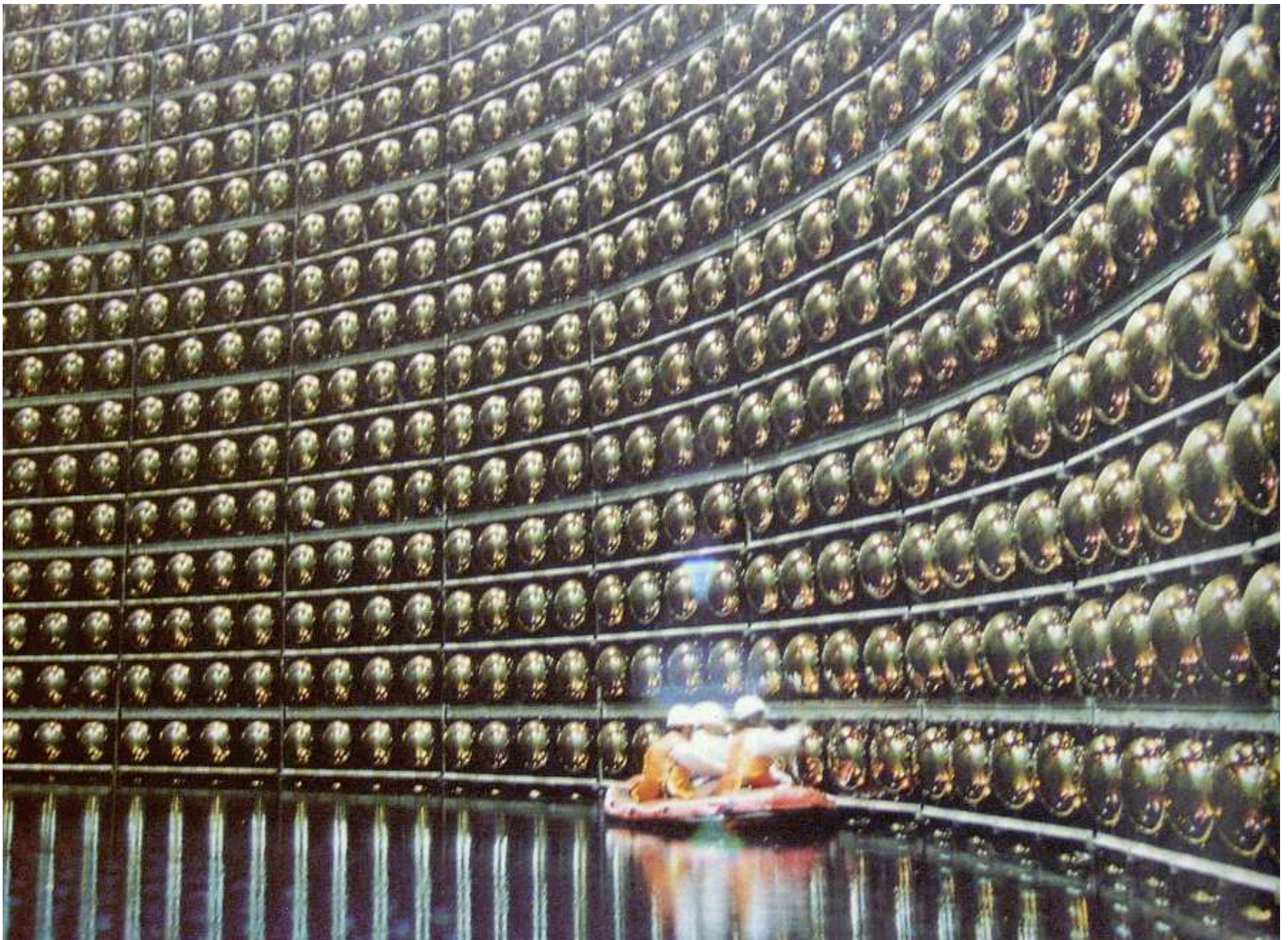
rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



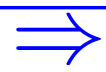
Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande





ATLAS



Super-Kamiokande

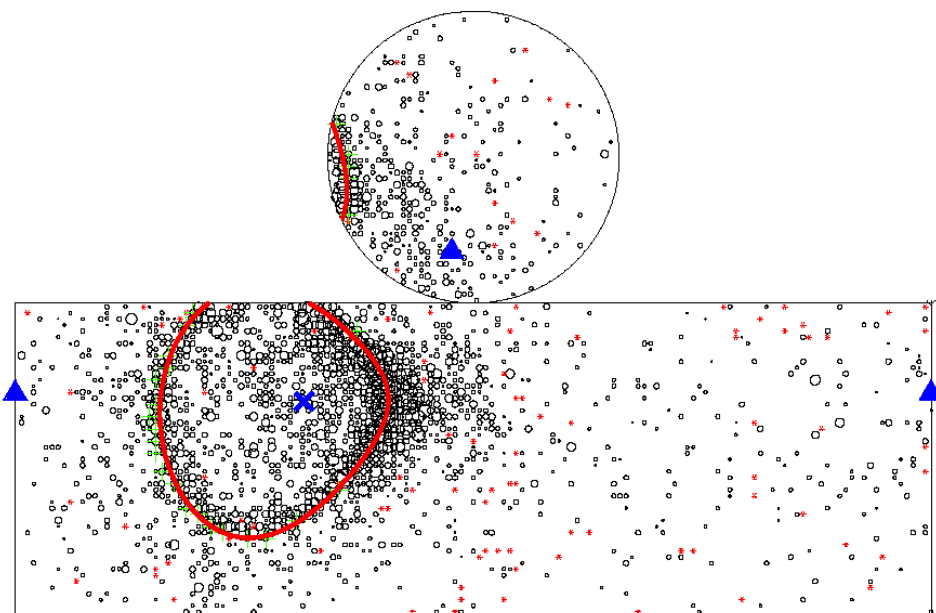
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

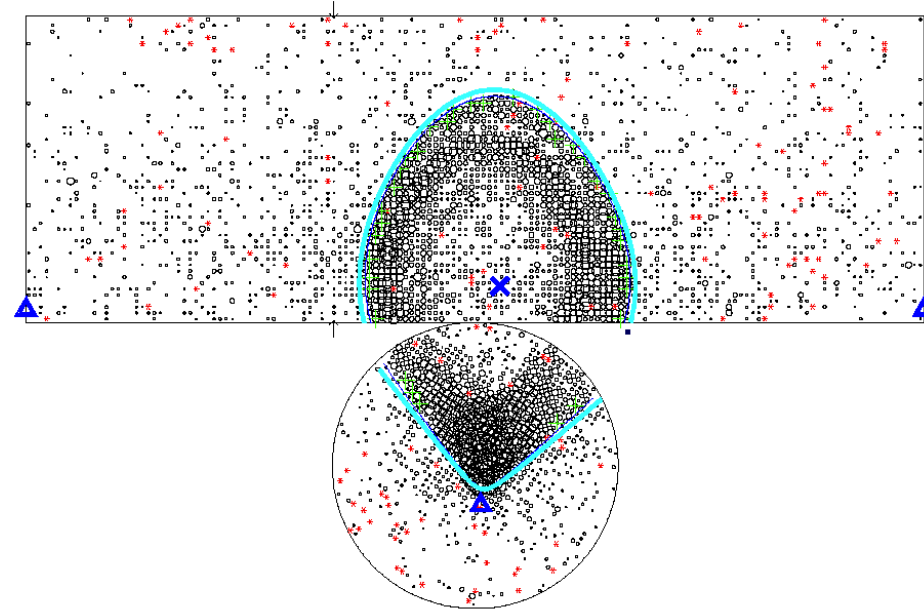


Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

“gruby” pierścień.



Detekcja cząstek

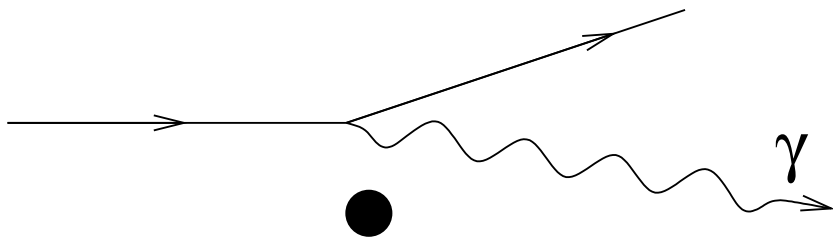
Kalorymetry

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

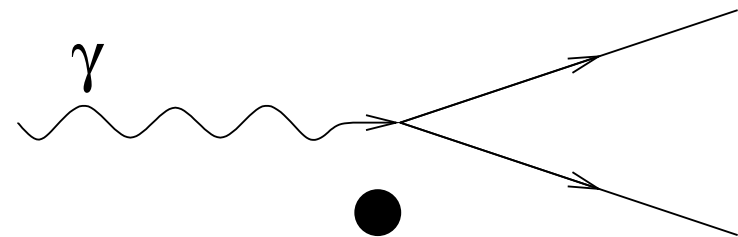
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi.

Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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



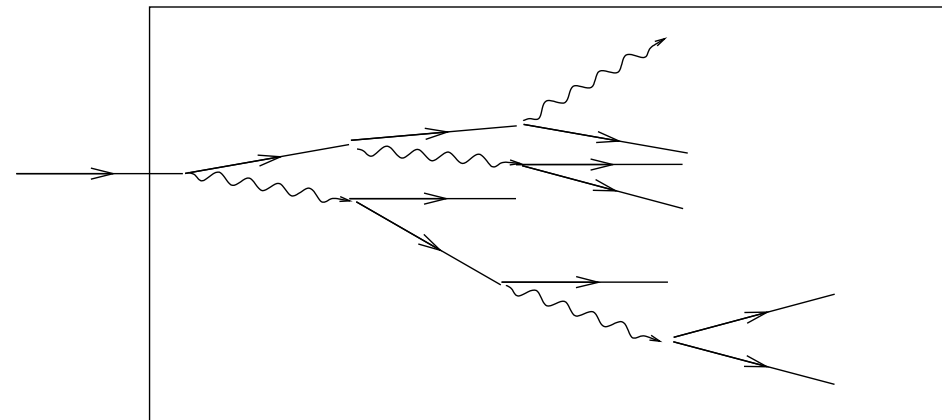
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

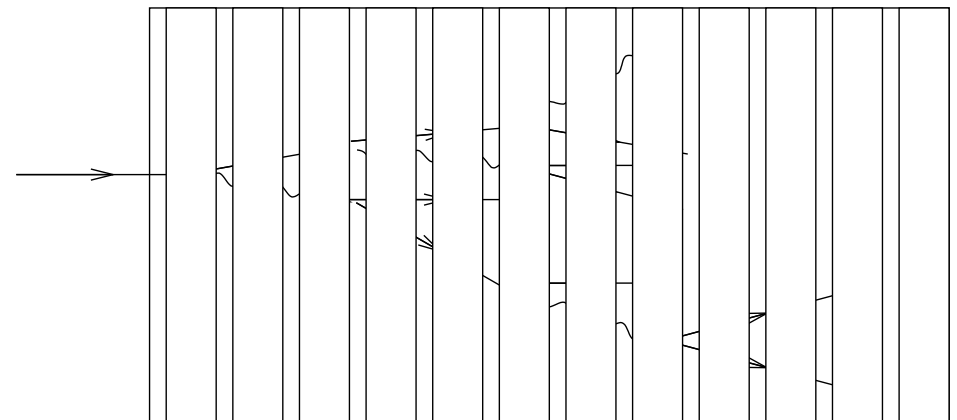
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowaną jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

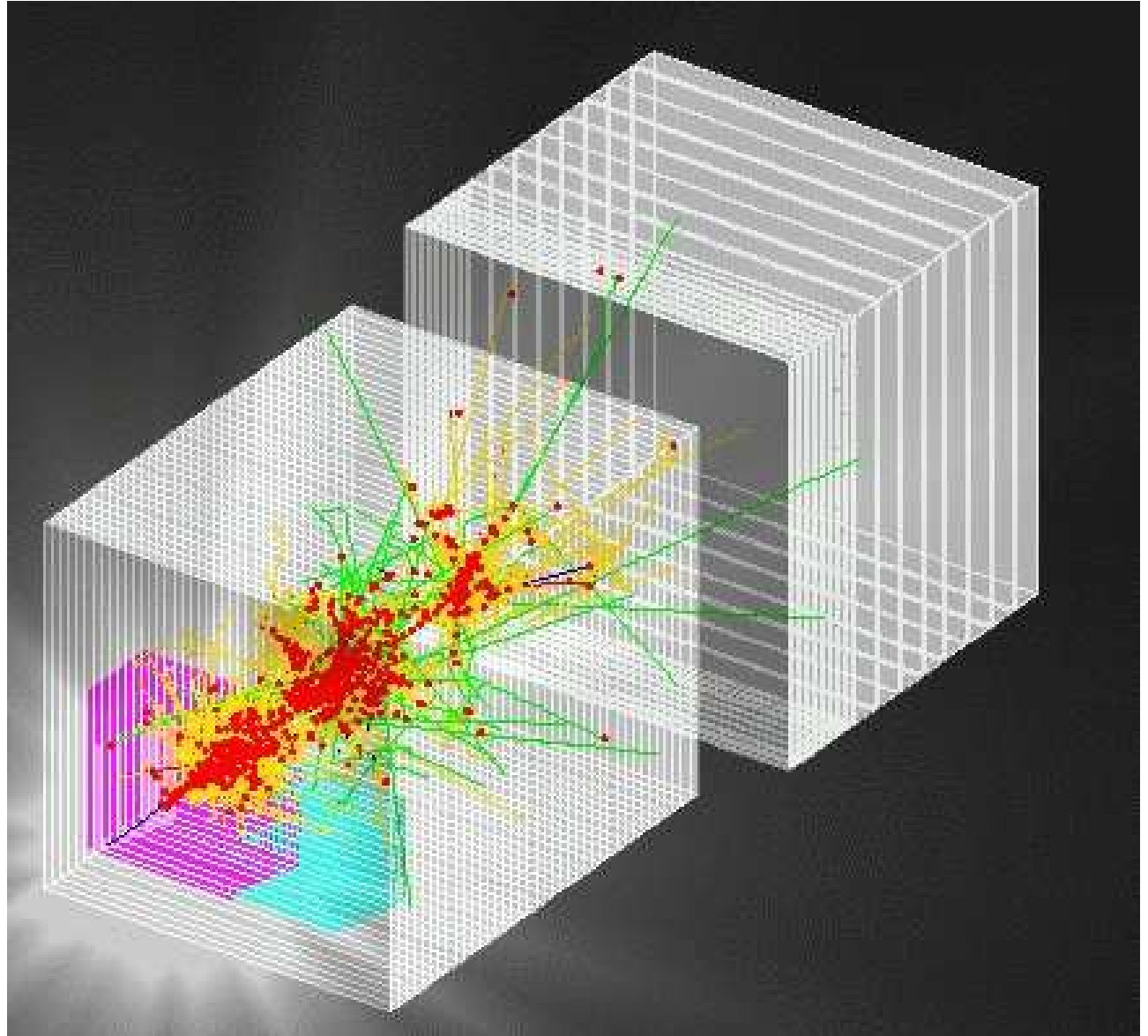
Kalorymetr próbkujący



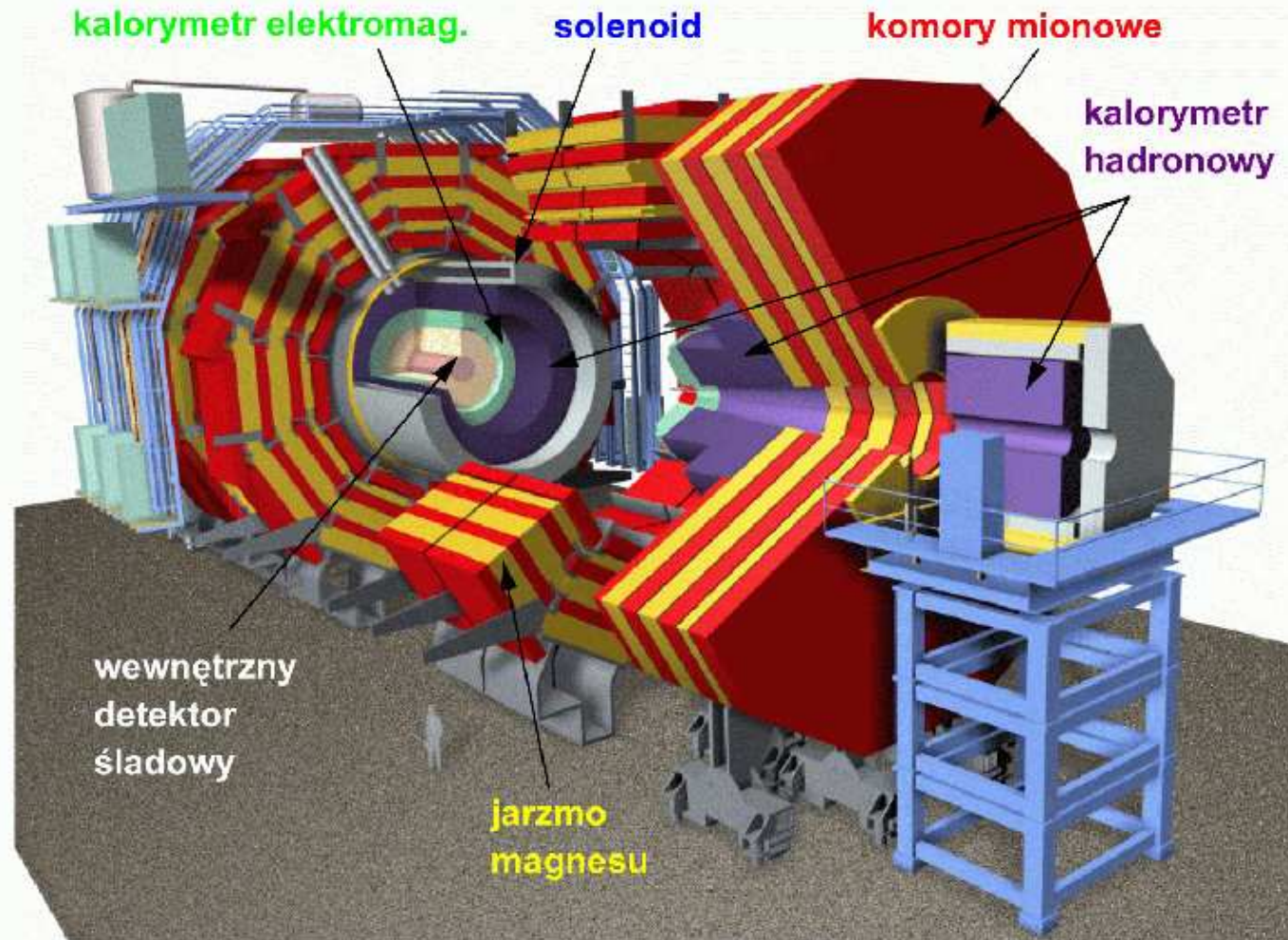
warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)



Compact Muon Solenoid



Compact Muon Solenoid

