

# Wszechświat cząstek elementarnych

Maria Krawczyk

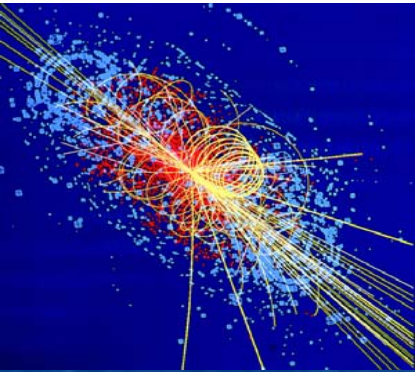
i

A. Filip Żarnecki

Instytut Fizyki Teoretycznej

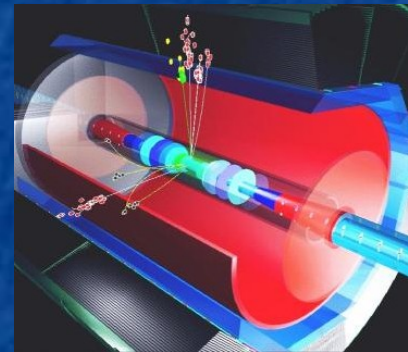
i

Instytut Fizyki Doświadczalnej



Wydział Fizyki UW  
semestr letni, rok akad. 2008/9

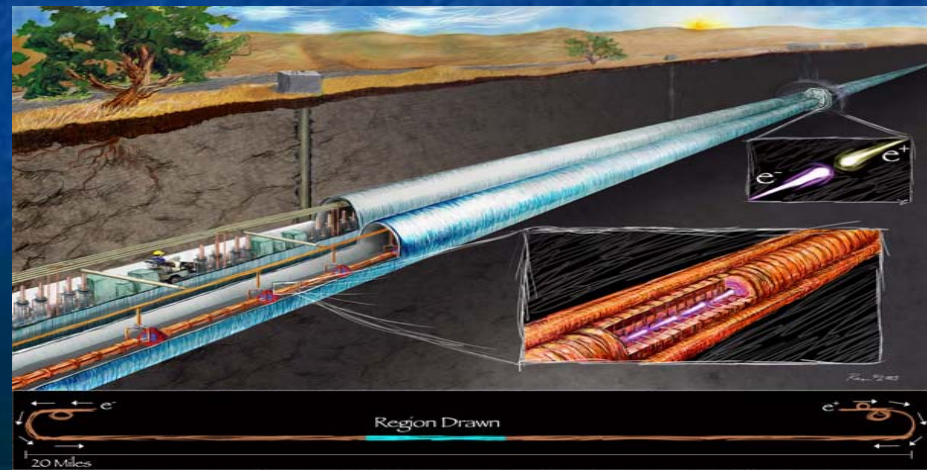
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/wce.html>



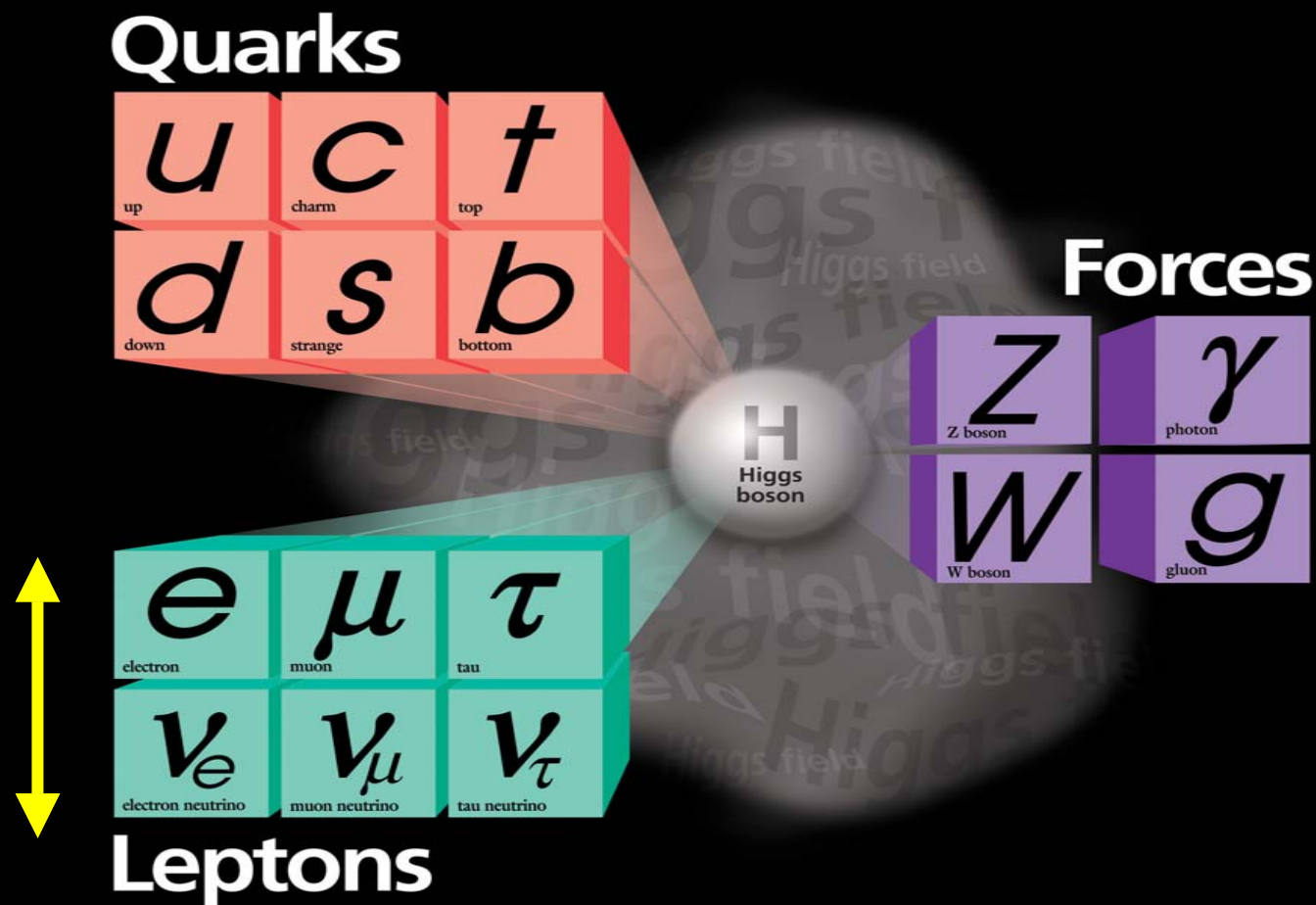
Large Hadron Collider



International Linear Collider



# 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

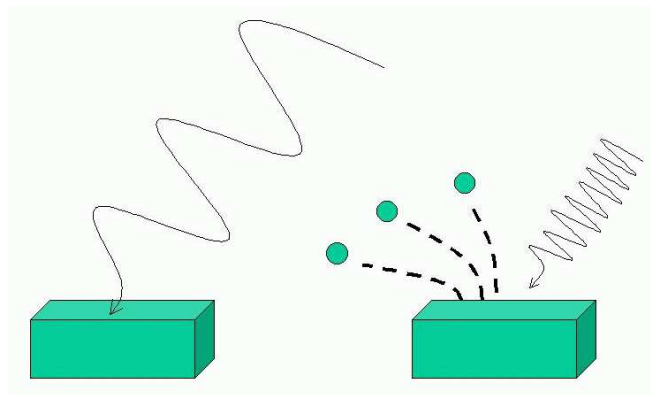


# Cząstki i fale

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

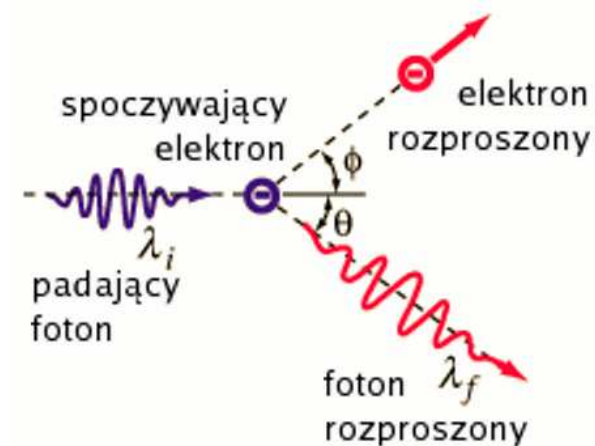


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

## Rozpraszanie Comptona

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

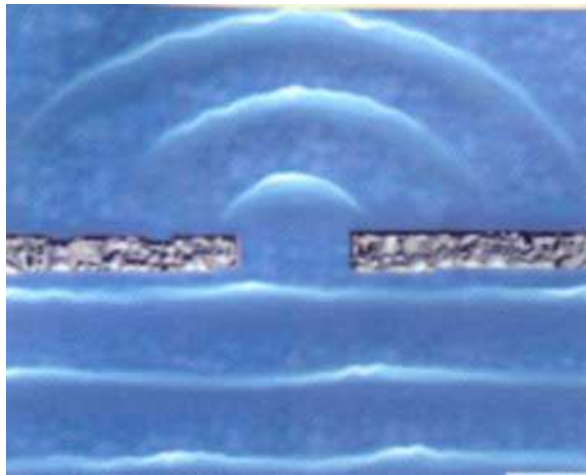


# Cząstki i fale

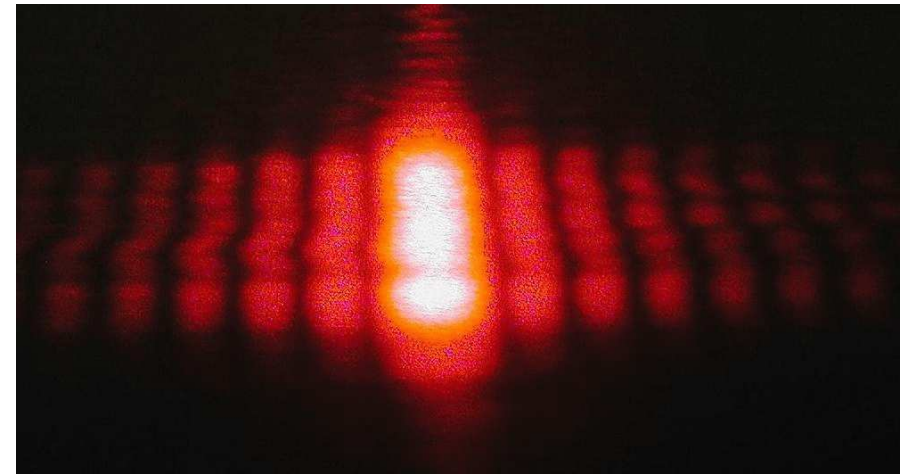
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.  
Świadczą o tym m.in. zjawiskodyfrakcji i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

***Fale na wodzie***



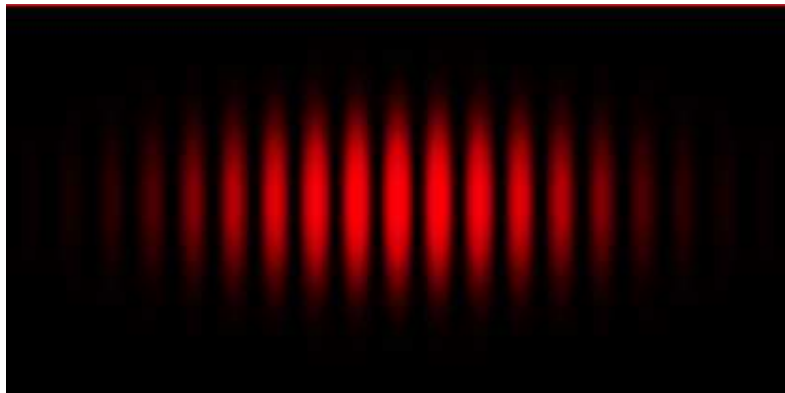
***Światło***



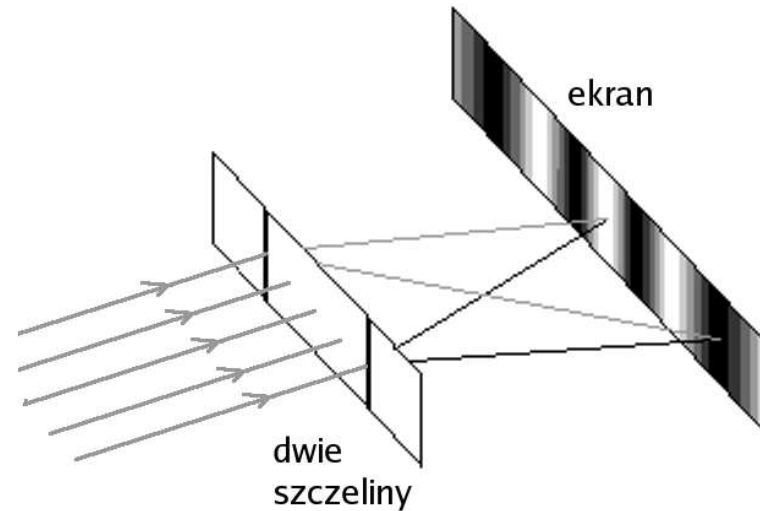
# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

## Światło



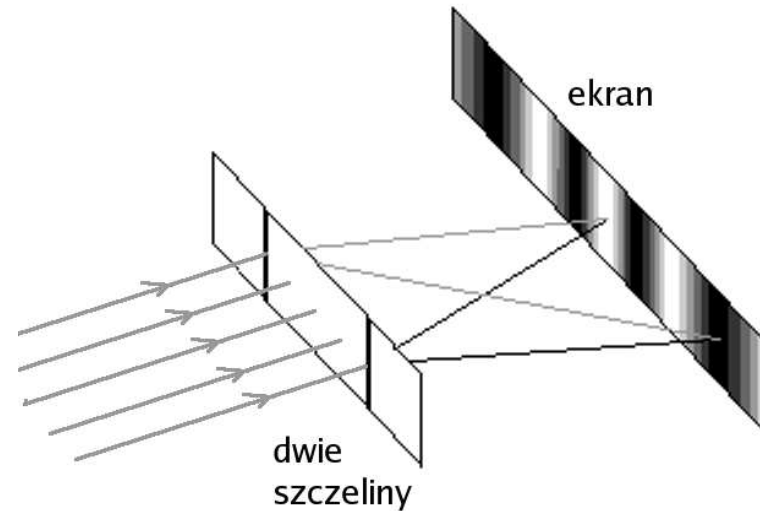
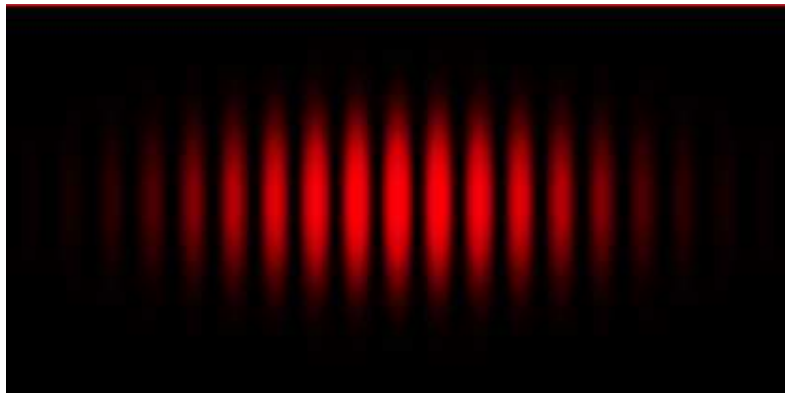
Złożenie **fal**  
⇒ **prążki interferencyjne**



# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

## Światło



Złożenie **fal**

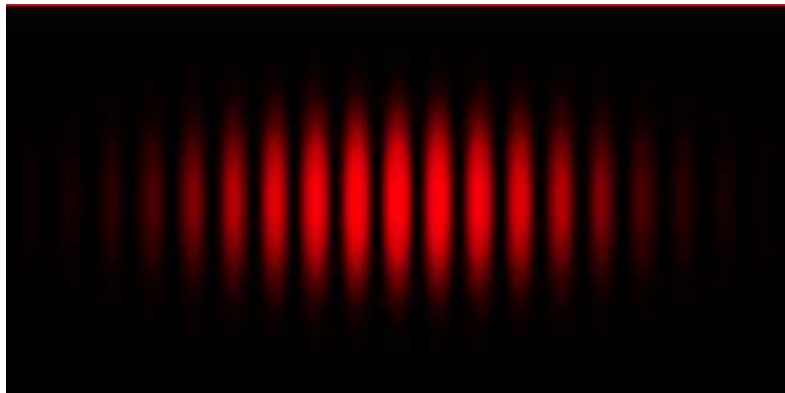
⇒ **prążki interferencyjne**

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

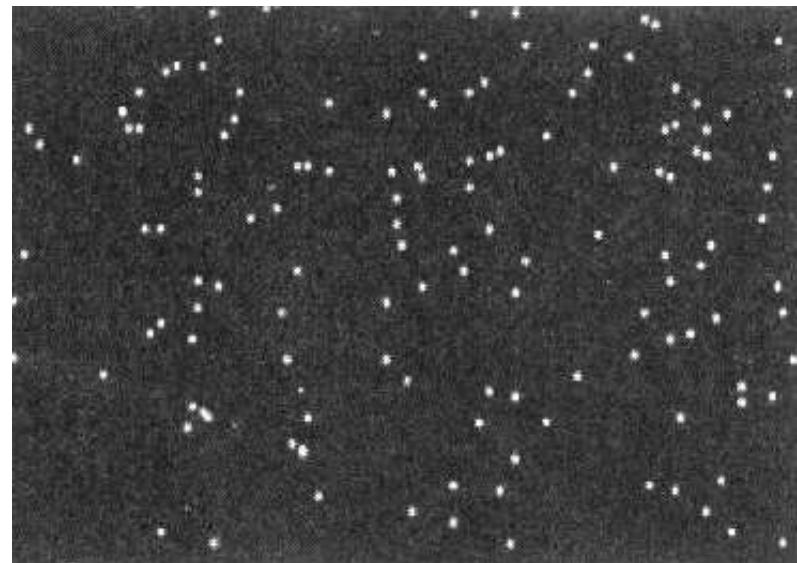
# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

**Światło**



**Elektrony**



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

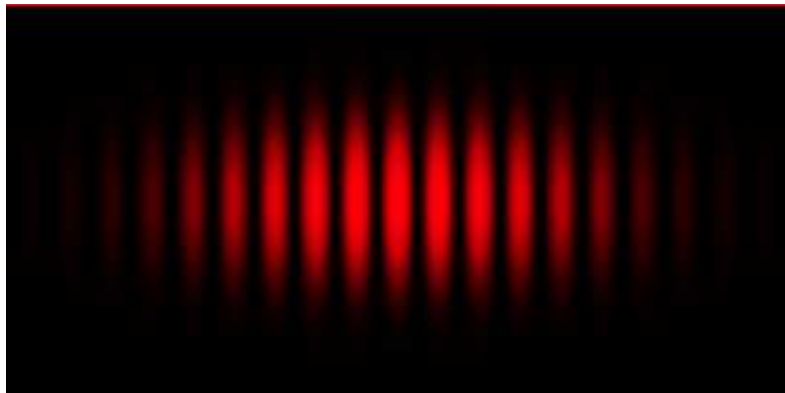
100 elektronów  
rozkład przypadkowy ?



# Cząstki i fale

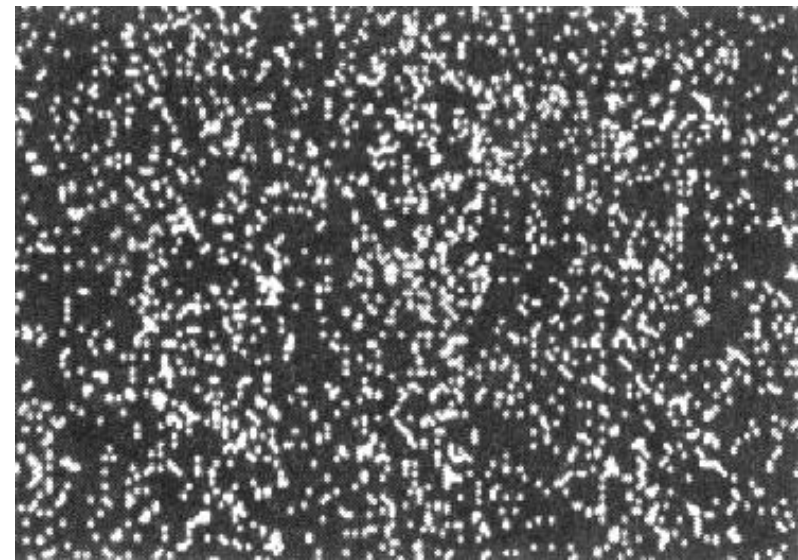
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

**Światło**



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

**Elektrony**

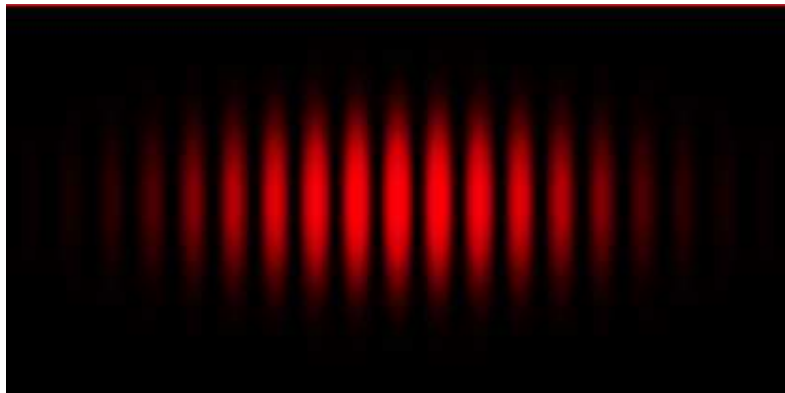


3000 elektronów

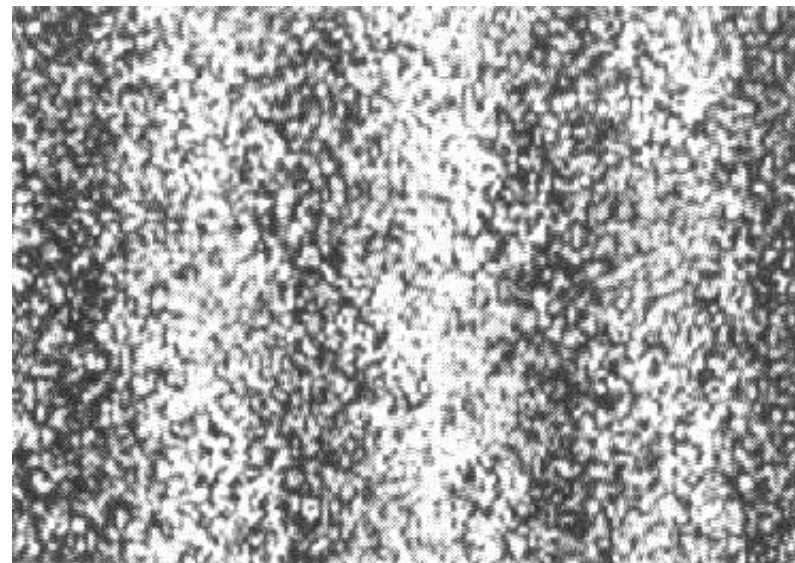
# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

**Światło**



**Elektrony**



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

70000 elektronów

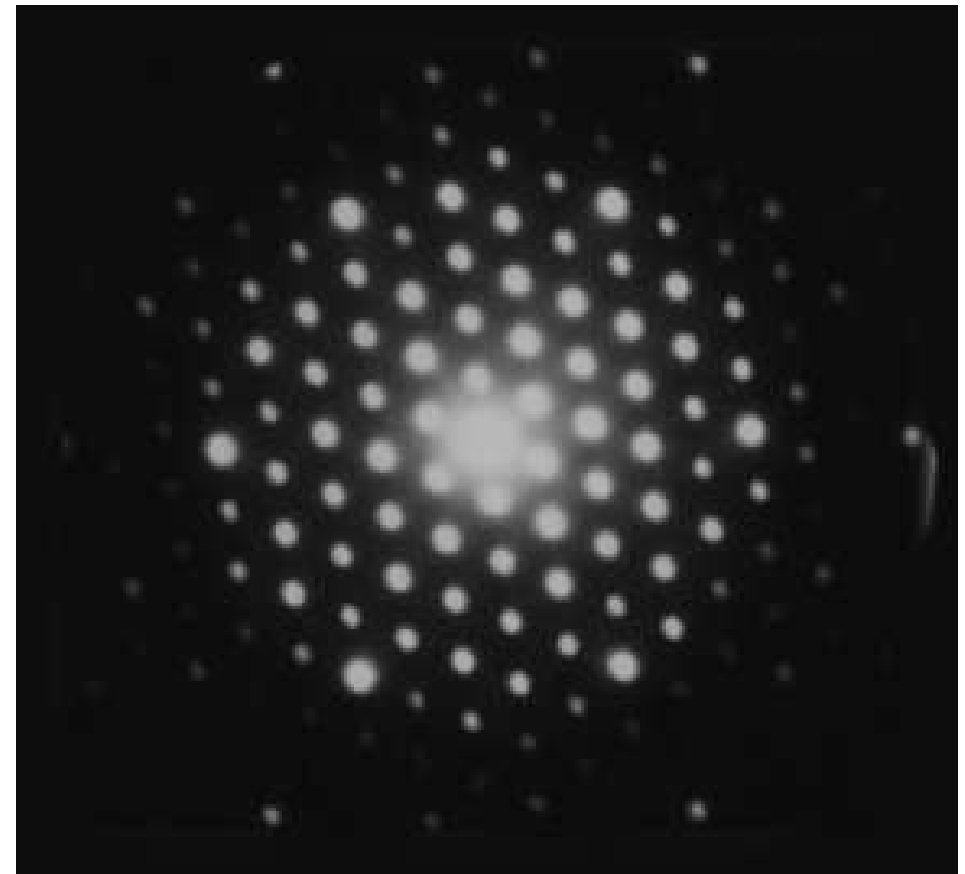
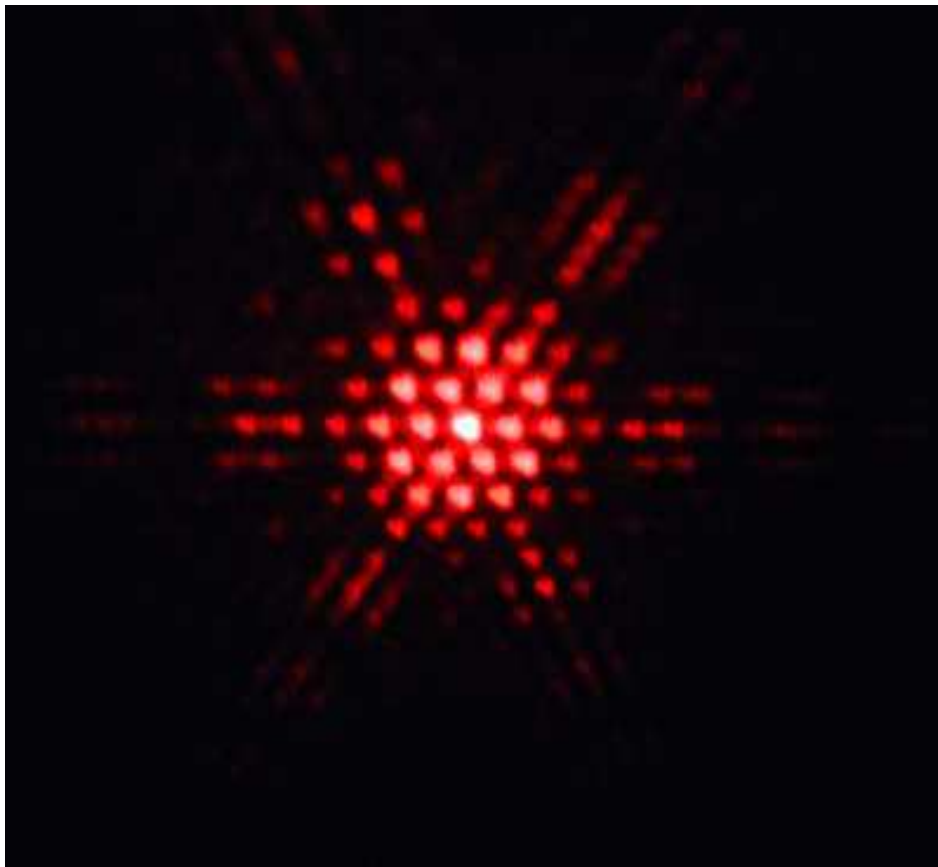
**Elektrony też zachowują się jak fale !**  
**Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.**

# Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

*Światło*

*Elektrony*

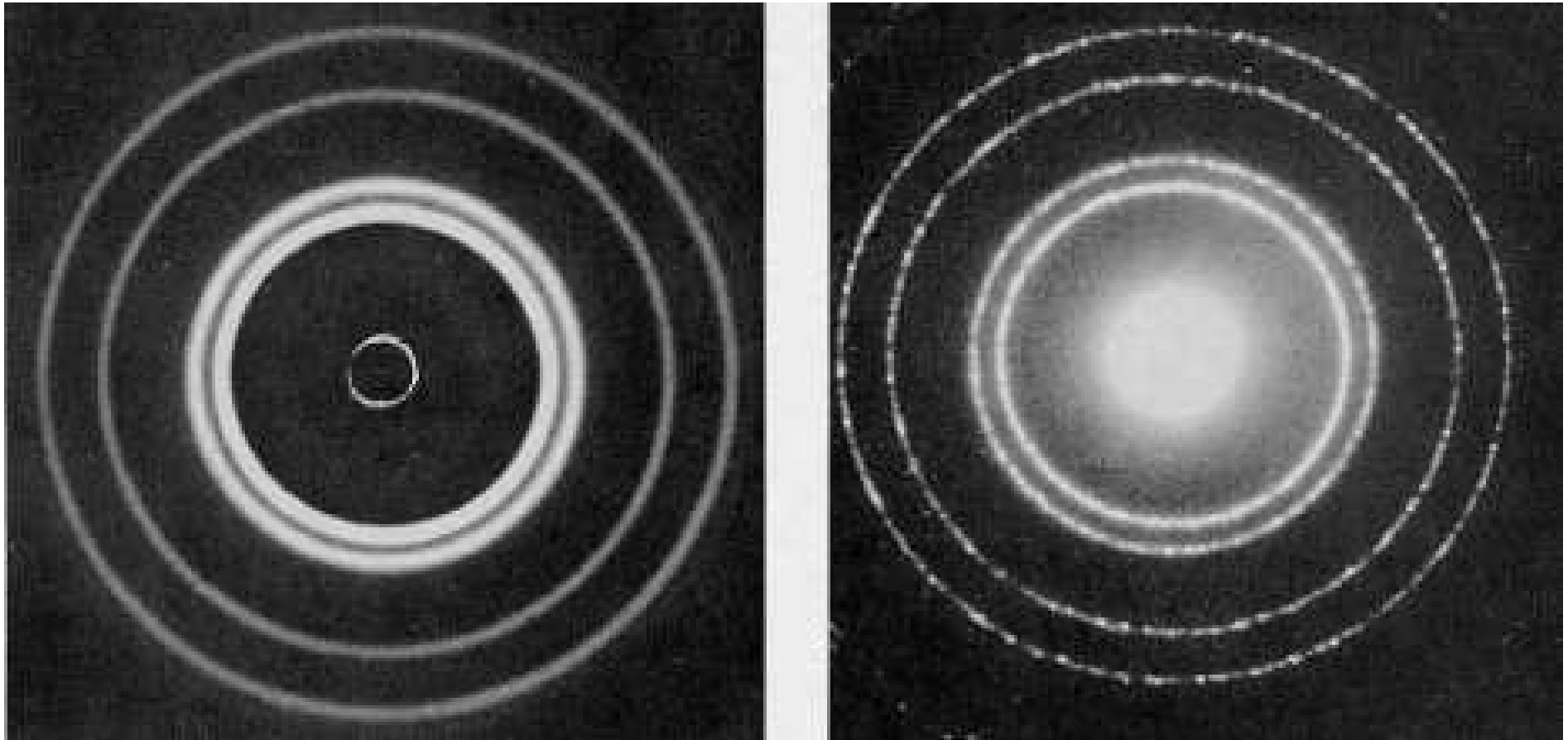


# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

*Promieniowanie X*

*Elektrony*



# Zdarzenia (przypadki, ang.events)

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

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

- 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

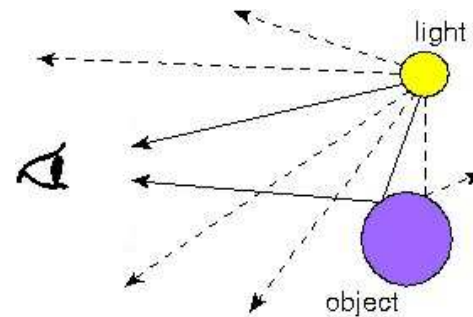
- Znikanie cząstek ale też ich powstawanie – to obserwuje się w doświadczeniach przy akceleratorach. Musimy zebrać dużo przypadków, aby dobrze mierzyć rozkłady różnych wielkości -> wnioskować o teorii

# Detekcja cząstek

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

# Wprowadzenie

## *Istota obserwacji*



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca obserwowanego procesu



# Wprowadzenie

## *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:

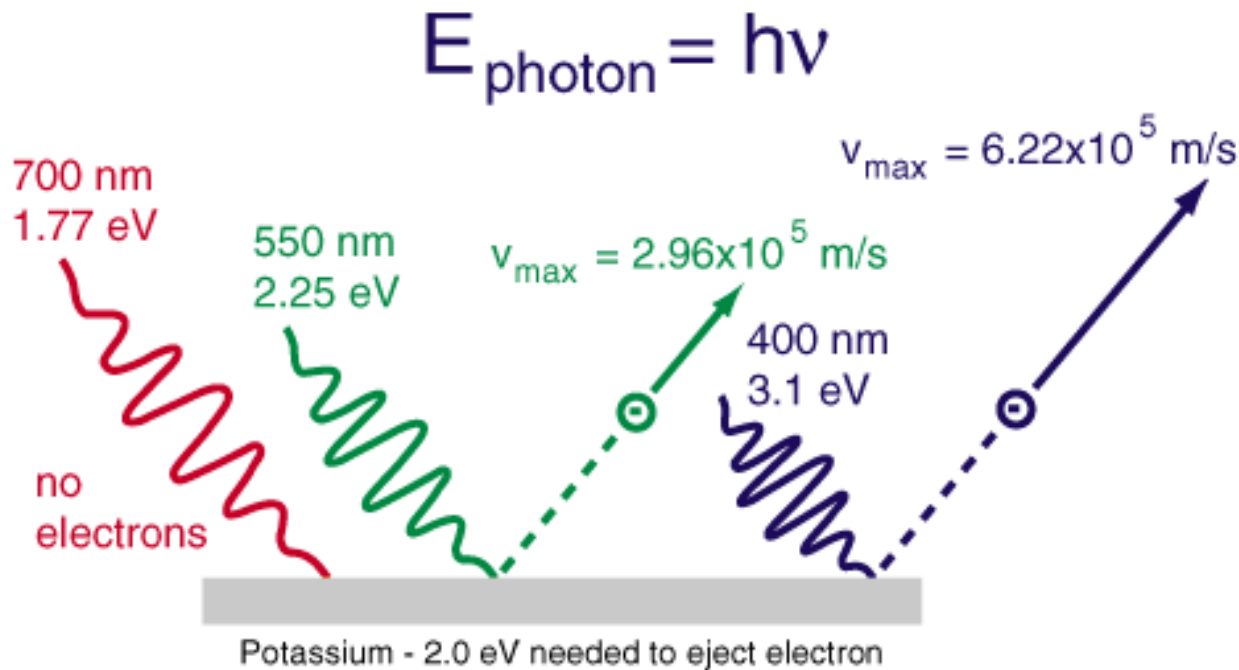
- efekt fotoelektryczny
- jonizacja i scyntylacja
- promieniowanie Czerenkowa



# Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887.

Padający foton uwalnia z powierzchni metalu elektron. W 1902 Philipp Lenard pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



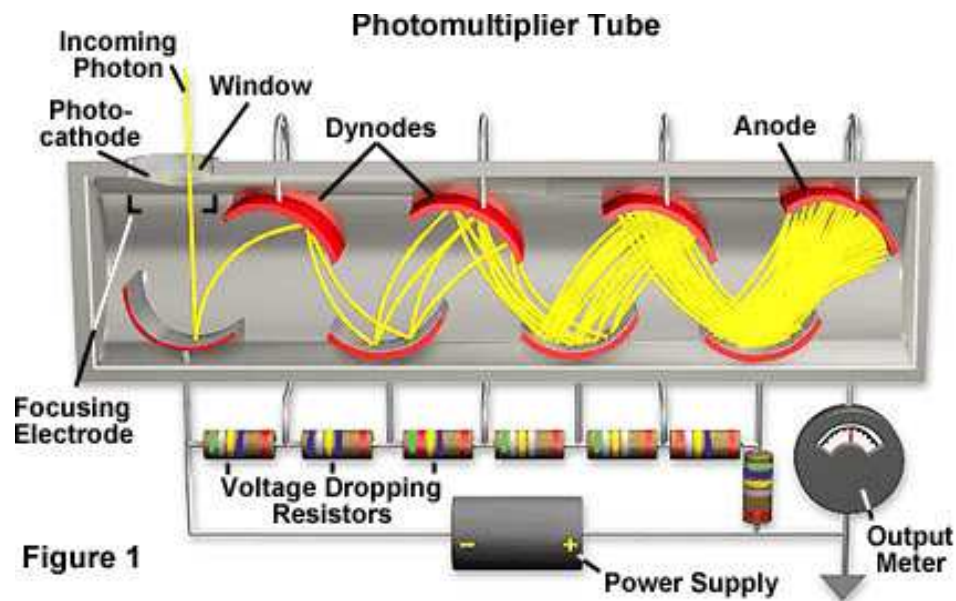
## Photoelectric effect



# Efekt fotoelektryczny

## Fotopowielacz

Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek.

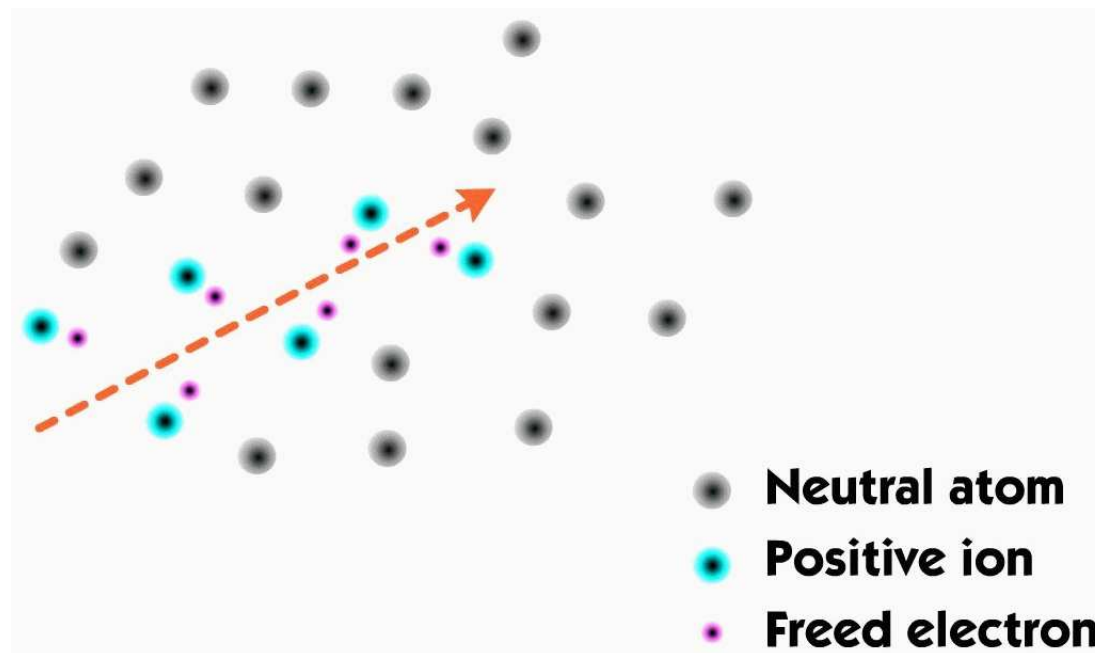


Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

# Detekcja cząstek

## **Jonizacja**

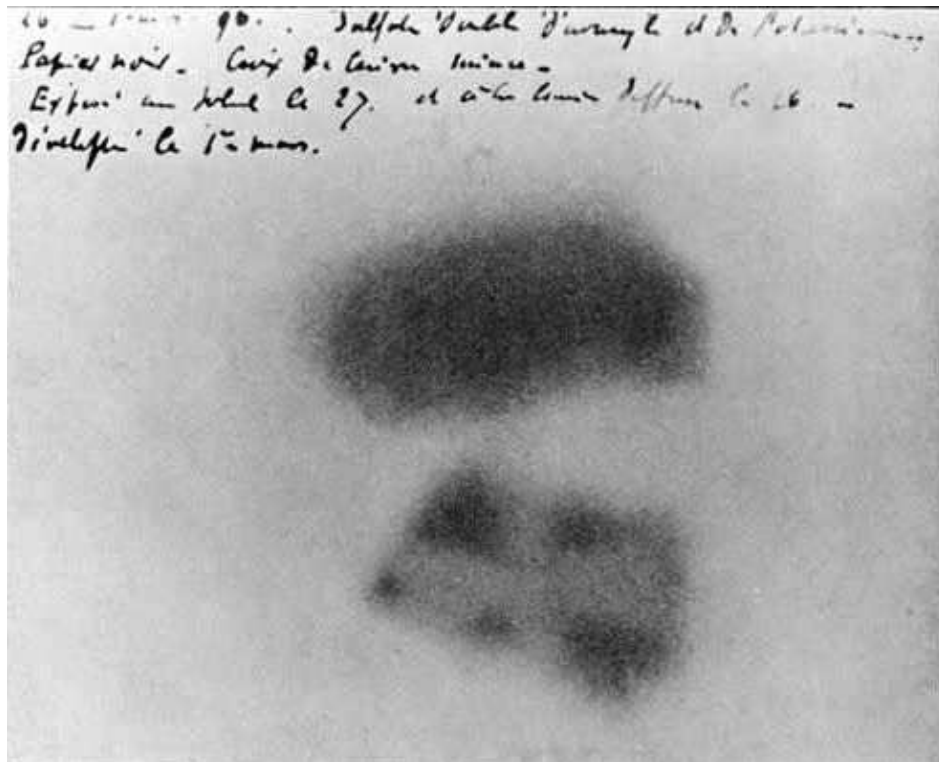
U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:



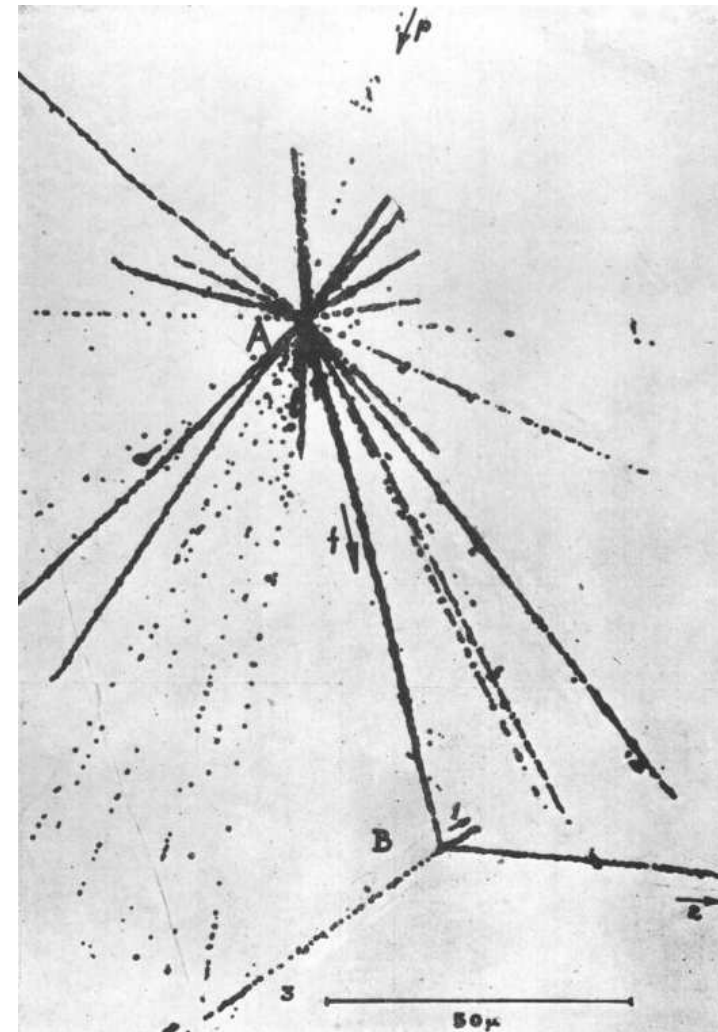
**Cząstka naładowana** przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów.

# Detekcja cząstek

## Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

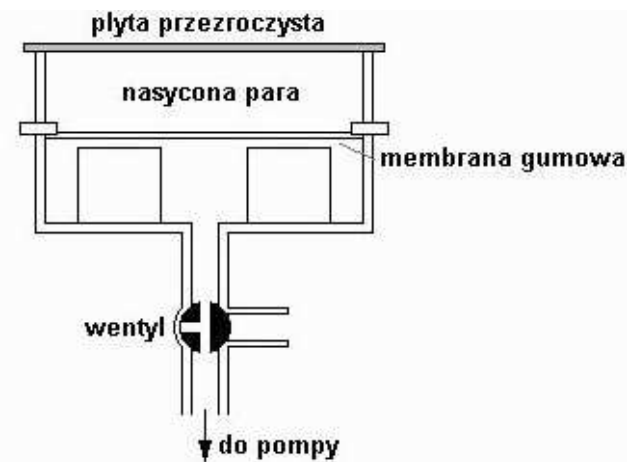
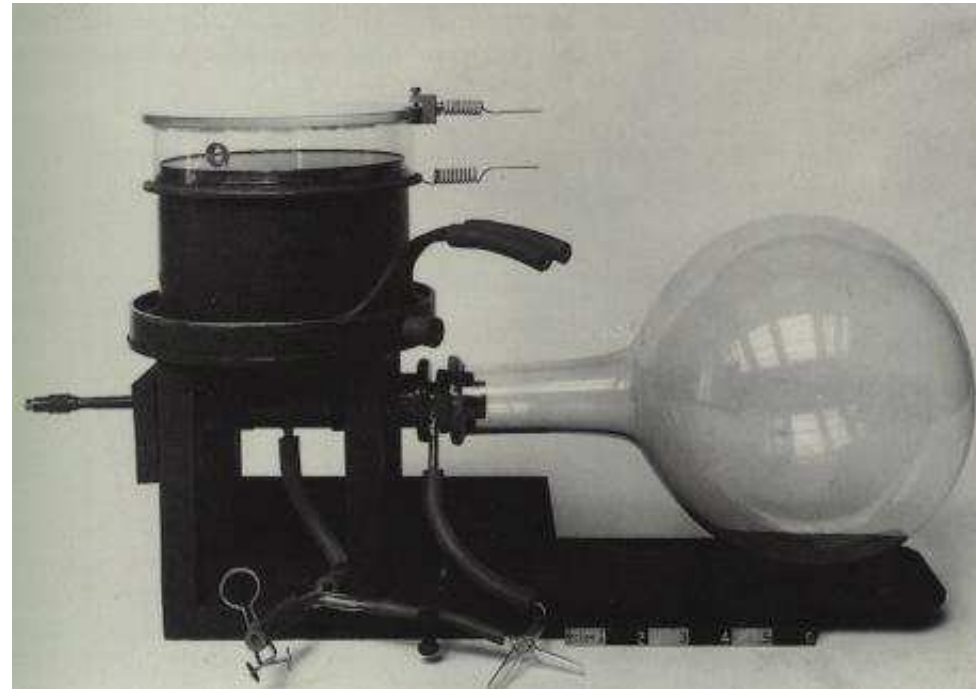


M. Danysz i J. Pniewski, 1953

# Detekcja cząstek

## Komora Wilsona

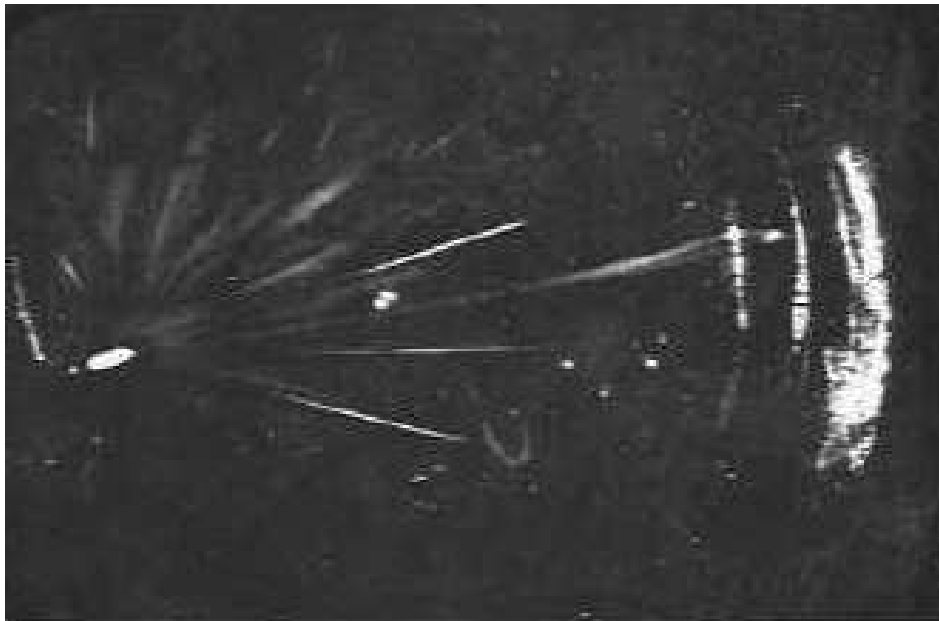
Charles Wilson, 1911



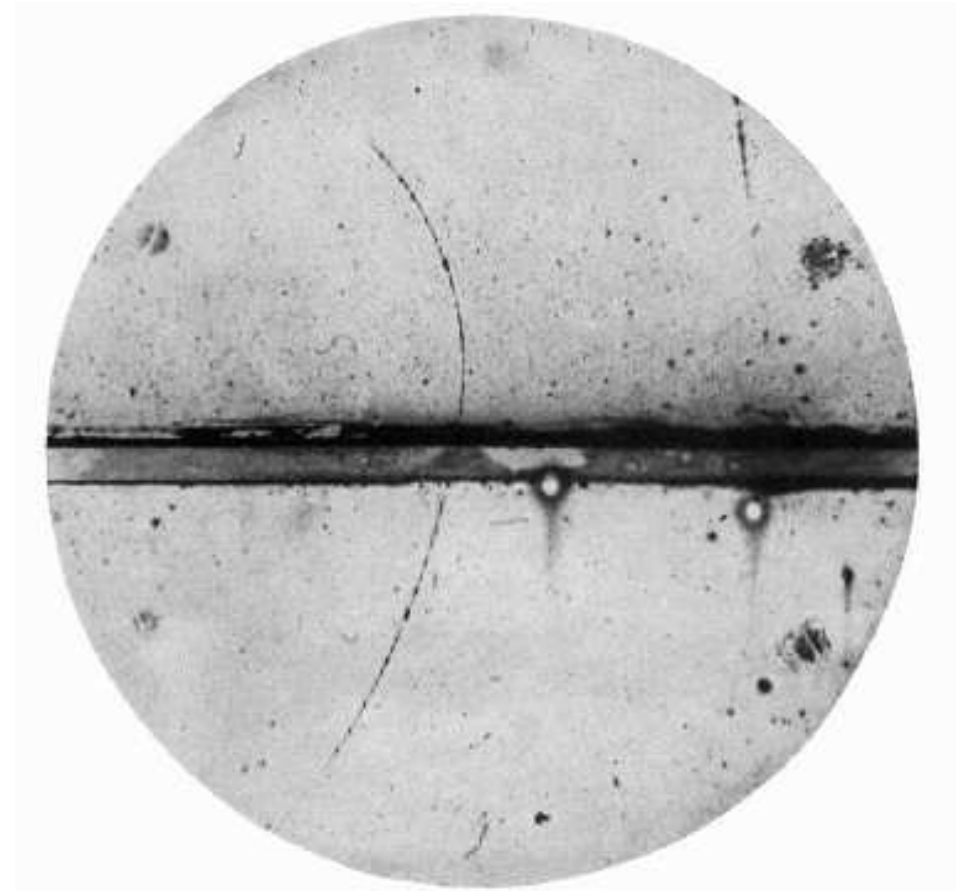
# Detekcja cząstek

## *Komora Wilsona*

Charles Wilson, 1911



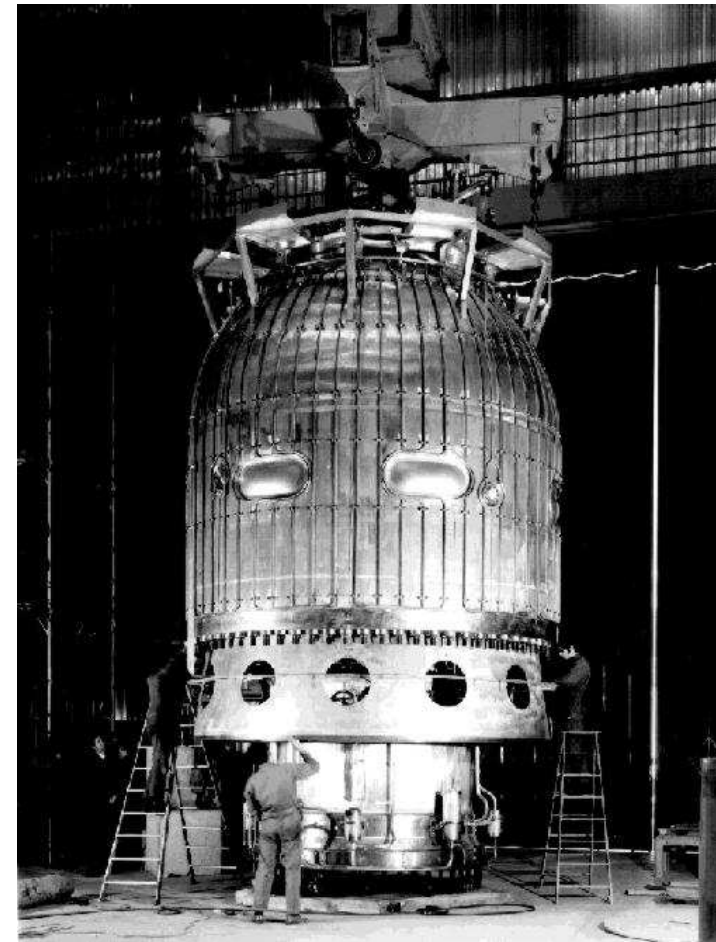
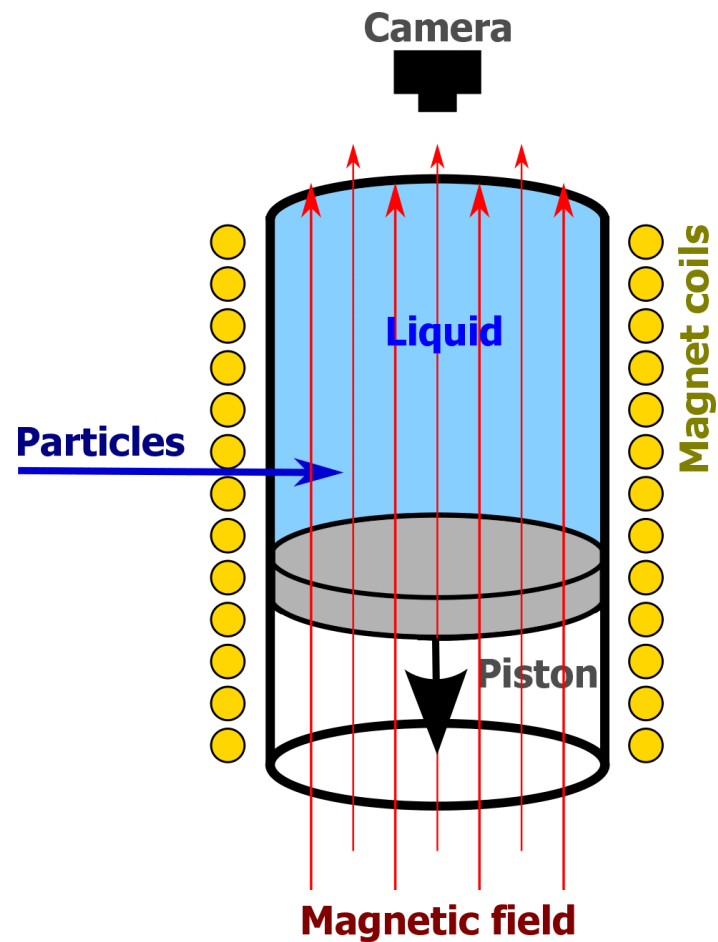
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

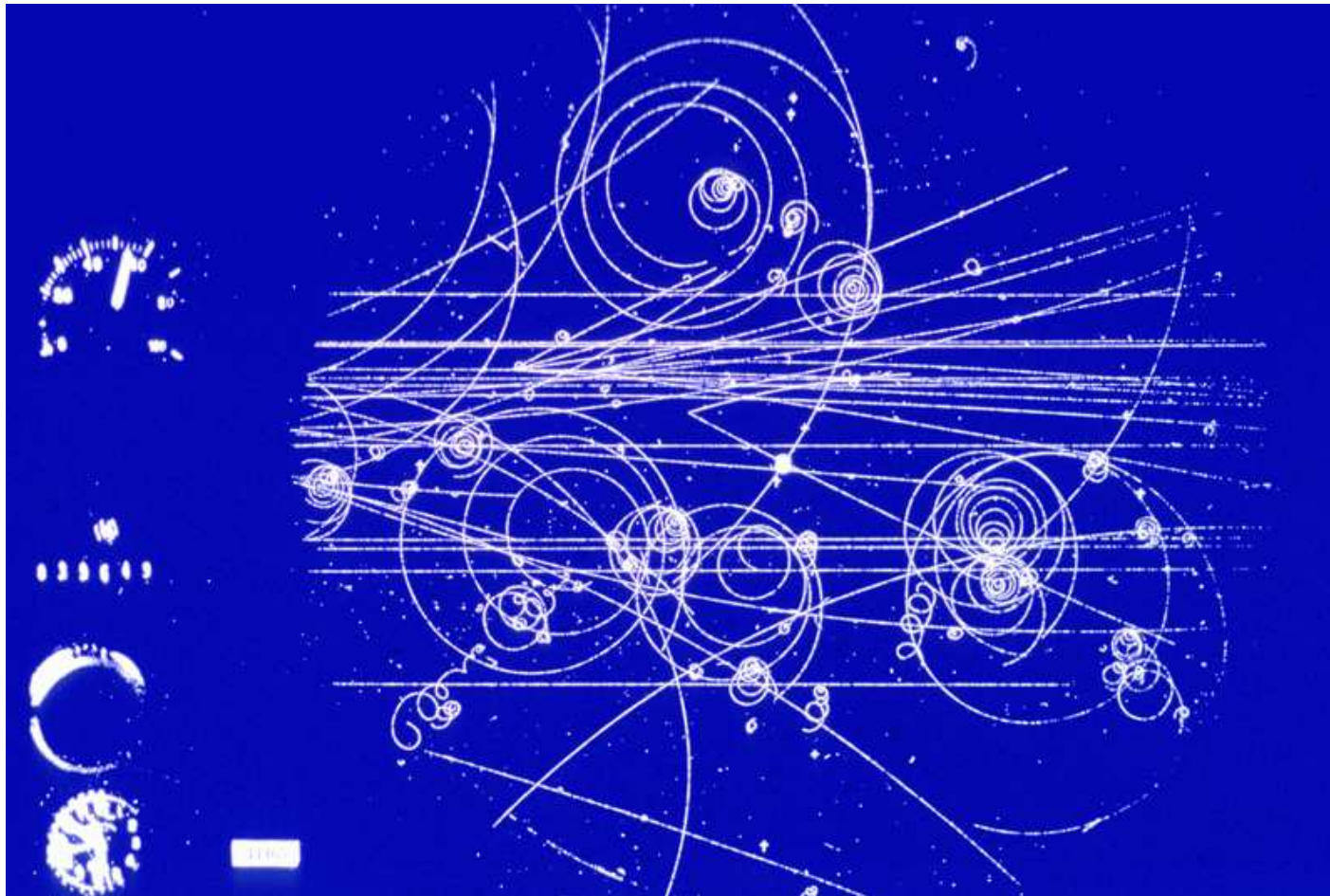
# Detekcja cząstek

## Komora pęcherzykowa, 1952



# Detekcja cząstek

## Komora pęcherzykowa



Cząstki wiązki oddziałują z cząstkami cieczy - "tarczy".

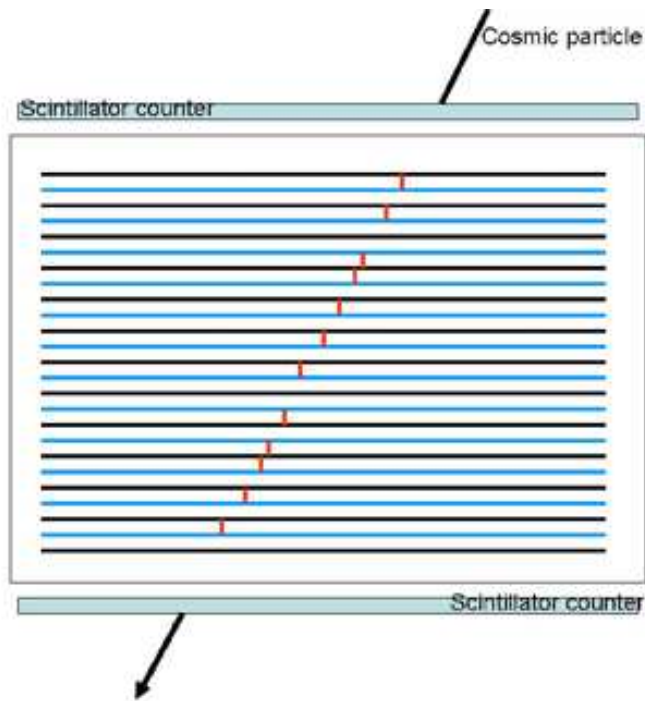




# Detekcja cząstek

## **Komora iskrowa**

Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



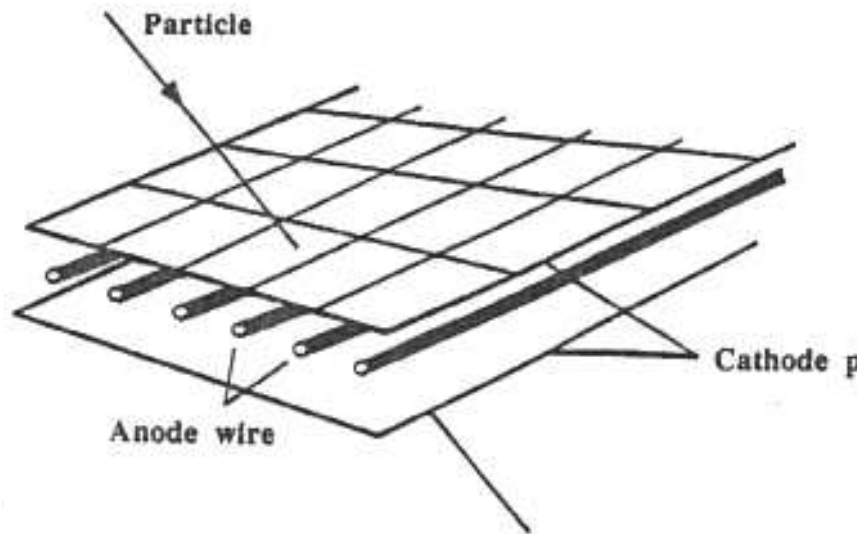
Możliwość wyboru zdarzeń  
(sterowanie napięciem)



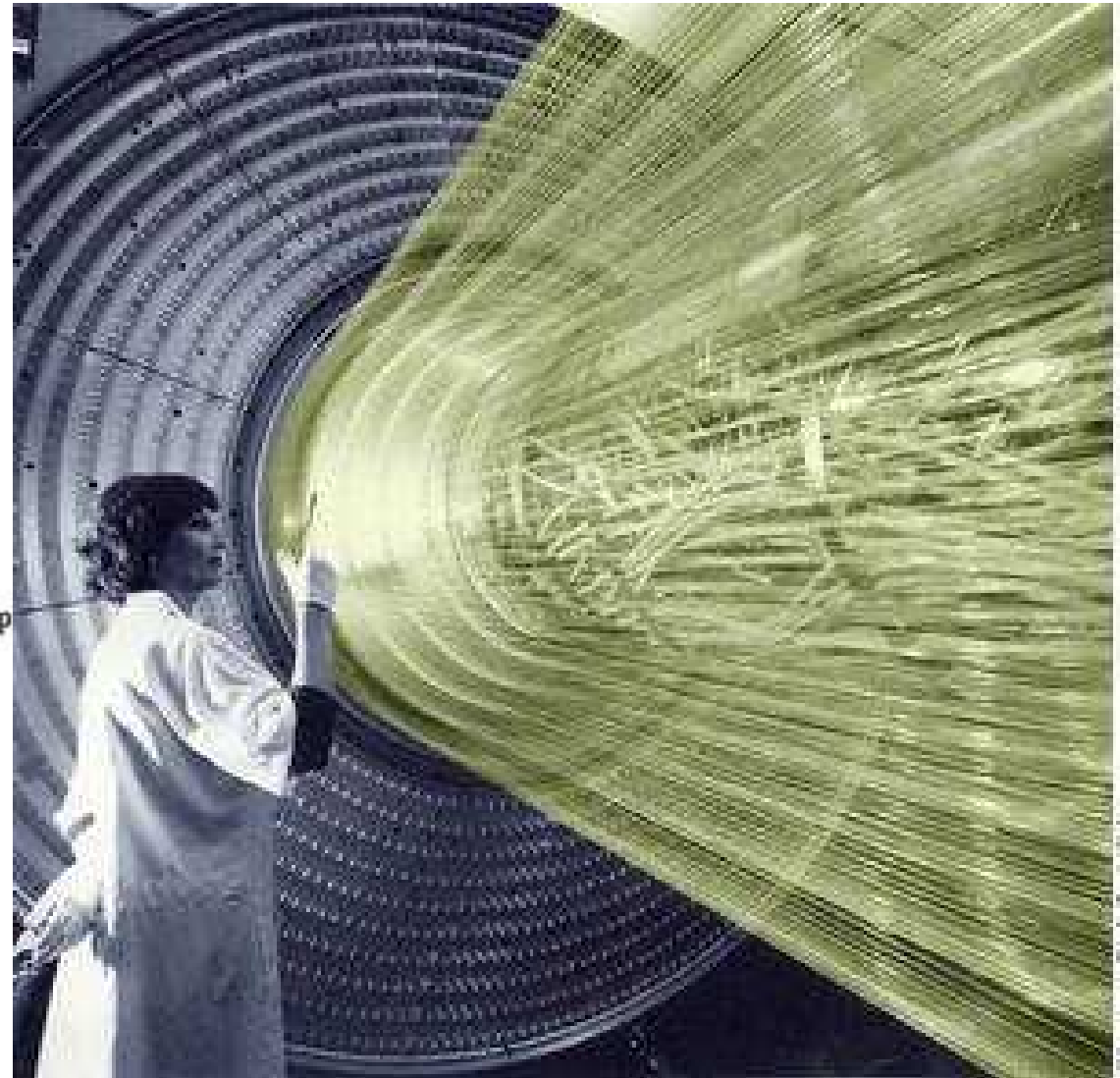
# Detekcja cząstek

## **Komora wielodrutowa**

Georges Charpak 1970  
(Nobel 1992)



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



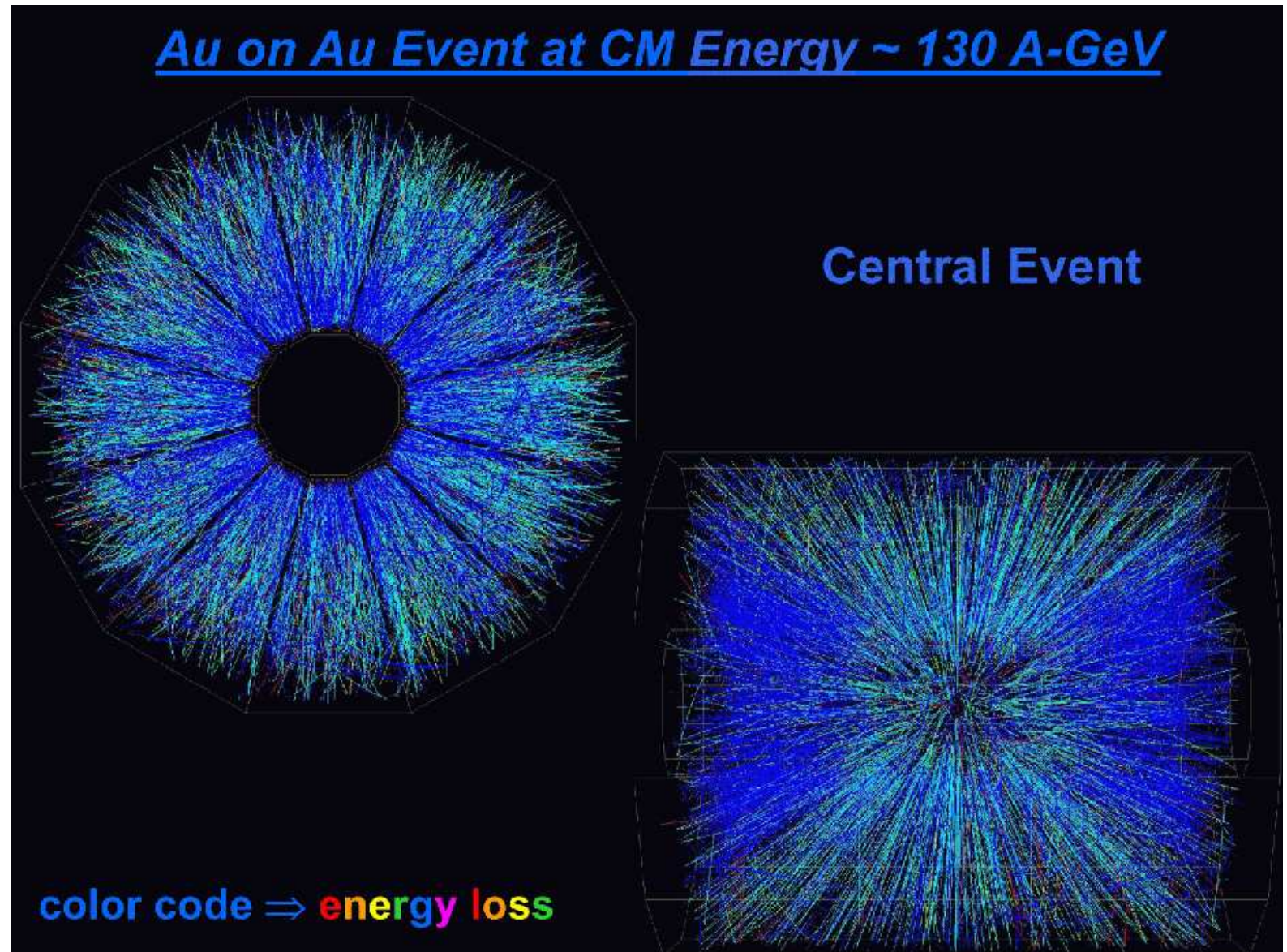
# Detekcja cząstek

## TPC

Komora  
projekcji  
czasowej

Przypadek  
zderzenia  
ciężkich  
jonów

detektor  
STAR  
przy RHIC



# Detekcja cząstek

## Detektory półprzewodnikowe

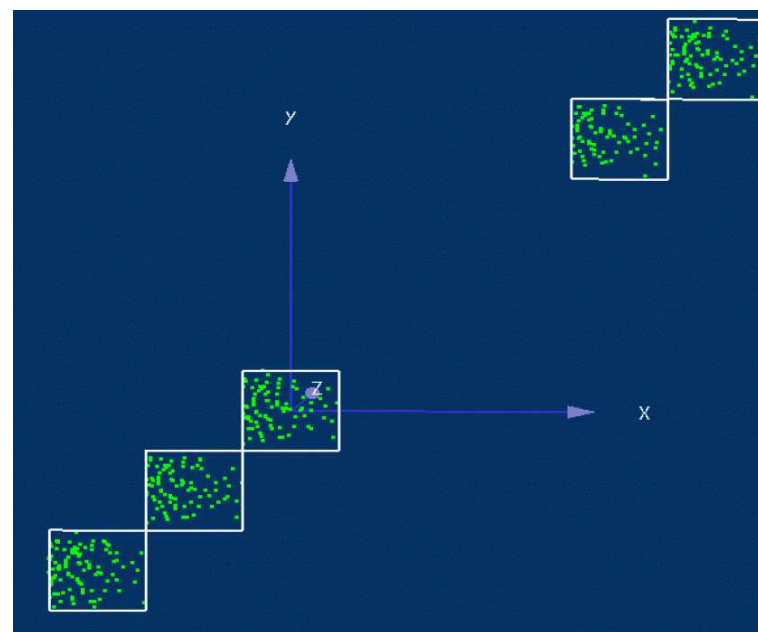
Coraz powszechniej używane.

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



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

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



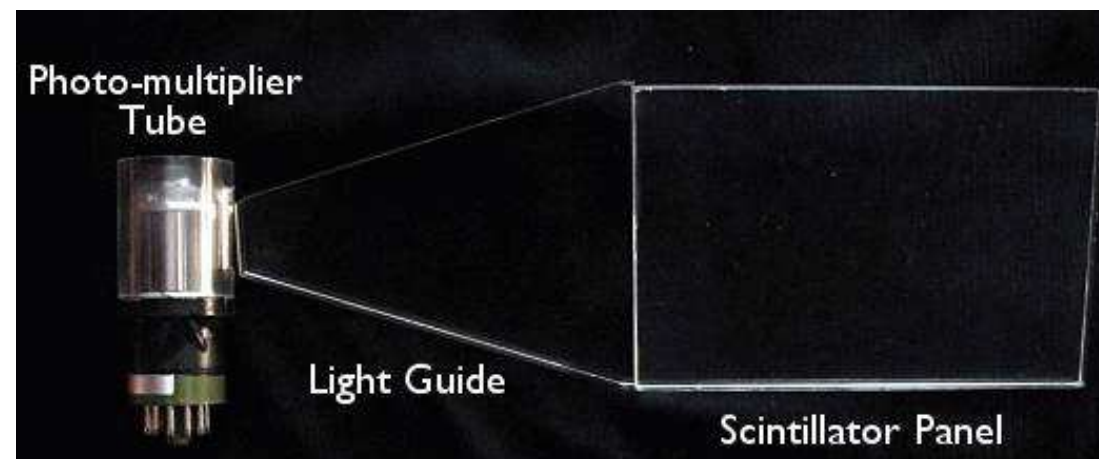
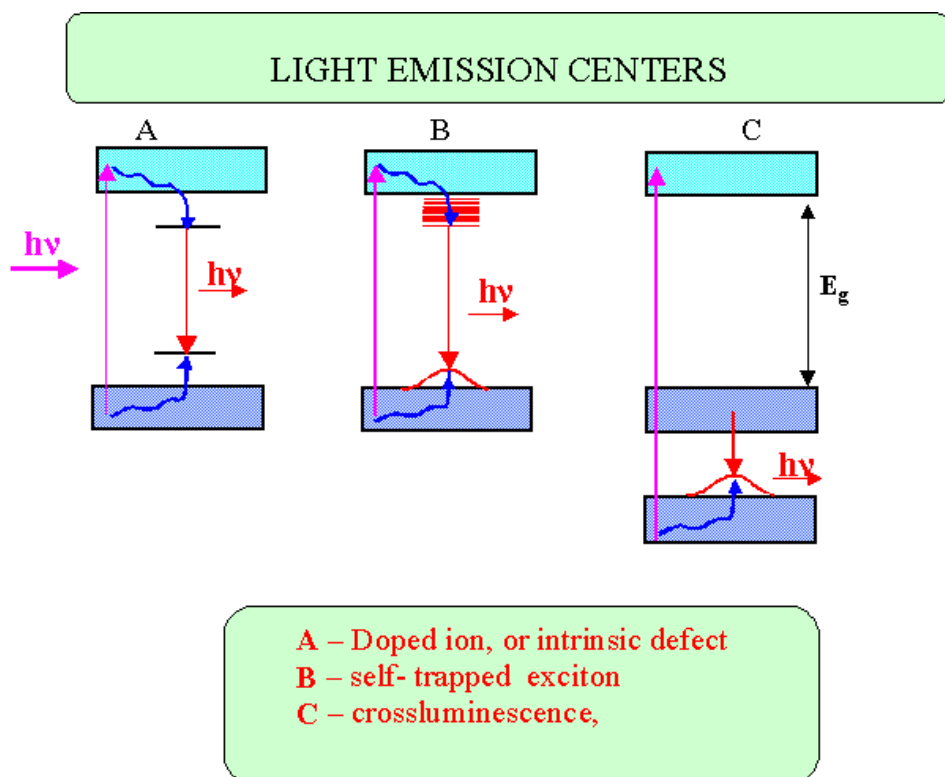
Niestety wciąż drogie...

# Detekcja cząstek

## Scyntylacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

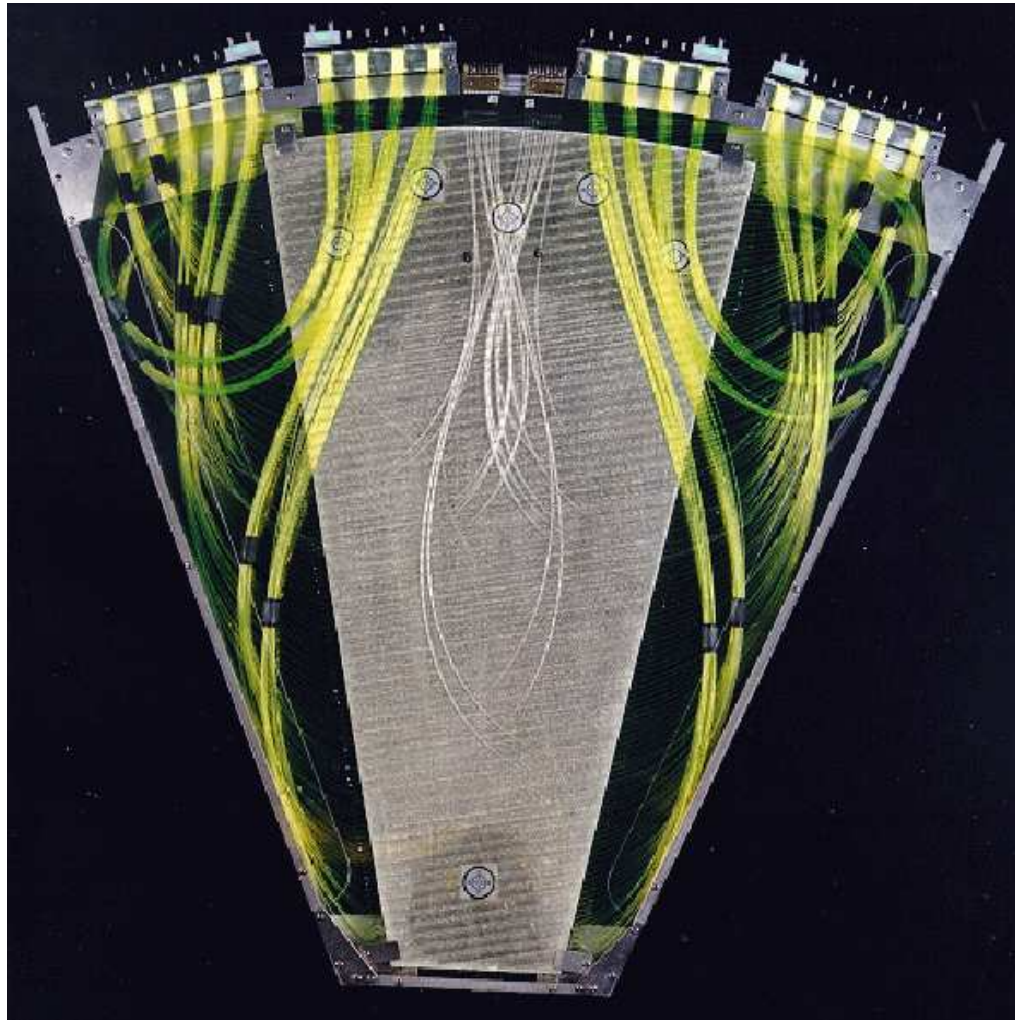
Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza



Brak pomiaru pozycji  
Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki

# Detekcja cząstek

## Detektory scyntylacyjne

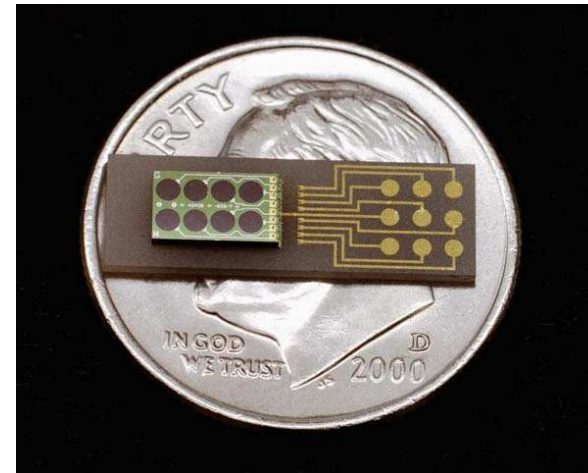


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

← włókna scyntylujące,

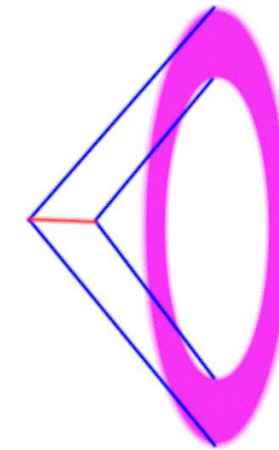
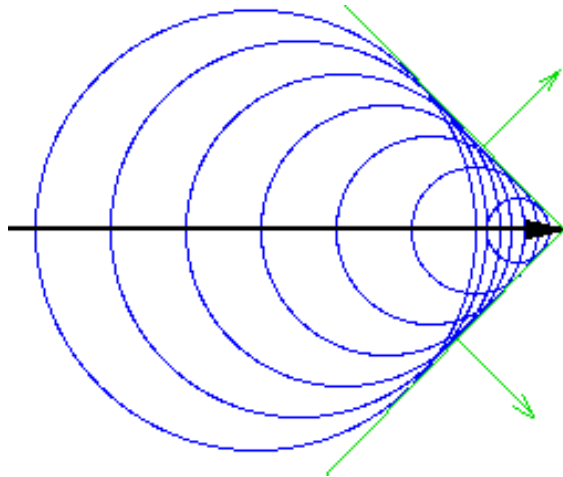
↓ fotonowielacze krzemowe.



# 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

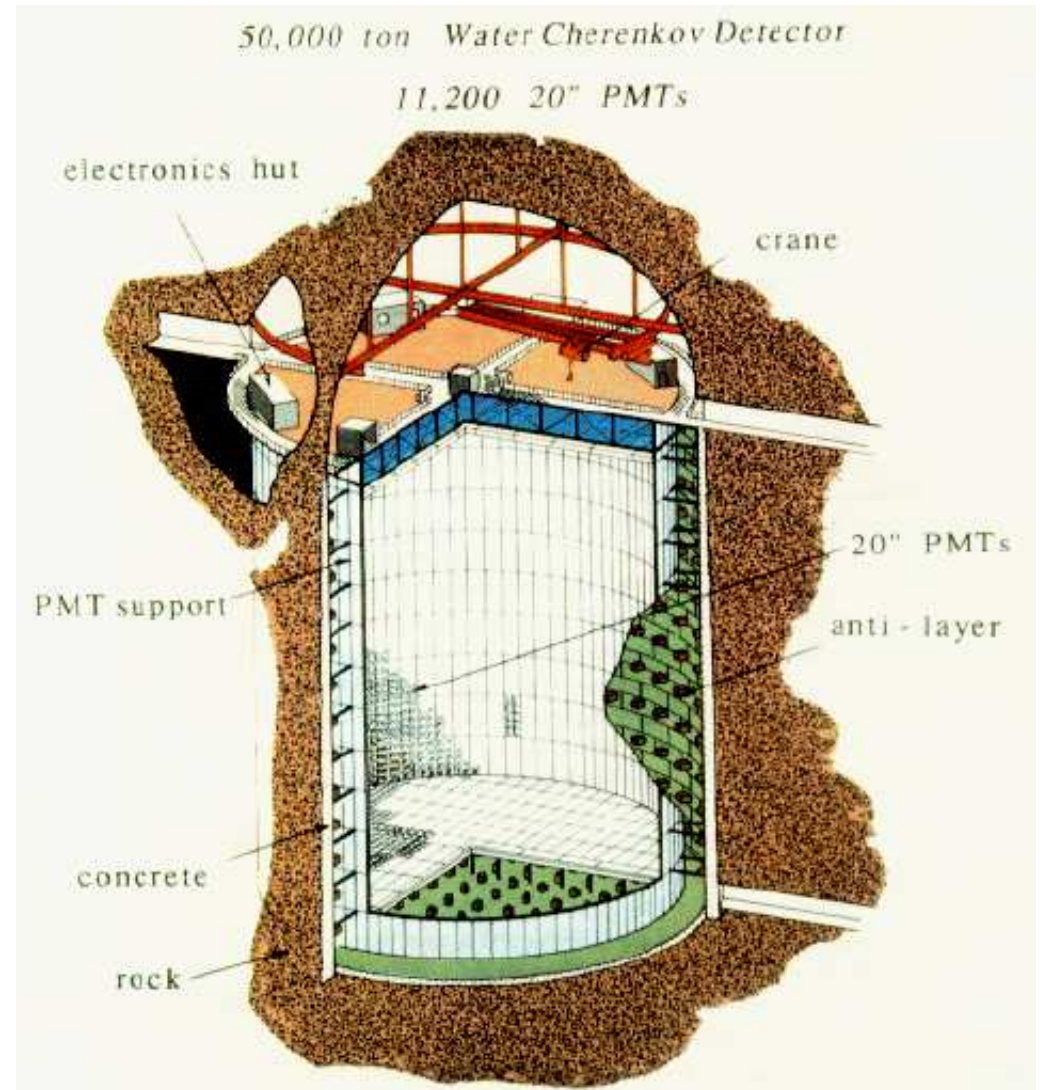
## **Super-Kamiokande**

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

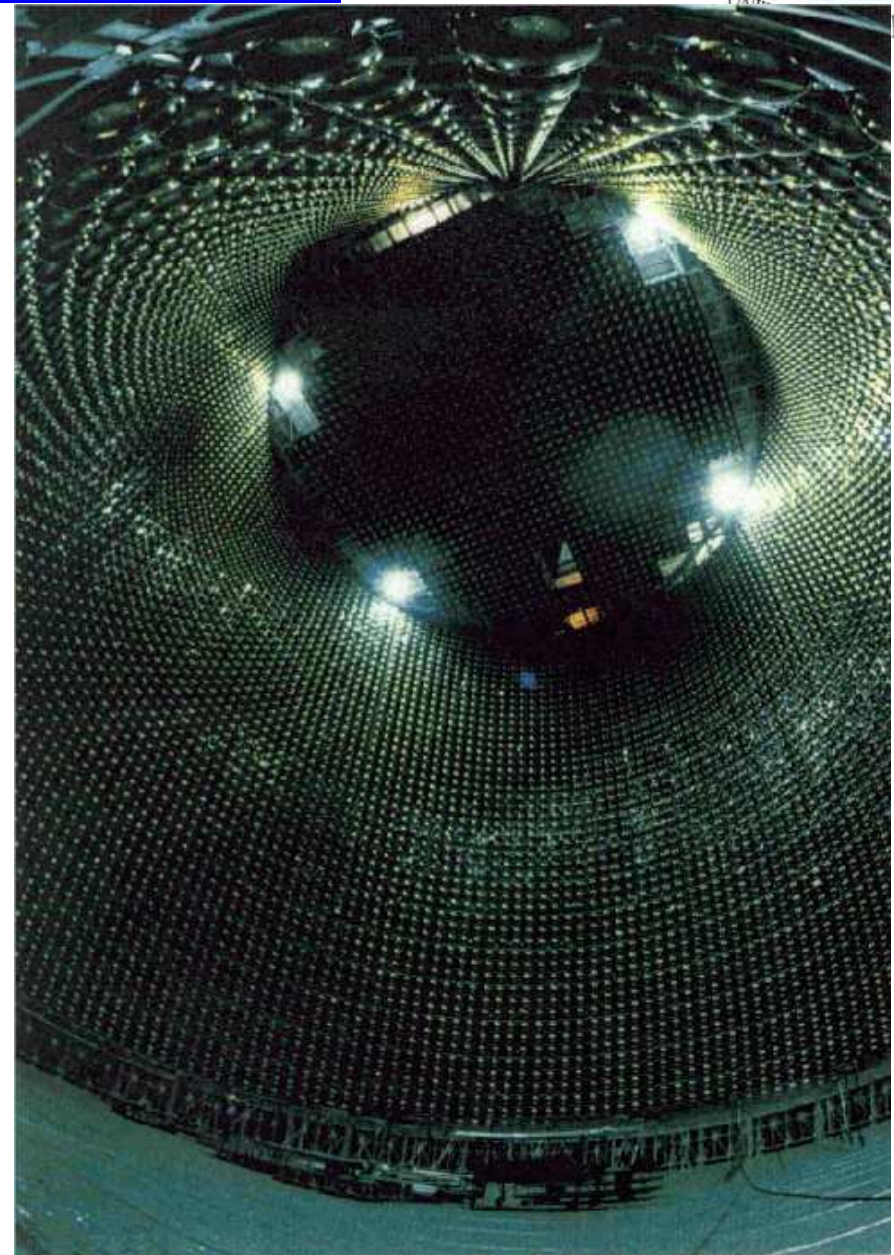
rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**





# Współczesne eksperymenty

## Super-Kamiokande



# Współczesne eksperymenty

## Super-Kamiokande

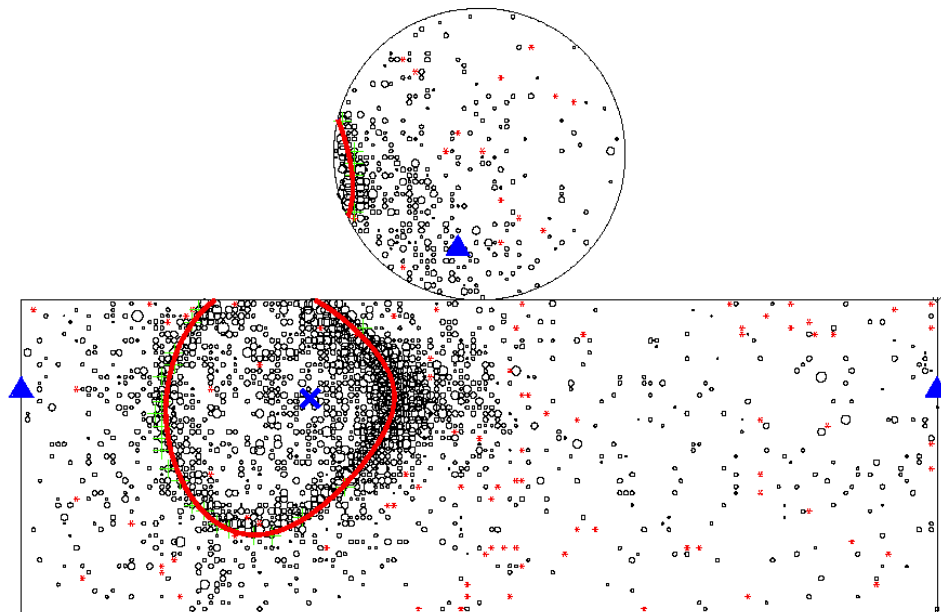
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

### Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

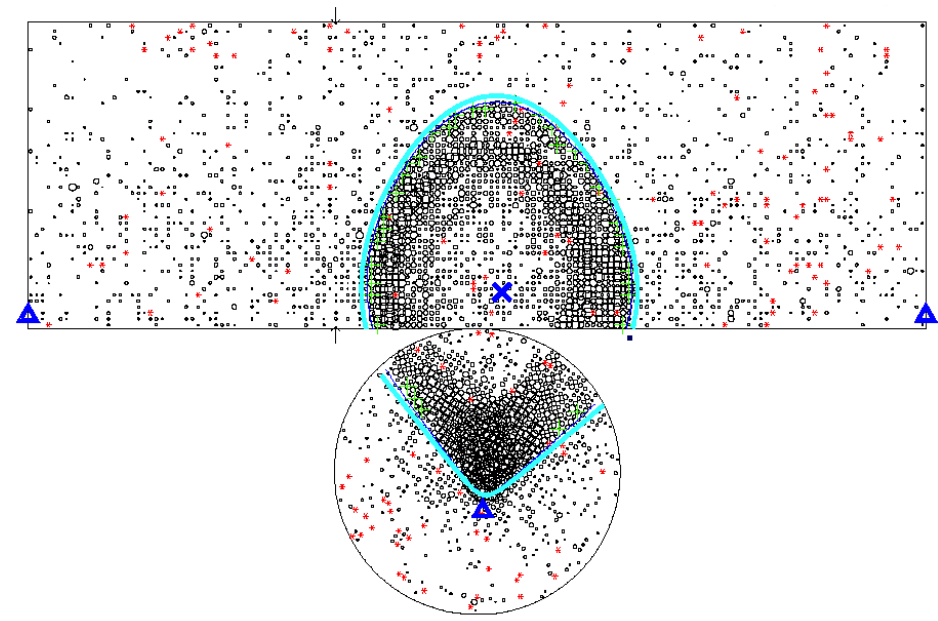


### Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

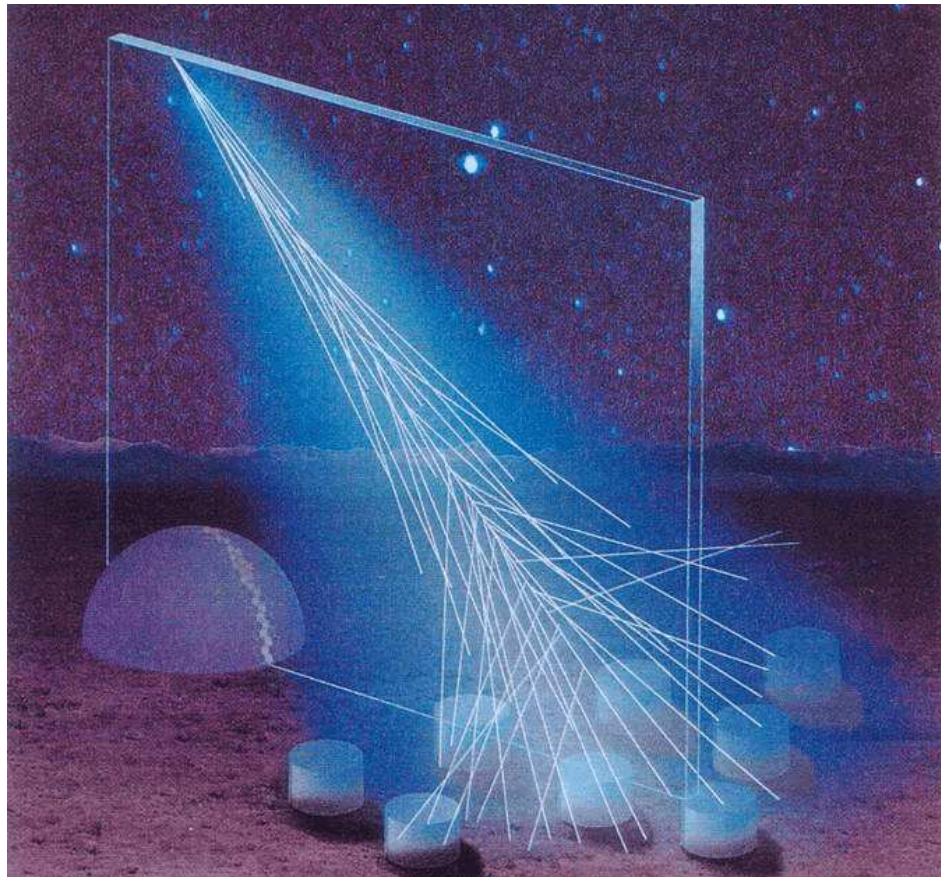
“gruby” pierścień.



# Współczesne eksperymenty

## *Obserwatorium Pierre Auger*

Obserwacja wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego.

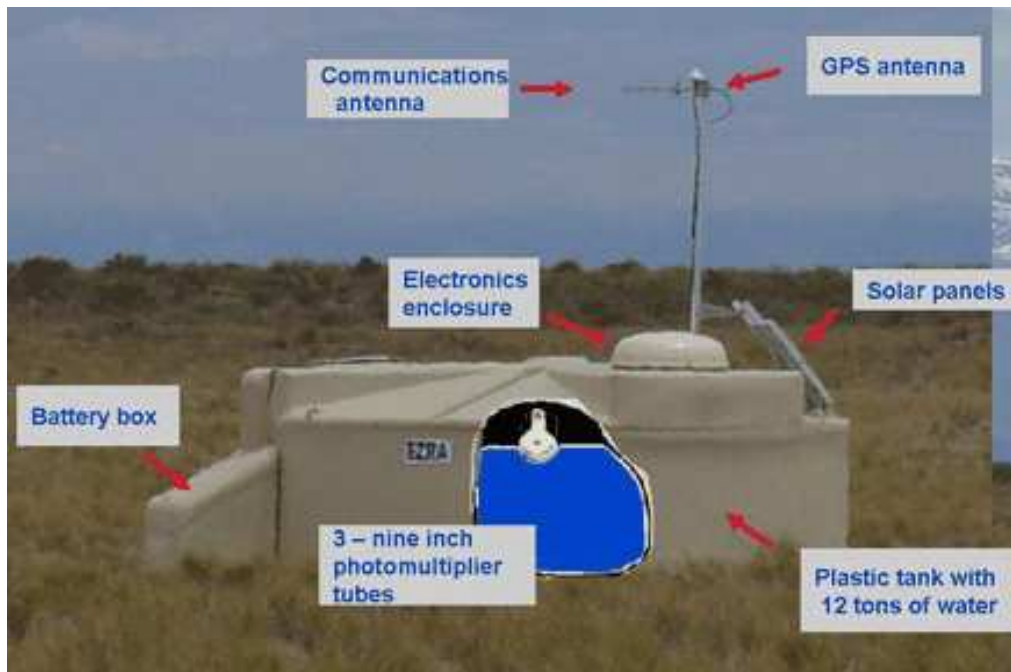


Scyntyllacja w powietrzu.  
Promieniowanie Czerenkowa w  
detektorach na powierzchni.

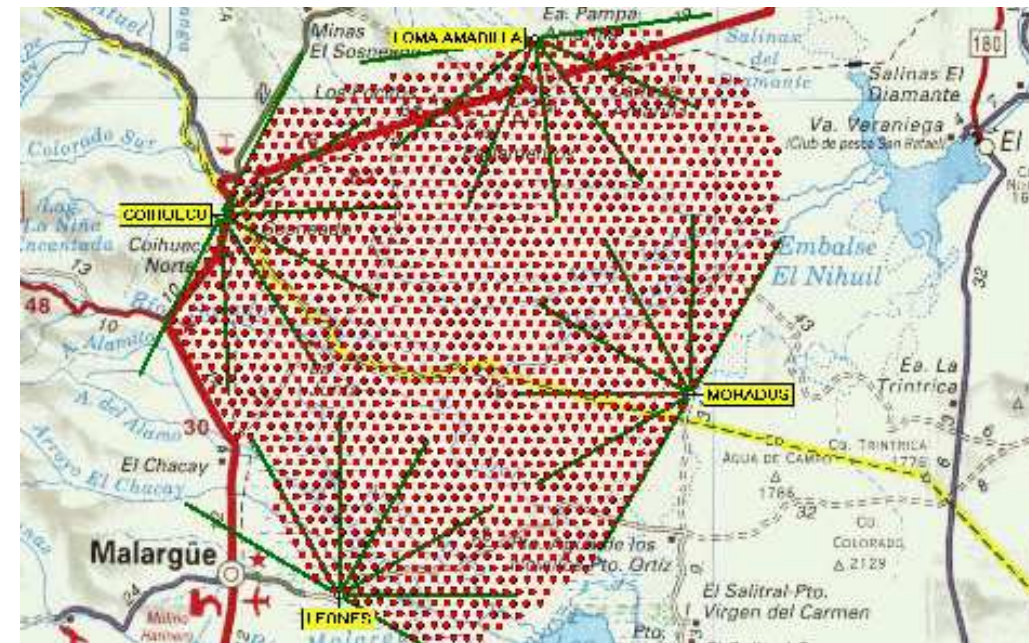
# Współczesne eksperymenty

## Obserwatorium Pierre Auger

Detektor powierzchniowy



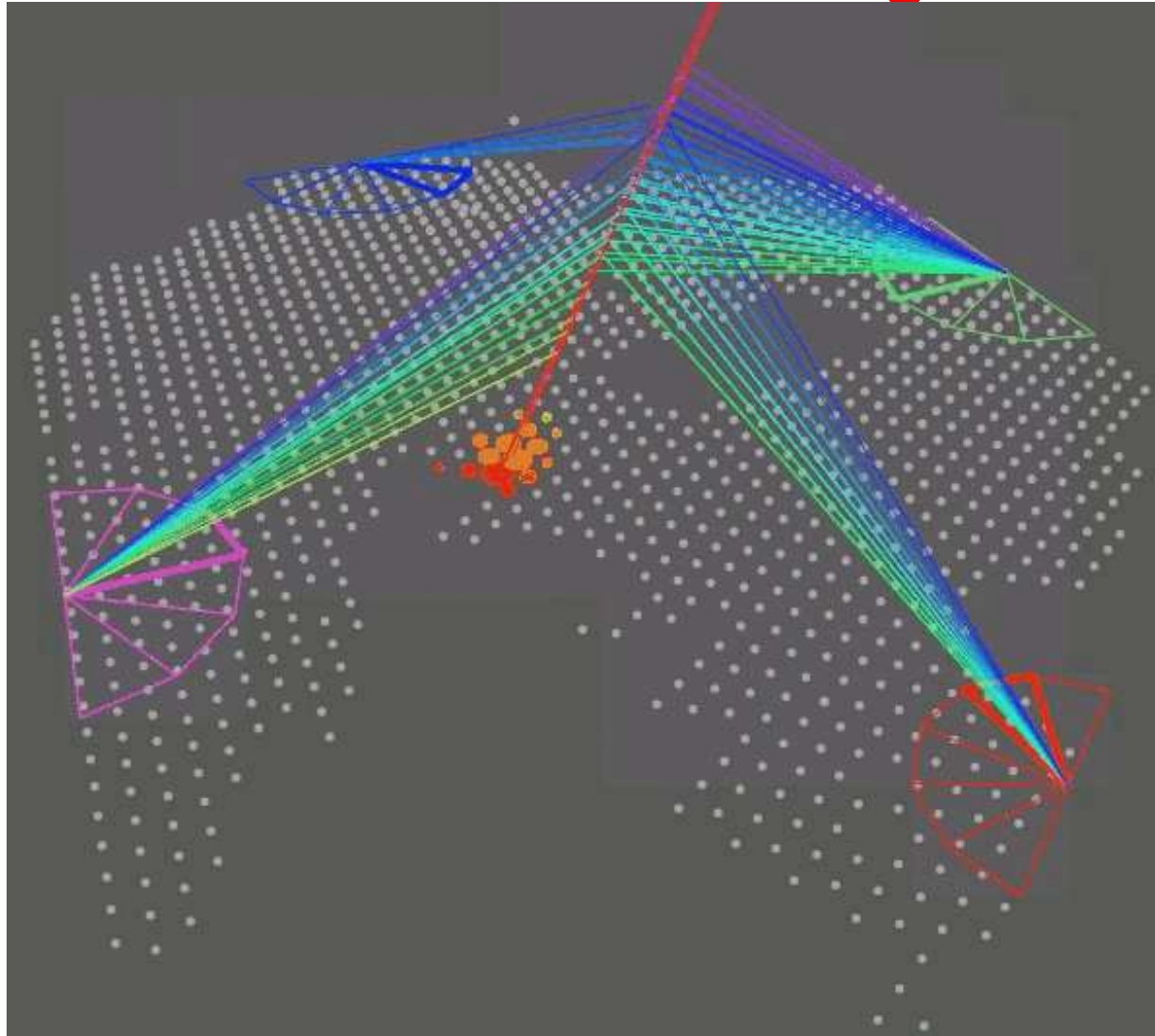
Mapa obserwatorium:



4 stacje po 6 teleskopów obserwujących świecenie w atmosferze (UV)  
1600 detektorów powierzchniowych rozstawionych na 3000 km<sup>2</sup> !!!

# Współczesne eksperymenty

## Obserwatorium Pierre Auger



Schemat obserwacji  
"pęku atmosferycznego":  
4 "zjęcia" z teleskopów  
+ "śląd" na powierzchni

# Detekcja cząstek

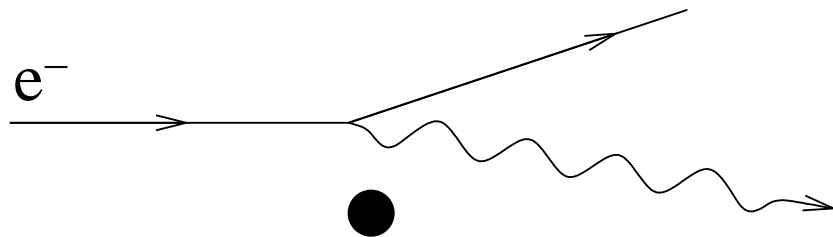
## **Kalorymetry**

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

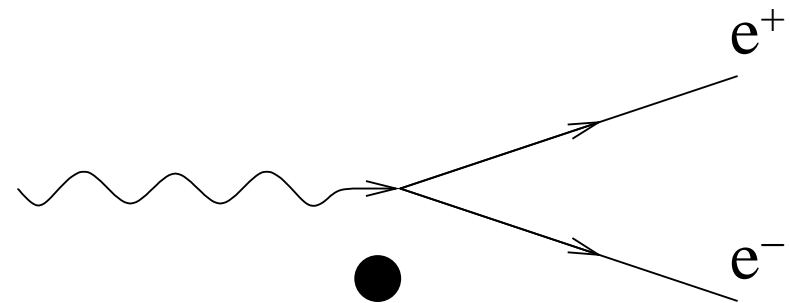
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi.

## **Kalorymetr elektromagnetyczny**

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



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



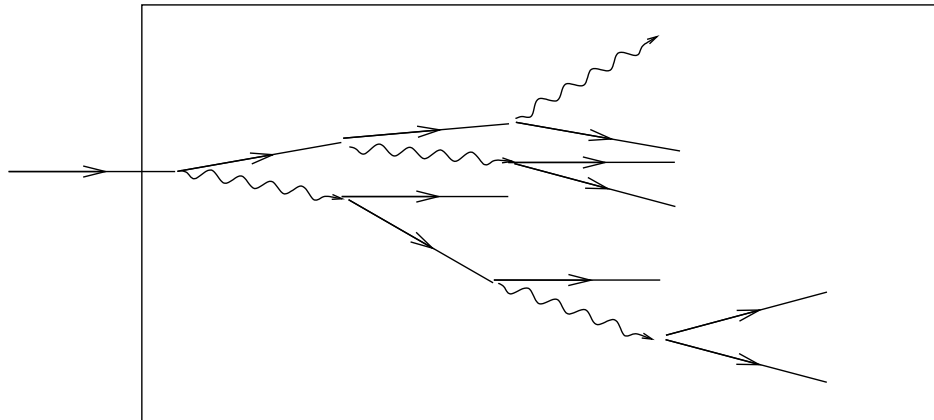
# Detekcja cząstek

## **Kalorymetry**

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

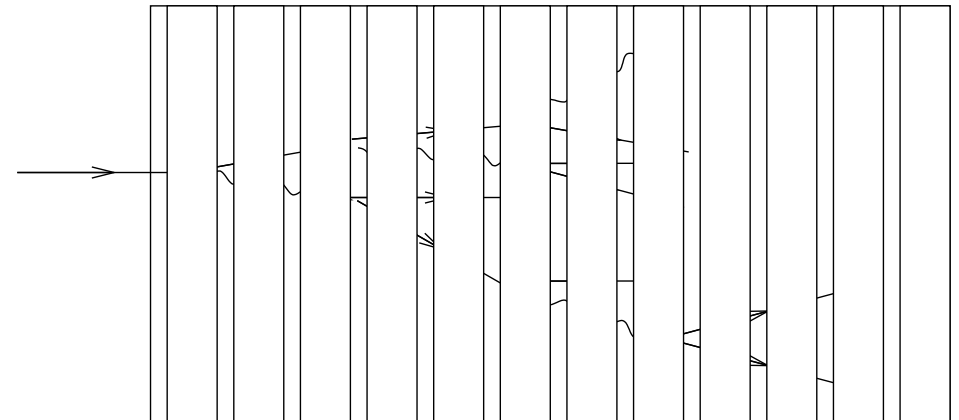
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitzą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

### Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylnatora

### Kalorymetr próbkujący



warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

# Detekcja cząstek

## *Kalorymetry*

Symulacja rozwoju  
kaskady hadronowej  
(pomiar energii protonu)

