

Współczesne eksperymenty fizyki cząstek elementarnych

Letnia Szkoła Fizyki 2009
Wydział Fizyki U.W.



prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych, Instytut Fizyki Doświadczalnej

Plan wykładu

- Wprowadzenie
Fizyka początków XX w.
- Fizyka w świecie cząstek
Teoria względności, falowa natura materii, antymateria
- Cząstki i oddziaływania
Elementy Modelu Standardowego
- Detekcja cząstek
Podstawowe zjawiska i jak możemy je wykorzystać
- Współczesne eksperymenty
Przykłady detektorów nieakceleratorowych
- Detektory uniwersalne
Co rejestrują detektory przy kolajderach, detektory przy LHC
- Podsumowanie

Koniec XIX w.

Elektryczność i magnetyzm

Wpływ pola elektromagnetycznego na ruchu ciała naładowanego:

$$\frac{d}{dt}m\vec{v} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Źródłem pola są ładunki i ich ruch. **Równania Maxwella** (1865):

$$\begin{aligned}\epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} &= \rho \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \vec{j}\end{aligned}$$

Koniec XIX w.

Elektryczność i magnetyzm

Wpływ pola elektromagnetycznego na ruchu ciała naładowanego:

$$\frac{d}{dt}m\vec{v} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Źródłem pola są ładunki i ich ruch. **Równania Maxwella** (1865):

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} &= \rho \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

⇒ fale elektromagnetyczne: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$



Koniec XIX w.

Elektryczność i magnetyzm

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza w 1886 roku potwierdziło słuszność teorii Maxwella.

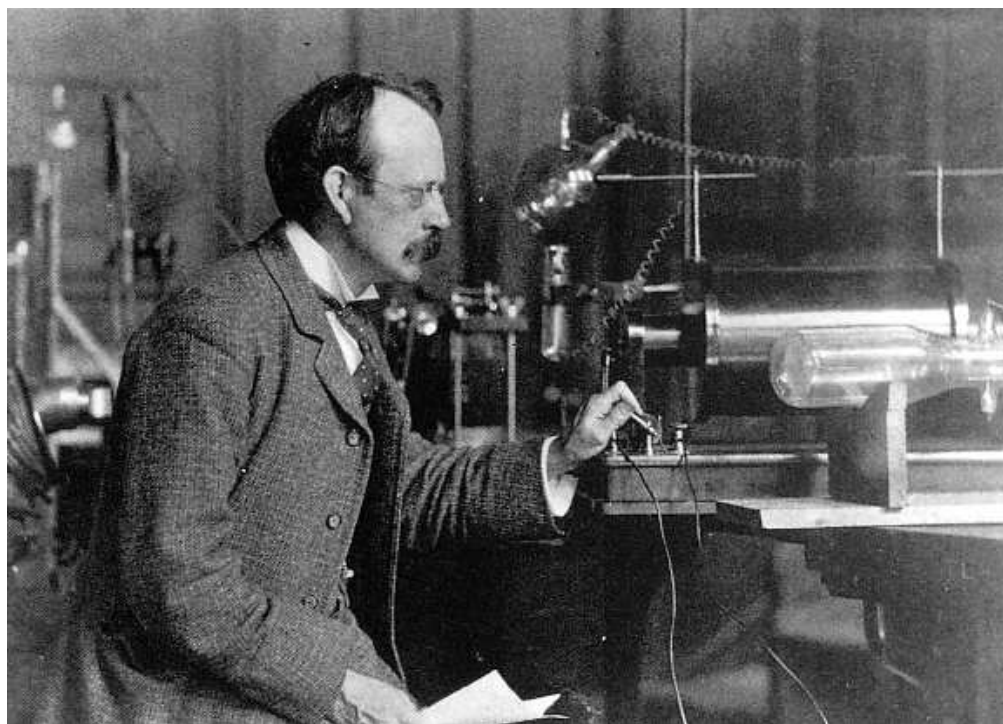
Jednak **natura elektryczności** wciąż była nieznana.

“Wszystkie te zjawiska przypisano pewnego rodzaju sile (energii), nazwanej elektrycznością (...) każde ciało posiada obydwa rodzaje elektryczności (ujemną i dodatnią) w stanie utajonym...”

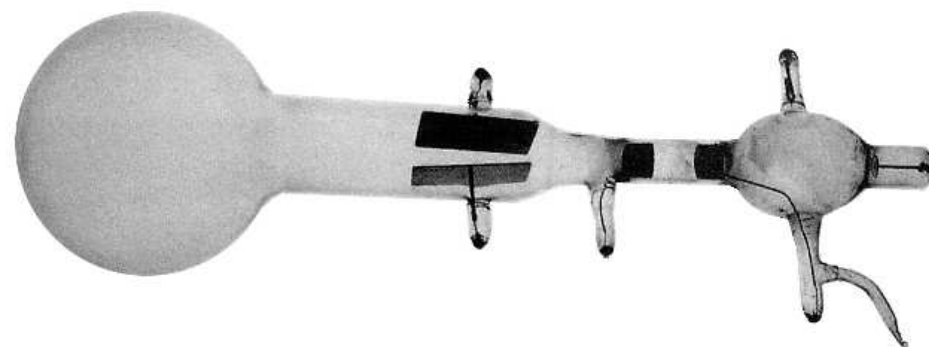
A.L.Szymański, Prawa Przyrody - Fizyka, Warszawa 1902

Odkrycie elektronu

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



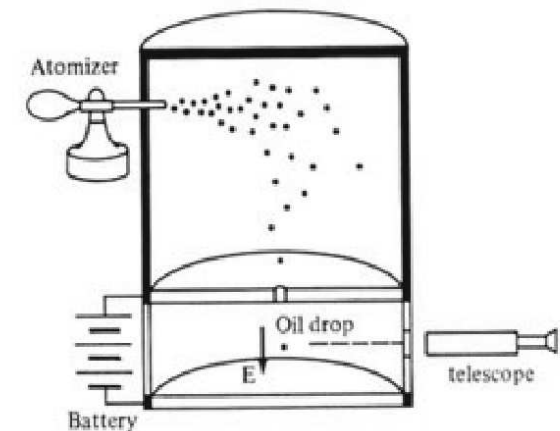
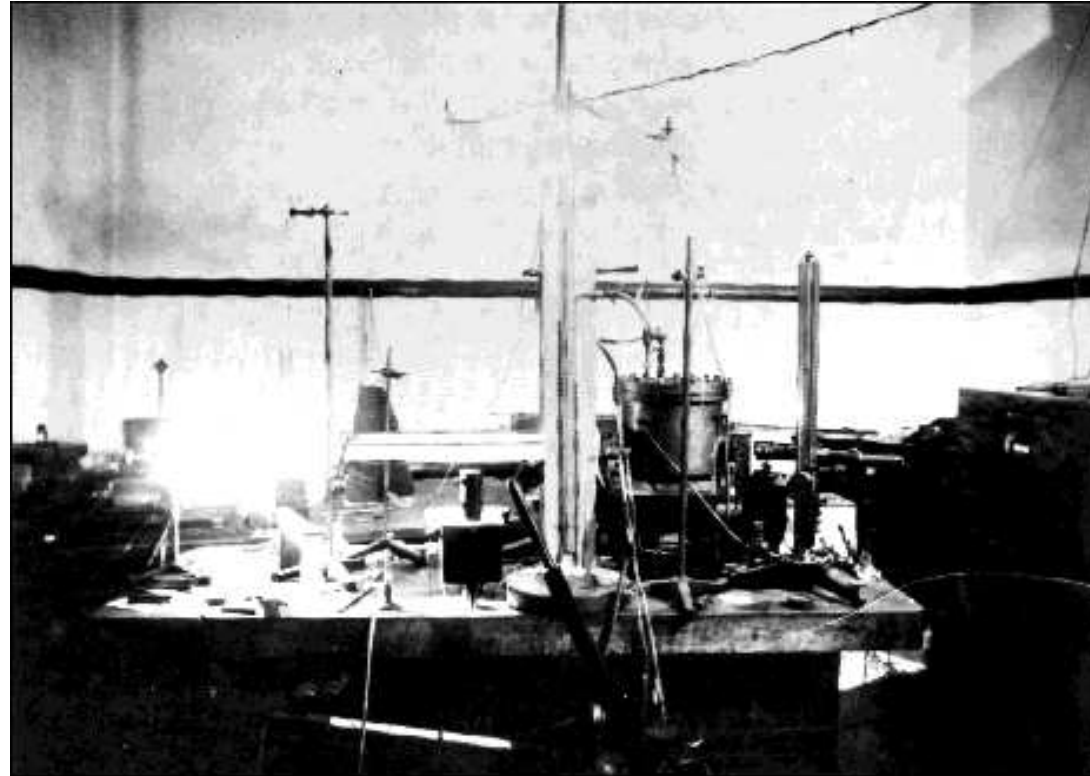
pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

$$\frac{e}{m} \approx 2 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Odkrycie elektronu

Robert Millikan 1909



Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył ładunek elektronu, a następnie obliczył jego **masę**: $m_e = \frac{1}{1837} m_H$

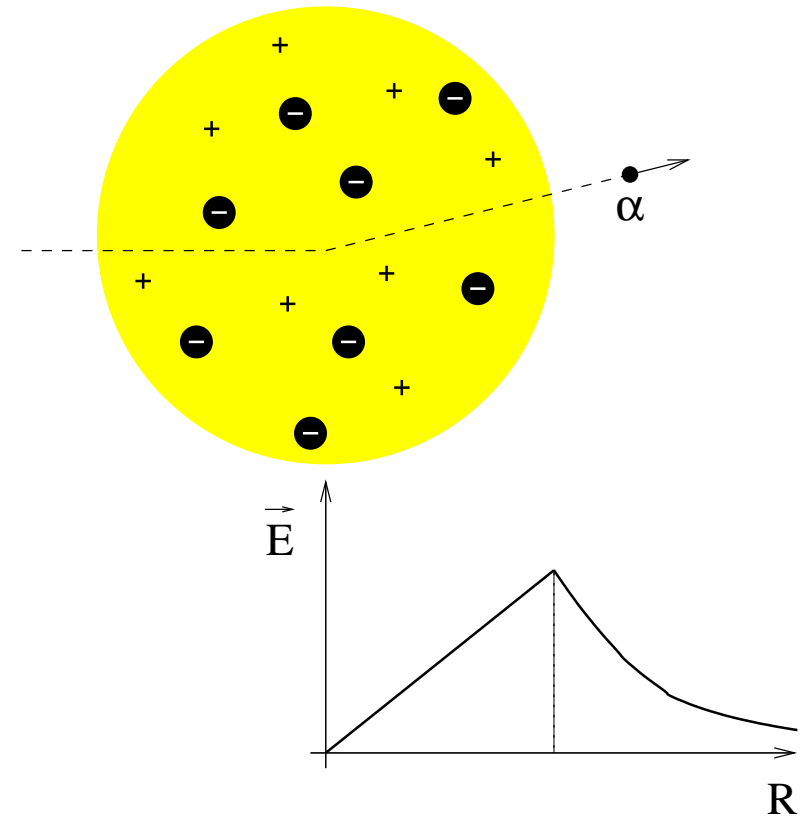
Odkrycie jądra atomowego

Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym



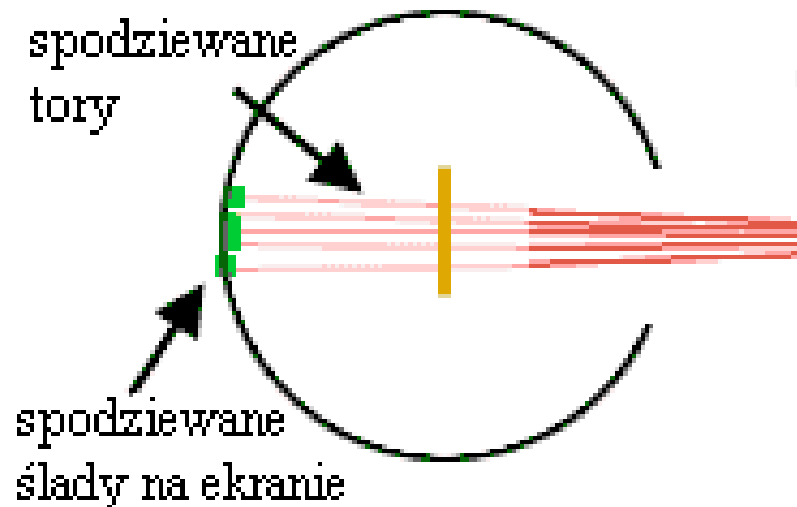
Model Thomsona: cała objętość atomu jednorodnie naładowana dodatnio ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" elektrony ("rodzynki").

Odkrycie jądra atomowego

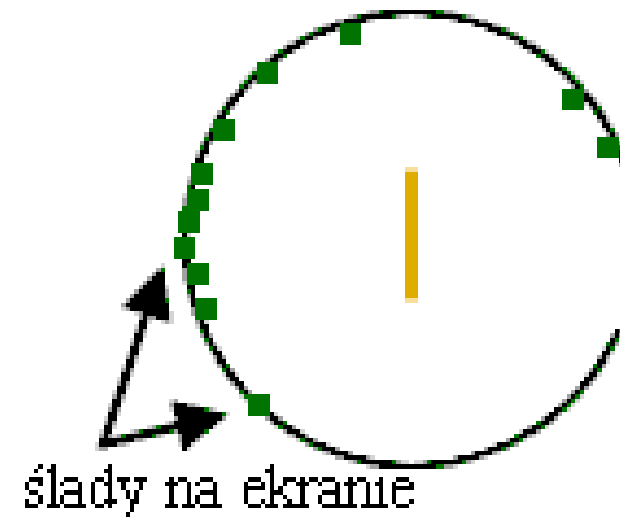
Doświadczenie Rutherforda

Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez H.Geigera i E.Marsdena (1911):

Oczekiwane

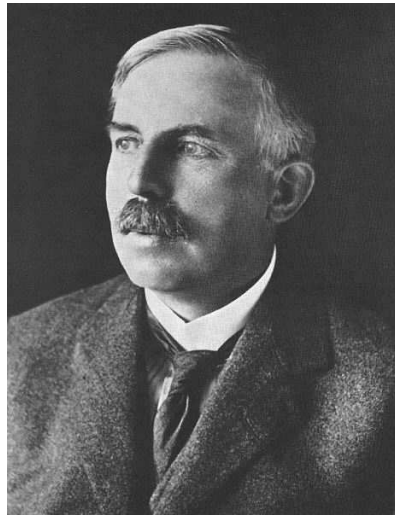


Uzyskane



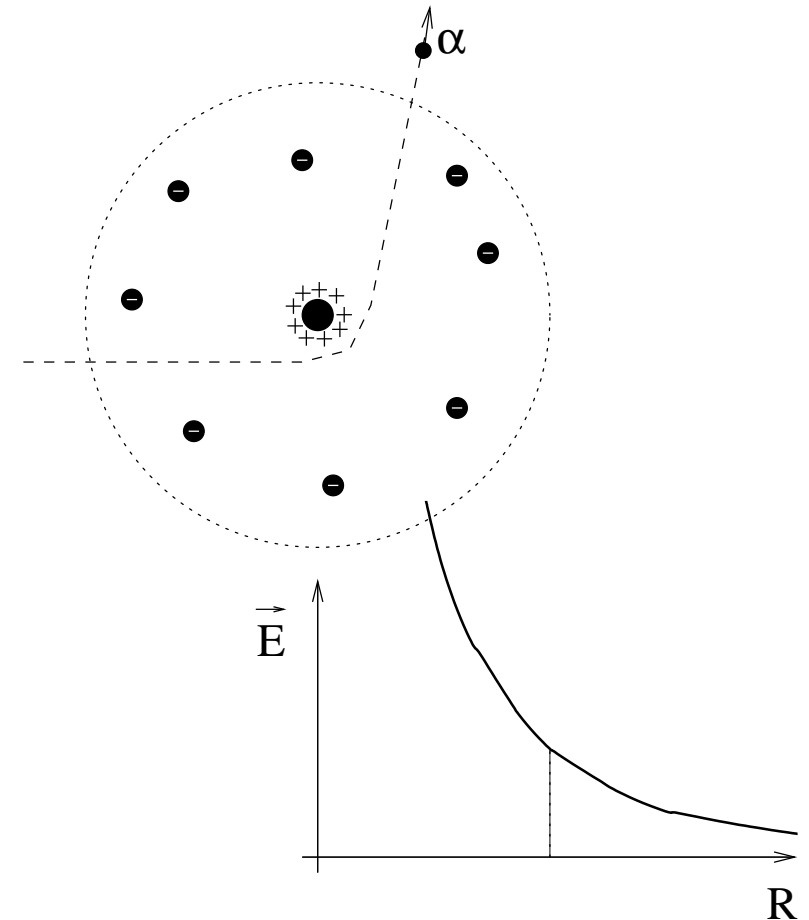
Odkrycie jądra atomowego

Model Rutherforda



Rutherford zaproponował
jądrowy model atomu.

Cały dodatni ładunek atomu (10^{-10} m)
skupiony jest w praktycznie **punktowym**
(10^{-14} m) **jądrze**



Cząstka α zawsze czuje
cały ładunek dodatni \Rightarrow
duże kąty rozproszenia

Teoria względności

W końcu XIX w. powszechnie uważano światło za **falę poprzeczną**.

Zgodność zmierzonych prędkości rozchodzenia się wskazywała na to, że światło jest **falą elektromagnetyczną**.

Falowa teoria światła bardzo dobrze tłumaczyła wszystkie znane ówczesnie zjawiska...

Teoria względności

W końcu XIX w. powszechnie uważano światło za **falę poprzeczną**.

Zgodność zmierzonych prędkości rozchodzenia się wskazywała na to, że światło jest **falą elektromagnetyczną**.

Falowa teoria światła bardzo dobrze tłumaczyła wszystkie znane ówczesnie zjawiska...

Teoria Maxwella przewidywała jednak, że **prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych nie powinna zależeć od układu odniesienia**.

Było to nie do pogodzenia z zasadami **“klasycznej” fizyki (Galileusza i Newtona)**, w szczególności z postulatem **uniwersalności czasu**.

Dwaj obserwatorzy poruszający się względem siebie powinni mierzyć różne wartości prędkości...

Teoria względności

Próbowano “ratować” teorię wprowadzając pojęcie **eteru**, w którym rozchodziłyby się fale elektromagnetyczne.

Eter miałby być

“...materią sprężystą, nadzwyczaj subtelną i nieważką, nie przedstawiającą żadnego znacniejszego oporu poruszającym się w niej ciałom...”

ale żadnych śladów jego istnienia nie udało się zaobserwować.

Teoria względności

Próbowano “ratować” teorię wprowadzając pojęcie **eteru**, w którym rozchodziłyby się fale elektromagnetyczne.

Eter miałby być

“...materią sprężystą, nadzwyczaj subtelną i nieważką, nie przedstawiającą żadnego znaczącego oporu poruszającym się w niej ciałom...”

ale żadnych śladów jego istnienia nie udało się zaobserwować.

W roku 1905 Einstein wprowadził **Szczególną Teorię Względności**.

Oparł ją na postulatach:

- uniwersalności prędkości światła,
- równoprawności wszystkich układów odniesienia.

Konsekwencją STW są m.in. względność czasu i odległości...

Teoria względności

W fizyce cząstek zawsze musimy korzystać z zasad STW.

Cząstki naogół poruszają się z prędkościami bardzo bliskimi c

Przykład: dla protonów w LHC $v \approx 0.999\,999\,995 \cdot c$ ($E=7$ TeV)

Energia w teorii względności:

- Energia spoczynkowa $E_0 = mc^2$ wprowadzona przez Einsteina
- Energia całkowita $E = \sqrt{E_0^2 + (pc)^2}$ p - pęd cząstki

Masa jest równoważna energii!

Teoria względności

W fizyce cząstek zawsze musimy korzystać z zasad STW.

Cząstki naogół poruszają się z prędkościami bardzo bliskimi c

Przykład: dla protonów w LHC $v \approx 0.999\,999\,995 \cdot c$ ($E=7$ TeV)

Energia w teorii względności:

- Energia spoczynkowa $E_0 = mc^2$ wprowadzona przez Einsteina
- Energia całkowita $E = \sqrt{E_0^2 + (pc)^2}$ p - pęd cząstki

Masa jest równoważna energii!

To nie jest “konwencja”. Zachowana jest tylko energia całkowita, energia kinetyczna może się zamieniać w masę, masa w energię !

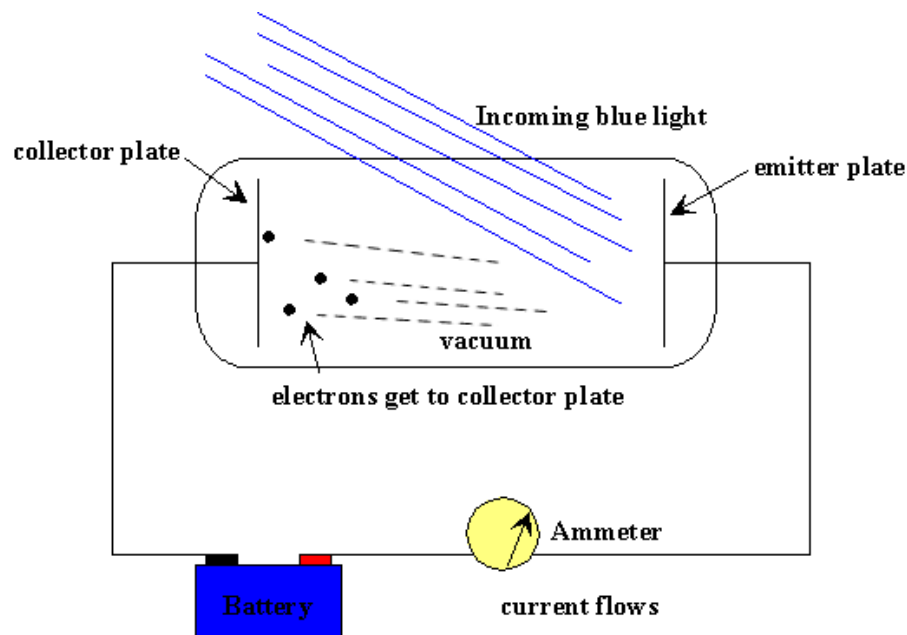
⇒ Dzięki temu możemy produkować nowe cząstki!

Odkrycie fotonu

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887

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

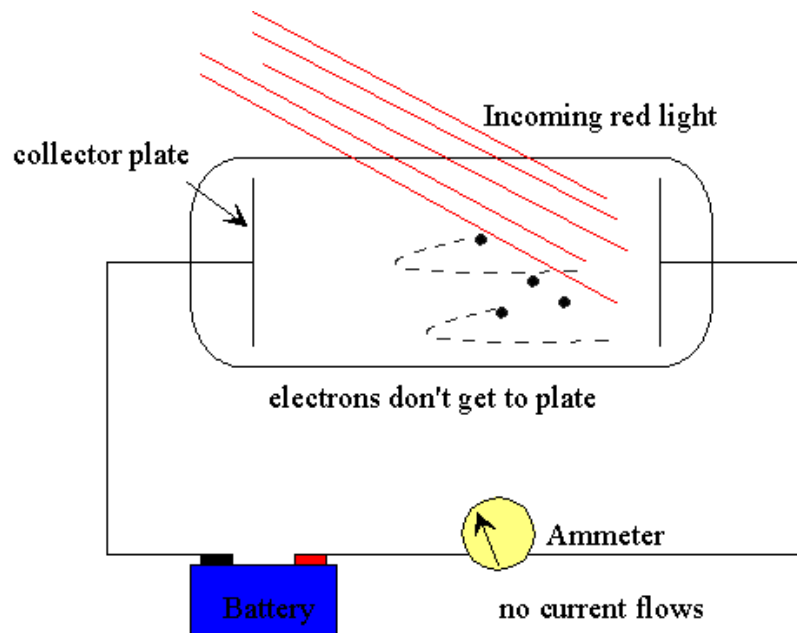


Odkrycie fotonu

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

Odkrycie fotonu

Efekt fotoelektryczny

W roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych **kwantów** energii, które dziś nazywamy **fotonami**.

Energia fotonu:

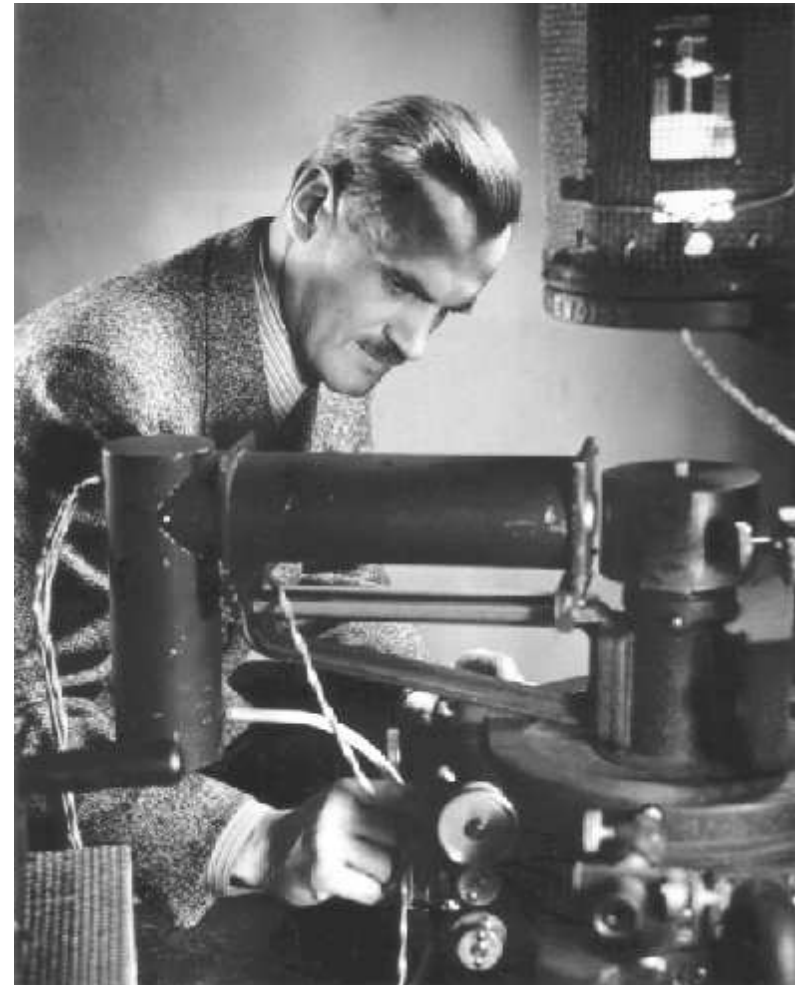
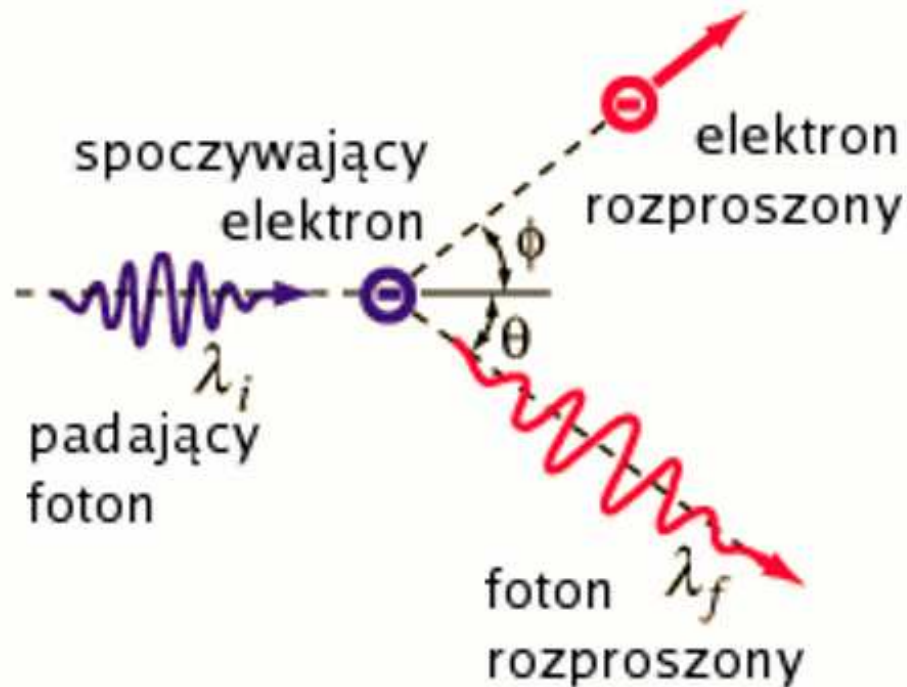
$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Aby wybić elektron z metalu E_{γ} musi być większa od tzw. **pracy wyjścia** \Rightarrow zależność od długości fali światła



Odkrycie fotonu

Arthur Compton 1923
Rozpraszanie fotonów na elektronach



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

Cząstki i fale

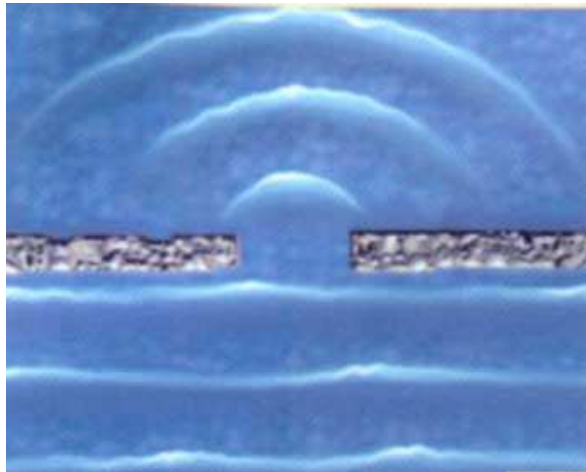
Fotony mają określoną energię i pęd - jak inne cząstki.

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

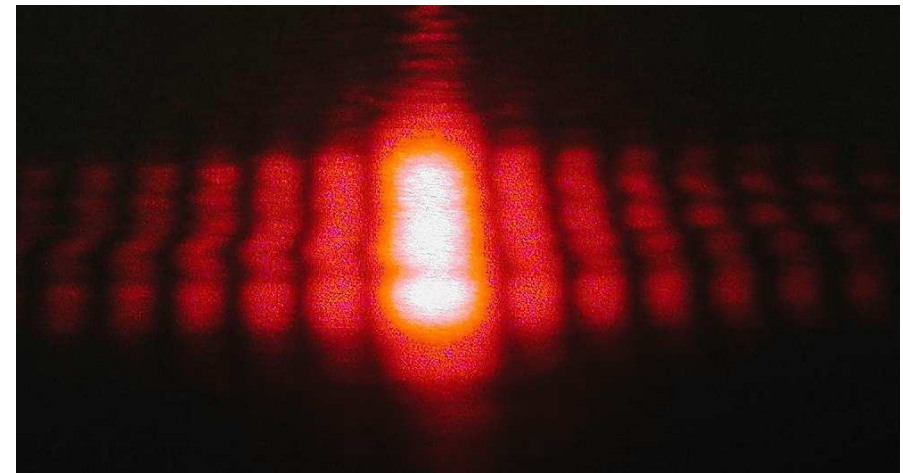
Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



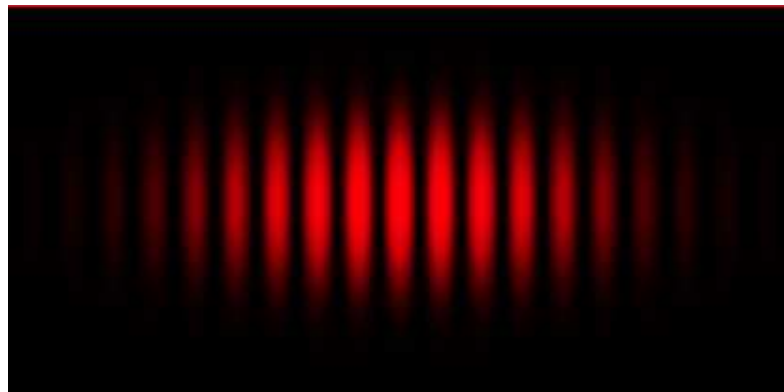
Światło



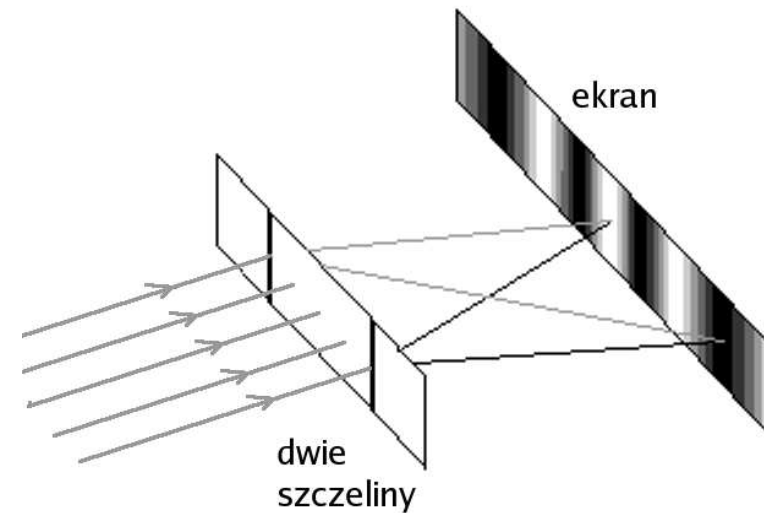
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



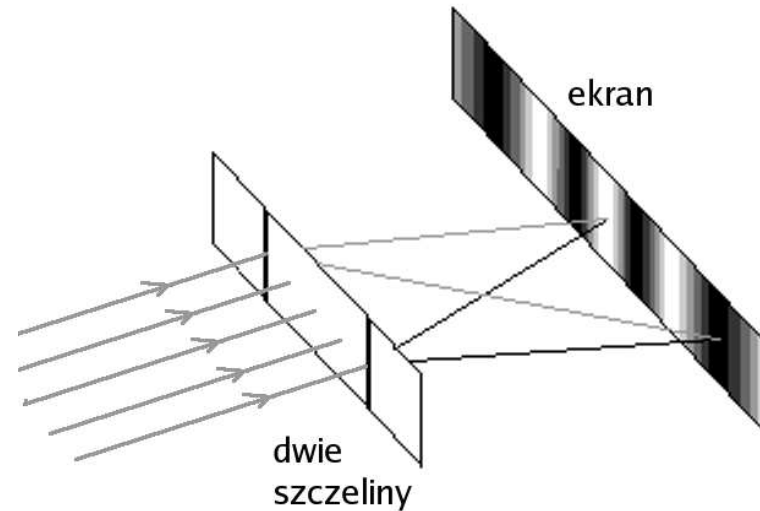
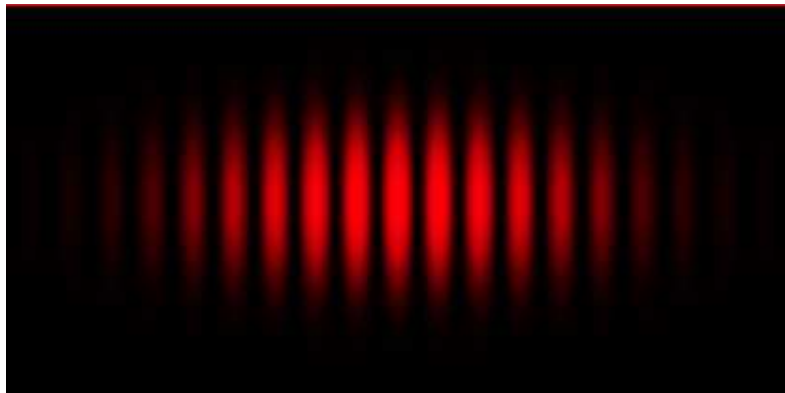
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**



Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**

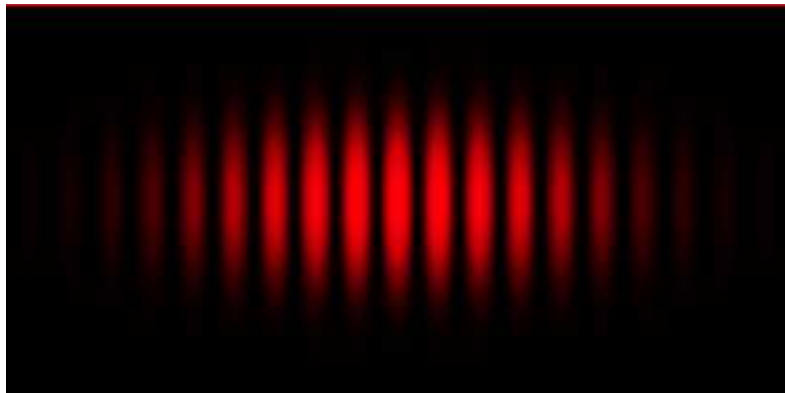
⇒ **prążki interferencyjne**

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

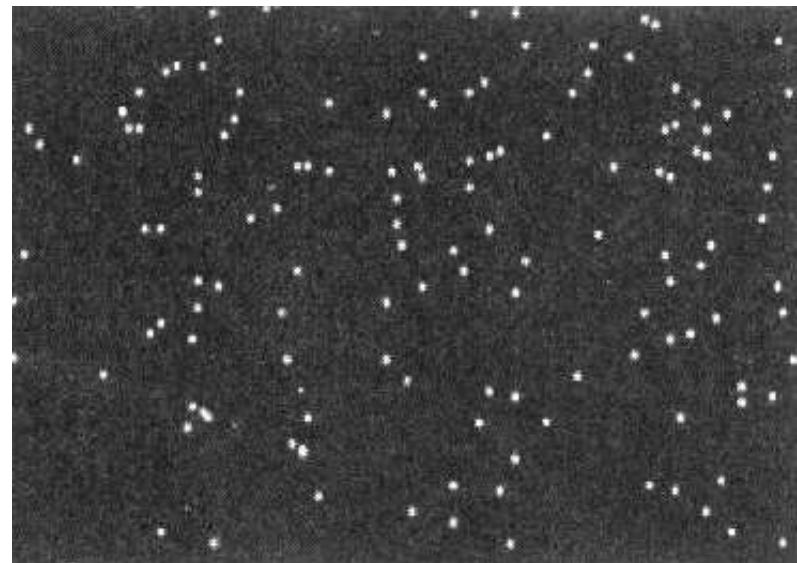
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**

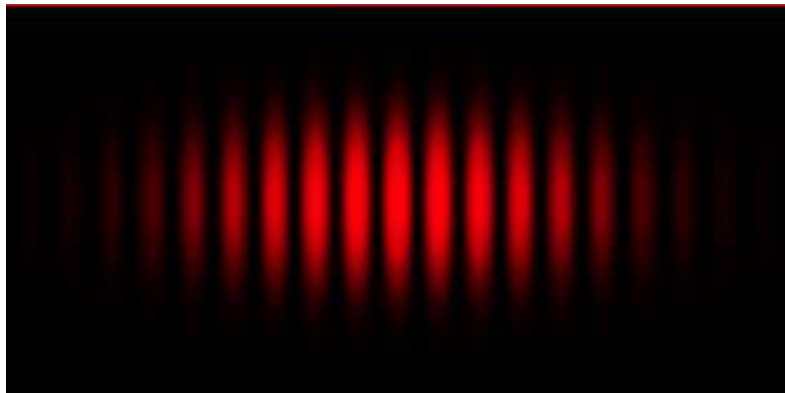
⇒ **prążki interferencyjne**

100 elektronów
rozkład przypadkowy ?

Cząstki i fale

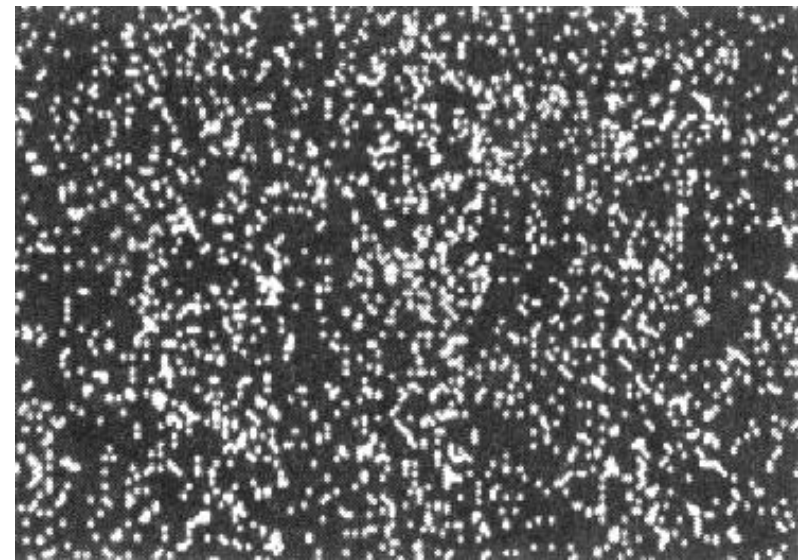
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



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

Elektrony

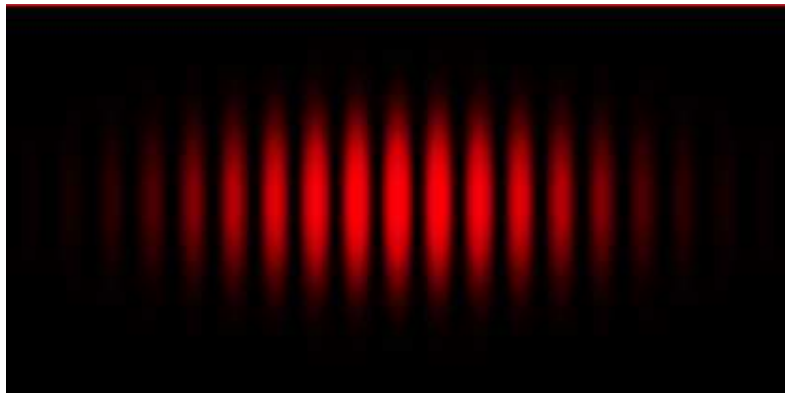


3000 elektronów

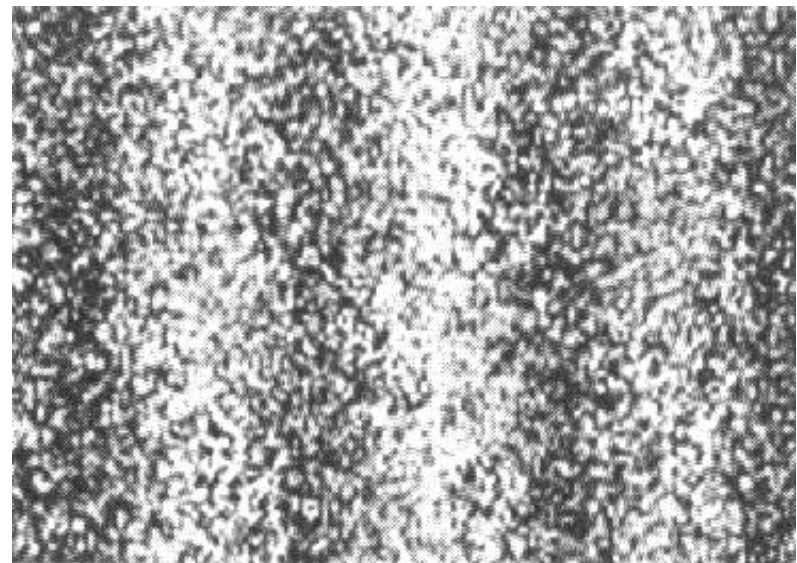
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

70000 elektronów

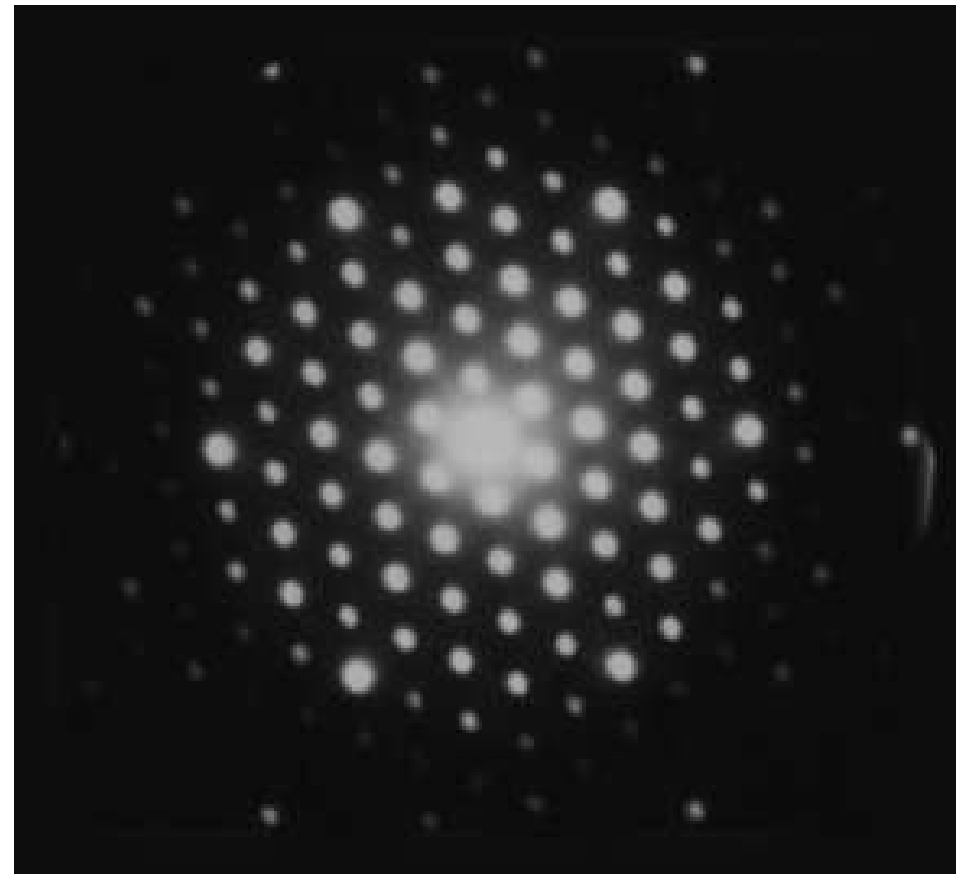
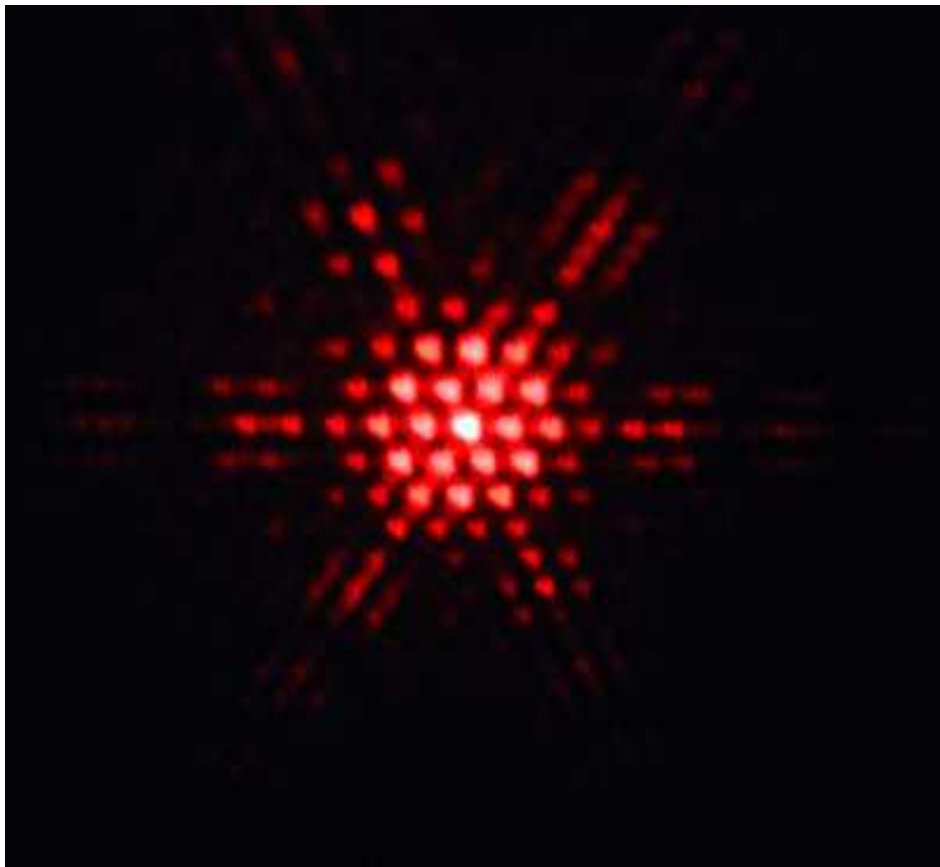
Elektrony też zachowują się jak fale !
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło

Elektrony

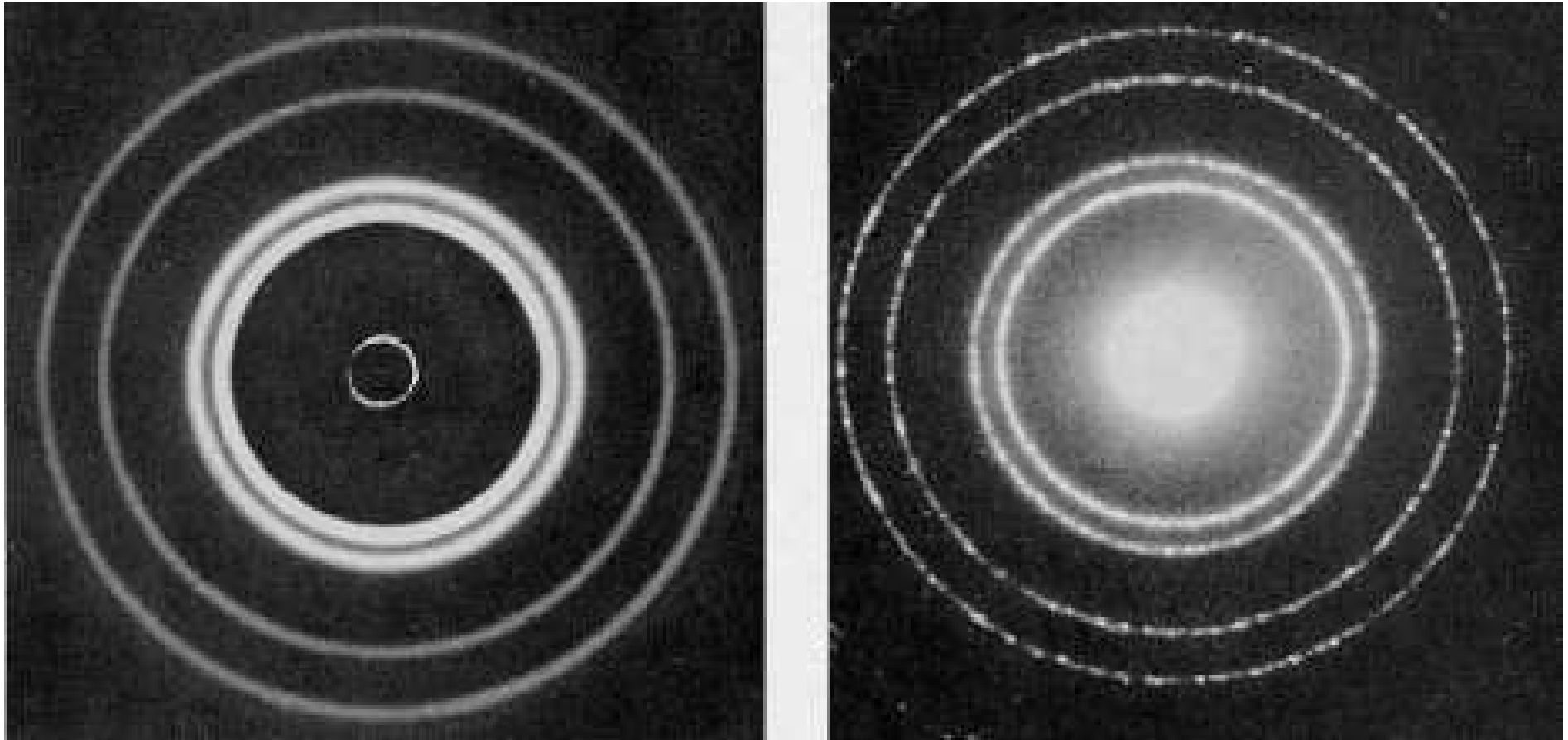


Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



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...

Cząstki i fale

Mechanika kwantowa

Mechanika kwantowa opisuje cząstki przez tzw. **funkcje falowe** $\psi(\vec{r}, t)$

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fal prawdopodobieństwa**”.

Cząstki i fale

Mechanika kwantowa

Mechanika kwantowa opisuje cząstki przez tzw. **funkcje falowe** $\psi(\vec{r}, t)$

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fal prawdopodobieństwa**”.

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"...**

Cząstki i fale

Mechanika kwantowa

Mechanika kwantowa opisuje cząstki przez tzw. **funkcje falowe** $\psi(\vec{r}, t)$

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fal prawdopodobieństwa**”.

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"...**

Teoria pozwala nam opisać rozchodzenie się (tzw. ewolucję) “**fal prawdopodobieństwa**” i dzięki temu wnioskować o możliwym zachowaniu cząstek.

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

Materia i antymateria

Ewolucję “fal prawdopodobieństwa” w polu sił $V(\vec{r})$ jako pierwszy spróbował opisać Erwin Schrödinger.

Jego równanie (1925) było jednak sprzeczne z teorią względności.

Materia i antymateria

Ewolucję “fal prawdopodobieństwa” w polu sił $V(\vec{r})$ jako pierwszy spróbował opisać Erwin Schrödinger.

Jego równanie (1925) było jednak sprzeczne z teorią względności.

W roku 1928 Paul Dirac wprowadził relatywistyczne równanie falowe, które godziło mechanikę kwantową z teorią względności, a także opisywało poprawnie spin elektronu.

Równanie Diraca miało jednak zaskakującą cechę: przewidywało istnienie stanów o ujemnej energii!...

Materia i antymateria

Ewolucję “fal prawdopodobieństwa” w polu sił $V(\vec{r})$ jako pierwszy spróbował opisać Erwin Schrödinger.

Jego równanie (1925) było jednak sprzeczne z teorią względności.

W roku 1928 Paul Dirac wprowadził relatywistyczne równanie falowe, które godziło mechanikę kwantową z teorią względności, a także opisywało poprawnie spin elektronu.

Równanie Diraca miało jednak zaskakującą cechę: przewidywało istnienie stanów o ujemnej energii!...

W roku 1931 Dirac zapostulował, że stany te powinny odpowiadać fizycznym cząstkom, ale o przeciwnym ładunku - antycząstkom.

Pozytron, antycząstka elektronu, został odkryty rok później...

Materia i antymateria

W oddziaływaniach elementarnych może następować zarówno **kreacja** jak i **anihilacja** par cząstka-antycząstka.

Zachowana jest całkowita **energia** i **pęd** układu, natomiast liczba i masy cząstek mogą się zmieniać.

Ograniczenie na masy produkowanych cząstek:

$$\sum m_f \leq \sqrt{s} = \sqrt{(\sum E_i)^2 - (\sum \vec{p}_i)^2}$$

Im **wieksze są energie** zderzających się cząstek, tym więcej nowych cząstek i tym **cięższe cząstki** możemy wyprodukować!

Postęp w fizyce cząstek jaki dokonał się w ciągu ostatnich 100 lat był nierozdzielnie związany z rozwojem technik ich detekcji i akceleracji

Świat cząstek

Fundamenty teorii cząstek

Nasze obecne spojrzenie na świat cząstek elementarnych (współczesne modele teoretyczne) opierają się na trzech fundamentach:

- **teorii względności**
równoważność masy i energii, zasady zachowania...

Świat cząstek

Fundamenty teorii cząstek

Nasze obecne spożenie na świat cząstek elementarnych (współczesne modele teoretyczne) opierają się na trzech fundamentach:

- **teorii względności**
równoważność masy i energii, zasady zachowania...
- **mechanice kwantowej**
probabilistyczny opis zachowania cząstek, zasada nieoznaczoności...

Świat cząstek

Fundamenty teorii cząstek

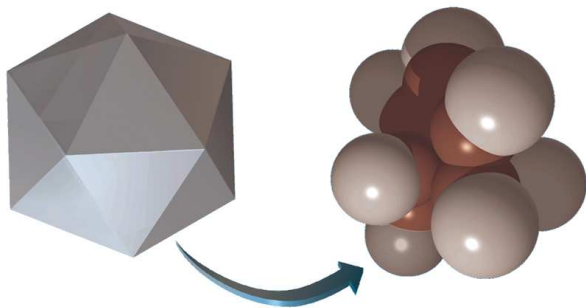
Nasze obecne spojrzenie na świat cząstek elementarnych (współczesne modele teoretyczne) opierają się na trzech fundamentach:

- **teorii względności**
równoważność masy i energii, zasady zachowania...
- **mechanice kwantowej**
probabilistyczny opis zachowania cząstek, zasada nieoznaczoności...
- **symetriach**
dostrzegając symetrie w świecie cząstek potrafimy lepiej zrozumieć rządzące nim reguły.
Każdej symetrii teorii odpowiada zasada zachowania.
Oddziaływania cząstek opisujemy poprzez symetrie...

Model Standardowy

Budowa materii

Cząsteczka

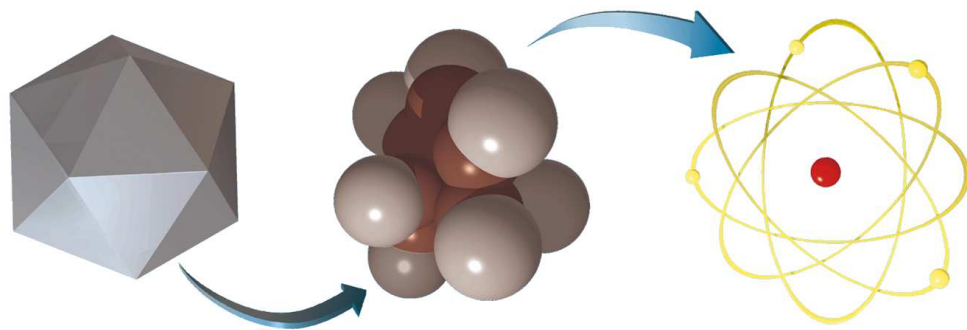


10^{-9} m

Model Standardowy

Budowa materii

Atom

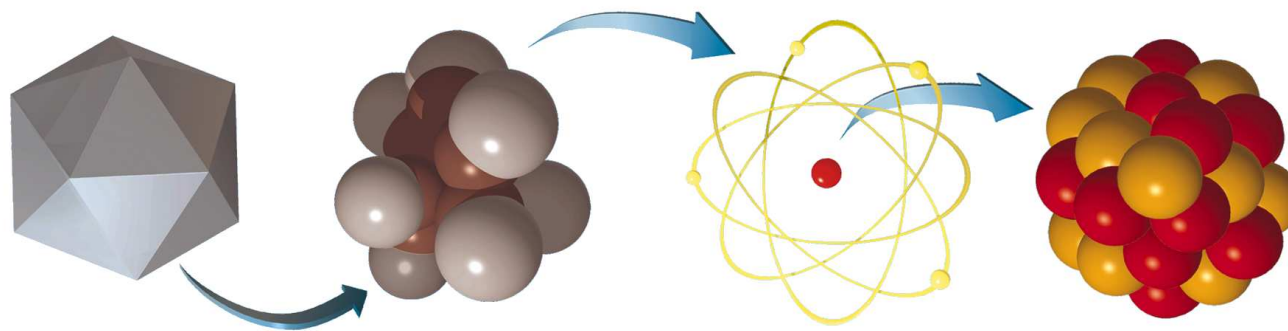


10^{-10} m

Model Standardowy

Budowa materii

Jądro atomowe

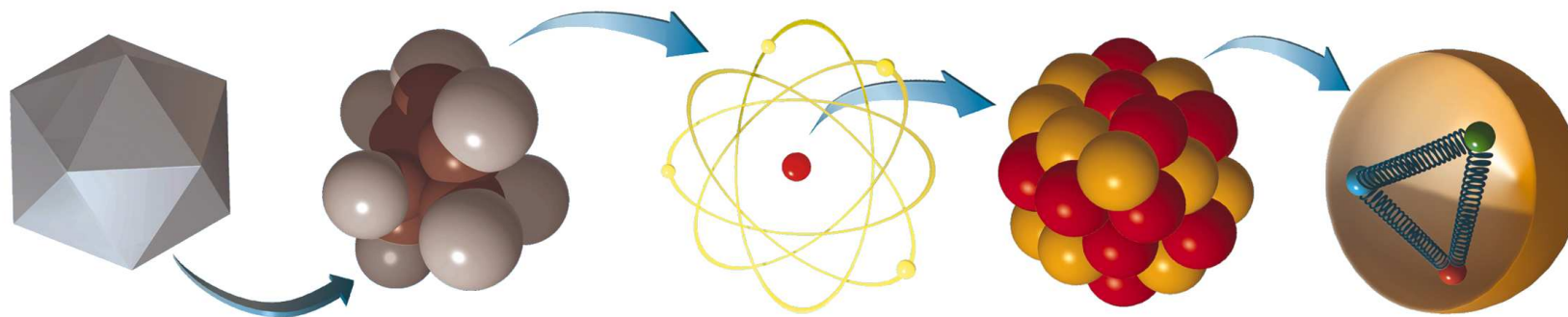


10^{-14} m

Model Standardowy

Budowa materii

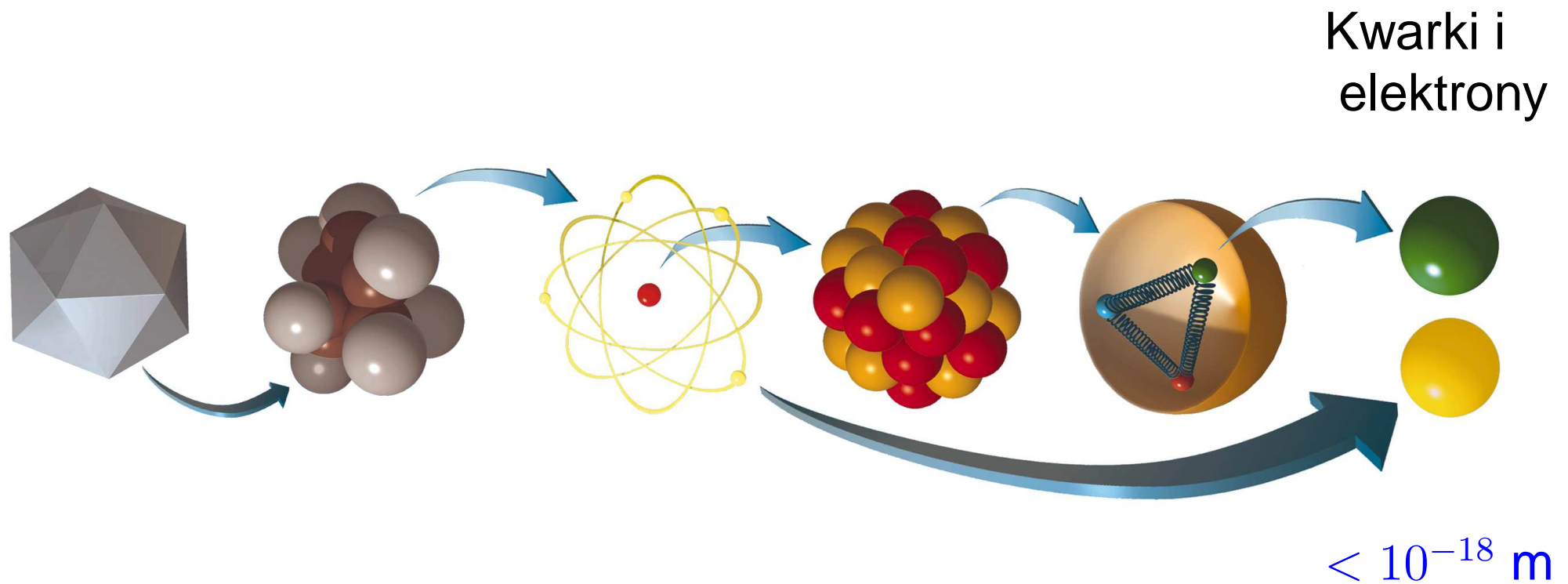
Nukleony



10^{-15} m

Model Standardowy

Budowa materii



Model Standardowy

Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

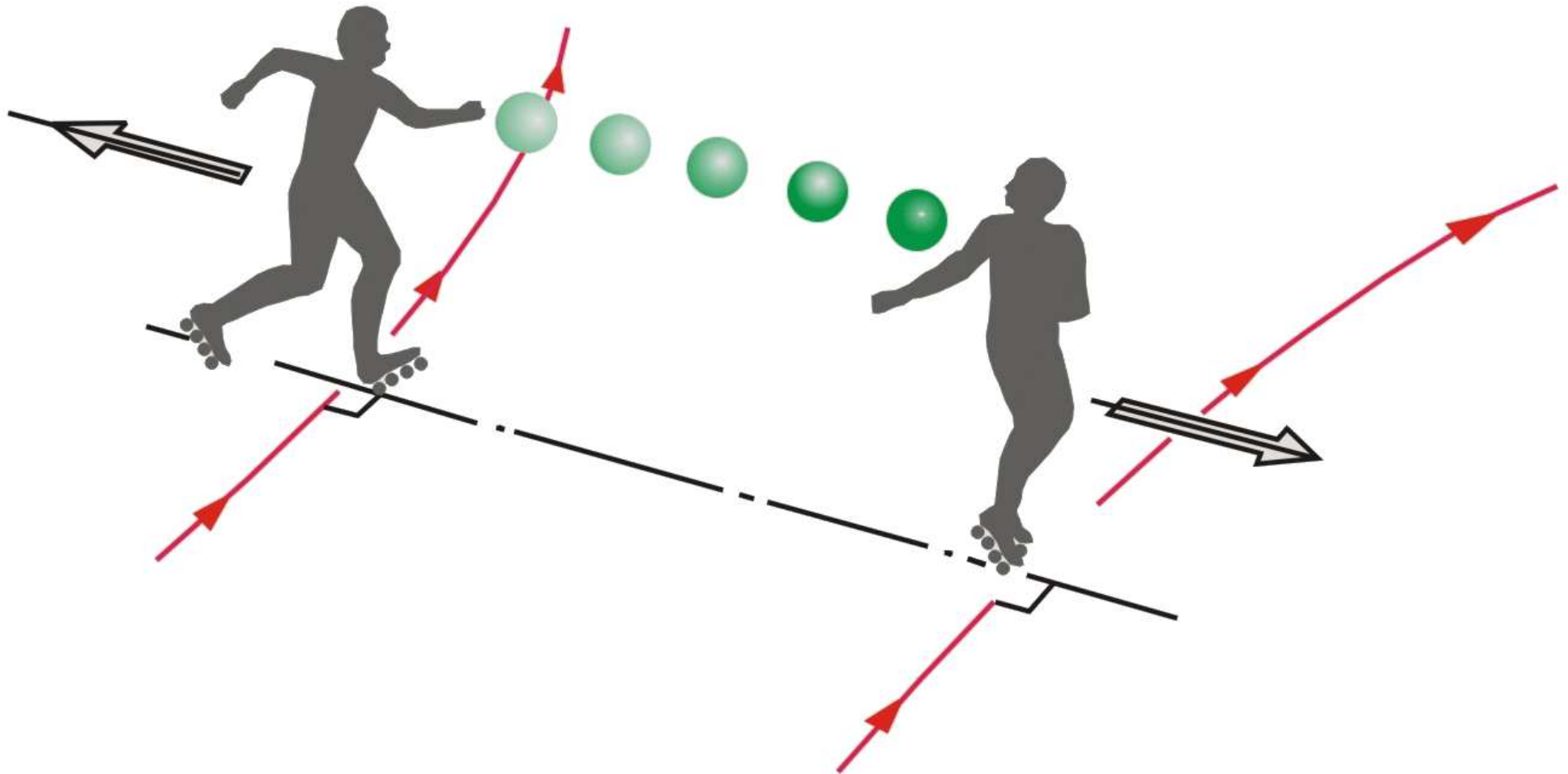
	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Model Standardowy

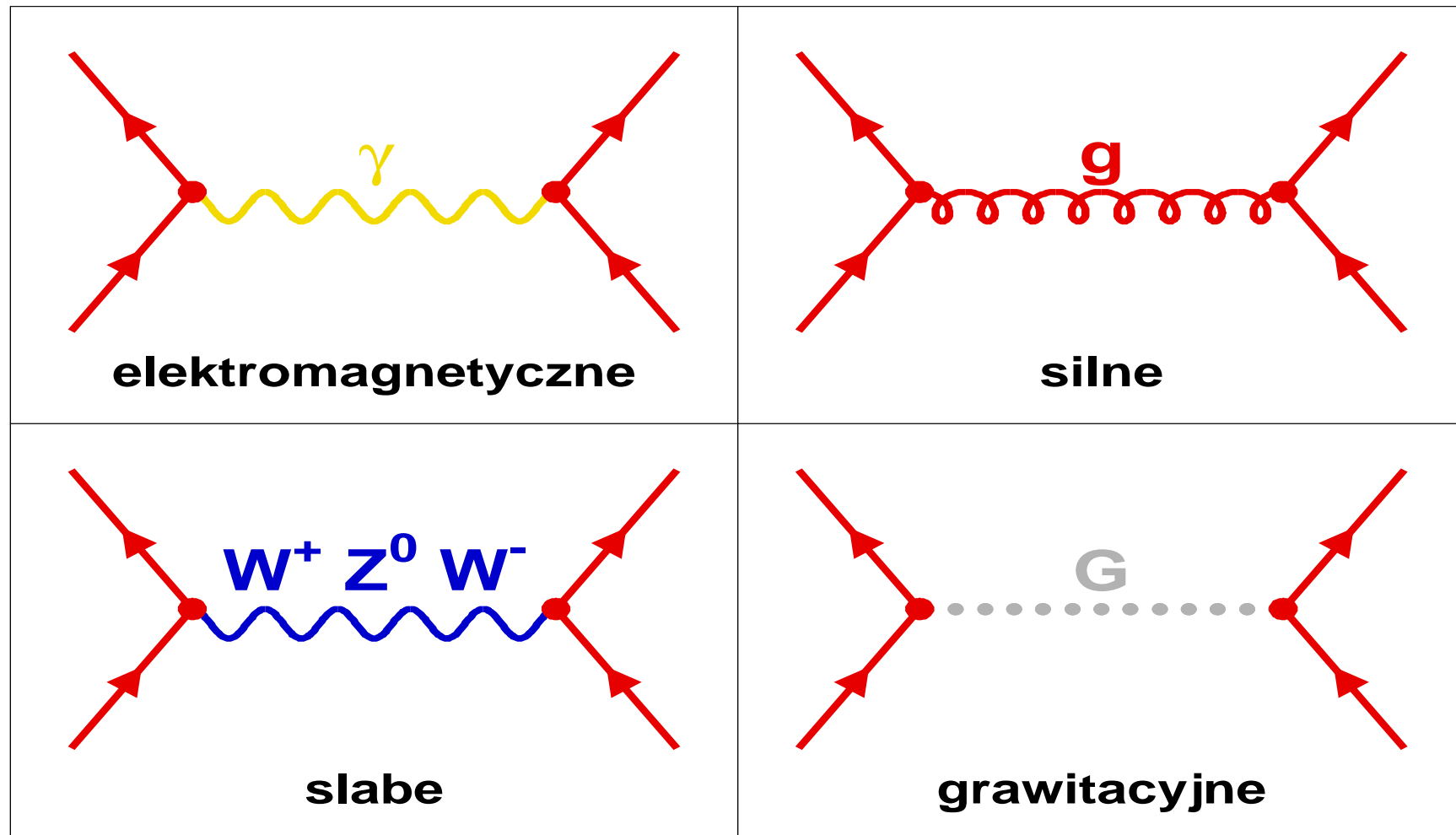
Oddziaływania

Opisujemy je jako wymianę cząstek - “nośników”



Model Standardowy

Wyróżniamy **cztery** podstawowe oddziaływania przenoszone przez odpowiednie nośniki



Model Standardowy

Oddziaływania

Nośnik oddziaływania przenosi **energię** i/lub **pęd** między cząstkami będącymi źródłami tego oddziaływania

<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>		<i>masa</i>
grawitacyjne	masa	graviton	G	0
elektromag.	ładunek	foton	γ	0
silne	“kolor”	gluony	g	0
słabe	“ładunek słaby”	“bozony	W^\pm	80 GeV
		pośredniczące”	Z^0	91 GeV

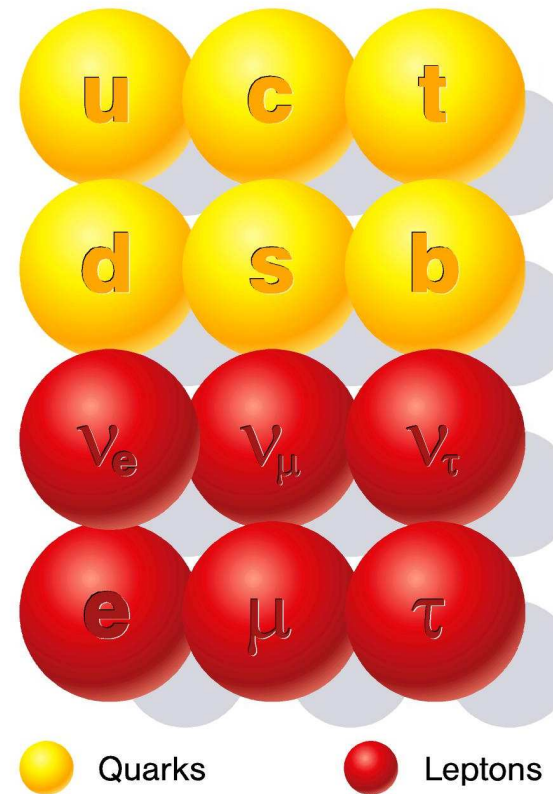
1 GeV = 1 000 000 000 eV \approx masa protonu

Nośniki oddziaływań uważamy za **punktowe** i **niepodzielne**, tak jak kwarki i leptony...

Model Standardowy

Podsumowanie

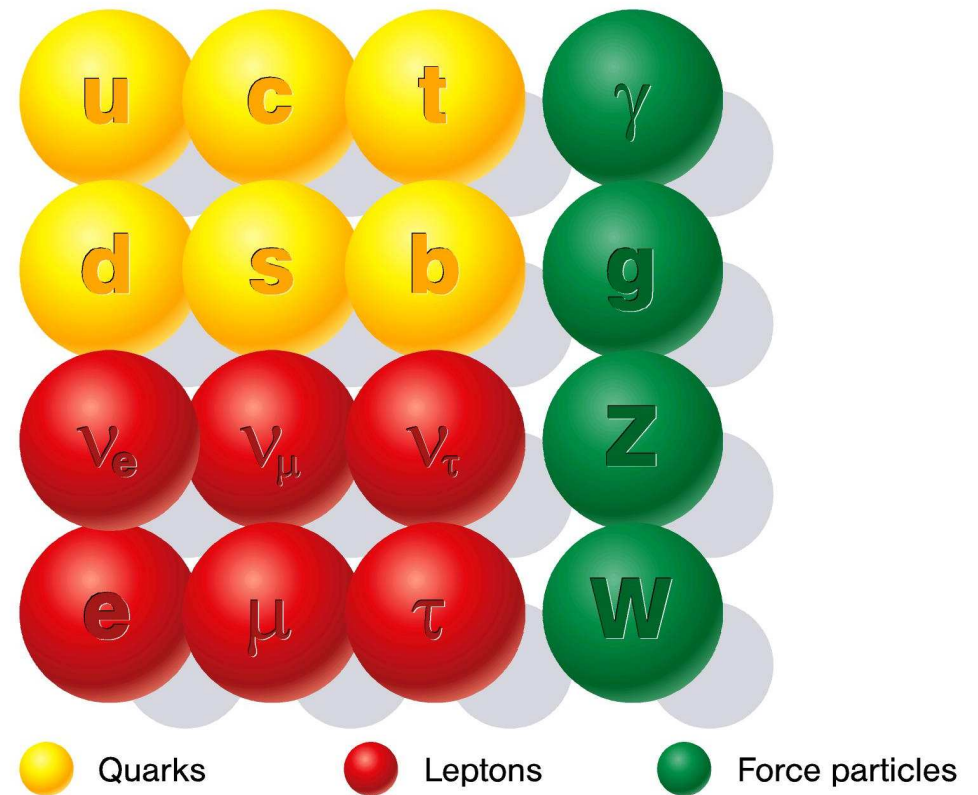
- cząstki materii
kwarki i leptony



Model Standardowy

Podsumowanie

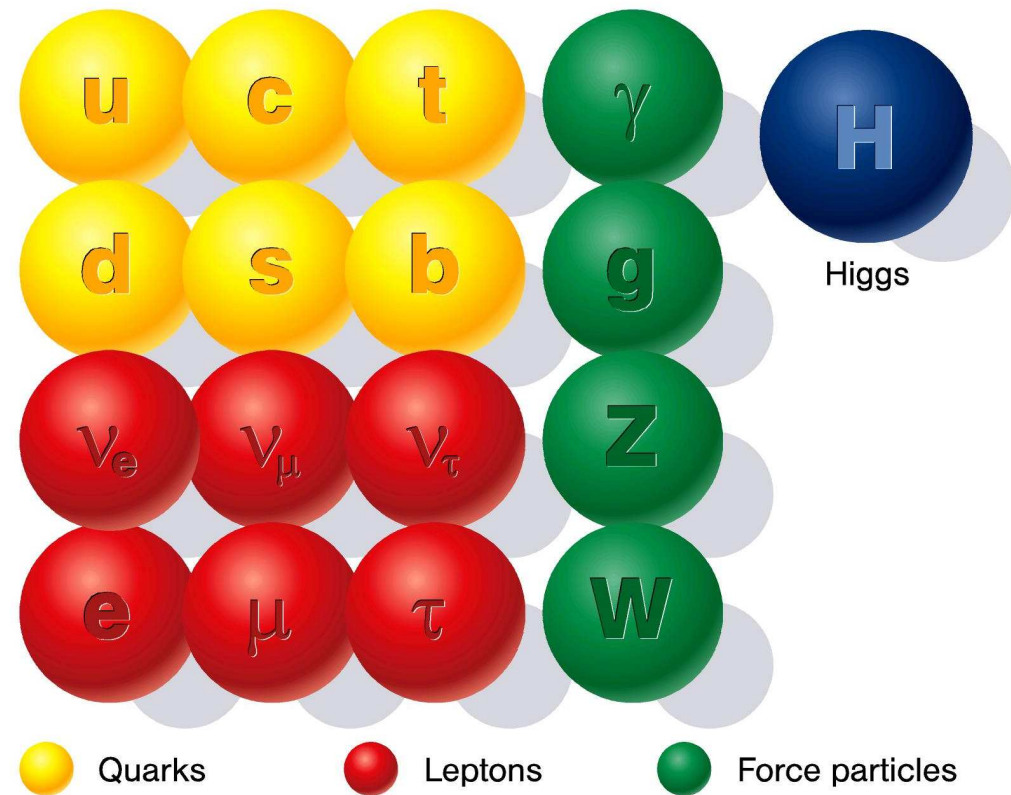
- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0



Model Standardowy

Podsumowanie

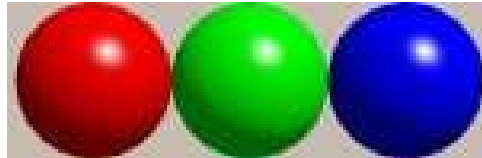
- cząstki materii
kwarki i leptony
 - nośniki oddziaływań
 γ, g, W^\pm i Z^0
 - bozon Higgsa
konieczny dla
spójności modelu
- “Nadaje masy”
wszystkim cząstkom



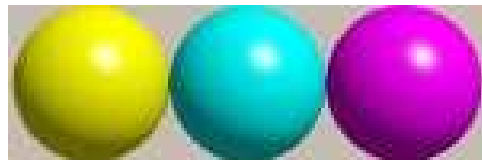
Model Standardowy

Kolor

Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym: **R**, **G** lub **B**.



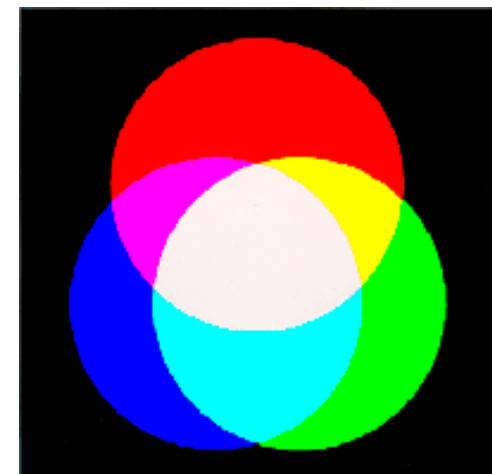
Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego (cząstki “białe”):

$$R + G + B = 0$$

$$R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} = 0$$



Model Standardowy

Hadrony

Oddziaływania silne powodują, że jako swobodne mogą istnieć tylko

- **bariony**: cząstki złożone z 3 kwarków
- **mezony**: cząstki złożone z kwarku i antykwarku

Znamy kilkaset takich cząstek, większość z nich jest bardzo nietrwała!

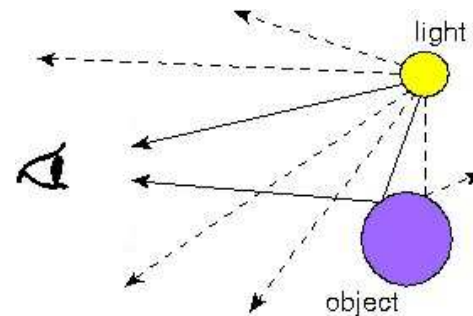
Tylko kilka z nich żyje na tyle długo, żeby móc być bezpośrednio zmierzone: proton, neutron, piony π^\pm , kaony K^\pm i K_L^0 .

Oprócz tego bezpośrednio mierzyć możemy: elektrony, miony, fotony i **neutrino**.

O istnieniu pozostałych wnioskujemy badając produkty ich rozpadu...

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.

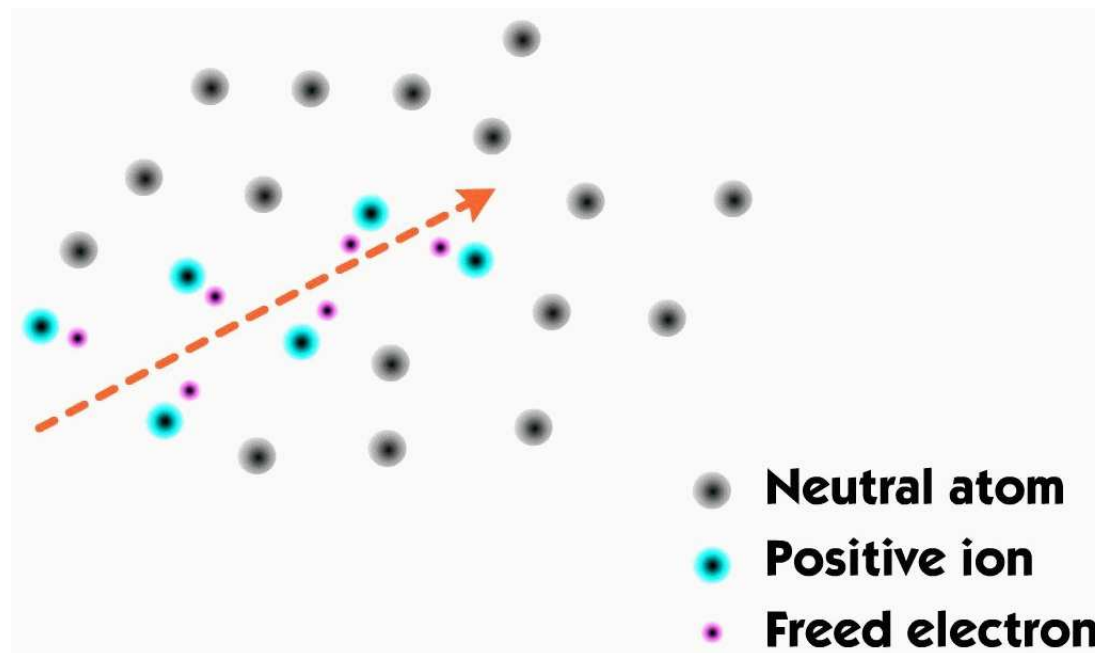
Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

- jonizacja i scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

Detekcja cząstek

Jonizacja

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

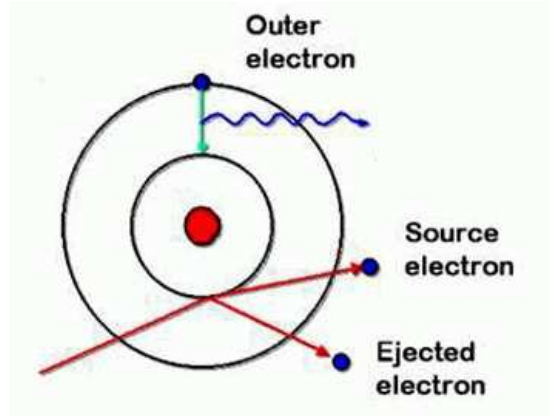


Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów. **Pojawiają się swobodne nośniki ładunku**

Detekcja cząstek

Scyntyłacja

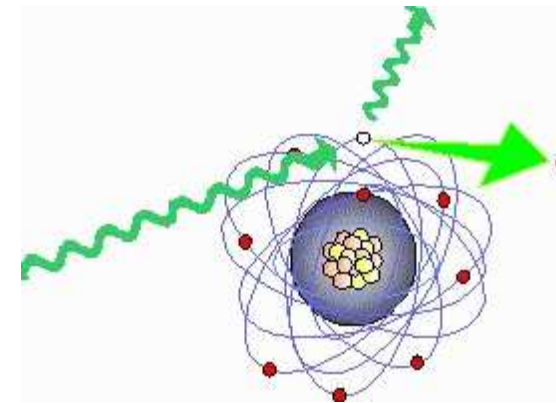
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



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

Fotony

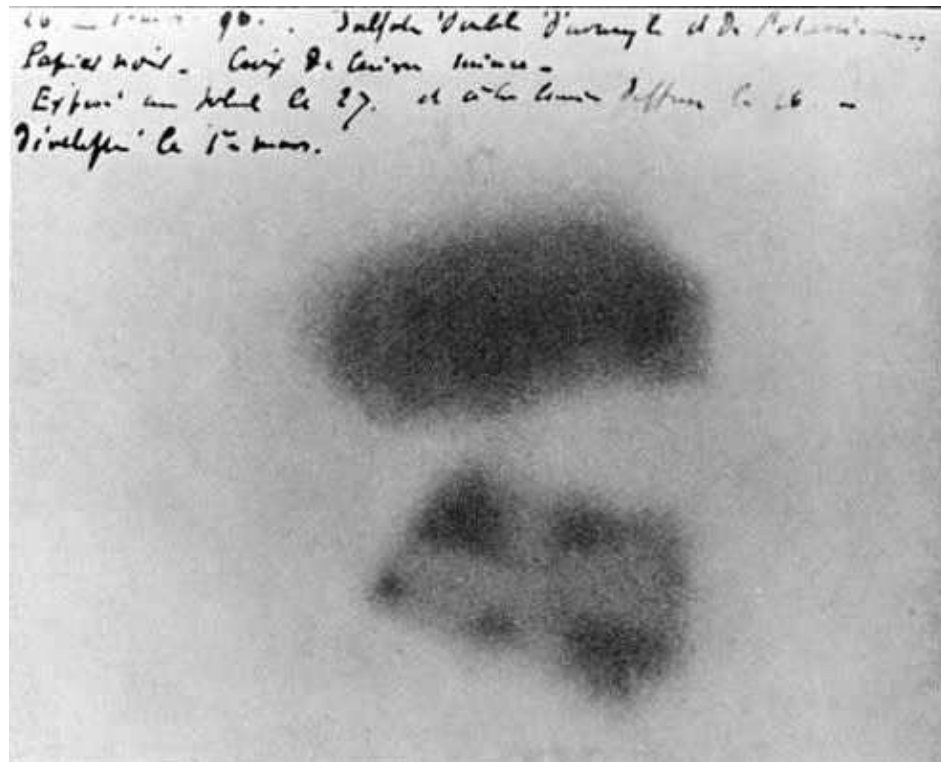
Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).



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

Detekcja cząstek

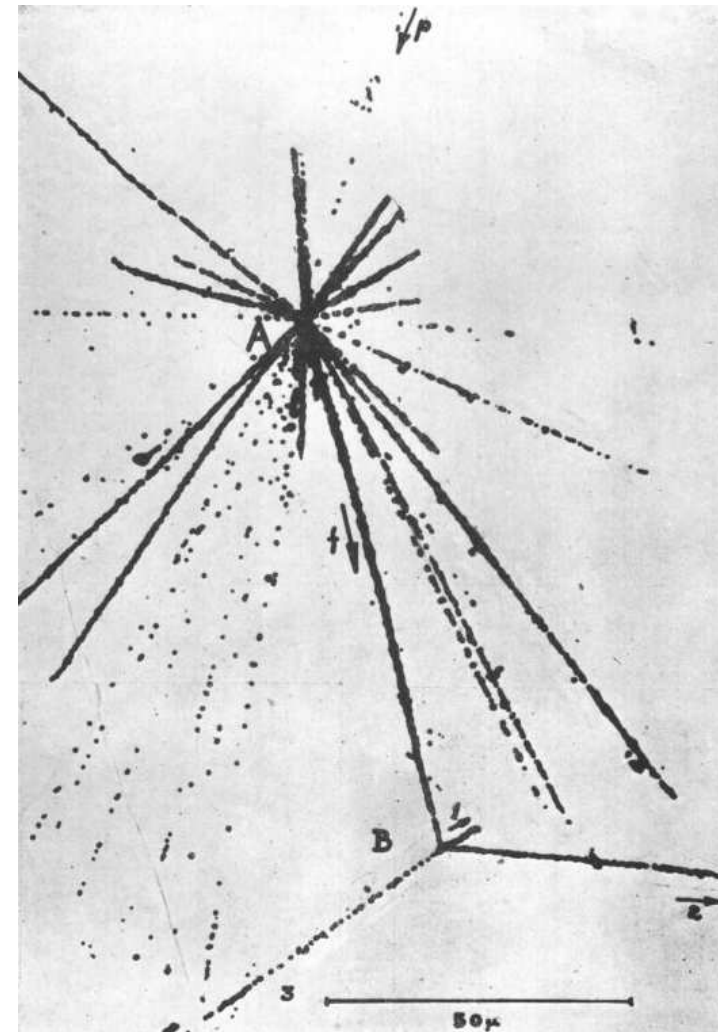
Emulsja fotograficzna



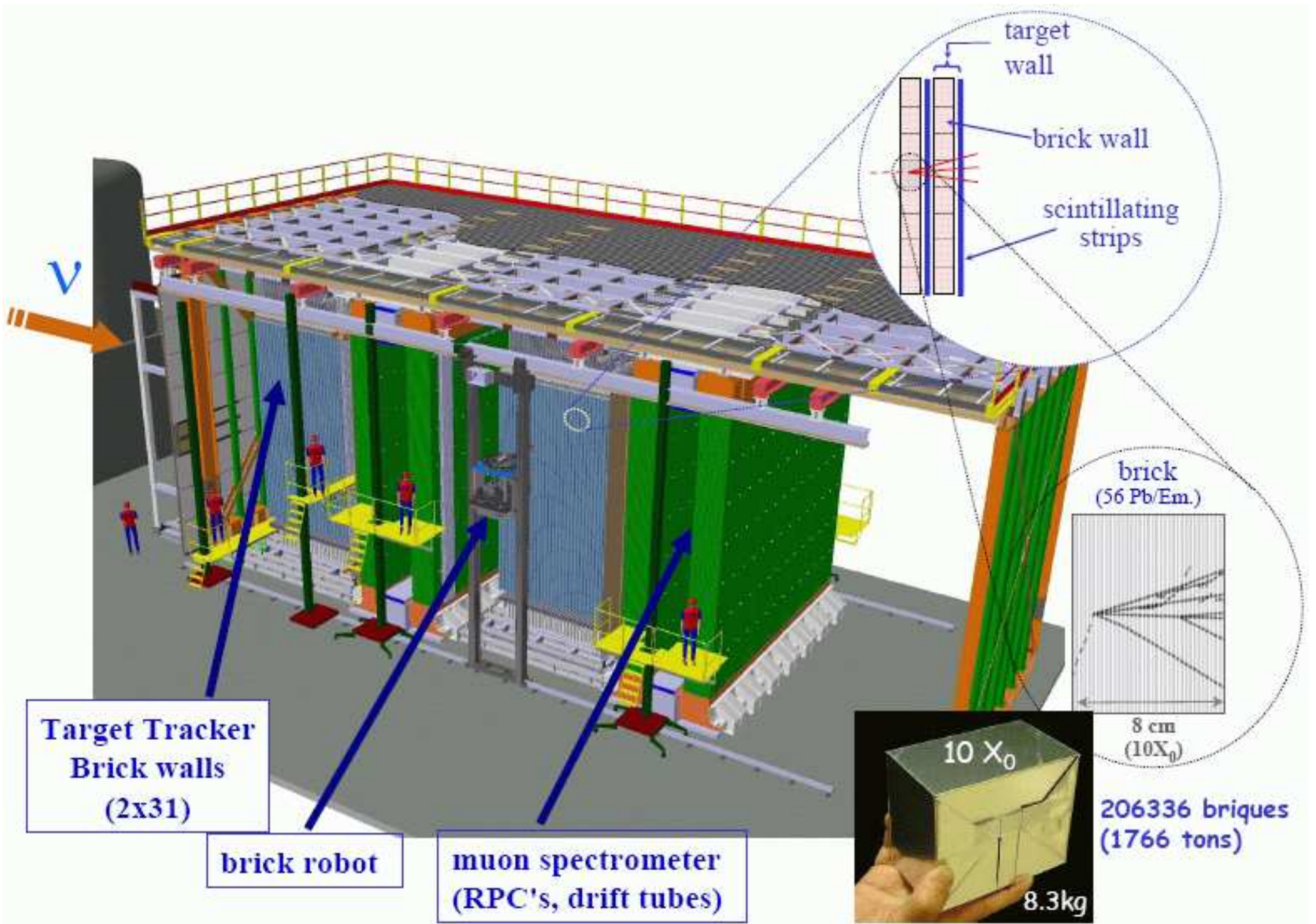
H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy

⇒ reakcja chemiczna



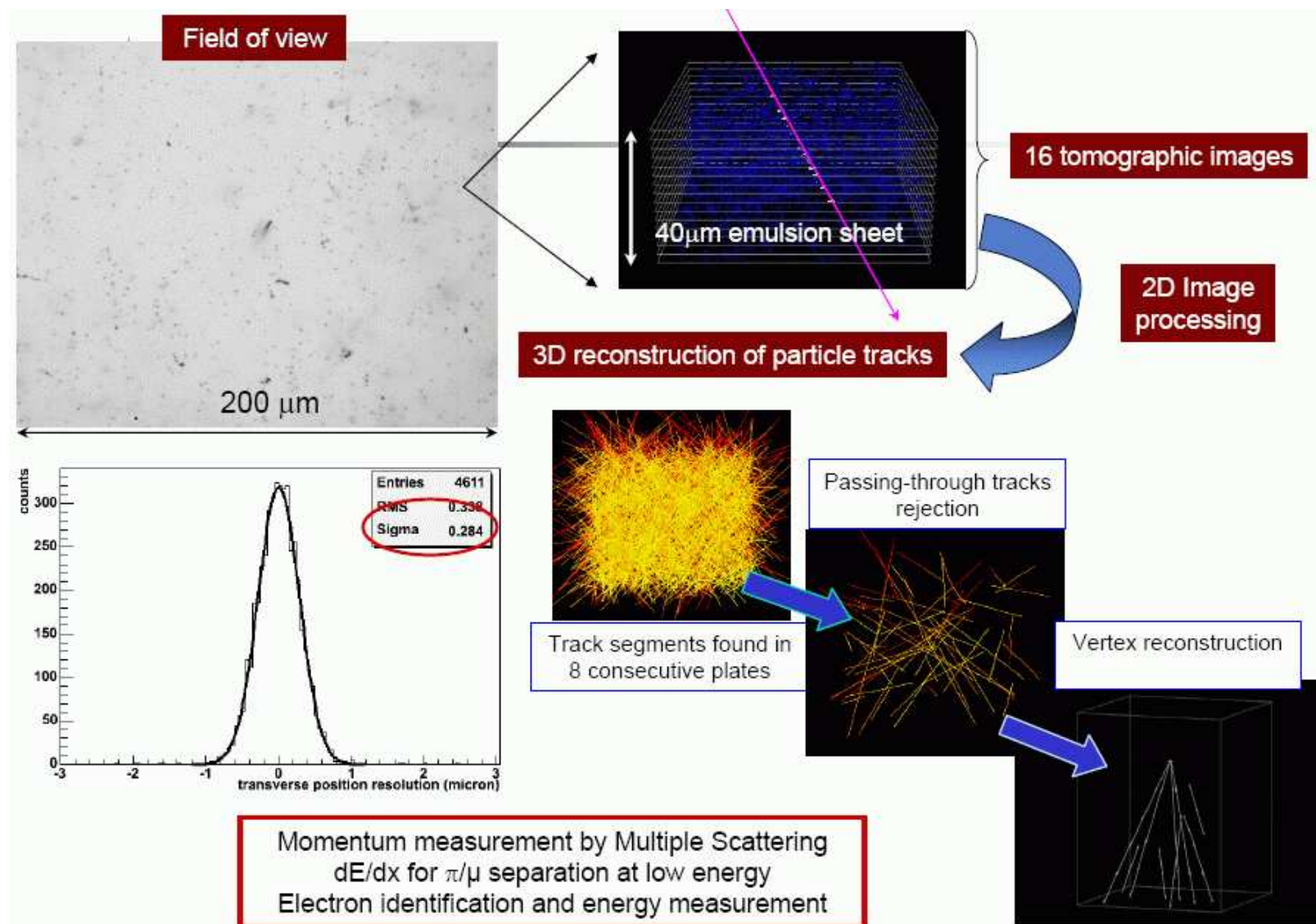
M. Danysz i J. Pniewski, 1953



Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna

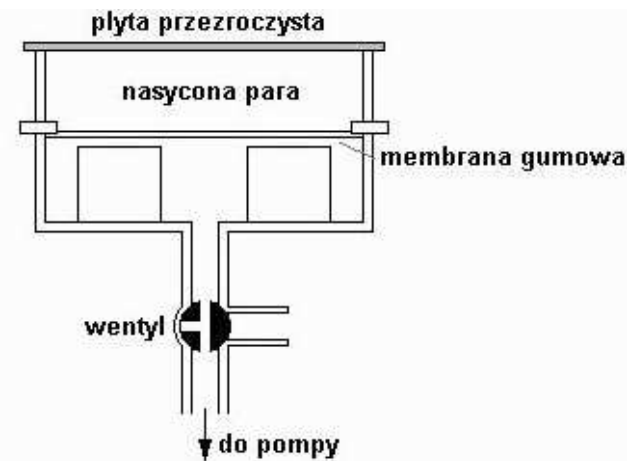
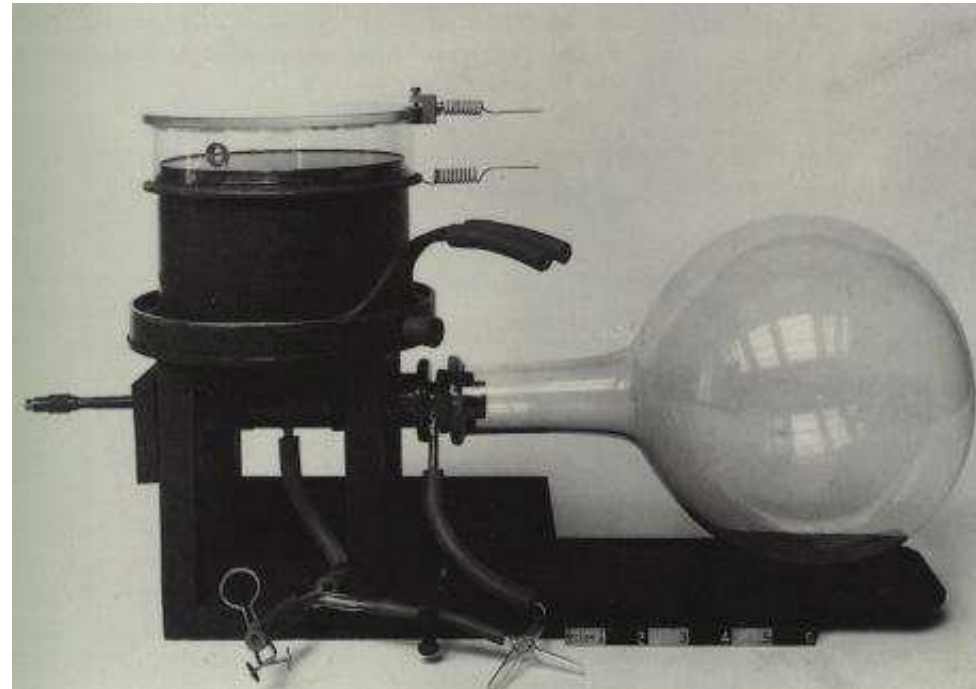
eksperyment OPERA



Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

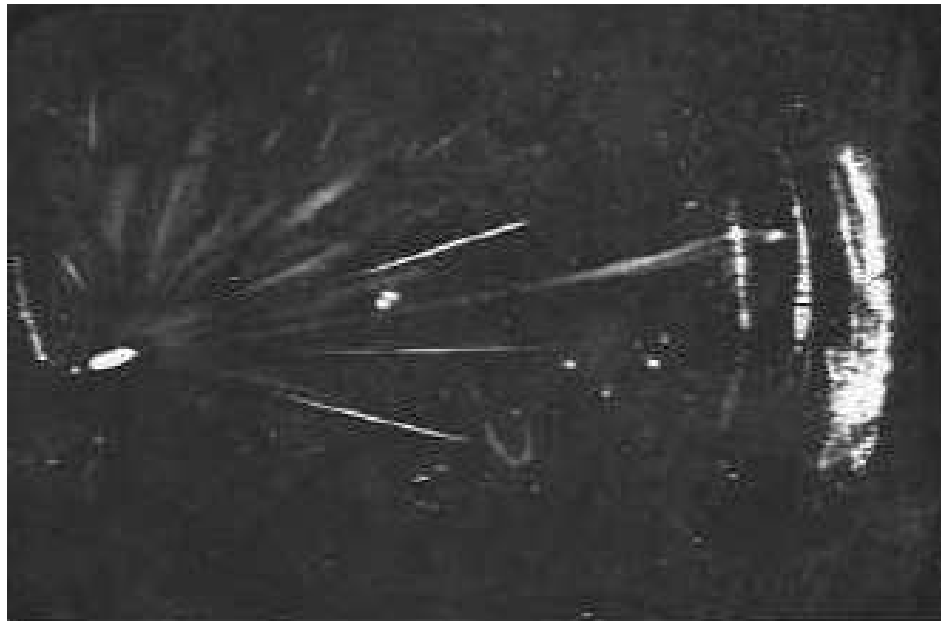


jony
⇒ kondensacja pary

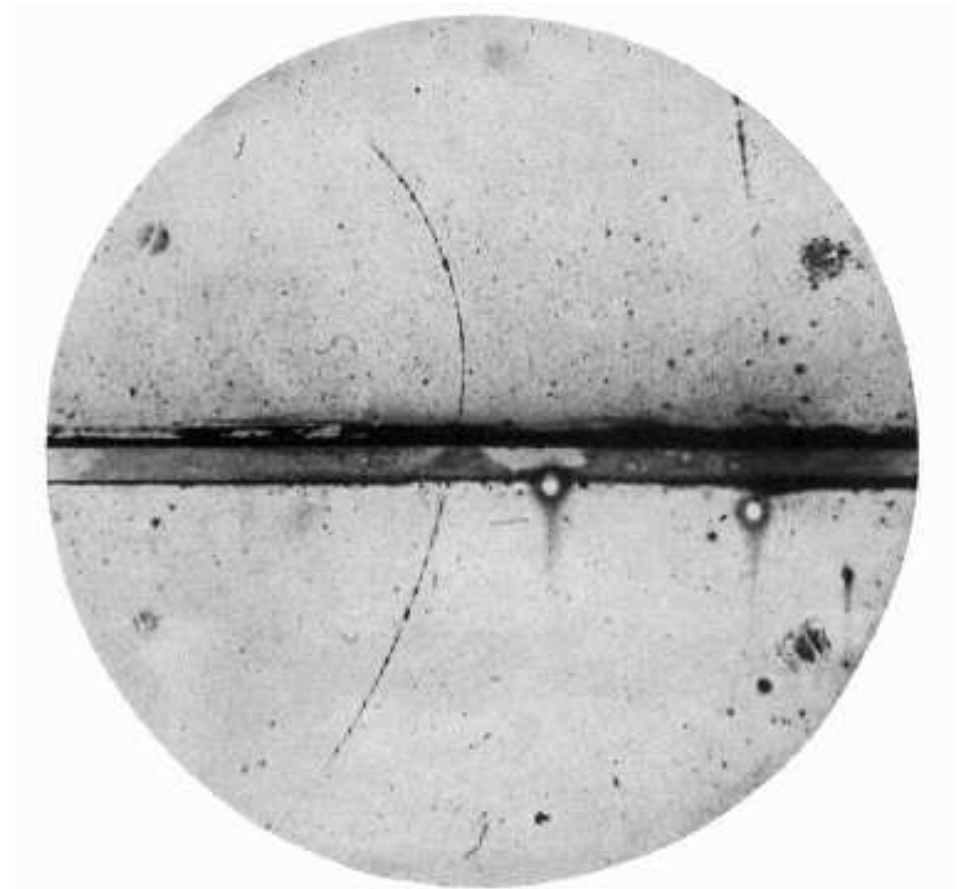
Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



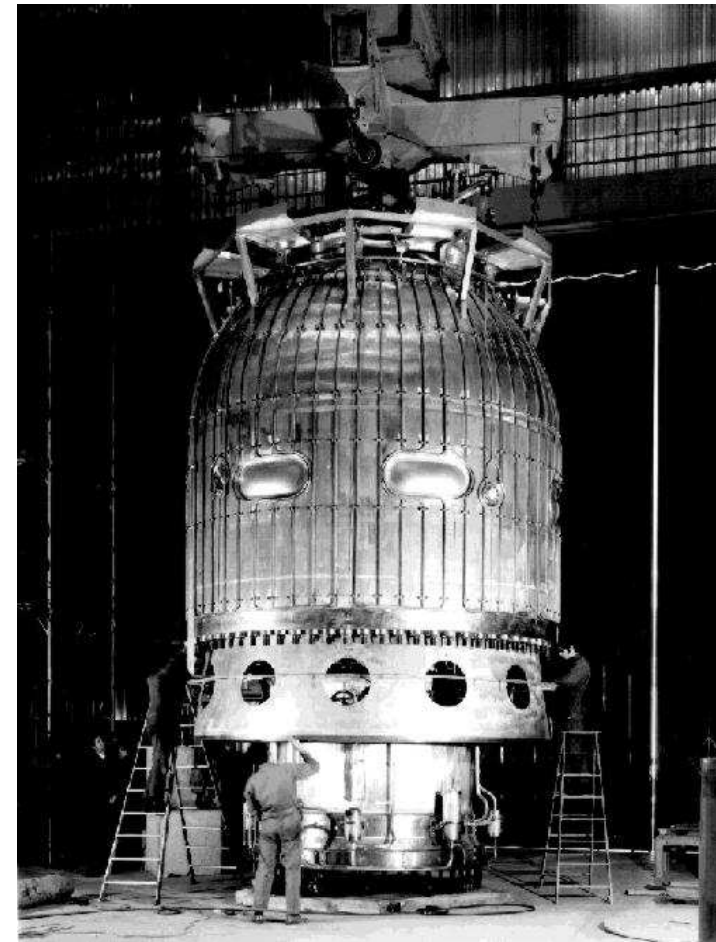
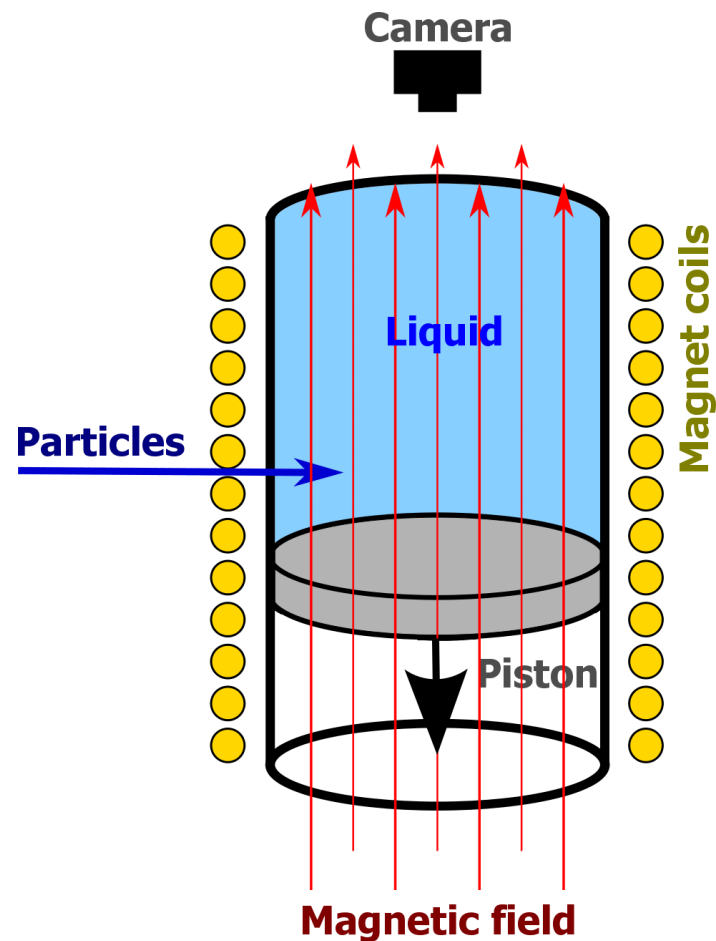
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa, 1952

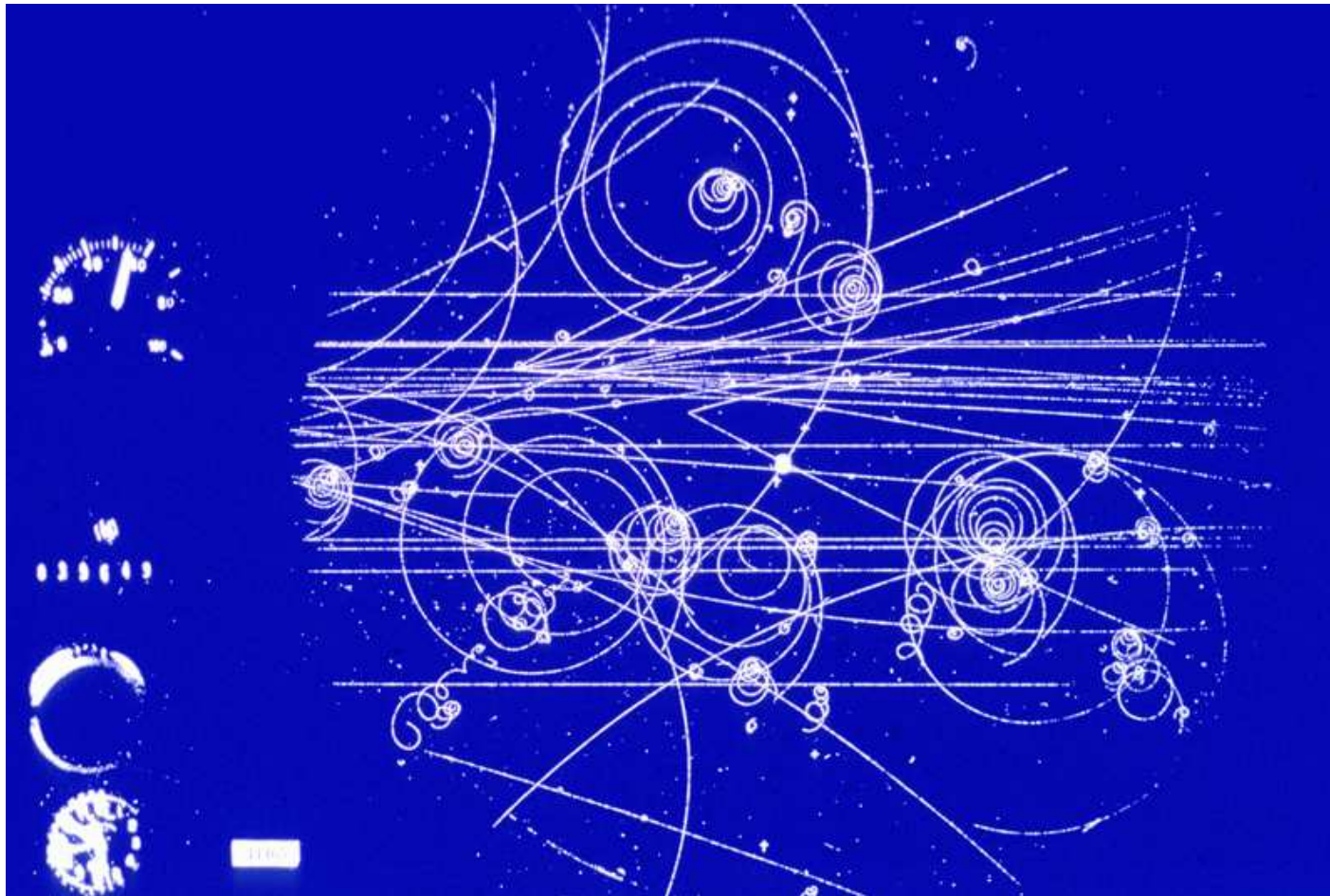


jony \Rightarrow wrzenie ciecży



Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa



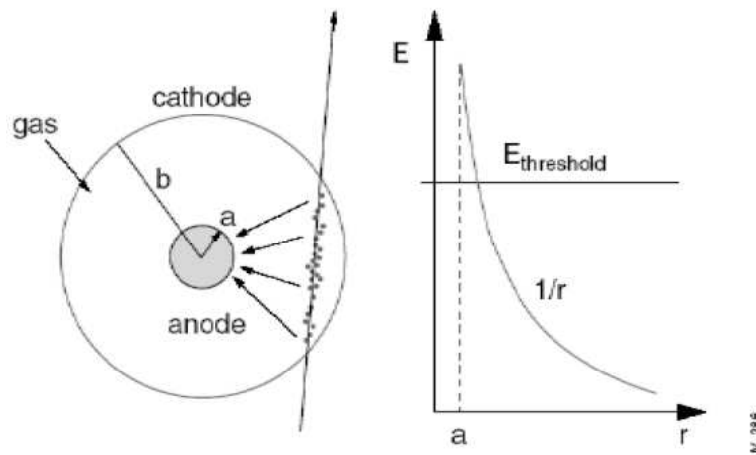
Cząstki wiązki oddziałują z cząstkami cieczy - "tarczy".

Detekcja cząstek

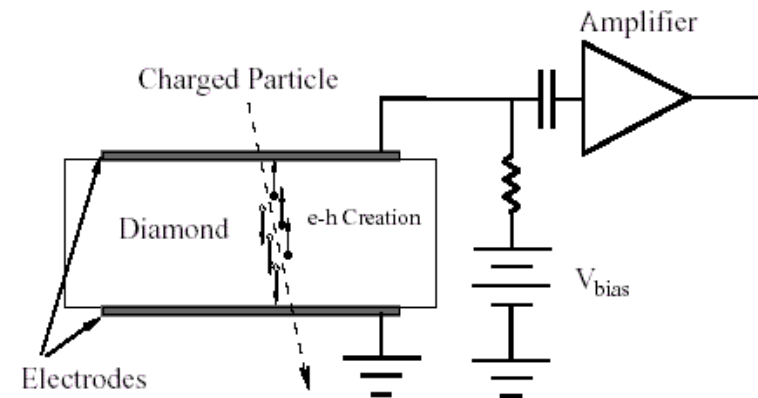
Pomiar jonizacji

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

w gazie



w półprzewodniku

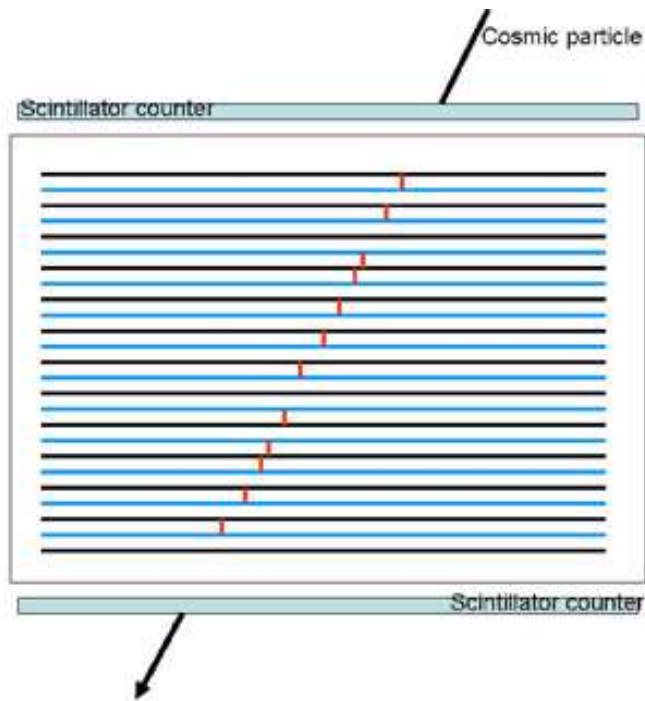


Na tej zasadzie opiera się większość współczesnych detektorów.

Detekcja cząstek

Komora iskrowa

Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



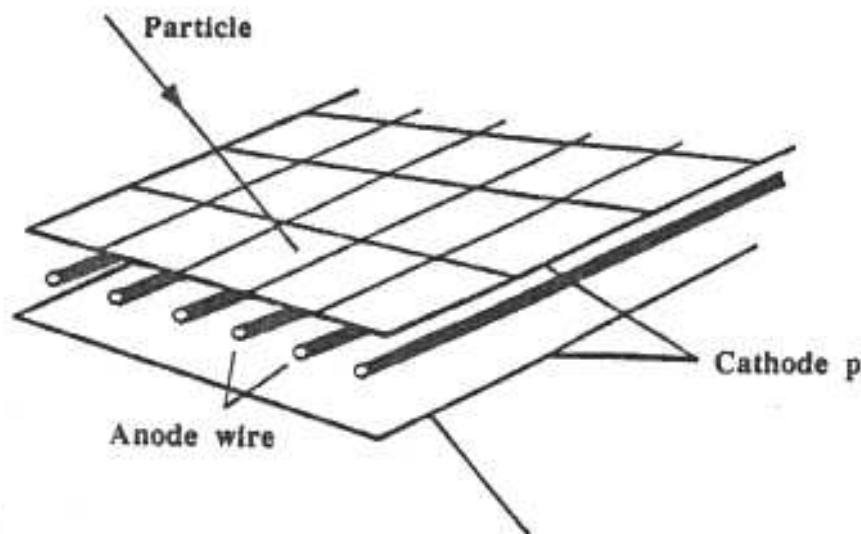
Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)



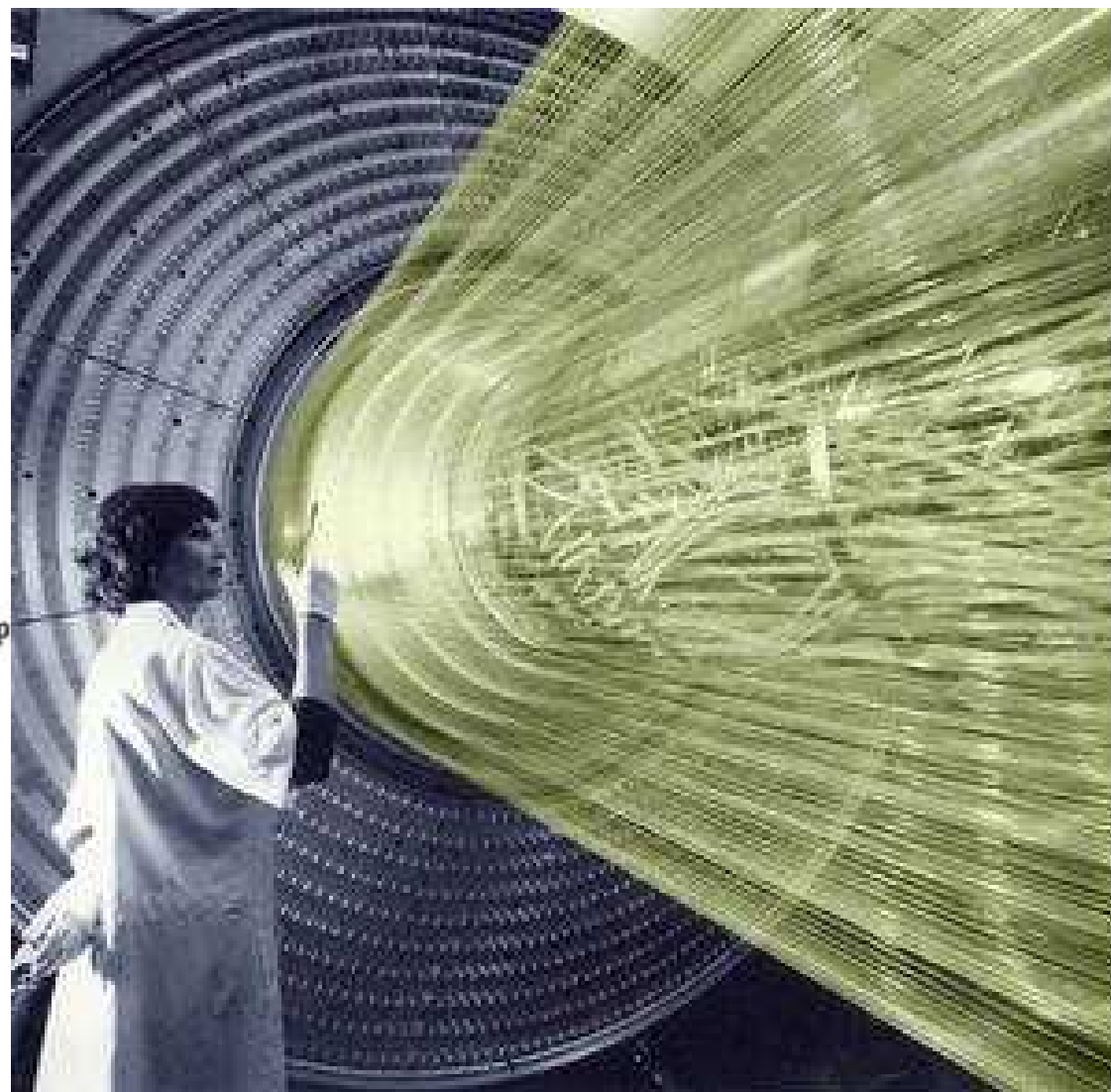
Detekcja cząstek

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



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



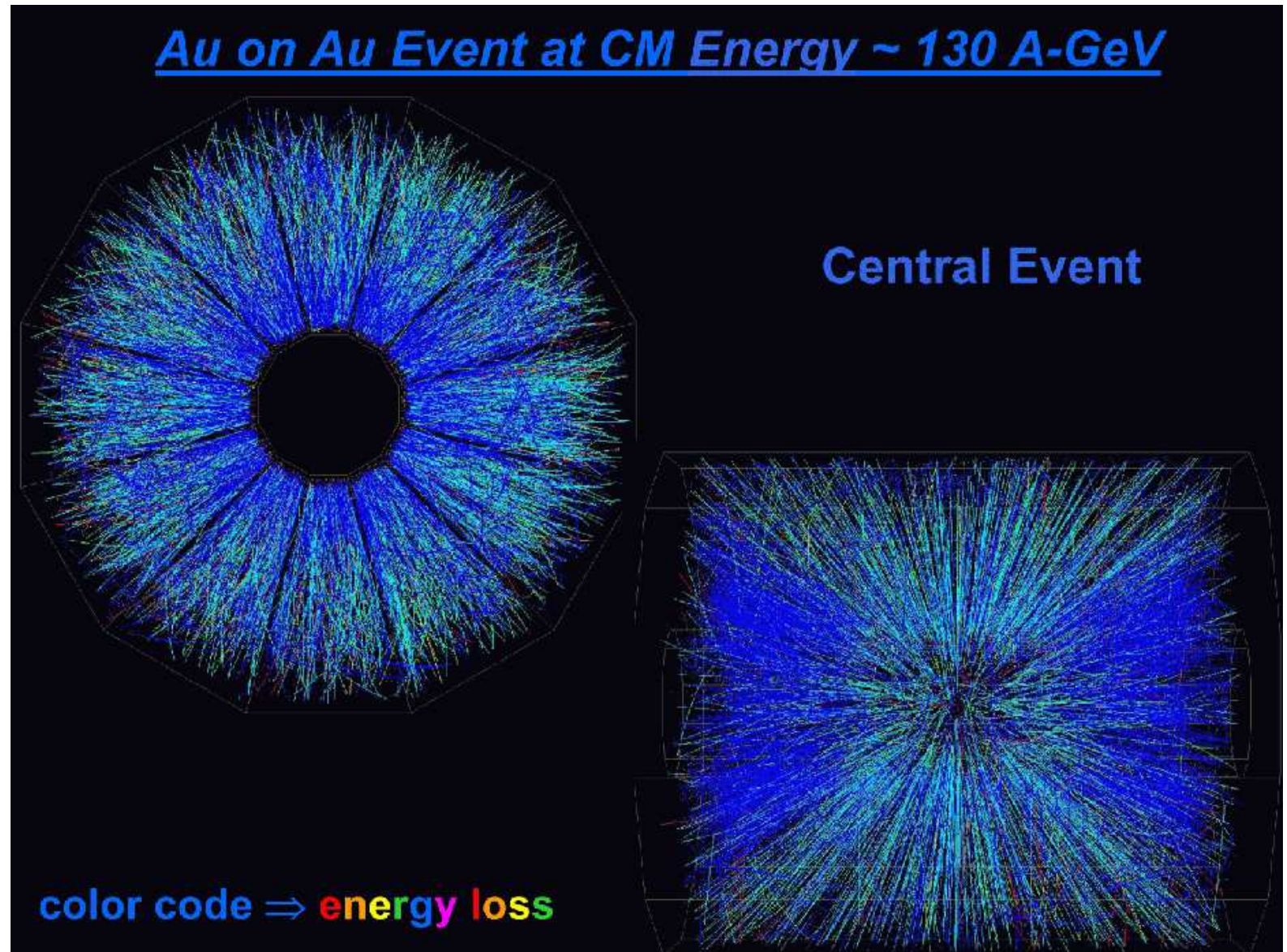
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

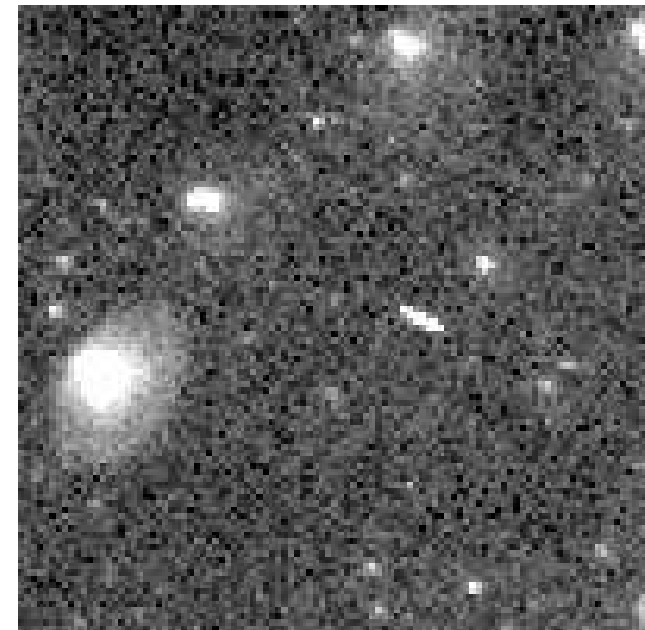
Bardzo różne technologie, m.in. CCD (używane w fotografii cyfrowej)

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



Wycinek:



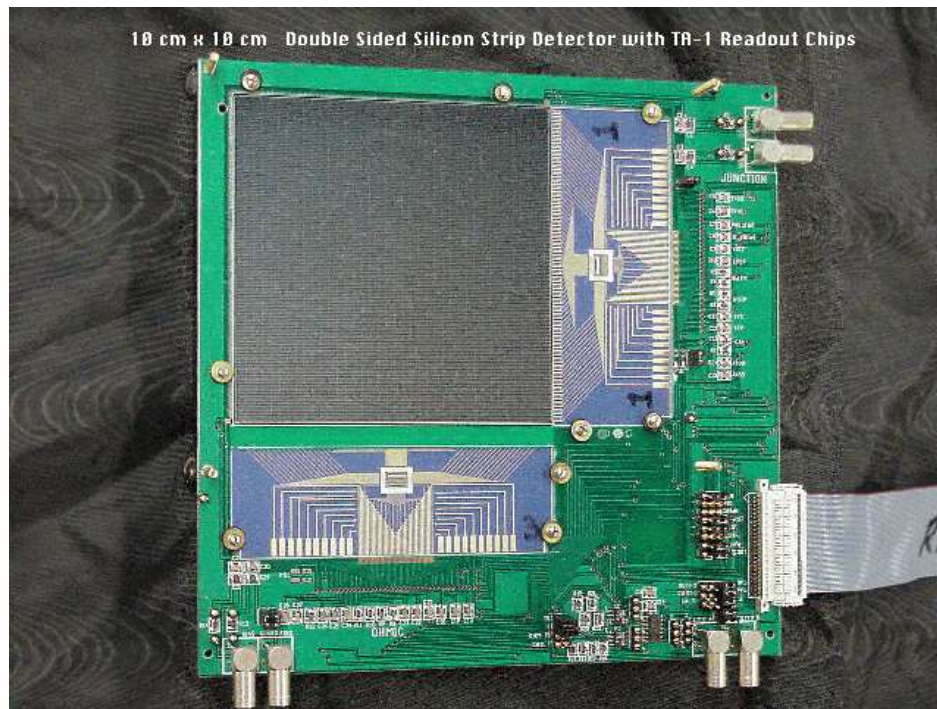
To nie UFO. To ślad cząstki...

Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

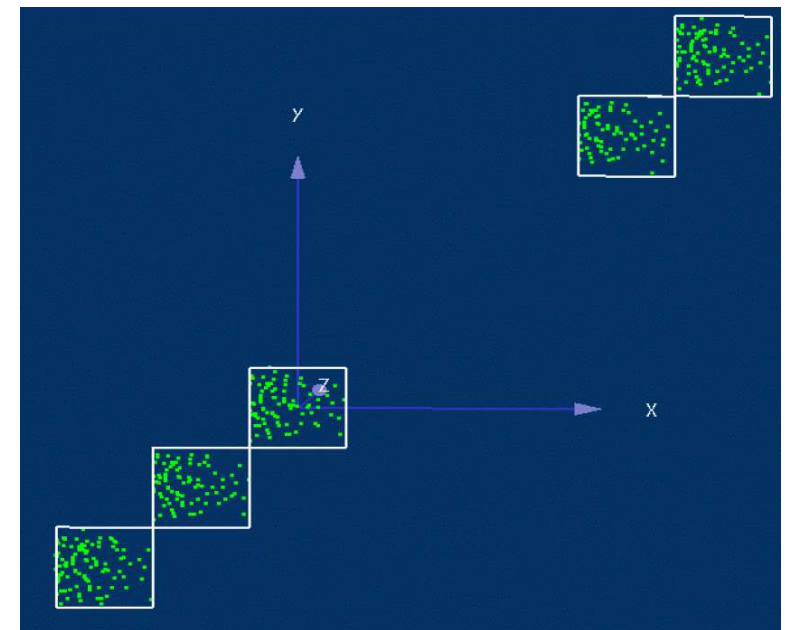
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

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



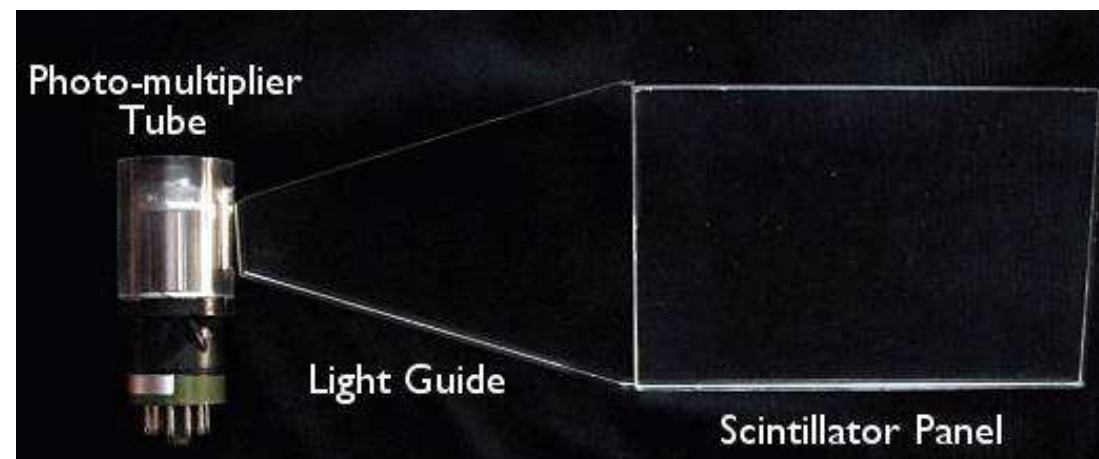
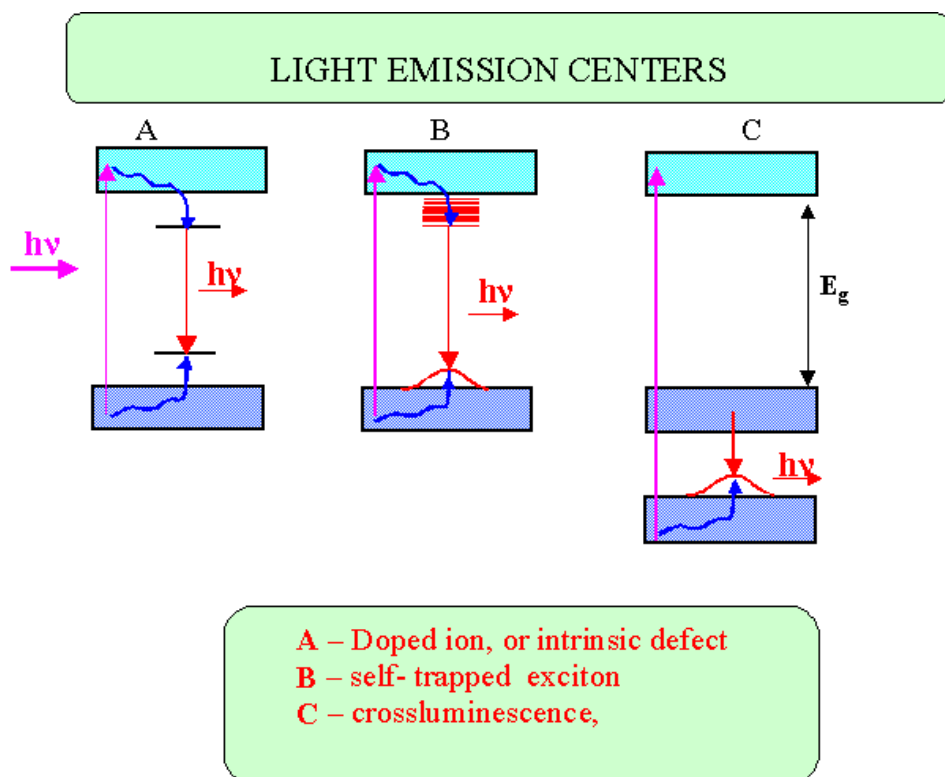
Mierzając pozycje w wielu warstwach możemy zrekonstruować tor.

Detekcja cząstek

Scyntylacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza

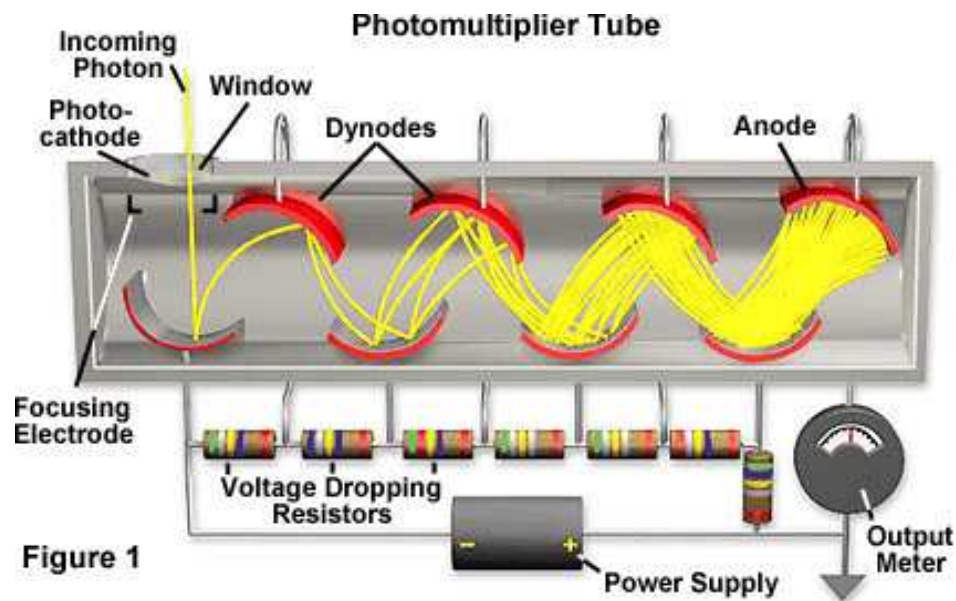


Brak pomiaru pozycji
 Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki

Detekcja cząstek

Fotopowielacz

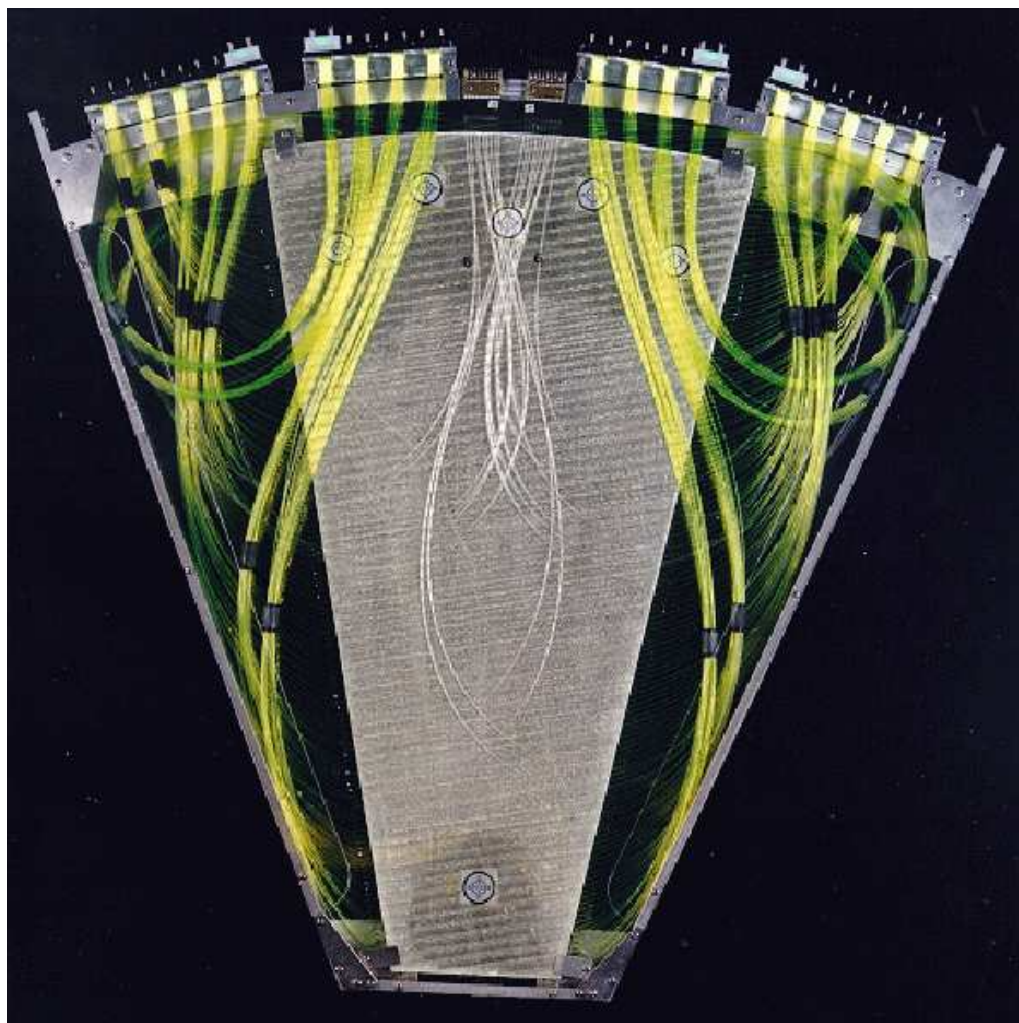
Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek.



Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detekcja cząstek

Detektory scyntylacyjne

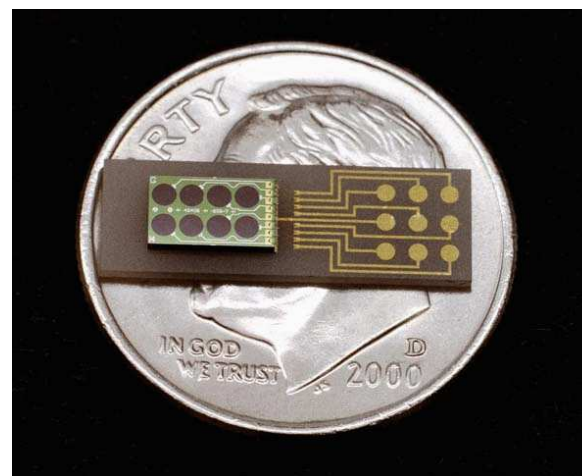


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

← włókna scyntylujące,

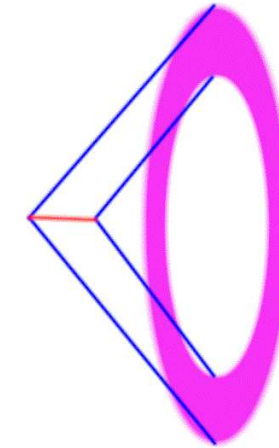
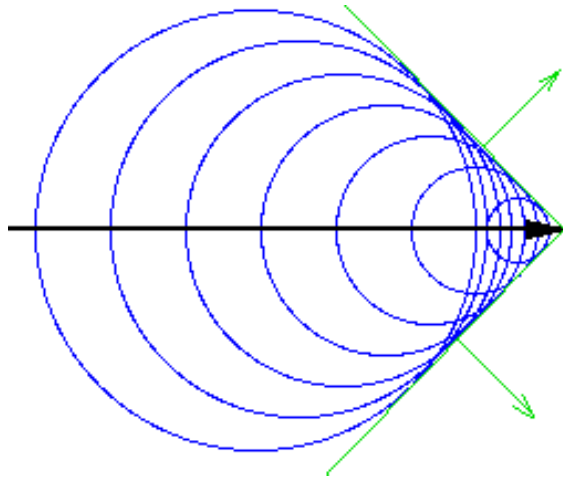
↓ fotonowielacze krzemowe.



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

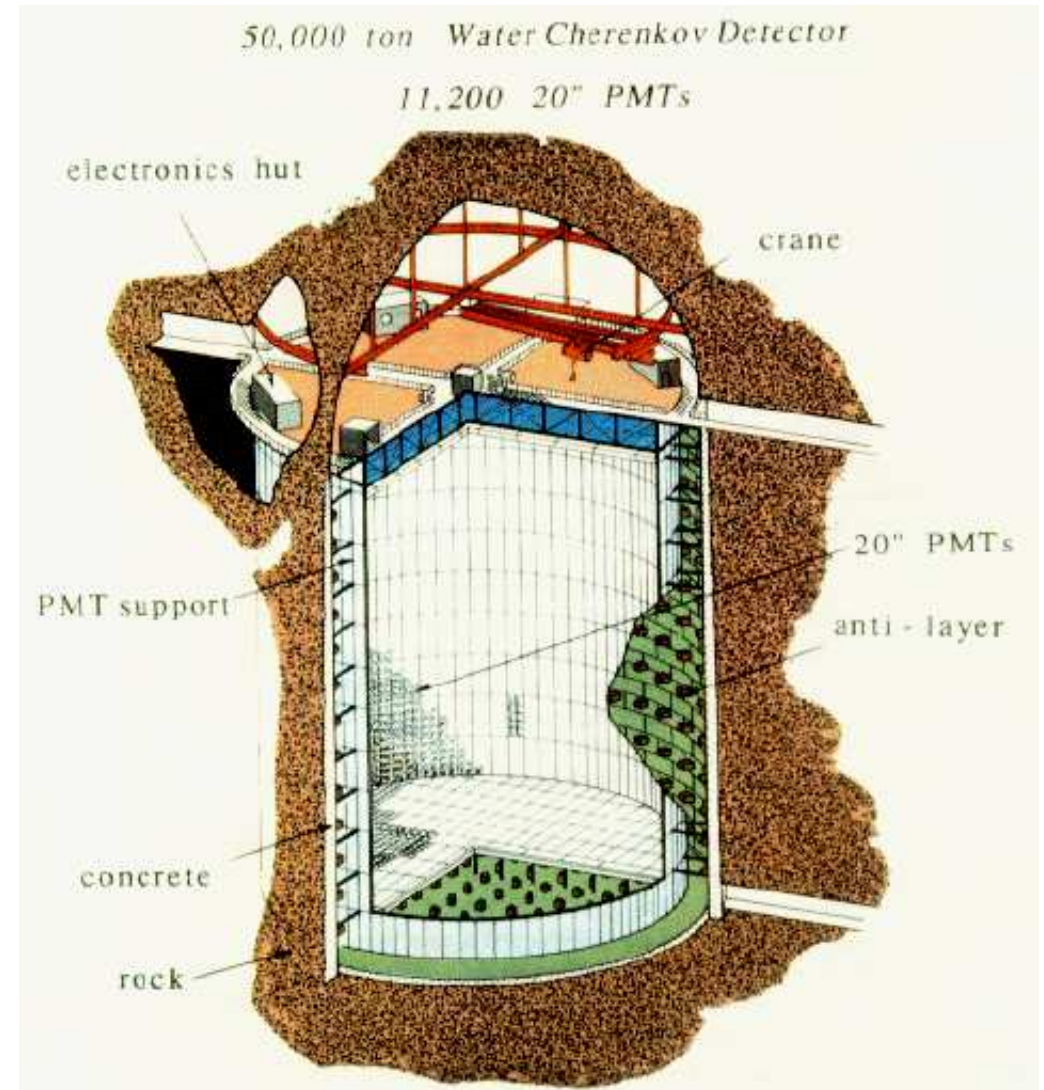
Super-Kamiokande

eksperyment neutrinowy

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

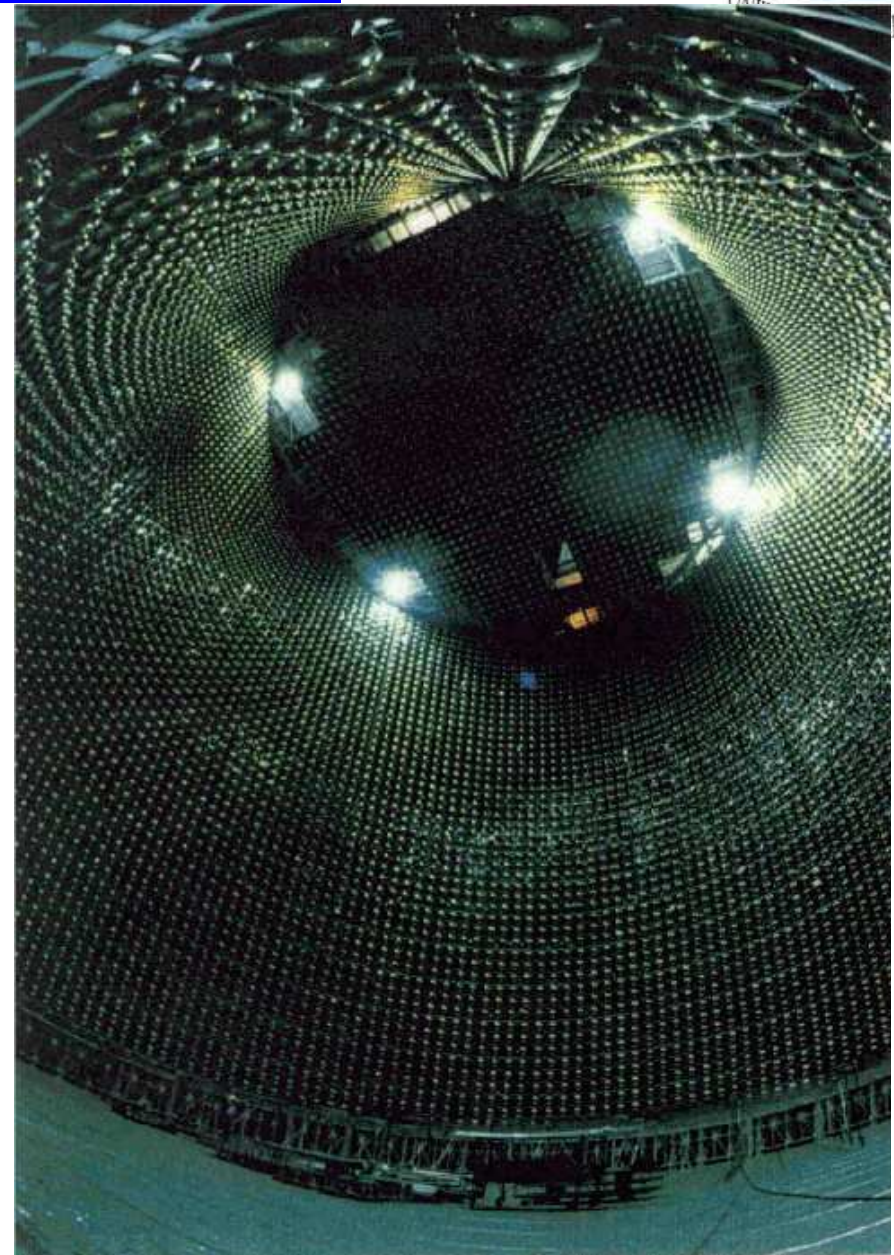
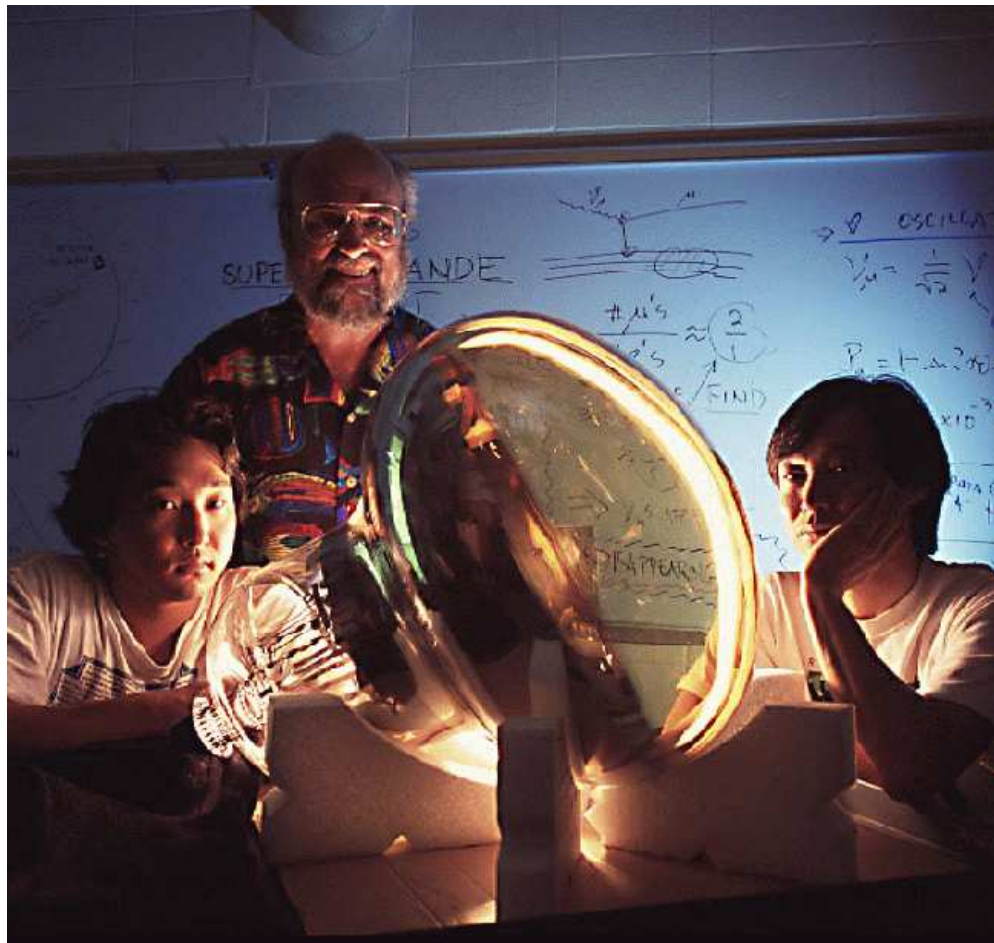
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

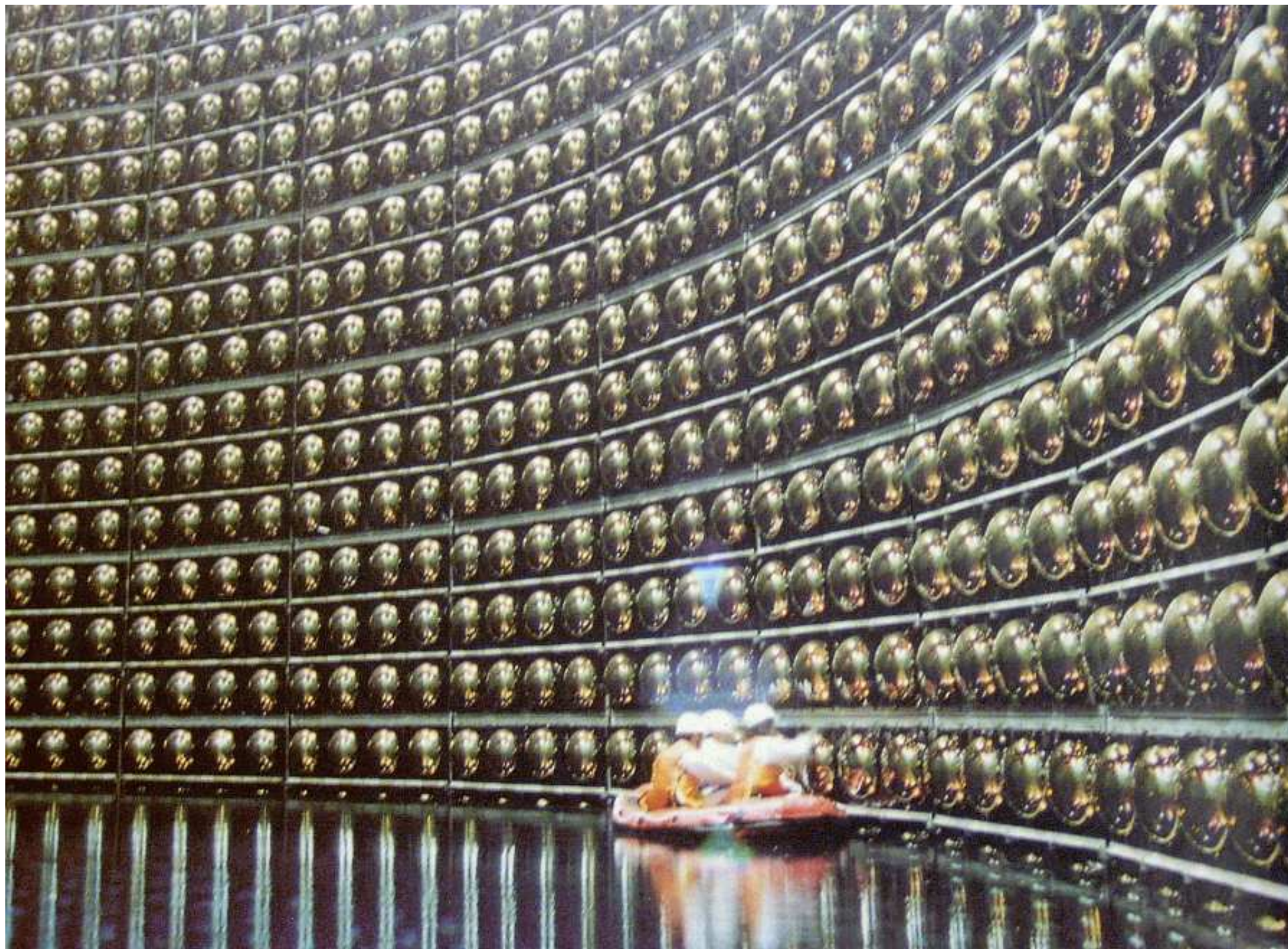
rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande





SKI



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande

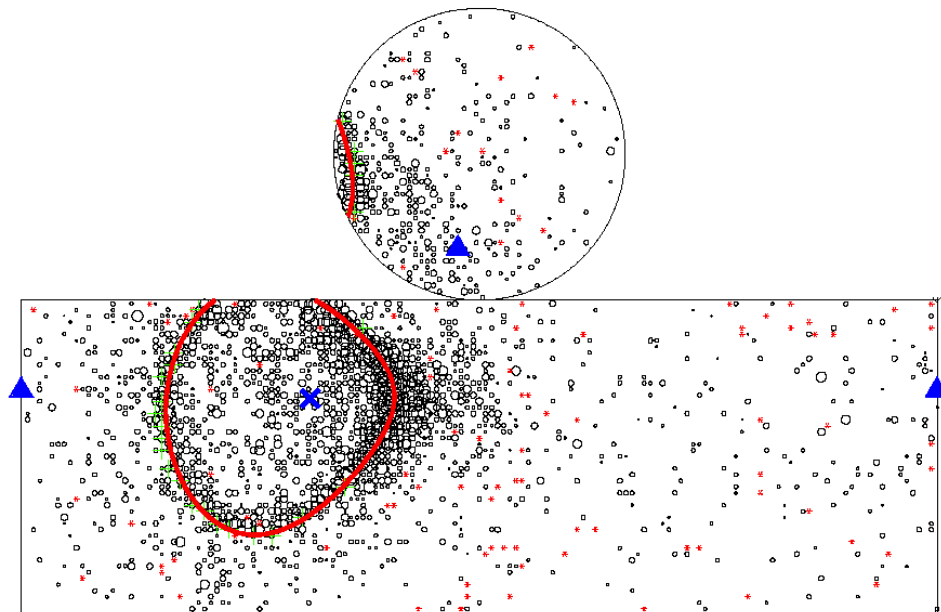
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

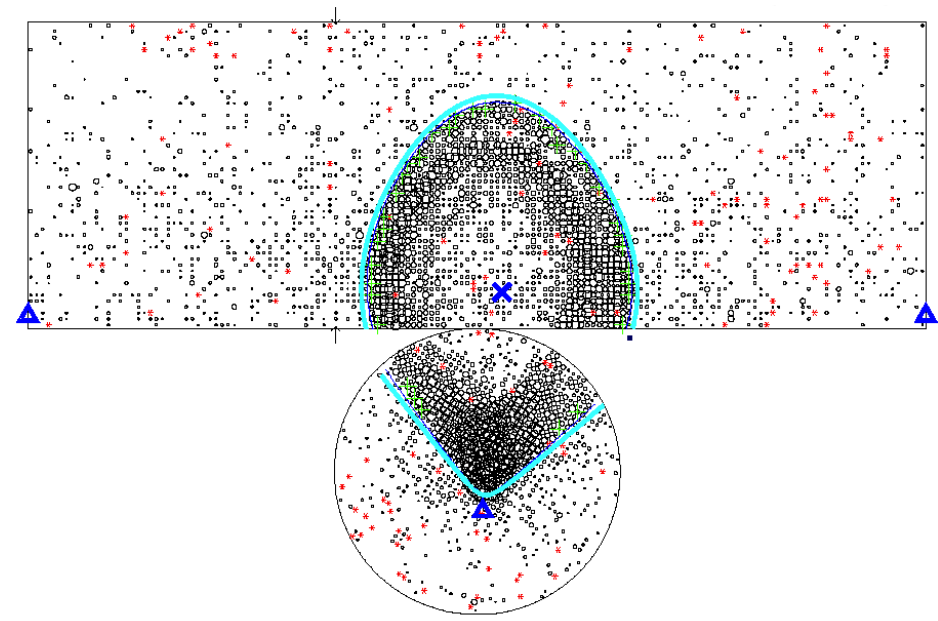


Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

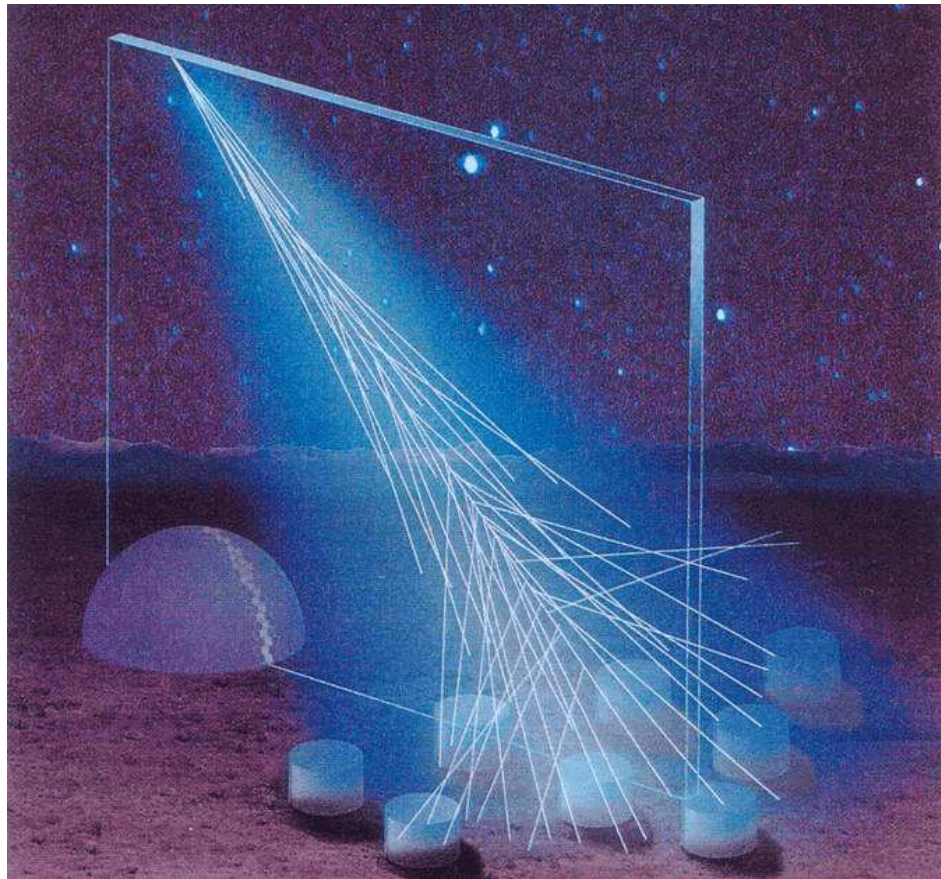
“gruby” pierścień.



Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Obserwacja wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego.

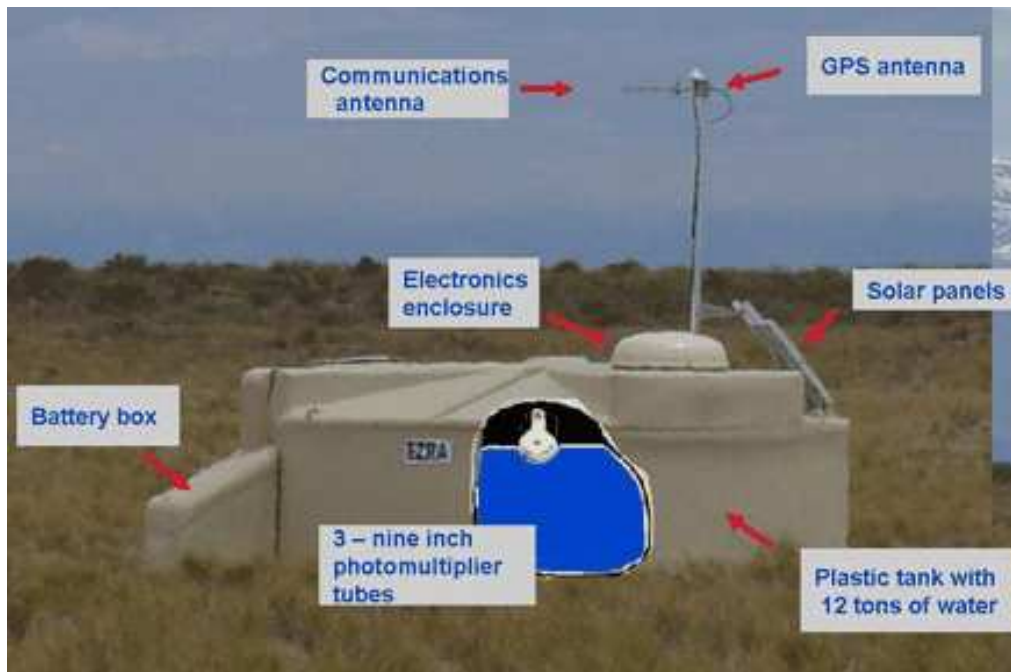


Scyntyllacja w powietrzu.
Promieniowanie Czerenkowa w
detektorach na powierzchni.

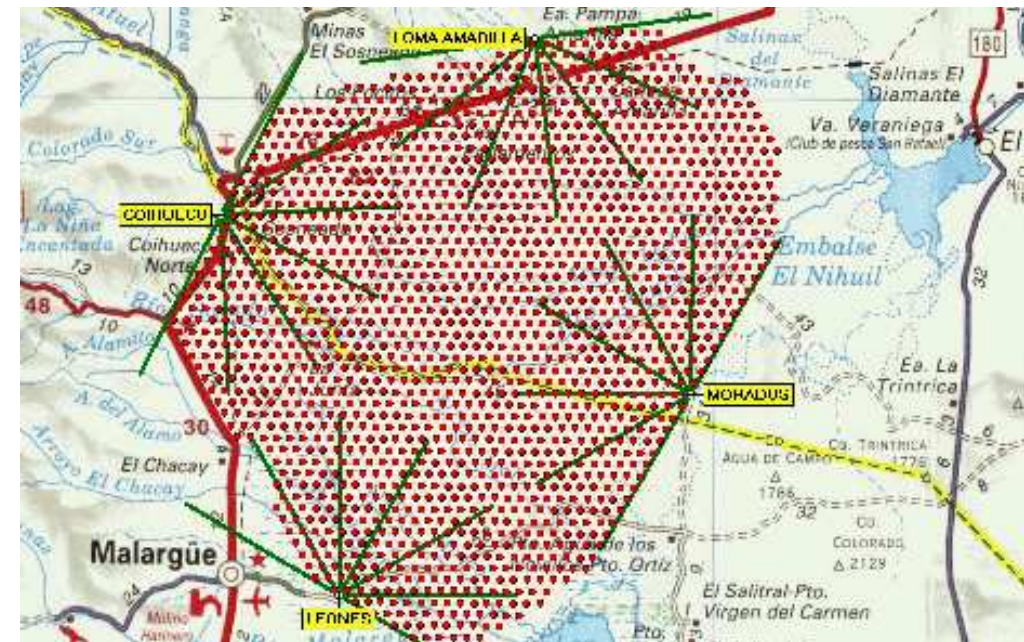
Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Detektor powierzchniowy



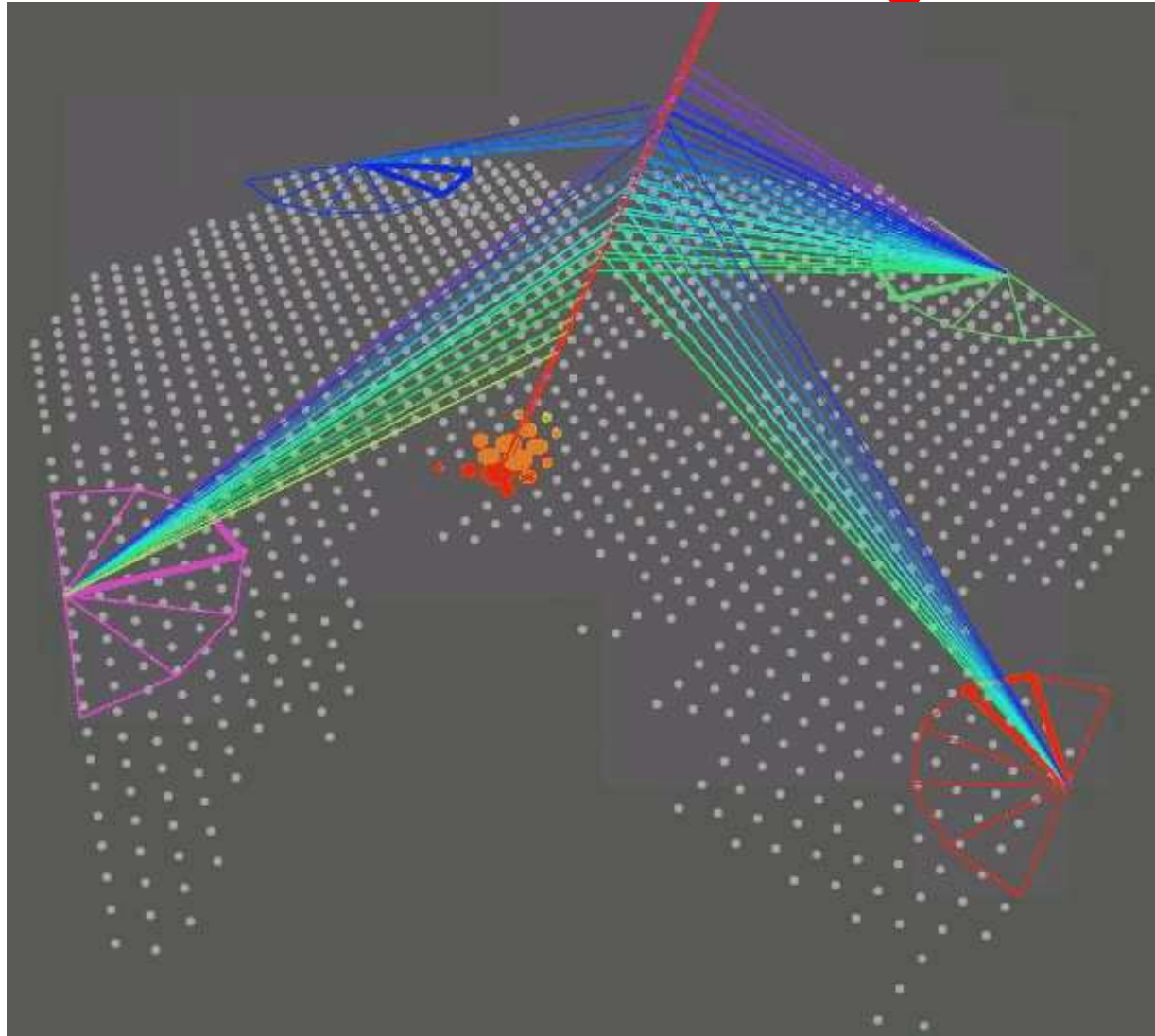
Mapa obserwatorium:



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
+ "śląd" na powierzchni

Detekcja cząstek

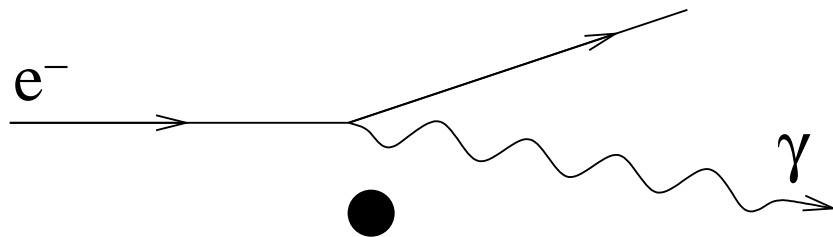
Kalorymetry

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

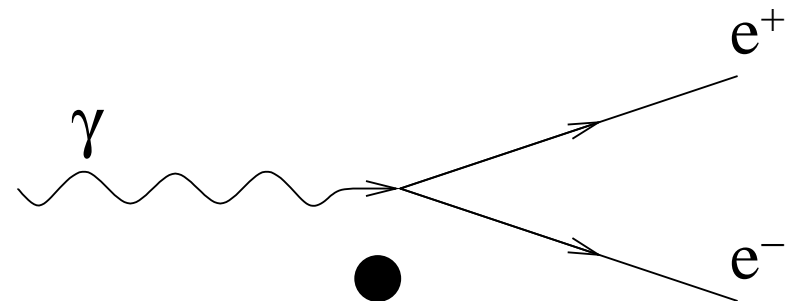
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi.

Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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



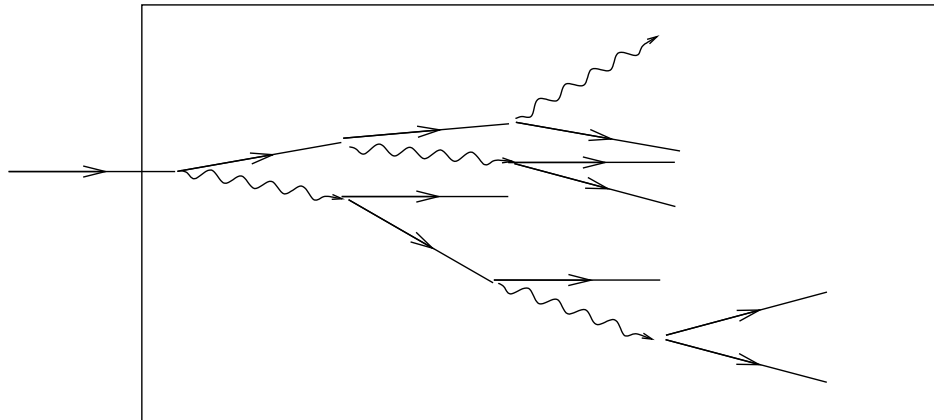
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

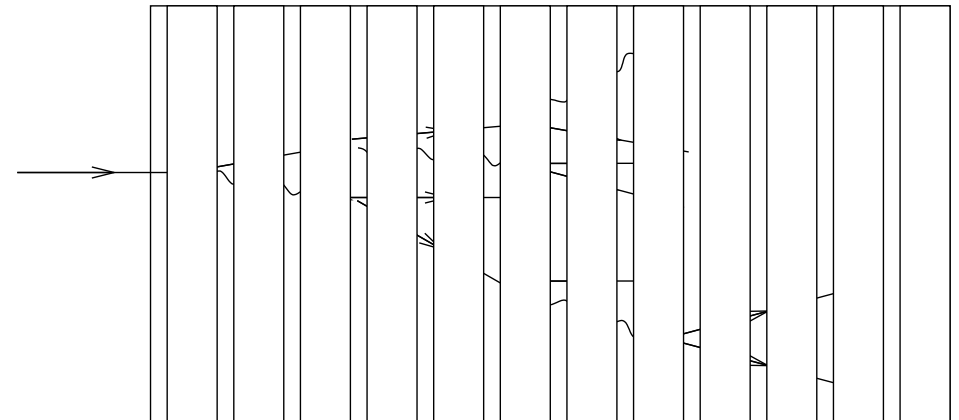
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylnatora

Kalorymetr próbkujący

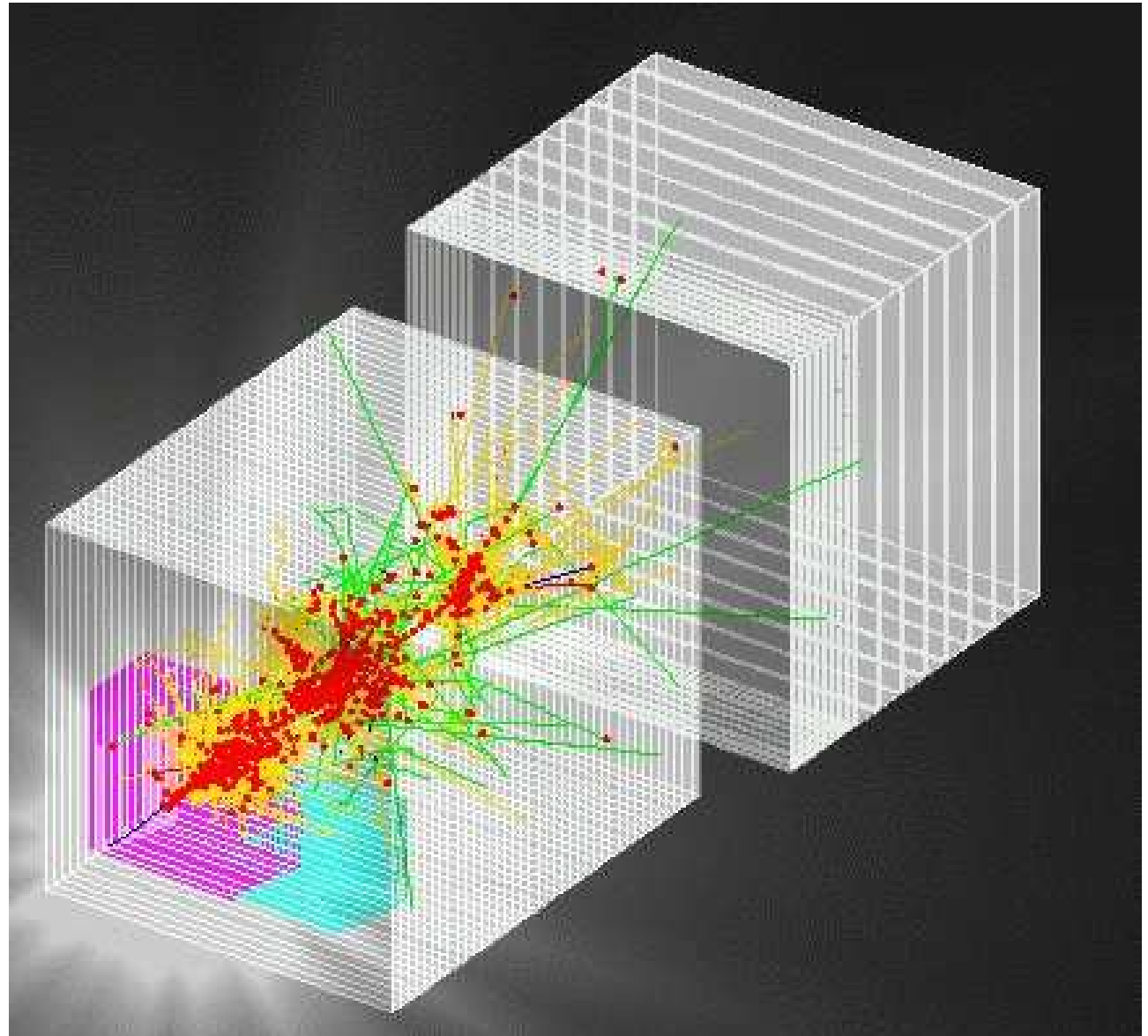


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)










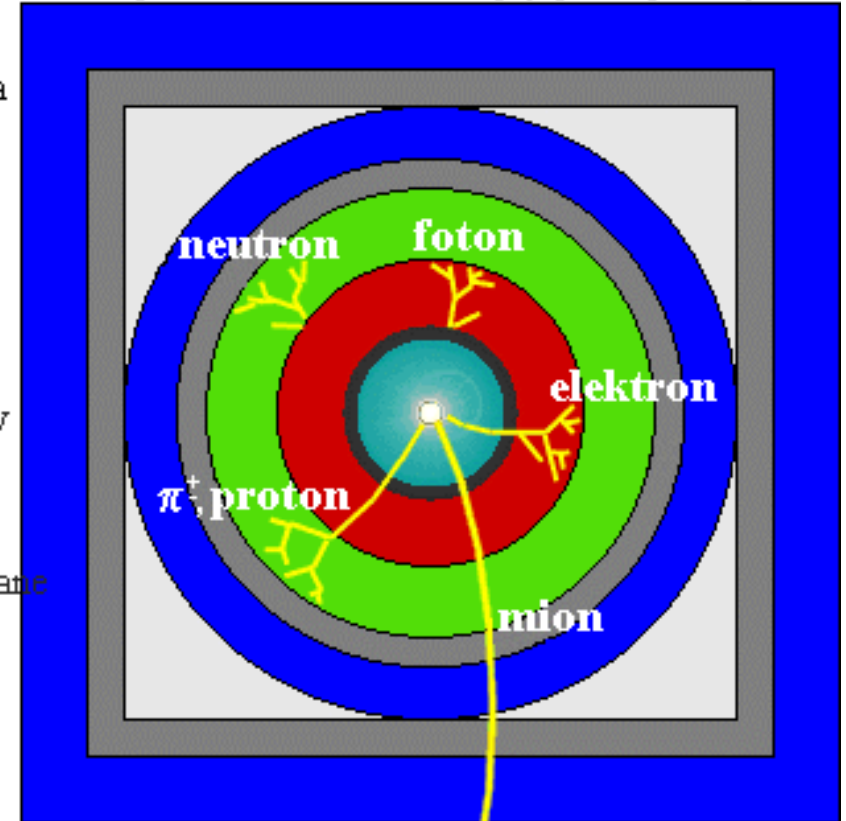
Detektory uniwersalne

Struktura warstwowa

Współczesne eksperymenty fizyki wysokich energii (zwłaszcza te na wiązkach przeciwbieżnych) są naogół zbudowane z **wielu różnorodnych elementów**.

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

-  rura dryfowa
-  komora trakera
-  solenoid magnesu
-  kalorymetr elektromagnetyczny
-  kalorymetr hadronowy
-  namagnesowane żelazo
-  komory mionowe



Ułożone **jeden za drugim** detektory umożliwiają optymalny pomiar **wszystkich rodzajów cząstek** i ich (zwykle częściową) identyfikację.

Detektory uniwersalne

Schemat budowy

Ten schemat opisuje większość współczesnych eksperymentów przy kolajderach (LEP, HERA, Tevatron, LHC, ILC):

Kolejno od środka detektora:

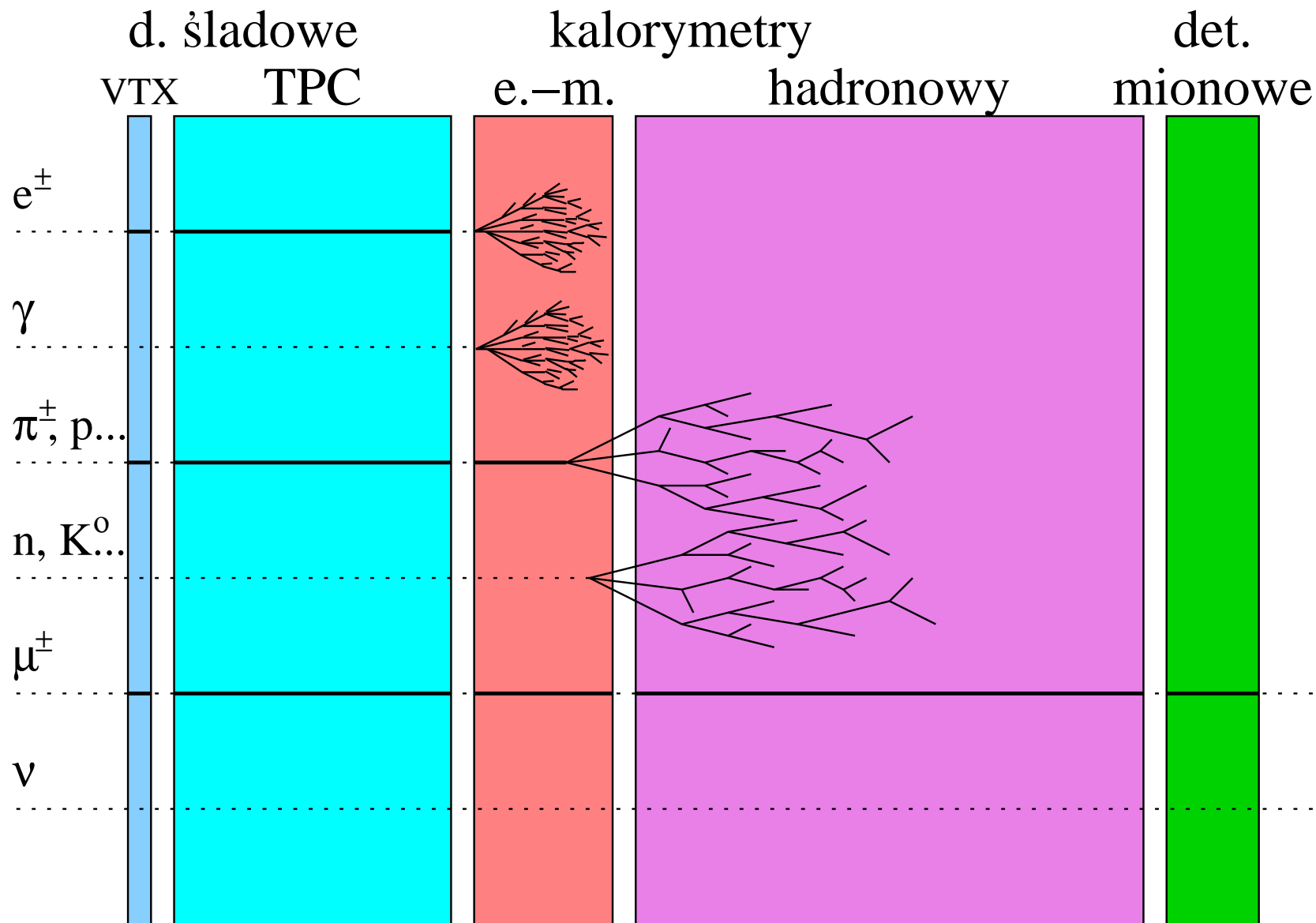
- detektor wierzchołka
jak najbliżej osi wiązki, określa gdzie zaszło zderzenie,
identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych
(tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów
cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym
najczęściej detektory gazowe
(minimalizuje oddziaływania cząstek w detektorze)

Detektory uniwersalne

Schemat budowy

- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek
(międz, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek; lawina hadronowa
jest wielokrotnie dłuższa od elektromagnetycznej.
- detektory mionowe
identyfikacja mionów - jedyne cząstki naładowane, które mogą
przejsć przez kalorymetry bez dużych strat energii

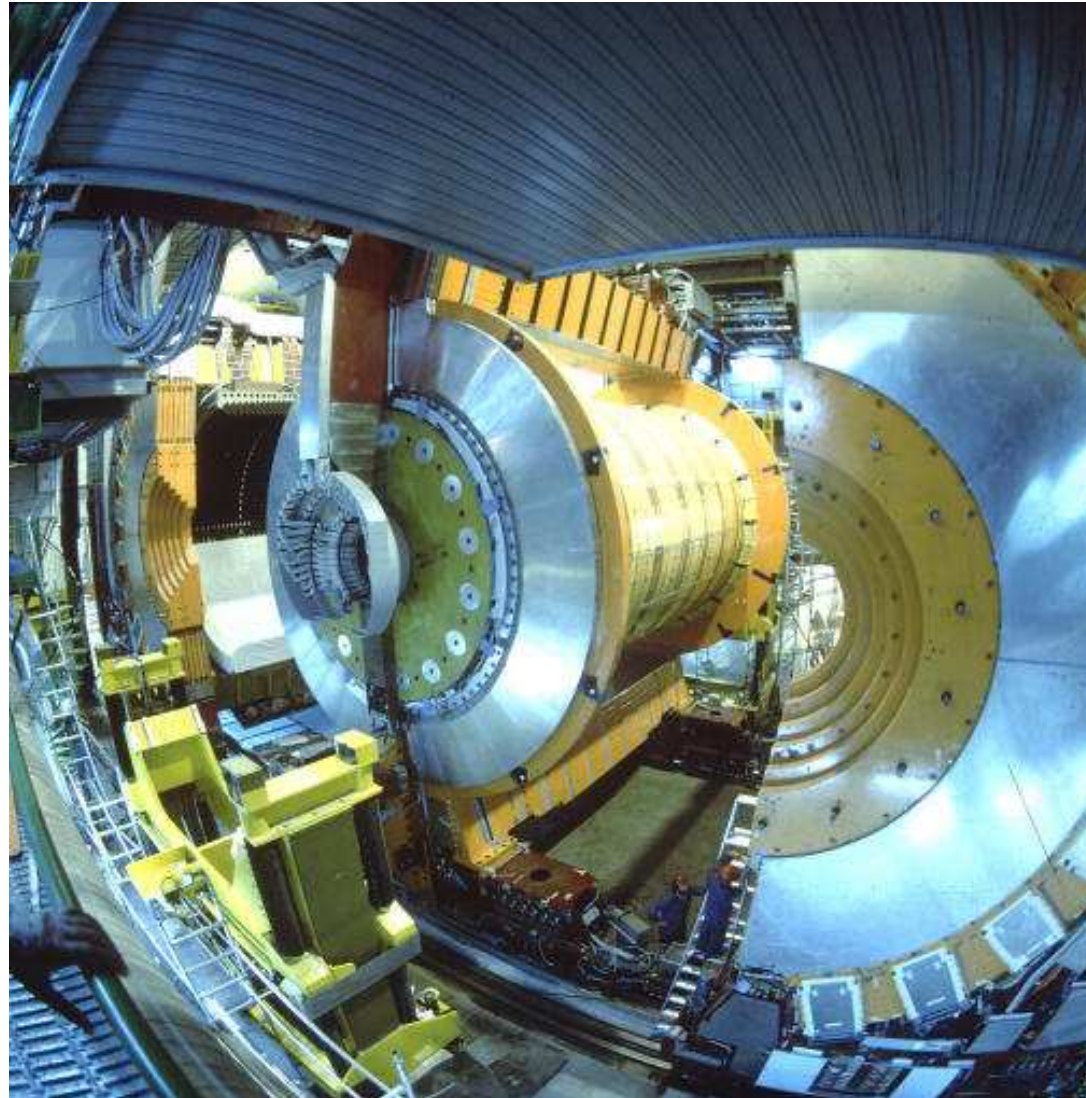
Detektory uniwersalne



Detektory uniwersalne

OPAL

Detektor **OPAL**,
akcelerator **LEP**,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 e^+e^-

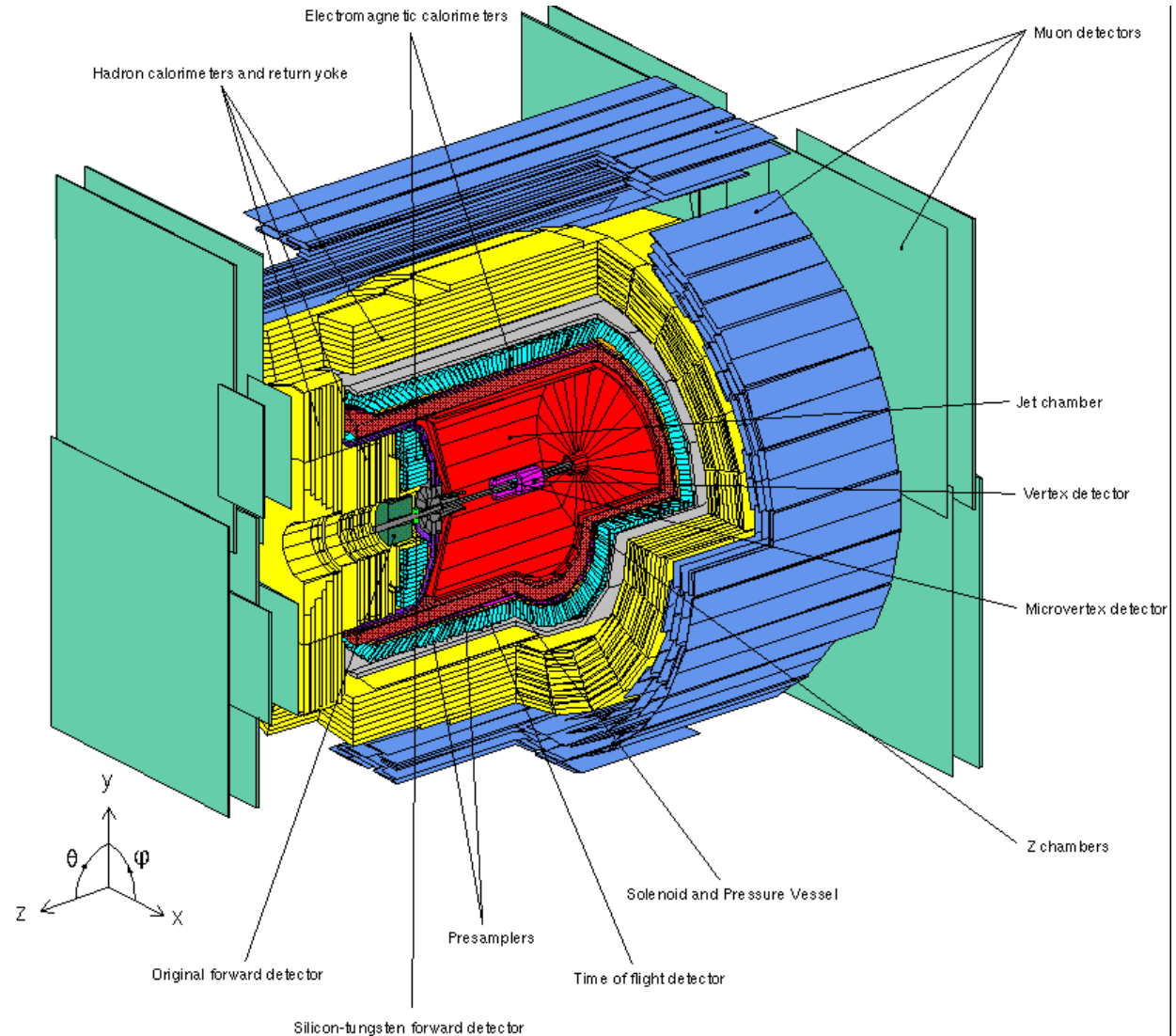


Detektory uniwersalne

OPAL



Detektor **OPAL**,
akcelerator **LEP**,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 e^+e^-



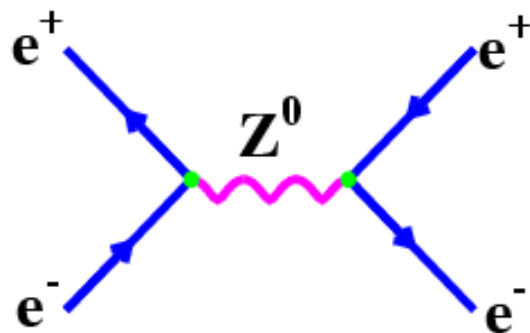
Co rejestrują detektory

W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

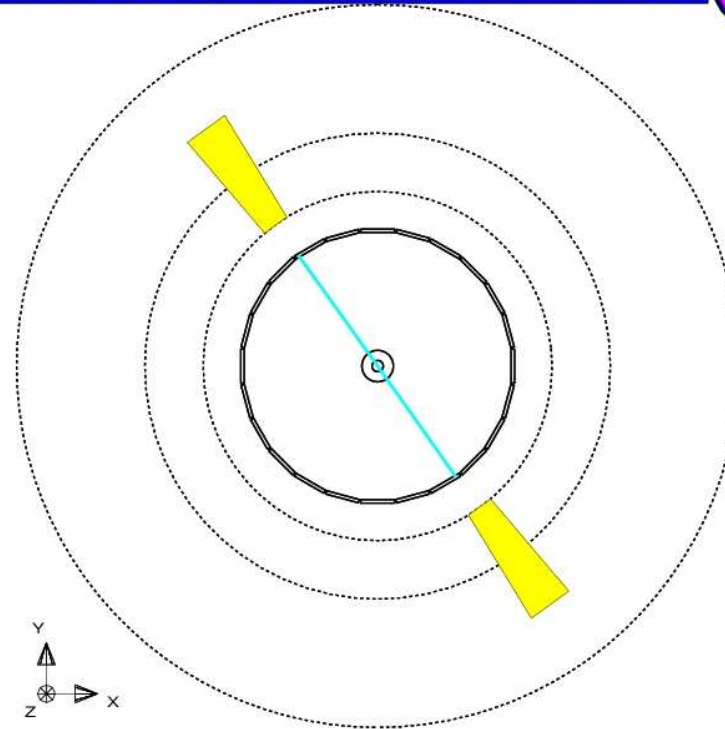
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

$$e^+e^- \longrightarrow e^+e^-$$



```
Run:event 5016: 331 Cirk(N= 2 Sump= 95.6) Ecal(N= 2 SimE= 90.7)
Ebeam 45.62 Vtx (-.01, .04, .13) Hcal(N= 2 SimE= .5) Muon(N= 0)
```



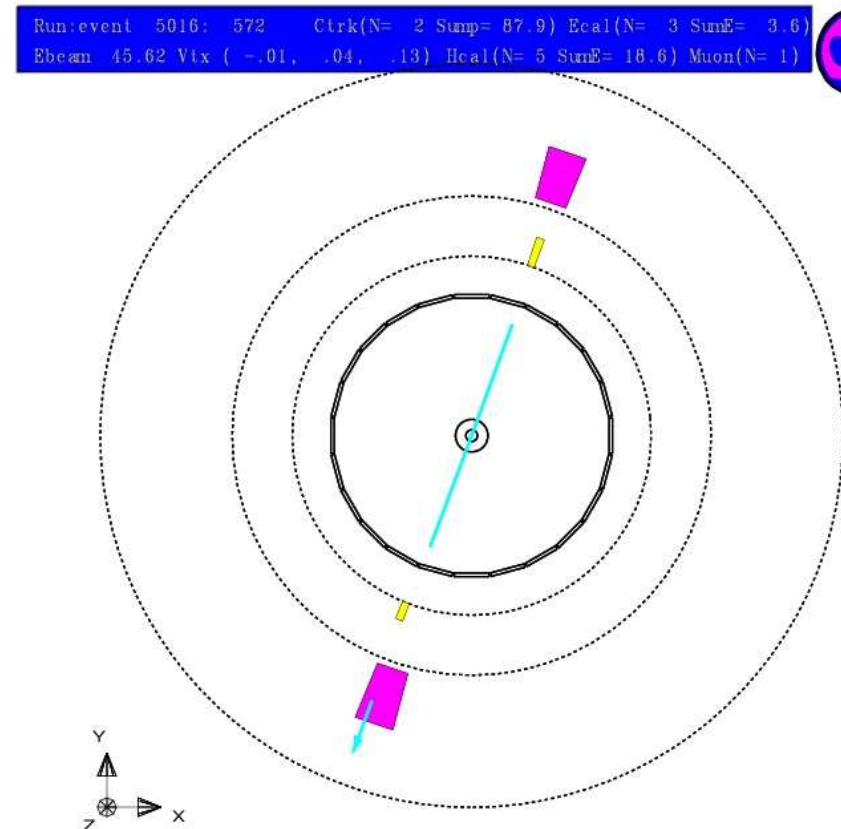
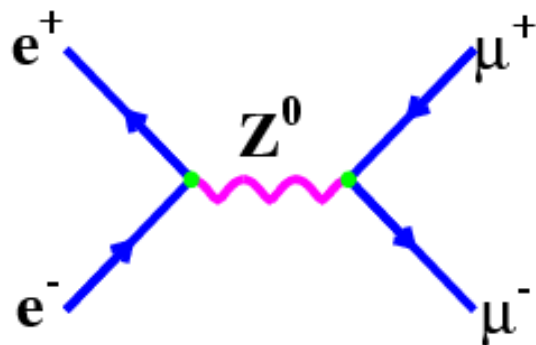
Co rejestrują detektory

W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

$$e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-$$



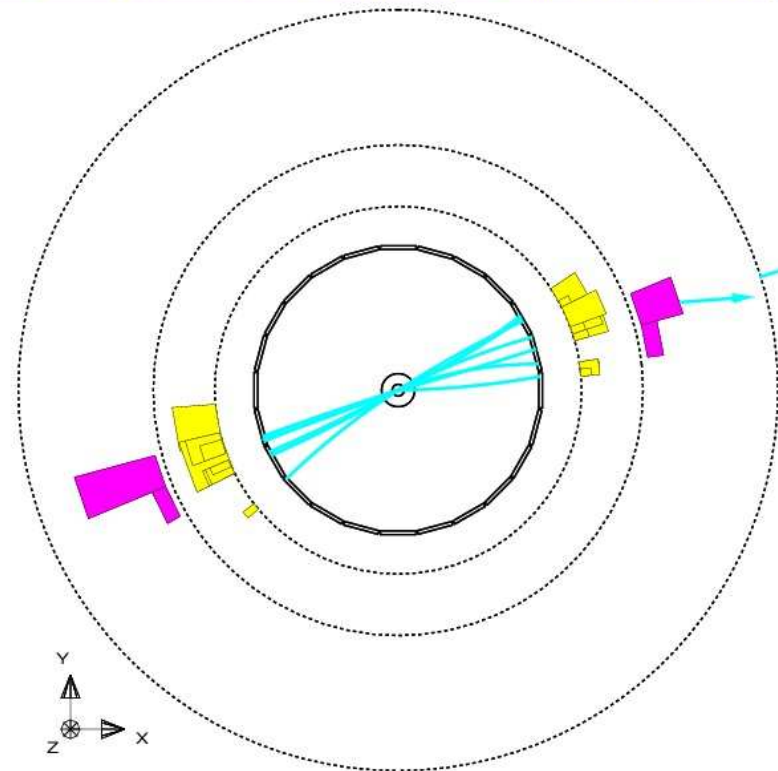
Co rejestrują detektory

W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony?

A jak interpretować taki przypadek?

```
Run:event 5014: 432 Ctrk(N= 22 SumE= 42.6) Ecal(N= 26 SumE= 40.3)
Ebeam 45.62 Vtx (-.43, -.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 27.8) Muon(N= 2)
```



Co rejestrują detektory

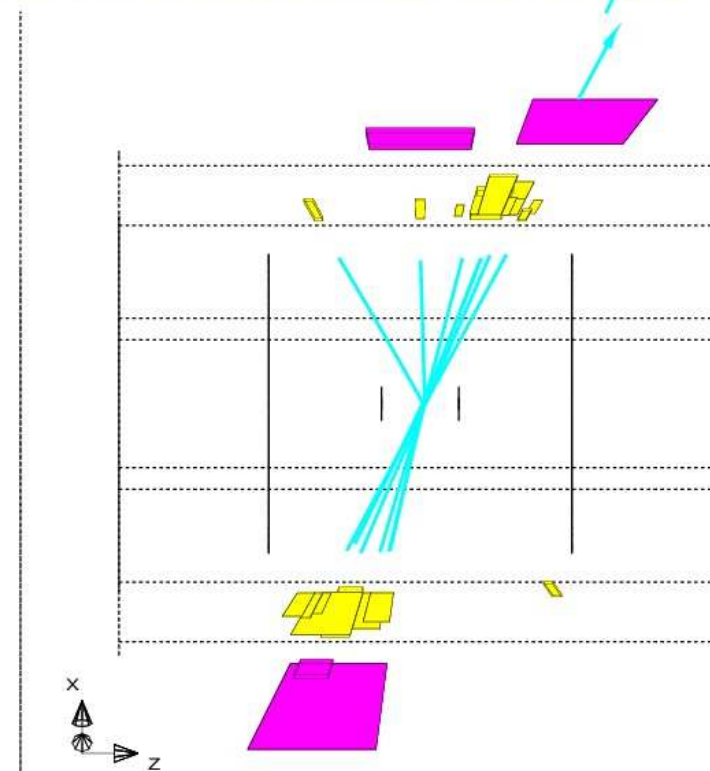
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony?

A jak interpretować taki przypadek?

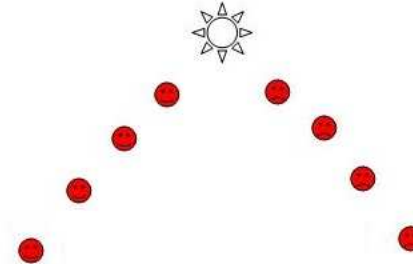
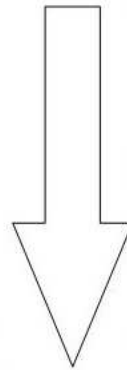
Produkowanych jest wiele cząstek, ale układają się w wyraźne “strugi”
(ang.: jets)

```
Run: event 5014: 432      Ctrk(N= 22 SumE= 42.6) Ecal(N= 26 SumE= 40.3)
Ebeam: 45.62 Vtx ( -.43, -.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 17.8) Muon(N= 2)
```



Hadronizacja

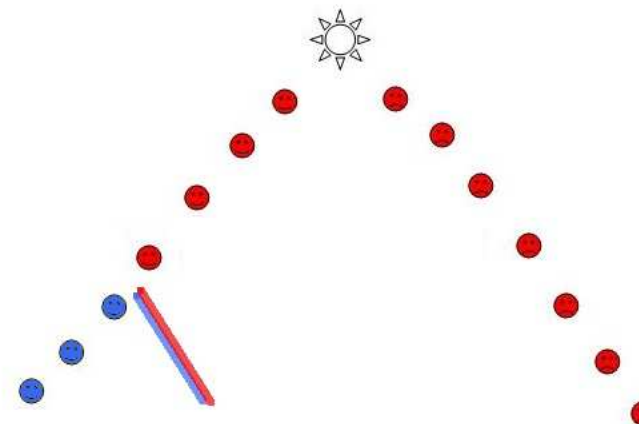
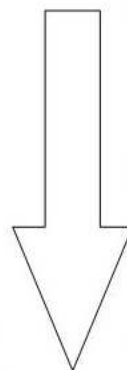
W zderzeniu powstaje para
kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$



Hadronizacja

W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

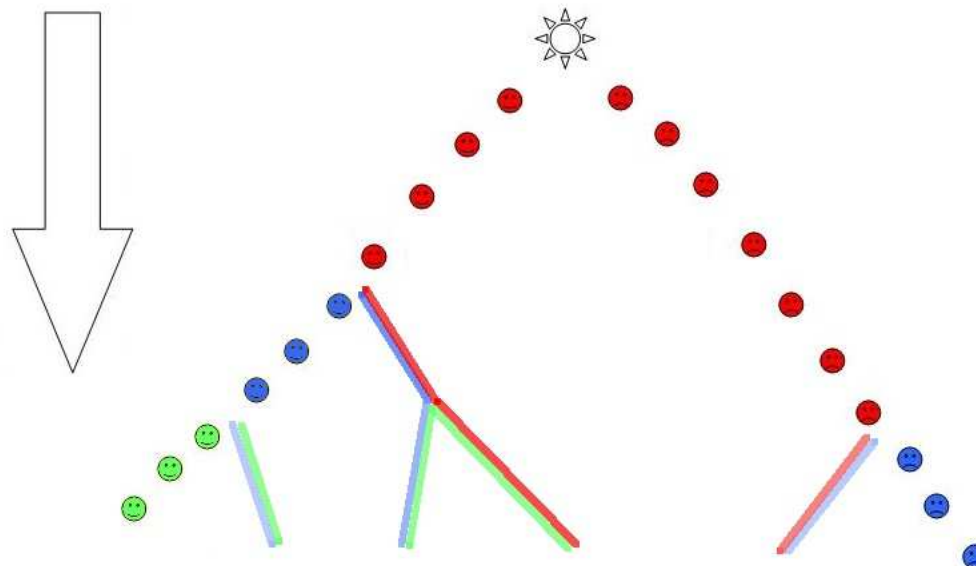


Hadronizacja

W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów



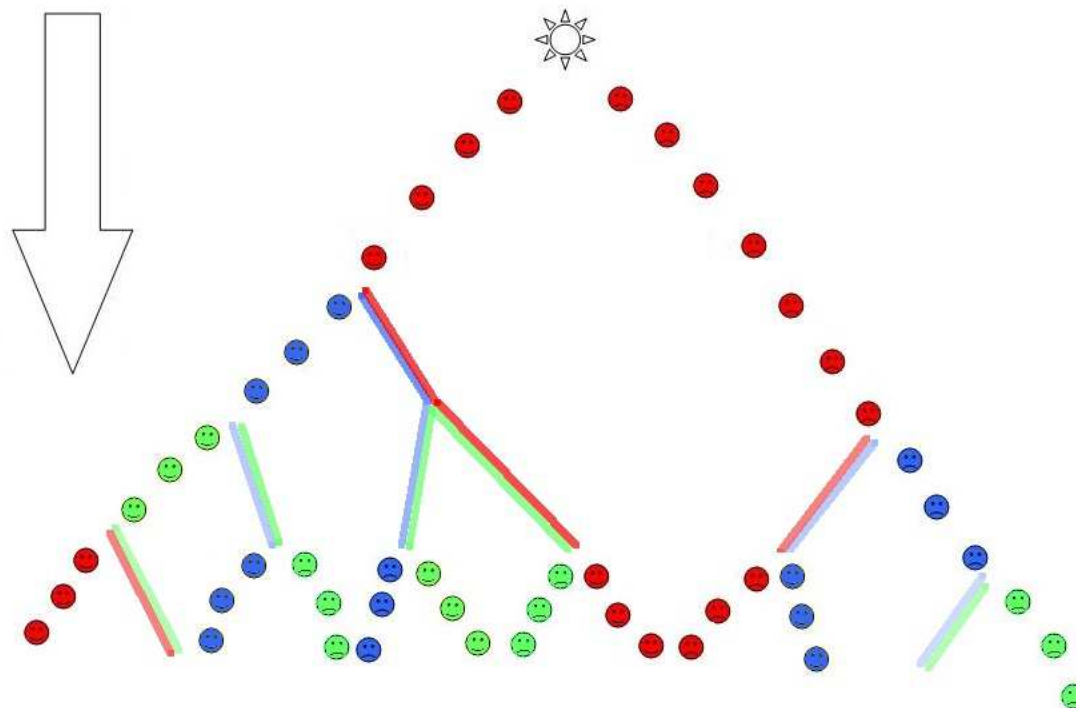
Hadronizacja

W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwarek



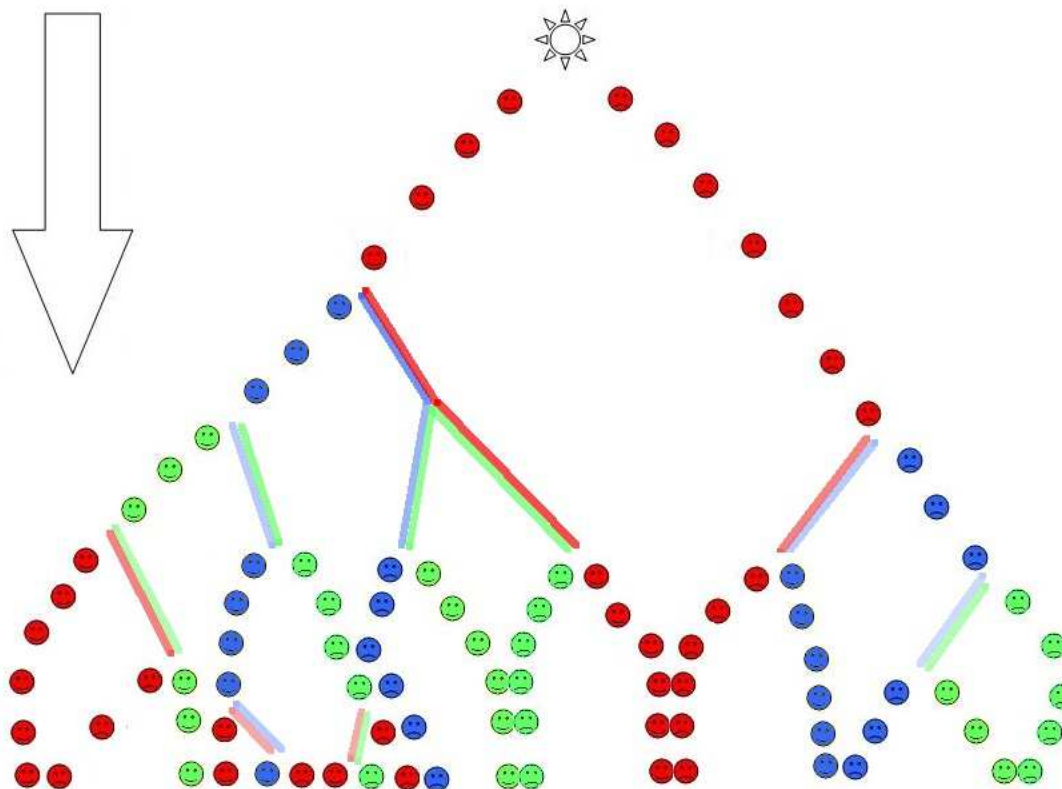
Hadronizacja

W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwar



Hadronizacja

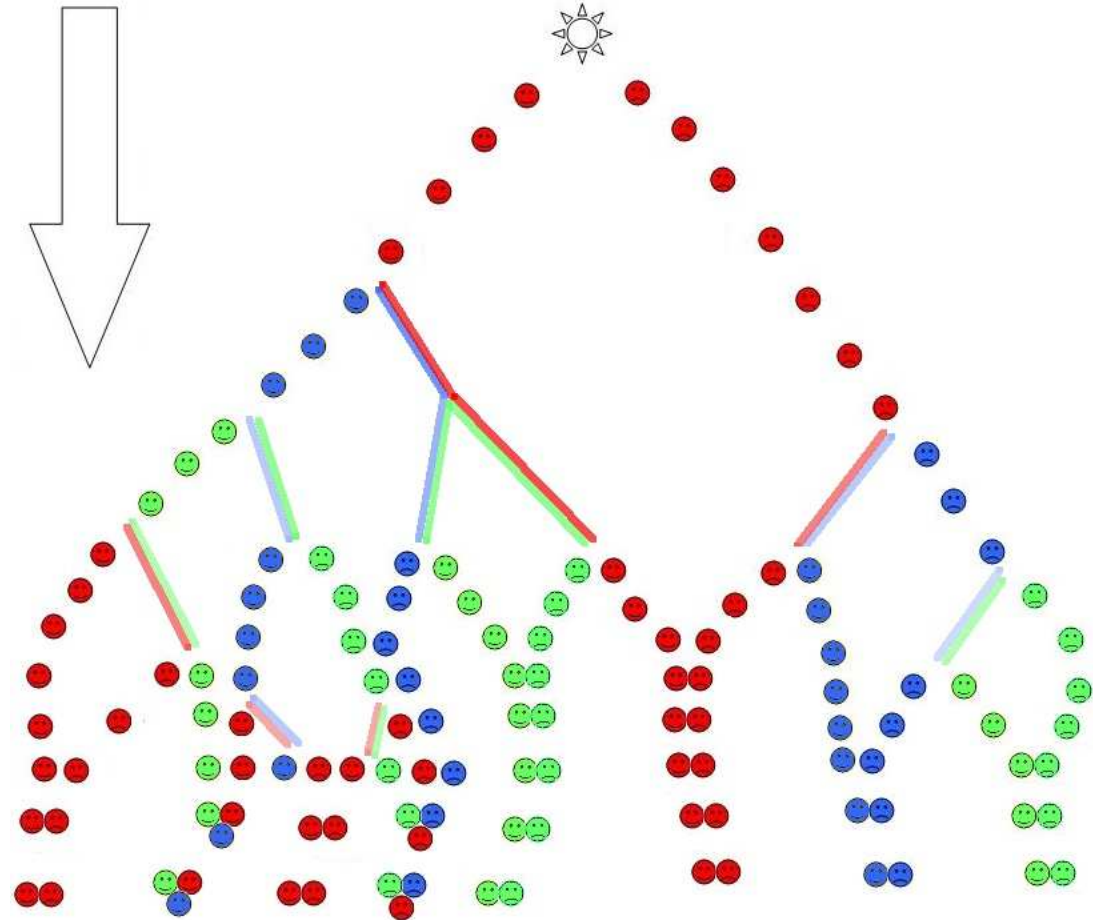
W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwar

Kwarki i antykwarki formują "białe" hadrony



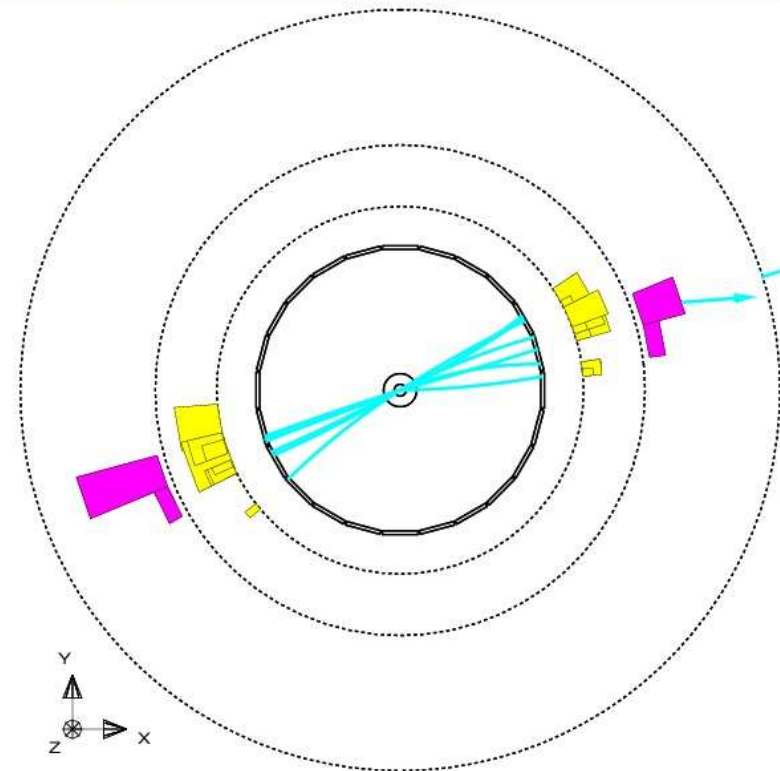
Co rejestrują detektory

W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

Naogół powstają 2 jety

```
Run:event 5014: 432      Ctrk(N= 22 SumE= 42.6) Ecal(N= 26 SumE= 40.3)
Ebeam 45.62 Vtx (-.43, -.05, 6.47) Hcal(N=20 SumE= 27.8) Muon(N= 2)
```



Co rejestrują detektory

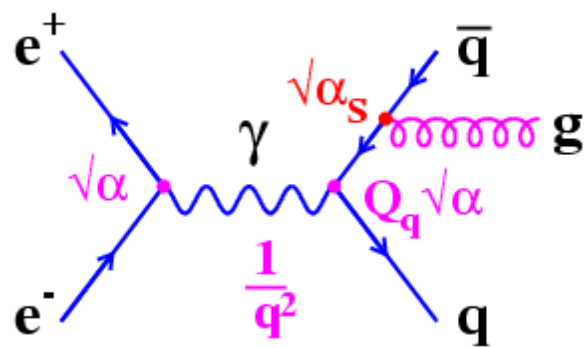
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

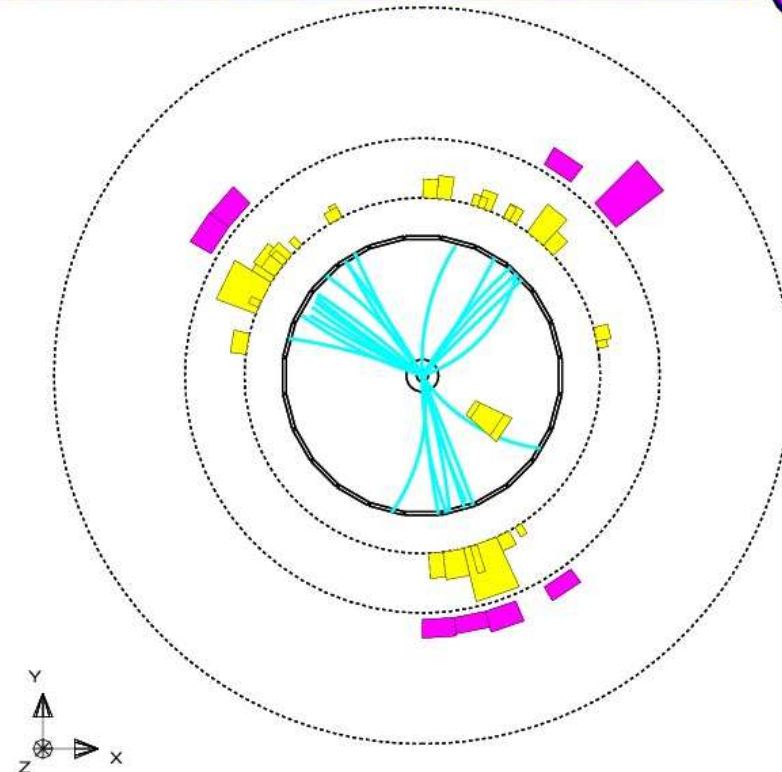
Naogół powstają 2 jety

Ale możliwe też:

$$e^+e^- \longrightarrow q\bar{q}g$$



```
Run:event 5014: 554 Ctrk(N= 36 Sump= 55.8) Ecal(N= 49 SumE= 47.5)
Ebeam 45.62 Vtx ( -.02, .05, -.02) Hcal(N=24 SumE= 21.5) Muon(N= 0)
```

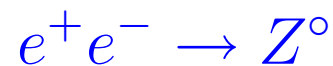


Co rejestrują detektory

Wraz ze zmianą energii wiązek obserwujemy zmianę częstości produkcji jetów hadronowych.

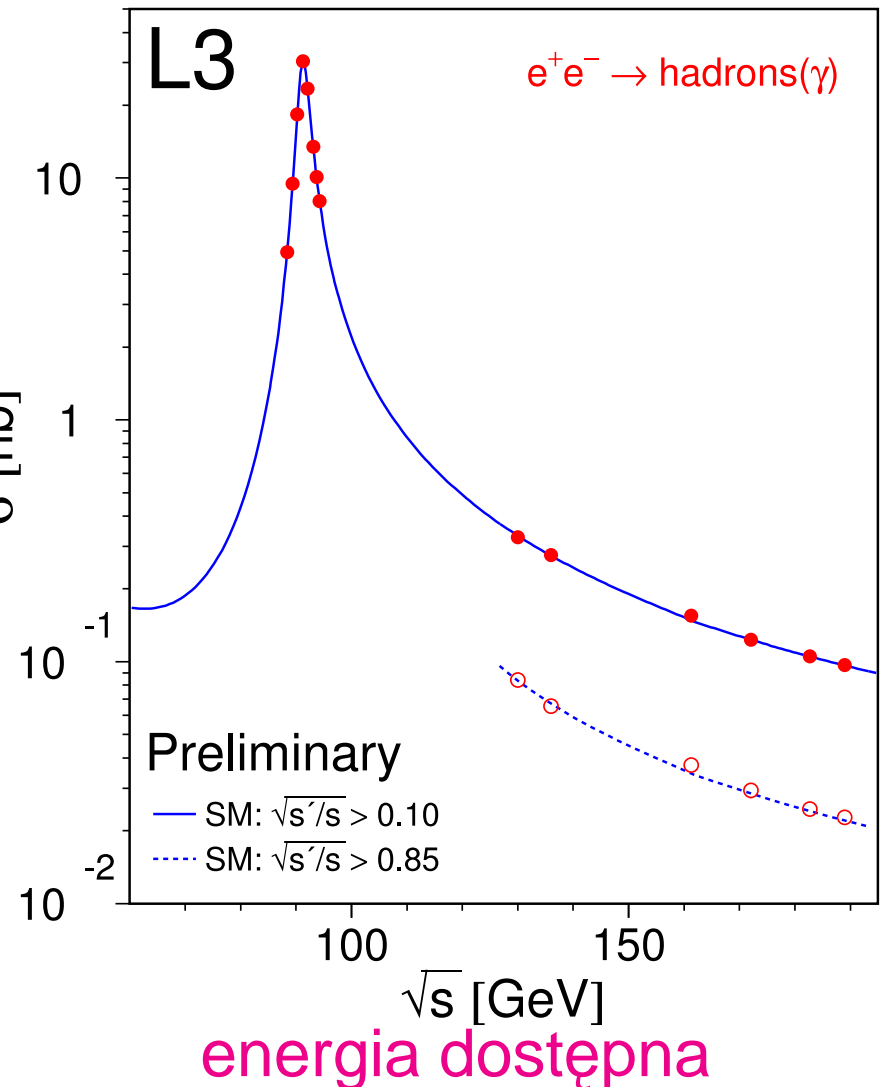
W przekroju czynnym na produkcję hadronów widać wyraźne maksimum odpowiadające produkcji bozonu Z^0

Rezonansowa produkcja ciężkich bozonów pośredniczących:



Bardzo precyzyjne pomiary:

$$M_Z = 91.1875 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

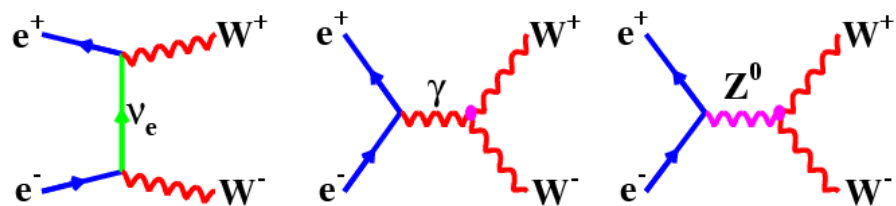


Co rejestrują detektory

W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

Dla $\sqrt{s} > 2M_W$ możliwa produkcja par bozonów W^\pm

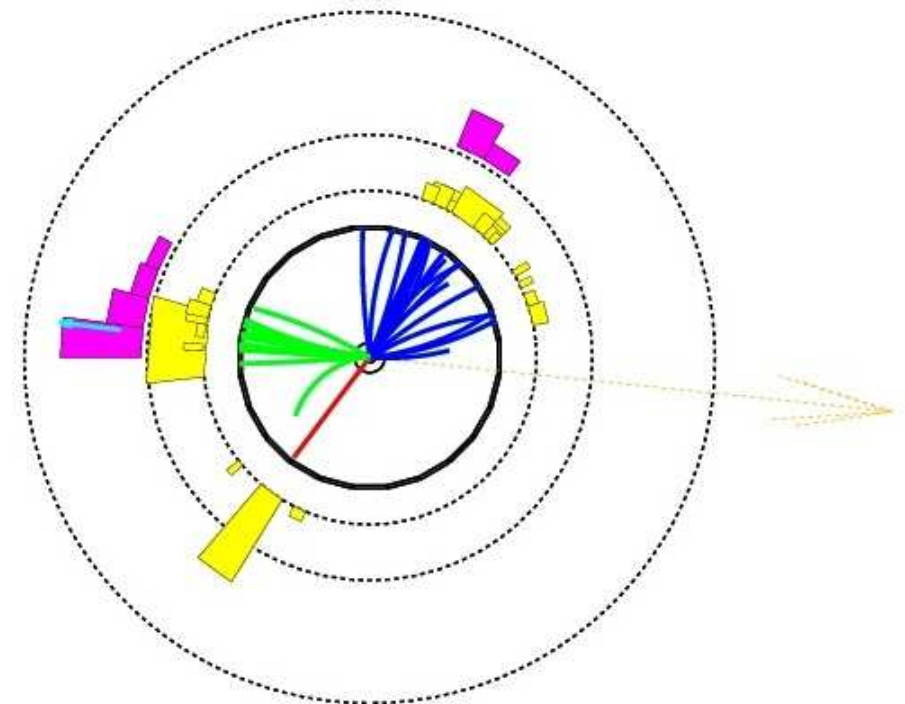
Trzy możliwe diagramy:



W przedstawionym przypadku

$$W^+ \rightarrow q\bar{q} \quad \text{2jety}$$

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$



neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu

LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem jest LHC.

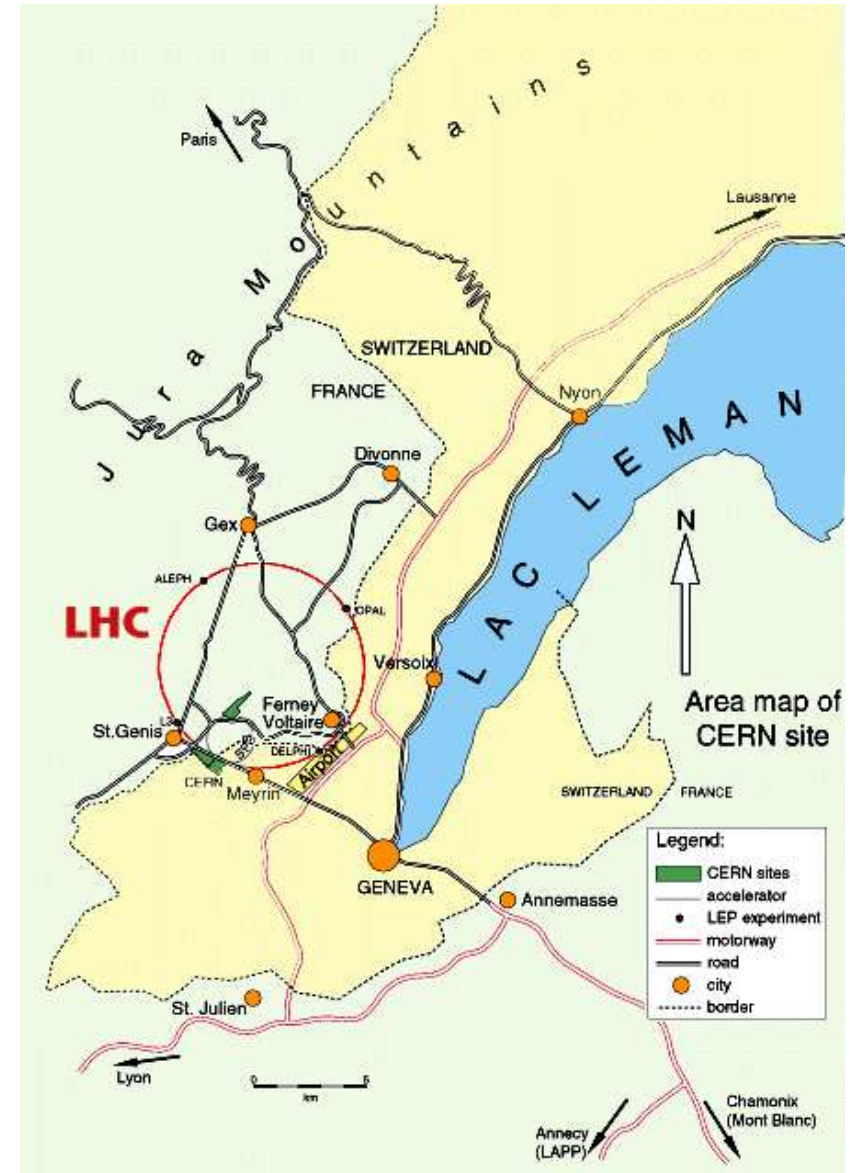
Zbudowany w CERN pod Genewą ma obwód ok. 27 km, **czeka obecnie na uruchomienie.**

Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 7 TeV.

W każdej 2800 "paczek" po 10^{11} protonów.

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)

W tym samym tunelu działał poprzednio akcelerator LEP.



LHC



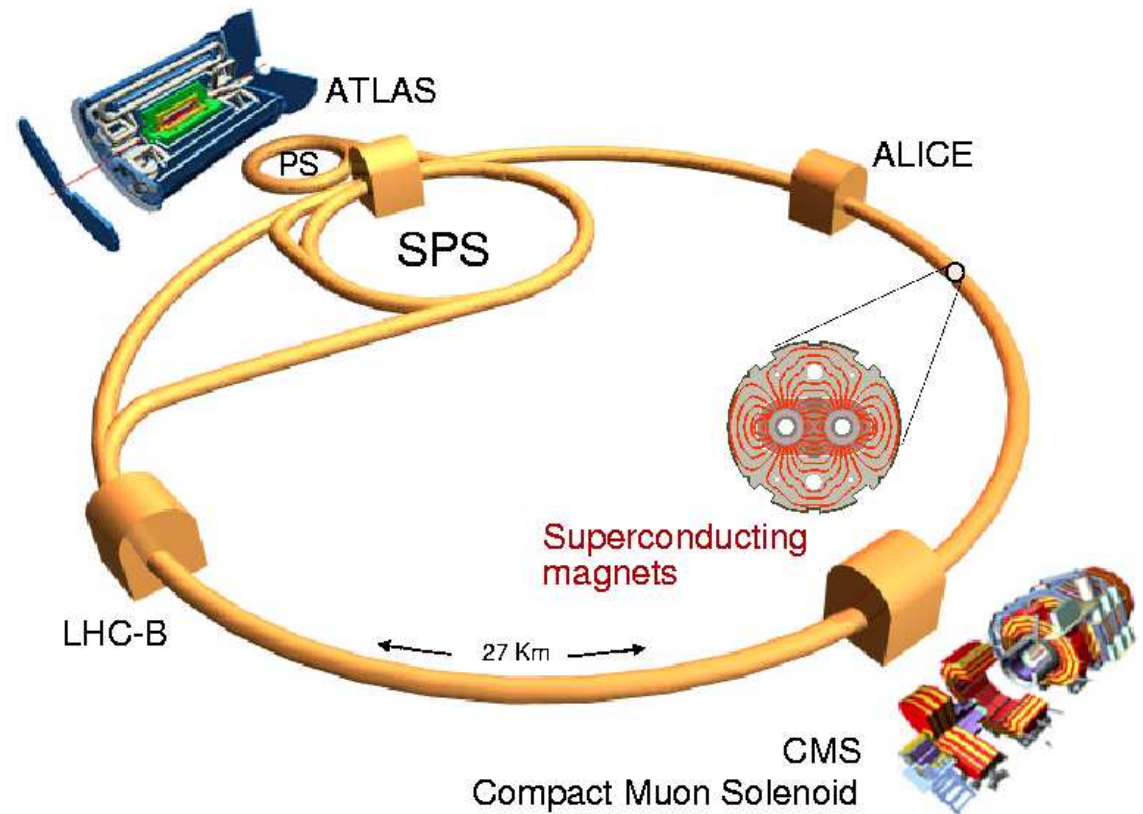
LHC

Przeciwbieżne wiązki protonów w LHC mają mieć energię $2 \times 7 \text{ TeV}$ ($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$)

Intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do 1000 nowych, ciężkich cząstek (np. cząstek supersymetrycznych) na godzinę!

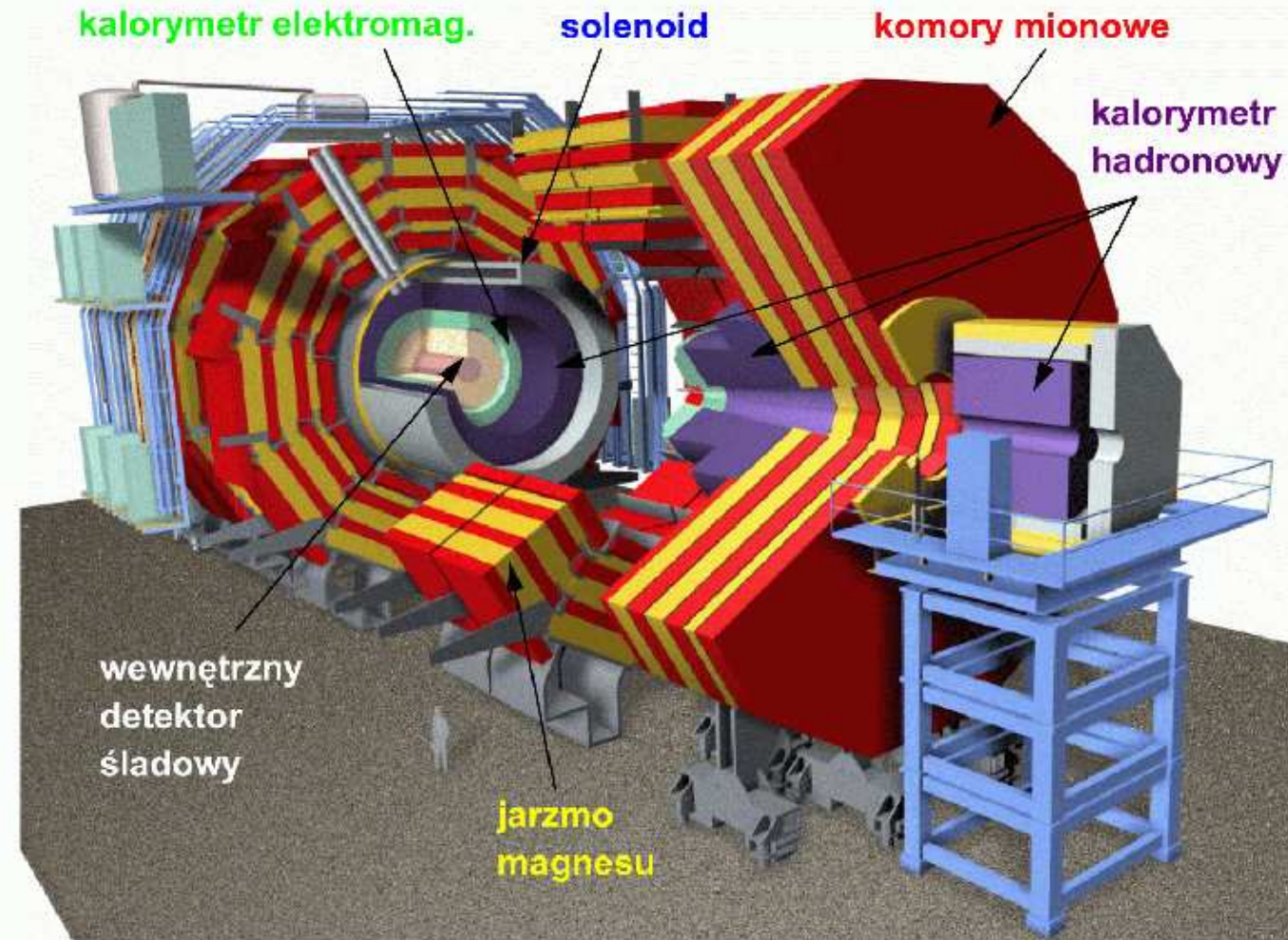
Przypadków produkcji nowych cząstek będą poszukiwać dwa eksperymenty: ATLAS i CMS

The Large Hadron Collider (LHC)



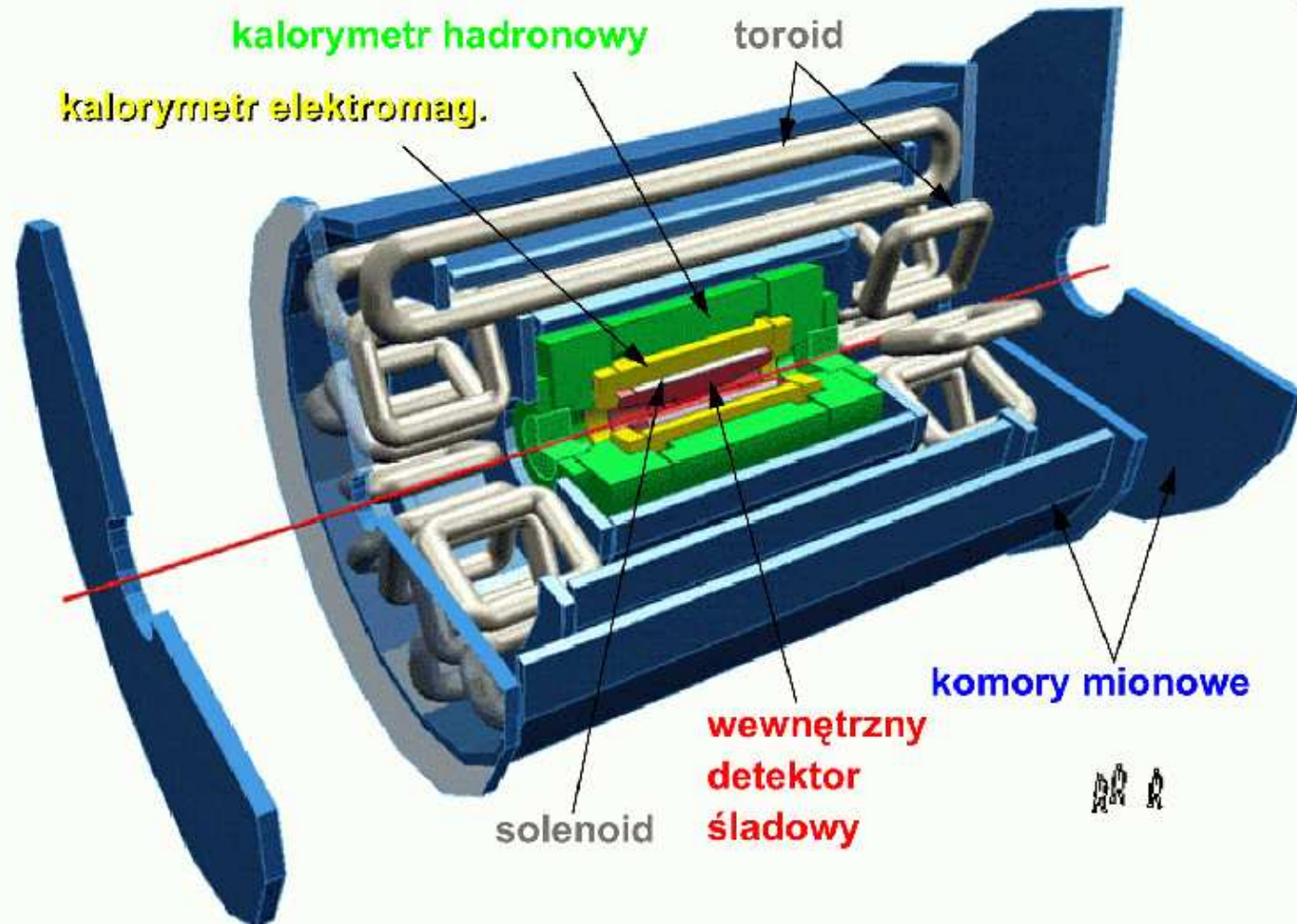
Detektory przy LHC

Compact Muon Solenoid



Detektory przy LHC

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



Detektory przy LHC

Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań w LHC.

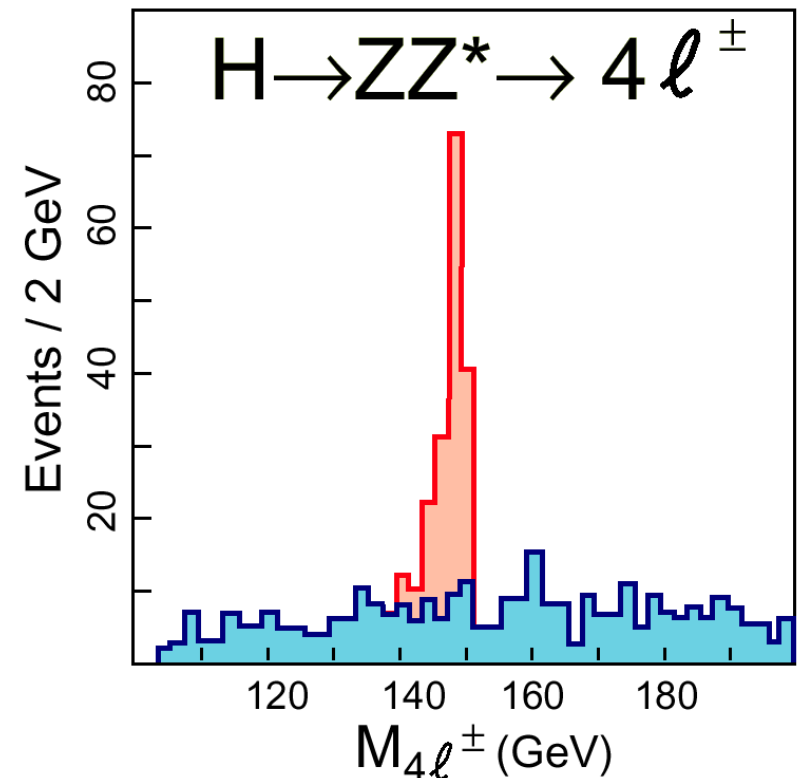
Najbardziej obiecujący jest **kanal**:

$$pp \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$

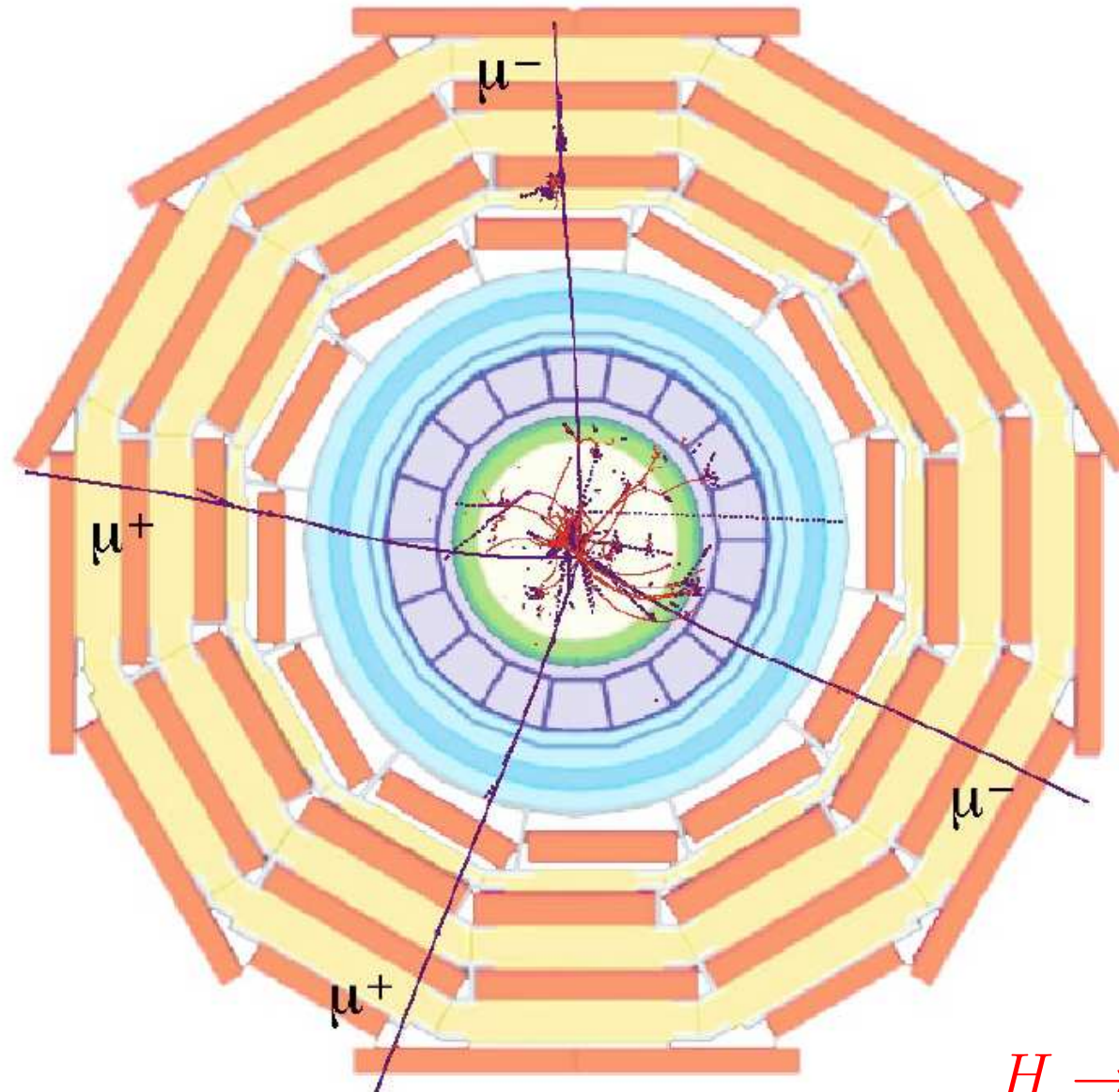
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować**

Masa bozonu Higgsa rekonstruowana na podstawie energii i pędów leptonów.

Eksperymenty przy **LHC** będą mogły zidentyfikować bozon Higgsa w **Modelu Standardowym w pełnym zakresie** mas.



Symulacja eksperymentu CMS



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

Detektory przy LHC

Uruchomienie LHC (planowane na jesień 2009) otworzy nowy rozdział w fizyce cząstek elementarnych i astrofizyce cząstek.

Wyniki wszystkich wcześniejszych eksperymentów mogą być dobrze opisane w ramach Modelu Standardowego.

Ale szereg przesłanek, w tym zwłaszcza obserwacje kosmologiczne, świadczą o tym, że musi istnieć jakaś “nowa fizyka”, nowe cząstki lub oddziaływania.

Jednym z głównych celów poszukiwań (obok tzw. cząstek Higgsa) są cząstki tzw. ciemnej materii.

O istnieniu nowej formy materii świadczą obserwacje oddziaływań grawitacyjnych na odległościach galaktycznych i większych. Ale to temat na osobny wykład...

Mamy nadzieję, że w roku 2009 rozpocznie się **nowa era** w fizyce i astrofizyce cząstek. Eksperymenty przy LHC będą działały przynajmniej przez 10 lat.

Wciąż możesz wziąć w tym udział !...



Czekamy także na Ciebie !