

Wszechświat cząstek elementarnych

Maria Krawczyk

i

A. Filip Żarnecki

Instytut Fizyki Teoretycznej

i


Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki UW

semestr letni, rok akad. 2007/8

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

Program

- 
1. Ogólne informacje o Modelu Standardowym
 2. Detekcje cząstek. Przyspieszacz i zderzacz.
Wielkie eksperymenty
 3. Hadrony, kwarki i leptony
 4. Teoria cząstek elementarnych
 5. Poszukiwanie cząstki Higgsa
 6. Rozszerzenie Modelu Standardowego
 7. Powstanie i budowa Wszechświata
 8. Ciemna materia, ciemna energia

Materiały pomocnicze

- Wykłady będą zamieszczane na stronie

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

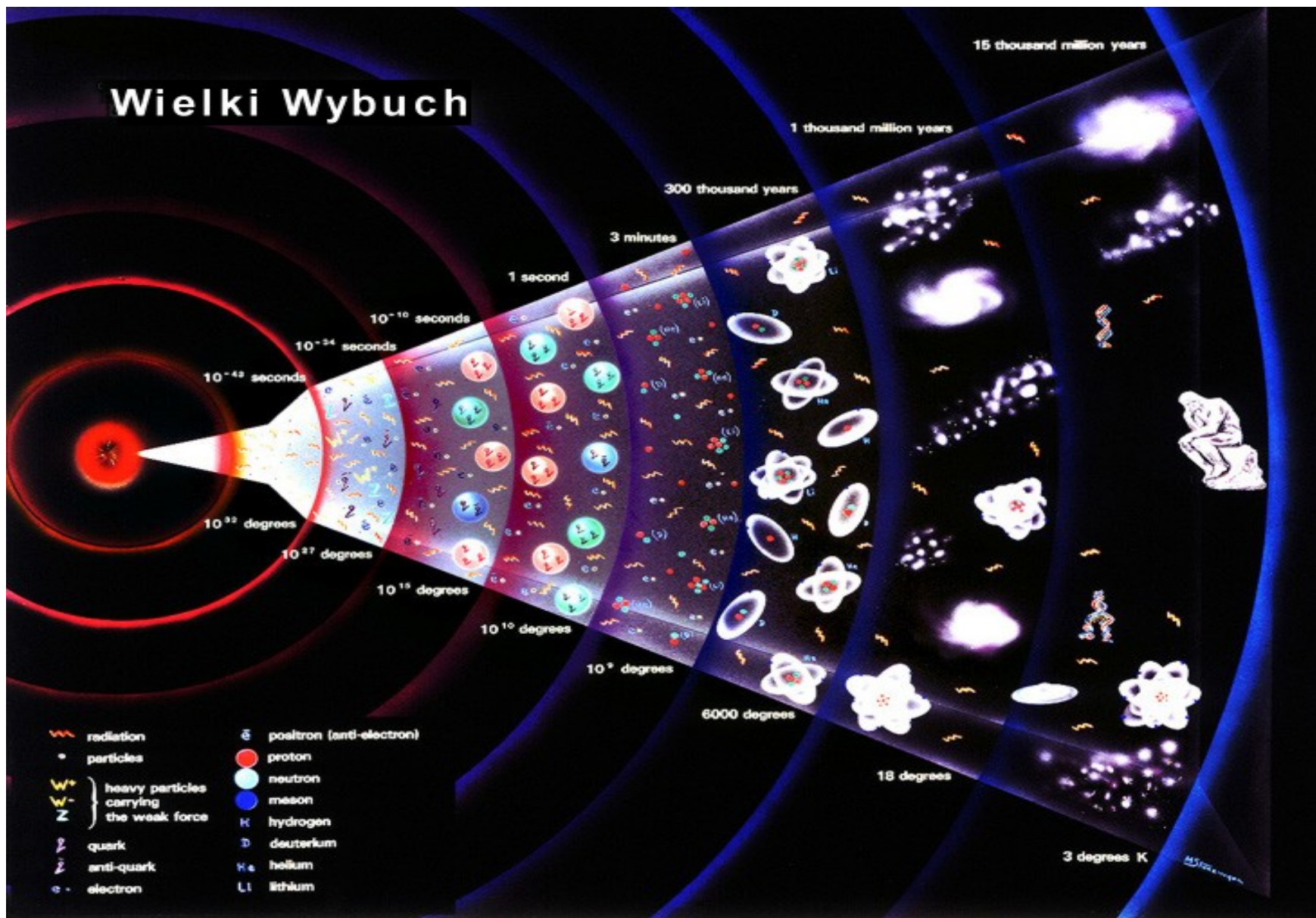
- **Literatura**

1. Martinus J.G. Veltman, Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics, World Scientific 2003
2. Frank Close, Kosmiczna Cebula - Kwarki i Wszechświat, PWN 1989
3. L. Lederman, D. Teresi, Boska cząstka, jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005
4. M. J. G. Veltman, The Higgs Boson, Scientific American 255:88-94, 1986 (Issue no 5).
5. Y. Nambu, A Matter of Symmetry, Scientific American, May 1992, str. 37
6. DELTA 5/2000

Warunki zaliczenia / zaliczenia na ocenę:

1. obecność na wykładach
dopuszczona jest nieobecność na dwóch wykładach, kolejne nieobecności obniżają ocenę
2. 50% punktów z egzaminu testowego
termin egzaminu pisemnego 16 czerwca 2008 ,
godz. 10, SDD
30 pytań (max 1 zdanie odpowiedzi)
3. Egzamin poprawkowy – początek września

Skąd ten tytuł wykładu?



Fizyka cząstek elementarnych

Wiek XX – niezwykły rozwój fizyki, fundamentalne idee
pierwsza połowa to teoria względności, teoria grawitacji
i teoria kwantów

druga połowa – fizyka cząstek elementarnych

Przestrzeń i czas w teorii grawitacji odgrywają
podstawową rolę; materia definiuje własności
przestrzeni a ruch materii wynika ze struktury
przestrzeni.

Einstein próbował opisać pola elektryczne i magne-
tyczne jako wynik własności czaso-przestrzeni. Do
końca życia poszukiwał takiej jednolitej teorii -
bezskuteczne.

Fizyka cząstek elementarnych

- Czasoprzestrzeń i prawa mechaniki kwantowej są „tłem” dla cząstek elementarnych
- Cząstki el. – dużo (1000) i różnorodne (Zoo)
Wiele zagadnień nadal niejasnych.
Niektóre cząstki występują w trzech „postaciach” różniąc się masą np. o czynnik 35 000
- Do dziś nie rozumiemy grawitacji i jej związku z mechaniką kwantową

Cząsteczki, atomy, jądra atom. i cząstki el.

- Materia składa się z cząsteczek
 - np. woda H_2O atomy H=wodór, O=tlen
- Cząsteczki = stany związane atomów
(92 różnych atomów w naturze)
- Atomy = stany związane jąder atomowych i elektronów; atomy są prawie puste
- Rozmiar atomu 1/100 000 000 cm,
jądro 100 000 mniejsze

Rutherford ustalił to w 1911 bombardując złoto ciężkimi cząstkami alfa (α)

nukleony

- Jądro = stany związane protonów i neutronów

Jądro atomowe = stan związany nukleonów

Nukleony

->protony (ładunek elektryczny= +1)
(elektron ma ładunek el. = -1)

->neutrony (ładunek el. = 0)

Atomy są neutralne elektrycznie

Jeśli oderwiemy jeden lub więcej elektronów

-> jony (ładunek el. dodatni). Jonizacja.

Przykłady atomów:

Wodór $H=p+e$ - najlżejszy atom

Deuter $D=pn +e$ - ciężki wodór (-> ciężka woda)

Tryt $T =pnn +e$

Hel $He=ppnn +ee$

Fizyka jądrowa -> badanie jąder atomowych

Nukleony i kwarki (oraz gluony)

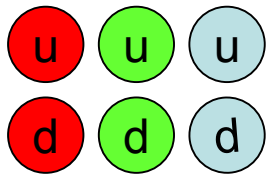
Proton i neutron = 3 kwarki

(różne typy kwarków i ich nazwy...)

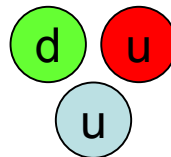
kwarki *u* (*up*) i *d* (*down*)

kwarki występują w 3 stanach (*barwach, kolorach*)

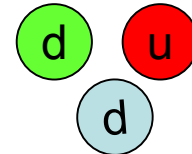
czerwone, zielone i niebieskie – to tylko nazwy



proton



neutron



Kwarki nie mają struktury! Są fundamentalne..

Ale nie występują jako cząstki swobodne – p i n tak

W nukleonach są gluony – sklejjące całość (w atomie ->siły e-m, fotony)

Cząstki elementarne i cząstki fundamentalne

- Cząstki typu p , n to stany związane kwarków
Cząstki fundamentalne - punktowe cząstki bez struktury
Termin cząstki elementarne obszerniejszy i obejmuje wszystkie obiekty prostsze od jądra atomowego (wyjątek proton)
- Fizyka cząstek elementarnych zajmuje się obecnie poziomem fundamentalnym – cząstkami fundamentalnymi i ich oddziaływaniami
- Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne – to też cząstki fundamentalne

Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym

Quarks



Forces



Fotony – rok 1905

- 1900 Planck – światło jest emitowane oraz pochłaniane w porcjach; to była hipoteza dotycząca atomów i natury procesów emisji/absorpcji

Kwant energii, stała Plancka $h=6,6 \cdot 10^{-27}$ erg cm, $E= h \nu$

Nagroda Nobla 1918

(ν – częstotliwość)

- 1905 Einstein – światło propaguje się w porcjach (cząstki światła) -- pakietach o określonej energii. To była hipoteza dotycząca natury światła (prom. elektromagnetycznego wg Maxwella) – nieakceptowana przez następne 15 lat! Nawet przez Plancka. Doświadczenie Comptona – bilard z udziałem elektronów i fotonów. W 1921 – Nagroda Nobla dla Einsteina
- Te pakiety to fotony (nazwa nadana w 1926 przez Lewisa) . Energia ich zależy od typu prom. elektromagnetycznego – fale radiowe mają mniejszą energię niż promienie X (Roetgena). Światło widzialne – większe energie niż radiowe (fioletowe b. energetyczne niż czerwone). W doświadczeniach z cząstkami elementarnymi fotony mają energię 100 000 000 000 razy większą niż w telefonie komórkowym
- Ale wiemy, że światło zachowuje się jak fala, czyli fotony też muszą mieć jakieś własności falowe – tu bije źródło mechaniki kwantowej (zwanej wtedy mechaniką falową).

Einstein wiedział o tym ale nigdy nie odkrył teorii kwantów, ale wręcz zwalczał ją

Antycząstki (antymateria)

- Antycząstki to też cząstki, choć mogą się różnić od swoich „partnerów” pewnymi własnościami.

Cząstki i antycząstki mają tę samą masę

- Np. elektron i pozyton – to para cząstka-antycząstka (ale która jest którą to sprawa umowy), różnią się znakiem ładunku elektrycznego (pozyton ma dodatni ładunek).

Elektron odkryto w 1897 a pozyton w 1932

- Przewidywanie teoretyczne istnienia antycząstki – Dirac’ 1928
- Cząstka i antycząstka mogą oddziaływać b. gwałtownie – zniknąć i pojawiać się parami
- Istnienie antycząstek wynika z prawa przyrody; cząstka może być swoją antycząstką – np. foton (ładunek el. zero)
- Oznaczenie dla antycząstki – kreska nad symbolem cząstki, np. kwark u i antykwark \bar{u}

Masa i energia

Energia – pojęcie podstawowe

Jeżeli prędkość obiektu mała (w porównaniu z prędkością światła) stosujemy opis nierelatywistyczny, gdzie związek energii kinetycznej z prędkością $E = \frac{1}{2} m v^2$; energia jest proporcjonalna do masy obiektu

Masa a waga -

Dla prędkości relatywistycznych → teoria względności, tu prędkość nie jest wygodną wielkością do opisu ruchu obiektu

Przykład: Około roku 1950 przyśpieszane protony miały energię 1 GeV. Prędkość światła $c = 300\,000$ km/s → prędkość protonów 212 000 km/s. Ostatnia maszyna LEP (CERN) przyśpieszała elektrony do energii 100 GeV, czyli prędkości 299 999,6 km/s.

LHC – przyśpieszanie protonów do energii 7000 GeV, $v = ?$

Pęd – lepsza wielkość $E = c \sqrt{p^2 + m^2 c^2}$, $E = mc^2$ dla $p = 0$ ($p = mv$)

Notacja naukowa

- Atom wodoru – rozmiar 1 Angstrom
0.000 000 01 cm, lub 1/10 nanometra
inny zapis: $1 \text{ A} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$
- Duży rozmiar -> np. 10^{10} m

Nazwy: duże liczby

Deka, hekto, kilo, mega, giga, tera, peta, exa, zetta, yotta

10 10^2 10^3 10^6 10^9 10^{24}

Nazwy: małe liczby

Decy, centy, mili, mikro, nano, pico, femto, atto, zepto, yocto

10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-6} 10^{-9} 10^{-24}

Zdarzenia (events)

- W doświadczeniach z cząstkami el. mamy do czynienia ze zdarzeniami – nie możemy przewidzieć ani kontrolować precyzyjnie tych zdarzeń. Nasze urządzenia pomiarowe są makroskopowe – musimy jakoś wydobywać informacje co się dzieje na poziomie cząstek
- Rozpady cząstek elementarnych (nawet tych fundamentalnych)
Np. neutron żyje średnio około 10 min – rozpada się na proton, elektron i neutrino elektronowe (w jądrze atomowym 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 tych urządzeniach (akceleratorach) . W rozpadzie neutronu dochodzi do zamiany kwarku d w kwark u + (..)



Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 2: Detekcja cząstek

prof. A.F.Żarnecki

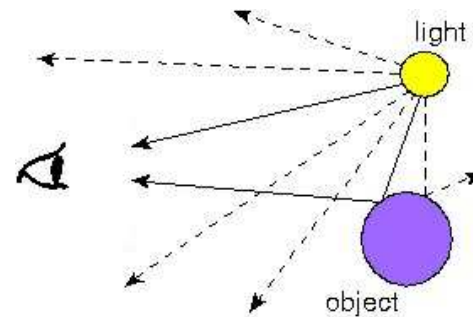
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Detekcja cząstek

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

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.

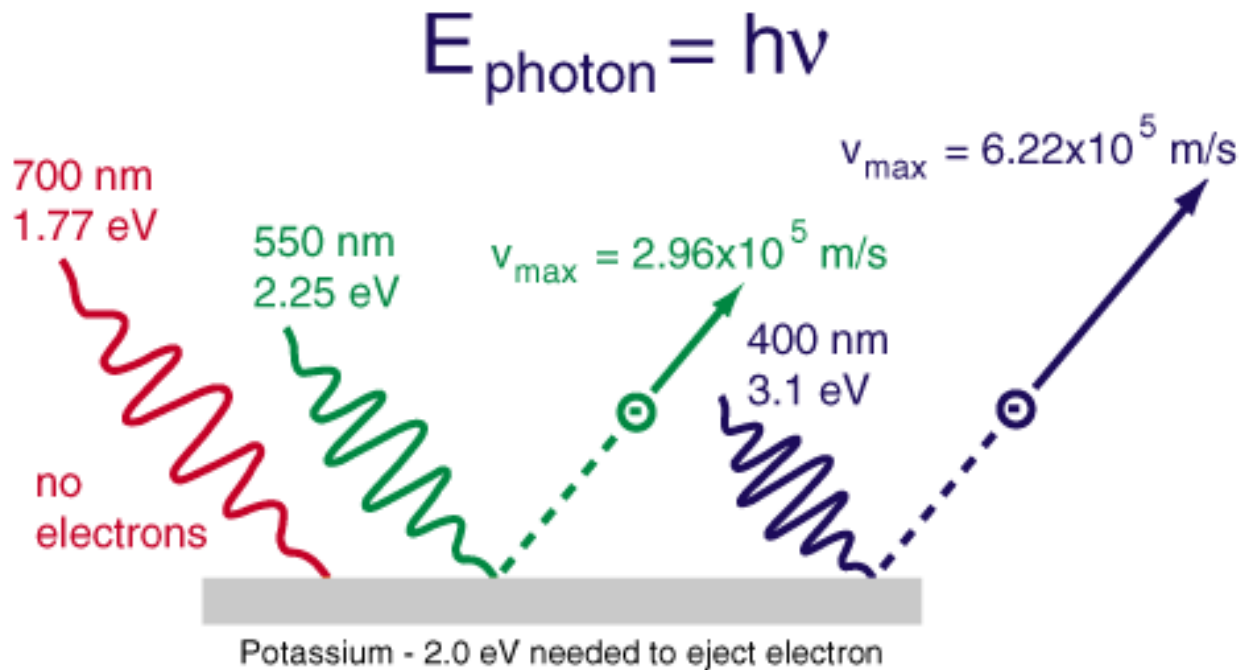
Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

- 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:



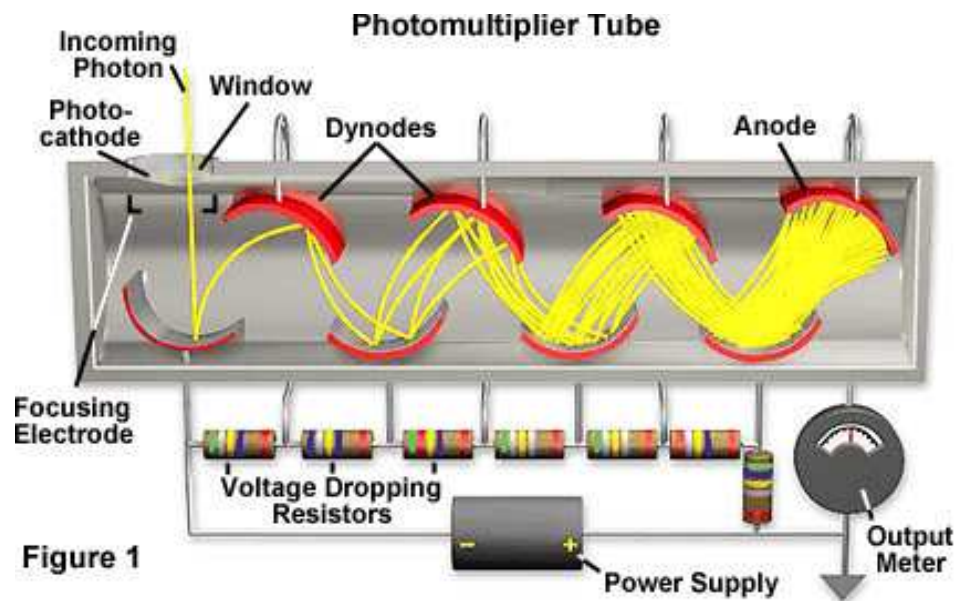
Photoelectric effect



Efekt fotoelektryczny

Fotopowielacz

Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek.

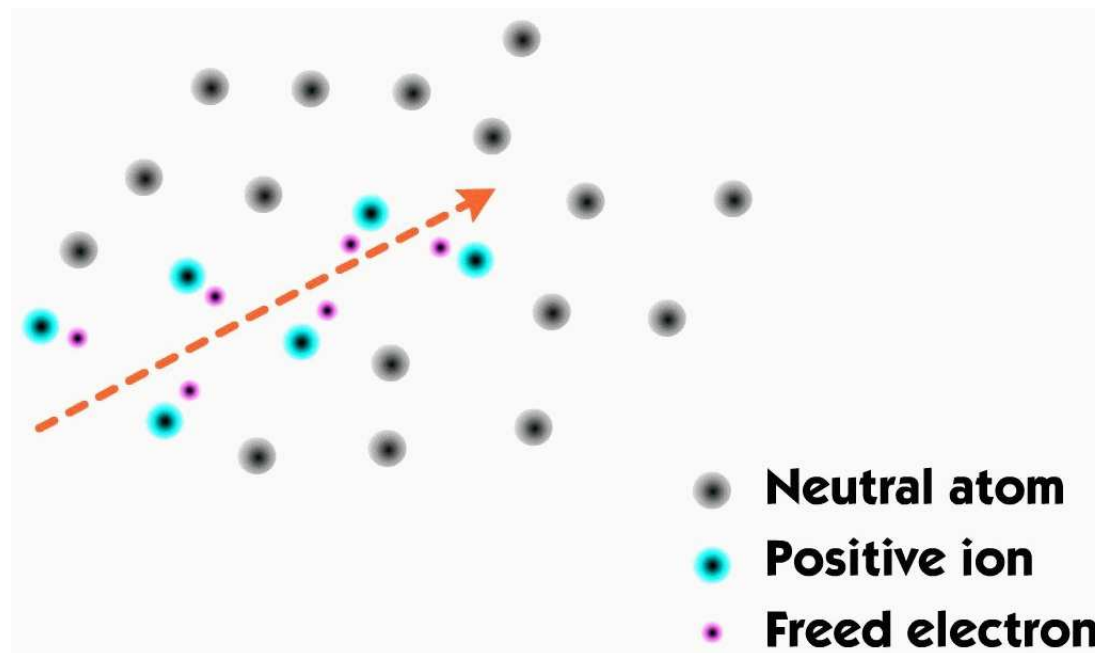


Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detekcja cząstek

Jonizacja

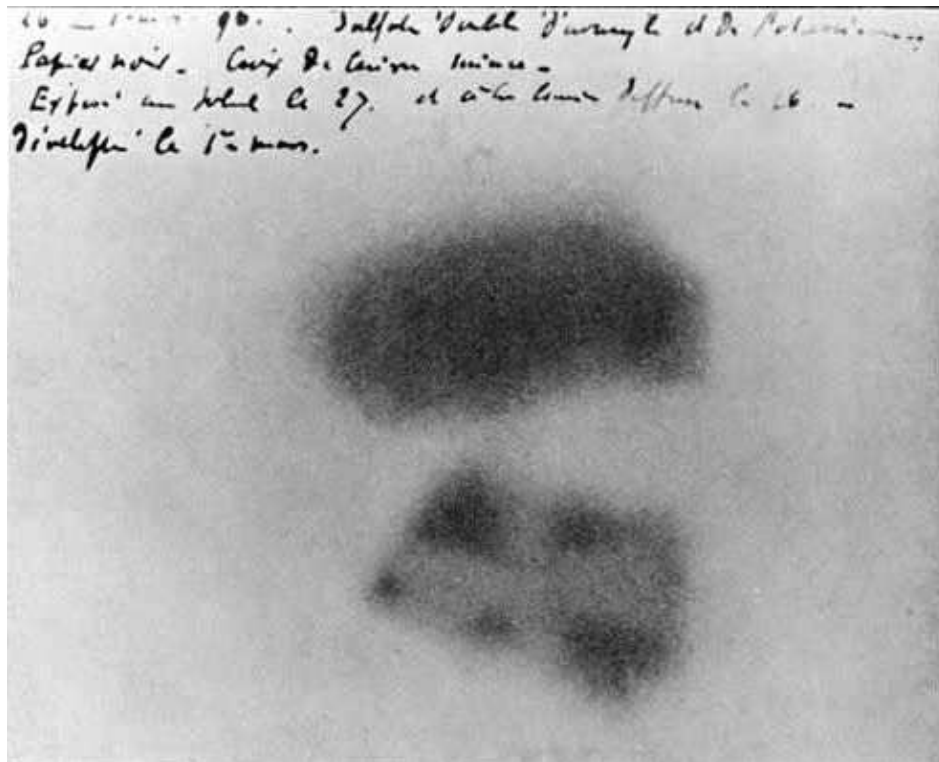
U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:



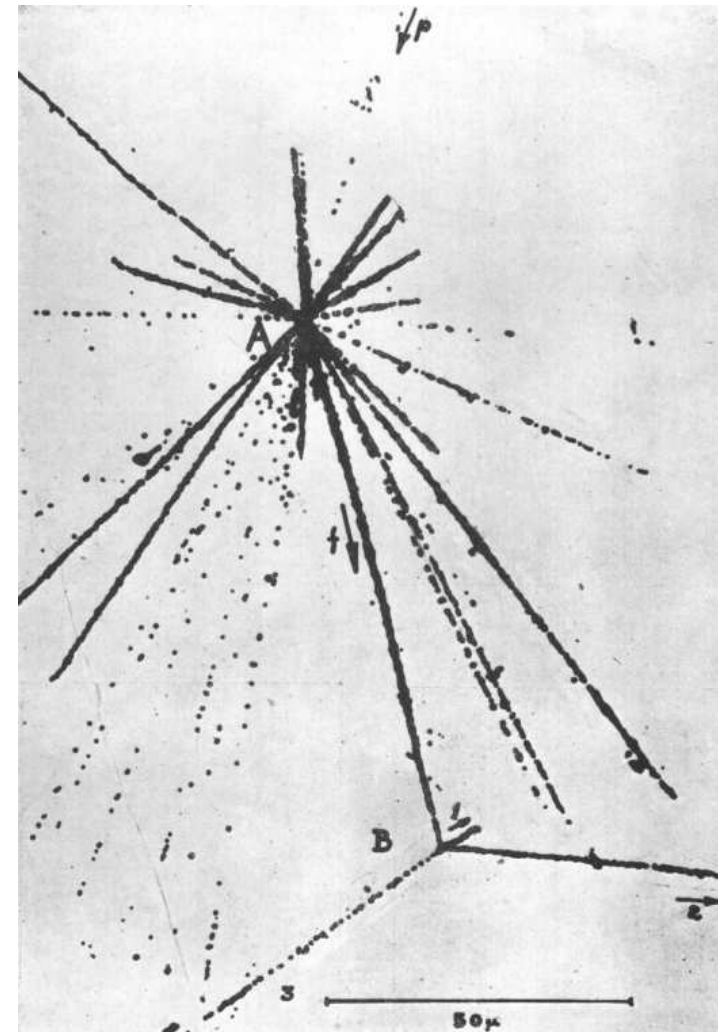
Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów.

Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

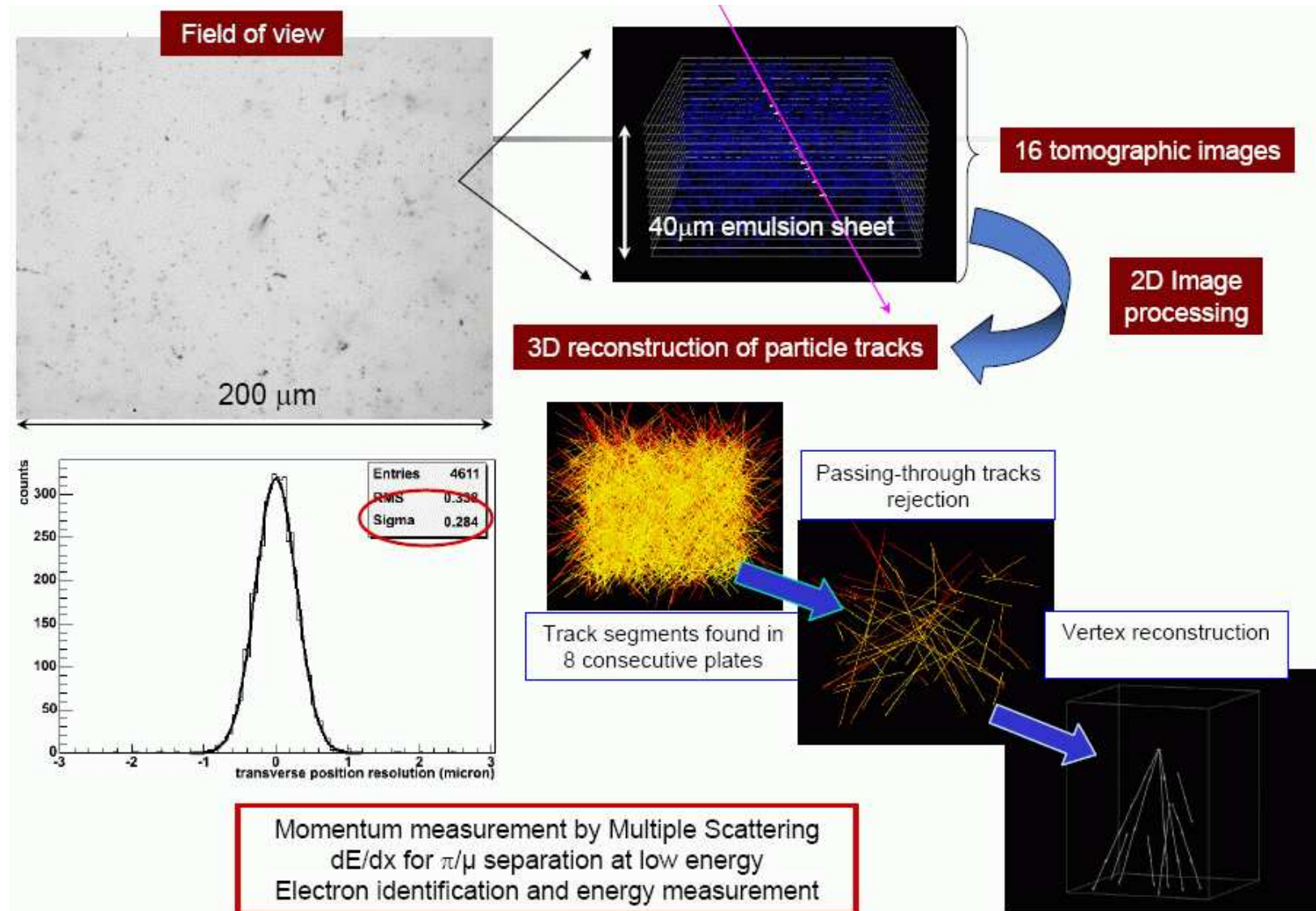


M. Danysz i J. Pniewski, 1953

Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna

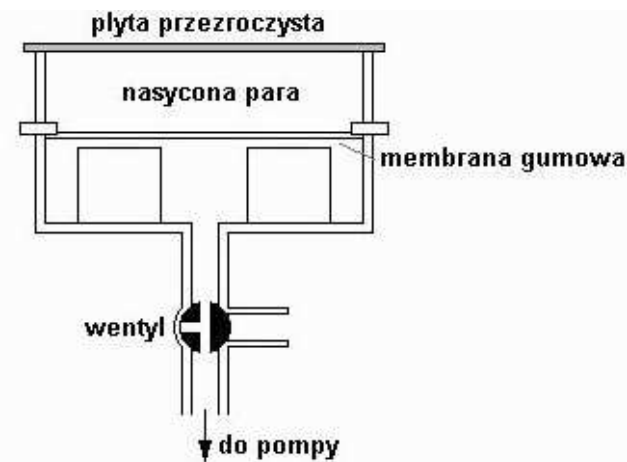
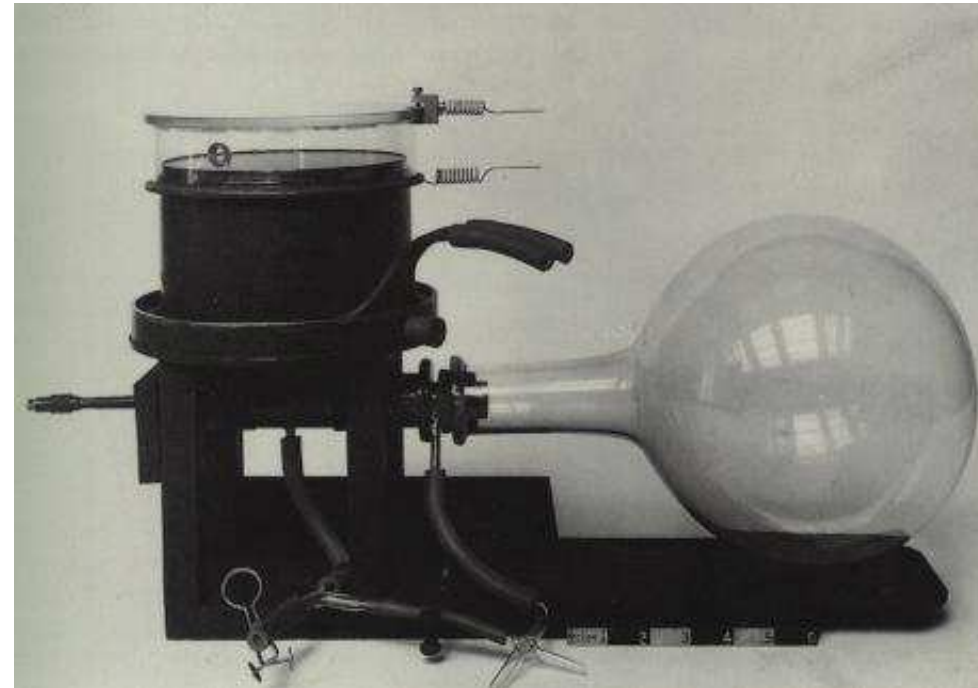
eksperyment OPERA



Detekcja cząstek

Komora Wilsona

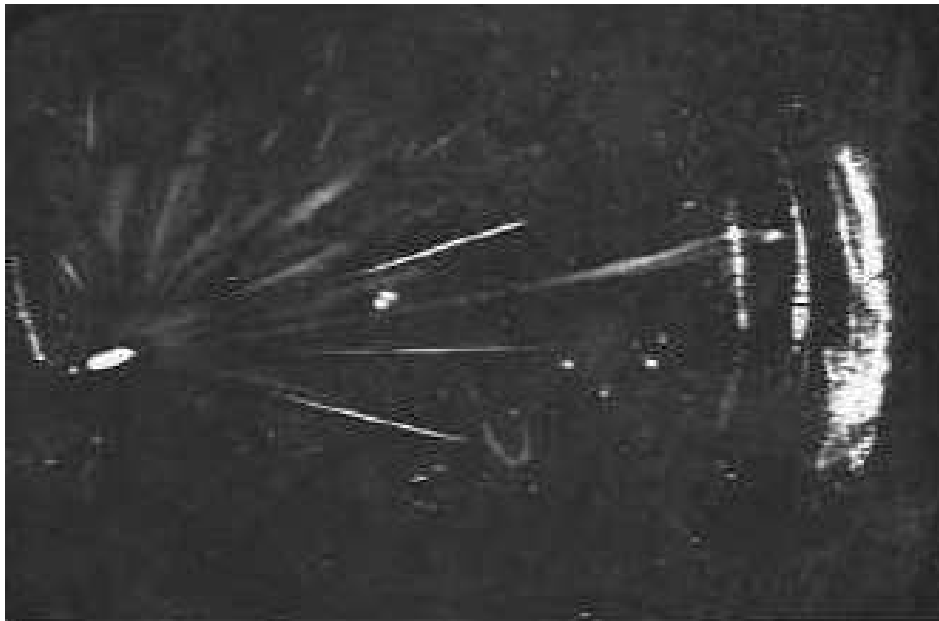
Charles Wilson, 1911



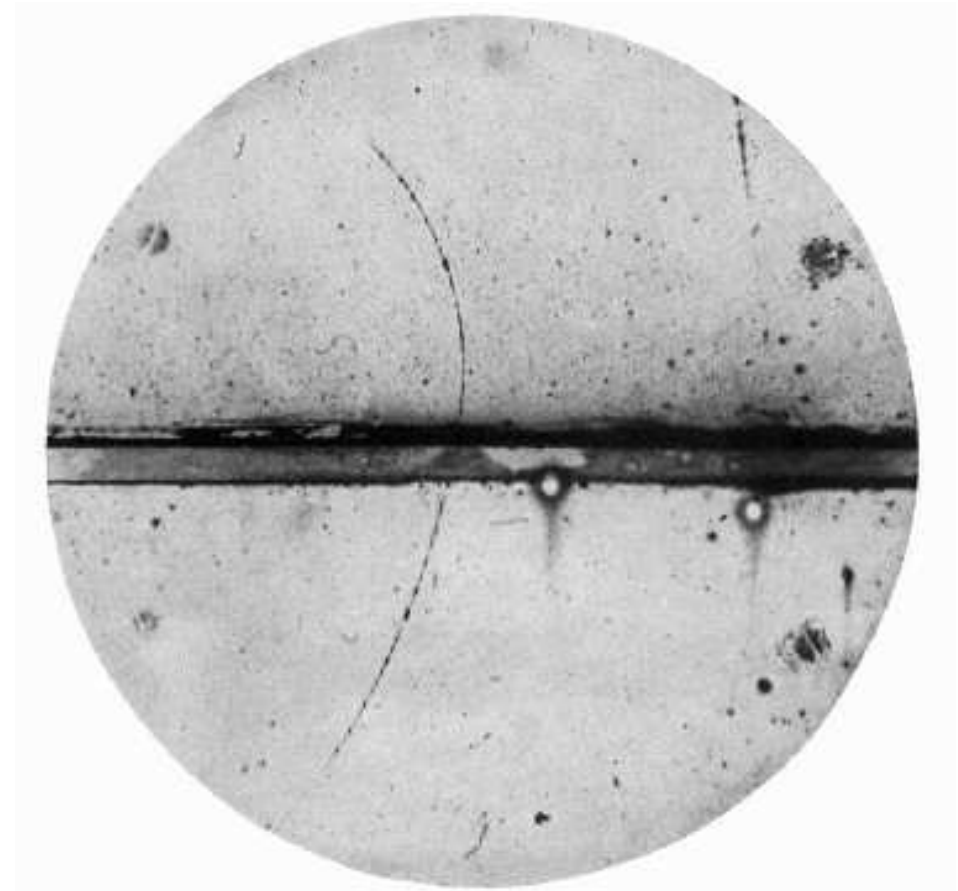
Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



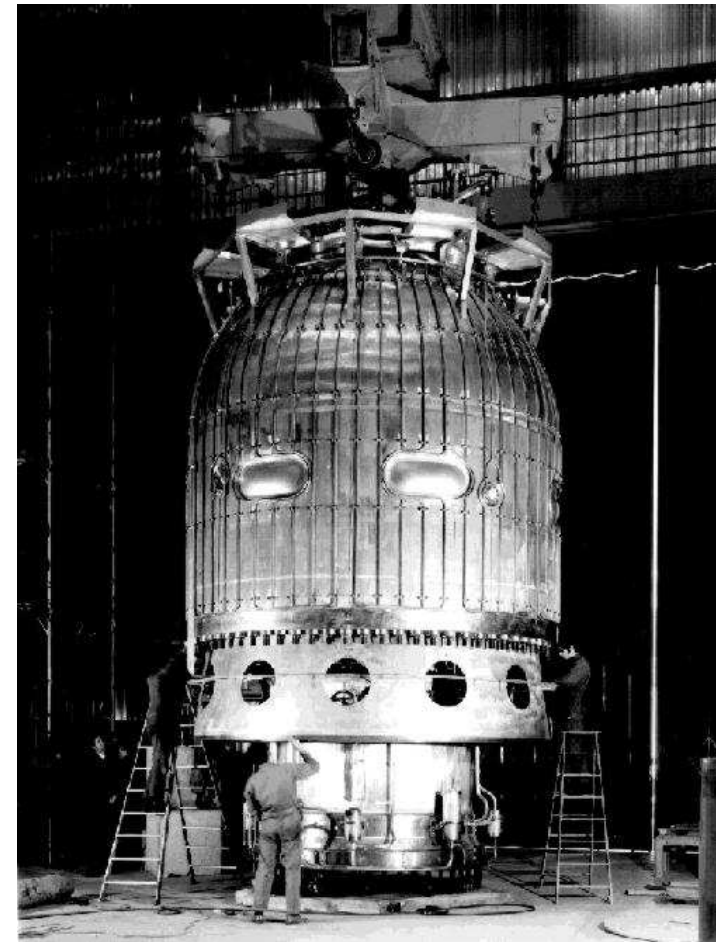
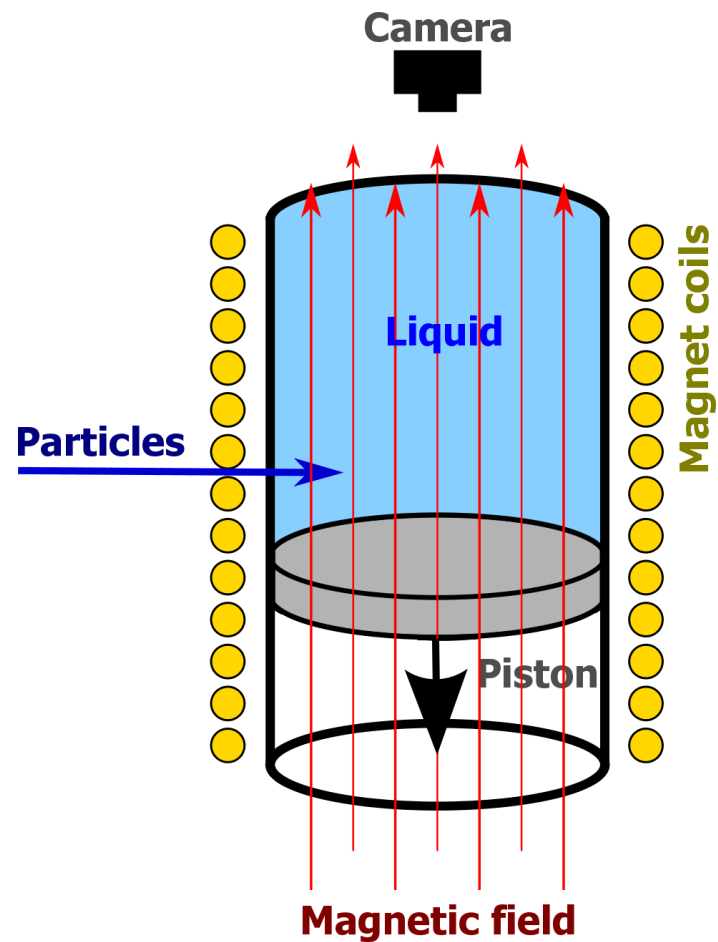
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

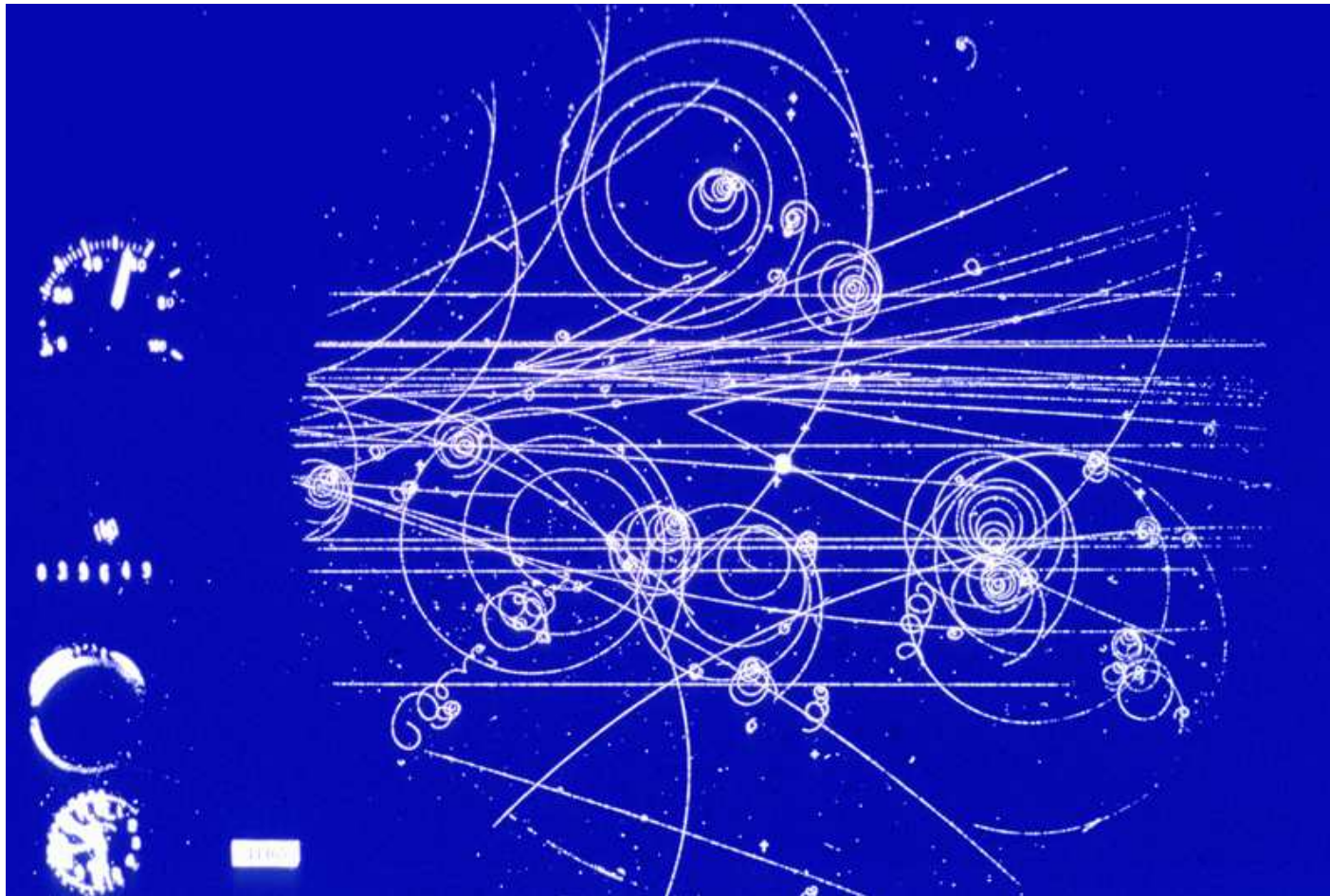
Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa, 1952



Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa



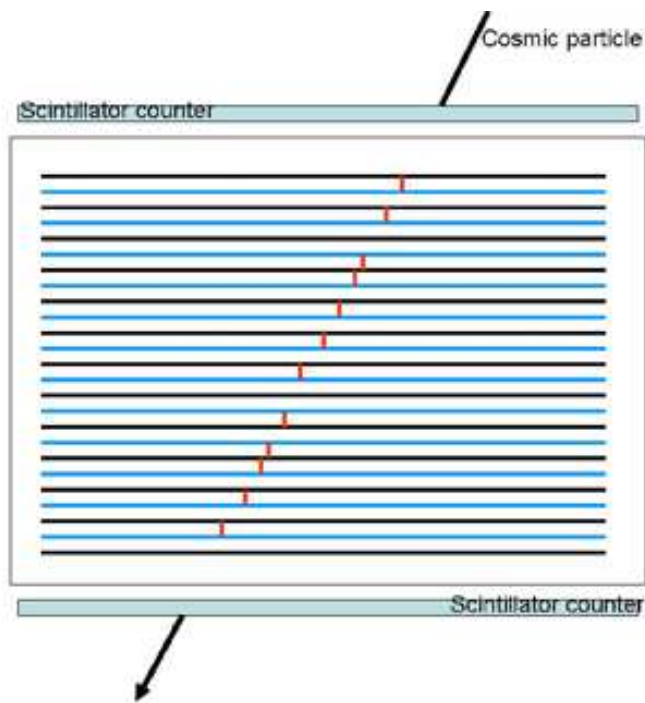
Cząstki wiązki oddziałują z cząstkami cieczy - "tarczy".



Detekcja cząstek

Komora iskrowa

Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



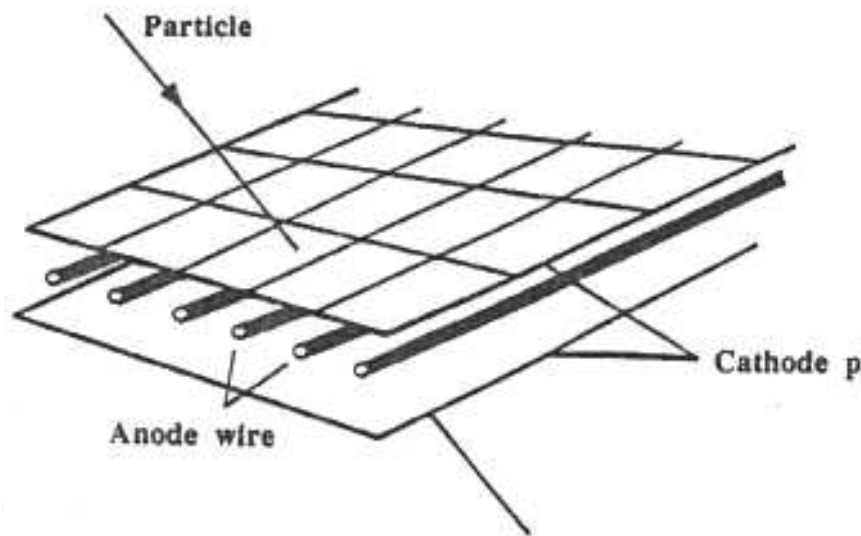
Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)



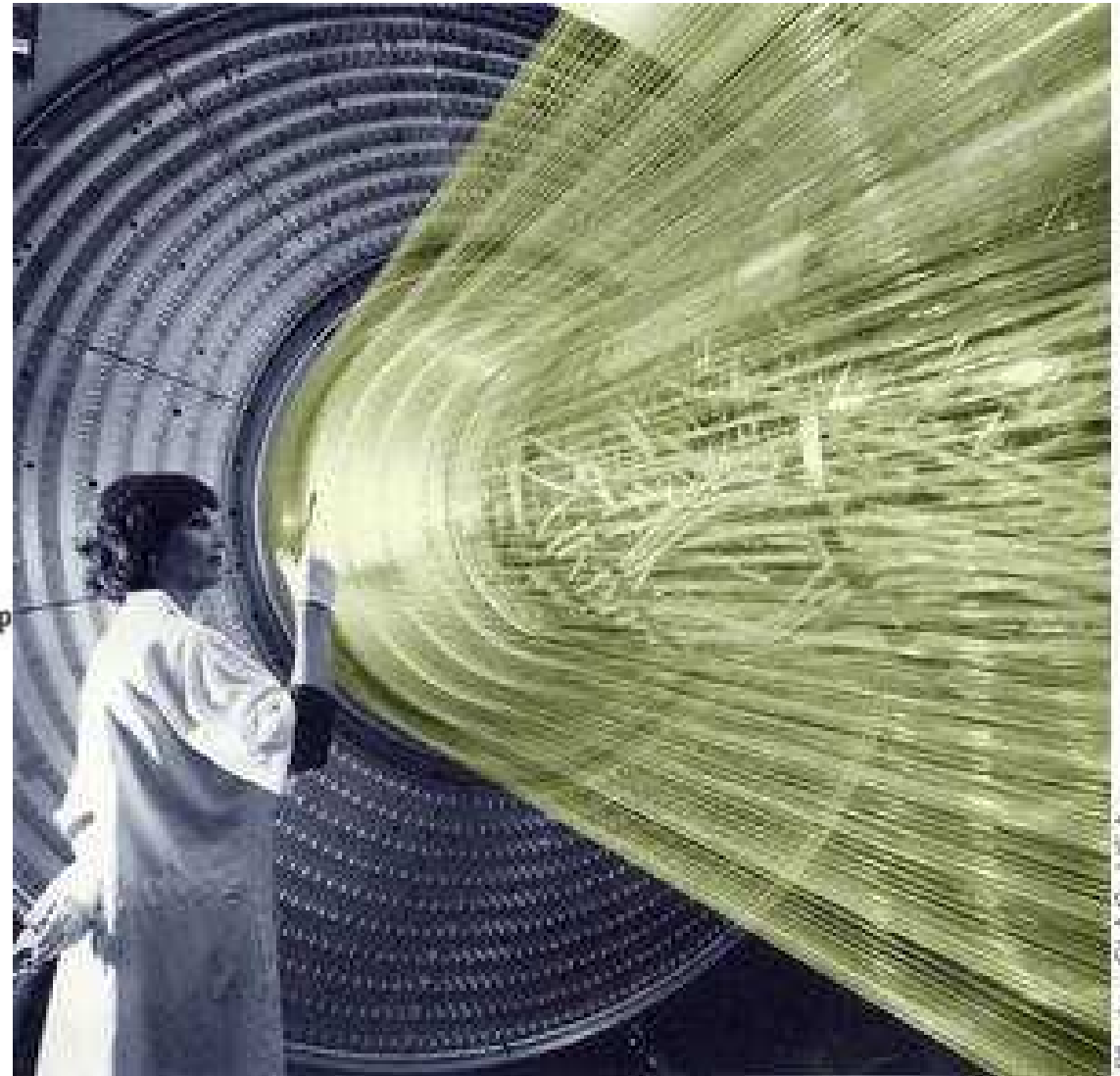
Detekcja cząstek

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



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



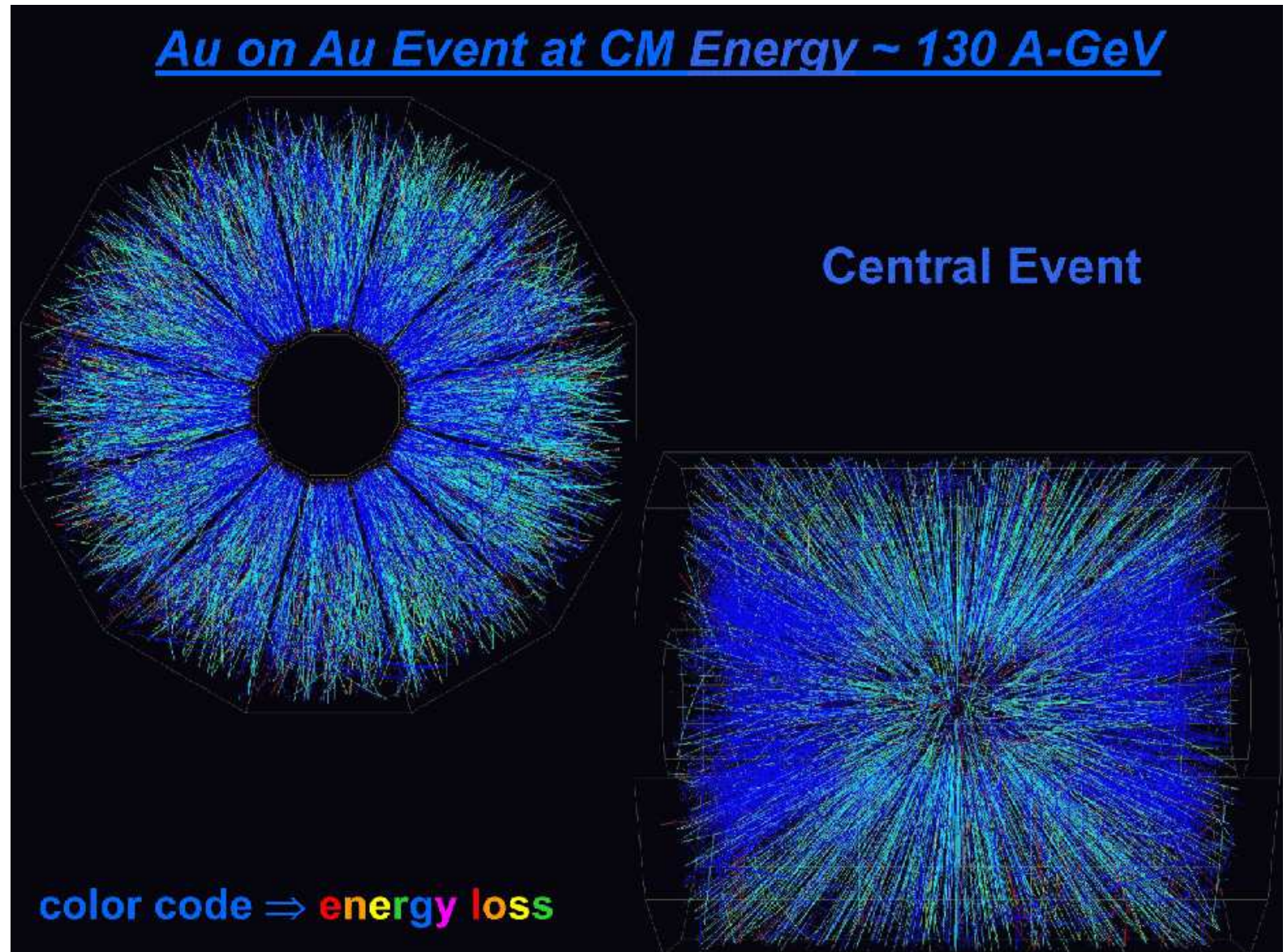
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC

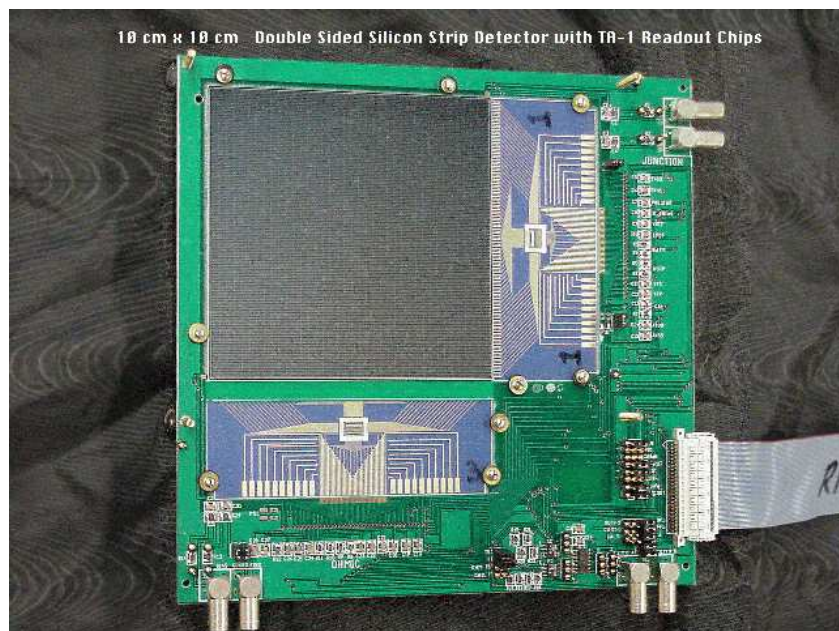


Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

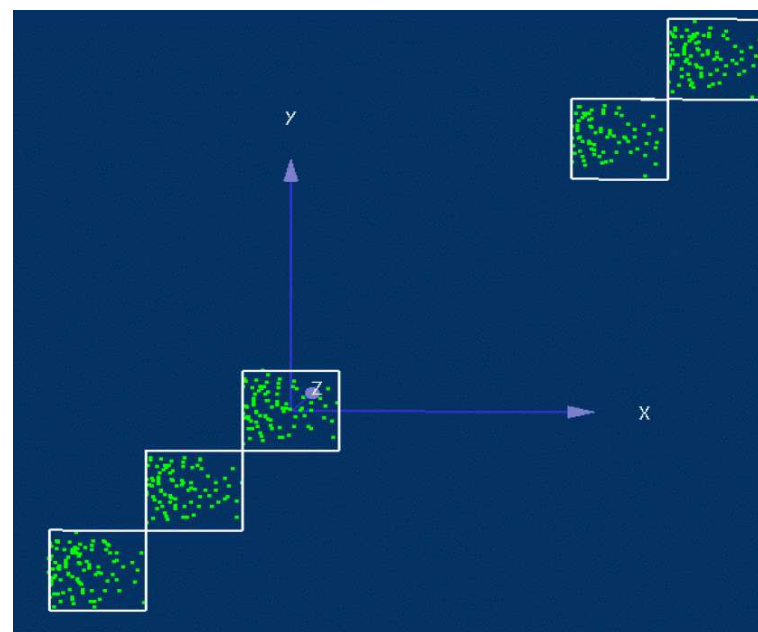
Coraz powszechniej używane.

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



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

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



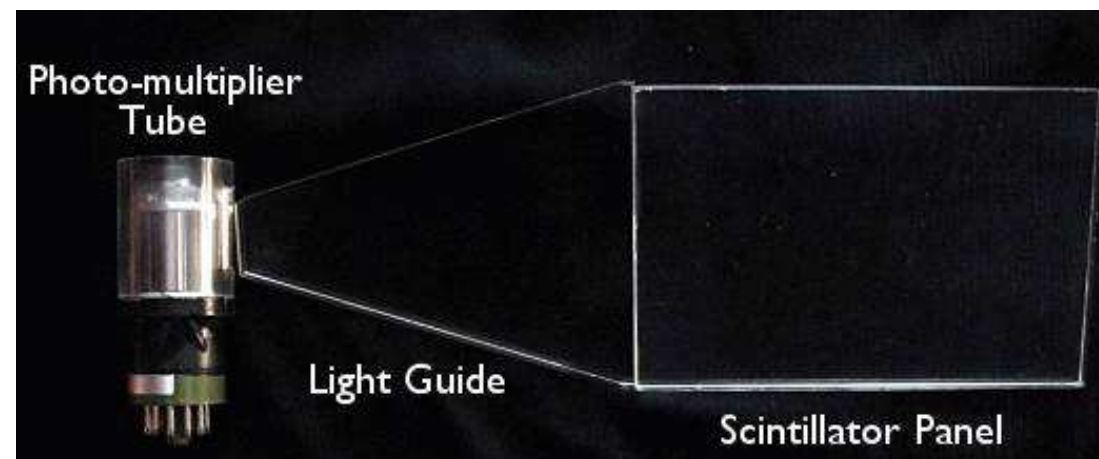
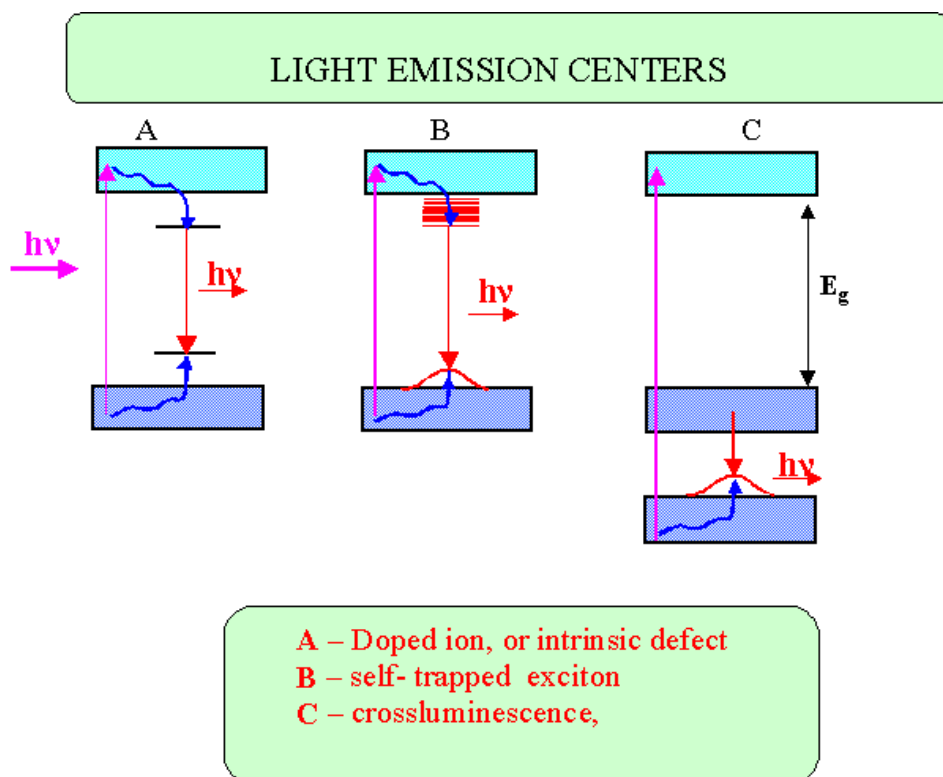
Niestety wciąż drogie...

Detekcja cząstek

Scyntylacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

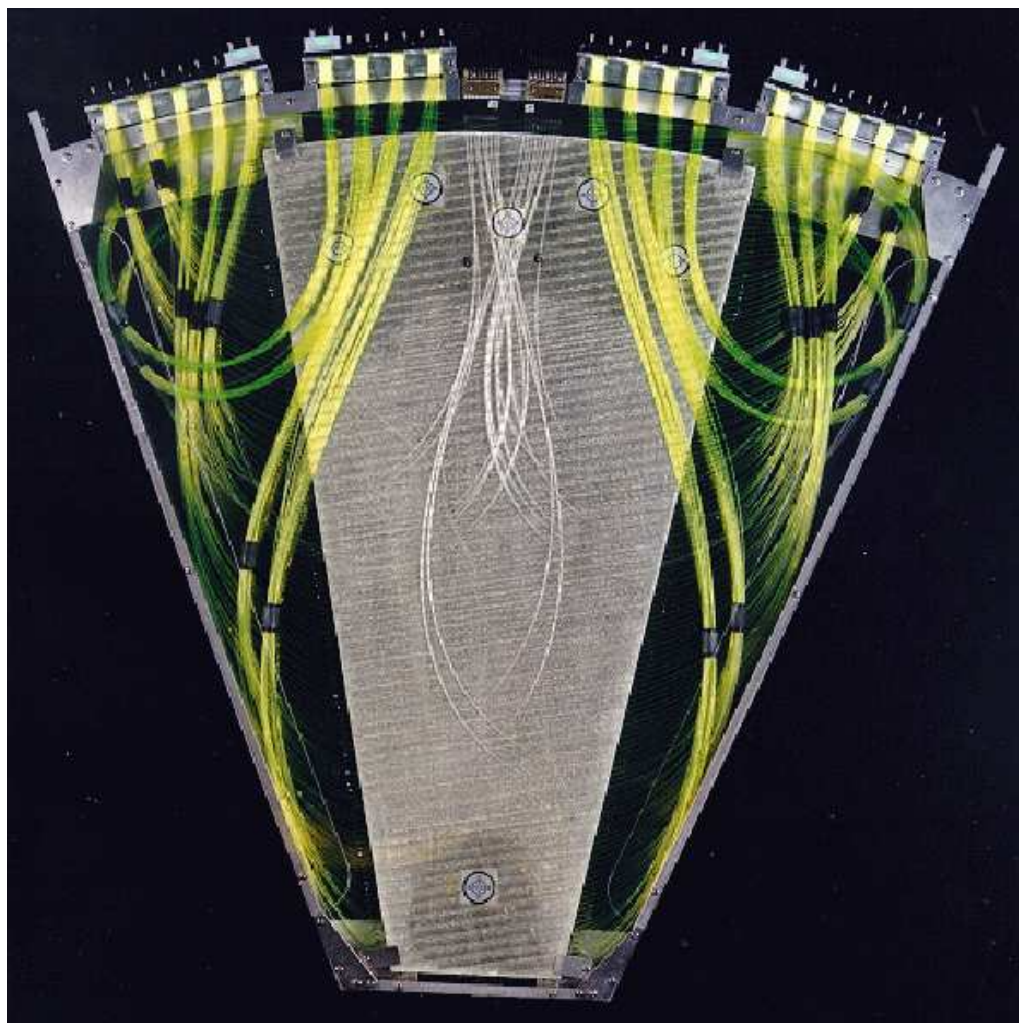
Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza



Brak pomiaru pozycji
Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki

Detekcja cząstek

Detektory scyntylacyjne

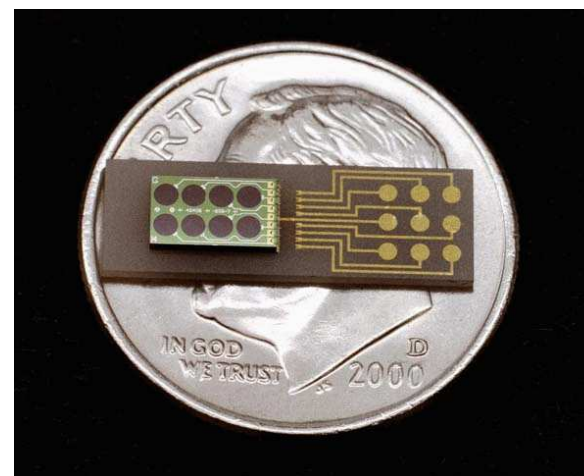


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

← włókna scyntylujące,

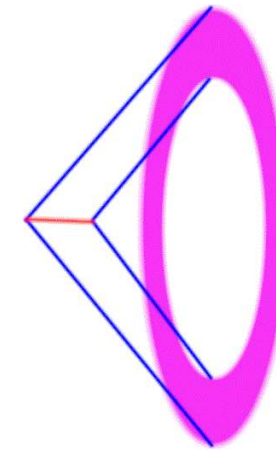
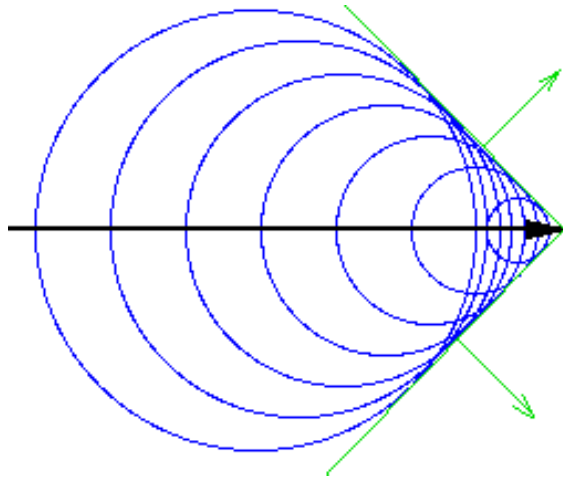
↓ fotonowielacze krzemowe.



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

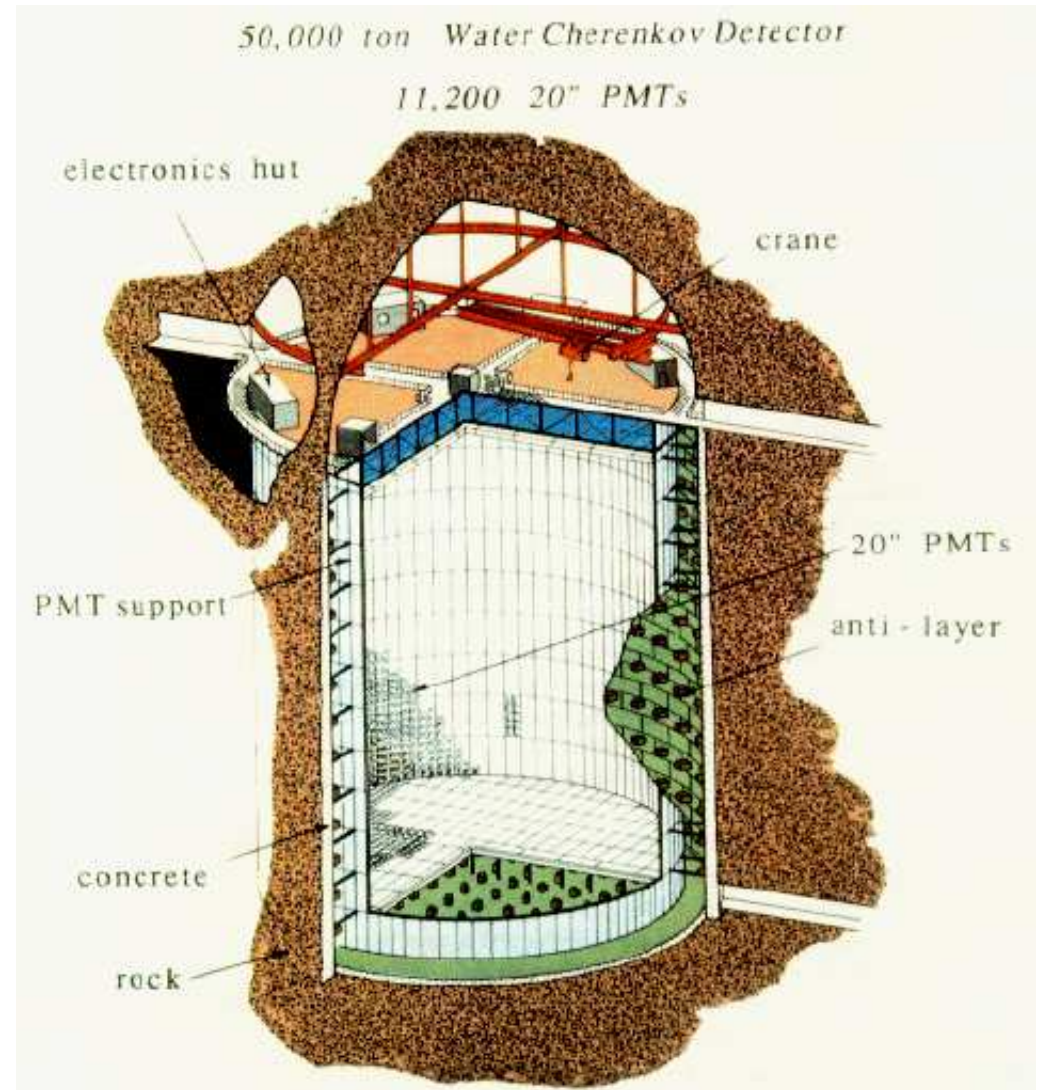
Super-Kamiokande

eksperyment neutrinowy

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

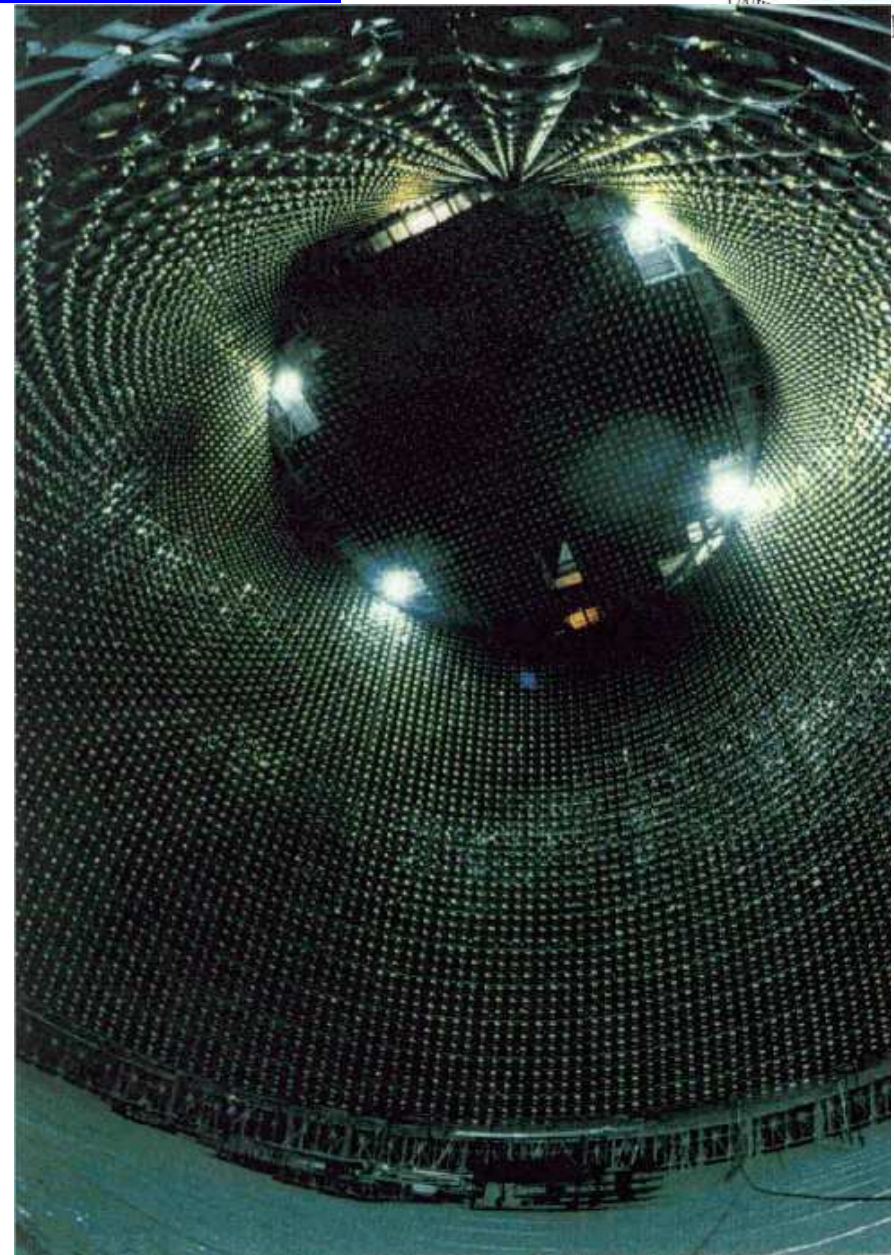
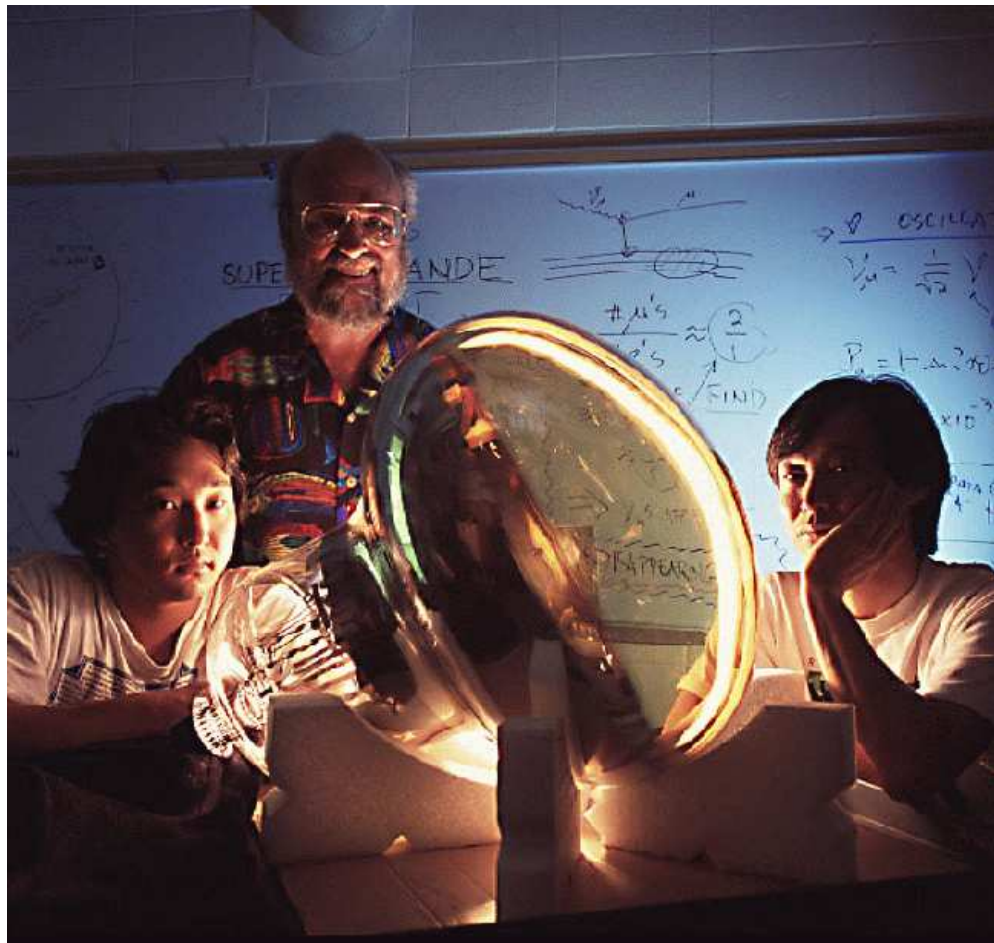
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande

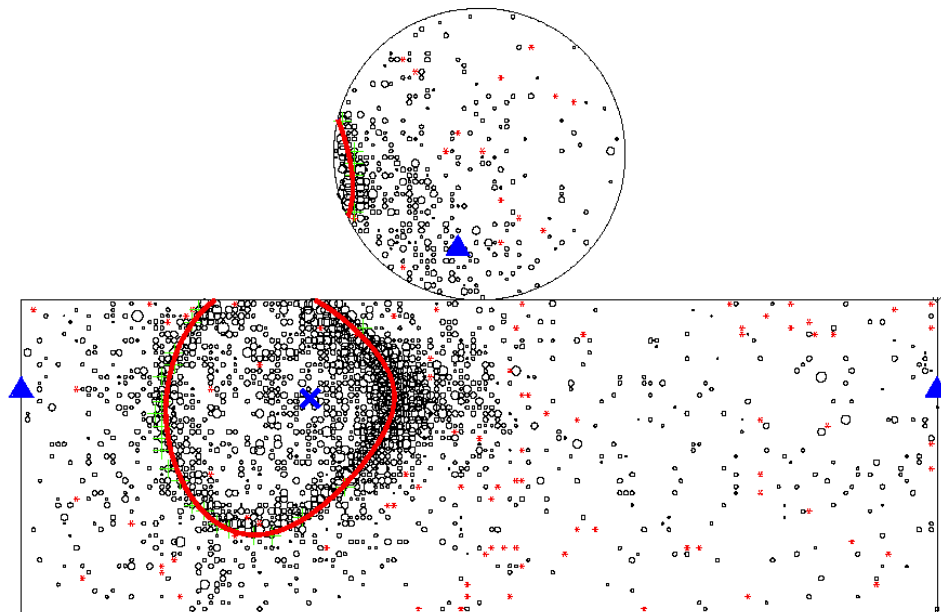
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

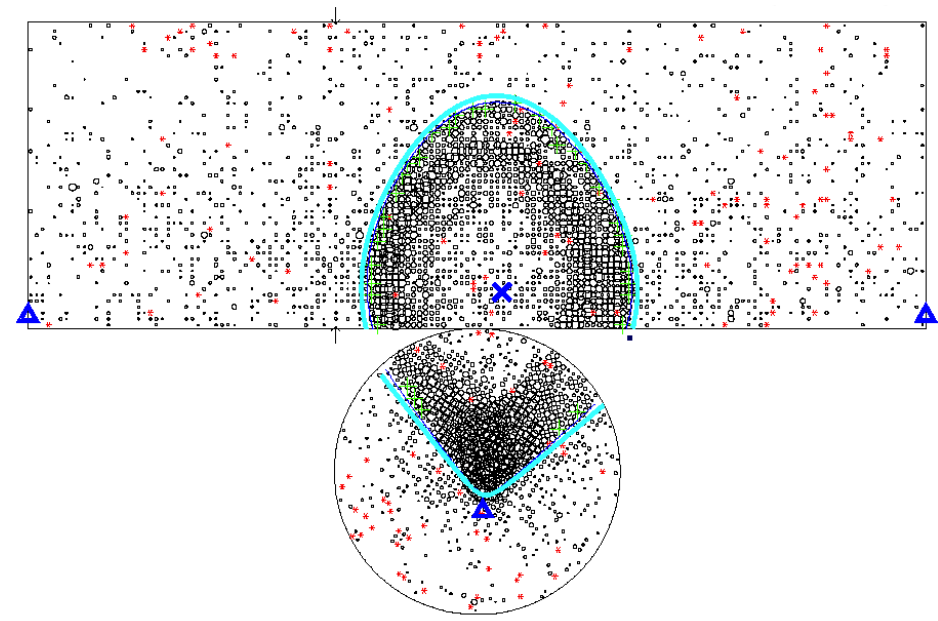


Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

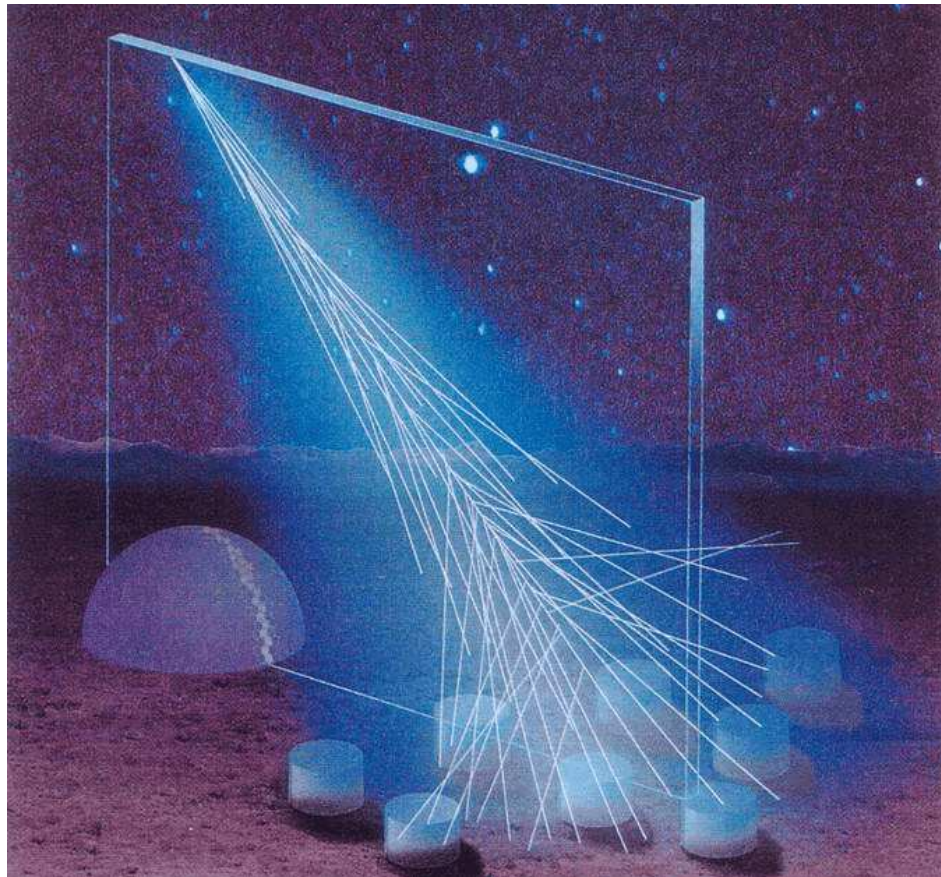
“gruby” pierścień.



Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Obserwacja wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego.

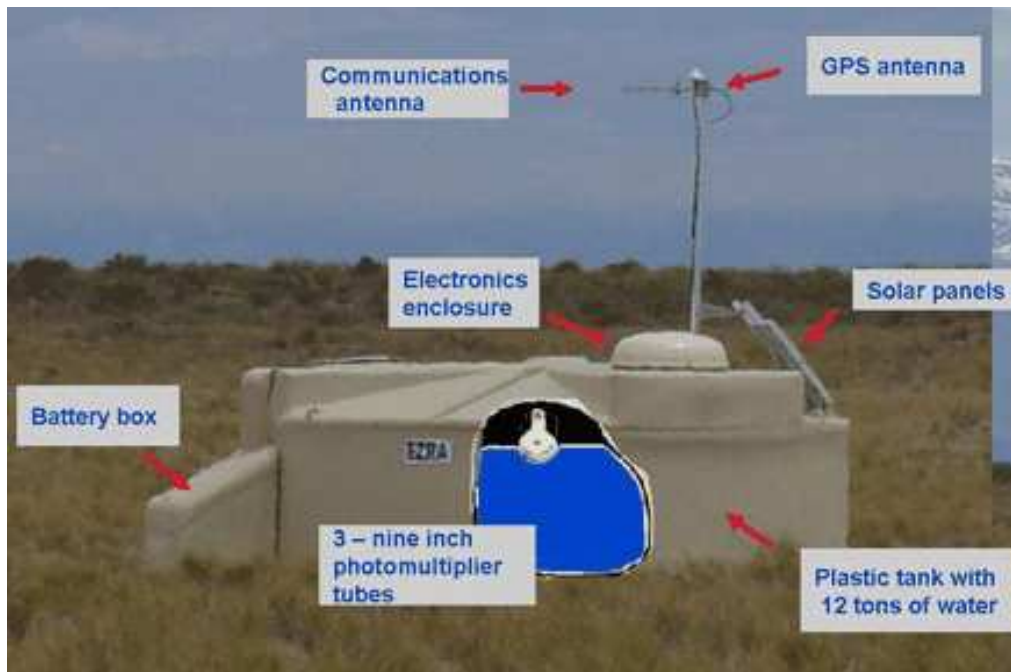


Scyntyllacja w powietrzu.
Promieniowanie Czerenkowa w
detektorach na powierzchni.

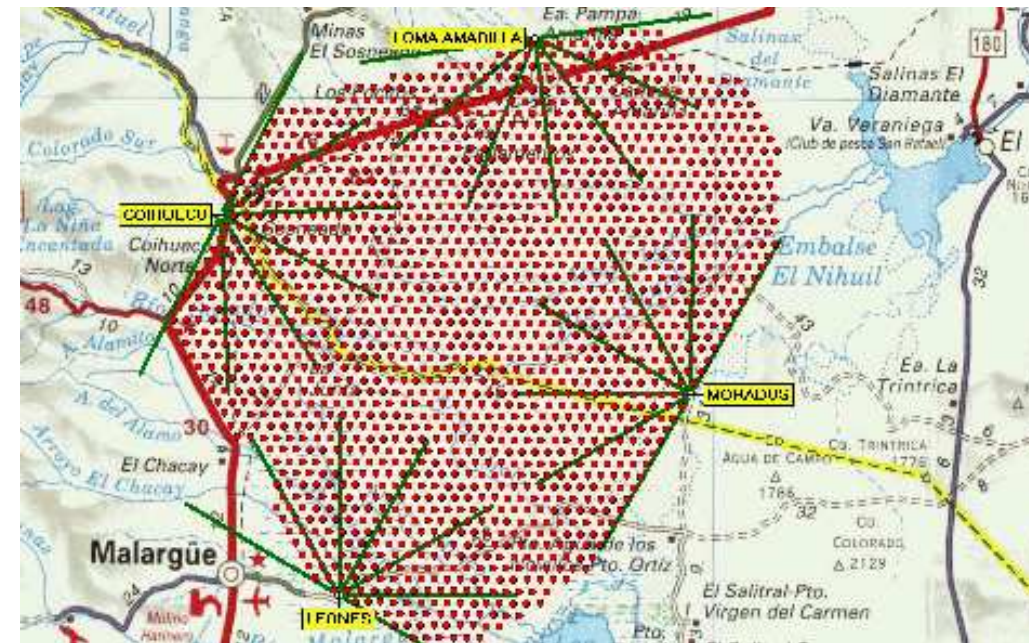
Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Detektor powierzchniowy



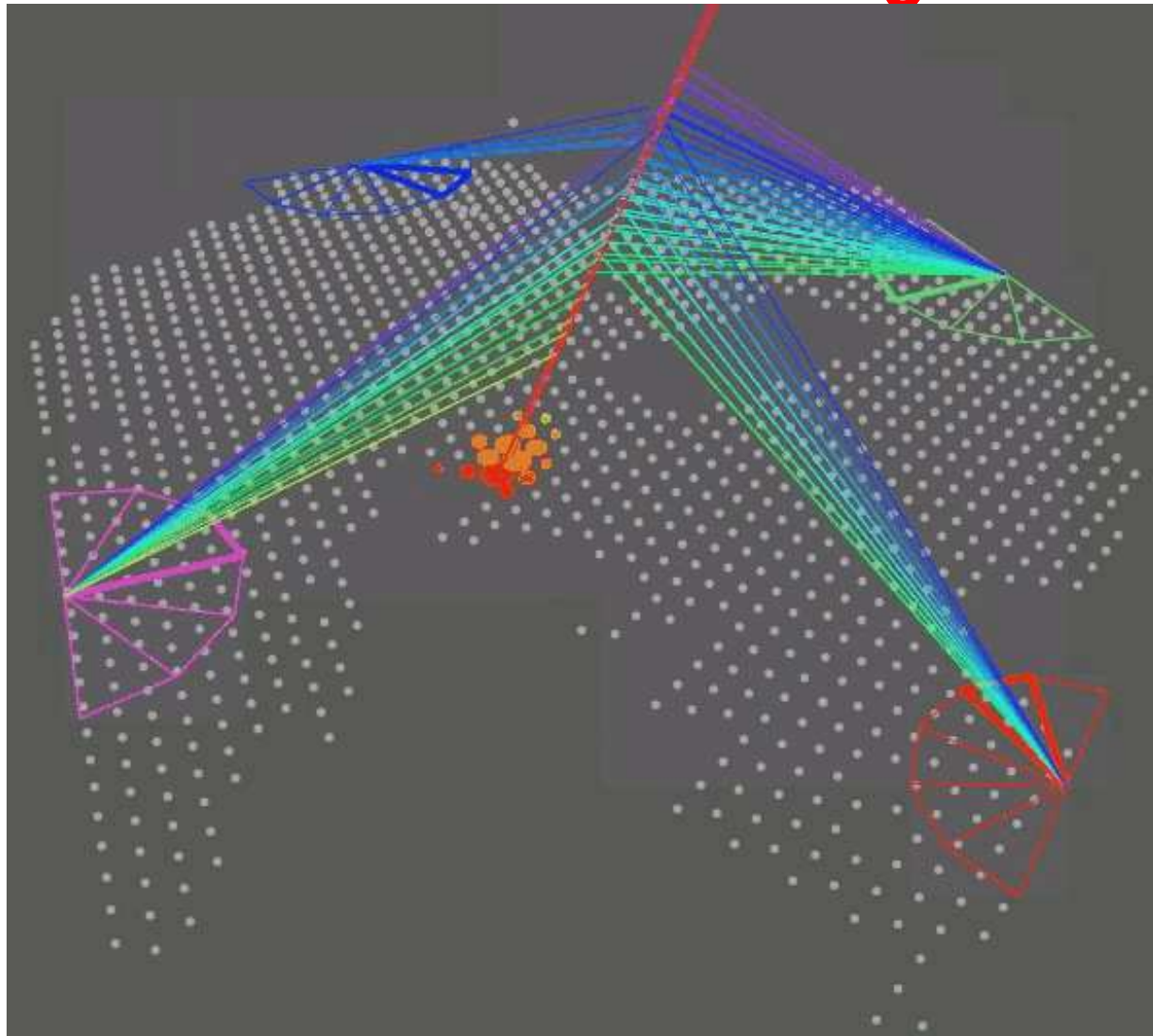
Mapa obserwatorium:



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

Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger



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

Detekcja cząstek

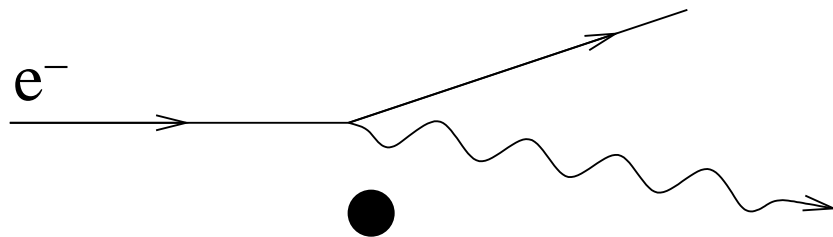
Kalorymetry

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

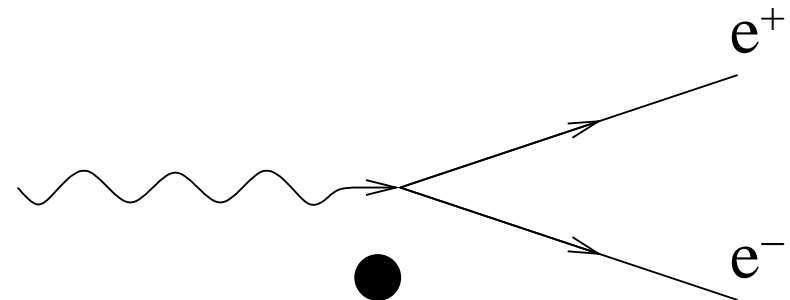
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi.

Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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



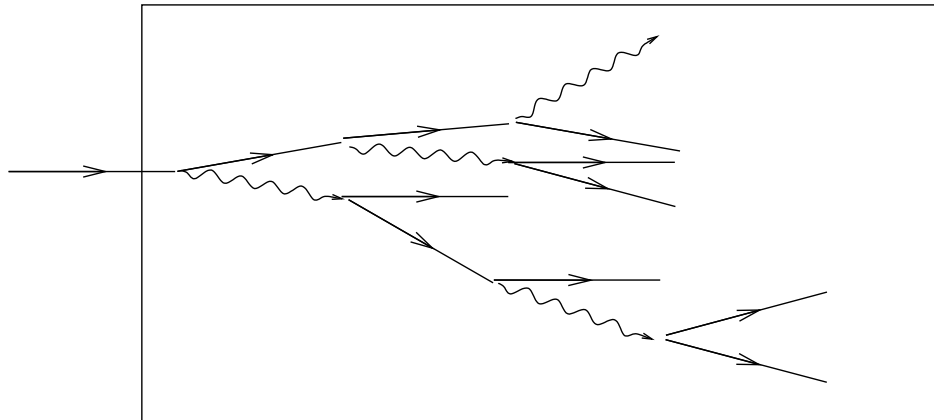
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

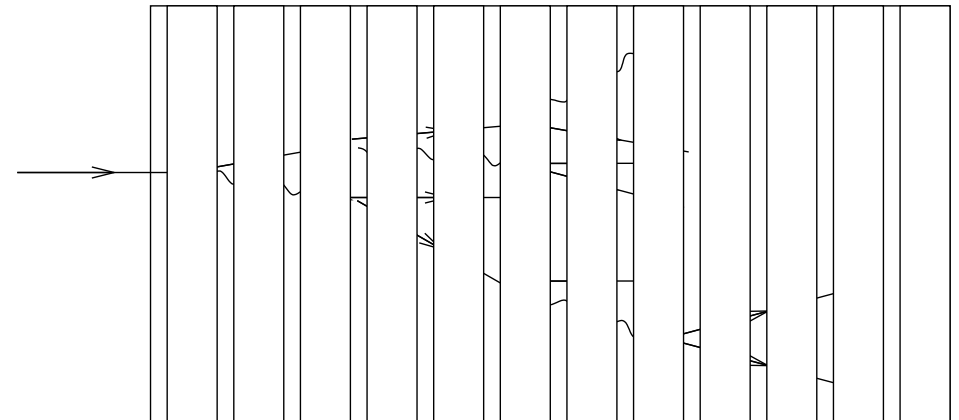
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntyлятора

Kalorymetr próbkujący

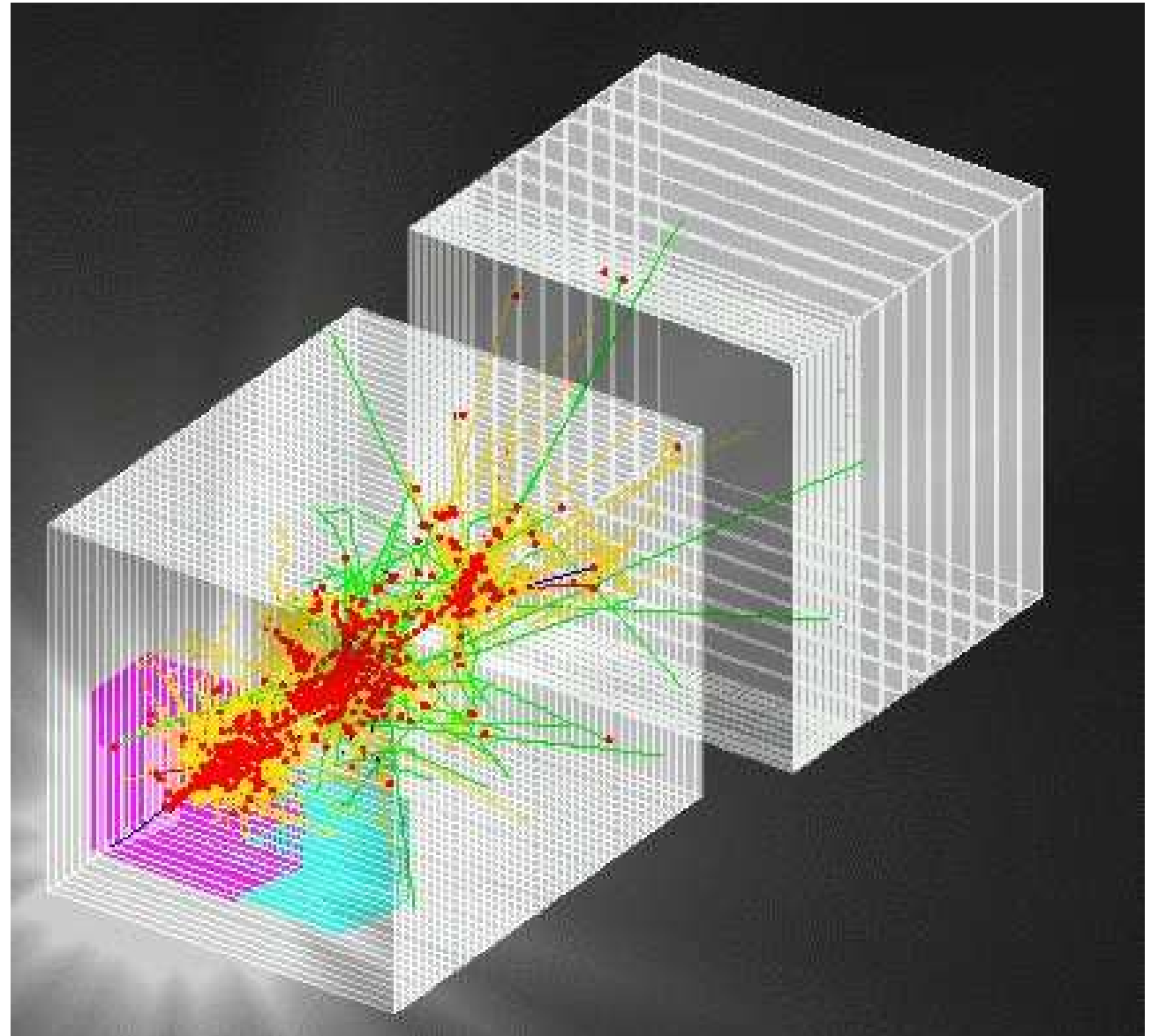


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)



Model Standardowy 5.III.2008

Model Standardowy to teoria materii zbudowana w oparciu o fundamentalne cząstki i siły

- **Materia:** cząsteczki->atomy->jądra at. (i elektrony)
→ nukleony->kwarki (kwarki: Gell-Mann i Zweig 63)
- **Siły:** realizują się przez wymianę cząstek

Czyli - wszystko zawarte we własnościach cząstek
Przykład: różnica mas kwarku u i d

Różnica mas kwarku u i d

- Te kwarki tworzą proton (uud) i neutron (ddu)
[$m_p=938.3 \text{ MeV}/c^2$, $m_n=939.5 \text{ MeV}/c^2$, $\Delta m=1.3 \text{ MeV}/c^2$]
- Rozpad neutronu =
rozpad kwarku d na kwark u (+...)
Kwark d – ma większą masę i rozpada się na cząstkę o mniejszej masie
- Ale co by było jeśli byłoby odwrotnie $m_d < m_u$?

Proton jest trwały a neutron – nie, i dlatego

- Słońce świeci – rozpad neutronu
- Woda istnieje (proton = jądro wodoru)

Rozpad neutronu $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$

Hipotetyczny rozpad protonu

$$p \rightarrow n e \bar{\nu}_e$$

**Ale dlaczego nie występuje ten rozpad?
Czy to naruszałoby jakąś zasadę?**

Zasada zachowania energii

W każdej reakcji (zderzeniu, rozpadzie):

energia końcowa = energia początkowa

- Każda cząstka o masie m ma z nią związaną energię

$$E=mc^2$$

Więc rozpad możliwy na cząstki o mniejsze masie;
bardziej masywne cząstki mają więcej szans na rozpad

- Zasada zachowania energii – ściśle przestrzegana przez Naturę

Przykład rozpadu neutronu: bilans masy

$$(940.5 - [938.3 + 0.511 + 0]) = 0.80 \text{ MeV}/c^2$$

ta różnica -> energia kinetyczna produktów rozpadu

Jednostka energii: elektronowolt (eV)

- **eV to energia elektronu po przejściu w polu elektrycznym różnicy potencjału 1 Volta (to jest b. mała jednostka energii, elektron w telewizorze kilka keV)**
- **eV -> MeV, GeV, TeV**
energia zderzeń Tevatron - 2 TeV, LHC – 14 TeV,
energia promieni kosmicznych do 10^{21} eV = 10^9 TeV
- **Cząstki elementarne poruszają się często z prędkościami bliskimi prędkości światła c**
- **Więc wszędzie pojawia się c i dla WYGODY -> $c=1$ a ponieważ związek Einsteina $E=mc^2$**

masę i energię wyrażamy w tych samych jednostkach

Zachowanie ładunku elektrycznego

- **Zasada zachowania ładunku el.**
 - **ściśle przestrzegana w przyrodzie**
- dlatego np. **proton nie mógłby się rozpaść na elektron (plus antyneutrino - el. neutralne)**
- **Ta zasada była znana zanim fizyka cząstek się rozwinęła (ale wraz z rozwojem tej dziedziny inne podobne prawa zachowania się pojawiły)**
- **Ładunek cząstek elementarnych – tylko w określonych porcjach → skwantowanie ładunku**
Niech ładunek el. elektronu = -1, wtedy
ładunek el. protonu +1,
ale kwarku u wynosi 2/3!
- **Obserwowane cząstki elementarne mają ładunek el. będący wielokrotnością ładunku el. elektronu – czyli $n=0,1,2,\dots$ lub $-1,-2,\dots$**
($n=0$ – cząstka neutralna lub obojętna)

Liczba ładunkowa (charge number)

- Zasada zachowania ładunku elektrycznego
czyli zachowanie liczby ładunkowej
końcowa l. ład. = początkowa l. ład.
(-> suma l. ładunkowych cząstek)
- Kwantowa liczba ładunkowa
(charge quantum number)
- pierwszy przykład liczby kwantowej

Liczby kwantowe

- Rozpad protonu nie jest zabroniony przez zasadę zachowania ładunku el.
zasada zachowania energii też pozwala
np. $p \rightarrow \bar{e} + \text{neutrino}$

Więc co zabrania?

- Stückelberg (1938) – nowy pomysł:
inna liczba kwantowa (tzn. jej zachowanie)
- Doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy-testy
np. dlaczego neutron nie rozpada się na: $e + \bar{e}$?

Nowa liczba kwantowa: liczba barionowa

Proton=+1, neutron=+1 ($\bar{p}, \bar{n} = -1$), pozostałe= 0
zachowana w Naturze

(baryon, z greckiego ciężki)

Kolory – nowe liczby kwantowe

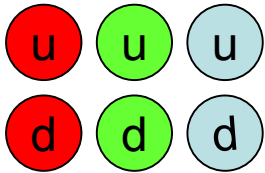
- Czerwony, niebieski , zielony – dla kwarków (i antyczerwony, antyniebieski, antyzielony dla antykwarków)
- Wszystkie kwarki są kolorowe
- Gluony – też mają kolor ale „podwójny” kolor i antykolor
np. gluon czerwono- antyniebieski
- foton „czuje ładunek el.”, gluon – ładunek kolorowy – (oddziałuje z.., sprzęga się do..)

3 kolory mogą się złożyć do 'koloru białego', czyli braku koloru

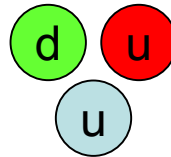
- Makroskopowo – ładunek kolorowy nie występuje, bo kwarki nie występują pojedynczo
- Stany związane kwarków są neutralne kolorowo
(tak jak atomy - neutralne elektrycznie)
- Proton, neutron są tak złożone z kolorowych kwarków, że ich wypadkowy kolor jest biały.

W protonie i neutronie

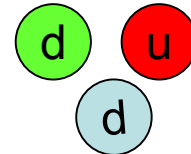
kwarki zmieniają kolor (bo cały czas wymieniają się gluonami), ale stan zawsze zawiera taką kombinację która oznacza brak koloru dla p i n (singlety kolorowe)



proton



neutron



Kwarki

- Liczba barionowa p i $n = +1$
Stąd kwarki mają liczbę barionową $1/3$
- Ładunek elektryczny
kwarków $q = 2/3$ lub $-1/3$
antykwarłów $\bar{q} = -2/3$ lub $1/3$
- Dla kwarków $u = 2/3, d = -1/3$
w zgodzie z ładunkami elektrycznymi
nukleonów:
 $p = +1, n = 0$

Liczba elektronowa

- Zawsze elektronowi towarzyszy cząstka neutrino (lub anty-neutrino)

np. w rozpadzie neutronu

- Liczba elektronowa: dla elektronu $e=+1$,
dla neutrina elektronowego $\nu_e=+1$
- I dla ich antycząstek $= -1$, inne $=0$

Więc jeśli liczba elektronowa ma być zachowana, to rozpad neutronu musi być taki: $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$

- Proces „skrzyżowany (crossing)”: $\nu_e n \rightarrow p e$ też istnieje. Proces $\bar{\nu}_e p \rightarrow \text{neutron } e$ odkrycie v Covan, Reines' 1956 (Nobel 1995)
- przedtem neutrino - tylko hipoteza 1930 Pauli (zachowanie energii w rozpadzie n)

Pierwsza rodzina

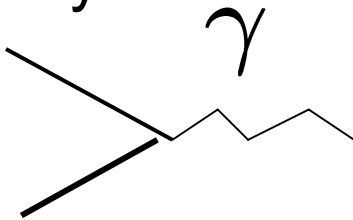
- Kwarki o ład. el. $2/3$ u (3 kolory)
 $-1/3$ d (3 kolory)
- Leptony 0 ν_e
 -1 e

(Leptony – z greckiego

małe)

Oczywiście istnieje też pierwsza antyrodzina np. antyleptony $+1$ \bar{e}
 0 $\bar{\nu}_e$

Oddziaływanie elektromagnetyczne – najprostszymi aktem oddziaływania cząstki naładowanej z fotonem



Siły –

Elektromagnetyczne (e-m) – nośnik foton (el. ładunek 0 i masa 0)

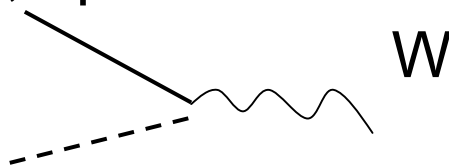
Są one silniejsze dla większego ładunku (co do wartości bezwzględnej) czyli oddz. e-m silniejsze dla kwarku u niż d, a z neutrinem nie ma oddziaływania e-m.

Wszystkie naładowane elektrycznie cząstki mogą emitować i pochłaniać fotony

Słabe

Cząstki u i d, neutrino elektronowe i elektron w wielu procesach występują w parach np. w rozpadzie neutronu, za procesy te odpowiedzialne są siły zwane słabymi

Bozony oddz. słabych – odpowiedniki fotonu dla oddz. elektromagnetycznych, np



Spin

- Własność zwana spinem – własny obrót (kręt)
 - spinning tennis ball
- Te obroty mogą być tylko pewnego typu -> są skwantowane. Każda cząstka ma określony spin, kierunek osi obrotu może się zmienić, ale nie spin.
- Przyjmując pewną jednostkę spinu - spiny cząstek mogą przyjmować jedynie wartości będące krotnością $\frac{1}{2}$ (0, 1, $\frac{3}{2}$...).

Rodziny i oddziaływania

- Materia: kwarki i leptony – spin $\frac{1}{2}$

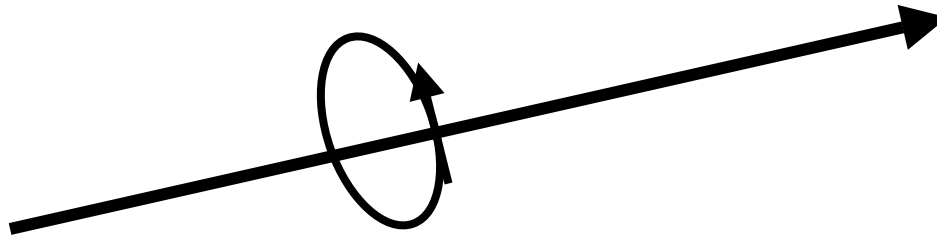
Druga rodzina: kwarki c, s (μ, ν_μ - liczba muonowa),

trzecia rodzina: kwarki t, b (τ, ν_τ - liczba tauowa)

- Oddziaływania: foton, gluony, bozony oddziaływań słabych - spin 1
- Spin 0?? – cząstka Higgsa?

Lewe i prawe cząstki o spinie $1/2$

- Lewa (lewo-ręczna) cząstka



dla cząstki prawej - obrót w przeciwną stronę
(śruba prawoskrętna)

Ale to jest względne- bo jak minę taką cząstkę
to będzie ona prawą (prawo-ręczną) cząstką.

- Więc jak jest lewa to i prawa cząstka musi istnieć – chyba, że masa cząstki jest zero!

Neutrino – masa zero (?)

- Neutrino – cząstka lewa
 - Antyneutrino – cząstka prawa
- O ile masa neutrina wynosi zero –
a tak jest w Modelu Standardowym
- Ostatnie doświadczenia wskazują, że neutrina mają niezerową masę

Model Standardowy cd. 12.03.08

Podsumowanie – cząstki
fundamentalne o spinie $1/2 \sim$
($\sim (h \text{ kreślone}) \sim h/(2\pi)$),
 h - stała Plancka, $\pi=3.14..$)
umowa $\sim =1$

Kwarki (wszystkie) :

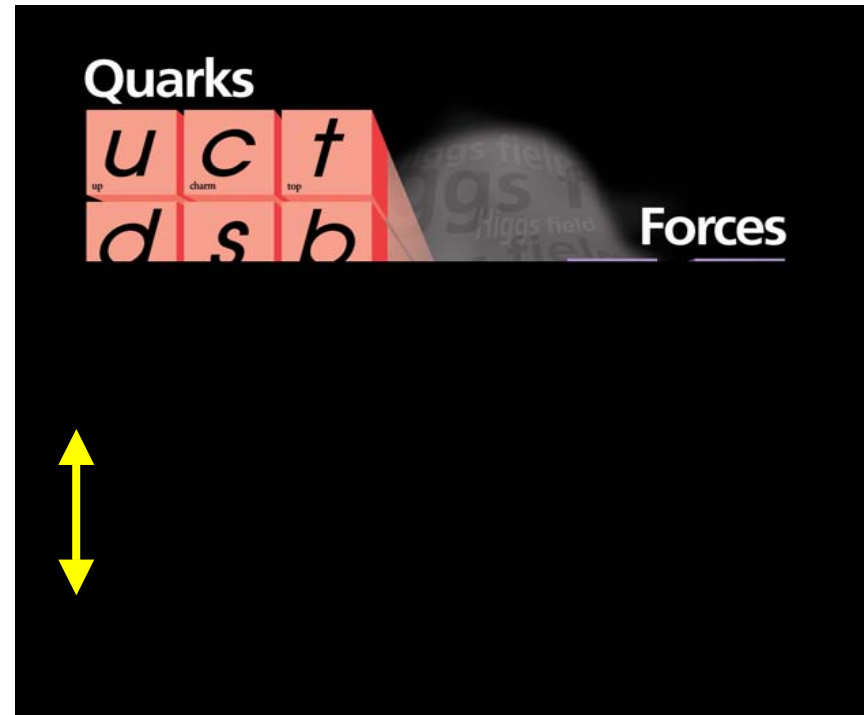
I. barionowa $B=1/3$

Leptony (wszystkie) :

I. leptonowa $L =1$

Antykwarki $B= -1/3$

antyleptony $L= - 1$



**Leptony: indywidualne liczby
kw.– elektronowa, muonowa
i taonowa**

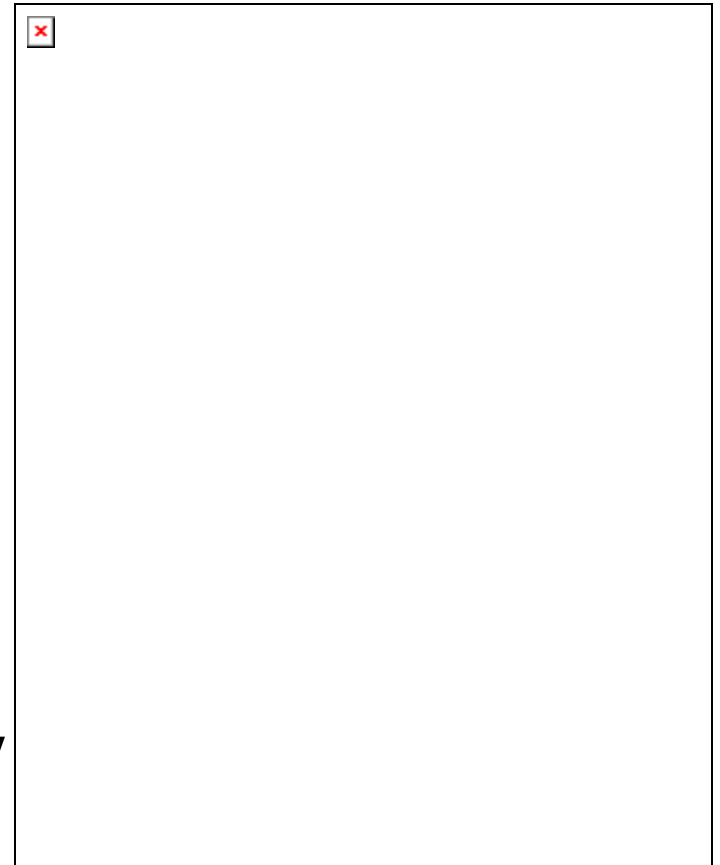
Top: 170.9 § 1.4 GeV !! *marzec 2008*

- **Masy:**

u	c	t
3 MeV	1.25 GeV	171 GeV

d	s	b
7 MeV	150 MeV *	4.5 GeV

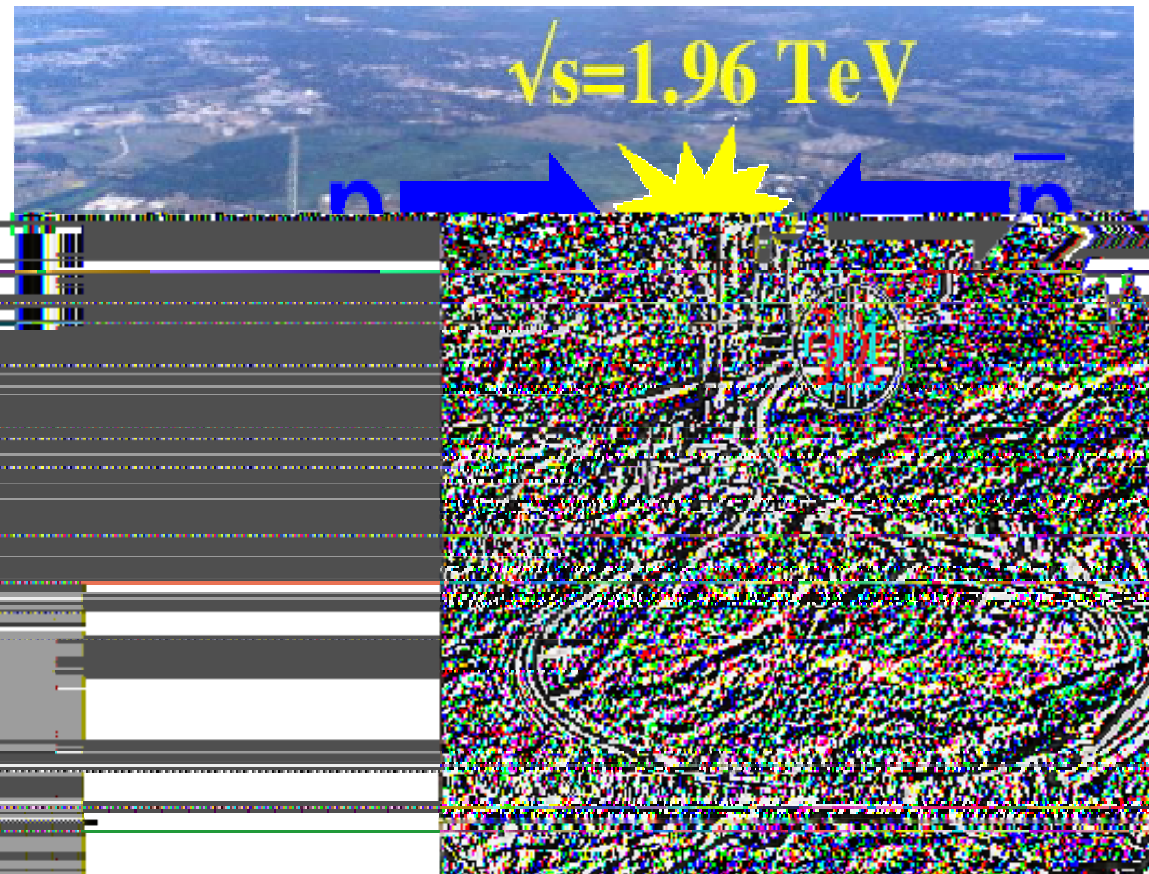
ν_e	ν_μ	ν_τ
$<5 \cdot 10^{-6}$ MeV	<0.27 MeV	<31 MeV
e (elektron)	μ (muon)	τ (taon)
0.511 MeV	105.7 MeV	1.78 GeV



Nowe dane dośw.– masa top

FERMILAB, k. Chicago

$170.9 \pm 1.1 \pm 1.5 \text{ GeV}$



teoria (MS):
wnioski dla
cząstki Higgosa
masa poniżej
144 GeV!

3 generacje (rodziny)

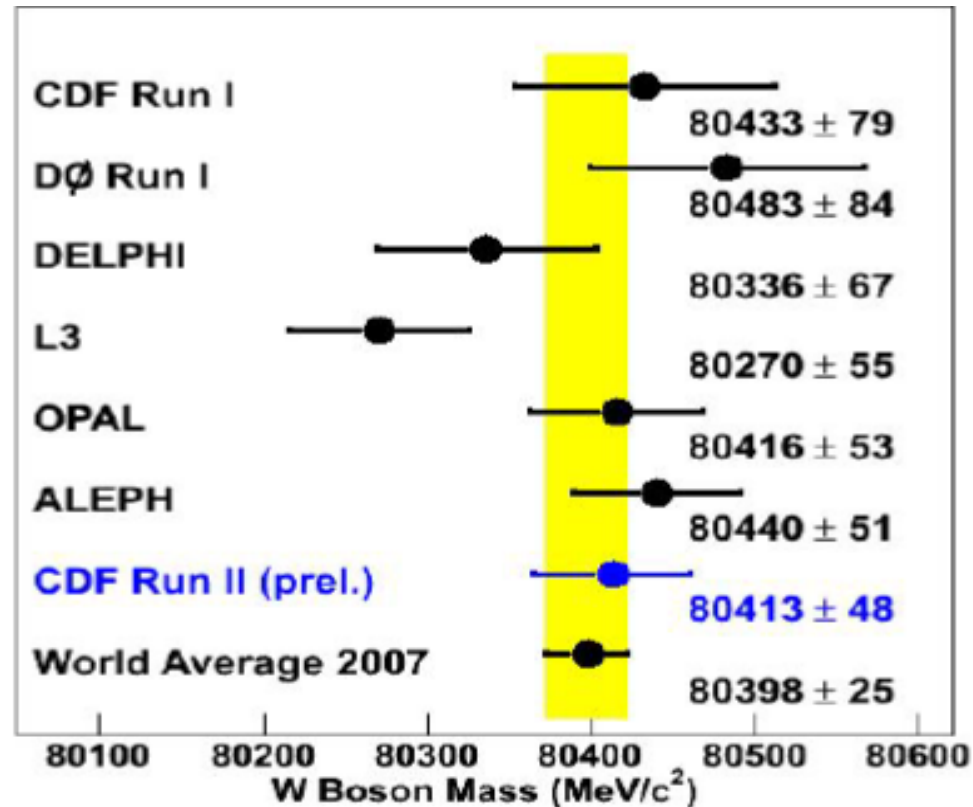
- **Czy są dalsze generacje?**
Doświadczenie: raczej nie, o ile neutrino lekkie.
Teoria: ?
- **Tablica cząstek fundamentalnych**
Generacje uporządkowane ze względu na masy –
I-a generacja - najmniejsze masy, III-a największe
(bez głębszej zasady)
- **Skąd te masy ? Mechanizm Higgsa (?)**
Ekstremiści to kwark top i neutrino
(uwaga: neutrino i antyneutrino – to nie jest para
cząstka-antycząstka)
- **Tablica cząstek jak tablica atomów Mendelejewa, ale**
są istotne różnice...

Cząstki o spinie 1 – bozony wektorowe

Nazwa	symbol	ład. el.	masa
Bozon	W^+	+ 1	80.4 GeV
Bozon	W^-	- 1	80.4 GeV
Bozon	Z	0	91.2 GeV
Foton	γ	0	0
Gluony(8)	g	0	0

(cząstki o spinie całkowitym – bozony)

Lato 2007 (dane z Tevatronu)



- New world average:
 $M_W = 80398 \pm 25 \text{ MeV}$
- Ultimate Run 2 precision:
 $\sim 15 \text{ MeV}$

Nośniki czyli bozony pośredniczące

- W^\pm/Z są bardzo masywne - ok. 100 razy masa protonu
- W^\pm są wzajemnie dla siebie antycząstkami
- γ i Z – są własnymi antycząstkami
- $gluon_{a\bar{b}}$ jest antycząstką do $gluon_{\bar{a}b}$
- grawiton – spin 2, ład. el. 0, masa 0 (własna antycząstka)

Siły

- Makroskopowo – dwie siły elektromagnetyczna i grawitacyjna mają długi zasięg (długi w porównaniu do rozmiaru nukleonu)
- W mikroświęcie – dodatkowo siły jądrowe i słabe
 - siły jądrowe które wiążą nukleony (jądrowe) mają zasięg 10^{-13} cm = 10^{-15} m;
gdy działają między kwarkami -> siły kolorowe (wymiana gluonów), zasięg podobny
 - siły słabe – rozpad neutronu, zasięg jeszcze mniejszy;
działają między kwarkami i leptonami poprzez wymianę bozonów pośredniczących W / Z

- Pola \leftrightarrow cząstki (Einstein 1905)

Promieniowanie elektromagnetyczne - strumień fotonów,

A samo pole elektromagnetyczne np. statyczne? Pole el. wokół protonu - czy też możemy wyobrażać sobie jako zbiór fotonów?

Odpowiedź: Też ale trochę innych, „poza powłoka masy”, tzn z niezerową masą. Tu jest stały bal: wysyłanie i pochłanianie tych fotonów. W mechanice kwantowej takie procesy są możliwe w krótkich przedziałach czasowych...

Ale elektron może spotkać taki foton, i zmienić swój pęd i energię

Siły → oddziaływania

- Oddziaływania =
emisja i pochłanianie bozonów (foton, W/Z, gluony)
oraz wymiana ich między cząstkami
- Klasyfikacja: historycznie wg „siły” (strength) inaczej natężenia
- Grawitacja bardzo słaba, np. dwa protony 10^{36} silniej oddziałują elektromagnetycznie niż grawitacyjnie
ale dla dużych obiektów (mas) obserwujemy duże efekty grawitacyjne
- Silne > elektromagnetyczne > słabe > grawitacyjne

(w typowych warunkach)

ALE, natężenie oddz. zależy od energii !

- Silne oddz. słabną i mogą być porównywalne z e-m dla dużych energii.
- Słabe oddziaływania dla energii poniżej 1 GeV tak słabe, że neutrina przechodzą przez całą Ziemię praktycznie bez oddziaływań. Ale słabe oddz. wzmacniają się ze wzrostem energii i dla energii 10 TeV są porównywalne z oddziaływaniem e-m.????
Słabe oddziaływanie cząstek Higgsa jest 'słabe' poniżej 1 TeV
- Uwaga: w procesach mogą uczestniczyć zarówno W/Z i fotony, więc ich charakter mieszany

Klasyfikacja: „stałe” sprzężenia

- Parametr opisujący elementarny akt oddziaływania, np

$$e \rightarrow e \gamma \quad e \gamma \rightarrow e$$

$$e \rightarrow \nu_e W^- \quad \nu_e \rightarrow e W^+$$

$$d \rightarrow u W^- \quad t \rightarrow b + W^+$$

$$d \rightarrow d Z \quad Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$$

$$u_r \rightarrow u_g + g_{r,\text{anti-g}}$$

- Stałe sprzężenia (niskie energie):

e-m

$$e \quad (\alpha_{\text{el}} = e^2/4\pi = 1/137)$$

silne (kolor)

$$g_s \quad (\alpha_s = g_s^2/4\pi = 1)$$

Uwaga:

słabe (fund.)

$$g \quad (\alpha_w = g^2/4\pi = 1/40 > \alpha_{\text{el}}$$

ale efektywnie $\alpha_w/M_W^2 \rightarrow 10^{-5} m_p^2 \ll \alpha_{\text{el}}$

Mechanika kwantowa.

Mieszanie

- Prawa mechaniki kwantowej różnią się od praw Newtona opisujących mechanikę klasyczną. Chociaż są graniczne przypadki (np. bardzo masywne cząstki) gdy stosuje się opis klasyczny.
- Mechanika kwantowa – tu nie wyznaczamy trajektorii ruchu, ale prawdopodobieństwa procesów. Trajektoria jest realizowana z pewnym prawdopodobieństwem. Nie śledzimy ruchu poszczególnych cząstek

Dwie szczeliny

- Światło –

fala (Huygens) czy cząstka (Newton)?

I to i to..., ale lepiej uznać, że pytamy nie tyle o istotę światła ale o to jaki aparat (pojęcia) możemy zastosować do opisu.

Fale interferują ze sobą...

Foton – cząstka światła, ale prawa ruchu jak dla fali... (jak dźwięk)

Źródła cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 5

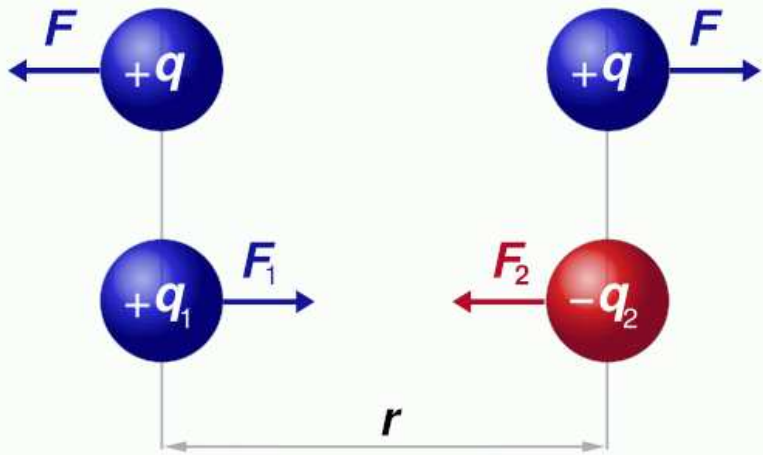
- Wprowadzenie
 - Pole elektryczne i magnetyczne, jednostki
- Naturalne źródła cząstek
 - Źródła promieniotwórcze, promieniowanie kosmiczne
- Akceleratory cząstek
 - Akceleratory elektrostatyczne, liniowe i kołowe
 - Współczesne akceleratory i ich ograniczenia

Wprowadzenie

Pole elektryczne

Prawo Coulomba

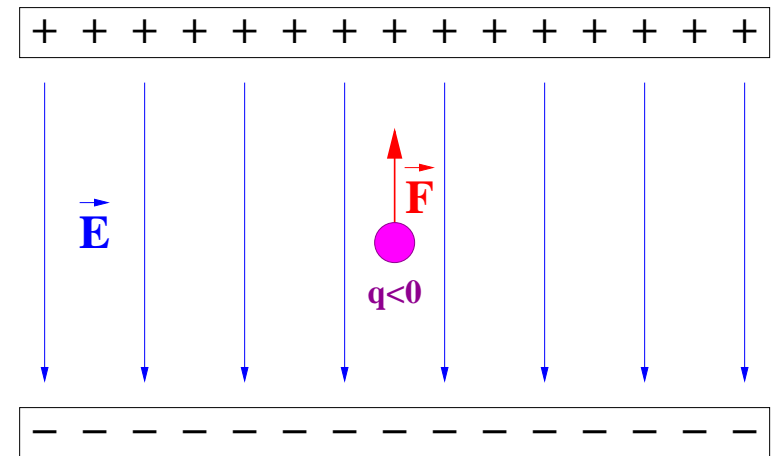
siła oddziaływania między ładunkami:



$$F_1 = F_2 = k_c \frac{q_1 \times q_2}{r^2}$$

gdzie: $k_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$

Gdy opisujemy ruch cząstki pod wpływem siły Coulomba wygodnie jest wprowadzić pojęcie "pola elektrycznego" \vec{E} :



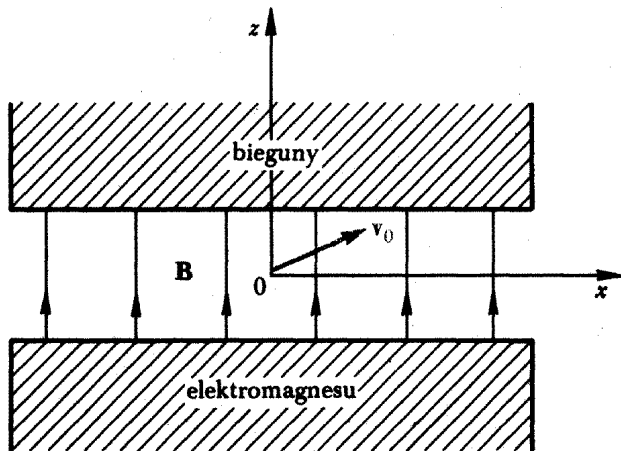
Siła działająca na ładunek q :

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

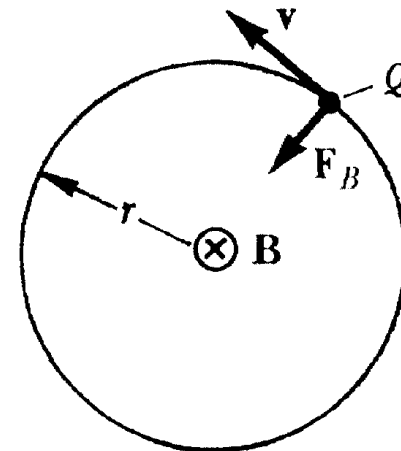
Wprowadzenie

Pole magnetyczne

Wytwarzane między biegunami magnesów lub elektromagnesów



Cząstka naładowana poruszająca się w płaszczyźnie prostopadłej do pola:



Na cząstkę działa siła Lorentza:

$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Siłą działa prostopadle do kierunku ruchu - nie zmienia prędkości (pędu, energii) cząstki, a jedynie kierunek jej ruchu!

Jednostki

Energia

Naturalna jednostka w fizyce cząstek jest **1 elektronowolt**

1 eV - energia jaka zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

$$1 e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$
$$\Rightarrow 1 eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

Jednostki pochodne:

$$\begin{aligned} \text{kilo} - & 1 \text{ keV} = 10^3 eV \\ \text{mega} - & 1 \text{ MeV} = 10^6 eV \\ \text{giga} - & 1 \text{ GeV} = 10^9 eV \\ \text{tera} - & 1 \text{ TeV} = 10^{12} eV \end{aligned}$$

Jednostki

Masa

Masa jest równoważna energii spoczynkowej cząstki:

$$E = mc^2$$

Gdzie prędkość światła:

$$c \equiv 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (\text{dokładnie !!!})$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Ale w fizyce cząstek powszechnie przyjmujemy $c \equiv 1$.

Jednostkę energii możemy wtedy przyjąć też za jednostkę masy ($E = mc^2$; $c \equiv 1$)

$$1 \text{ eV}/c^2 \equiv 1 \text{ eV} = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Przykładowe masy:

elektron	e	511 keV	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
proton	p	938 MeV	$1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Jednostki

Sprzężenie

Stała sprzężenia oddziaływań elektromagnetycznych zwana też historycznie stałą struktury subtelnej

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

Może być rozumiana jako "moc" oddziaływania elektrostatycznego dwóch ładunków elementarnych wyrażona w jednostkach stałej Plancka:

$$\hbar \approx 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \hbar c \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Zwyczajowo przyjmujemy $c \equiv \hbar \equiv \epsilon_0 \equiv 1$

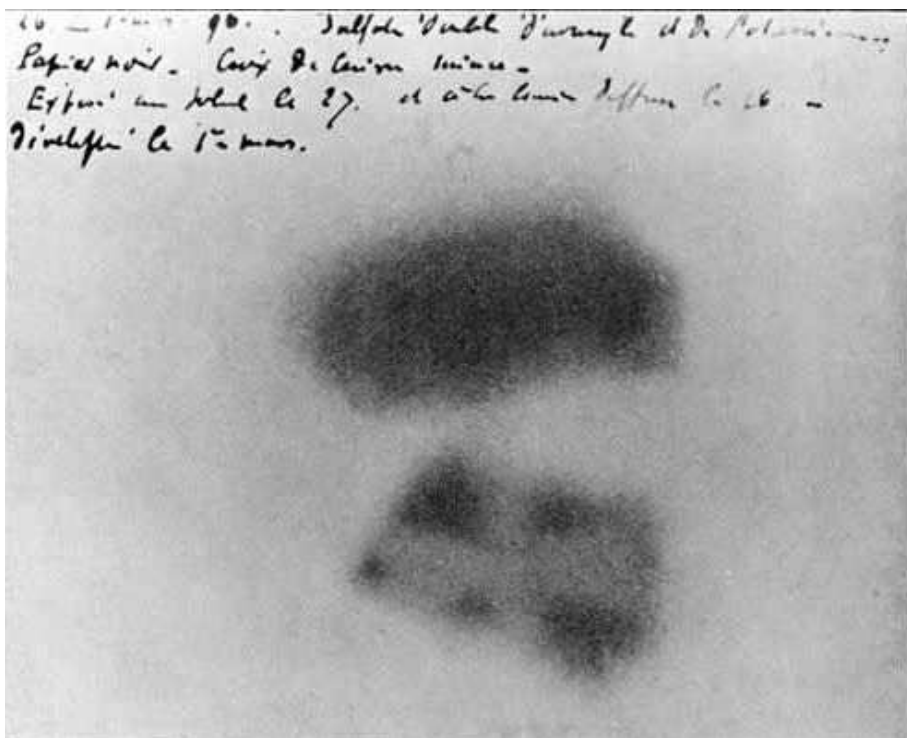
$$\Rightarrow \alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi}$$

Źródła cząstek

Pierwiastki radioaktywne

Promieniotwórczość odkrył **H. Becquerel** w roku **1896**.

Sole uranu emitowały promieniowanie, które zaciemniało płytę fotograficzną.



Na początku XX wieku wyodrębniono 3 rodzaje promieniowania:

- α - jądra helu ($2p2n$)
- β - elektrony
 β^+ - pozytony
- γ - fotony

Badania z użyciem źródeł promieniotwórczych doprowadziły do wielu ważnych odkryć (np. odkrycie jądra atomowego)

Podstawową wadą źródeł promieniotwórczych była mała energia emitowanych cząstek.

Promieniowanie kosmiczne

Początkowo uważane było za przejaw naturalnej promieniotwórczości Ziemi.

Dopiero w 1912 roku Victor Hess pokazał, że obserwowane cząstki pochodzą z kosmosu.

Pierwotne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską

Skład (pomijając neutrina):

- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- cięższe jądra $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$

Taki jak "skład Wszechświata"...



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

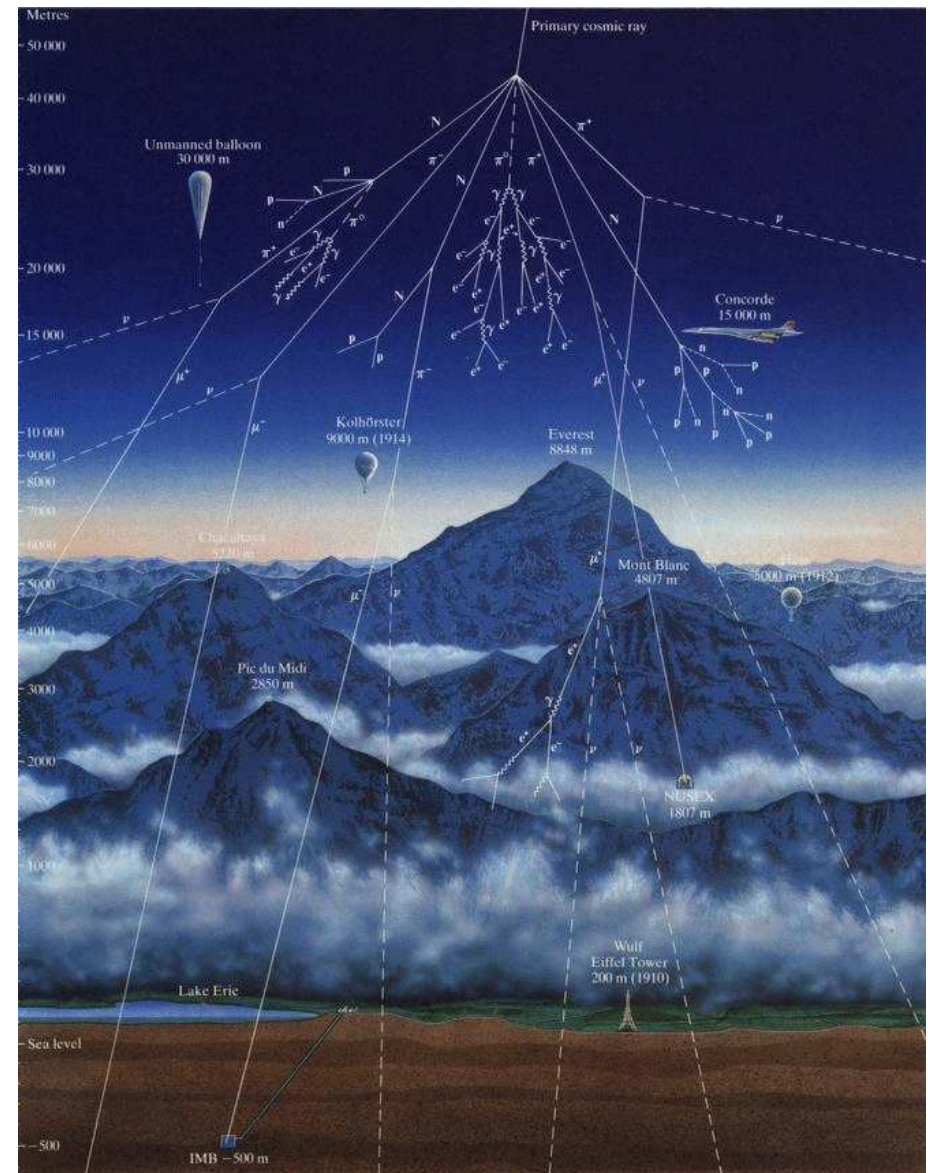
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony** i **kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

Docierają do **powierzchni Ziemi**

- miony $\mu^{\pm} \sim 70\%$
- elektrony $e^{\pm} \sim 25\%$
- protony, piony $\pi^{\pm} \sim 3\%$

Łącznie około 180 na $m^2 \cdot s$

Nie licząc bardzo licznych neutron...



Promieniowanie kosmiczne

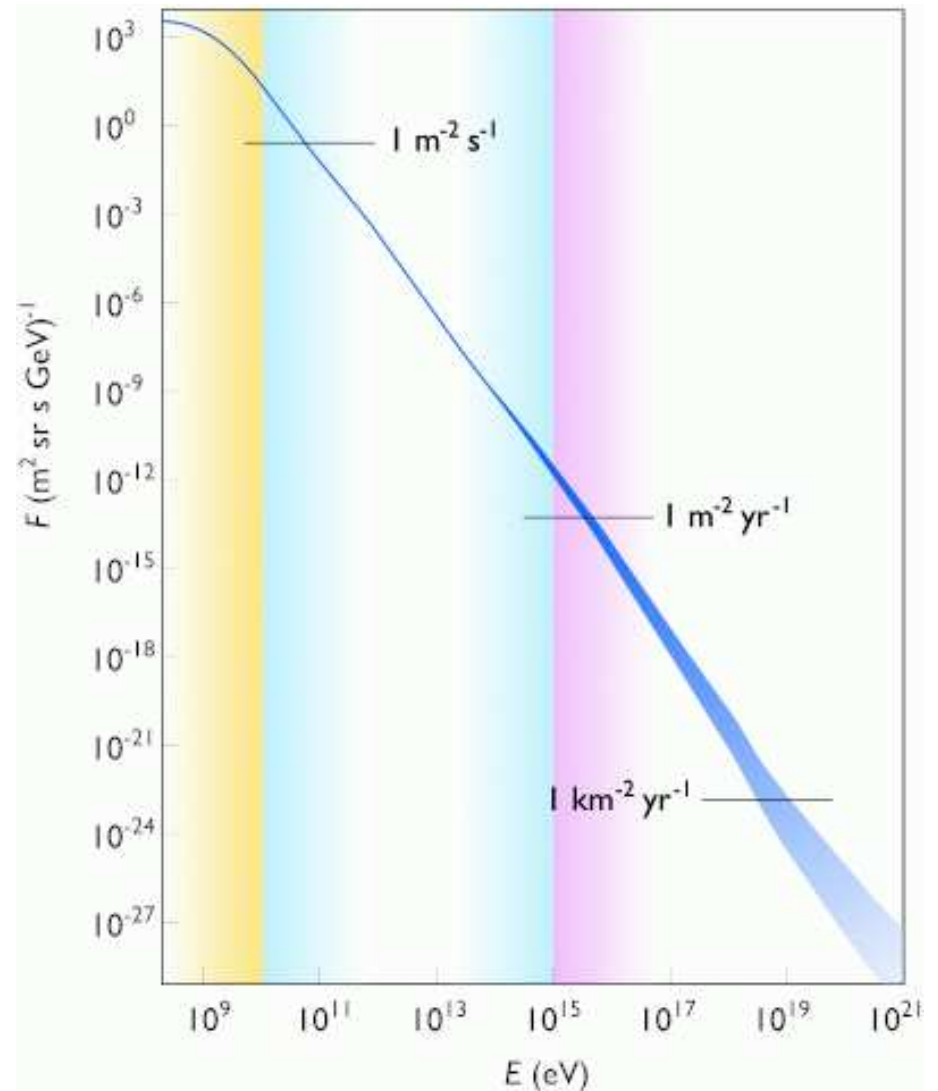
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.

Okazuje się, że przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do $5 \cdot 10^{19} \text{ eV} \sim 10 \text{ J}$ (!!!).

Niestety cząstek o najwyższych energiach jest ich bardzo mało...

Wciąż nie rozumiemy skąd to promieniowanie pochodzi i jak może powstawać...



Akceleratory

Dlaczego je budujemy?

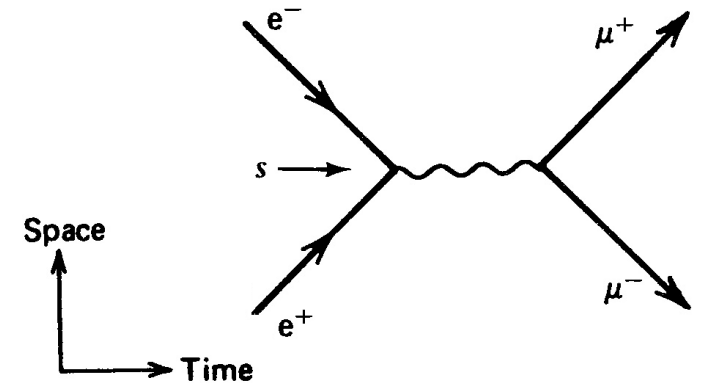
Chcielibyśmy badać oddziaływania cząstek w dobrze kontrolowanych warunkach: znać rodzaj zderzającej się cząstki, jej energię i dokładny moment zderzenia.

Wiemy też, że oddziaływania cząstek zależą od ich energii.

Przykład - **anihilacja** e^+e^- :



Aby wyprodukować nowe cząstki musimy spełnić zasadę zachowania energii - dostarczyć energię wystarczającą do nadania im masy.



Im wyższa masa cząstki, którą chcemy wyprodukować, tym większa musi być energia zderzających się cząstek.

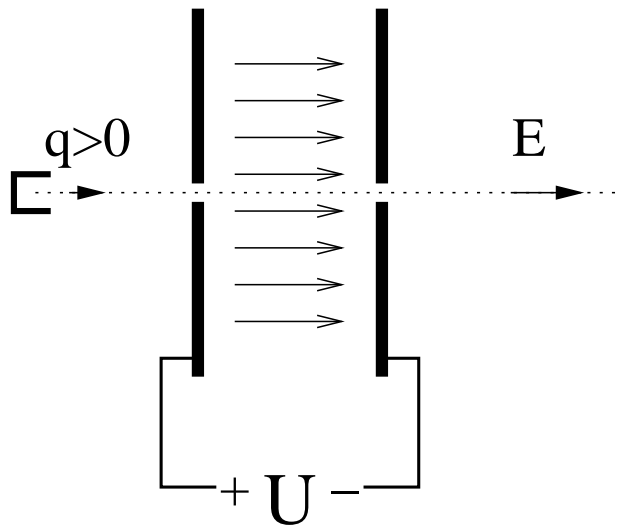
Akceleratory

Akceleratory elektrostatyczne

W 1919 roku Rutherford wskazał na korzyści z przyspieszania cząstek.

Najprostszym akceleratorem cząstek jest pole elektrostatyczne:

np. kondensator



Problemem jest uzyskanie odpowiednio wysokiej różnicy napięć:

- ⇒ generator [Cockrofta-Waltona](#) (1932): 750 kV
- ⇒ generator [Van de Graaffa](#) (1931): 1.5 MV

W pewnych dziedzinach wciąż używane

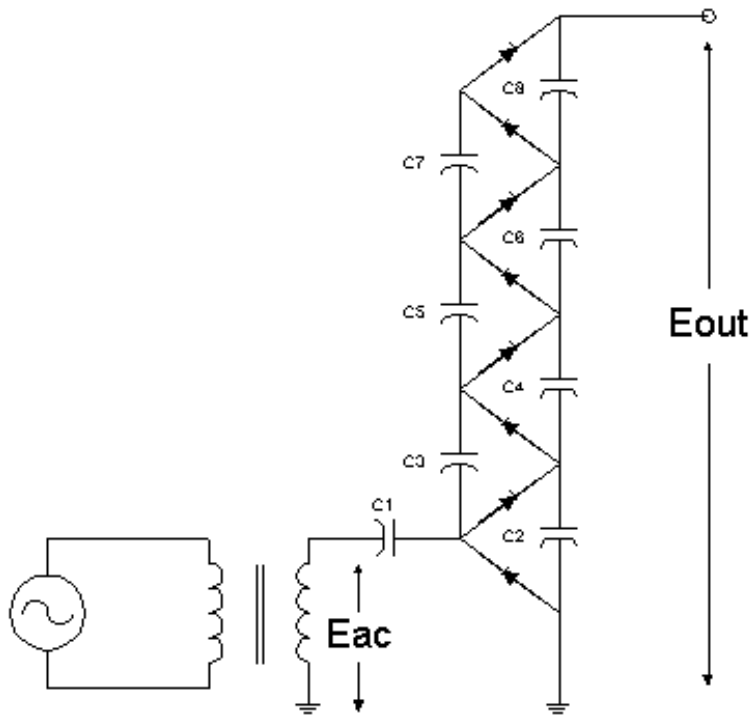
Uzyskiwana energia:

$$E = E_0 + U \cdot q$$

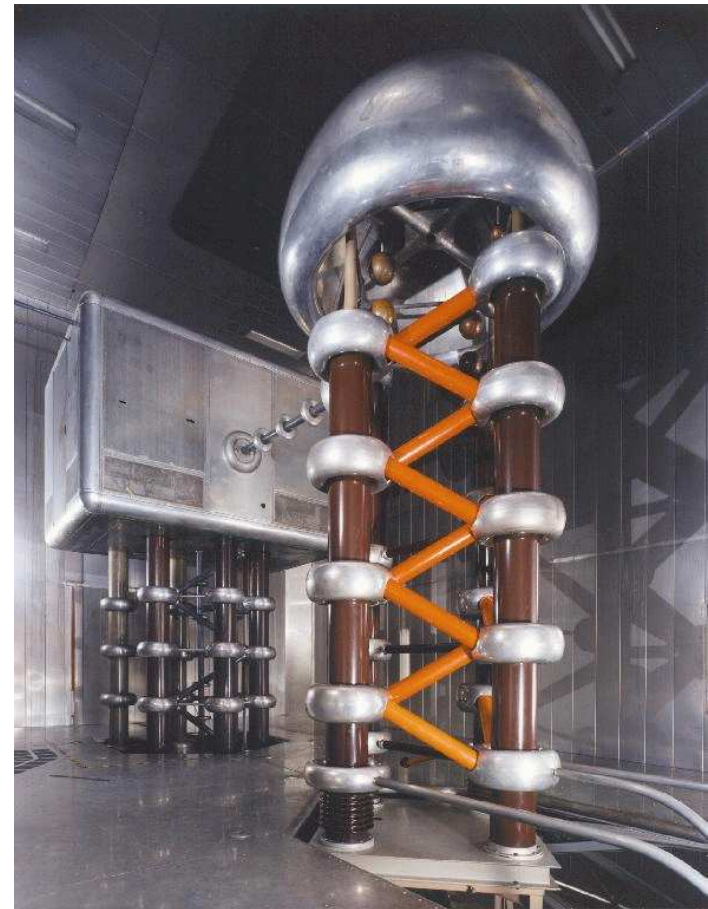
Akceleratory

Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



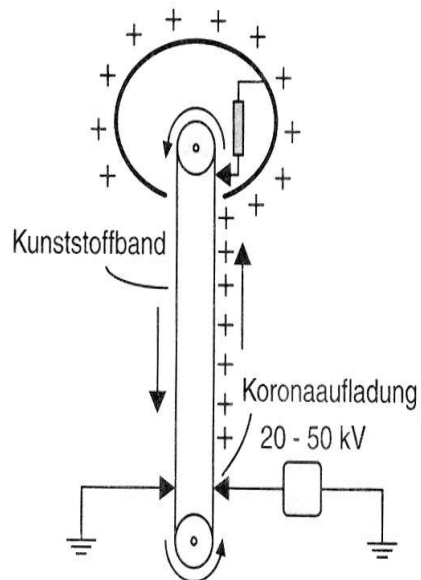
Współczesne urządzenie



Akceleratory

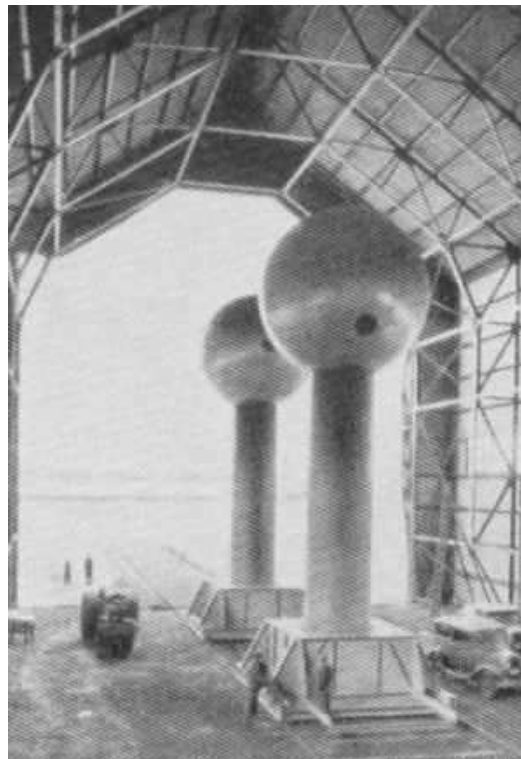
Generator Van de Graaffa

Schemat



Van-de-Graaff-Generator

Historia



Współczesne urządzenie



Obecnie różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 30 MV

$$\Rightarrow E \sim 30 \text{ MeV}$$

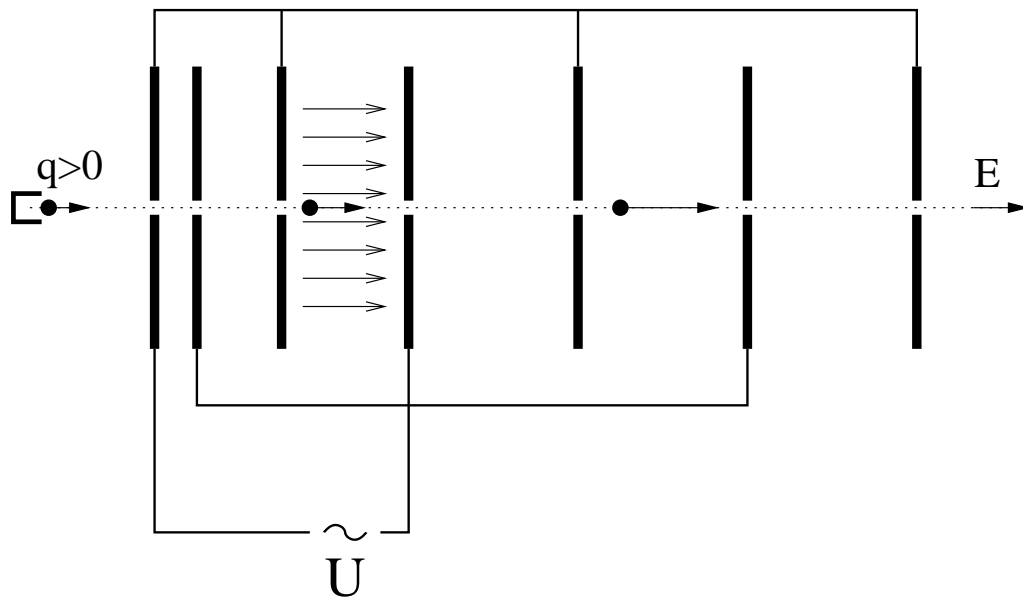
\Rightarrow **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

Akceleratory

Akcelerator liniowy

Idea: **Gustav Ising 1924**. Pierwsze urządzenia: **Rolf Wideroe 1927**, Lawrence 1931.

Cząstka przechodzi przez kolejne “kondensatory”



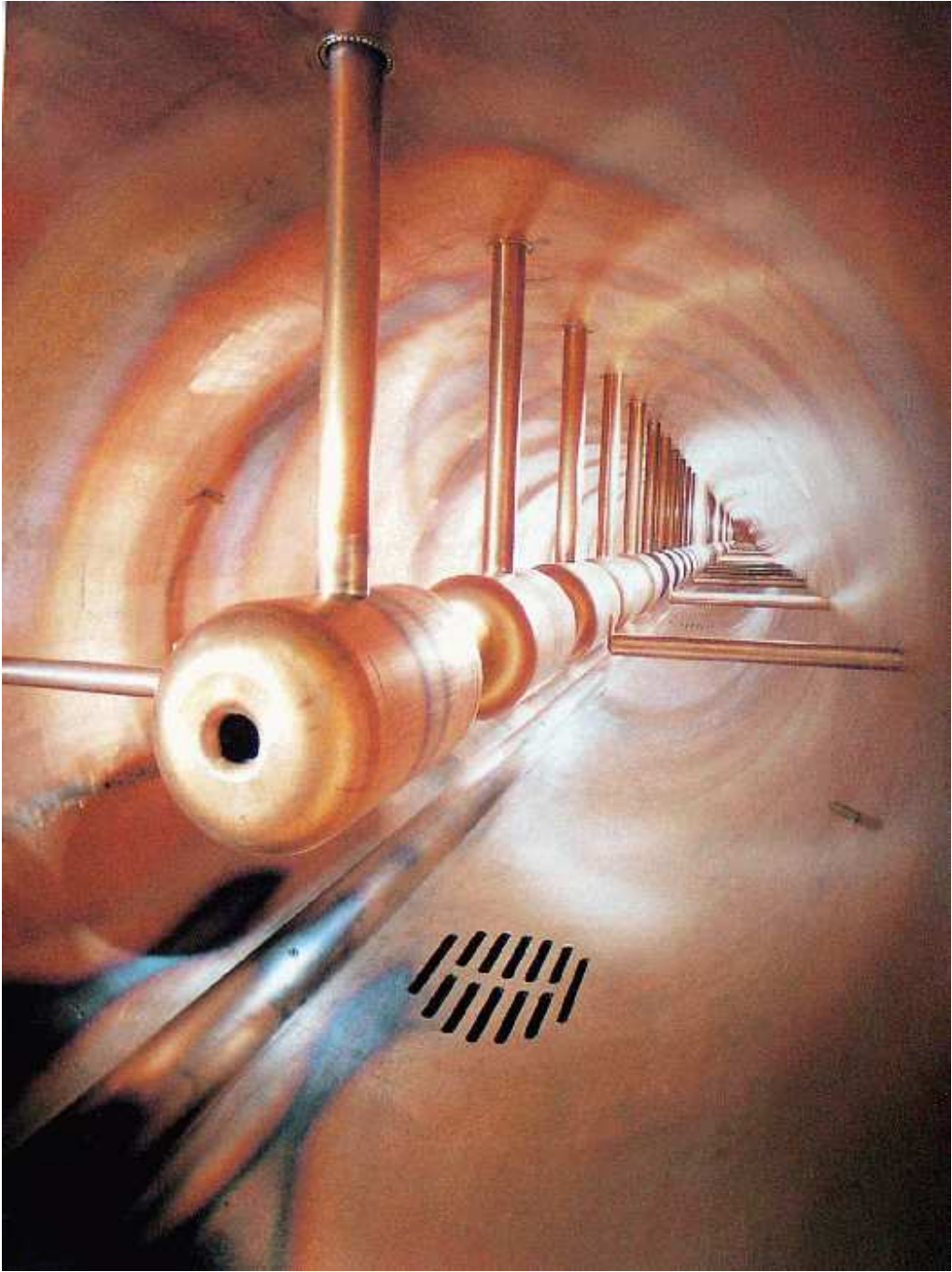
Przy odpowiednim dobraniu długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

Częstość jest zazwyczaj stała. Długości kolejnych elementów rosną proporcjonalnie do prędkości cząstki.

Dla $E \gg m$, prędkość $\beta \rightarrow 1$: $L = \text{const.}$

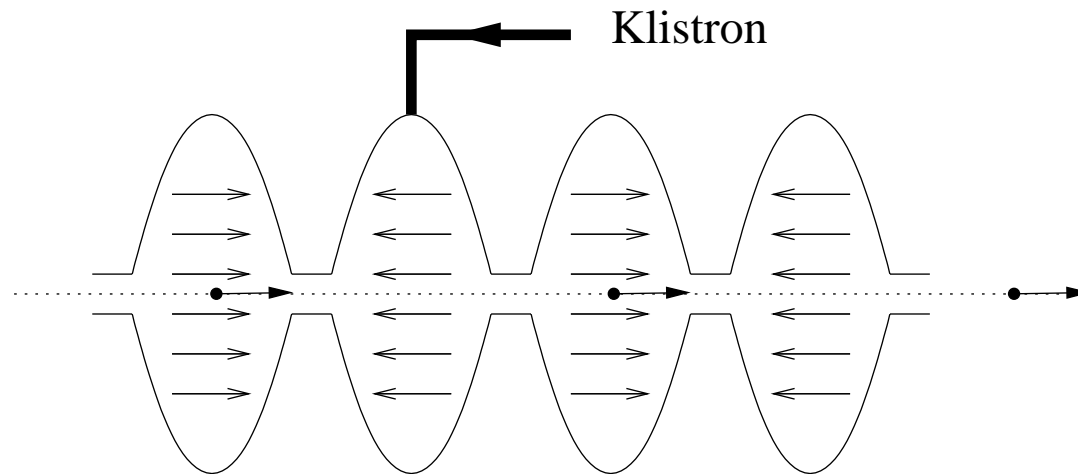
Liniowy akcelerator protonów
w ośrodku Fermilab (USA)



Akceleratory

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy tzw. wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

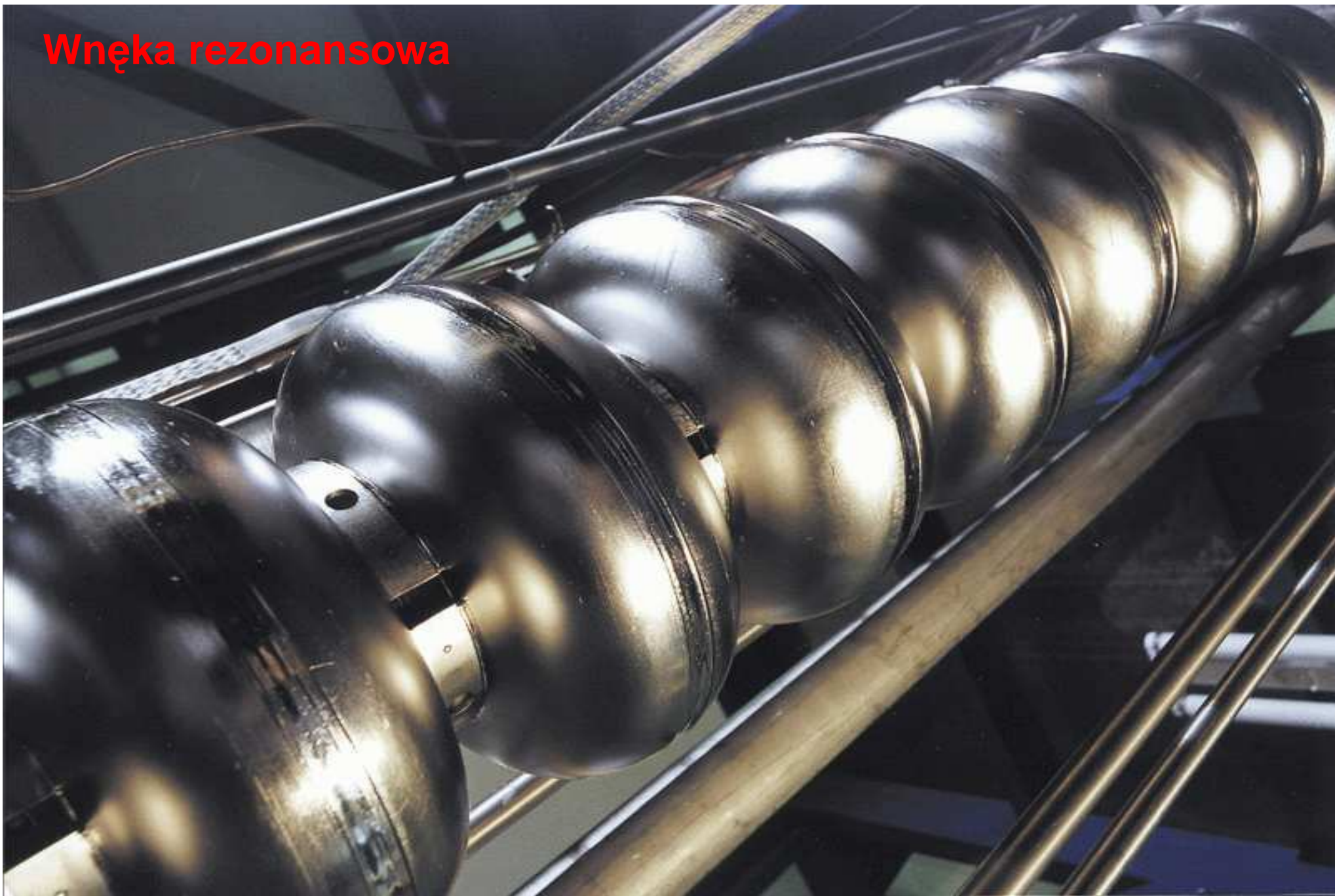
Długość fali/wnęki jest tak dobrana, że cząstka zawsze trafia na pole przyspieszające.

Częstości rzędu 1 GHz - mikrofałe.

Wnęki rezonansowe pozwalają uzyskiwać natężenia pola rzędu 10 MV/m

⇒ dla uzyskania energii 1 GeV potrzebny jest akcelerator liniowy o długości ~ 100 m

Wnęka rezonansowa



Akceleratory

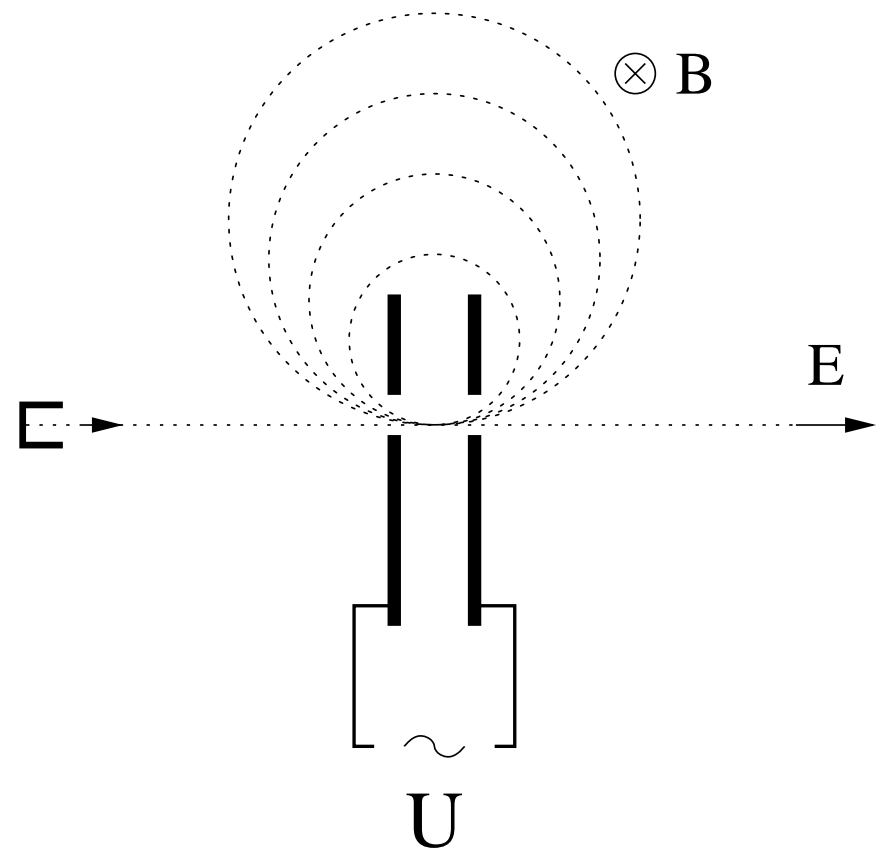
Akcelerator kołowy

Zamiast używać wielu wnęk możemy wykorzystać pole magnetyczne do “zapętlenia” cząstki.

Cząstki mogą przechodzić przez wnękę przyspieszającą wiele razy...

Pierwszy tego typu akcelerator (**cyklotron**) zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence

Schemat poglądowy:



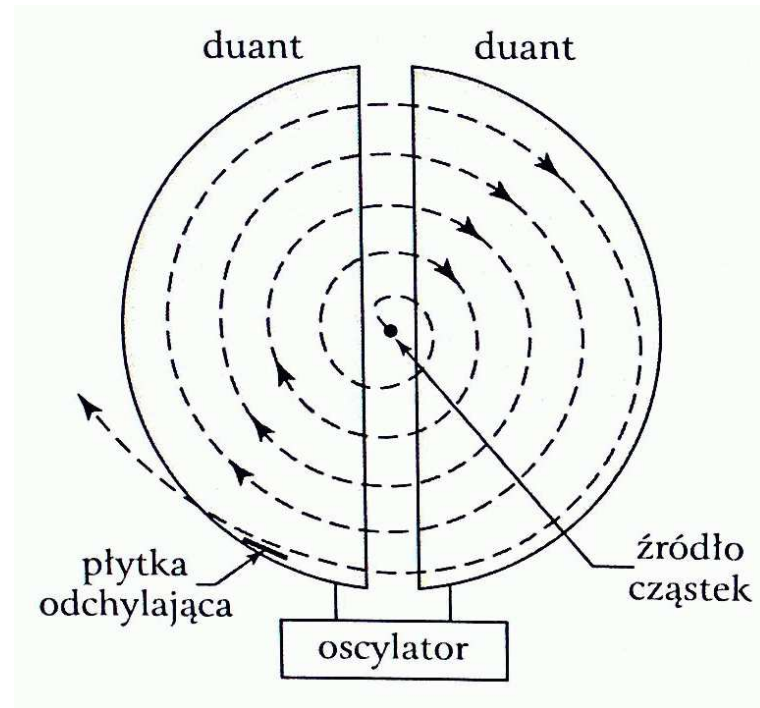
Akceleratory

Cyklotron

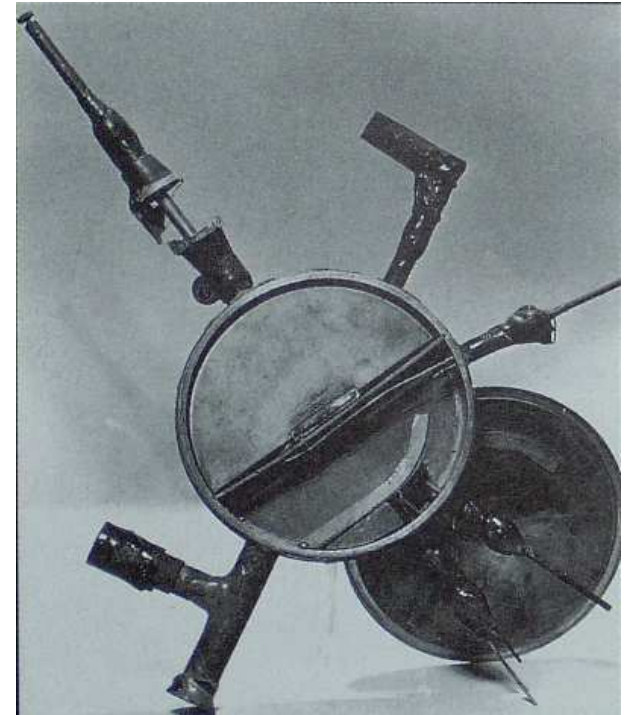
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



Akceleratory

Synchrotron

1955

Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie



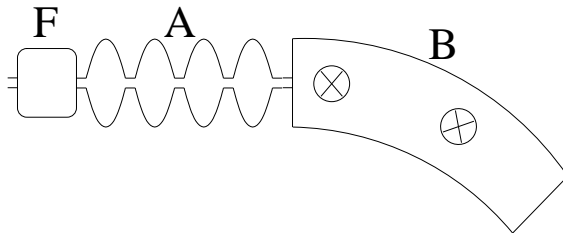
Akceleratory

Akcelerator kołowy

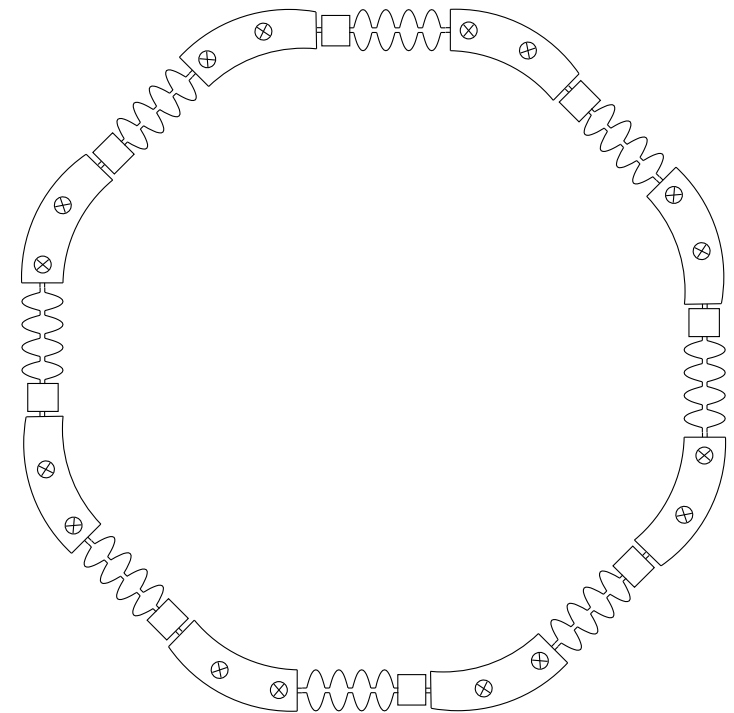
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

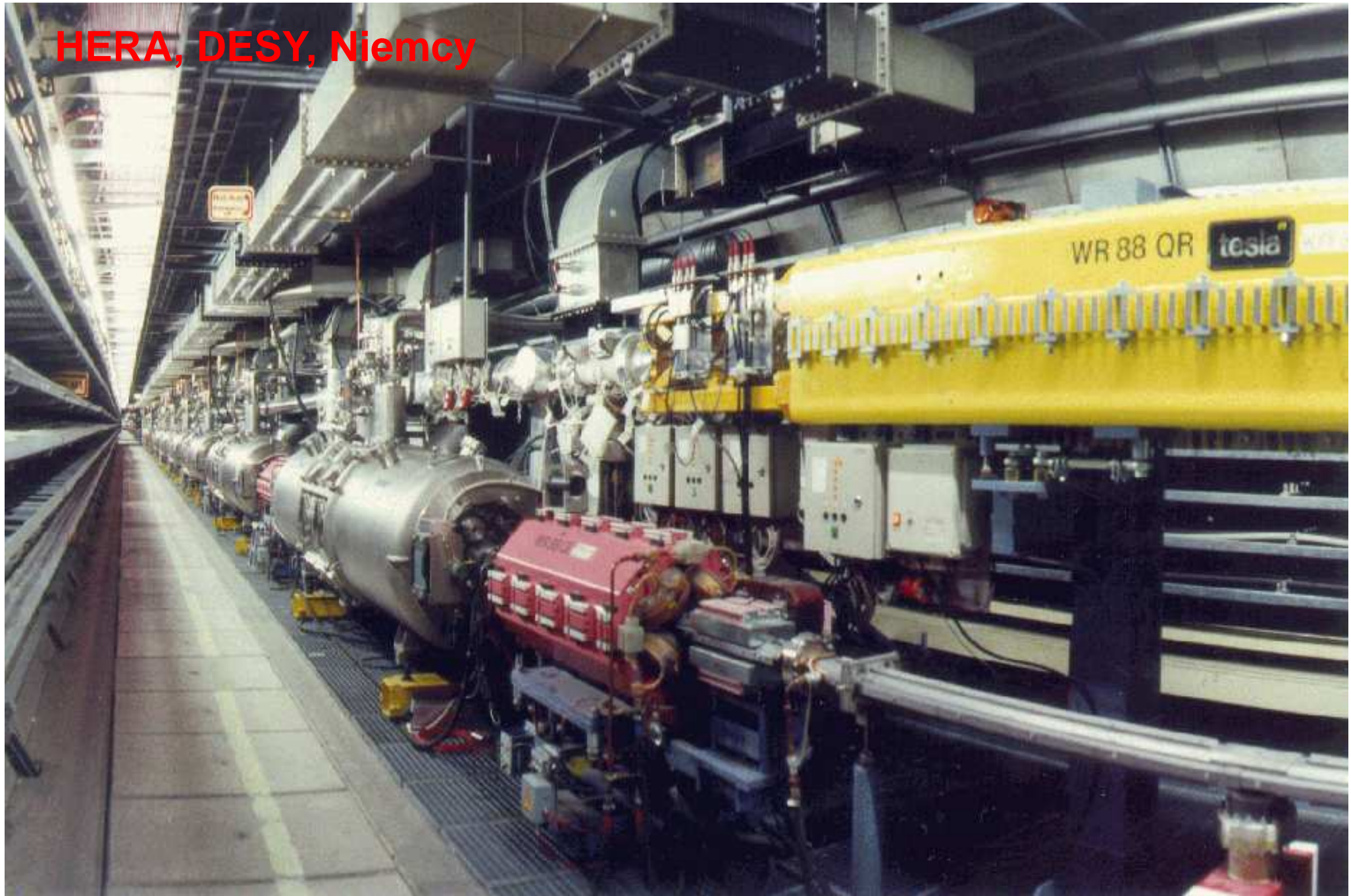
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



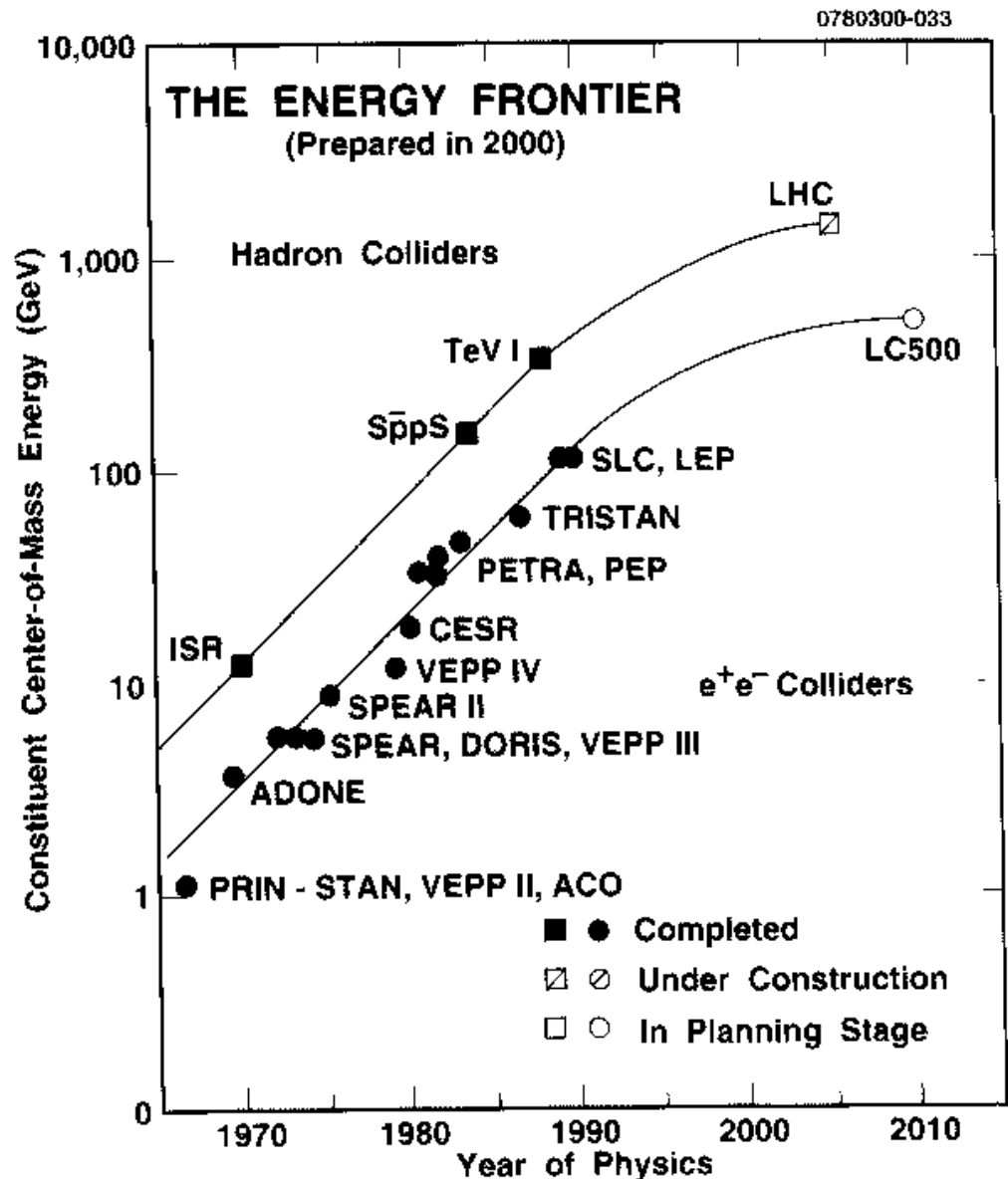
HERA, DESY, Niemcy



Akceleratory

Kolejne etapy w rozwoju fizyki cząstek są nierozdzielnie związane z budową nowych akceleratorów, o coraz wyższych energiach.

Niestety, mechanizm przyspieszania cząstek pozostał niezmienny - akceleratory muszą być coraz większe i coraz... kosztowniejsze.



Akceleratory

Największe akceleratory

Badania fizyki cząstek z wykorzystaniem akceleratorów koncentrują się w kilku dużych ośrodkach na całym świecie:

- **CERN** w Genewie (LEP, SPS, LHC)
- **DESY** w Hamburgu (HERA)
- **Fermilab** pod Chicago (Tevatron)
- **SLAC** w Stanford, Kalifornia (SLC)
- **KEK** w Japoni

Akceleratory

LEP/LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator LHC.

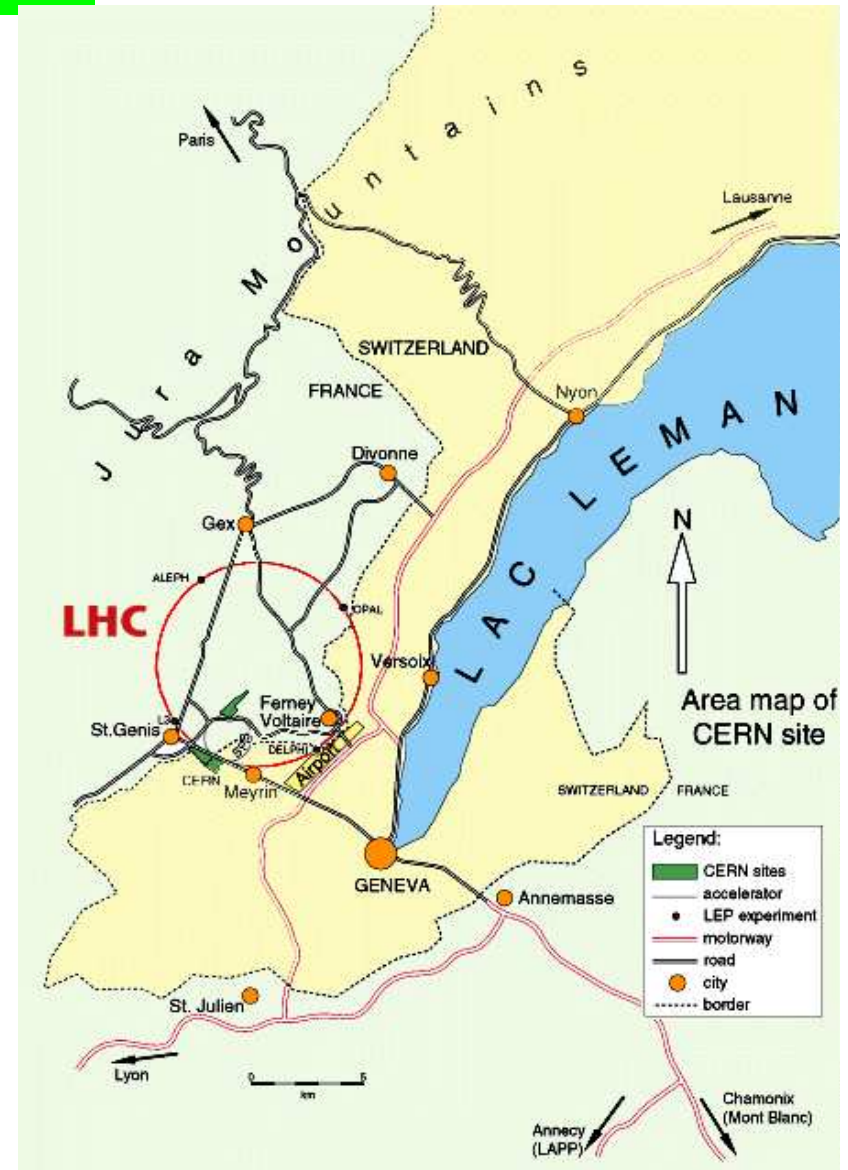
Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 7 TeV.

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

Energia jednej paczki: $\sim 10^5$ J

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

Całkowita zgromadzona energia: $\sim 6 \cdot 10^8$ J



LHC, CERN, Genewa



DESY, Hamburg



Tevatron, Fermilab, USA



SLAC Stanford, USA



KEK Japonia



Akceleratory

Ograniczenia

Aby uzyskiwać coraz wyższe energie zderzających się wiązek musimy budować coraz większe i większe akceleratory...

Dlaczego !?

Co ogranicza energie uzyskiwane w akceleratorach ?

W przypadku kołowych akceleratorów protonów \Rightarrow **pole magnetyczne**

Pole magnetyczne musi rosnać wraz ze wzrostem energii wiązki, aby utrzymywać cząstki wewnątrz rury akceleratora. W praktyce jednak nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż $B_{max} \sim 10$ T.

W przypadku akceleratorów kołowych e^\pm : \Rightarrow **przyspieszające pole elektryczne**

Elektrony krążące po orbicie tracą energie na **promieniowanie hamowania**.

Energia którą możemy **dostarczyć** jest proporcjonalna do obwodu akceleratora i średniego pola przyspieszającego jakie potrafimy wytworzyć.

Projekt akceleratora
kołowego e^+e^-
o energii 1000 GeV

“LEP 1000”
2 TeV in Center-of-Mass
Diameter \approx 900 km
Linear Collider at 50 MeV/m
Length = 40 km $\rightarrow\leftarrow$

**Why LEP 1000 gave
way to the idea of
linear colliders**



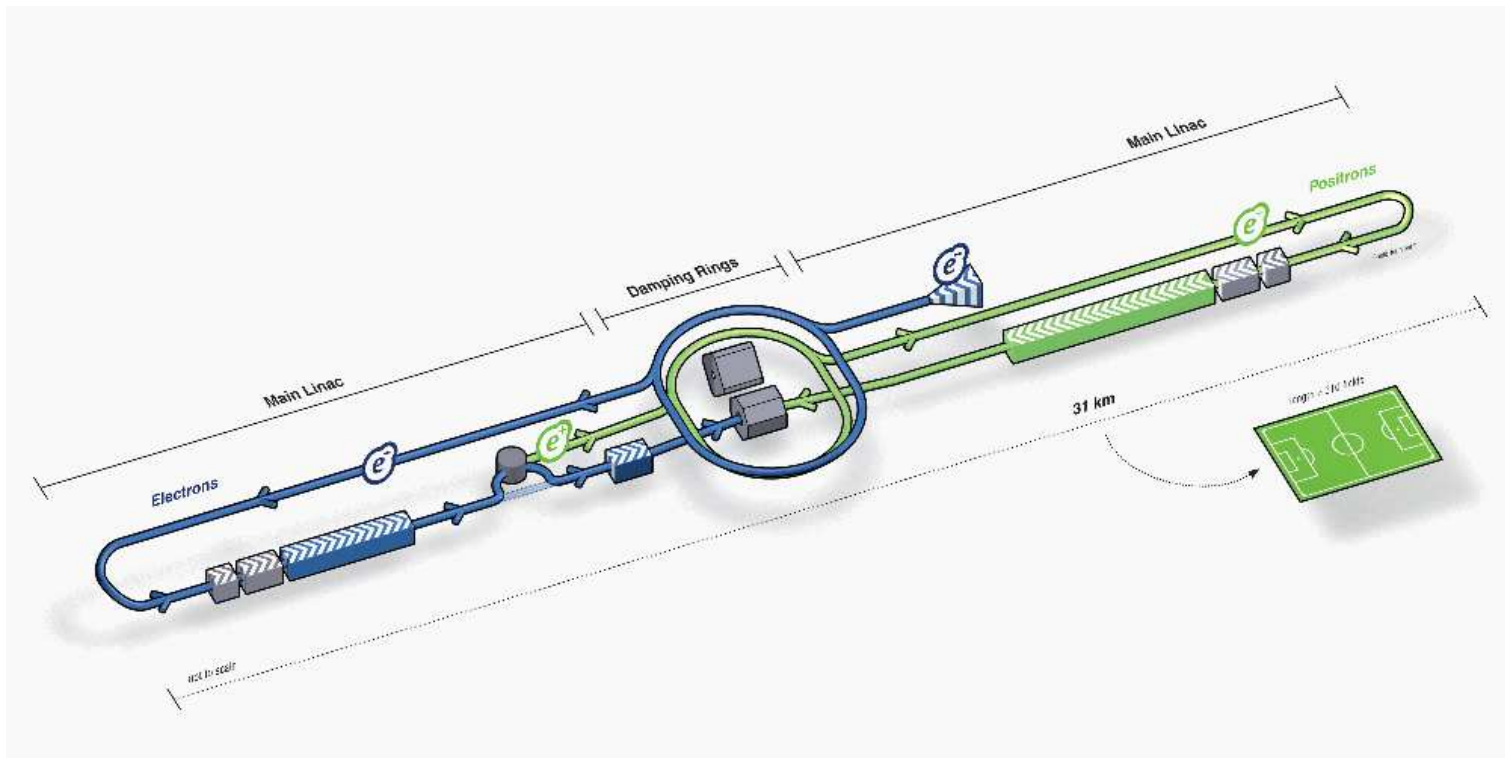
Akceleratory

ILC

Wszystko wskazuje na to, że LHC będzie ostatnim akceleratorem kołowym.

Kolejnym będzie prawdopodobnie **akcelerator liniowy e^+e^-**

ILC - International Linear Collider



Kolajdery

Większość budowanych obecnie akceleratorów to "kolajdery". Jeden/dwa akceleratory przyspieszające a następnie zderzające ze sobą cząstki z dwóch przeciwbieżnych wiązek. W ten sposób uzyskujemy dużo wyższą "energię dostępną":

$$E = \sqrt{4E_1E_2} \quad \text{dla wiązek przeciwbieżnych}$$

$$E = \sqrt{2E_1m_2} \quad \text{dla zderzenia cząstki wiązki ze spoczywającą cząstką ("tarczą")}$$

Jest jednak wysoka "cena", która musimy zapłacić.

W przypadku zderzeń wiązki z tarczą praktycznie wszystkie cząstki oddziałują.

W przypadku wiązek przeciwbieżnych jedynie nieliczne - bardzo trudno jest uzyskać odpowiednią częstość zderzeń.

Kolajdery

Świelność

Świelność \mathcal{L} określa liczbę reakcji zachodzących w jednostce czasu.

Wraz ze wzrostem energii zderzenia potrzebujemy coraz większych świelności!

Świelność zależy od:

- częstości przecięć wiązek (liczby paczek/pulsów)
- liczby cząstek w paczce
- poprzecznych rozmiarów wiązki

Problem zwłaszcza w akceleratorach liniowych: po jednym “przecięciu” wiązka tracona

⇒ konieczne jest uzyskanie bardzo małych rozmiarów poprzecznych wiązek.

LEP: $\sigma_x \approx 300 \mu m$ $\sigma_y \approx 8 \mu m$

Proj. ILC: $\sigma_x \approx 0.5 \mu m$ $\sigma_y \approx 5 nm$ (!)

Wszechświat cząstek elementarnych

Wykłady 6: Współczesne eksperymenty

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Detekcja cząstek

- Przypomnienie
 - Podstawowe typy detektorów
 - Kolajdery cząstek
- Budowa detektora uniwersalnego (hybrydowego)
 - zasada budowy
 - przykładowe konstrukcje
- Zbieranie i analiza danych
 - układ wyzwiania
 - przechowywanie i analiza danych

Kolajdery

LEP/LHC

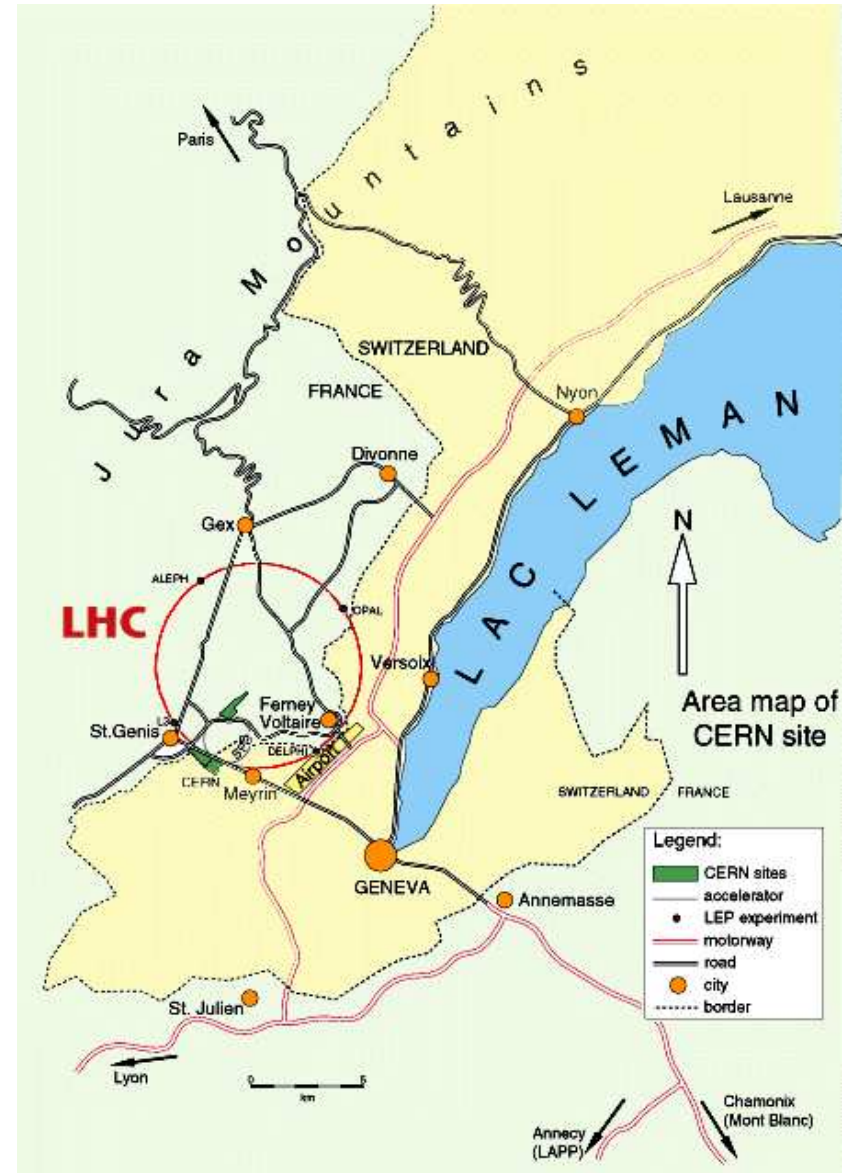
Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator LHC.

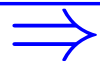
Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 7 TeV.

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

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



Kolajdery



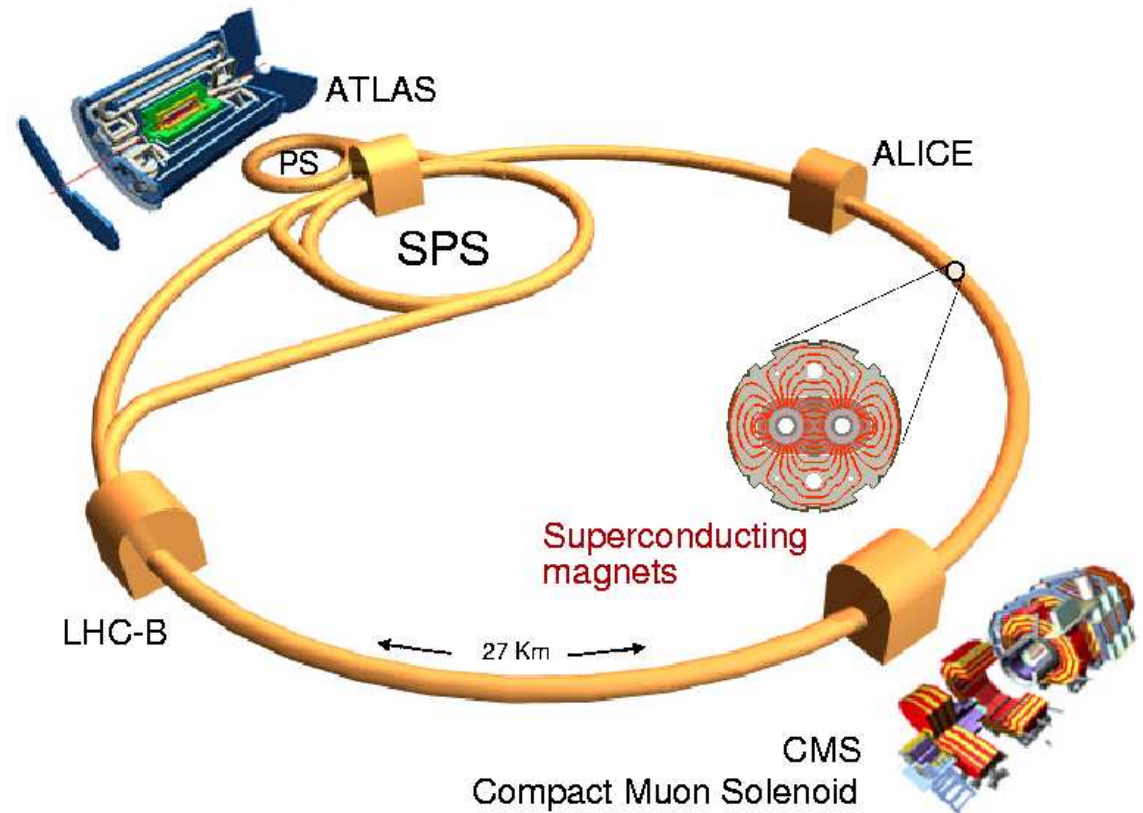
Kolajdery

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** cząstek Higgosa **na godzinę** !

Przypadków produkcji cząstki Higgosa będą poszukiwać dwa eksperymenty: **ATLAS** i **CMS**

The Large Hadron Collider (LHC)










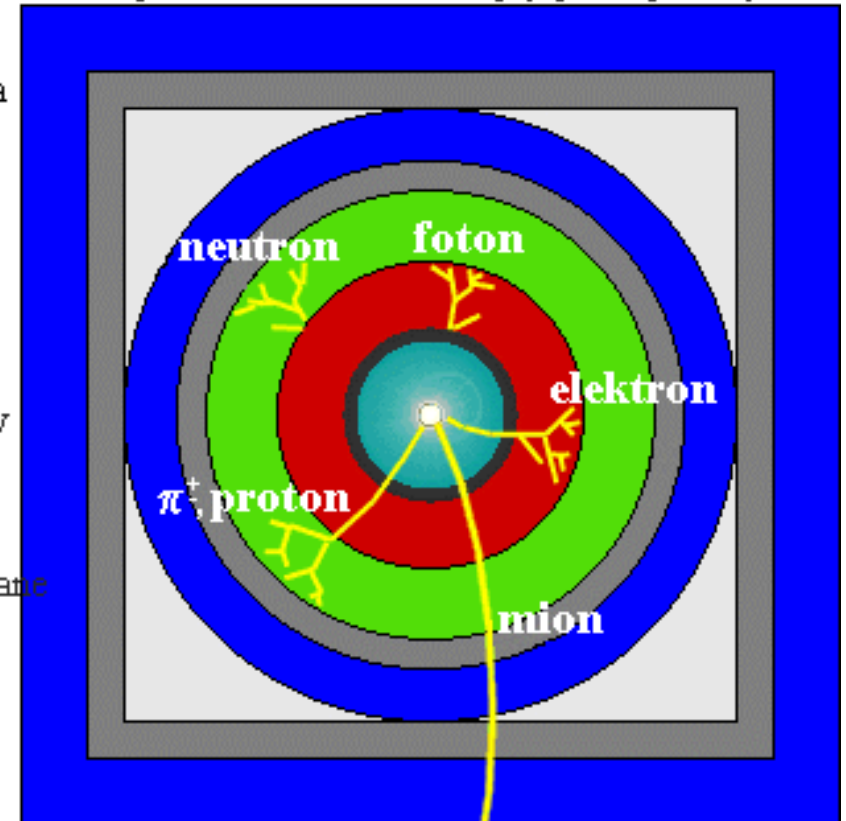
Współczesne eksperymenty

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.

Współczesne eksperymenty

Detektor uniwersalny

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

Kolejno od środka detektora:

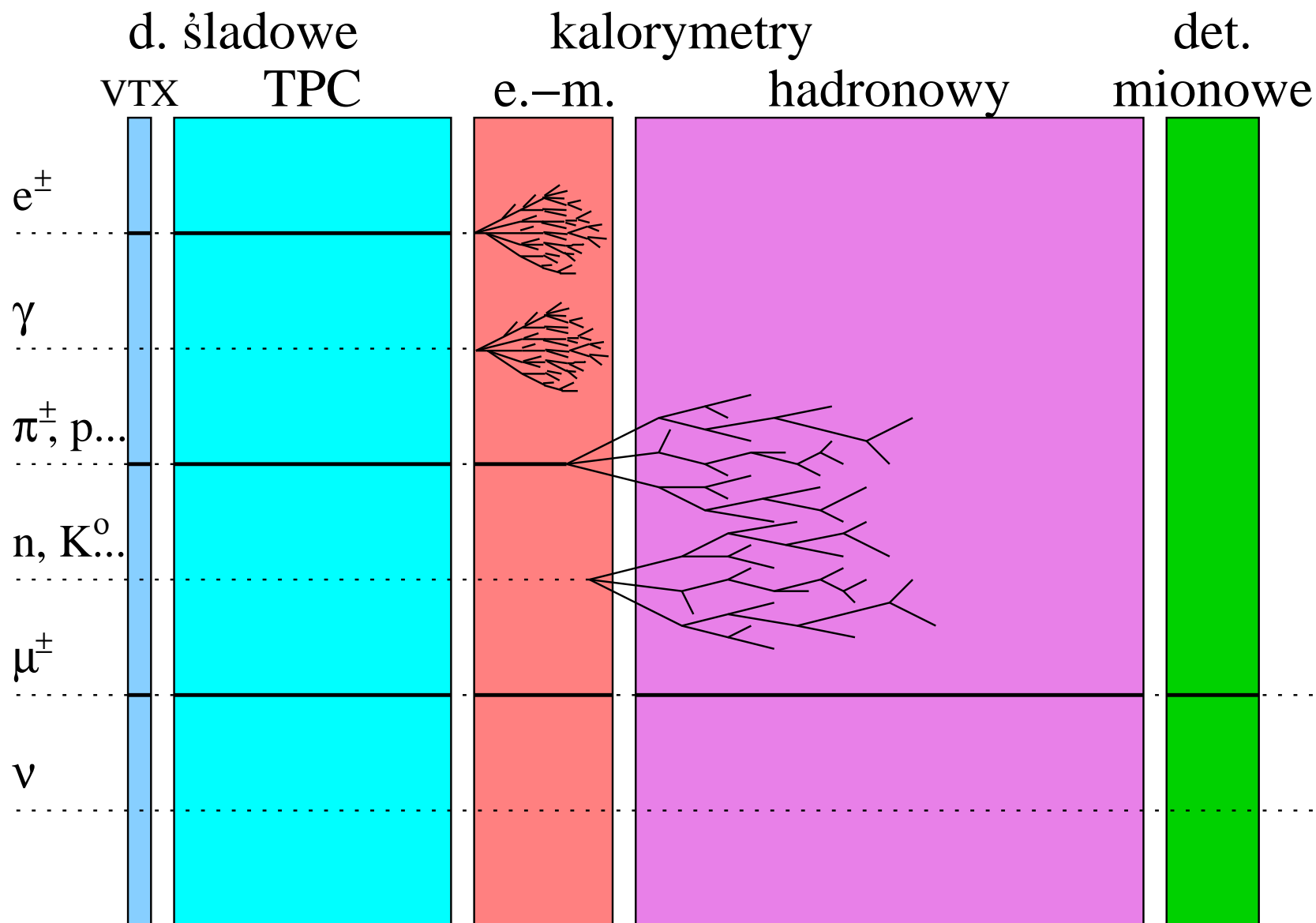
- detektor wierzchołka
jak najbliżej osi wiązki, określa gdzie zaszło zderzenie,
identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych
(tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów
cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym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

Współczesne eksperymenty

Detektor uniwersalny

- 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

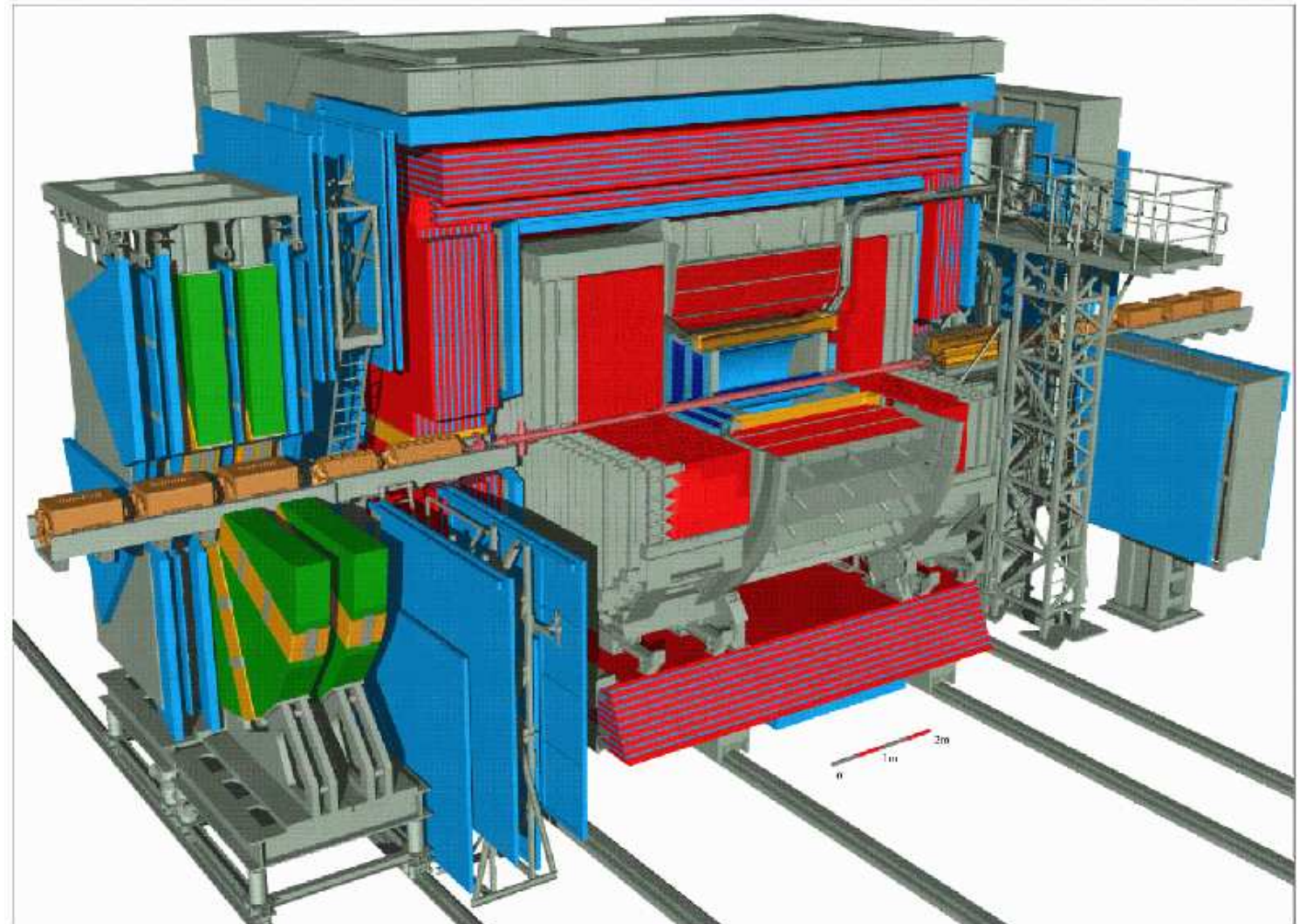
Współczesne eksperymenty



Współczesne eksperymenty

ZEUS

Detektor **ZEUS**,
 akcelerator
HERA,
 zderzenia wiązek
 przeciwbieżnych
 $e^\pm p$



ZEUS (HERA) 

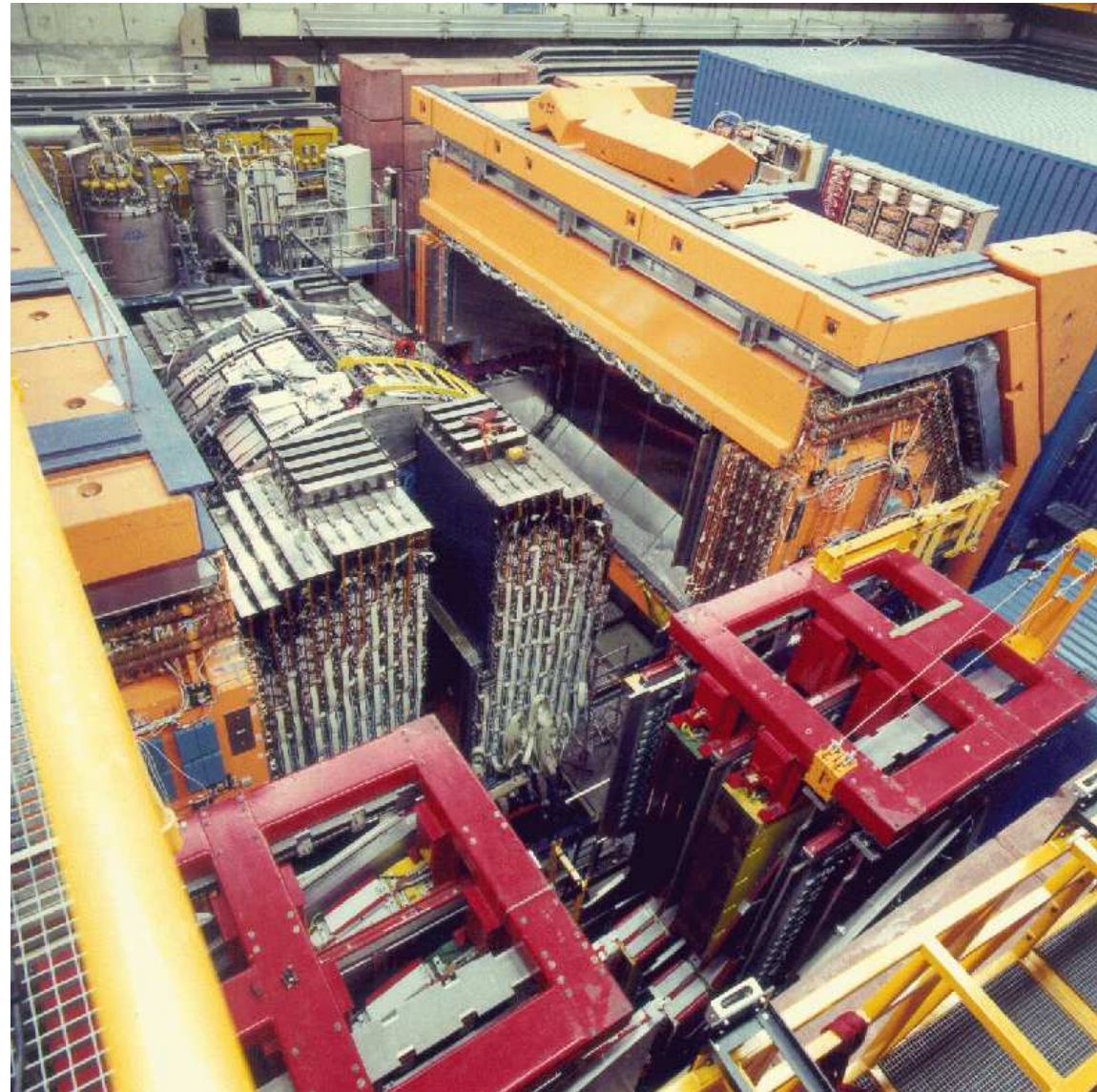
Software: SURC-IDEAS level V11
 Performed by: Caster Hartmann
 Status: October 1995



Współczesne eksperymenty

ZEUS

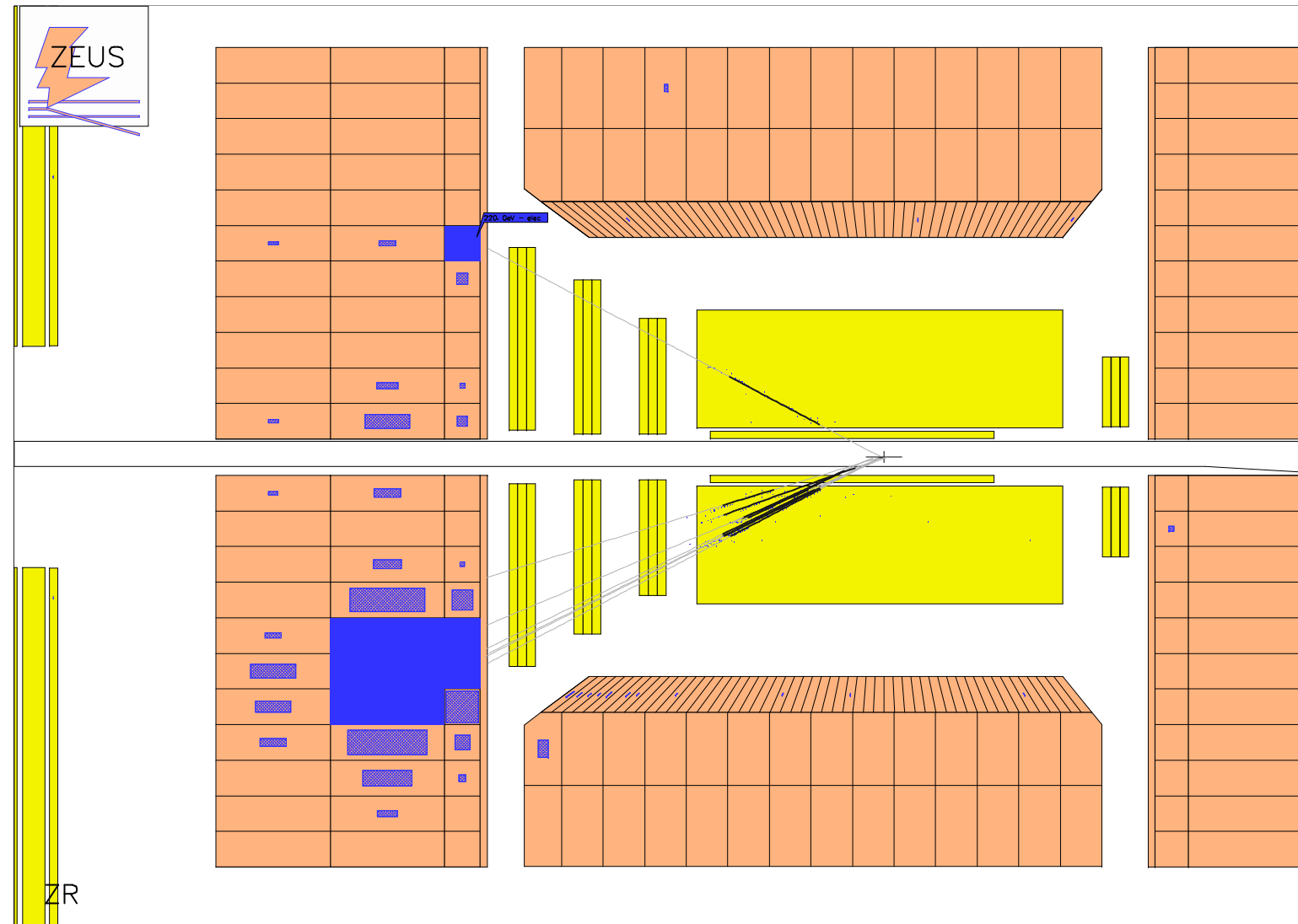
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Współczesne eksperymenty

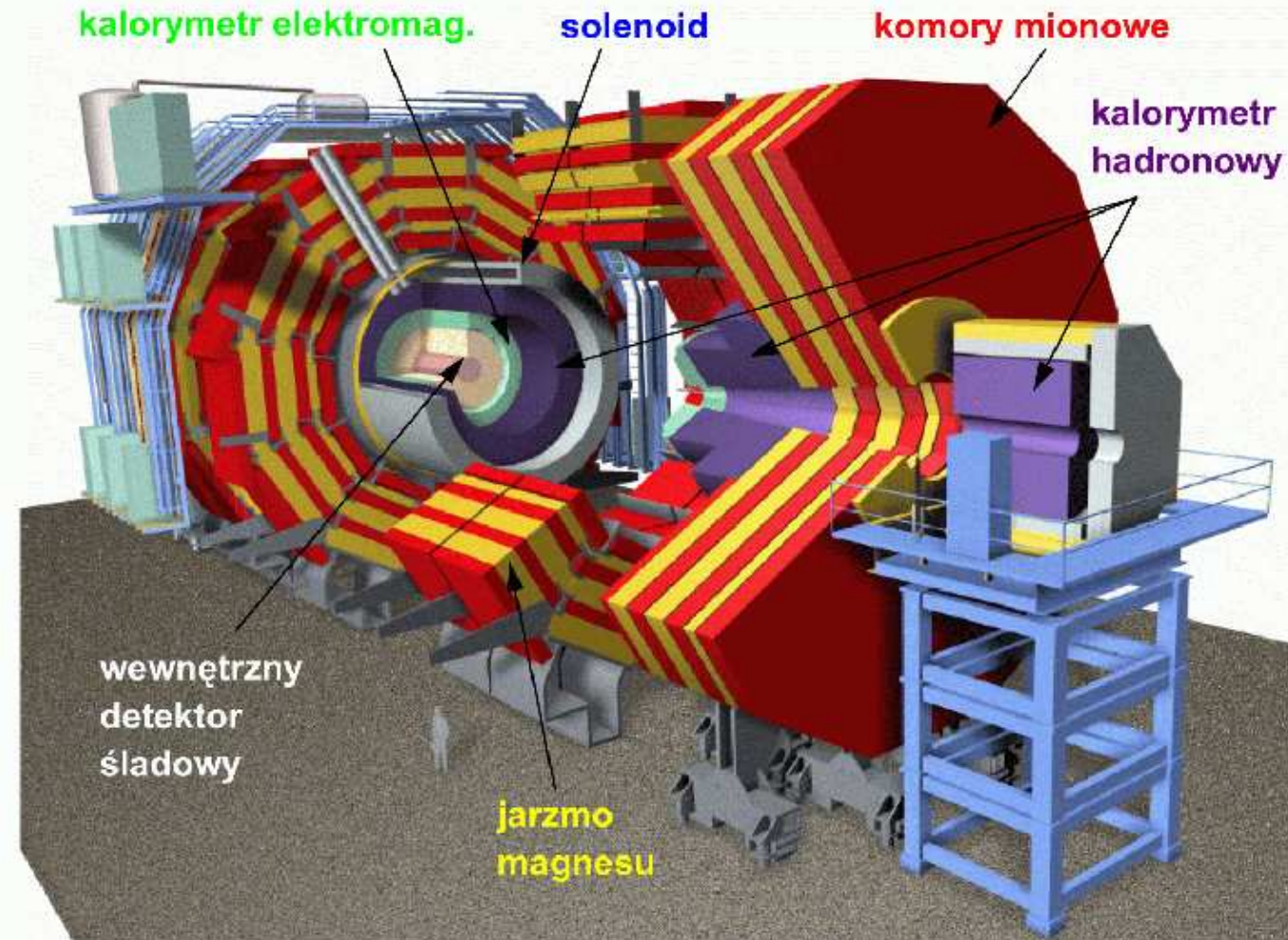
ZEUS

Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^\pm p$



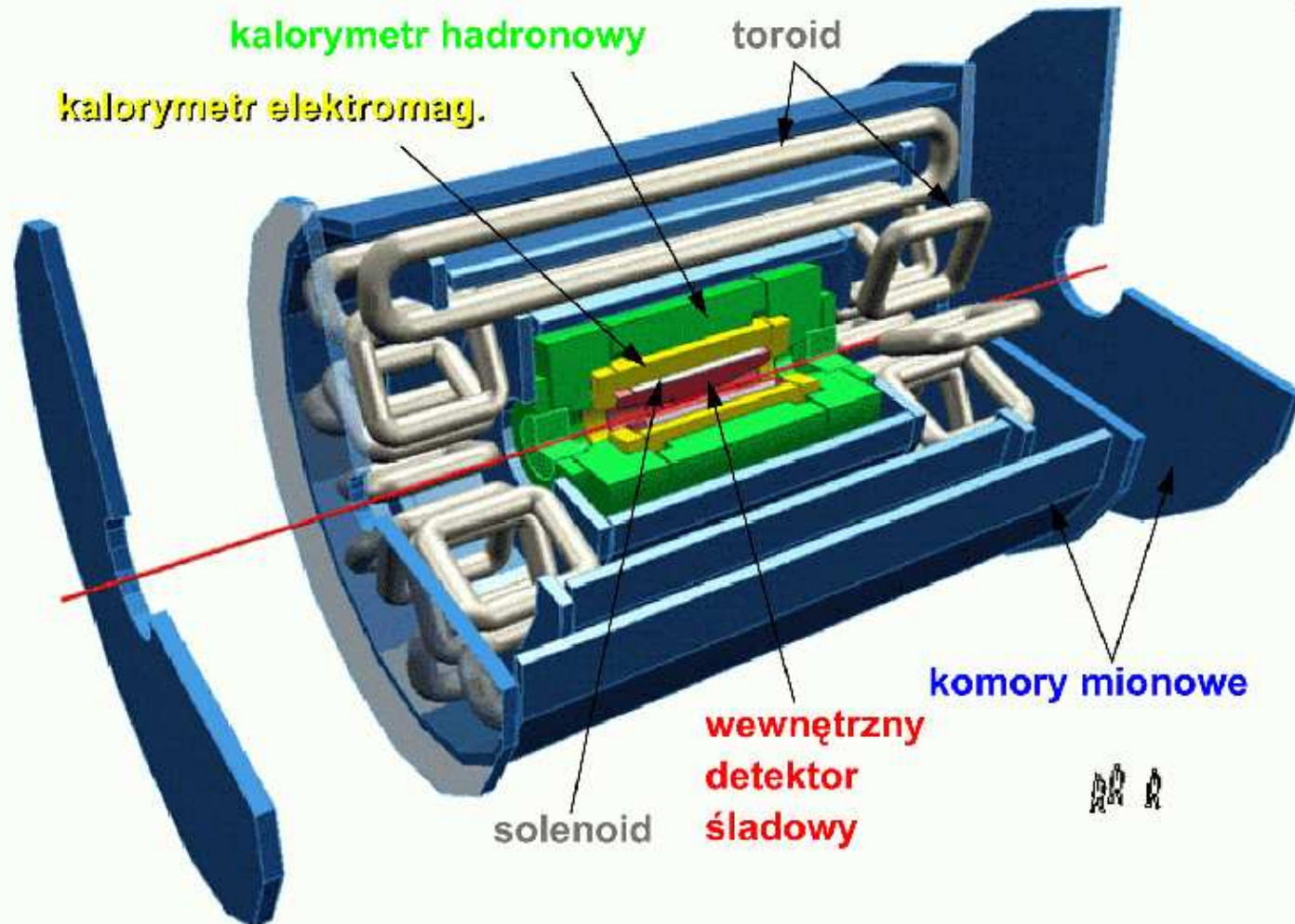
Współczesne eksperymenty

Compact Muon Solenoid



Współczesne eksperymenty

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



Stan przygotowań - ATLAS

23 luty 2008

UX15 Jura Sat Feb 23 14:00:02 2008

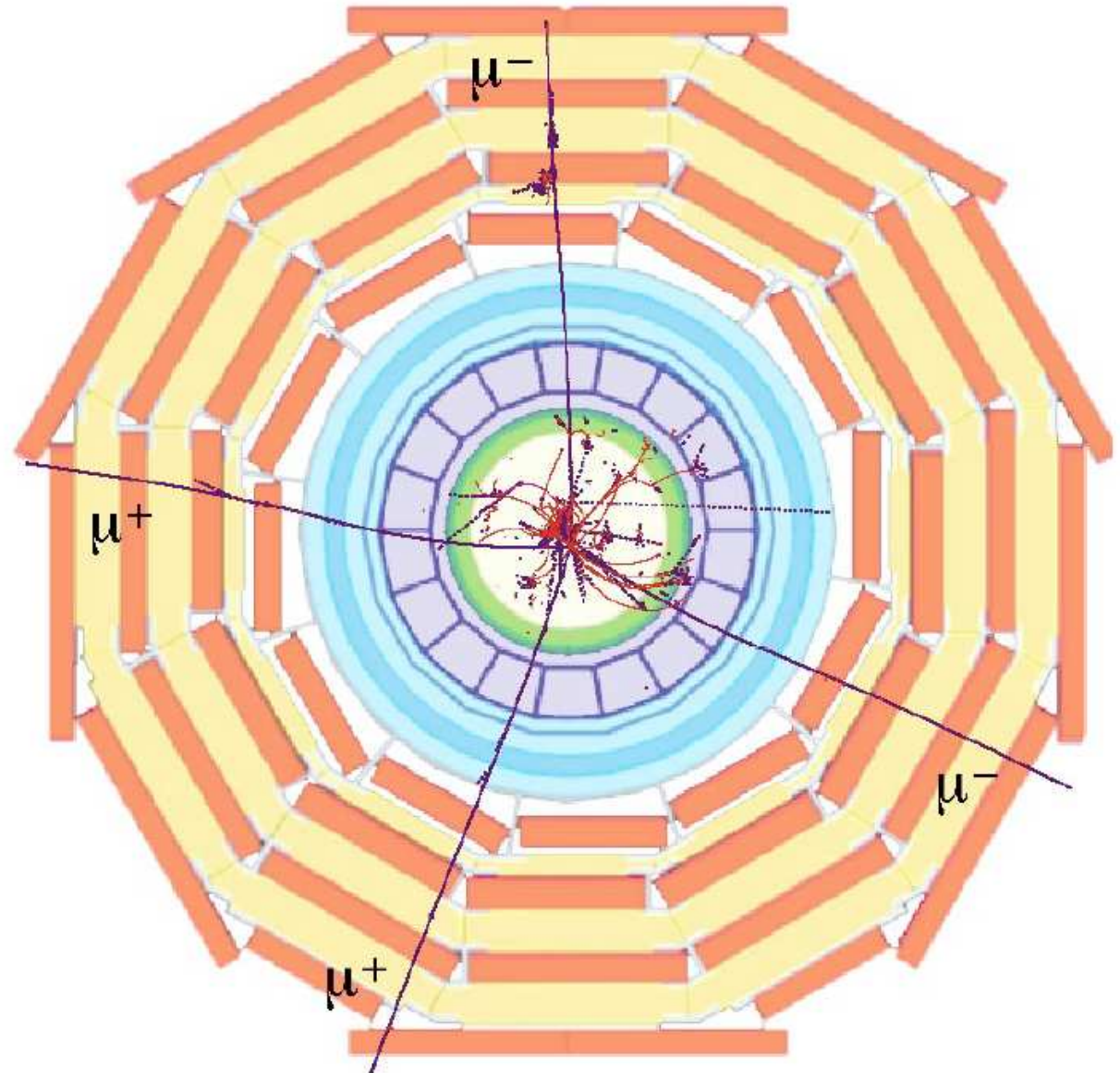


Współczesne eksperymenty

W detektorze CMS przy LHC mamy nadzieję zobaczyć takie przypadki:

Produkcja Bozonu Higgsa i rozpad

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



Współczesne eksperymenty

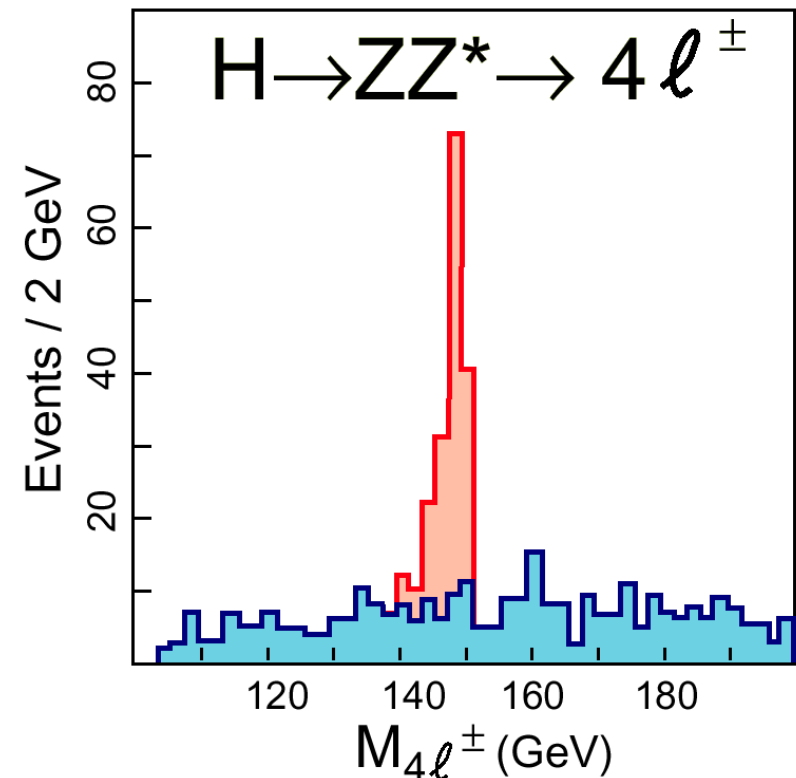
Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań w LHC.

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** (kalorymetr elektromagnetyczny, komory mionowe)

Ale wciąż nie będzie to łatwe zadanie!



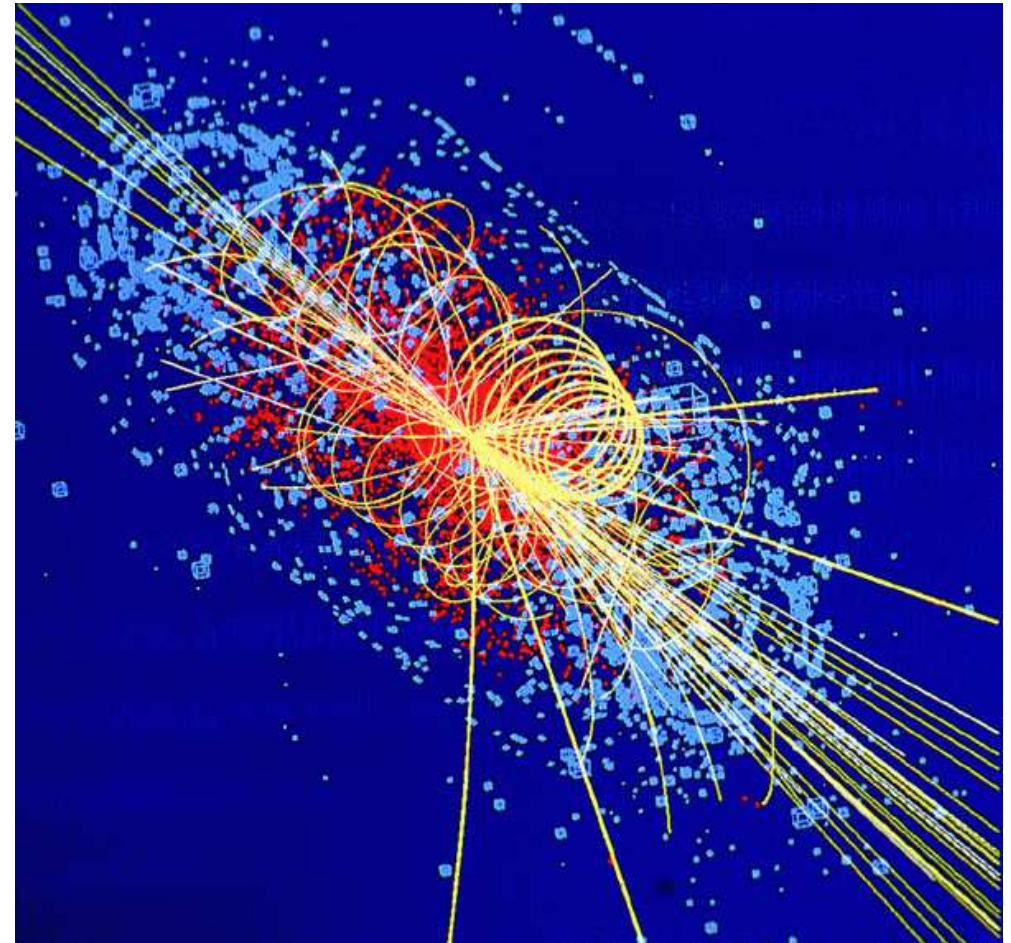
Współczesne eksperymenty

Przy każdym przecięciu paczek zderzać się będzie kilkadziesiąt par protonów.

W prawie każdym zderzeniu wyprodukowane będą nowe cząstki.

Koło miliarda oddziaływań na sekundę!

Jak wybrać te ciekawe?



Współczesne eksperymenty

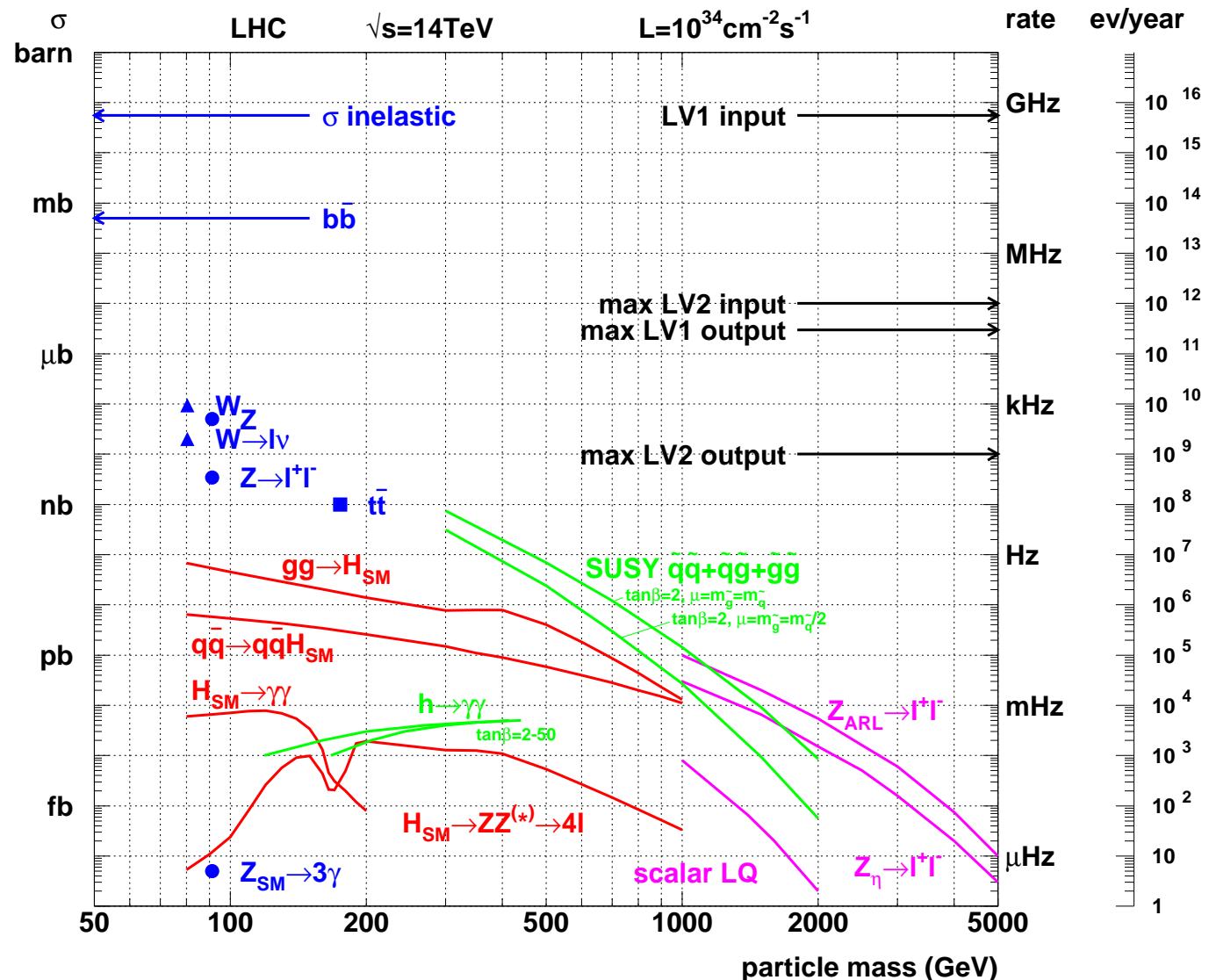
Układ wyzwalań

Sygnaly z detektora są na bieżąco "podglądane" przez dedykowane układy elektroniczne.

Tylko "ciekawe" sygnaly są czytane z detektora.

Te przypadki są dalej przepuszczane przez specjalne programy - "filtry", które mają odrzucać wszystkie śmieci.

Zapisujemy tylko to, co ma szansę być ciekawe!



Współczesne eksperymenty

Zbieranie i rekonstrukcja danych

Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

Ale do niedawna można to było trzymać w jednym miejscu...



Współczesne eksperymenty

Zbieranie i rekonstrukcja danych

Ilość zbieranych danych dawno przekroczyła możliwości pojedynczego komputera.

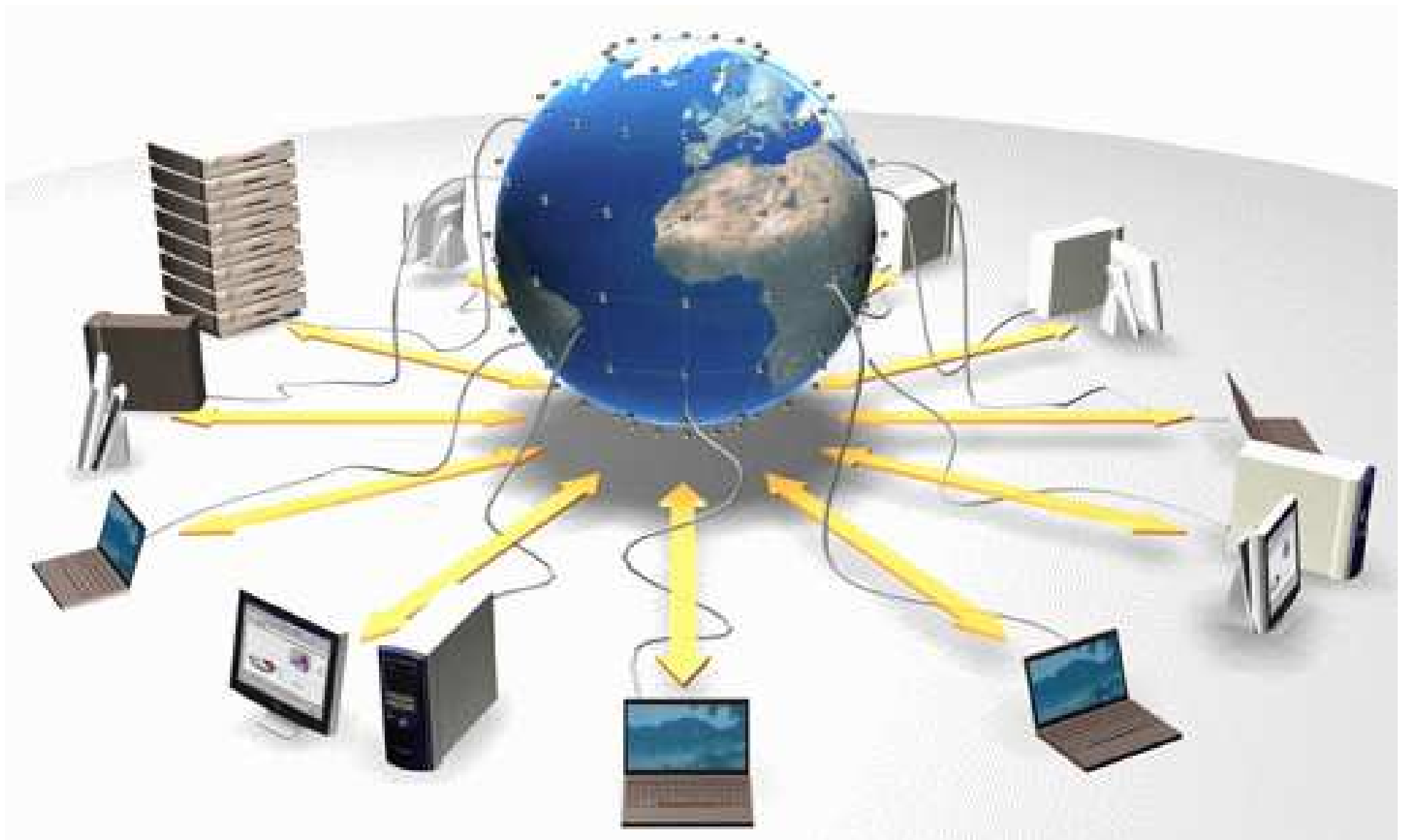
1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

Ale do niedawna można to było trzymać w jednym miejscu...



GRID dla LHC



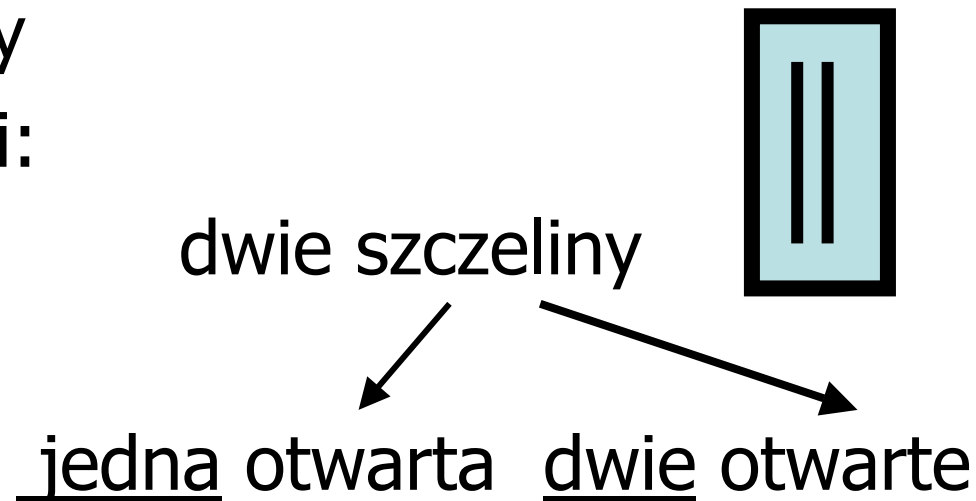
Mechanika kwantowa 8.IV.2008

Mieszanie

- Światło = cząstka
prawa ruchu jak dla fali
- Interferencja
- Omówienie doświadczenia z dwiema
szczelinami na które pada światło
laserowe

Laser- przesłona (przystłona, szczelina)- ekran

- Określony kolor (długość fali) \rightarrow energia $E = h \nu$
- Fotony opuszcza źródło pojedynczo
dobiegają do ekranu zanim następny foton
jest emitowany
- Dwa przypadki:



Pierwsza przesłona otwarta

- Pierwszy foton gdzieś trafi, drugi gdzieś trafi, itd.
- Utworzy się pewien rozmazany obraz z drobnymi efektami kolorowymi na brzegach (dyfrakcja)
- Intensywność światła – proporcjonalna do liczby fotonów (i gęstości energii)
- Liczba fotonów w danym obszarze ekranu
Więcej na środku tzn na linii przesłony (jaśniej) – mniej po bokach (ciemniej) –
czyli prawdopodobieństwo większe w środku mniejsze po bokach
- Jedyna informacja jaką mamy-
prawdopodobieństwo uderzenia w ekran

Druga szczelina otwarta...

- Druga szczelina otwarta - jak poprzednio
- A co się dzieje gdy obie szczeliny otwarte?
Suma obu tych przypadków? Czyli najwięcej fotonów na wprost szczelin? NIE
- Obraz interferencyjny i najjaśniej za przeszkodą...
Ale przecież fotony docierały pojedynczo do ekranu – więc co z czym interferuje?
- Interferencja to własność samego fotonu, ale również elektronu i innych cząstek kwantowych

Film

- Działko z fotonami

<http://www.colorado.edu/physics/2000/schroedinger/twoslit2.html>

- The double-slit experiment, and its variations, then became a classic [*Gedankenexperiment*](#) (thought experiment) for its clarity in expressing the central puzzles of quantum mechanics; although in this form the experiment was not actually performed with anything other than light until [1961](#), when [C.Jönsson](#) of the [U. of Tübingen](#) performed it with [electrons](#), and not until [1974](#) in the form of "one electron at a time", in a laboratory at the [University of Milan](#), by researchers led by [P. Merli](#), of LAMEL-CNR Bologna.
- The results of the [1974](#) experiment were published and even made into a short film, but did not receive wide attention. The experiment was repeated in [1989](#) by Tonomura et al at [Hitachi](#) in [Japan](#). Their equipment was better, reflecting 15 years of advances in electronics and a dedicated development effort by the Hitachi team. Their methodology was more precise and elegant, and their results agreed with Merli's team.
- In September [2002](#), the double-slit experiment of Claus Jönsson was voted "the most beautiful experiment" by readers of [*Physics World*](#)

Amplituda i prawdopodobieństwo

- Fale-

np. góry i doliny na powierzchni wody..

Znak + gdy nadwyżka (max -> amplituda)

znak - gdy niedomiar

Gdy spotkają się dwie fale – mogą się wygaszać lub wzmacniać (interferencja)

- Prawdopodobieństwo – zawsze dodatnie

między 0 a 1

- Intensywność (natężenie) = (amplituda)²

Rysunek: czynnik 4 a nie 2

- Niech szczeliny bardzo blisko
- Badamy intensywność światła na ekranie czyli rozkład energii, a ponieważ każdy foton niesie określoną porcję energii
odpowiada to rozkładowi fotonów

- Maksimum:

$A_{I,II}$ = amplitudy dla otwartej I lub II szczeliny

Dodajemy amplitudy:

$$(A_I + A_{II})^2 = (A_I)^2 + (A_{II})^2 + 2A_I A_{II}$$

czy prawdopodobieństwa $(A_I)^2 + (A_{II})^2$?

Jeżeli $A_I = A_{II} = 1$

to dostaniemy w wyniku 4 lub 2.

- Rozkład w rzeczywistości: czynnik 4
- Wniosek: dodajemy amplitudy !

Całkowita energia zawarta w ekranie

- Interferencja wpływa na rozkład fotonów
- Zachowanie prawdopodobieństwa
Całkowite prawdopodobieństwo że cząstka gdzieś się znajdzie na ekranie = 1
- A jeśli cząstka się rozpadnie na inne cząstki ? Prawdopodobieństwo dla całego procesu zachowuje się

Mieszanie

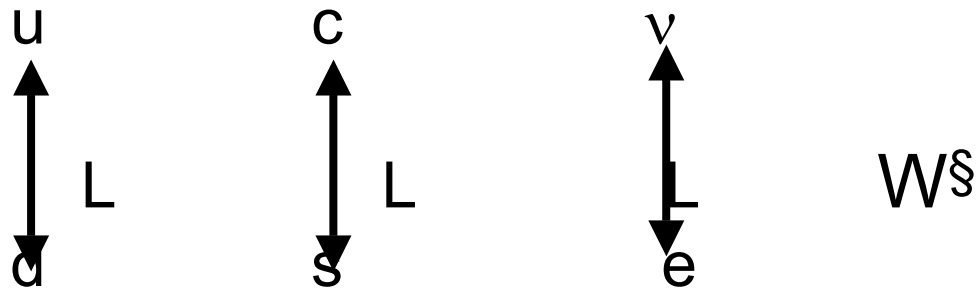
- Stałe sprzężenia g
 $u \rightarrow d W^+$
może mieć różne wartości,
np. oddz. e-m znaki ładunków różne
- Prawdopodobieństwo tego procesu
(przejścia) – transition probability
prop. do kwadratu g – zawsze dodatnie

Amplituda przejścia dla oddz. słabych L

$\sim g$

Prawdopodobieństwo przejścia: $g^2/4\pi$

Opis fundamentalny przejść w dubletach



Ale zaobserwowano różnicę między przejściami dla kwarków a między elektronem i neutrino.

Związek dla prawdopodobieństw przejść:

Prob. $u \rightarrow d W^+$ + prob. $u \rightarrow s W^+$ =

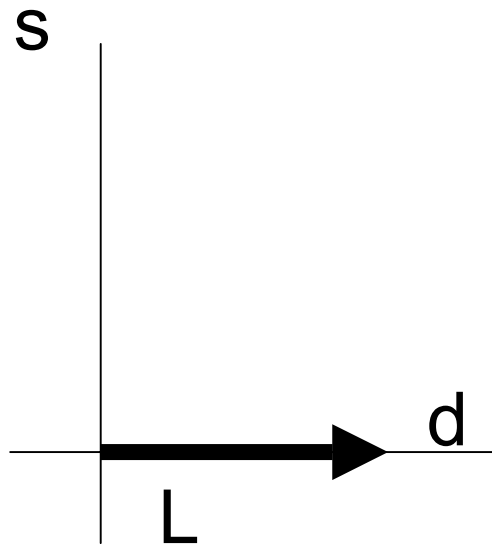
prob. $\nu \rightarrow e W^+$

Rzeczywiste rozpady to:

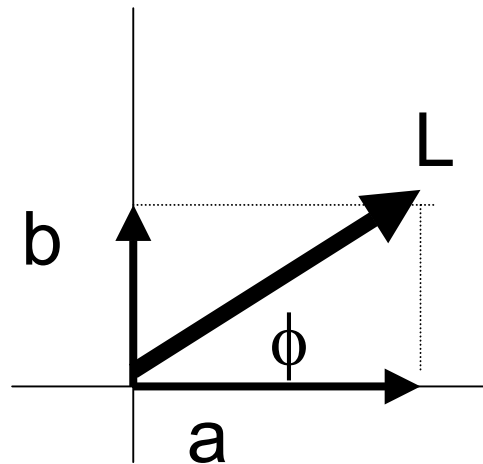
Prob: $W^- \rightarrow \bar{u} d$ $W^- \rightarrow \bar{u} d$ $W^- \rightarrow \bar{\nu} e$

Kąt Cabibbo ϕ

Sprzężenie kwarku \underline{u} do s i d



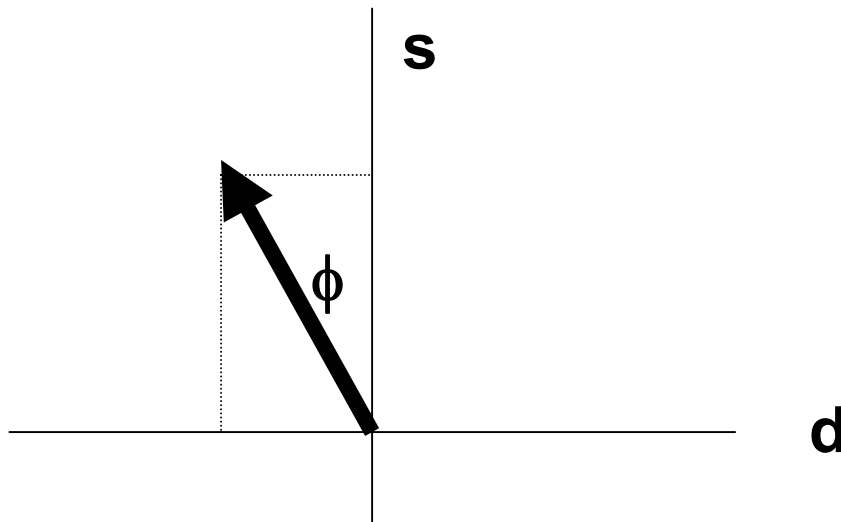
$$a^2 + b^2 = L^2$$



Eksperyment: $\phi = 12.7^\circ$

Podobnie dla $c \rightarrow d$ i $c \rightarrow s$

Sprzężenie kwarku \underline{c} do d i s



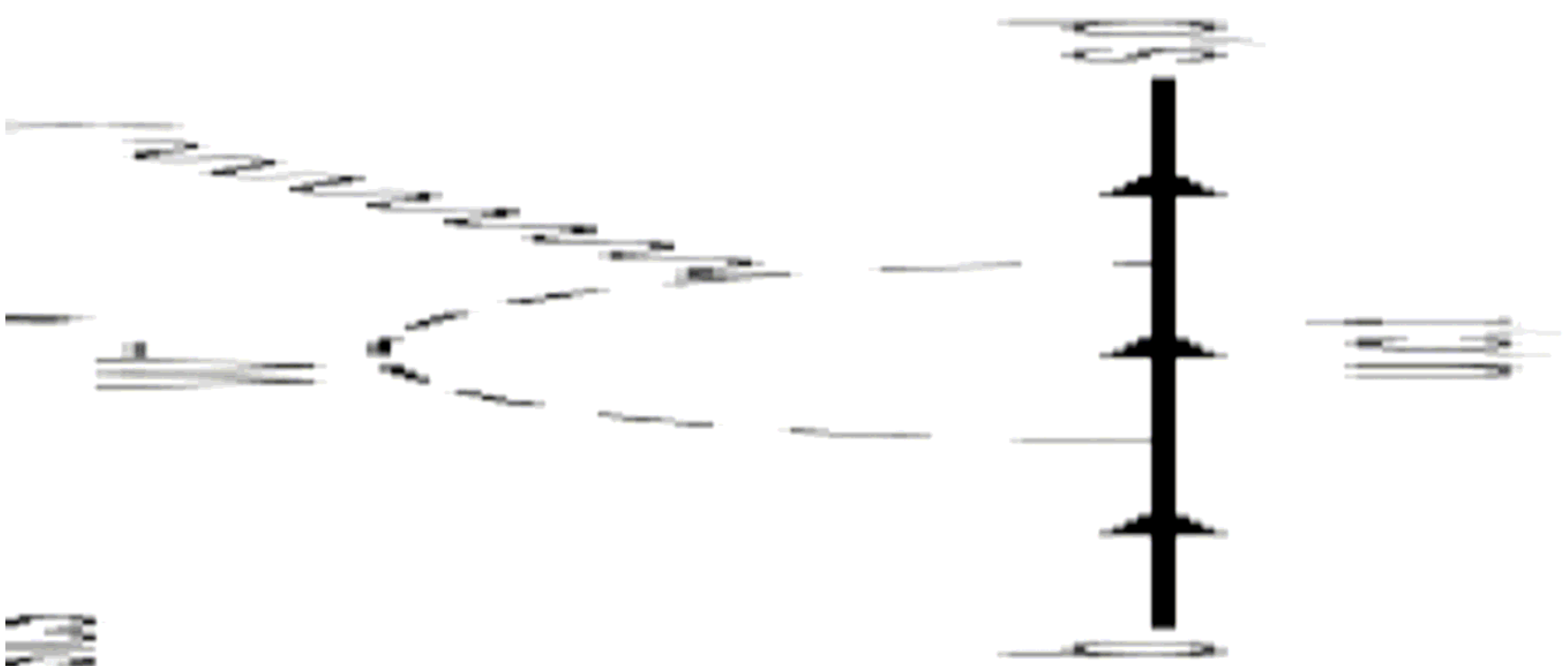
Dane dla rozpadu neutronu ($d \rightarrow u e \bar{\nu}_e$) - w 1963

sprzężenie mniejsze niż dla rozpadu mionu ($\mu \rightarrow \nu_\mu e \bar{\nu}_e$)

Kąt Cabibbo – mieszanie między 1 i 2 generacją kwarków

- potrzebny do opisu danych – ale dlaczego taki? skąd mieszanie? Częstka Higgsa? Nie wiemy...
- Sytuacja jest nawet bardziej skomplikowana mieszanie między trzema generacjami kwarków
Macierz Cabibbo-Kobayashi – Maskawa
- takie mieszanie założono zanim odkryto trzecią generację! (bo istniejące dane tego wymagały stała sprzężenia zespolona)
lepton tau – 1975 Perl, kwark t -1995
- Macierz C-K-M : 3 kąty (jeden kąt Cabibbo)+faza

Prawdopodobieństwo rozpadu $b \rightarrow s \gamma$ plus $b \rightarrow d \gamma$



Czy dla sprzężenia z Z też mieszanie? NIE

Przejścia bez zmiany ład. elektrycznego

- $d \rightarrow d Z$
- a mieszanie: czyli czy istnieje przejście:
 $d \rightarrow s Z$? NIE

Dlaczego? nie wiemy (Higgs?)

- **CZY JEST MIESZANIE LEPTONÓW**

miedzy generacjami? Nie? Jeśli neutrino nie mają masy to nie ma... a jeśli mają to jest

Słońce świeci neutrinami

$$e \rightarrow \nu_e W^-$$

- $e \rightarrow \nu_e W^-$ i również $\nu_e \rightarrow W^+ e$ możliwe
- Doświadczenia z neutrinami słonecznymi
- Jeśli nie ma mieszania – zawsze ν_e
- Mieszanie – zamiana na neutrino muonowe i taonowe, i są na to pewne dowody bo obserwuje się mniej ν_e niż emituje Słońce
- Jeżeli masy różne to inny czas docierania na Ziemię i docierająca mieszanka jest inna
(Gdy masy takie same- mimo mieszania – nie dowiemy się o tym)

Mieszanie - posumowanie

- Efekt kwantowy
- Być może cząstka Higgsa jest odpowiedzialna za mieszanie generacji (macierz CKM)

- Z i γ to wynik mieszania neutralnych bozonów

Wspólny opis oddz. słabych i e-m - oddziaływanie elektrosłabe (electroweak EW)

Efekt Higgsa cząstki Higgsa?

- Mieszanie \rightarrow kąt Weinberga
- Z sprzęga się do neutrin, foton nie
- Pomiar kąta Cabibbo: $u \rightarrow d W^+$ i $\nu_e \rightarrow e W^+$
- kąt Weinberga: $u \rightarrow d W^+$ i $u \rightarrow u Z$

Energia i powłoka masy

- Zrozumieć związek energii i pędu
- Dla pojedynczej cząstki –
warunek powłoki masy (mass-shell)

Energia i pęd – podstawowe wielkości
i zachowane

Prawo zachowania energii

Prawo zachowania pędu np. z zderzeniu

Pęd – wektor, 3 składowe (małe prędkości $p=mv$)

- „Normalnie” aby opisać stan cząstki
(zaniedbujemy spin i inne l. kwantowe)
-> gdzie, kiedy i jaki pęd
- W mech kwantowej: jeśli znamy dokładnie
położenie nie znamy pędu
i odwrotnie (zasada niepewności Heisenberga)
Również jeśli znamy dokładnie czas – nic
nie wiemy o energii
- Nie wiemy tzn wszystkie możliwości z tym
samym prawdopodobieństwem

Do opisu fali

- Więc określony pęd \rightarrow fala płaska (jest wszędzie)
- Więc lepiej posługiwać się w opisie własnościami które są takie same w makroświecie i mikroświecie
Np. prawa zachowania energii i pędu
- W praktyce nigdy nie znamy położenia dokładnie, więc i o pędzie coś wiemy

Zderzenie dwóch cząstek

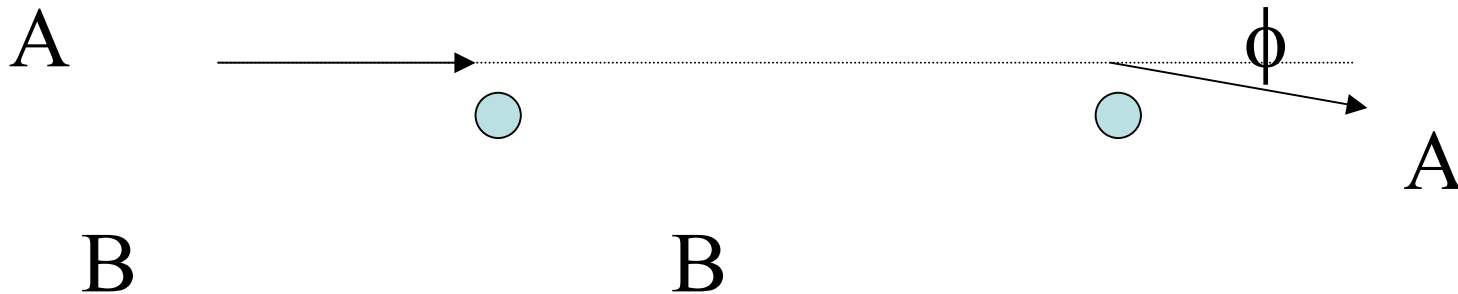
- Procesy elastyczne
te same cząstki przed i po zderzeniu
- Procesy nieelastyczne
 - tu oczywiste że suma mas przed i po zderzeniu może być różna
- UWAGA – masa cząstki
= masa cząstki w spoczynku

Prawa zachowania

- Energia i pęd cząstki nie są niezależne
Jeśli dla cząstki o danej masie znamy pęd to znamy prędkość i energię
- Teoria relatywistyczna pozwala na istnienie cząstek o masie zero i dowolnej energii (foton)
 - jeśli znamy pęd znamy energię

Zderzenie elastyczne cząstek A i B

- Niech B (b. ciężka) spoczywa
- A pada na nią i się rozprasza pod kątem ϕ



Rozkład kątowy

- Kule bilardowe - kąt znany przy określonych warunkach
- W świecie cząstek – nie znany dokładnie. Wiązka w akceleratorze cząstek określonego typu, przekrój wiązki b. duży w stosunku do rozmiarów cząstek np. tu rozmiaru B

Więc wiele zdarzeń i rozkład kątów

rozproszenia – ten rozkład to źródło wiedzy o oddziaływaniu (rozkład kątowy) oraz własności tarczy

Doświadczenie Rutherforda

Cząstki alfa padały na folii złota –

niektóre się odbijały do tyłu (jądro złota masa 50 x masa cząstka α)

Prawo Coulomba

- Ładunki el. – oddziaływanie słabsze gdy ładunki dalej od siebie $F \sim 1/r^2$
- Dośw. Rutherforda 1911 – elektrony w folii nie były ważne, istotne tylko jądra

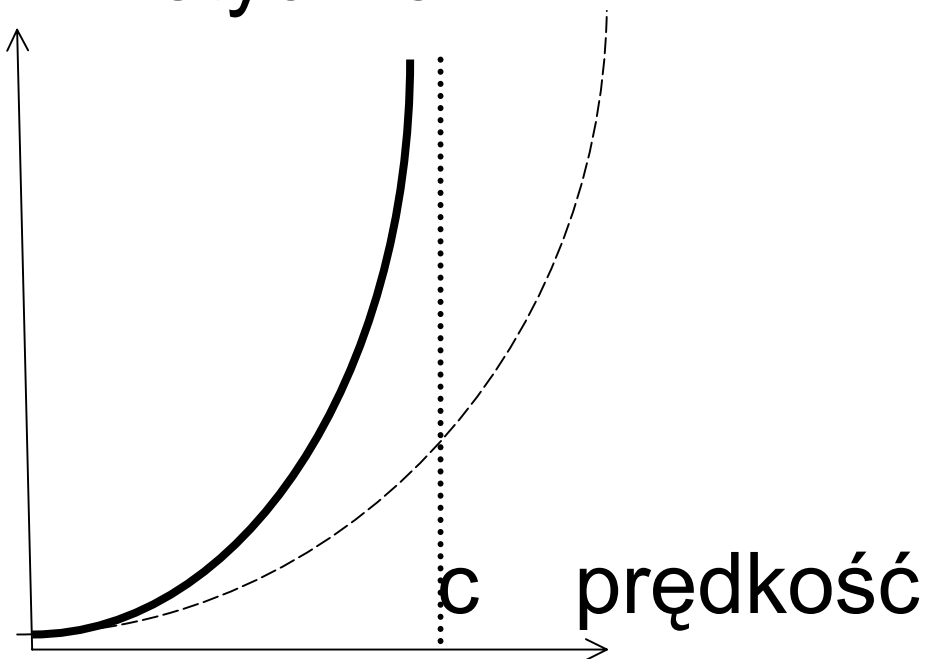
Prawo Coulomba -> informacja z rozkładu kąтового: atomy puste, ciężkie jądro w środku, i od nich odbijały się cząstki alfa

=> sto tysięcy (10^5) razy mniejszy rozmiar jądra niż atomu

Cząstki α (4 nukleony 2p 2 n) – cięższe niż elektron, lżejsze niż jądro złota (197 nukleonów)
- idealna sonda

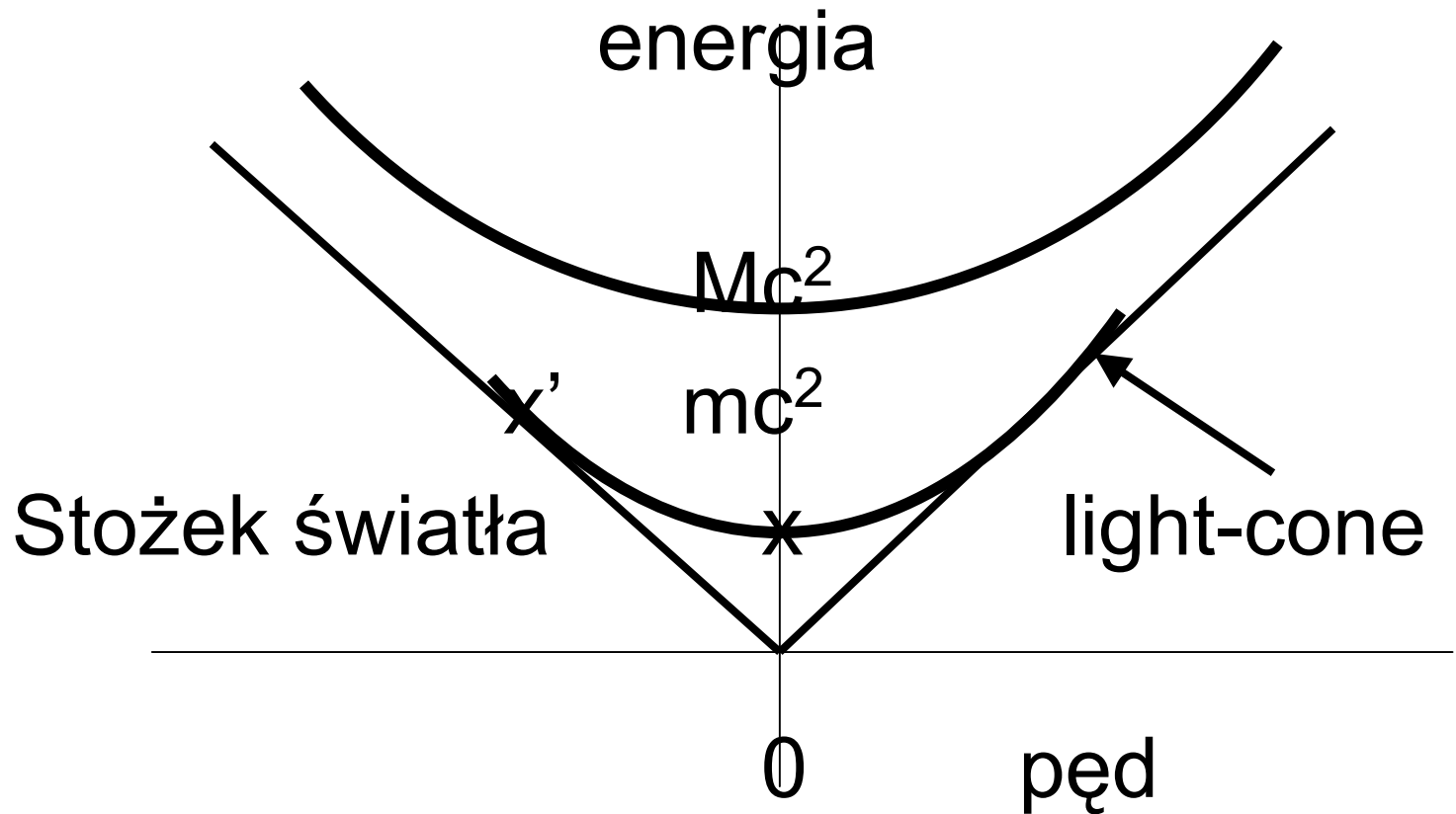
$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

- En.kinetyczna



Związek relatywistyczny –ograniczenie na prędkość (c – prędkość światła)

Energia i pęd



Zmiana układu odniesienia: $x \rightarrow x'$ (powłoka masy)

Teoria relatywistyczna -

- Najbardziej bezpośredni przejaw teorii relatywistycznej to obserwowany czas życia cząstek – dłuższy jeśli cząstka się porusza → jest to tzw. dylatacja czasu.
Podobny efekt - skrócenie (długości) Lorentza
- Rola pomiaru - transformacja Lorentza wiąże pomiary w różnych układach odniesienia
- Niezmienniczość relatywistyczna:
względem obrotów, przesunięcia w czasie i przestrzeni - znane wcześniej (przed Einsteinem)
- Niezmienniczość relatywistyczna względem zmiany układu odniesienia (stała prędkość)
- Prędkość światła stała w układach odniesienia poruszających się ze stałą prędkością względem siebie

Niezmienniczość Lorentza, niezmienniczość Poincare

- Obroty i zmiana układu (stała prędkość) → niezmienniczość Lorentza
Niezmienniczość Lorentza plus niezmienniczość względem przesunięcia w czasie i przestrzeni to niezmienniczość Poincare

Obie znane przed Einsteinem

- Jeśli proces jest zabroniony to jest zabroniony w każdym układzie, np rozpad
- Do opisu nieraz wygodny pewien układ.

Świat hadronów

- Lata 60-te – znane cząstki elementarne to foton, elektron, muon, neutrino oraz wiele silnie oddziałujących z protonem i neutronem cząstek - hadronów
- Klasyfikacja Gell-Manna – hipoteza kwarków, czyli cegiełek z których zbudowane są hadrony
- Proton i neutron to ich stany związane
- Kwarki ‘zobaczono’ w 1967 (SLAC) w dośw. typu Rutherforda

Stany związane

- Kwarki – uwięzione, nigdy jako swobodne
- Stany związane ale zupełnie inaczej niż w atomie lub jądrach
- Atom wodoru, jądra at. – tu energia wiązania mała więc całkowita energia bliska sumie energii zawartej w masach $E=mc^2$

(atom wodoru: masa e = 0.511, masa p = 938.272 MeV, en. wiązania -13.6 eV;

jądro helu 2 p 2n => 3755.67 MeV

masa n = 939.563 MeV, en. wiązania -28 MeV)

Łatwo można znaleźć składniki

Inaczej jest z kwarkami....

Stany związane kwarków

- Różnica jest taka , że gluony wiążące kwarki tez oddziałują ze sobą
- Kwarki są zanurzone w magmie gluonowej ich masa – znikoma część masy całości w protonie kwarki około 15 MeV a masa $p = 938$ MeV – reszta w gluonach (one same bezmasowe)
- Kwarków nie można wydzielić = struna gluonowa się wytwarza między kwarkami które chcemy rozdzielić i en wiązania rośnie wraz z zwiększeniem odległości

Wyznaczanie mas kwarków

- Trudne szczególnie dla lekkich kwarków
- Np.. różnica uud i ddu znana = 1.291 MeV ; jest jeszcze wkład od różnicy ładunków (oddz. e-m)

$$u = 1.5 - 3 \text{ MeV}$$

$$d = 3 - 7 \text{ MeV}$$

- Cięższe kwarki (odkryte po 1967) – tu łatwiej
 $c, b, t =$ masy 1.3, 4.5, 171 GeV,

Energia wiązania niezbyt istotna dla hadronów zbudowanych z ciężkich kwarków

Stany związane $J/\psi = c \bar{c}$ 3000 MeV (1974)

Liczby kwantowe

- Hadrony= kwarki w cieście gluonowym
(o własnościach gumy do żucia)

- Czy istnieje glueball?

- Liczby kwantowe hadronów

mezony: kwark – antykwark

bariony: 3 kwarki

Opis teoretyczny – Kwantowa chromodynamika(QCD)

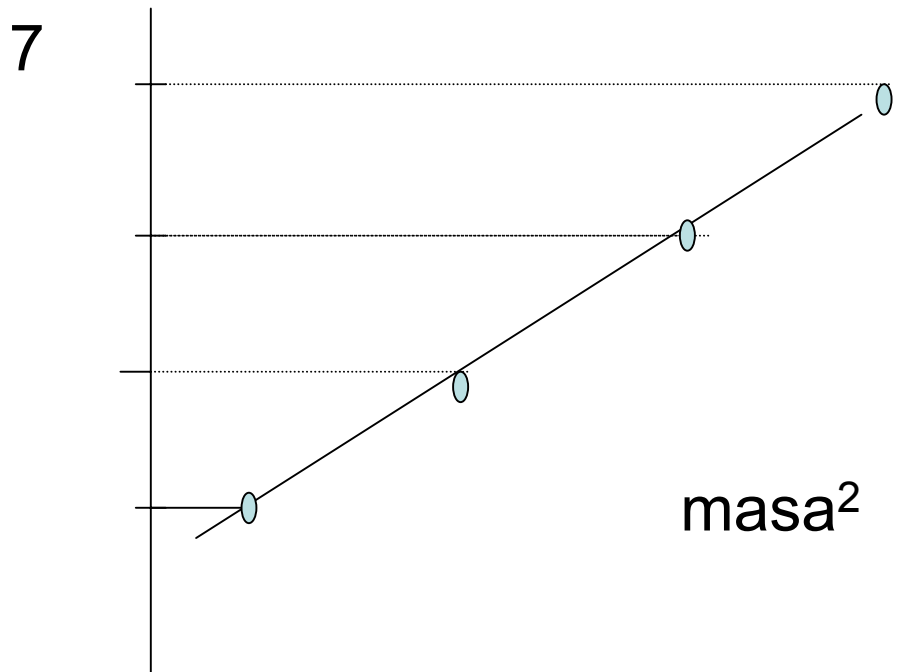
podobna do kwantowej elektrodynamiki QED

komplikacje związane z różnymi typami gluonów i ich samo-odziaływaniem

Struny gluonowe dały początek →teoria strun

Stany zwiazane – trajektorie Reggego

- Spin



- Jak stany wzbudzone (wyższa energia) w atomie

Spin stanu związanego

- Hadrony = stany związane kwarków
cząstki o określonych liczbach
kwantowych również spinu
Stany kwantowe i spin = wewnętrzny moment
pędu przyjmuje tylko określone wartości:
1/2, 3/2, 5/2... 11/2.. fermiony
0, 1, 2, 3, ... 6 bozony

Różne liczby kwantowe hadronów
związane z różnymi typami kwarków

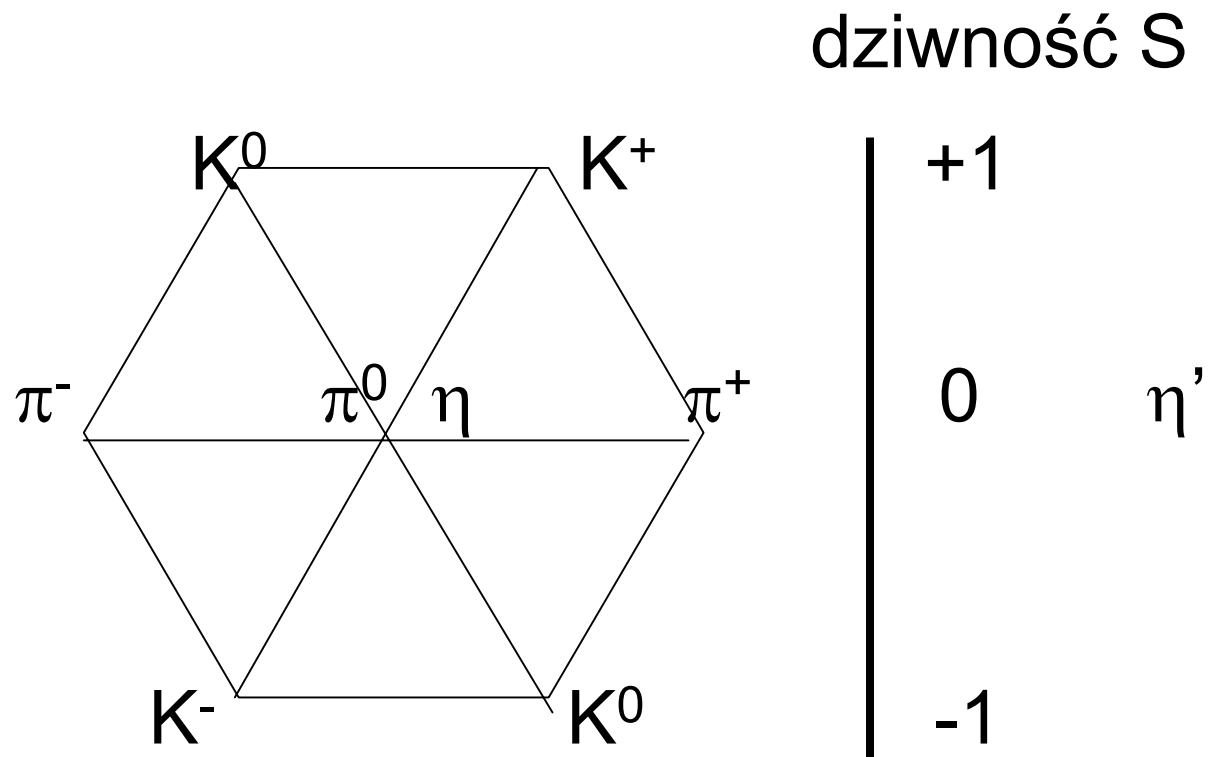
Mezony kwark-antykwar

Spin 0		masa MeV	czas życia (s)
π^-	d \bar{u}	140	$2.6 \cdot 10^{-8}$
π^+	u \bar{d}	140	
π^0	d \bar{d} , u \bar{u}	135	$8.4 \cdot 10^{-17}$
K^0	d \bar{s}		
K^+	u \bar{s}	494	$1.2 \cdot 10^{-8}$
K^-	s \bar{u}	494	
K^0	s \bar{d}		
η	u \bar{u}	548	$5.6 \cdot 10^{-19}$
η'	s \bar{s}	958	$3.3 \cdot 10^{-21}$

Kaony – mieszanie neutralnych

- K_S 498 MeV $0.89 \cdot 10^{-10}$ s
- K_L 498 $5.2 \cdot 10^{-8}$

Oktet mezonów i skalar



Masy w oktecie(nonecie)

- Masa kwarku dziwnego ~ 150 MeV
masy cząstek różnią się

ale widać symetrię - multiplet
- Istnieje też oktet (nonet) mezonów o spinie 1

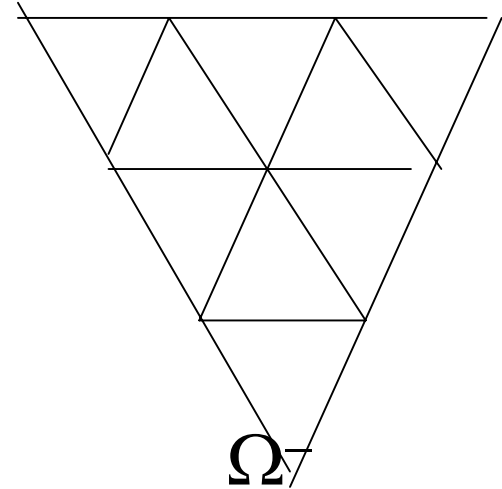
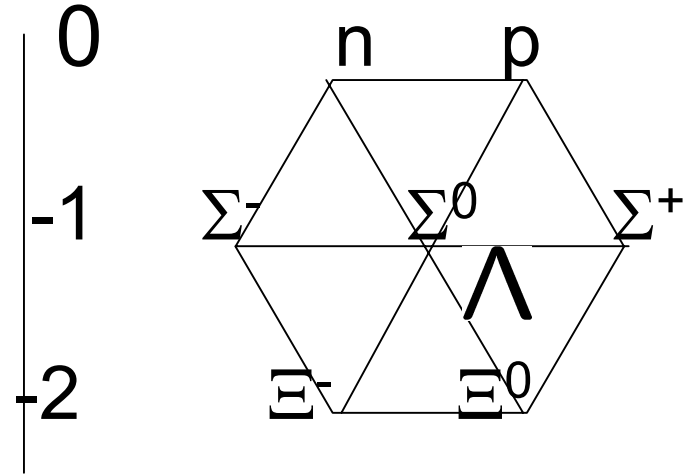
Bariony

- Oktet (o spinie $\frac{1}{2}$)

dziwność $s=0,-1,-2$

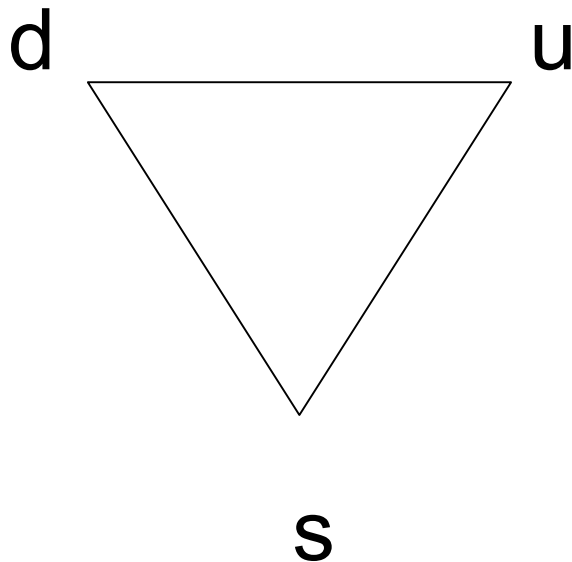
- Dekuplet o spinie $\frac{3}{2}$
tu stany typu sss, uuu, ddd
 Ω masa 1672.5 MeV

s



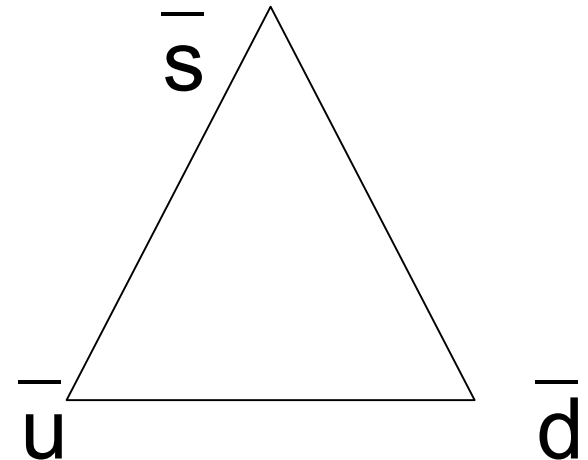
Kwarki –

fundamentalne reprezentacje
grupy SU(3) [zapachu]



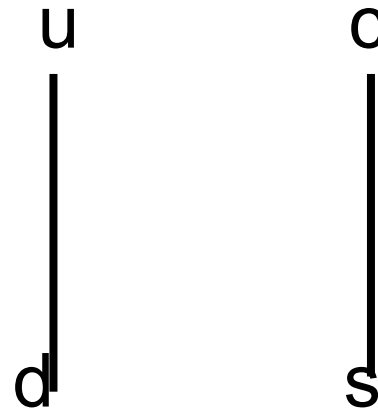
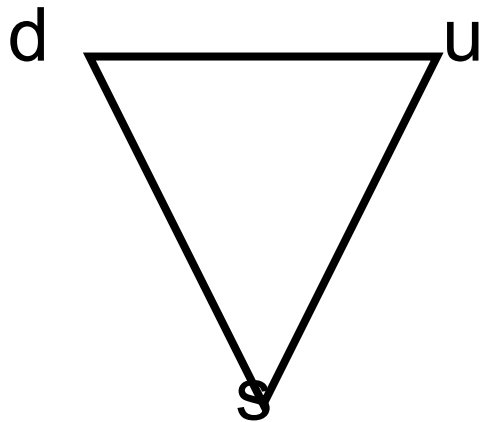
$$3 \times 3 \times 3 = 1 + 8 + 8 + 10$$

$$3 \times \bar{3} = 1 + 8$$



Trójkąty czy dublety; symetria leptonów i kwarków

- Grupa $SU(3)$ [zapachu] – trójki kwarków „uds”
→ budowa hadronów
- Grupa $SU(2)$



Hara,
Glashow ...

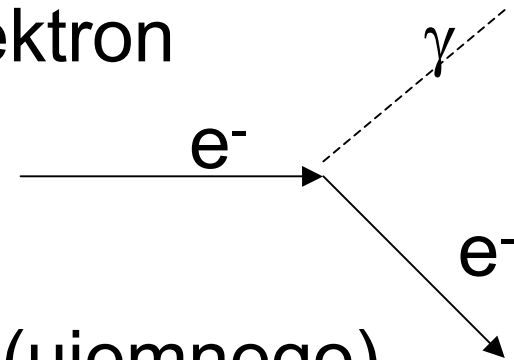
Symetria lepton-kwark , leptony = dublety $SU(2)$
Gdy oddz. silne i słabe chcemy opisać → dublety
Tędy wiodła droga do Modelu Standardowego

Teoria cząstek elementarnych 23.IV.08

- 1948 – nowa faza mechaniki kwantowej
precyzyjne pomiary wymagały precyzyjnych obliczeń
→ metoda Feynmana
- Diagramy Feynmana i reguły Feynmana
dziś uniwersalne narzędzie fizyki cząstek
wpierw zastosowane w kwantowej elektrodynamice
(QED – Quantum Electrodynamics)
- QED – oddz. elektronów z fotonami; trudności ale
istnieje sposób → *procedura renormalizacji*
- Oddziaływania słabe $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$ – TRUDNOŚCI a
renormalizacja bezradna. Propozycja – nowe
oddziaływanie, nowe cząstki → teoria oddz. słabych
z bozonami W/Z i cząstką Higgsa renormalizowalna!
- Nagroda Nobla: Glashow, Salam, Weinberg 1979 (W/Z)
t’Hooft, Veltman 1999 (renormalizowalność)

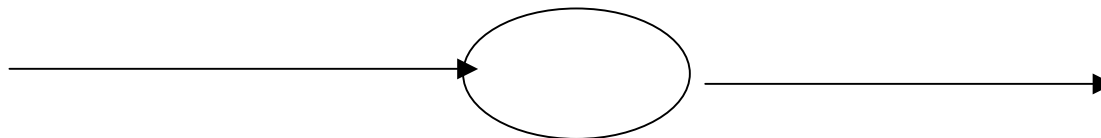
Diagramy i reguły Feynmana

- Diagramy – cząstki reprezentujemy przez linie a akt oddziaływania przez punkt przecięcia (wierzchołek)
- Np. emisja fotonu przez elektron



strzałki – przepływ ład. el. (ujemnego)

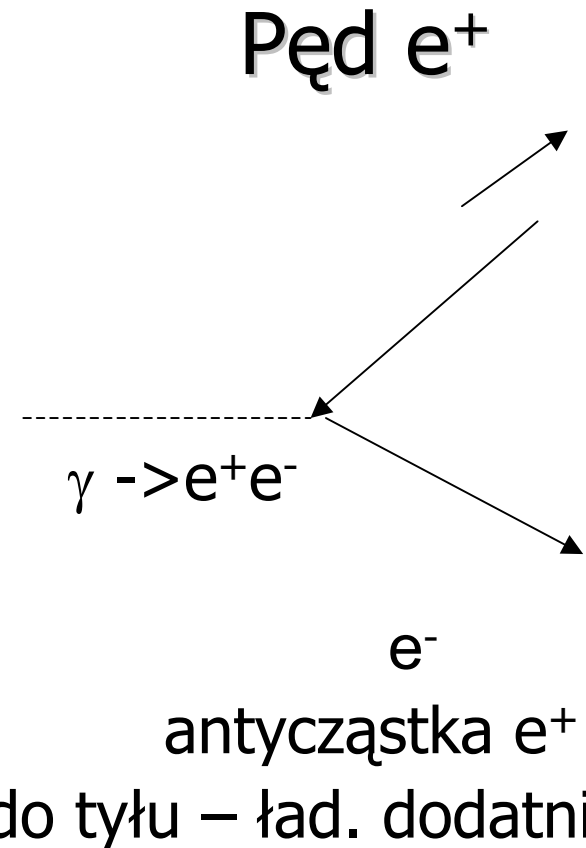
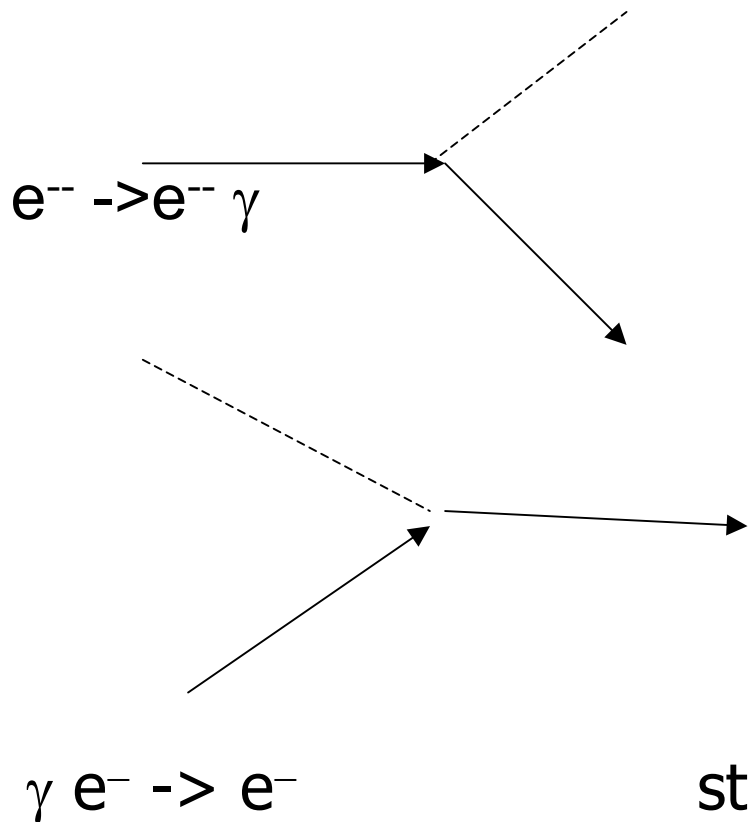
- Pętle



Reguły Feynmana

- Procesy skrzyżowane $e^- e^- \gamma$

Pozyton - 1930

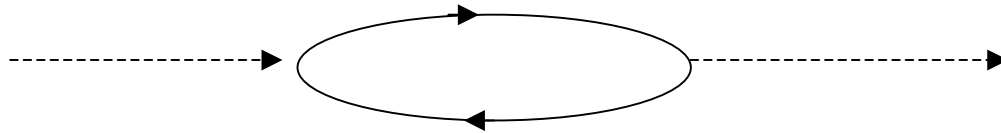


Zasada zachowania energii i pędu

- Dla swobodnego elektronu proces $e \rightarrow e \gamma$ nie może być zrealizowany, ale jest możliwy dla elektronu w atomie (elektron przechodzi do niższego stanu)
- Spoczywający elektron ma najniższą możliwą energią, po emisji fotonu nie może mieć mniejszej – a jeśli w jednym układzie niemożliwe to w innym układzie też nie jest możliwe
- Dla swobodnego fotonu rozpad na e^+e^- też nie jest możliwe bo ...obserwator
Ale w pobliżu jądra – może (rysunek)
- W materii – emisja fotonów – promieniowanie hamowania (bremsstrahlung)

Linie wewnętrzne

- Mechanika kwantowa pozwala na istnienie cząstek z niedostępnymi energiami ale przez krótki czas (zasada Heinsenberga $\Delta E \sim 1/\Delta t$)
Np. elektrony mogą mieć zerowa a nawet ujemną energię, lub b. dużą energię dla spoczywającego e więc np. kreacja i anihilacja par



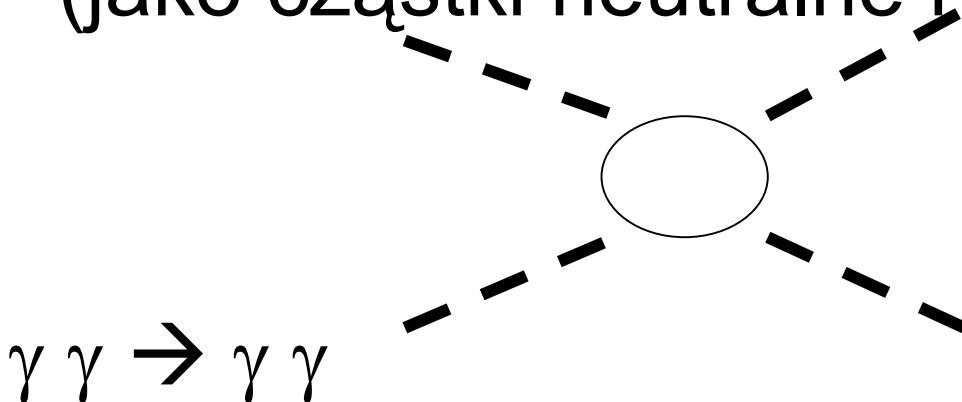
- Cząstki wirtualne –cząstki dla których $E^2 \neq p^2 + m^2$ (cząstki „poza powłoką masy”) istnieją krótko i nie są obserwowane

Diagramy Feynmana cd

- Typowe zderzenia



- Różnym diagramom z cząstkami wirtualnymi
 - uwzględniamy interferencję
 - możliwe jest rozpraszanie światła na świetle (jako cząstki neutralne nie oddziałują wprost)



Amplitudy i prawdopodobieństwa procesów

- Jeżeli znamy własności cząstek i sprzężeń → obliczenia prawdopodobieństwa procesów
- Cząstki początkowe wytwarzamy lub przygotowujemy ale końcowe możemy tylko obserwować
- Ponieważ z określonego stanu początkowego do określonego stanu końcowego można dojść na wiele sposobów →
wiele diagramów należy uwzględnić (suma amplitud) i możliwa interferencja
- Pytanie który konkretnie proces się zdarzył – to jak pytanie którą szczeliną przeszedł foton ...

Nieskończoności

- Opis procesu - uwzględniamy wszystkie możliwe diagramy (procesy) pozwalające na przejście od stanu początkowego do stanu końcowego
- W procesach uczestniczą cząstki wirtualne ale w niektórych przypadkach cząstki te mogą mieć dowolnie wielkie energie

Pytanie: czy te wkłady są tłumione?

- Nieraz nie są tłumione → nieskończone prawdopodobieństwa procesów

Tłumienie wkładu od pętli

- Tłumienie większe – dla cząstek bardziej wirtualnych
- Zależy od typu cząstki, szczególnie ważne jest jaki jest spin; zachowanie momentu pędu czyli jeżeli w stanie początkowym cząstka ze spinem – to w stanie końcowym wystąpi cząstka ze spinem albo cząstki bezspinowe ale ze wzajemnym momentem pędu
- Im spin większy tym mniejsze tłumienie dla dużych wirtualności - problemy z cząstkami ze spinem 1
- Tłumienie zależy też od typu sprzężenia

Nieskończoności i renormalizacja

- Dla fotonu – wkłady od różnych diagramów z nieskończonościami kasują się, co wykazali w 1948 Feynman, Tomonaga i Schwinger (Nobel 1964) – renormalizacja. QED prowadzi do skończonych przewidywań.
Bardzo precyzyjnych przewidywań – np. dla anomального momentu mionu
- Dla oddziaływań słabych w bozonami W i Z (spin 1) – problem większy ale nowe oddziaływanie i nowe diagramy mogą tu pomóc

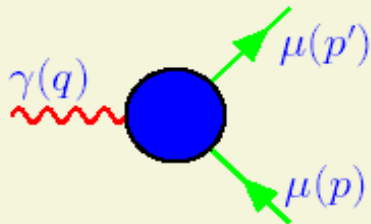
Anomalous magnetic moment or $g-2$ for muon based on Jegerlehner, Eidelman, J. Miller 2006-7

① The Anomalous Magnetic Moment of the Muon

$$\vec{\mu} = g_{\mu} \frac{e\hbar}{2m_{\mu}c} \vec{s} ; \quad g_{\mu} = 2(1 + a_{\mu})$$

Dirac: $g_{\mu} = 2$, a_{μ} muon anomaly

Stern, Gerlach 22: $g_e = 2$; Kusch, Foley 48: $g_e = 2(1.00119 \pm 0.00005)$



$$= (-ie) \bar{u}(p') \left[\gamma^{\mu} F_1(q^2) + i \frac{\sigma^{\mu\nu} q_{\nu}}{2m_{\mu}} F_2(q^2) \right] u(p)$$

$$F_1(0) = 1 ; \quad F_2(0) = a_{\mu}$$

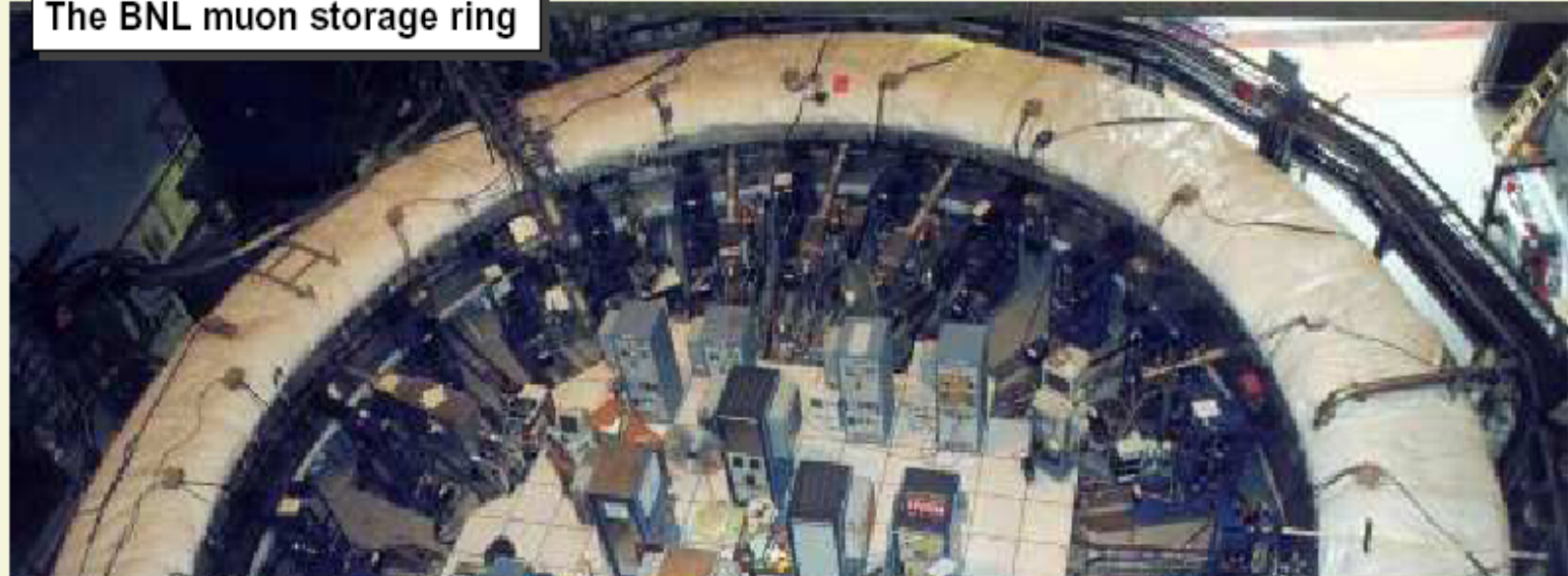
a_{μ} responsible for the Larmor precession

directly proportional at magic energy ~ 3.1 GeV

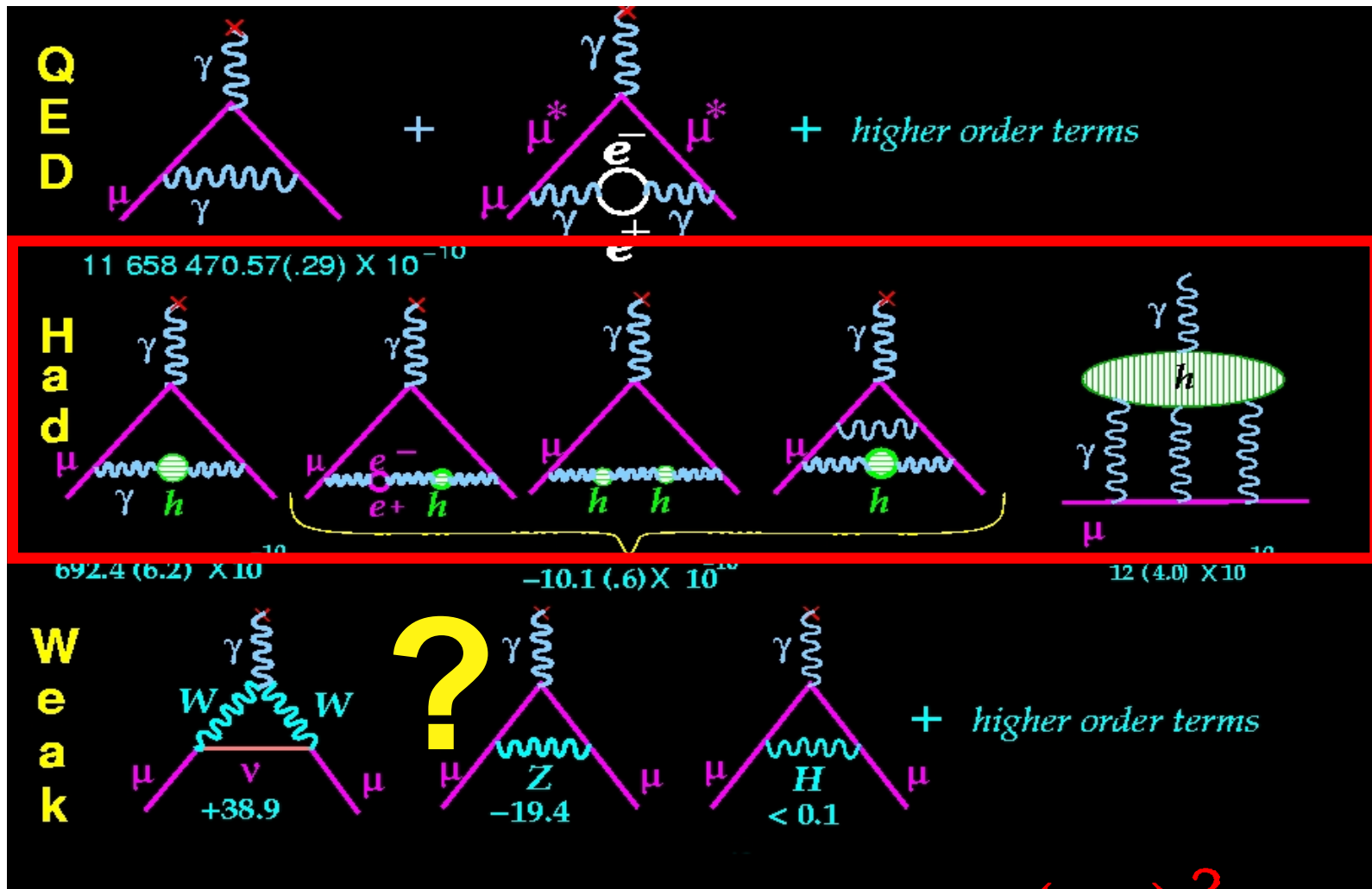
CERN, BNL $g-2$ experiments

$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} - \left(a_{\mu} - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} \right]_{\text{at "magic } \gamma}^{E \sim 3.1 \text{ GeV}} \simeq \frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} \right]$$

The BNL muon storage ring

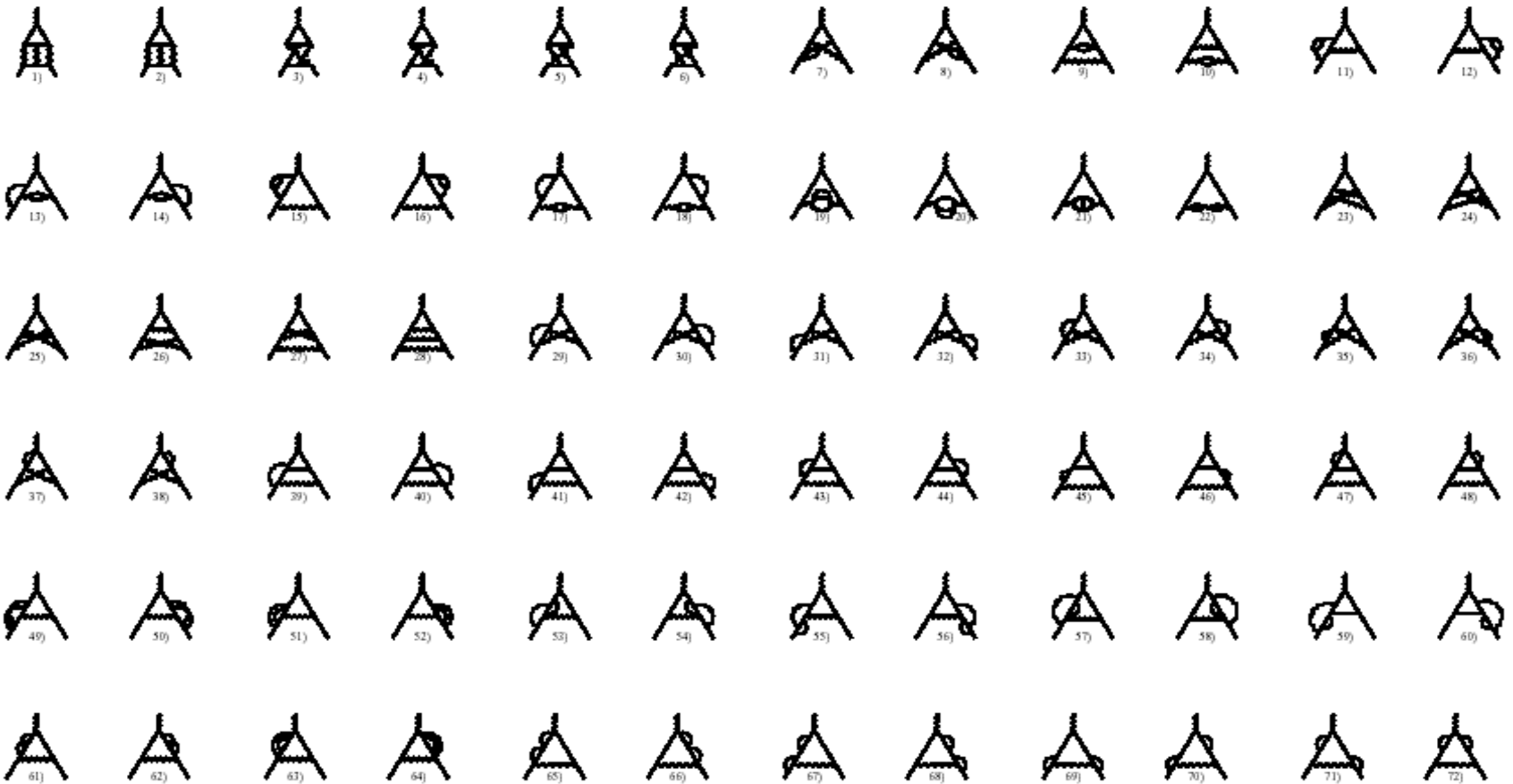


Standard Model contributions



e vs. μ : relative contribution of heavier things $\left(\frac{m_\mu}{m_e}\right)^2 \simeq 40,000$

3 rd order QED contributions



QED Contribution a_μ^{QED}

$$\begin{aligned} a_\mu^{\text{QED}} \cdot 10^{10} &= \sum C_i \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^i = & 11614097.3 \text{ (1-loop)} \\ &+ & 41321.8 \text{ (2-loop)} \\ &+ & 3014.2 \text{ (3-loop)} \\ &+ & 38.1 \text{ (4-loop)} \\ &+ & 0.4 \text{ (5-loop)} \end{aligned}$$

Terms up to α^3 are known analytically, a recent more accurate numerical calculation of the α^4 terms and the leading $\log \alpha^5$ terms gave (T. Kinoshita and M. Nio, 2005; A.L. Kataev, 2006):

$$a_\mu^{\text{QED}} = (116584719.4 \pm 1.4) \cdot 10^{-11}.$$

From the latest value of a_e (G. Gabrielse et al., 2006; M. Passera, 2006):

$$\alpha^{-1} = 137.035999710(96), \quad a_\mu^{\text{QED}} = (116584718.09 \pm 0.14 \pm 0.08) \cdot 10^{-11}.$$

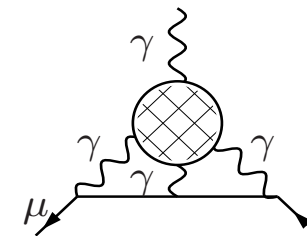
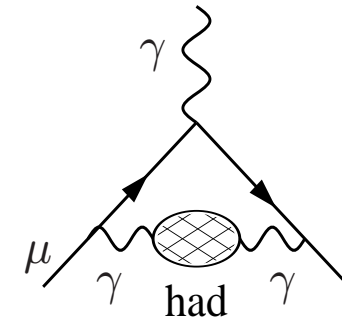
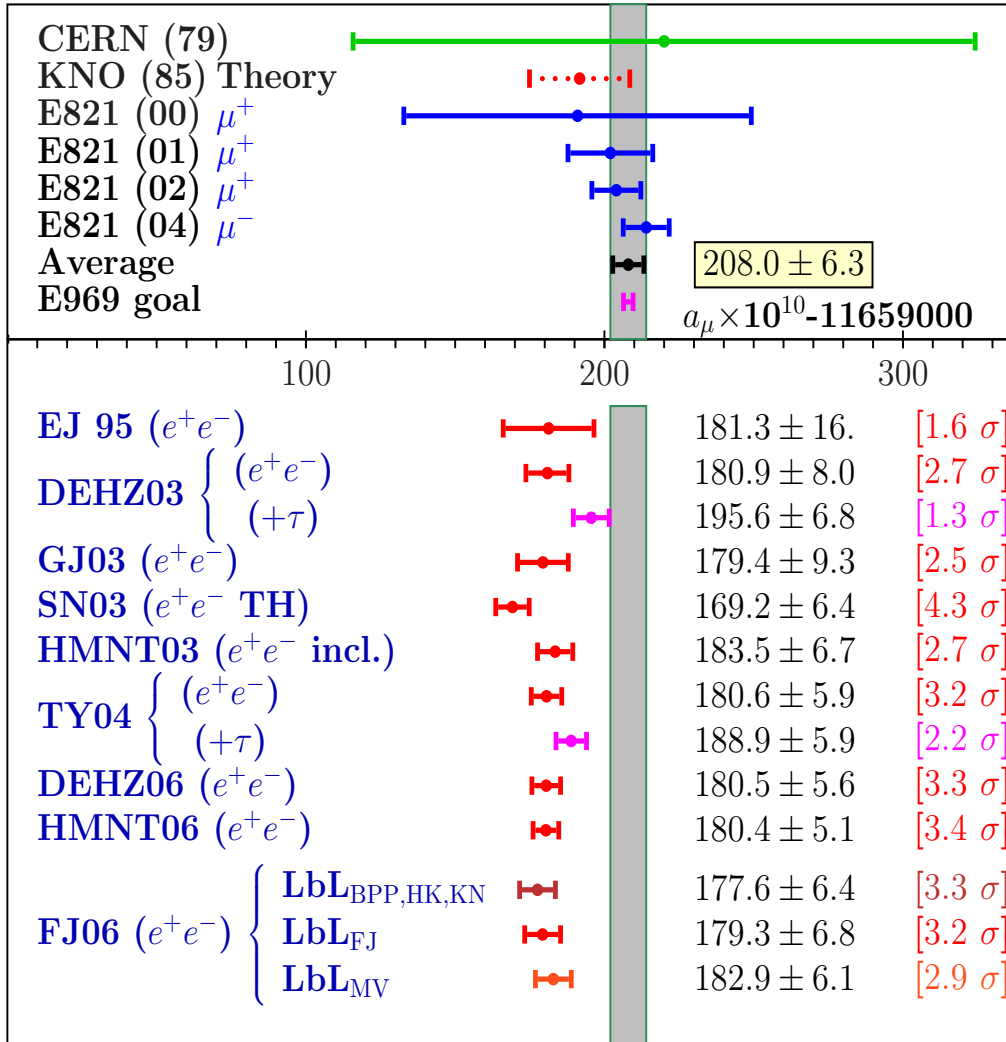
The errors are due to: a/ $\mathcal{O}(\alpha^5)$, b/ α

g-2 for muon (Jegerlehner'07)

New Physics?

$$\delta a_\mu = (287 \pm 91) 10^{-11}$$

3.2 σ



Rachunek zaburzeń

- Musimy sumować wkłady, w tym z większą liczbą wierzchołków
- Ale to jest nieskończony szereg...
- W wielu wypadkach nie musimy sumować do końca – np. w QED sprzężenie proporcjonalne do ładunku elektrycznego – to jest małe sprzężenie

$$e^2 \rightarrow \alpha = e^2 / (4 \pi \hbar c) \sim 1/137$$

czyli kolejny człon w szeregu $\sim 1\%$

- Rachunek zaburzeń (r.perturbacyjny) - precyzja

Renormalizacja

- Niezbieżność szeregu sumującego różne wkłady i energie/pędy cząstek wirtualnych
- Idea renormalizacji: 1948 Kramers dla QED – nieskończoności występują tylko w kilku określonych wyrażeniach
- Nieskończoności nie ma w anomalnym momencie magnetycznym mionu ani elektronu bo jeśli występują to takie same w obliczeniach ładunku elektrycznego oraz momentu magnetycznego. Możemy wyrazić jedno przez drugie a dla ładunku el. przyjmując wartość doświadczalną – czyli to jest *trik*

Trik bardzo skuteczny

nazwa uczona: renormalizacja

- Jeżeli nieskończoności tylko w wolnych parametrach teorii (każda teoria ma takie parametry, np G_N - stała grawitacyjna)
- Ładunek elektryczny jest wolnym (wyściowym) parametrem QED – „input” teorii, masa elektronu m_e – też.
- Skoro teoria nie przewiduje tych parametrów – to możemy w nich ukryć nieskończoności

Renormalizacja – działa dobrze

- Ale świadczy o niedoskonałości teorii
- Dobrze, że można kłopotliwe człony wyizolować
- Problemy teorii typu QED:
 - teoria jedynie perturbacyjna
 - występują nieskończoności (choć można je izolować)
- Bardzo precyzyjne przewidywania

Nierenormalizowalność

- Są teorie z nieskończonościami zawartymi nie tylko w wolnych parametrach
- Długo sądzono że tak jest np. dla teorii z cząstkami o spinie 1 ale innymi niż foton
- Dziś wiemy, że można mieć renormalizowalne teorie z cząstkami o spinie 1 – o ile są to teorie z cechowaniem (*gauge theories*), dokładnie
→ *teorie Yanga-Millsa*
- Grawitacja inna – to teoria z cechowaniem ale nierenormalizowalna

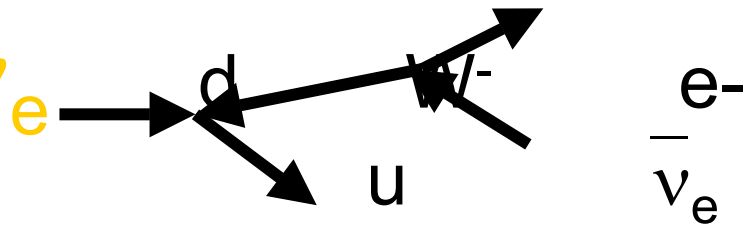
Oddziaływania słabe

- Nie prowadzą do sił działających na dużych odległościach
- Odkrycie, Becquerel 1896
radioaktywność β
- Na poziomie fundamentalnym w rozpadzie β
 $d \rightarrow u W^-$ podstawowy wierzchołek – stała sprzężenia g („ładunek słaby”) $\alpha_w = g^2/4\pi = 1/40$
większa niż α_{em} , (ale oddziaływanie słabsze niż e-m bo masa W/Z duża)
- Strzałki na liniach zgodnie z pędem dla cząstek,
a dla antycząstek strzałka przeciwna do pędu;
 W^- - antycząstka do W^+

Teoria cząstek el. 30.IV.2008

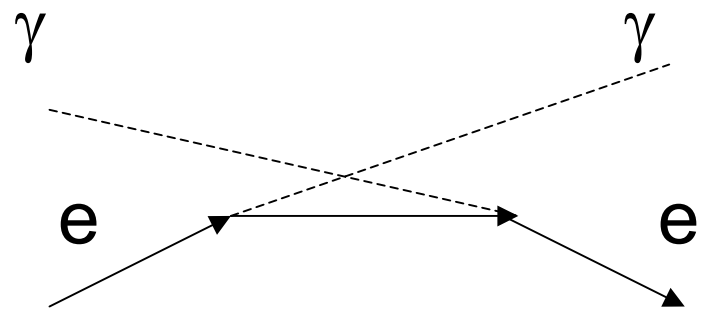
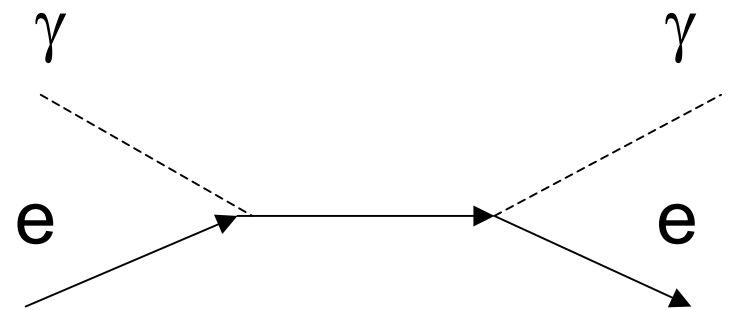
- Teoria cząstek elementarnych obejmuje opis oddziaływań elektrosłabych i silnych
- Symetria cechowania – fundament teoretyczny → wykład w maju

Rozpad $d \rightarrow u e \bar{\nu}_e$



- W jest bardzo masywne (80.4 GeV) więc w tym rozpadzie W jest bardzo wirtualne, daleko poza powłoką masy
- Rozpad $d (W^-)$ i rozpad $\bar{d} (W^+)$; W ma spin 1 i mamy kłopoty z renormalizowalnością
- Aby dokładnie przedyskutować ten problem najpierw przeanalizujemy rozpraszanie Comptona

$$\gamma e \rightarrow \gamma e$$



Zachowanie teorii dla dużych energii

- Źle jeśli prawdopodobieństwo procesów rośnie z energią, gdyż może przekroczyć 1
- Rozpraszanie Comptona – każdy diagram daje wkład rosnący z energią ale suma diagramów – OK (kasowanie)
- Kasowanie wynika ze struktury teorii (symetria cechowania) -

Reguły gry (Reguły Feynmana)

- Wchodzący lub wychodzący foton (cząstka wektorowa o spinie 1) – czynnik E
($E = \text{energia}$)

Foton wirtualny – czynnik 1

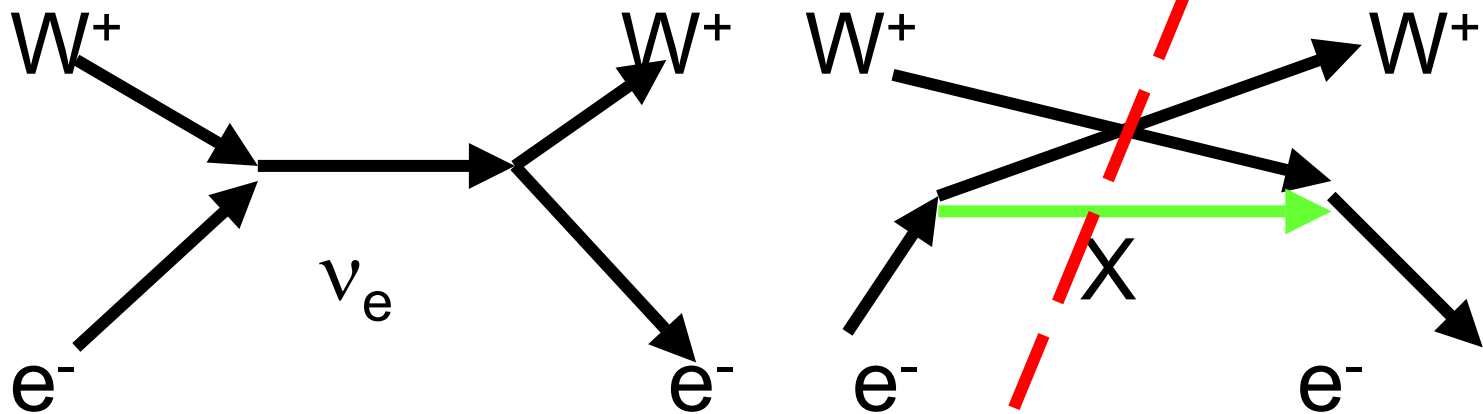
- Wchodząca lub wychodząca cząstka o spinie $\frac{1}{2}$ czynnik \sqrt{E} , wirtualna cząstka o spinie $\frac{1}{2}$ - czynnik $1/E$
- Wchodząca lub wychodząca cząstka o spinie 0 - czynnik 1, wirtualna cząstka o spinie 0 - czynnik $1/E^2$
- Ale są jeszcze dodatkowe czynniki wynikające ze sprzężeń, np wirtualny W sprzęgający się do dwóch rzeczywistych (na powłoce masy) cząstek z obu końców – czynnik $1/E^2$

Gramy: proces Comptona

- Amplituda rośnie z energią jak E^2 (\sqrt{E})² $1/E = E^2$
a prawdopodobieństwo E^4
- Złe zachowanie każdego z diagramów
ale w sumie (dodajemy amplitudy!)
kasuje się te wkłady i uzyskany wynik jest
niezależny od energii

Rozpraszanie W^+

- Zastępując γ przez W



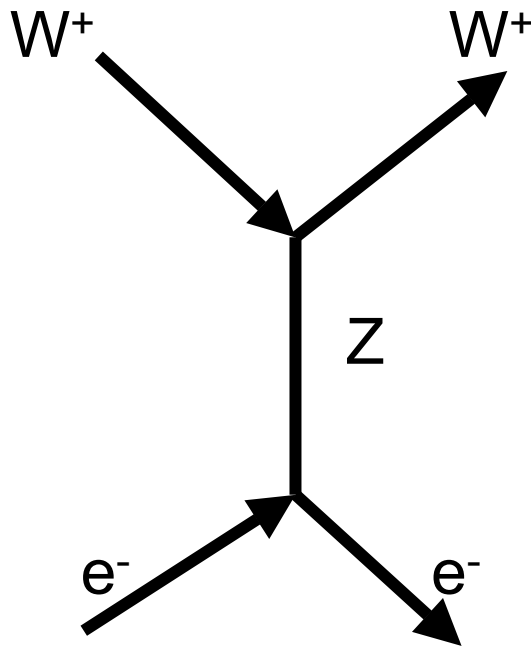
Zachowanie ładunku: X^{--} podwójnie naładowana

cząstka – **ale taka cząstka nie istnieje!**

Zachowanie złe (amplituda): $E^2 (\sqrt{E})^2 1/E = E^2$

Neutralny bozon Z konieczny!

- Diagram z bozonem Z



Zachowanie E^2 (\sqrt{E})² (wierzchołek E)/ $E^2 = E^2$, i dobry znak sprzężenia WWZ – kasowanie jak dla procesu Comptona !

Cena – nowa cząstka bozon Z z określonym oddziaływaniem

Znaleziono ją – bozon Z z masą 92 GeV

→ sukces teorii

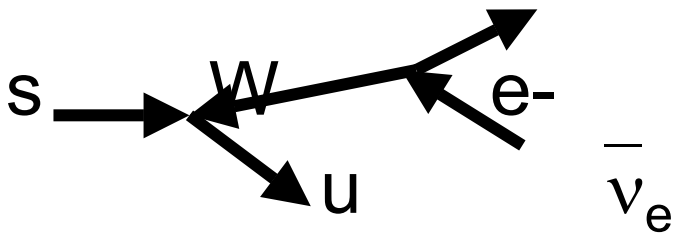
Kwark powabny (charmowy) c

- Cząstka Λ (podobna do neutronu) masa 1116 MeV: zawiera kwarki d u s
(stąd wiemy że kwark s jest o 200 MeV cięższy niż d)
- Rozpad Λ : Jeden z kanałów jak dla d tylko zamiana $d \rightarrow s$
- Exp. stała sprzężenia dla wierzchołka s - u - W mniejsza o czynnik ok. $\frac{1}{4}$ od stałej sprzężenia dla d - u - W (tanges kąta Cabibbo $\tan 13^\circ$):

$$suW \sim g \sin(\phi_c)$$

$$duW \sim g \cos(\phi_c)$$

Rozpad $s \rightarrow u$



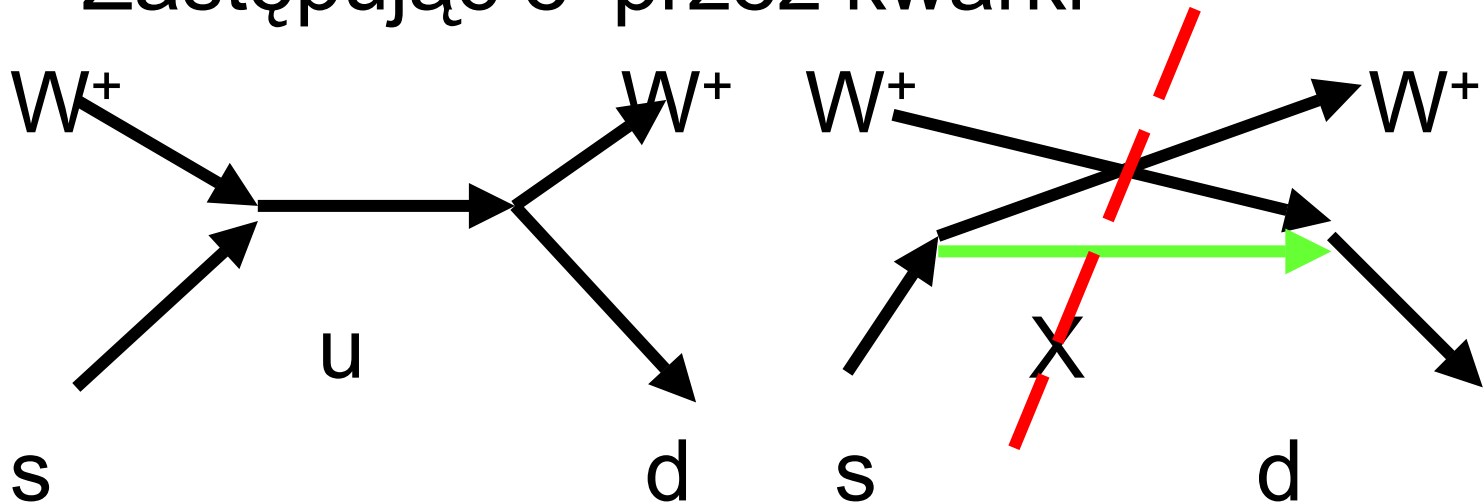
The diagram shows a quark transition. An incoming s quark line from the left meets a vertex. From this vertex, a W boson line goes up and to the right, and a u quark line goes down and to the right. The W boson line then meets a second vertex. From this second vertex, an e^- electron line goes up and to the right, and a $\bar{\nu}_e$ anti-electron neutrino line goes down and to the right.

Analiza rozpraszania W na kwarkach
z uwzględnieniem tych sprzężeń



Rozpraszanie W^+ na kwarkach

- Zastępując e^- przez kwarki



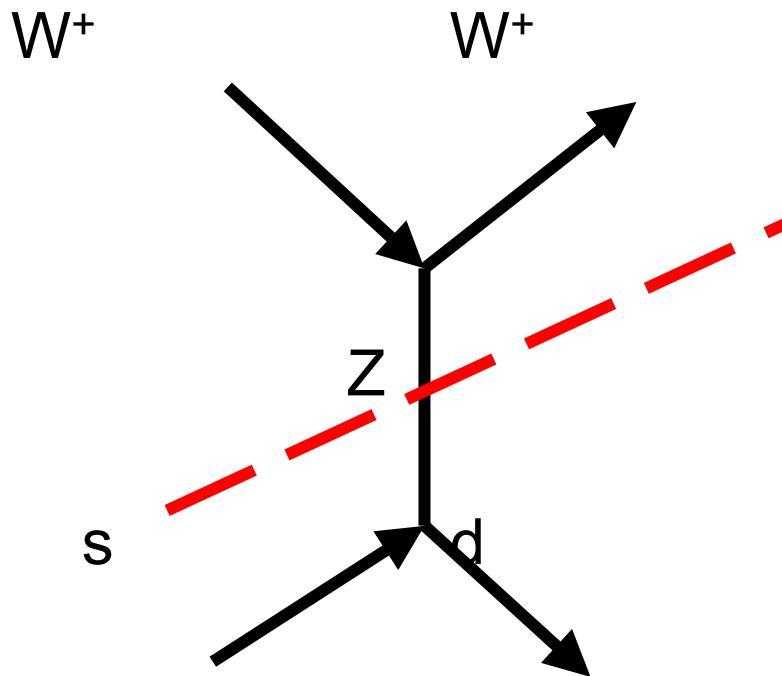
Zachowanie ładunku:

X z ładunkiem $-4/3$ nie istnieje !

Zachowanie złe (amplituda): $E^2 (\sqrt{E})^2 1/E = E^2$

Diagram z bozonem Z – tu nic nie pomoże

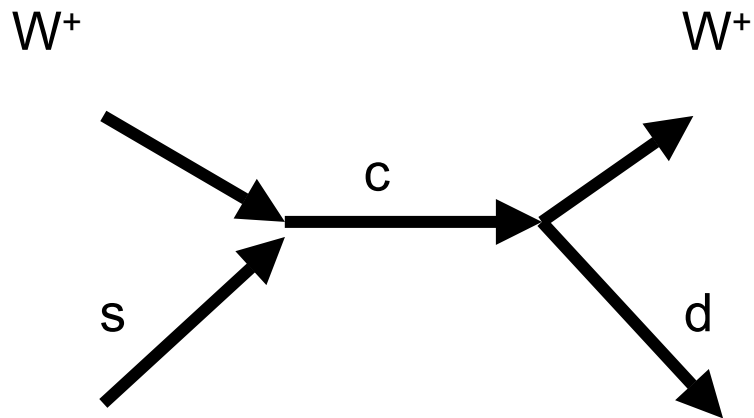
- Diagram z bozonem Z



- Ten proces nie istnieje – brak prądów neutralnych ze zmianą zapachu !

„absence of FCNC”

Rozpraszanie $W^+ s \rightarrow W^+ d$



Sprężenia:

$$\begin{aligned} \text{sc } W & \text{ jak } \text{ du } W > \cos(\phi_c) \\ \text{cd } W & & -\sin(\phi_c) \end{aligned}$$

**dzięki minusowi
kasowanie złego
zachowania dla
dużych energii**

Kwark c

- Dodajmy proces w kwarkiem c

$$W^+ s \rightarrow c \rightarrow W^+ d$$

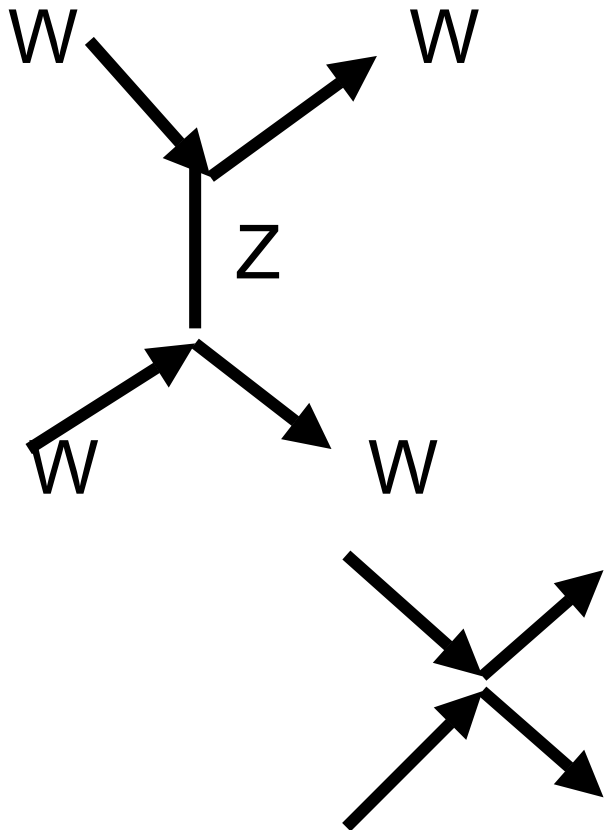
(postulujemy istnienie cząstki o określonych własnościach, m.in kąt Cabibbo..)

- Kasowanie się członów $\sim E^2$
- Kwark c odkryty w 1974 r –
sukces teorii

Rozpraszanie bozonów W na sobie

$\sim E^4$ ($E^4 E^2/E^2$) - coraz gorzej...

- Procesy z samymi bozonami W



Nowy typ procesu!
kasowanie E^4 , ale nie E^2

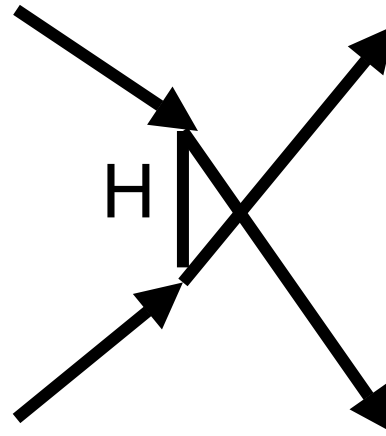
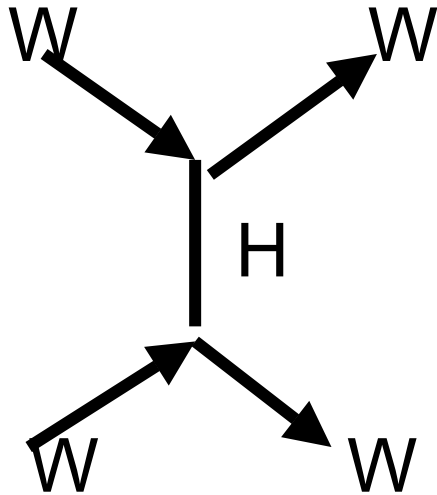
Człon $E^2 \rightarrow E^2 M^2$

- uwaga cząstka Higgsa!

- Z analizy wymiarowej wynika że pozostają człony typu $E^2 M^2$
(M- masa bozonów W lub Z)
- Musimy coś jeszcze dodać tak aby te człony usunąć – cząstka o spinie 0 sprzęgająca się do W i Z odpowiednio (bozon H)

Rozpraszanie bozonów W na sobie

- wkład od H



Sprzężenia proporcjonalne do mas cząstek do których H się sprzęga - dobre zachowanie prawdopodobieństwa dla procesu $WW \rightarrow WW$

Koniec?

- Cząstka H sprzęga się do każdej cząstki masywnej
- Nie znaleziona dotychczas
- Oczekujemy: masa ok. 100 GeV
- Teoria oddziaływań EW – renormalizowalna, tylko H potrzeba i zamykamy teorię

Generacja masy?

- Ponieważ H sprzęga się do masy zakłada się powszechnie, że H jest związana z generacją mas cząstek
- Masy- więc oczekiwany związek z grawitacją (i strukturą Wszechświata)

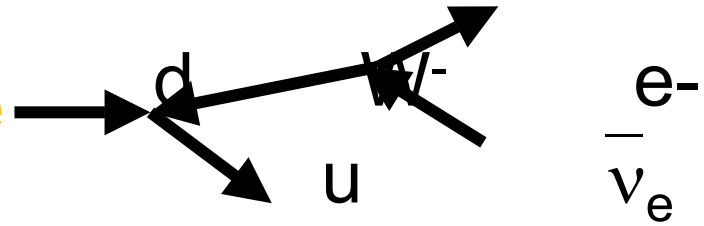
Parametr ρ

- Inne procesy rozpraszania WZ, ZZ
 - wszystkie problemy „rozwiązuje” tylko jedna cząstka H o ile określony związek mas W i Z
$$\rho = M_W^2 / (M_Z^2 \cos^2 \theta_W) = 1$$
- Poprawki kwantowe (wyższe rzędy szeregu) modyfikują ten związek nieco
- Kwark t daje poprawkę rosnąca z m_t^2
 - to pozwoliło wyznaczyć masę zanim odkryto kwark t (1995)

Nobel 1999 (Veltman, t'Hooft)

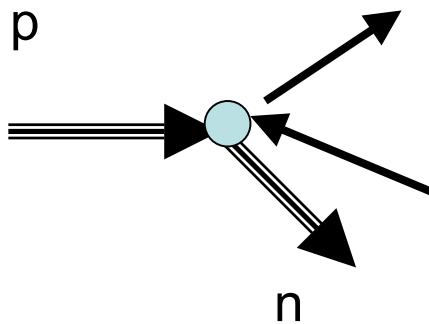
- Struktura poprawek zgodna z symetrią cechowania

Rozpad $d \rightarrow u e \nu_e$



- W bardzo masywne (80.4 GeV) wymiana opisuje wyrażenie $1/(q^2 - M_W^2)$ wielkość q^2 – mała w porównaniu do M_W^2

$$G_F/\sqrt{2} = g^2/(8 M_W^2)$$



4-fermionowe oddziaływanie Fermiego
 efektywne sprzężenie $G_F = 10^{-5} m_p^{-2}$
 słabe w porównaniu z α_{em}

Oddziaływania słabe
Symetria cechownia itp.
Spontaniczne łamanie symetrii
Generacja mas

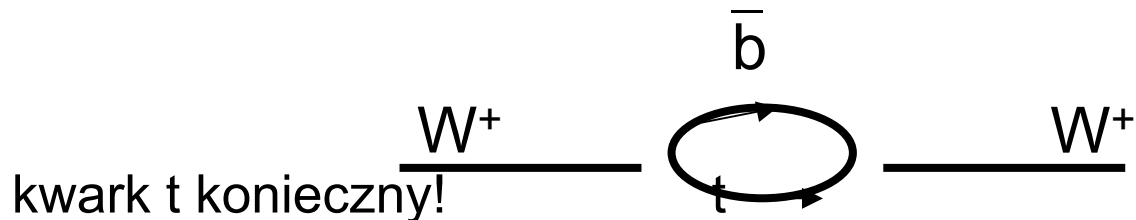
7 V 2008

Poszukiwanie cząstki Higgsa

- Jedna czy więcej?
- Mierzac ρ – jedna cząstka H wystarczy
- Poprawki do masy Z (energia własna Z) – wkłady osobliwe ale się kasują

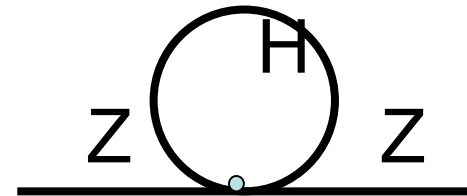
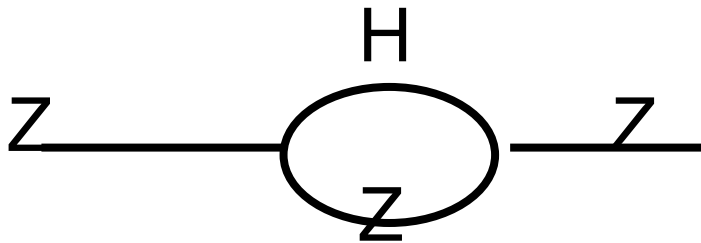


- Poprawki do masy W



Poprawki do mas W/Z od H

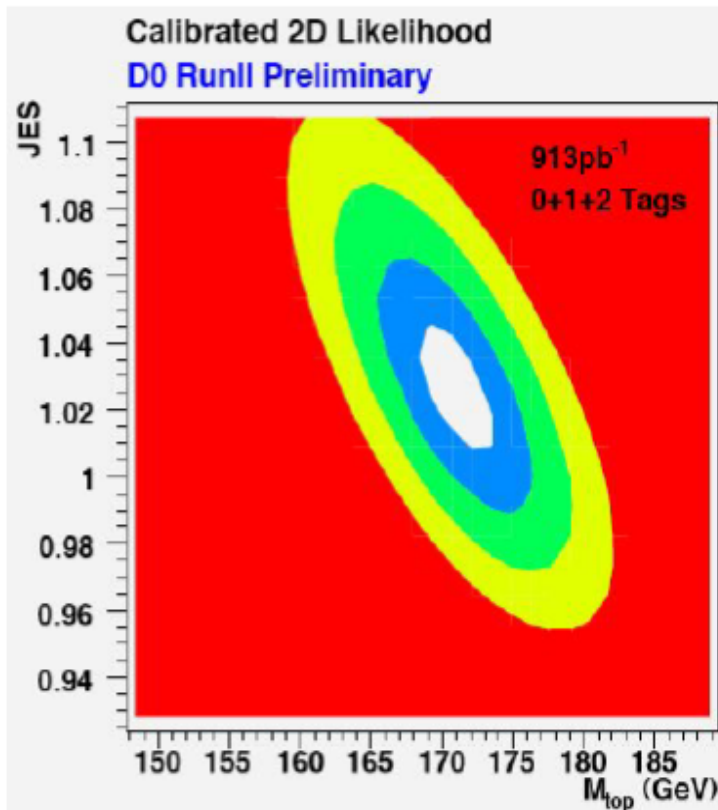
- Pętle z H



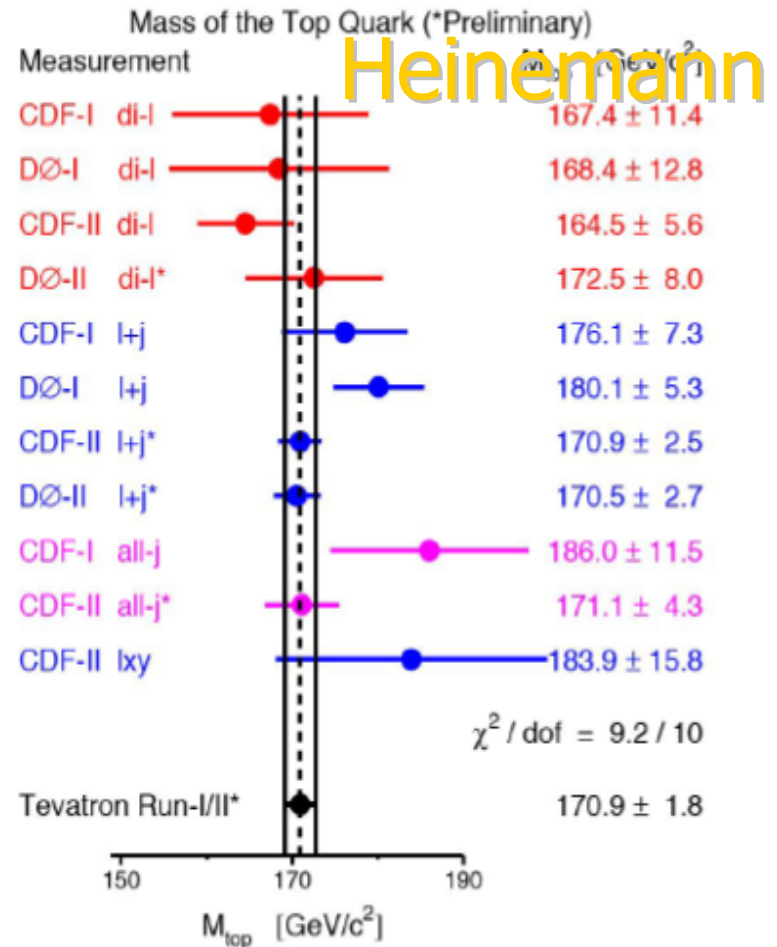
- Zmieniają stosunek mas W i Z ale znacznie mniej niż b i t
- Ale te wkłady od H powodują że przewidywania na masę t niepewne 5%
Po odkryciu kwarku t → oszacowania na masę H około 100 GeV

Top Quark Mass Results

June 2007



$$m_{\text{top}} = 170.9 \pm 1.8 \text{ GeV}/c^2$$



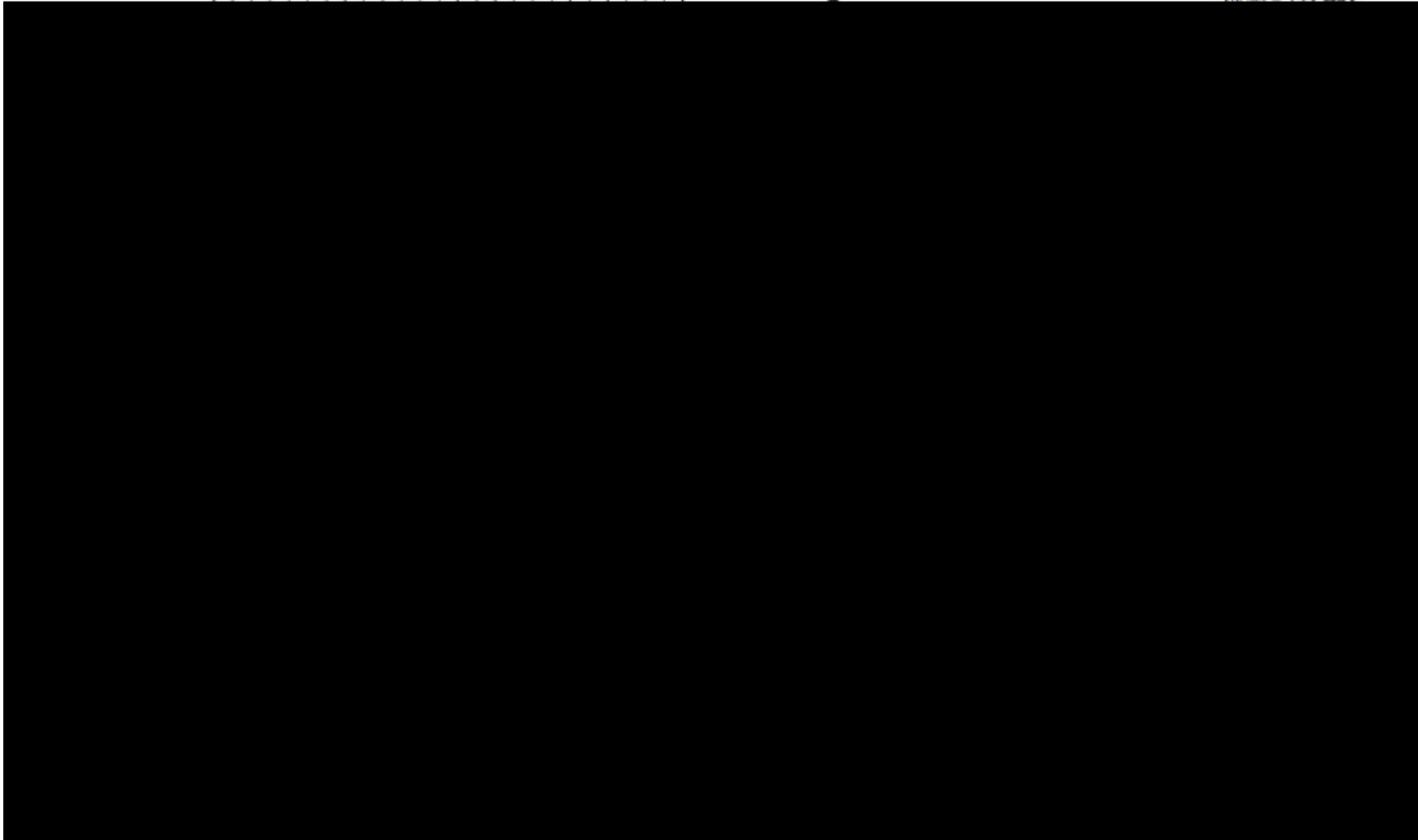
Prediction from LEP1, SLD, M_W, Γ_W : $178.9^{+11.7}_{-8.6} \text{ GeV}/c^2$

June 2007

M_W , m_{top} and m_{Higgs}

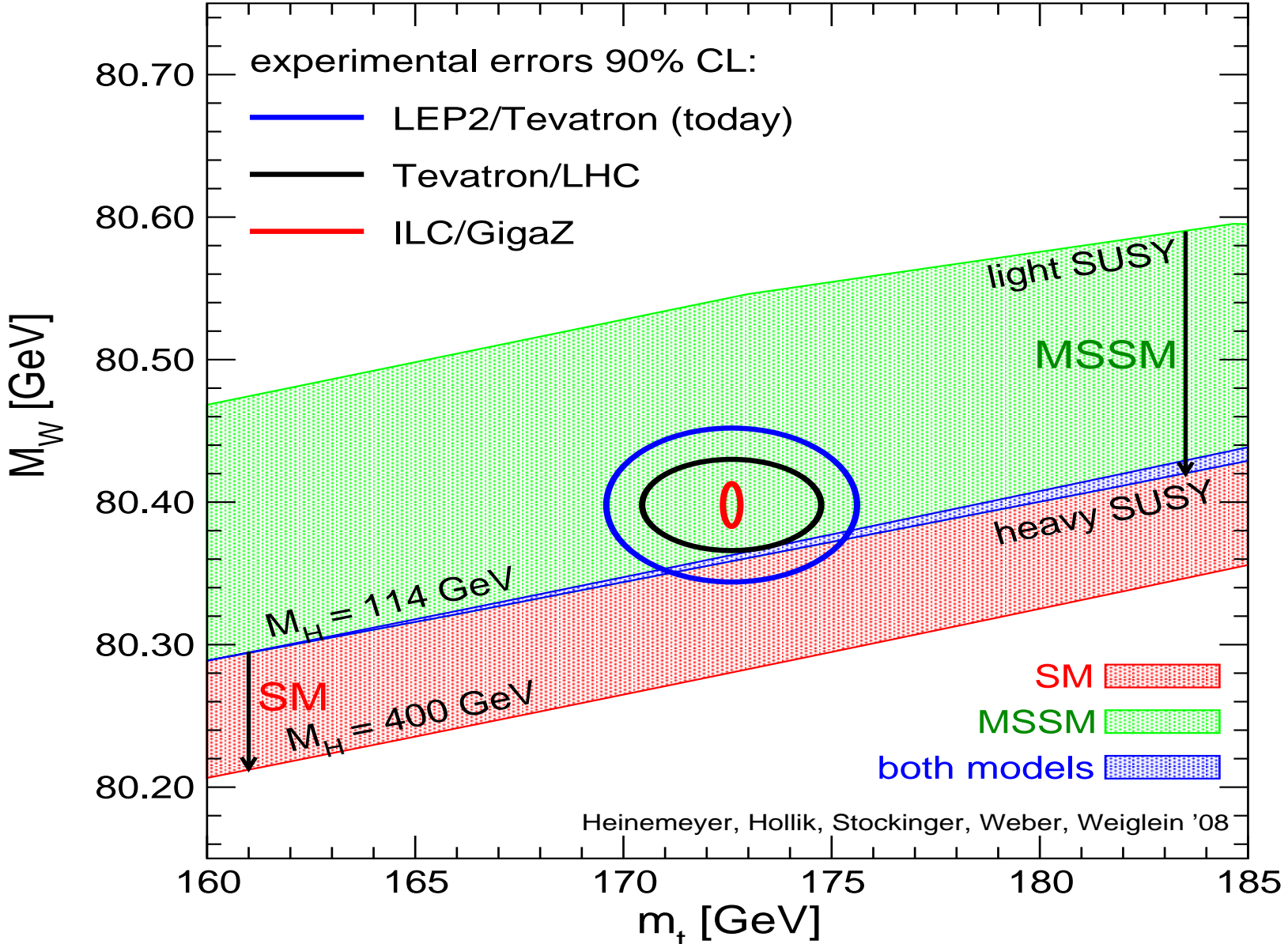
Heinemann

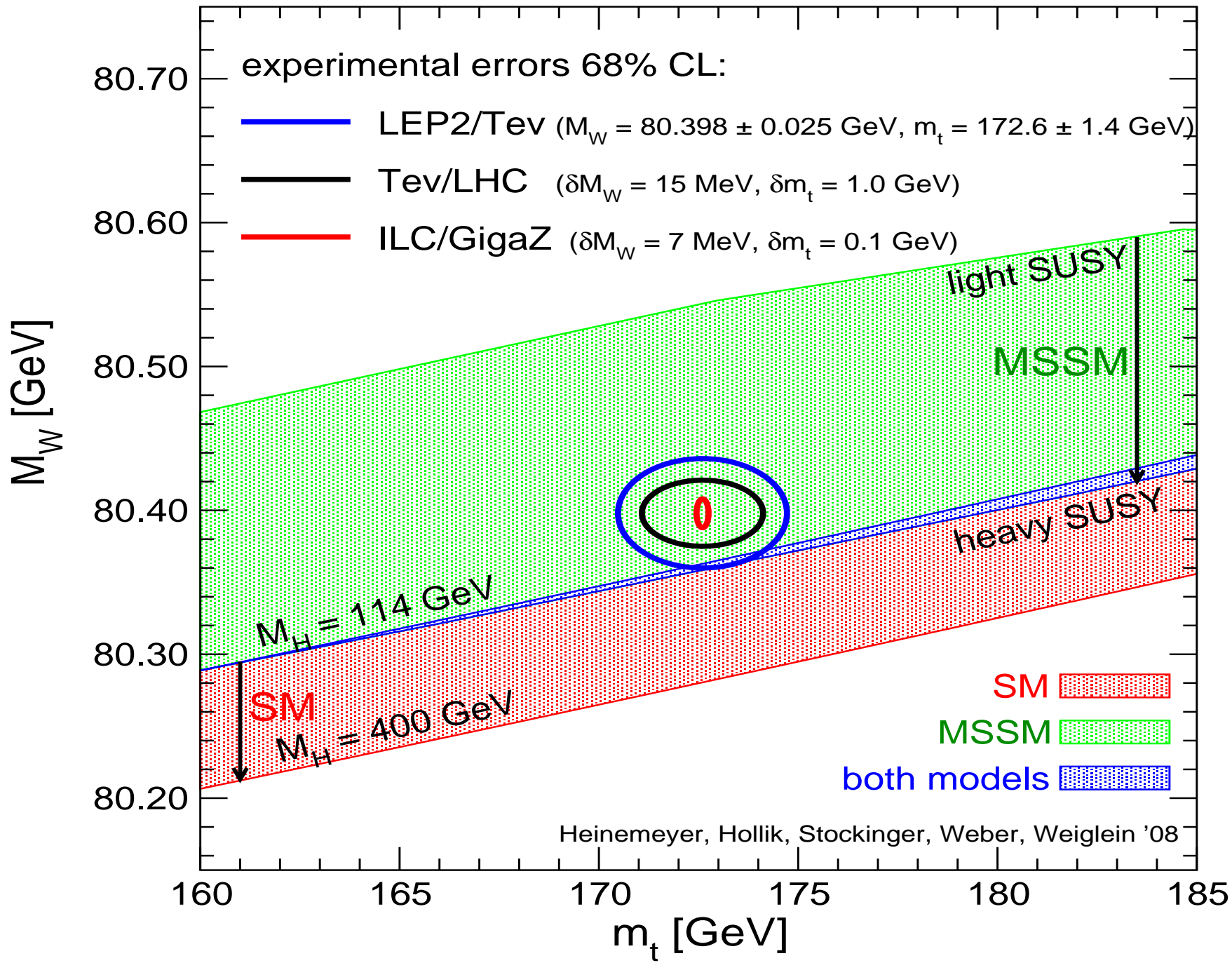
$m_{\text{Higgs}} = 144 \text{ GeV}$



Spring 2008

$M_W = 80.398 \pm 0.025$, $M_t = 172.6 \pm 1.4$ GeV





Samo-oddziaływanie cząstek H

- Dwie cząstki H przyciągają się- mogą powstać stany związane a pewna część energii ujemna (en. wiązania)
- Stan związany wielu (nieskończenie wielu) cząstek H i całkowita energia ujemna takiego stanu. Jest on rozciągły przestrzennie..
- Takie obiekty mogły powstać na początku Wszechświata, i oddziaływanie grawitacyjne
- Wszechświat wielkości piłki futbolowej - zakrzywienie Wszechświata
- Teorie, że Wszechświat był początkowo zakrzywiony w przeciwny sposób i po wystąpieniu stanów H zniesienie krzywizny → dziś Wszechświat płaski

The theory ends here -Veltman

- Samo-oddziaływanie H proporcjonalne do masy H
- Dla dużych mas (>500 GeV) załamuje się rachunek zaburzeń
- *The theory ends here. We need help. Experiments must clear up this mess.*
→ LHC pp, ILC e^+e^- (PLC $\gamma\gamma$, $e\gamma$)

Symetria

- Symetria – idea za pomocą której człowiek w ciągu wieków starał się zrozumieć i ustanowić porządek, piękno i doskonałość – H. Weyl (Getynga)
 - Pojęcie symetrii cechowania Weyl 1918
 - 1918 E. Noether związek symetrii i praw zachowania: symetria względem przesunięcia w czasie – zachowanie energii
w przestrzeni – .. pędu
obroty – ..momentu pędu
- Symetrie wewnętrzne np. prawo-lewo

Symetria globalna i lokalna

- Globalna – niezależnie od położenia i czasu
- Lokalna – zależna od (x,y,z) i t

Symetria (niezmienniczość) cechowania

- Względem zmiany skali (wycechowania) przyrządu pomiarowego
- W wersji globalnej – zmiana kalendarza, skali temperatury czy położenia południka zerowego – nie wpływa na odstęp czasu, ilości ciepła potrzebnego do podgrzania wody czy czasu podróży. Podobnie zmiana nominału pieniądza → globalnie niezmiennicze przychody czy straty firmy.
- W wersji lokalnej – całkowity chaos..

Symetria lokalna

- Zmiana opisu np. elektronu przez zmianę fazy

$$\psi' = \psi e^{i\theta}$$

nie wpływa na prawdopodobieństwo
(taka niezmienniczość teorii istotnie występuje
gdy globalna zmiany fazy)

- Lokalna zmiana opisu elektronu – OK,
jeżeli jest rekompensowana przez zmienność
lokalną innego czynnika
- Pojawiają się oddziaływania pomiędzy różnymi
elementami układu i ścisłe związki formy
oddziaływania z istnieniem symetrii lokalnej

Zasada cechowania

- Zasada cechowania jako konstrukcja opisu oddziaływań: niezmienniczość opisu względem **lokalnej** zmiany fazy fermionów o ile istnieje odpowiednie oddz. z odpowiednim charakterem kompensujących zmian opisu (cechowania) nośników tych oddziaływań – bozonów cechowania
- E-m: zmiana fazy (symetria $U(1)$) elektronu \rightarrow istnienie oddz e-m, które można cechować odpowiednio (cechowanie fotonu)
- Swoboda cechowania – znany fakt z fizyki klasycznej: wybór punktu (poziomu) zerowania się potencjałów elektrycznego lub grawitacyjnego

Oddziaływania elektroslabe

- bozony W i Z masywne

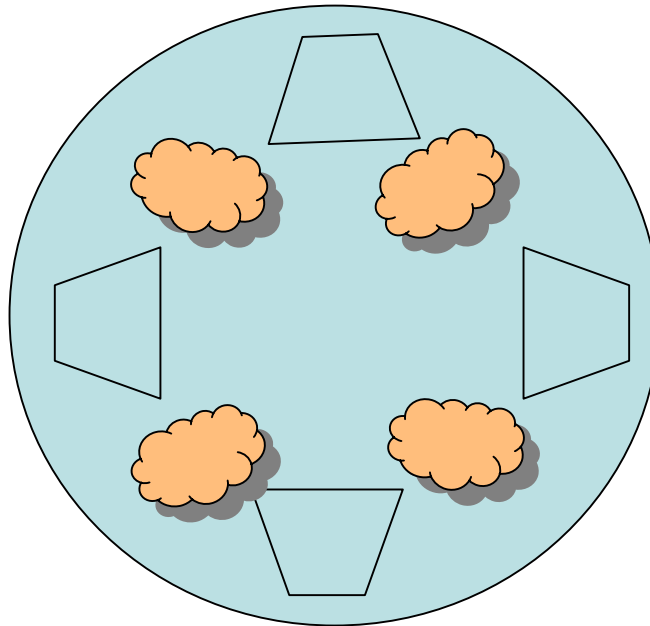
- Symetria wzg. lokalnej grupy cechowania przekształceń (transformacji) unitarnych $SU(2) \times U(1)$, nośniki - W^\pm , Z i γ
 $SU(2)$ – grupa nieabelowa (nieprzemienne) wynik złożenia dwóch przekształceń zależy od kolejności jak mnożenie macierzy
Teorie z cechowaniem typu Yanga- Millsa (nieabelowe)
- Cząstki W, Z , foton i fermiony (elektron, muon, kwarki...) zgodnie z tą symetrią muszą być bezmasowe, człony masowe łamią tę symetrię, ale przecież te cząstki (poza fotonem) nie są bezmasowe!
- Generowanie mas w specjalny sposób - **spontaniczne łamanie symetrii** SSB

Spontaniczne łamanie symetrii- np.

ferromagnetyk, domeny poniżej temp Curie, a oddziaływanie dipoli magn. nie zależy od kierunku

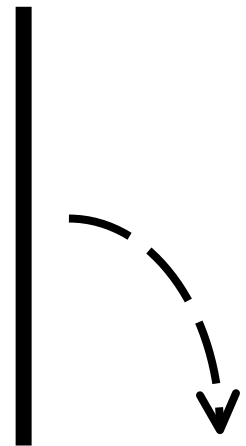


- Wybierz ciasteczko (lewe-prawe?)–



a inni muszą się dostosować

- Pionowy kijek – gdzie upadnie?



Mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa

- Schwinger 1962 – łamanie symetrii lokalnej i globalnej różnią się; gdy lokalna nie muszą się pojawiać bezmasowe cząstki (bozony Goldstone'a)
- Anderson 1963 – nadprzewodnictwo to też przykład SSB oddz. e-m a nie pojawia się bezmasowa cząstka, wie może w innych lokalnie symetrycznych teoriach tak będzie
- R. Brout i F. Englert (Phys. Rev Lett. 13, 1964, 321) opis mechanizmu SSB dla teorii z cechowaniem lokalnym
- P. Higgs, Phys.Rev.Lett. 13, 1964, 508, Phys. Lett. 12, 1964, 132 (praca początkowo odrzucona jako nieistotna dla fizyki cząstek elementarnych)

Generacja masy bozonów W i Z

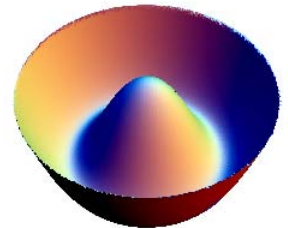
- Połączenie lokalnej symetrii cechowania i spontanicznego łamania symetrii – spójny opis oddziaływań EW
- Nieobserwowane bozony Goldstona po sklejeniu z nieobserwowanymi bezmasowymi bozonami cechowania tworzą masywne bozony W^\pm i Z
- Foton pozostaje bezmasowy
$$SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)_{em}$$
- Również fermiony dostają masę

Mechanizm BEH przewiduje istnienie neutralne, bezspinowej cząstki – bozonu Higgsa H

- Wszystkie sprzężenia H ze znanymi cząstkami takie jakie wynikają z wymogów kasowania się niewłaściwych członów !!
- Masa Higgsa wolnym parametrem
- Skąd ta cząstka się bierze? Musimy coś dodać – dodajemy dublet pól skalarnych (zespolone). To oznacza dodanie 4 rzeczywistych pól, 3 są użyte na zbudowanie fizycznych cząstek W^\pm i Z a pozostałe pole opisuje cząstkę H

Symmetry - a main idea of modern particle physics

- Interactions are described by gauge principle
- Masses are generated by a spontaneous symmetry breaking (Higgs mechanism)
- Prediction: Higgs boson(s)
- **HIGGS SECTOR** – a key to underlying theory



SYMMETRY

from D. Gross talk at Photon2005

BEFORE EINSTEIN

Symmetries were regarded as consequences of the dynamical laws of nature.

AFTER EINSTEIN

Einstein recognized the relativistic symmetry implicit in Maxwell's equations and elevated it to a symmetry of space-time.

THE GEOMETRIZATION OF SYMMETRY

LOCAL SYMMETRY

GLOBAL SYMMETRY

Global symmetries are regularities of the laws of motion formulated in terms of physical events; the application of the symmetry transformation yields a different physical situation, but all observations are invariant under the transformation. The traditional symmetries discovered in nature were global symmetries, transformations of a physical system in a way that is the same everywhere in space.

LOCAL SYMMETRY

Local (or gauge) symmetries are of a totally different nature, are formulated only in terms of the laws of nature; the application of the symmetry transformation merely changes our description of the same physical situation, does not lead to a different physical situation.

SYMMETRY DICTATES DYNAMICS

1912-17 General Coordinate  Gravitation

1968-73 Gauge Invariance  Electro-Weak and Strong

THE THEORY OF MATTER and STANDARD MODEL(S)

F. Wilczek, LEPFest, Nov.2000 (hep-ph/0101187)

Theory of Matter = $SU(2)_I \text{ weak} \times U(1)_Y \text{ weak} \times SU(3)_{\text{color}}$

Theory of Matter refers to the core concepts

- quantum field theory
- gauge symmetry
- spontaneous symmetry breaking
- asymptotic freedom
- the assignments of the lightest quarks and leptons

Standard Models: Choose the number of Higgs (scalar) doublets
- 1HDM, 2HDM (MSSM), 3HDM ...

NonStandard Models are based on more radical assumptions.

See eg. *CP Study and the Nonstandard Higgs Workshop 2002-2006*
(CERN Report hep-ph/0608079)

Oddziaływania silne 14.V.2008

Kwantowa chromodynamika (QCD)

- Oddziaływania fotonów z elektronami (QED) rachunek zaburzeń, mała stała sprzężenia $\alpha=1/137$
- Oddziaływania bozonów W i Z z leptonami i kwarkami – stała sprzężenia $\alpha_w=1/40$ - oddz. słabe fundamentalne
- Oddziaływania silne fundamentalne (inaczej kolorowe), sprzężenia gluonów z kwarkami z dużą stałą sprzężenia $\alpha_s=1$
- Rachunek zaburzeń ? Nie wiemy jak obliczyć masę protonu (pionu) jako stanu związanego kwarków, ale wiele potrafimy dzięki asymptotycznej swobodzie
- Uwięzienie, asymptotyczna swoboda i skalowanie

QCD= grupa symetrii cecghowania SU(3), 3 kolory i 8 naładowanych gluonów

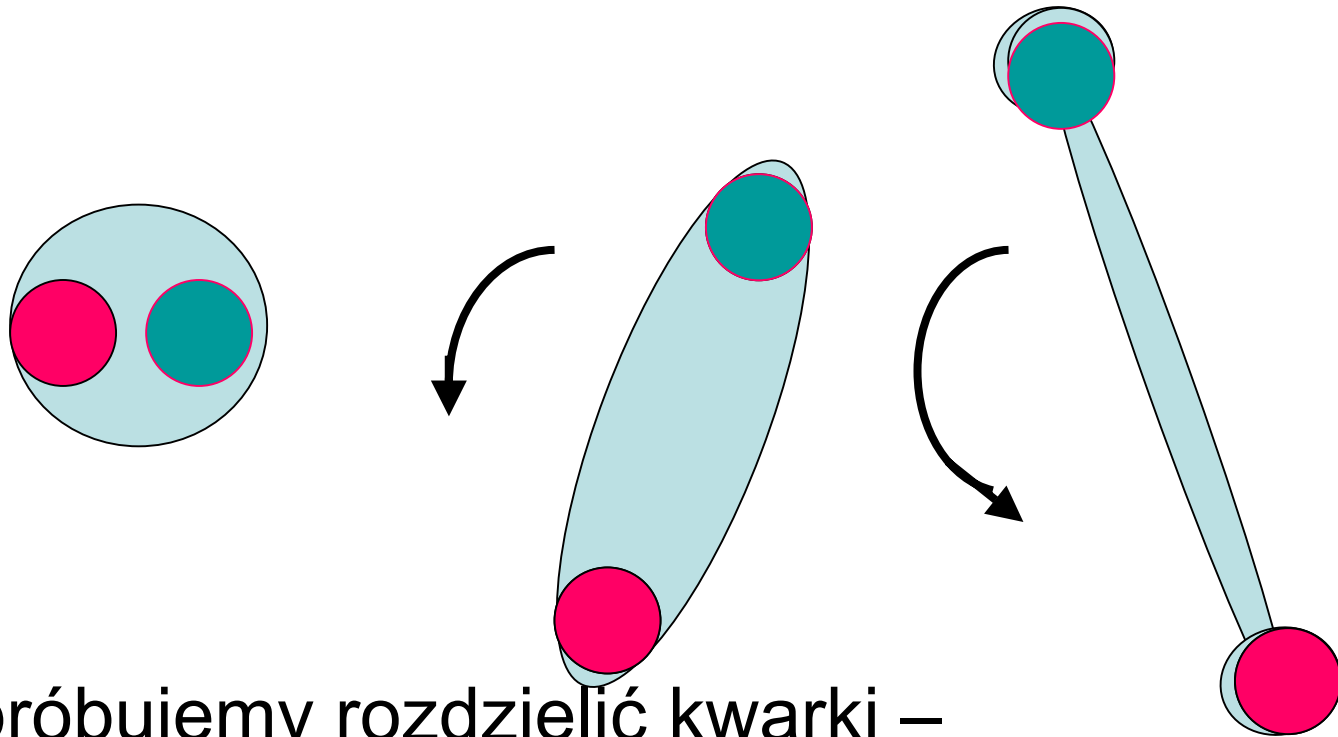
- Oddziaływanie fotonów γ w porównaniu z oddziaływaniem gluonów g : gluony są „naładowane” kolorowo i oddziałują ze sobą.
- Przykład: zał. że oprócz γ istnieje inny foton γ_c naładowany elektrycznie – oczywiście neutralny foton γ będzie oddziaływał z γ_c . Więc wokół jądra zwykłe pole elektryczne (pole Coulomba) związane z γ . Ale również powinno istnieć pole elektryczne związane z γ_c oraz oddziaływanie między nimi. To znacznie komplikują ten obraz – i tak jest z gluonami.
- Wokół każdego kwarku pole gluonowe typu Coulomba i oddz. między gluonami \rightarrow *uwięzienie*

Uwięzienie

- Foton bezmasowy – oddz. długo zasięgowe
- Gluony: też bezmasowe ale oddziaływanie krótko zasięgowe - nieskończona energia potrzebna aby to oddzielić części układu hadronowego.
- Fizyczna cząstka musi być kolorowo neutralna i nie ma długo zasięgowych sił kolorowych.
- Np. stan czerwony i anty-czerwony lub kombinacje kolorów: czerwony, zielony i niebieski zmieszane dają biały kolor światła
- Protony i neutrony – stany związane 3 kwarków o różnych kolorach, pole gluonowe wygaszone na odległościach dużych wzg. odl. między kwarkami
- Nie można usunąć jednego kwarku z protonu, bo powstałyby obiekty kolorowe → **uwięzienie**

Struna gluonowa

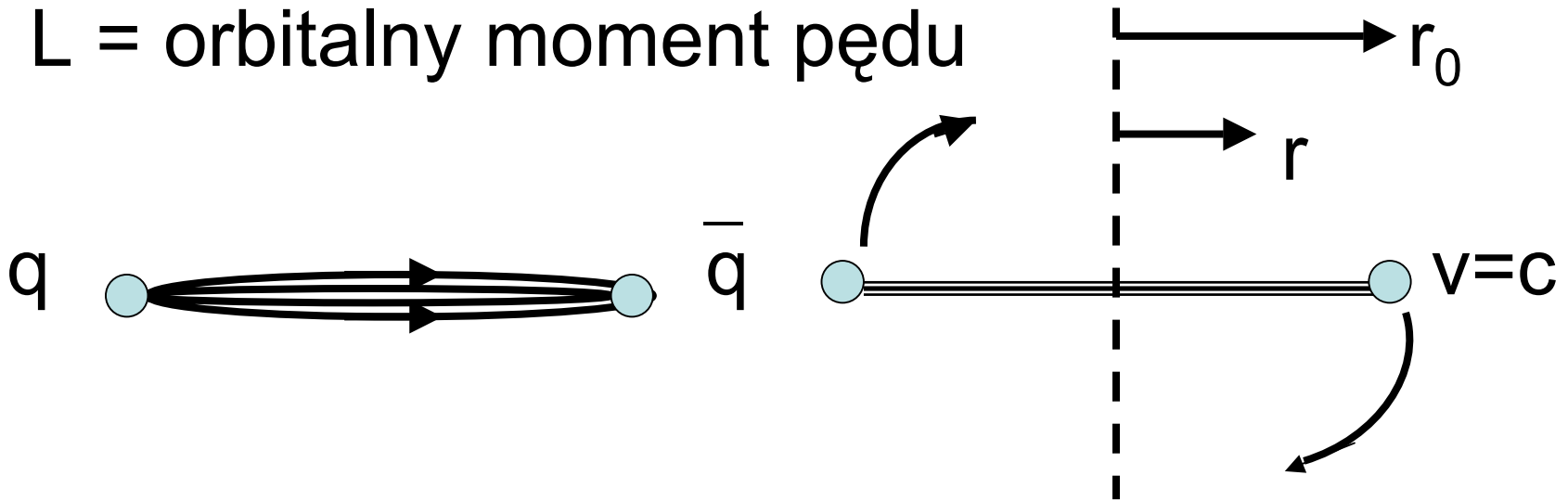
- Pole gluonowe wewnątrz hadronów – jak klej, guma



- Gdy próbujemy rozdzielić kwarki – struna gluonowa, mogą pojawić się też obroty kwarków wokół siebie-> stany wzbudzone, wyższe energie i spiny

Spin i masa cząstek – moment struny

- Związek liniowy $J = J_0 + \alpha' m^2$
- Całkowity moment pędu $J =$ orbitalny moment pędu + wewnętrzny moment pędu (spin)
- $L =$ orbitalny moment pędu



Pęd cząstki relatywistycznej: $p = mv / \sqrt{(1-v^2/c^2)}$

Model struny

- Gęstość energii na jednostkę długości struny wynosi k
- Na końcach dwa bezmasowe kwarki (q i \bar{q}) wirują z prędkością $v = c$
- Prędkość elementu na strunie w odł. r $v/c = r/r_0$
- Energia (masa) struny

$$E = mc^2 = 2s \int_0^{r_0} k \, dr / \sqrt{1 - v^2/c^2} = kr_0 \pi$$
- A moment pędu

$$L = 2 \int_0^{r_0} c^2 s \, r v \, dr / \sqrt{1 - v^2/c^2} = kr_0^2 \pi / 2 \sim c$$
- Zależność $J = \alpha' E^2 + \text{const}$ $\alpha' = 1/2\pi k \sim c = 0.93 \text{ GeV}^{-2}$
 $k = 0.87 \text{ GeV fm}^{-1}$
- Zgadza się, gdyż masa protonu $1 \text{ GeV}/c^2$,
 promień 1 fm , gęstość $k = 1 \text{ GeV fm}^{-1}$

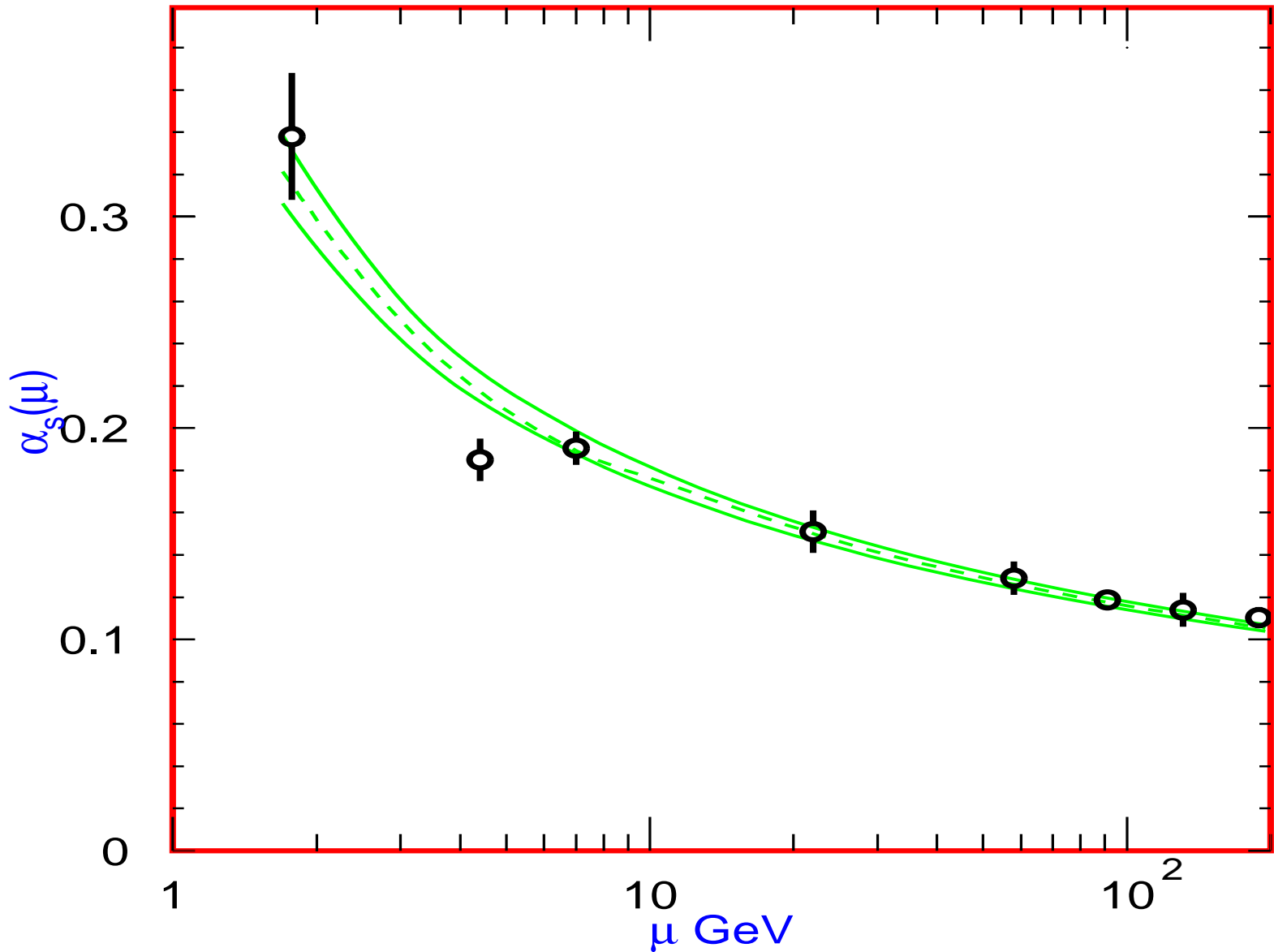
Trajektorie Reggego $J=J_0+\alpha'$ $m^2(\text{GeV}^2)$

Biegająca stała sprzężenia

- Poprawki wyższych rzędów powodują że efektywnie stałe sprzężenia „biegną” tzn. są zależne od skali energii procesu
- QED - tu rośnie α z energią
 $1/137 \rightarrow 1/128$ dla skali M_Z
- QCD - maleje ze wzrostem energii (przekazu pędu) \rightarrow asymptotyczna swoboda
- EW (SU(2)) - również maleje z energią
- Skąd różnica między QED a QCD?
Naładowane gluony , samoodziaływanie (nieabelowa grupa symetrii)

Politzer, Gross, Wilczek'74 (Nobel 2004)

Biegająca stała sprzężenia α_s

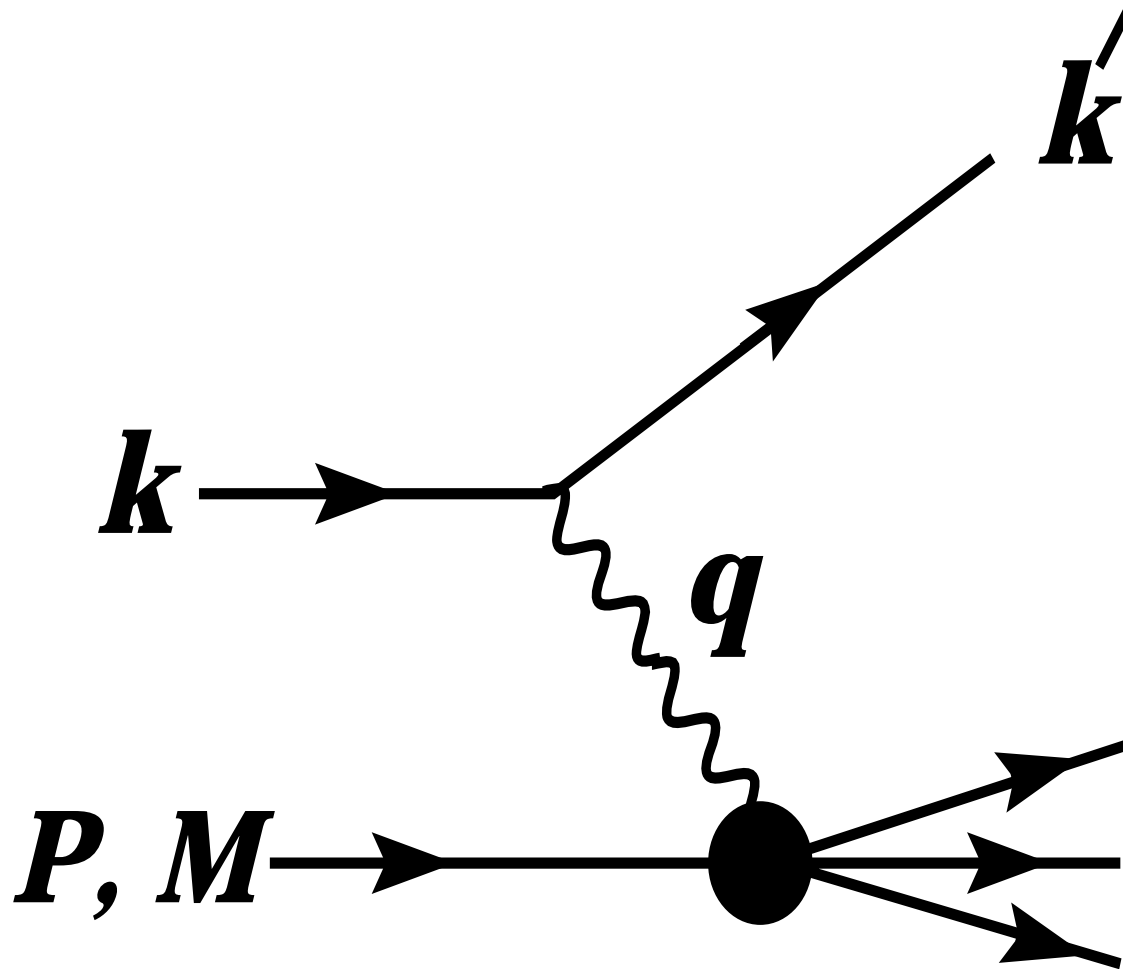


α_s a liczba fermionów n_f

Asymptotyczna swoboda dla $(33-2n_f)>0$, gdyż

$$\alpha_s(\mu_2^2) = \frac{\alpha_s(\mu_1^2)}{1 + \frac{\alpha_s(\mu_1^2)}{12\pi} (33 - 2n_f) \log(\mu_2^2 / \mu_1^2)}$$

Rozpraszanie głęboko nieelastyczne $ep \rightarrow e$ hadrony (a'la Rutherford)



Sonda
fotonowa

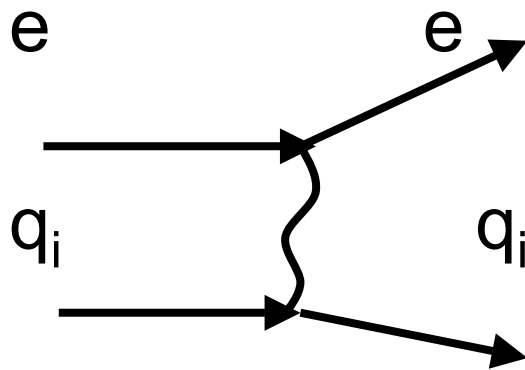
wirtualność
 $|q^2|=Q^2$

$Q^2 \gg M_p^2$

Duży przekaz
pędu do
protonu

Warunki doświadczalne: foton robi zdjęcie pewnej konfiguracji składników w protonie

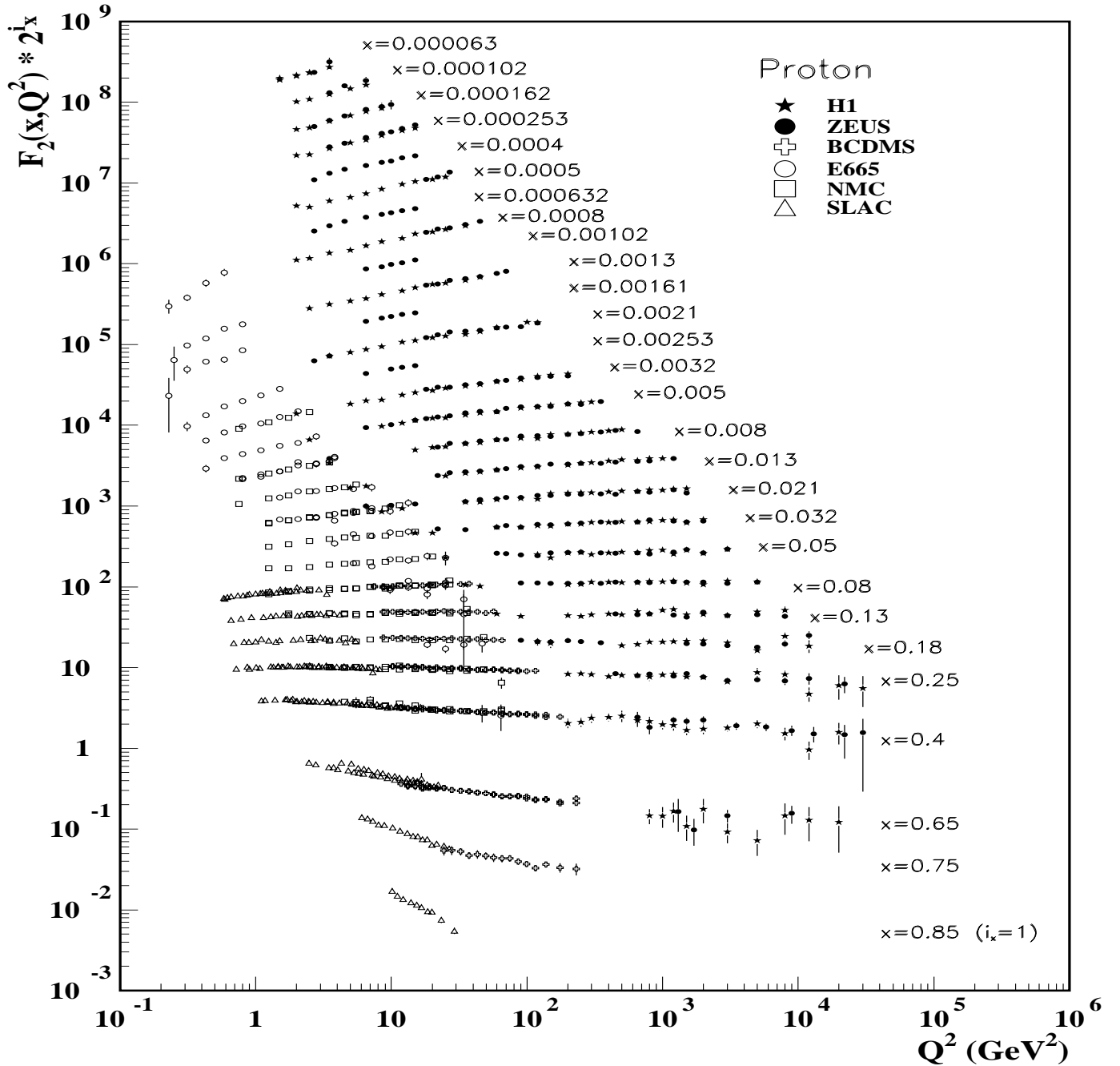
- Foton oddziałuje z prawie swobodnym kwarkiem w protonie (jak w procesie $ee \rightarrow ee$)



suma po różnych q_i

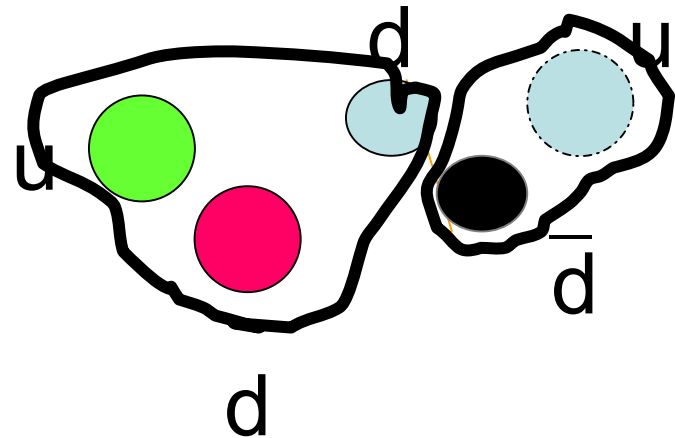
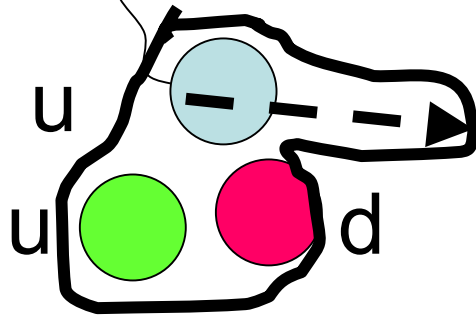
- Funkcja struktury F: suma wkładów $e_{q_i}^2 q_i(x, Q^2)$
 $x_{Bj} = Q^2 / (2 p_p q) = x$ część pędu protonu niesiona przez kwark q (parton) Feynman
- Skalowanie: F nie zależy od Q^2 Bjorken 1967

F₂



Produkcja hadronów $eq \rightarrow eq$

- Wybijanie kwarku i kreacja pary kwark-antykwarlek ze struny gluonowej
- jak $p(uud) \rightarrow n(ddd) \pi^+$



Dżety (strugi) hadronowe

- Po wybiciu kwarku w procesie który nazywamy *twardym* , tzn pędy poprzeczne $> 1 \text{ GeV}$ (rach. zaburzeń)
- następuje proces fragmentacji kwarku w kwarki i gluony – proces półtwardy
(rachunek zaburzeń, ale suma wszystkich
rzędów w α_s)
- a następnie proces hadronizacji
(mała skala energii – procesy miękkie, modelowanie, efekty nieperturbacyjne)
- Pamięć po wybitym kwarku – dżety hadronowe

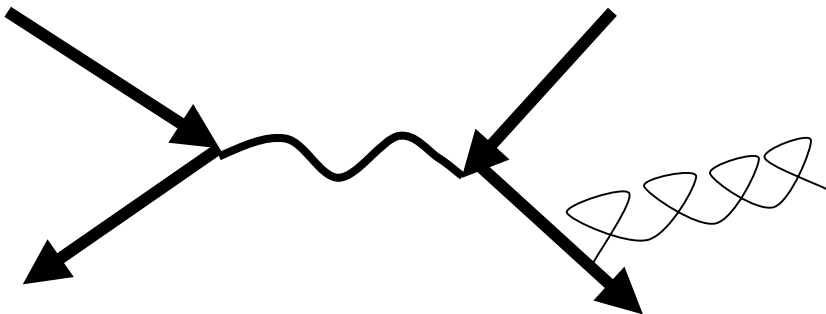
Czy są dżety hadronowe pochodzące z gluonu?

- Tak, czekamy na Nobla

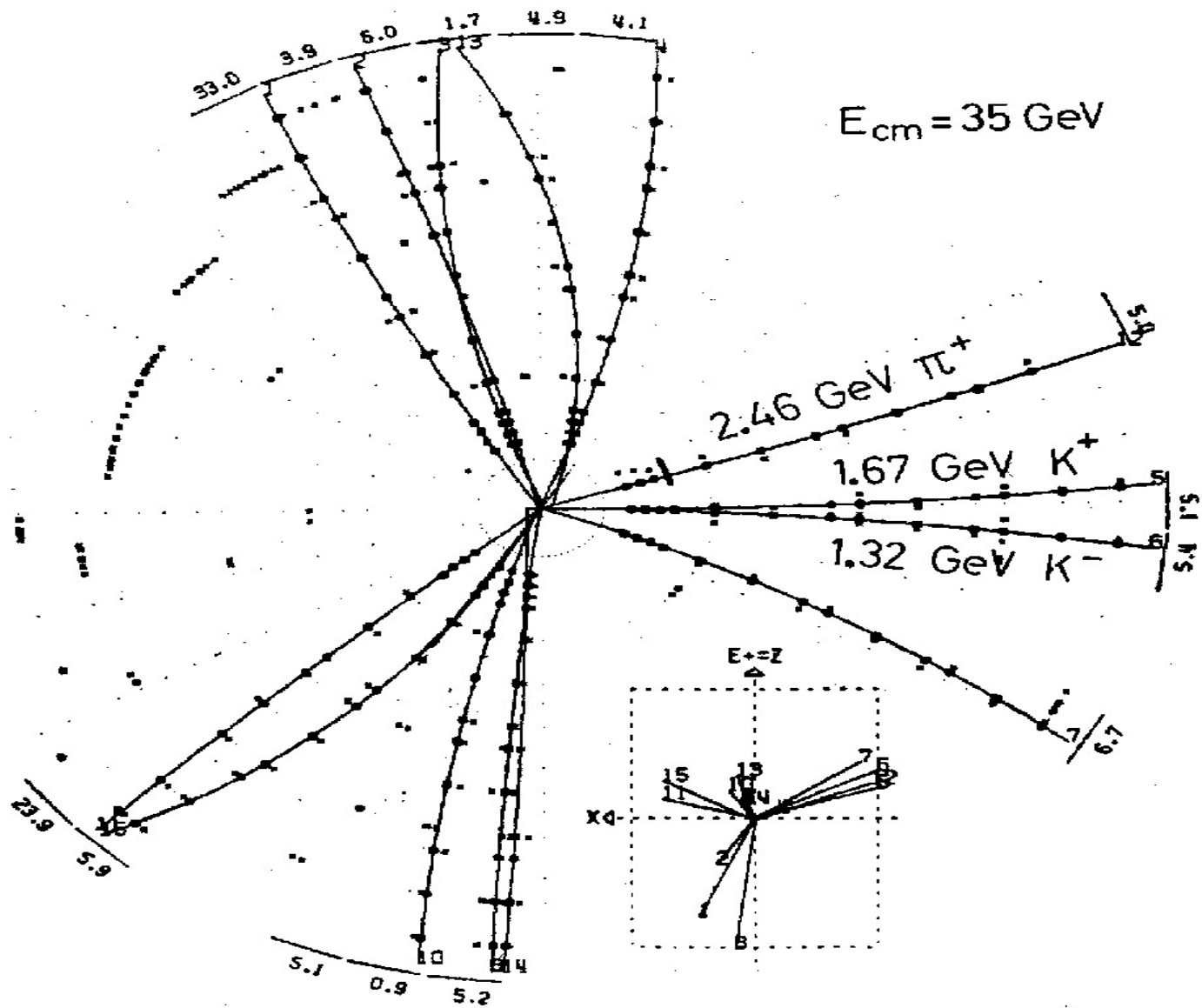
$$e^+e^- \rightarrow q \bar{q}$$

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

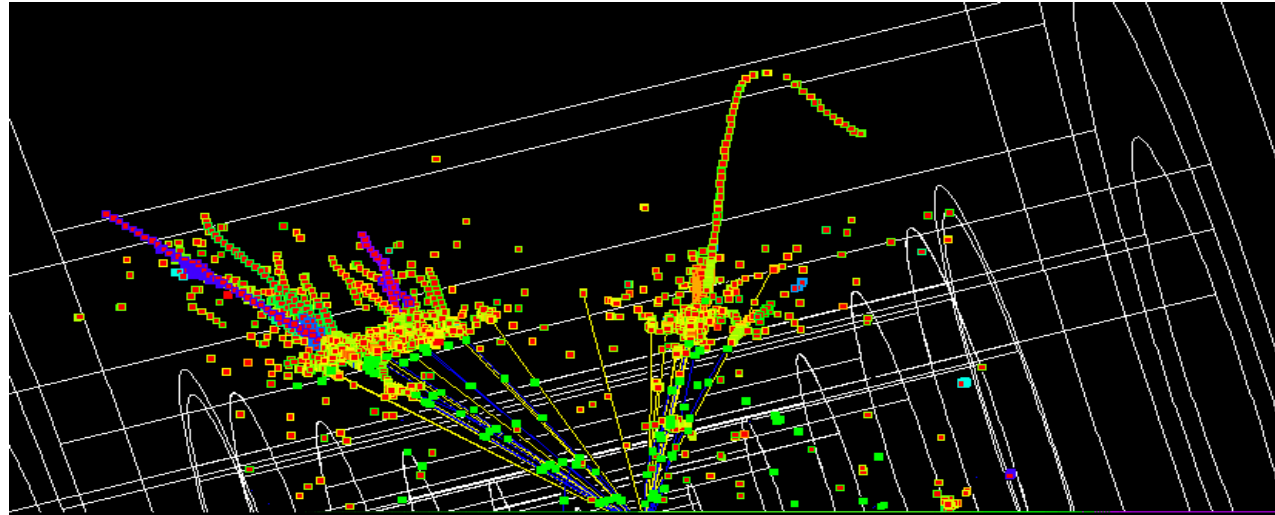
Przypadki 3 dżetowe



- A pioneering discovery in 1979. At the PETRA storage ring (DESY), the "gluon" was directly observed for the first time. The gluon is the carrier particle of the strong force, which binds the fundamental constituents of all matter - the quarks - together and is considered one of the four basic forces of nature.
- For their discovery of the gluon in 1979, four DESY scientists received the Particle Physics Prize of the European Physical Society (EPS), considered the "European Nobel Prize in Physics", in 1995.



A simulation of what the decay of a Z+Higgs to four jets would look like in ILC detector
www.interactions.org



Poza Modelem Standardowym

21.V.2008

- **Model Standardowy: symetria cechowania**
 $SU(2) \times U(1) \times SU(3)_c$
EW: $SU(2) \times U(1) \rightarrow$ częściowa unifikacja sił słabych i e-m
- **Wielka Unifikacja (Grand Unified Theory - GUT)**
 \rightarrow łączenie oddziaływań EW i silnych. Symetria cechowania GUT widoczna przy energiach powyżej 10^{16} GeV. Zbliżanie się wartości stałych sprzężenia

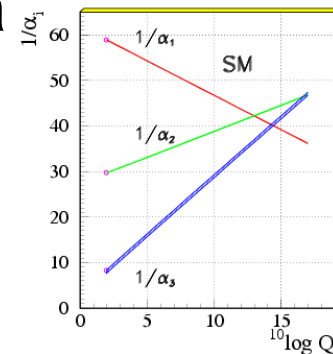
□ **Największa skala energii w fizyce ?**

W grawitacji naturalną skalą jest skala Plancka

masa Plancka $M = (\sim c / G_N) = 1.2 \cdot 10^{19}$ GeV

G_N – stała Newtona

długość Plancka $1.6 \cdot 10^{-35}$ m



Model Standardowy AD 2008

- Znakomita zgodność z doświadczeniem, choć brak cząstki Higgsa
- Ale są problemy:
Poprawki pętlowe, różne skale energii – problem hierarchii
- Dużo parametrów (masy, stałe sprzężenia, kąty mieszania) ... masa neutrin..

Problems of SM

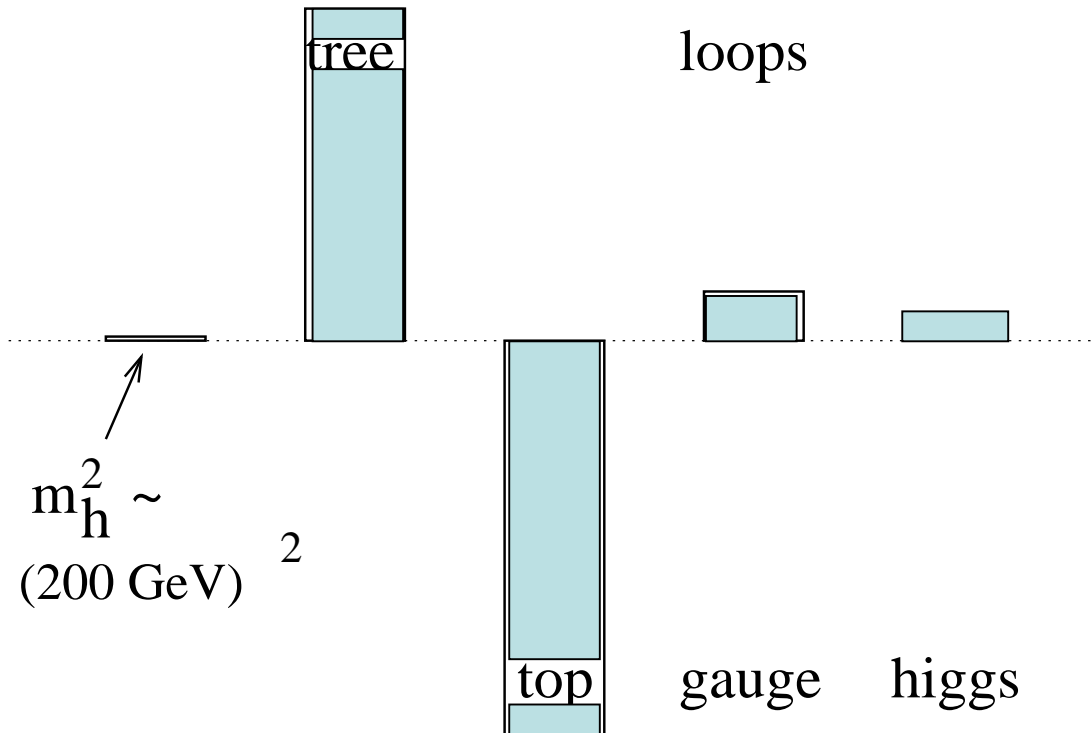
- A hierarchy problem $M_h \ll M_{Pl}$
quadratic divergencies occur in the radiative corrections to the M_h

$$M_h^2 = (M_h^2)^{tree} + \delta(t) + \delta(\text{gauge}) + \delta\{h\}$$

Using a cut-off $\Lambda = 10 \text{ TeV}$, ie. assuming that the SM is valid up to this scale \rightarrow fine tuning

- No dark matter candidate
- No prediction for
fundamental constants
number of generations
pattern of fermion masses,
non-zero mass of the neutrino
- no unification

Fine tuning



M. Schmaltz

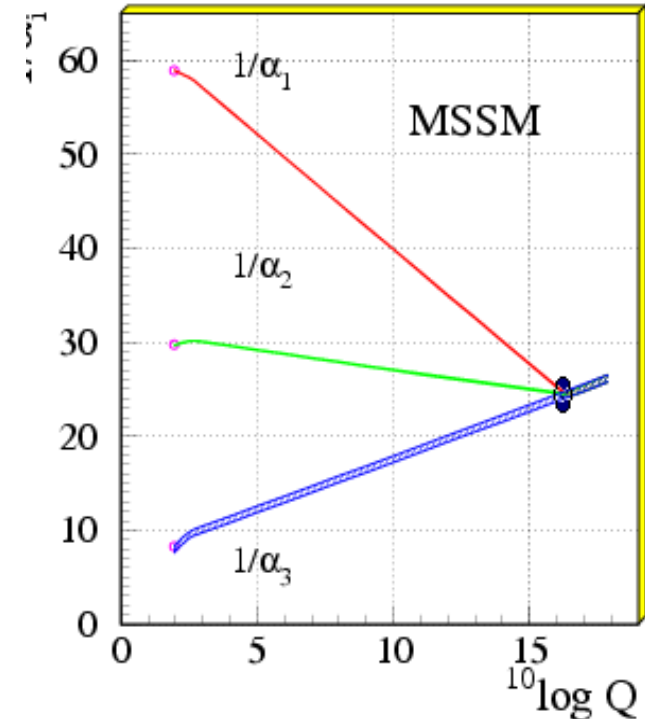
Supersymetria

- Symetria: fermiony – bozony; założenie że wszystkie znane cząstki fund. mają swoich supersymetrycznych partnerów
- Cząstki SUSY → muszą być b. masywne bo ich nie obserwujemy. Więc ta symetria musi być łamana
- Oczekiwane masy cząstek SUSY – 1 TeV
- Nowa liczba kwantowa R – i oczekiwanie, że najlżejsza cząstka SUSY jest trwała
- Problem hierarchii usunięty – kasowanie się wkładów od fermionów i bozonów
- Unifikacja oddziaływań: lepsze „zbieganie” stałych

Cząstki SUSY

kwark q	$\frac{1}{2}$	skwark $\sim q$	0
lepton l	$\frac{1}{2}$	slepton $\sim l$	0
foton γ	1	photino $\tilde{\gamma}$	$\frac{1}{2}$
gluon g	1	gluino $\sim g$	$\frac{1}{2}$
W^{\pm} Z^0	1	wino $\sim W^{\pm}$ zino $\sim Z^0$	$\frac{1}{2}$

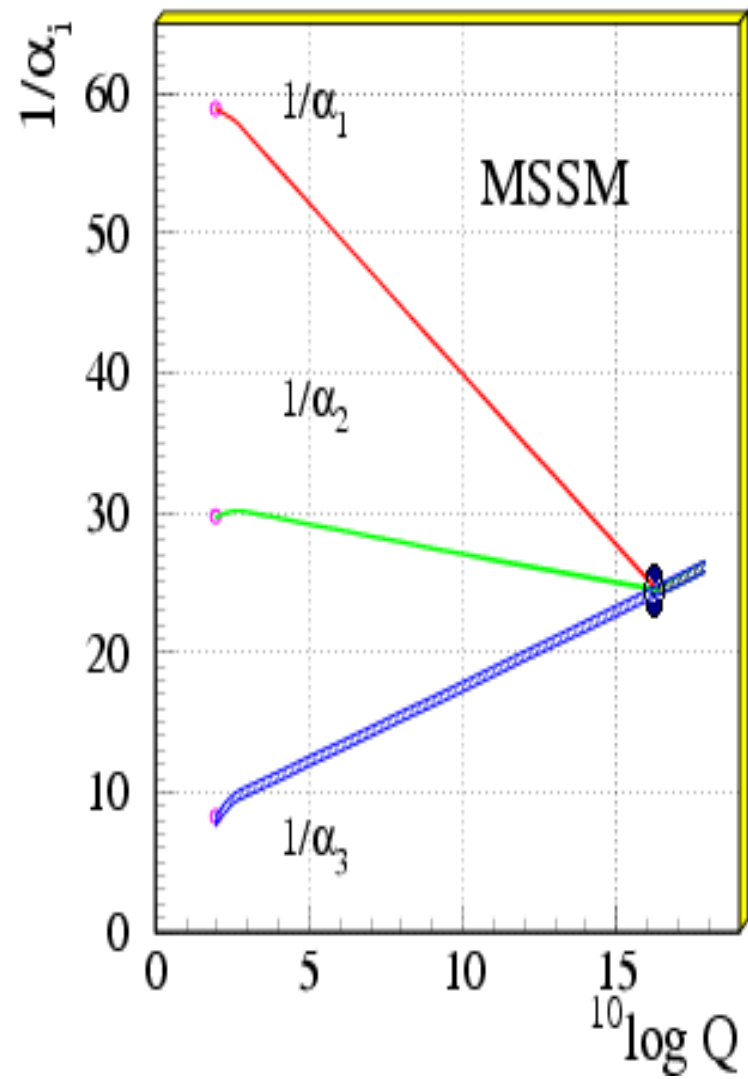
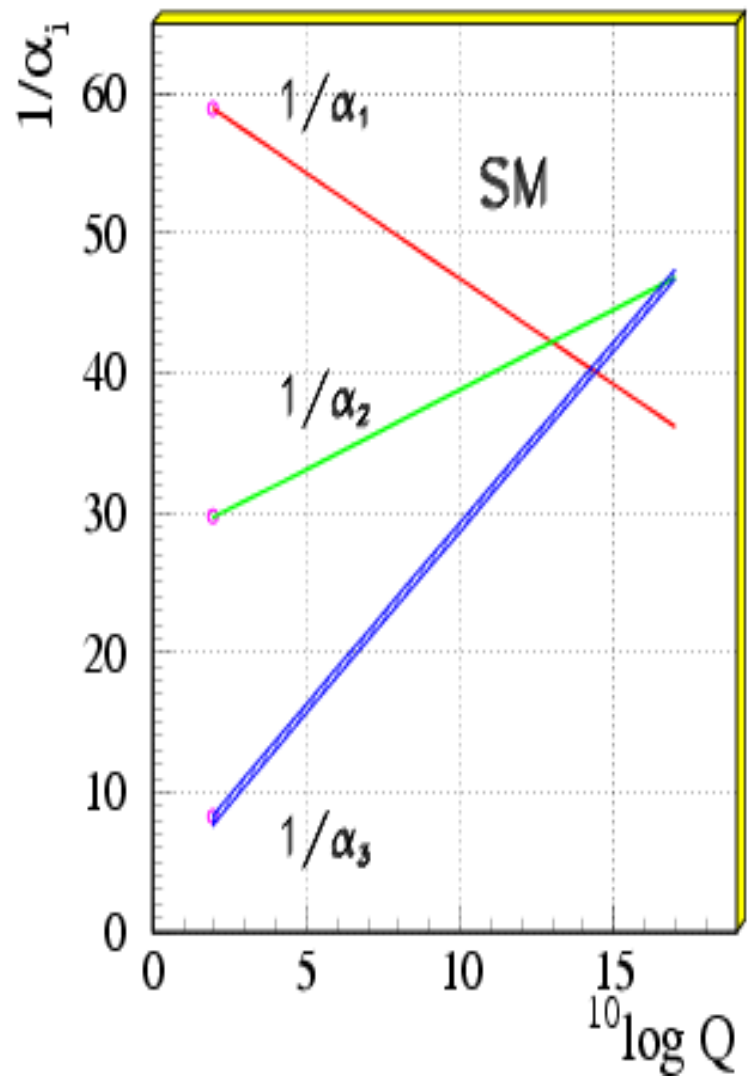
Unifikacja z SUSY



Minimalny Standardowy Model Supersymetryczny MSSM - sektor Higgsa

- Dwa dublety pól skalarnych (zespolonych) → aby nadać masy. Przewidywane cząstki fizyczne: 5 cząstek Higgsa h, H, A i H^\pm (spin 0) (h jak w SM) higgsina o spinie $\frac{1}{2}$
- Gejdżina mieszają się z higgsinami → 4 fizyczne cząstki neutralina i 4 czardżina

Unifikacja sił

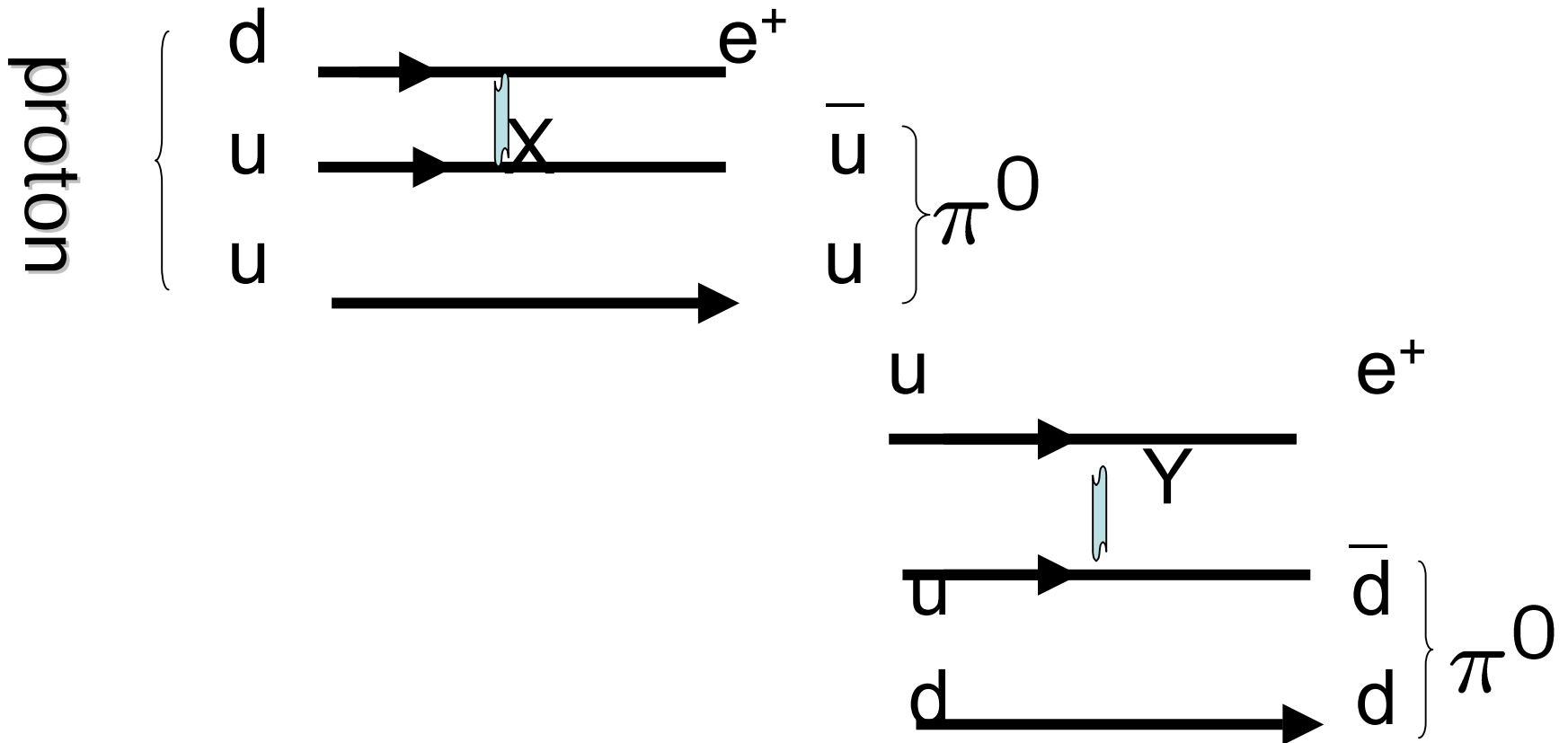


Teoria Wielkiej Unifikacji: SU(5)

- Symetria cechowania SU(5) (zawiera SU(2)xU(1)xSU(3) jako podgrupę)
zapropozowano w 1974
- W multipletach zarówno kwarki jak i leptony -
możliwość zamiany kwarków w leptony i odwrotnie
- 12 kolorowych bozonów cechowania:
X (ład. el. $-1/3 e$) i Y ($-4/3 e$)
plus gluony, foton, $W^{\pm}, Z = 24$ bozony cechowania
- 3 generacje fermionów (15 stanów) np.
 $u_c, u_z, u_n, d_c, d_z, d_n, e^-, \nu_e$ w różnych stanach spinowych;
również leptokwarki występują X, Y
- Zalety: skwantowanie ładunku el.; ład. el. $e = -$ ład. el. p
- Wada: proton się rozpada w wyniku wymiany
bozonów X i Y za szybko: czas życia $10^{30} \text{ s} \approx 10^1 \text{ lat}$

Rozpad protonu $p \rightarrow e^+ \pi^0$

Przykłady procesów z wymianą bozonów X i Y



Superstruny

- Teoria Wszystkiego (Theory of Everything)
próba połączenia wszystkich oddziaływań (wraz z grawitacją).
W kwantowej grawitacji – oddziaływania punktowe
→osobliwości
- Zastępujemy cząstki punktowe strunami o skończonej długości
- W grawitacji – skala Plancka
 $l_{Pl}=1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$, $M_{Pl}=1.2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$
- Cząstki – zamknięte pętle i różne wzbudzenia strun → różne cząstki fundamentalne.
- Teoria renormalizowalna w przestrzeni o wymiarach 10 lub więcej. Początkowo poszukiwano opisu dla oddz. silnych ale pojawił się graviton (bezmasowa cząstka o spinie 2) w wersji supersymetrycznej
- Parametr opisujący struny α' -z teorii Reggego
- .Brak przewidywań

Czekając na LHC (ILC..)

Veltman..

this book is about a physics, and this implies that the theoretical ideas discussed must be supported by experimental facts. Neither supersymmetry nor string theory satisfy this criterion. They are figments of the theoretical mind.

To quote Pauli: „They are not even wrong.”

They have no place here.

Uwaga:

To nie jest powszechnie wyznawany pogląd.

Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 14: Ewolucja Wszechświata

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Ewolucja Wszechświata

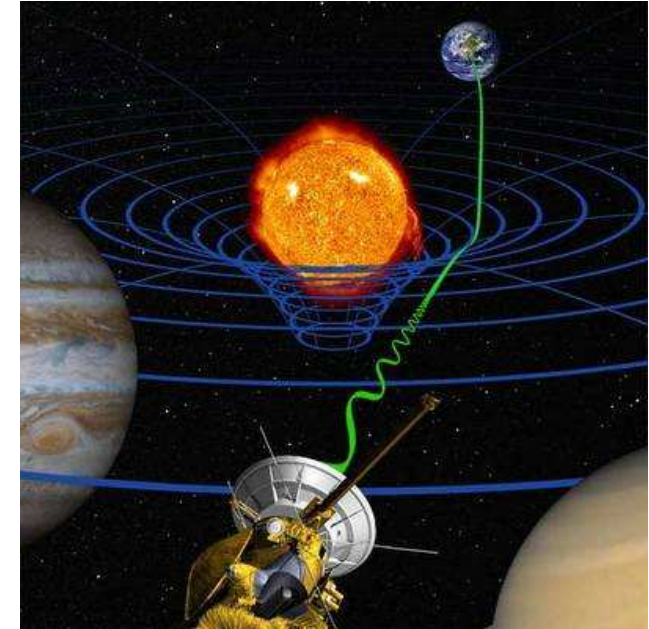
- Wprowadzenie
 - Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Efekt Dopplera i Prawo Hubblea
- Ewolucja Wszechświata
 - założenia modelu
 - Wielki Wybuch
 - przyszłość Wszechświata
- Ile jest materii we Wszechświecie?

Wprowadzenie

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



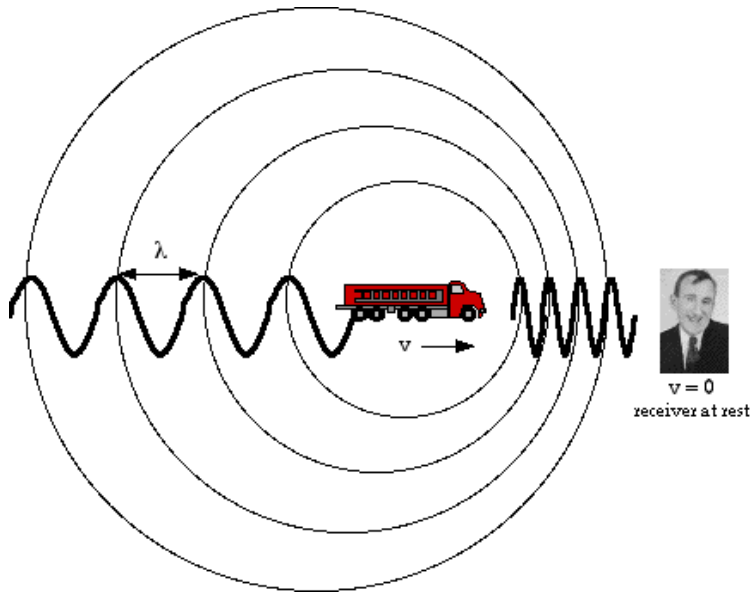
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii.

Problem teorii Einsteina: nie istniało statyczne rozwiązanie.

Aby uratować statyczny Wszechświat Einstein dołożył do swoich równań **stałą kosmologiczną - Λ**

Efekt Dopplera



W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej częstotliwości**.

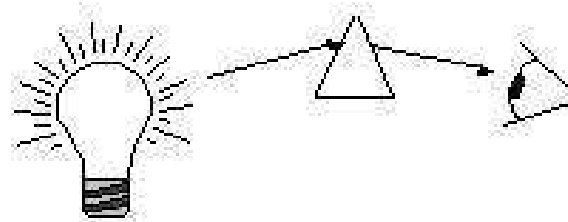
Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

$$f_{obs} = \frac{f}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

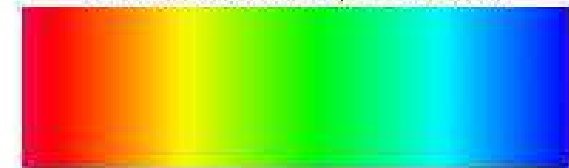
Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

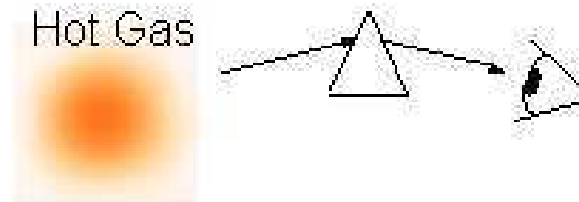


Continuum Spectrum

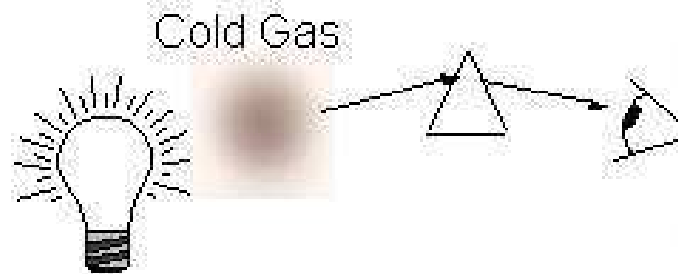
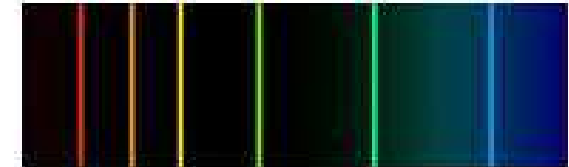


Linie absorpcyjne

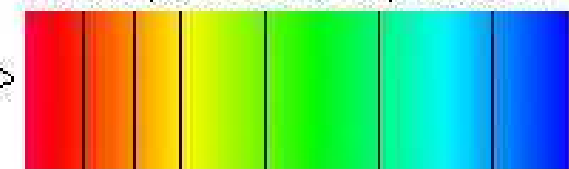
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



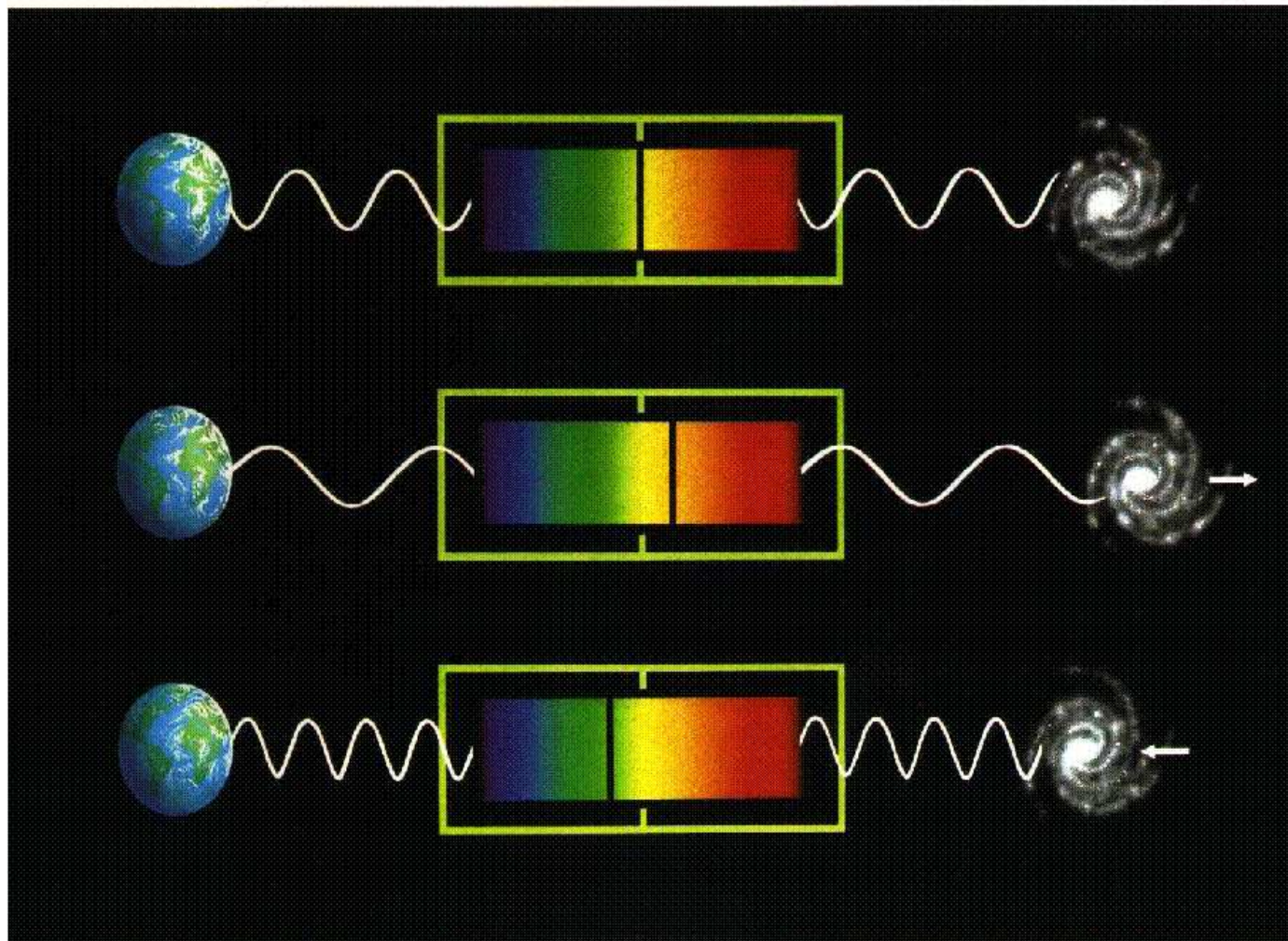
Absorption Line Spectrum



W obu przypadkach pozycja linii jest ściśle określona
(charakterystyczna dla danego atomu)

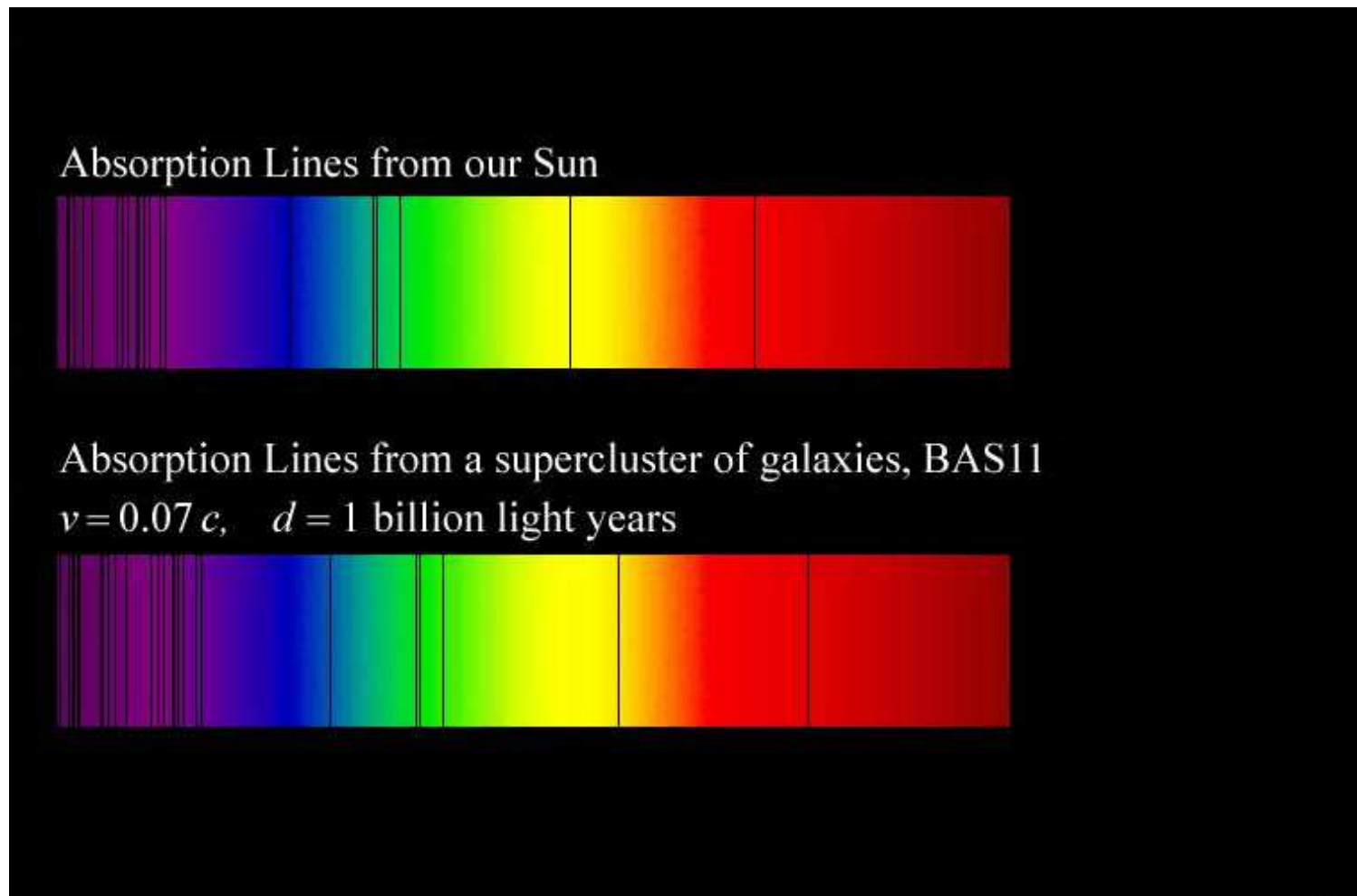
Efekt Dopplera dla światła

Mierząc linie absorpcyjne w widmie galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu



Efekt Dopplera dla światła

Mierząc linie absorpcyjne w widmie galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu i **wyznaczyć ich prędkość względem nas**

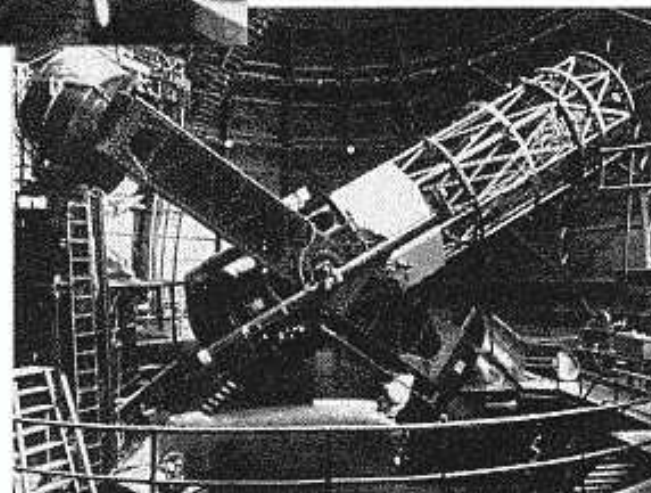
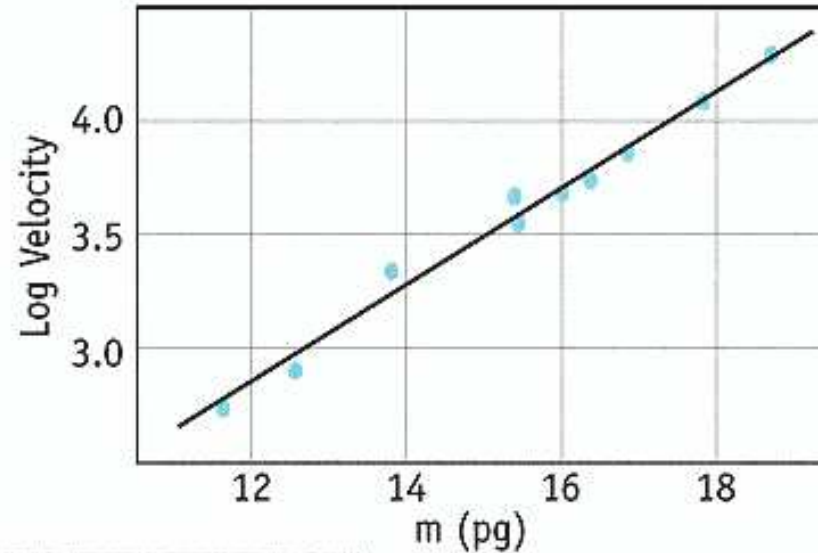


Prawo Hubble (1929)

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

Prawo Hubble'a (1929)

Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

Zauważył on, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością** od Ziemi:

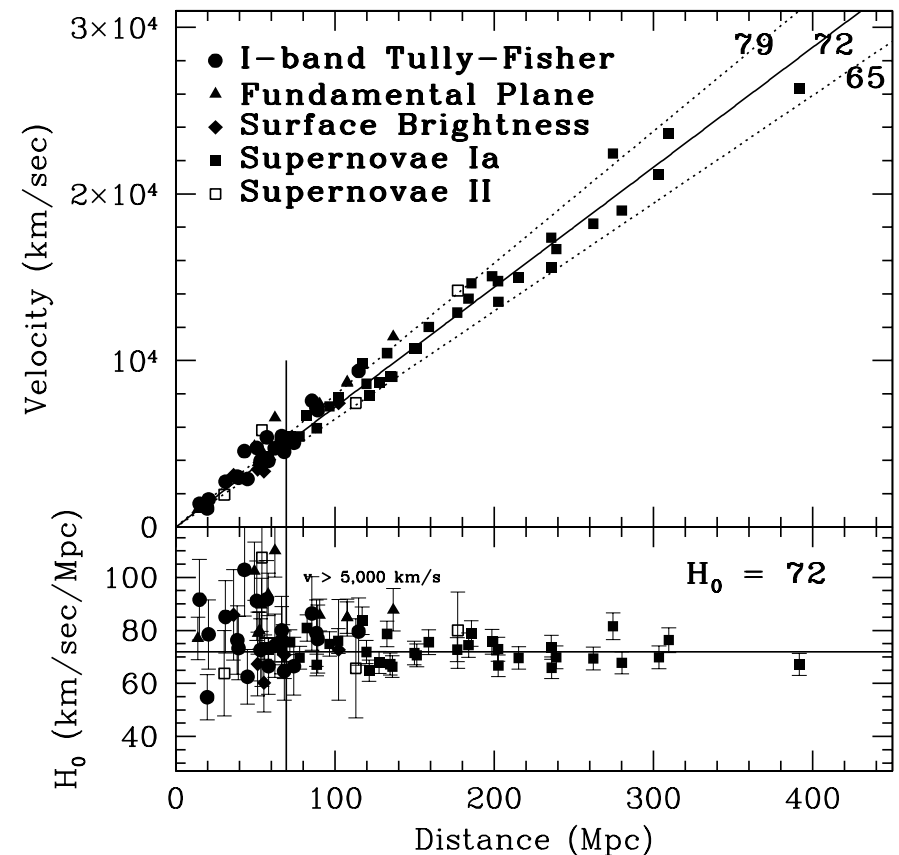
$$v = H \cdot r$$

r - odległość, H - stała Hubble'a

Obecne pomiary: $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

$$1 \text{ Mpc} \approx 3 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

Współczesne pomiary:



Prawo Hubble'a

Pomiar odległości

Wyznaczenie odległości jest znacznie trudniejsze od wyznaczenia "przesunięcia ku czerwieni".

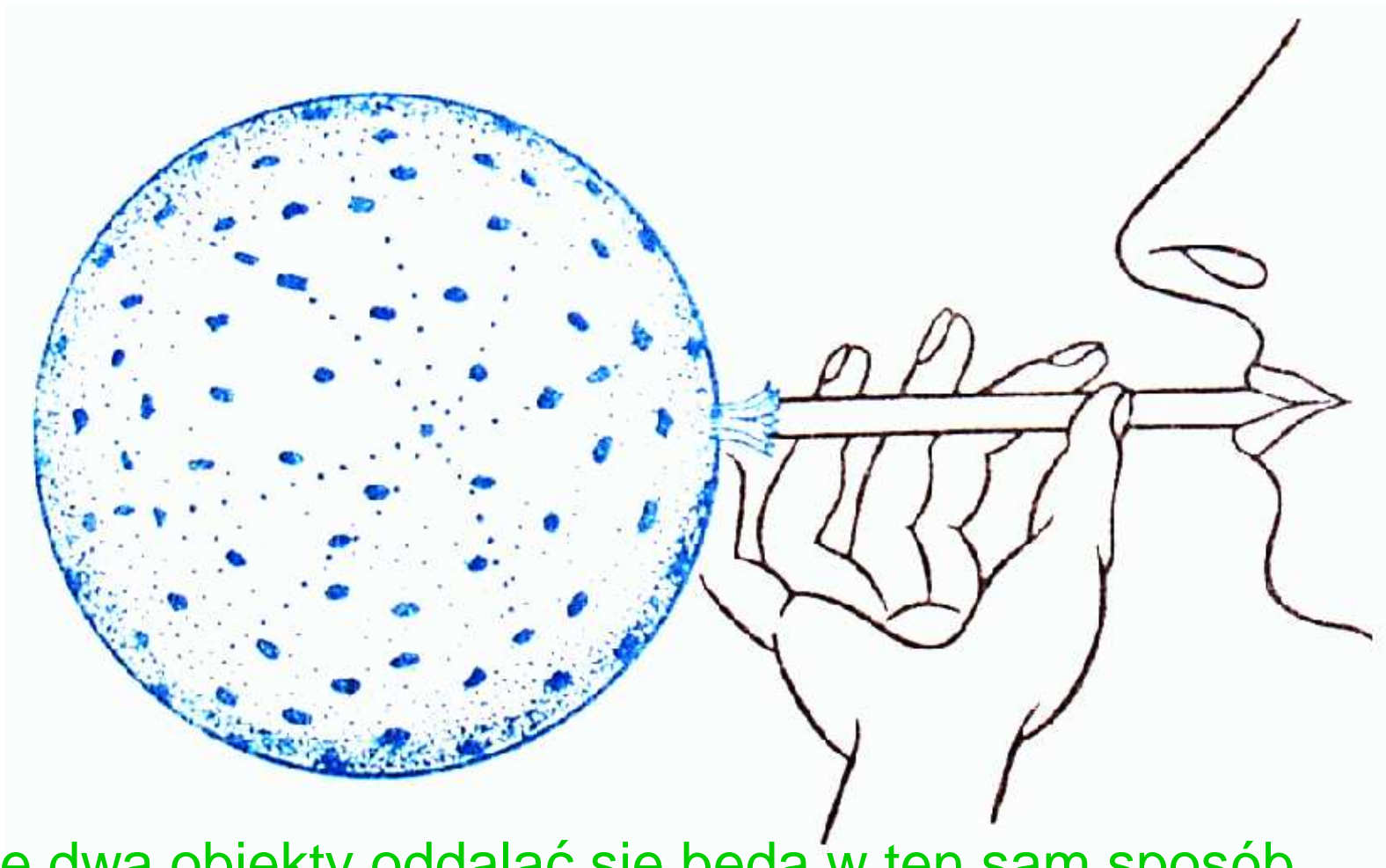
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

Na największych odległościach są to **Supernowe typu 1A**.



Prawo Hubble'a

Obserwacja Hubble'a, że **wszystkie** obiekty oddalają się, **nie wyróżnia** w żaden sposób **naszego** układu odniesienia.



Dowolne dwa obiekty oddalać się będą w ten sam sposób.

Ewolucja Wszechświata

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur \Rightarrow “skala kosmologiczna”

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszony" są poszczególne obiekty.

Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat ewoluował z punktowego skupiska nieskończonej energii...



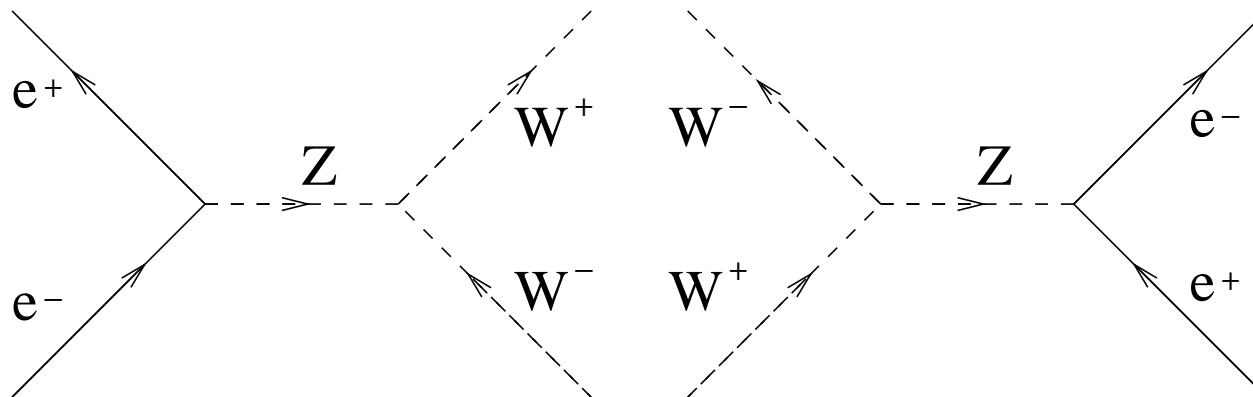
Ewolucja Wszechświata

Na samym początku **gęstość energii** była bardzo duża.

Na poziomie cząstek oznacza to, że cząstki miały bardzo duże **energie kinetyczne**, znacznie większe od ich mas.

Nie istniały żadne obiekty złożone (**nukleony, jądra atomowe, atomy**), gdyż energie były znacznie większe od energii wiązania.

Wszystkie cząstki elementarne znajdowały się w **stanie równowagi**, gdyż nieustannie zachodziły procesy **anihilacji i kreacji**.

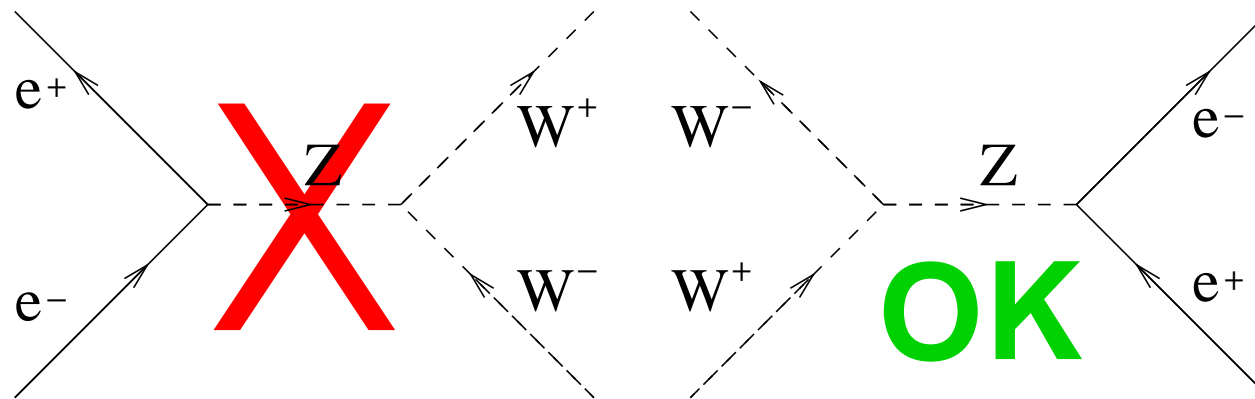


Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**



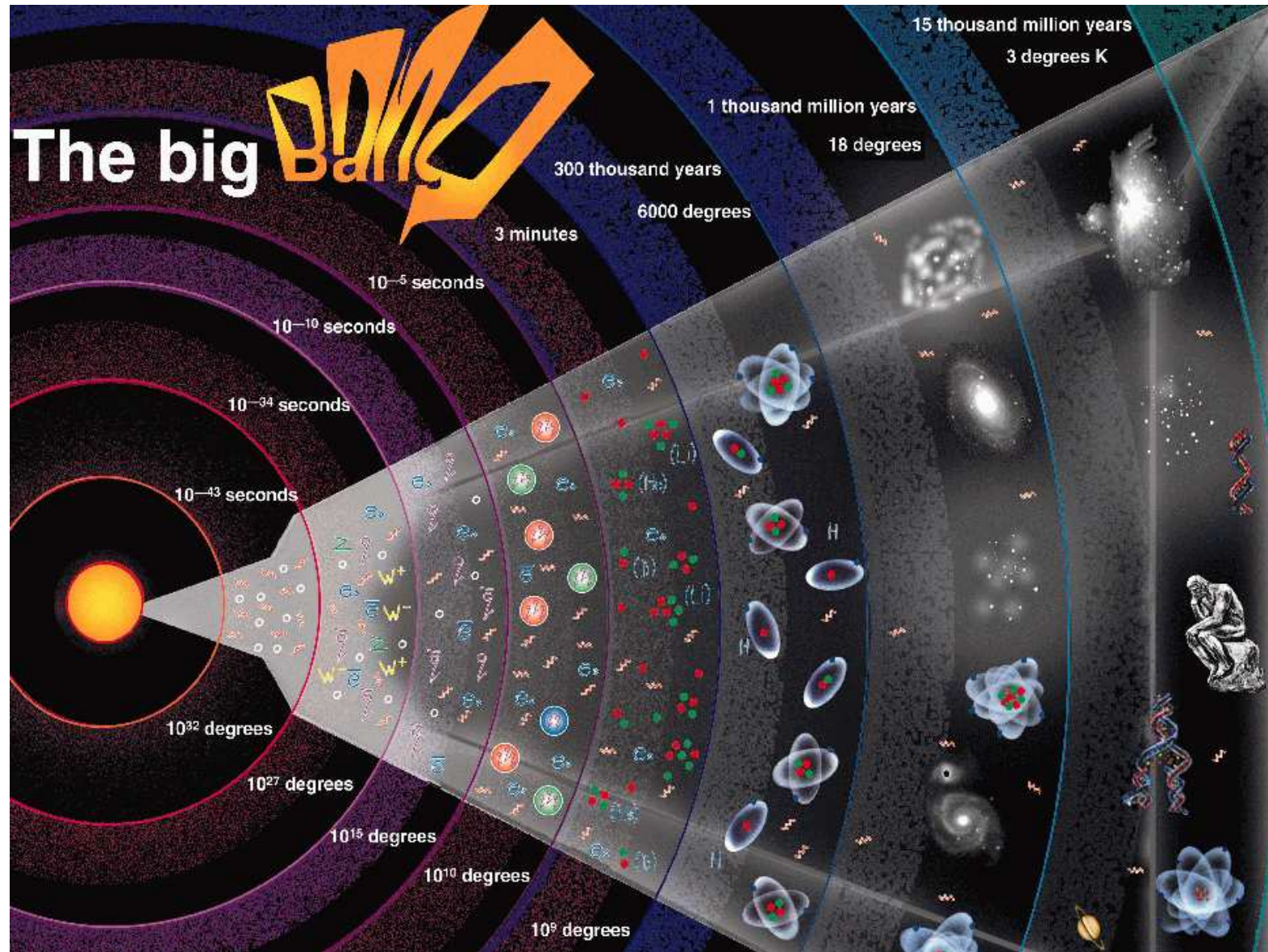
Ewolucja Wszechświata

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)

Ewolucja Wszechświata



Ewolucja Wszechświata

Czy Wszechświat będzie się rozszerzał w nieskończoność ?

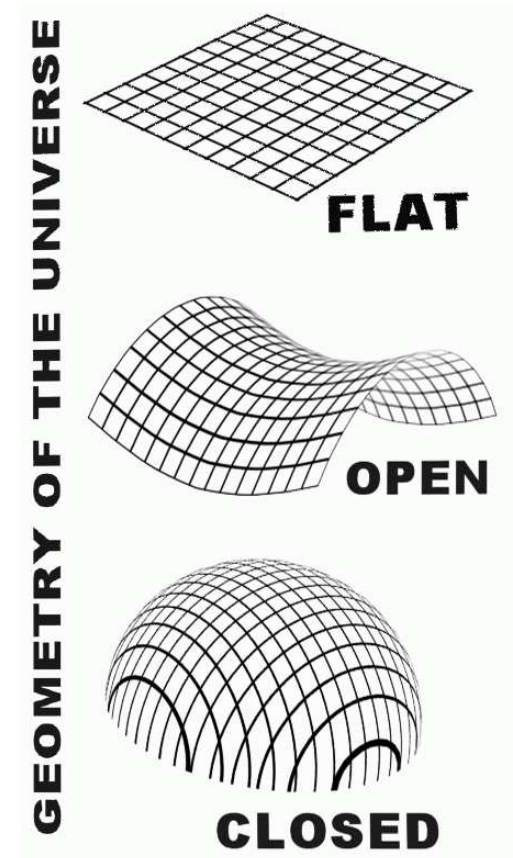
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że przyszłość Wszechświata zależy od gęstości materii ρ .

Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

$\rho = \rho_c$ asymptotycznie “zatrzyma” się

$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

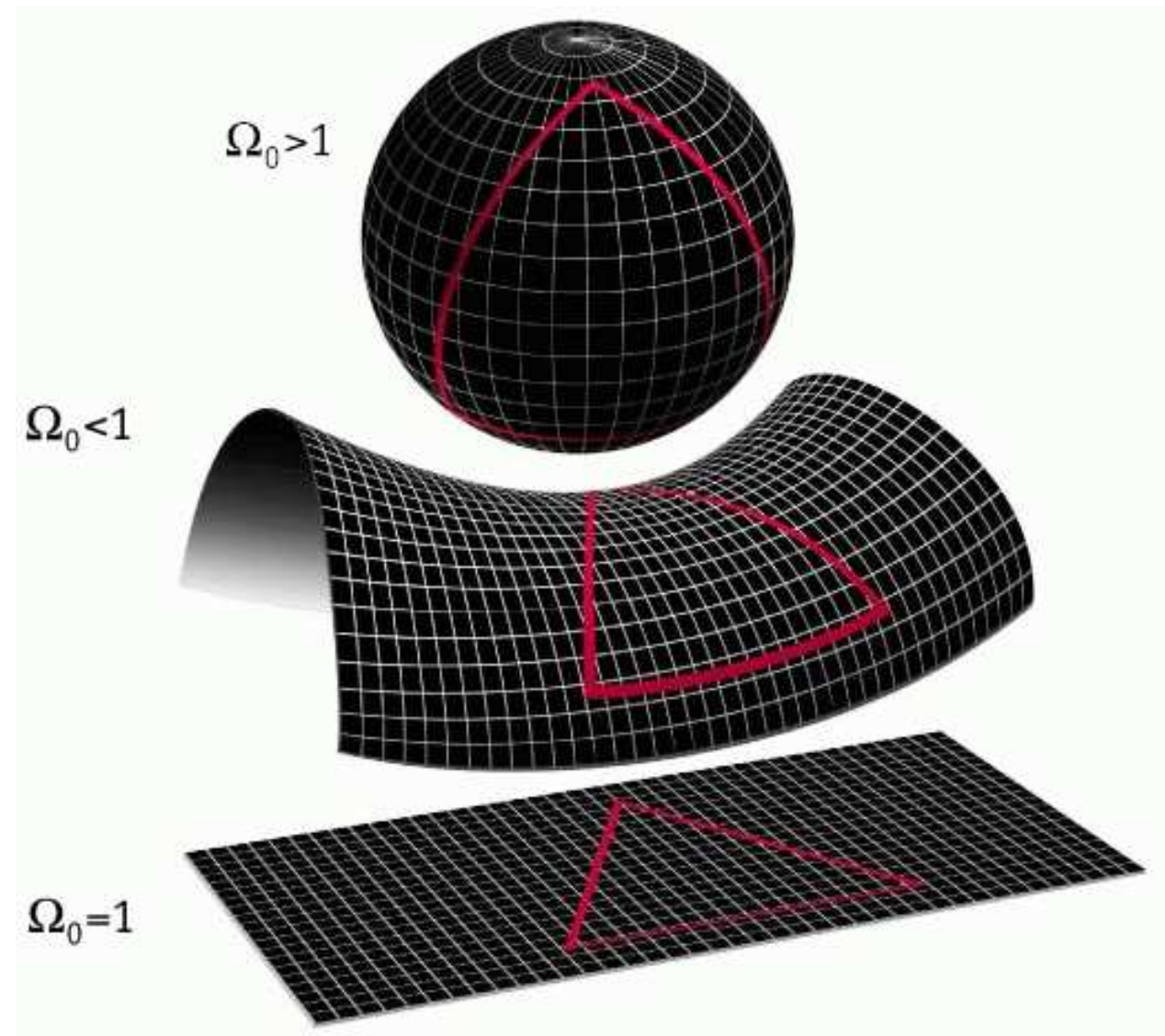


Krzywizna przestrzeni

Całkowita gęstość materii/energii we Wszechświecie decyduje też o geometrii przestrzeni na skalach kosmologicznych!

Lokalnie wiemy, że przestrzeń jest płaska (suma kątów trójkąta wynosi 180°).

Ale na dużych odległościach trudno to sprawdzić...



Gęstość materii we Wszechświecie

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od **gęstości materii**.
Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

- z pomiaru **promieniowania** gwiazd i materii międzygwiazdnej
⇒ materia **“światlista”**

$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

- z pomiaru zawartości **lekkich pierwiastków** + model **nukleosyntezy (Wielki Wybuch)**
⇒ materia **“barionowa”**

$$\Omega_b \sim 0.04$$

- z pomiaru oddziaływań **grawitacyjnych**
⇒ materia **“grawitacyjna” (całkowita ?)**

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow \text{ciemna materia !?}$$



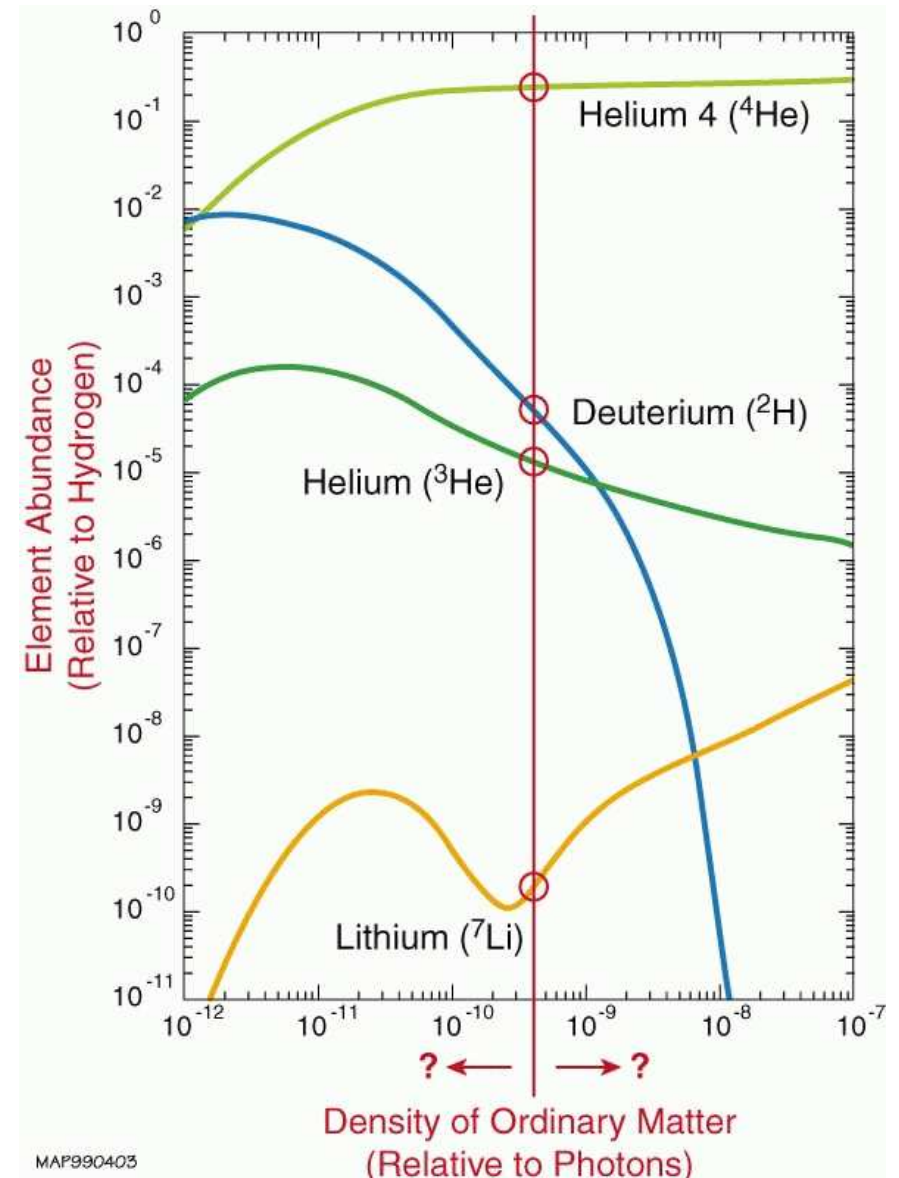
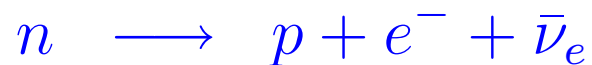
Pierwotna nukleosynteza

W zależności od stosunku gęstości materii do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

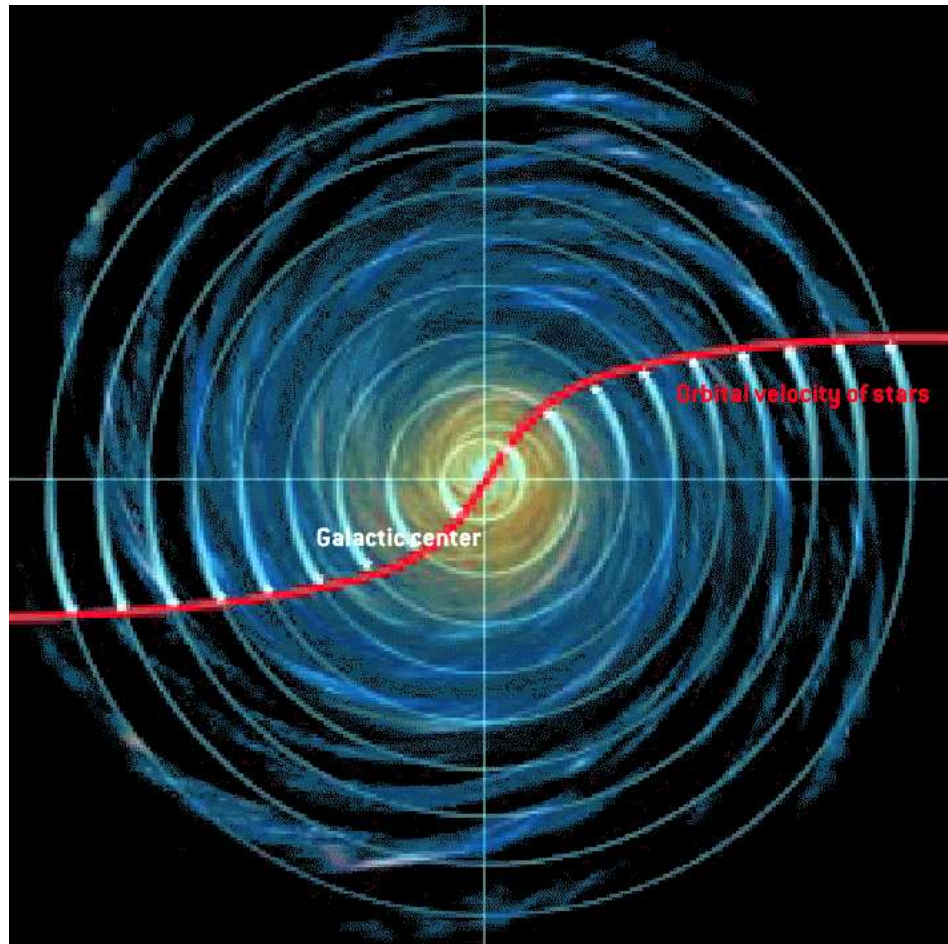
Produkcja deuteru:



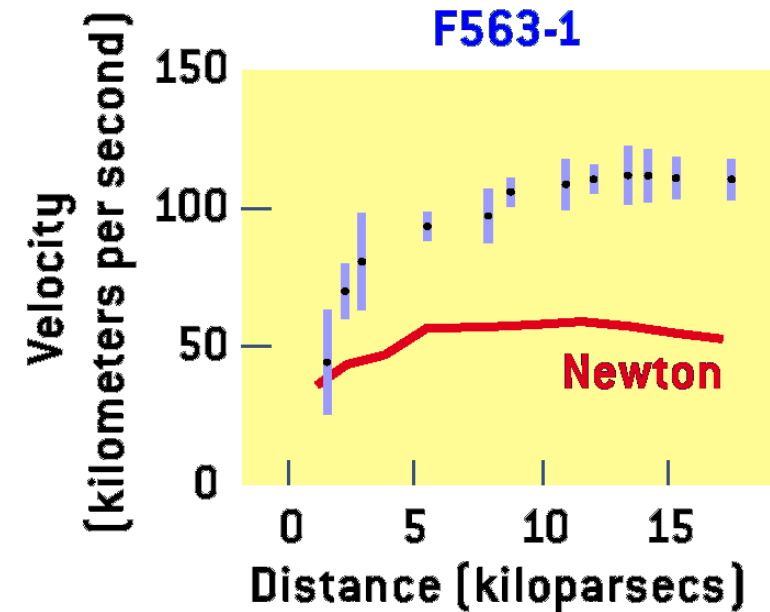
Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):



Ciemna materia?



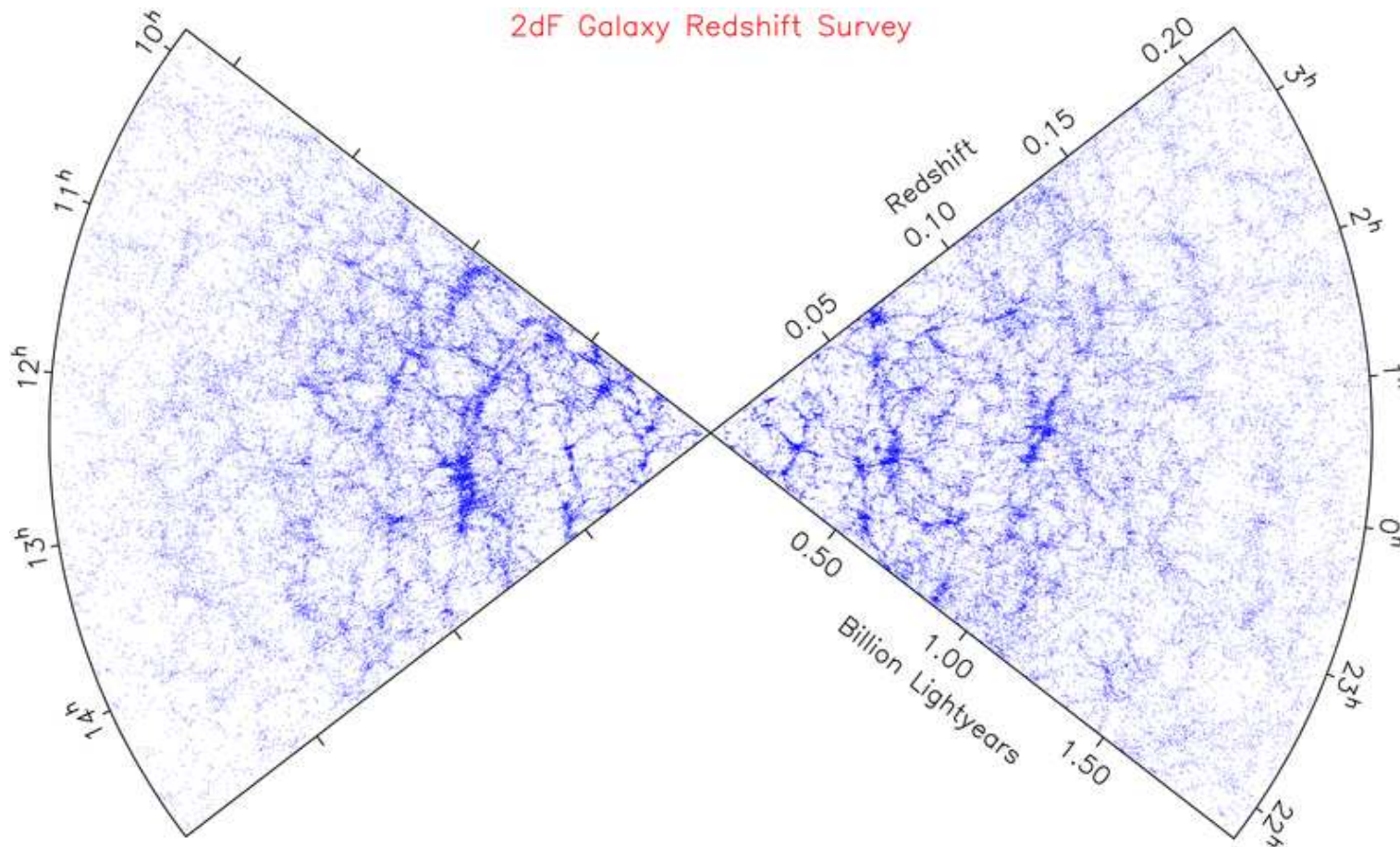
Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.



Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

Ciemna materia?

Znana nam materia barionowa nie tłumaczy **tworzenia się struktur** we Wszechświecie i nie wystarcza też do opisu **oddziaływań grawitacyjnych** na skalach międzygalaktycznych.



Ciemna materia - podsumowanie

Wiemy że ciemna materia:

- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5 \times$ materia barionowa)

Nie wiemy:

- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

Jednym z głównych kandydatów jest najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP), którą mamy nadzieję odkryć w LHC.

Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 15: Ciemna Strona Wszechświata

prof. A.F.Żarnecki

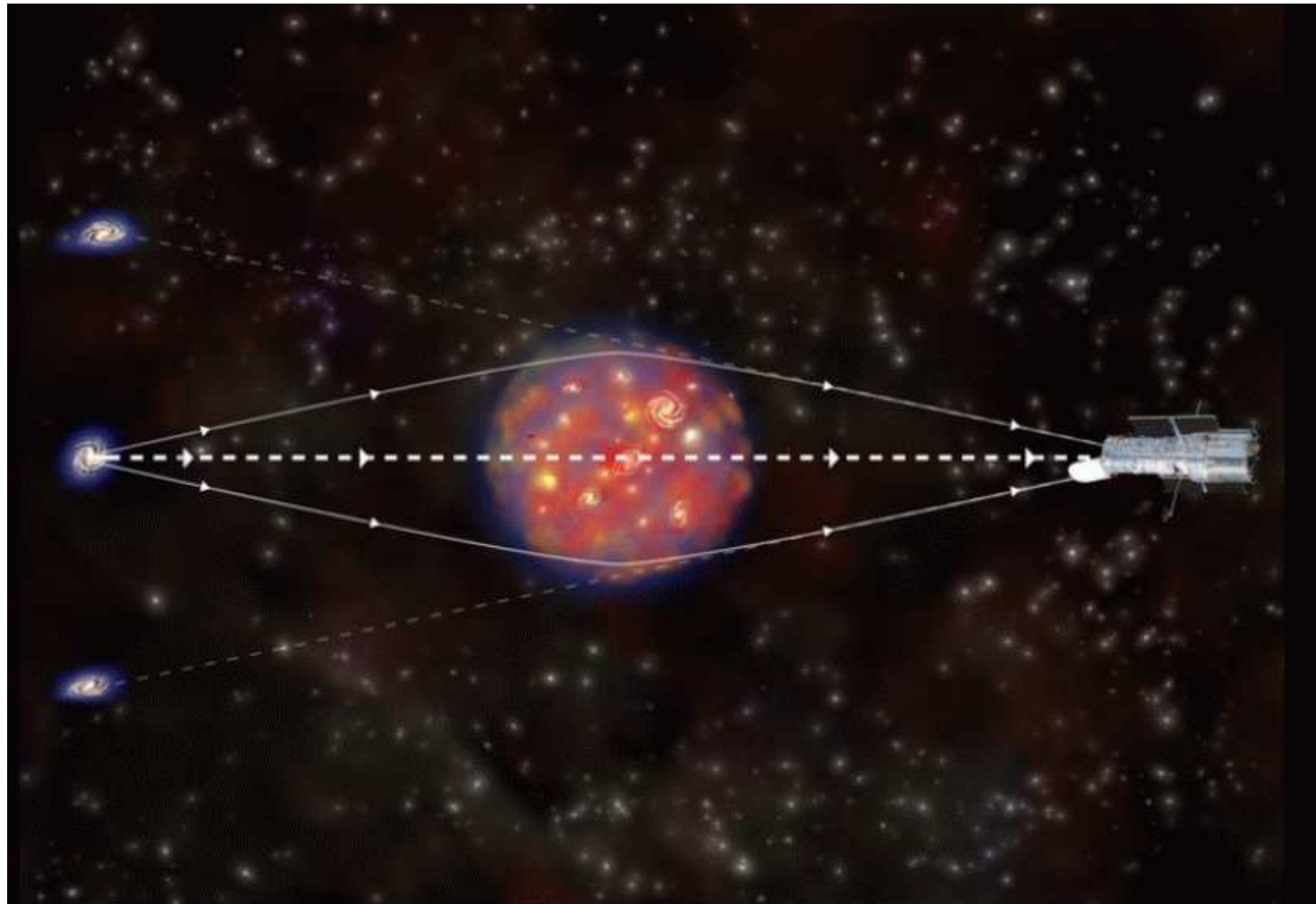
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Ciemna Strona Wszechświata

- Soczewkowanie grawitacyjne
Jak możemy zobaczyć ciemną materię
- Mikrofalowe promieniowanie tła
Zdjęcie narodzin Wszechświata
- Ciemna energia
W jakim Wszechświecie żyjemy?
- Podsumowanie

Soczewkowanie grawitacyjne

Materia powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.



Soczewkowanie grawitacyjne

Materia powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.

Zdjęcie z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a

Niebieskie łuki - wielokrotny obraz odległej galaktyki położonej za masywną gromadą galaktyk.



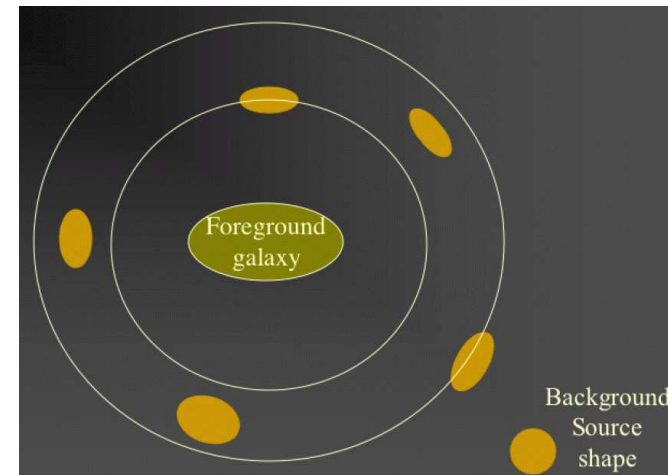
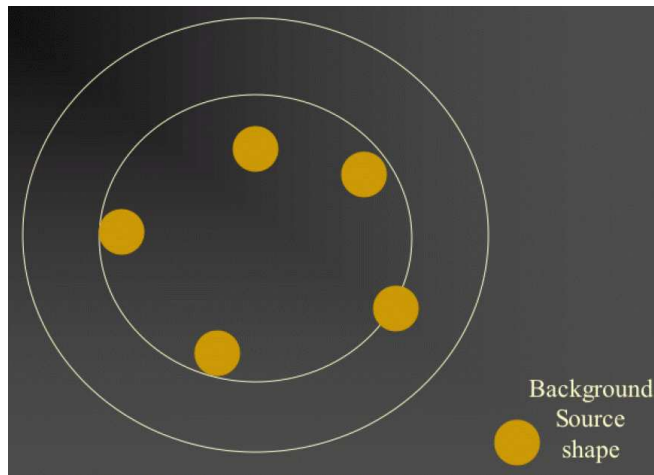
Soczewkowanie grawitacyjne

Silne soczewkowanie grawitacyjne

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.

Słabe soczewkowanie grawitacyjne

W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **zniekształcenie obrazu**.



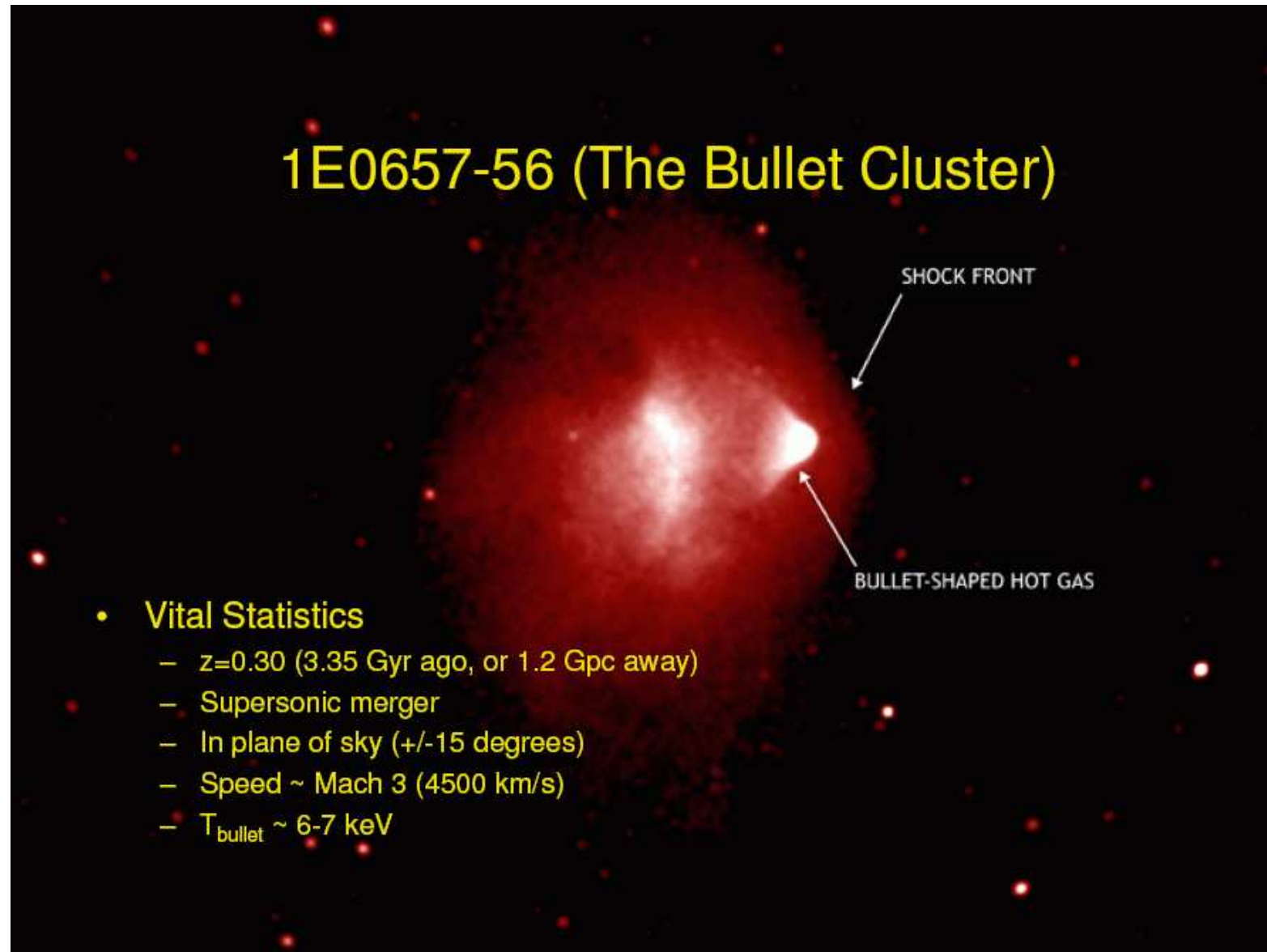
W obu przypadkach możemy wnioskować o **masie** obiektów znajdujących się na drodze promieni świetlnych.

Kosmiczna kolizja

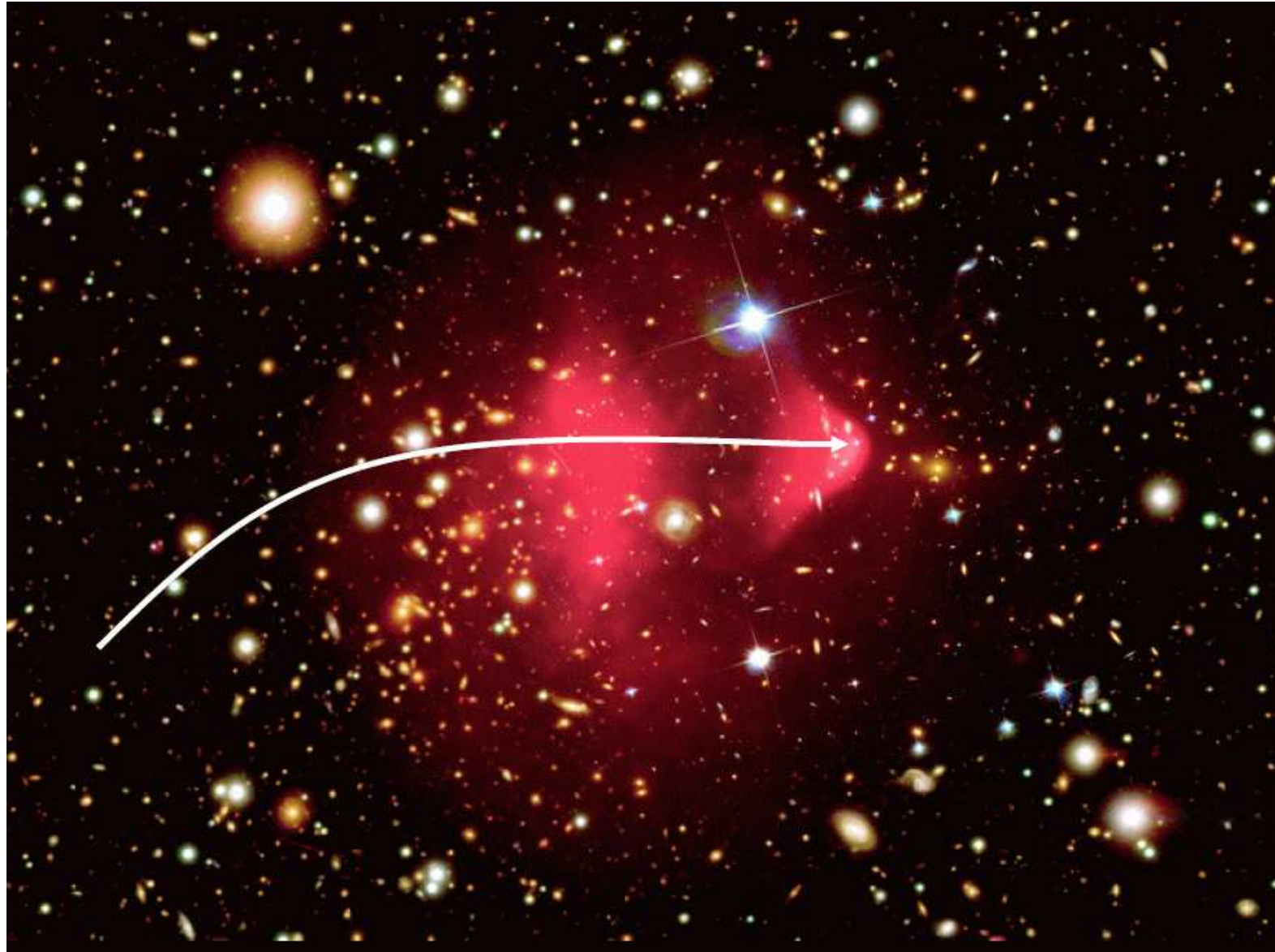
Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. W ostatnich latach bardzo dokładne pomiary tego promieniowania stały się możliwe dzięki wystrzeleniu teleskopu kosmicznego **Chandra**.



Kosmiczna kolizja

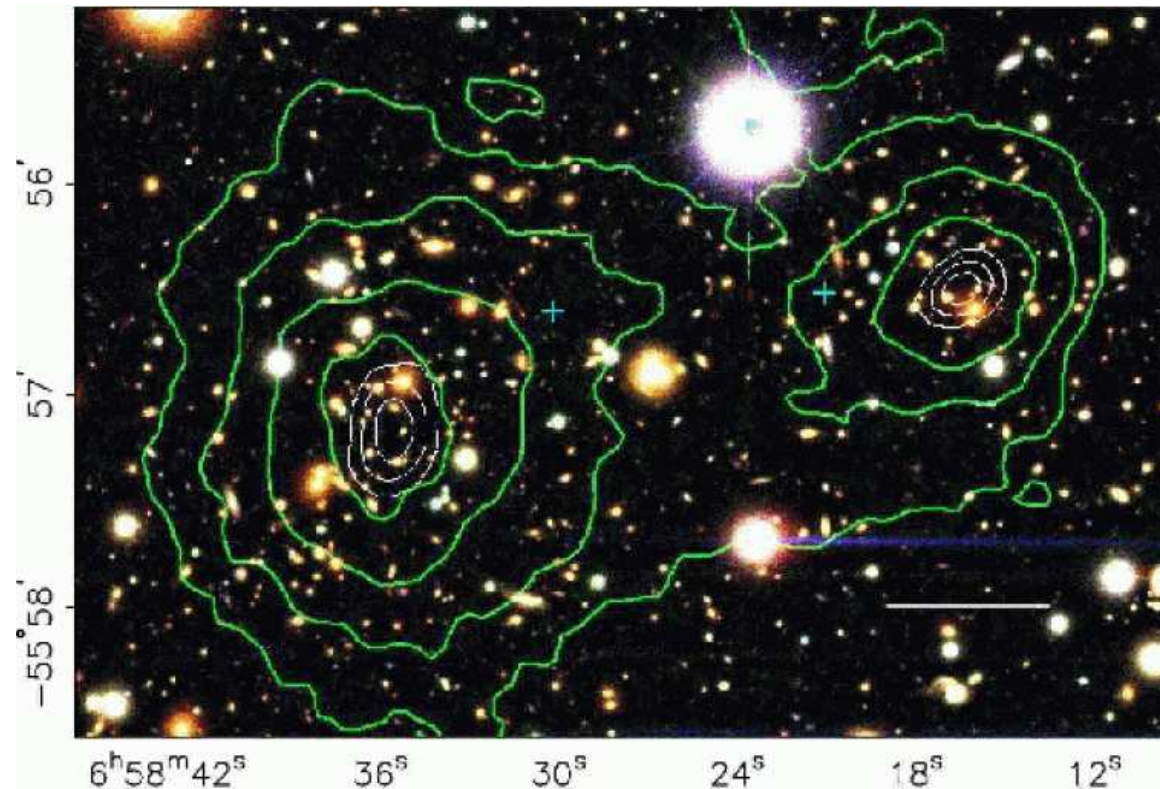


Kosmiczna kolizja



Kosmiczna kolizja

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "grawitacyjnej" w widocznym układzie. Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.

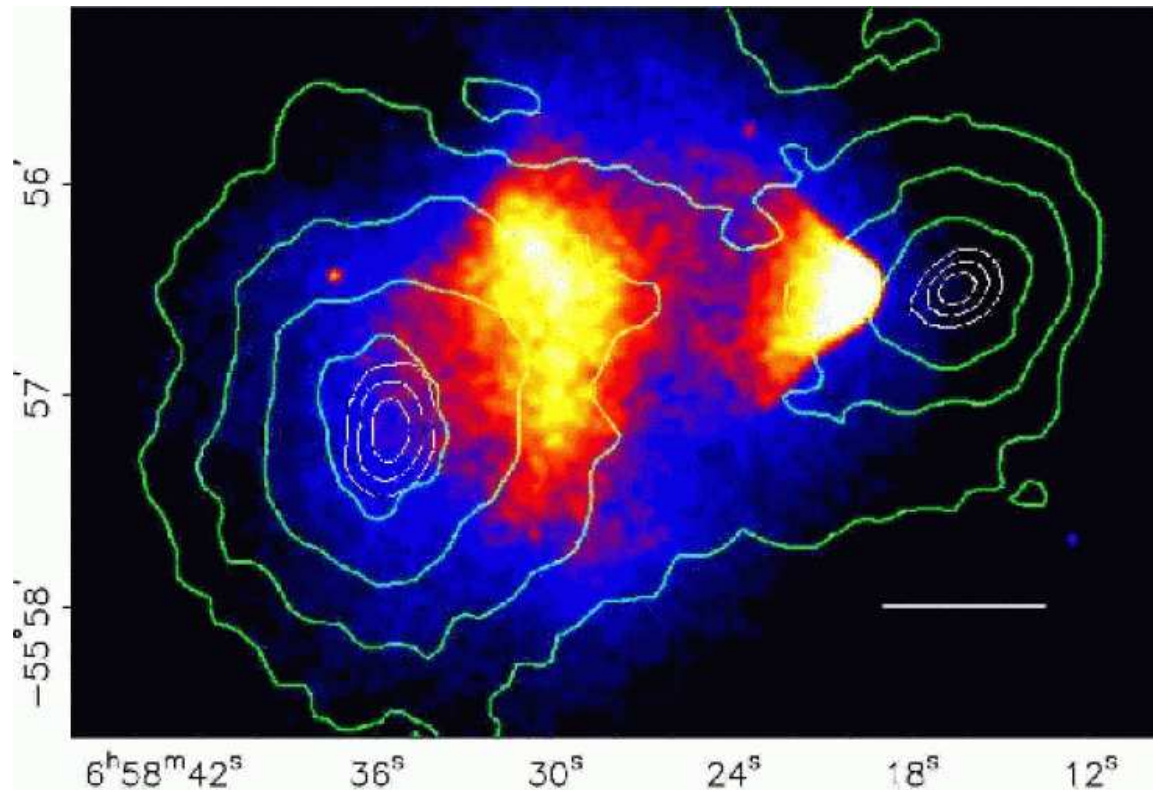


Kosmiczna kolizja

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "grawitacyjnej" w widocznym układzie.

Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.

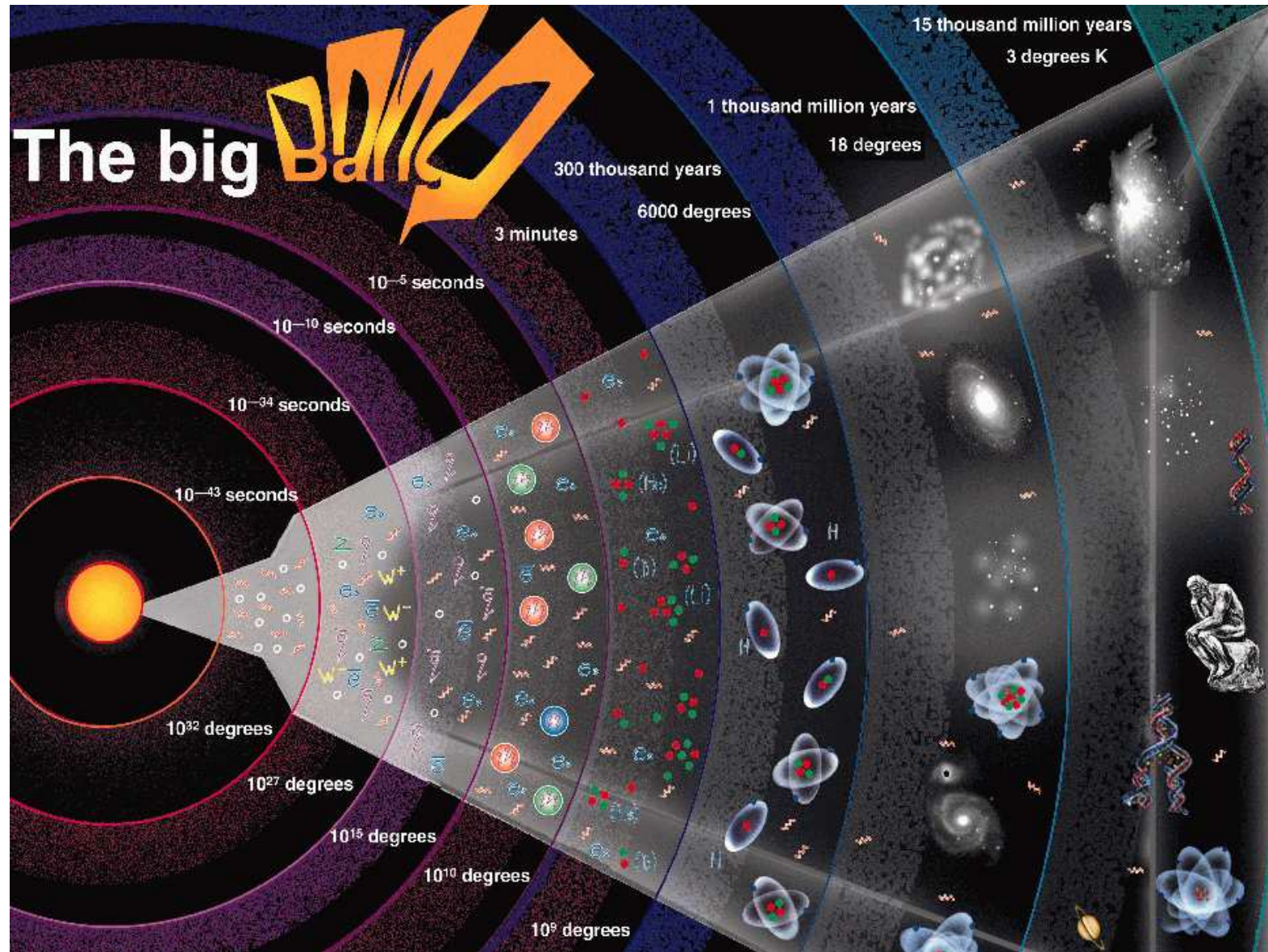
Nie zgadza się z rozkładem materii międzygwiazdnej.



Kosmiczna kolizja



Ewolucja Wszechświata



Promieniowanie tła

W miarę **rozszerzania** się Wszechświata malały energie zderzających się cząstek. Stopniowo zanikały cięższe cząstki (przestawały być produkowane, a rozpadały się).

Gdy Wszechświat miał kilka godzin pozostały już tylko **jądra** lekkich pierwiastków, **elektrony** i **fotony**.

Elektrony i jądra mogły tworzyć atomy, ale były one nieustannie "rozbijane" w wyniku zderzeń z fotonami.



Okolo **300'000 lat po Wielkim Wybuchu** fotony nie mają już dość energii, żeby jonizować atomy. Elektrony łączą się z jądrami tworząc obojętne atomy. Pozostają tylko atomy i **fotony**.

Promieniowanie tła

W przezroczystym Wszechświecie fotony praktycznie nie oddziałują. Jedynie ich energia wciąż maleje (**długość fali rośnie**).

W 1948 **George Gamow**, Ralph Alpher i Robert Herman doszli do wniosku, że fotony powstałe 300'000 lat po Wielkim Wybuchu muszą wciąż wypełniać Wszechświat.

Tylko ich energia jest tak mała, że nie byliśmy w stanie ich obserwować.

Jest to tzw. **promieniowanie reliktowe** inaczej nazywane też **mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB)**

Rozkład widmowy promieniowania powinien odpowiadać rozkładowi promieniowania ciała doskonale czarnego.

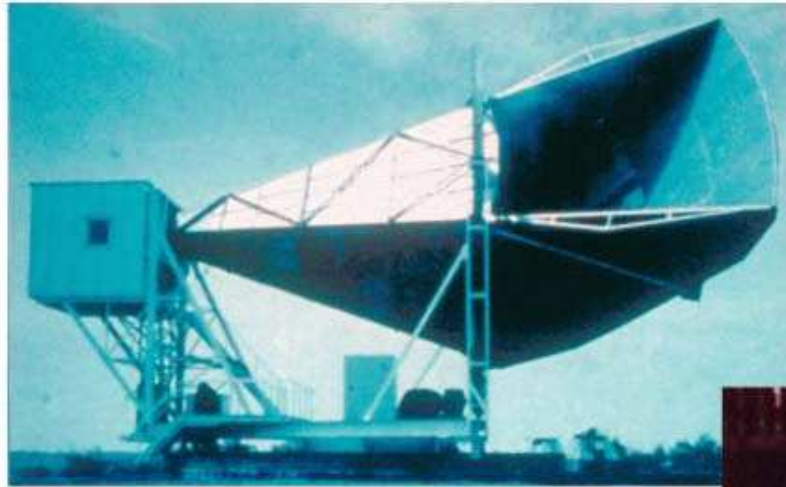
$$T \sim 5 K$$



Promieniowanie tła

zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzisa i R.W.Wilsona.

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

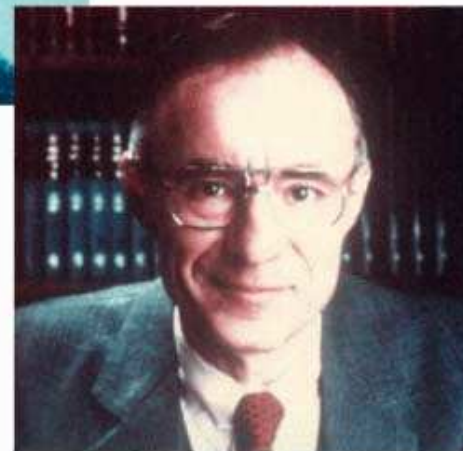


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

Promieniowanie tła

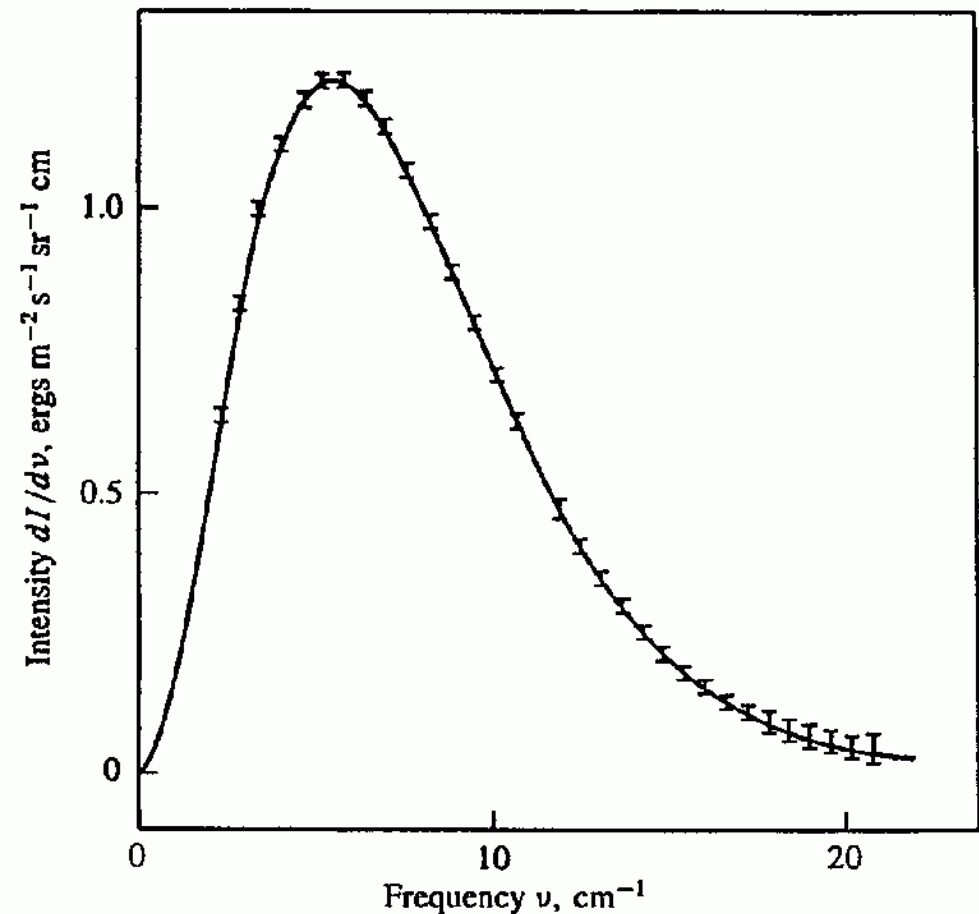
zostało odkryte w 1965 roku przez **A.A.Penzisa** i **R.W.Wilsona**.

Rozkład widmowy promieniowania zgadza się z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego.

$$T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

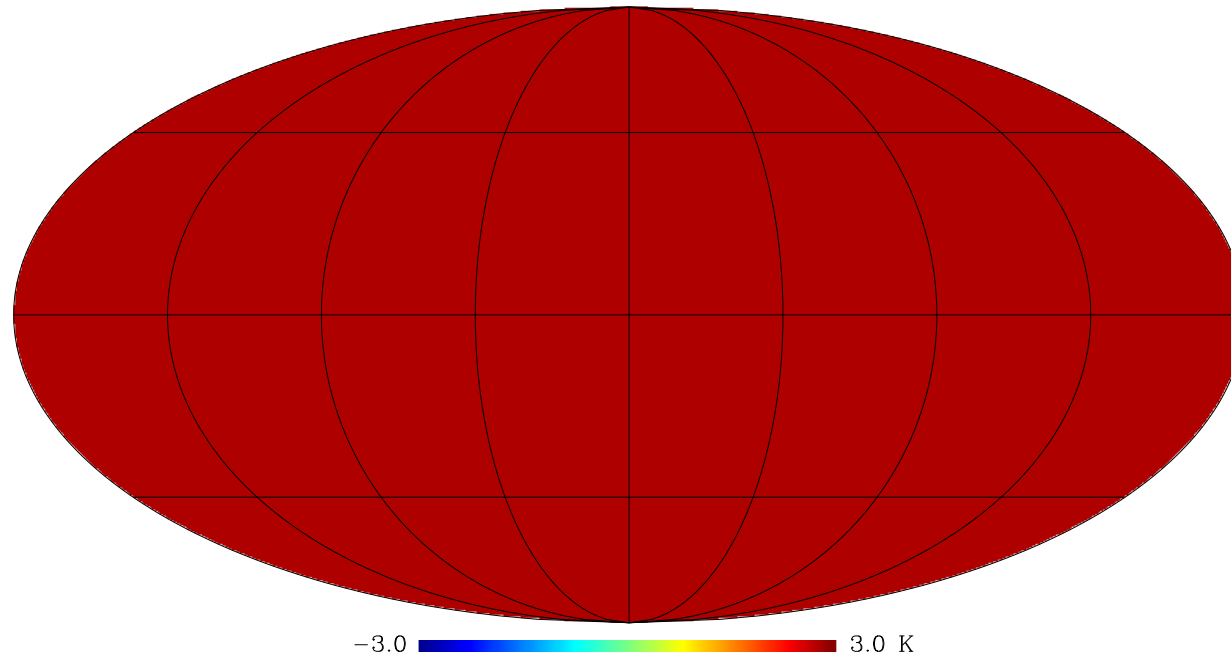
Obserwacja **CMB** była rozstrzygającym dowodem **Wielkiego Wybuchu** i "pogrzebała" model statycznego Wszechświata.

Wyniki z satelity **COBE**: (1999)



Promieniowanie tła

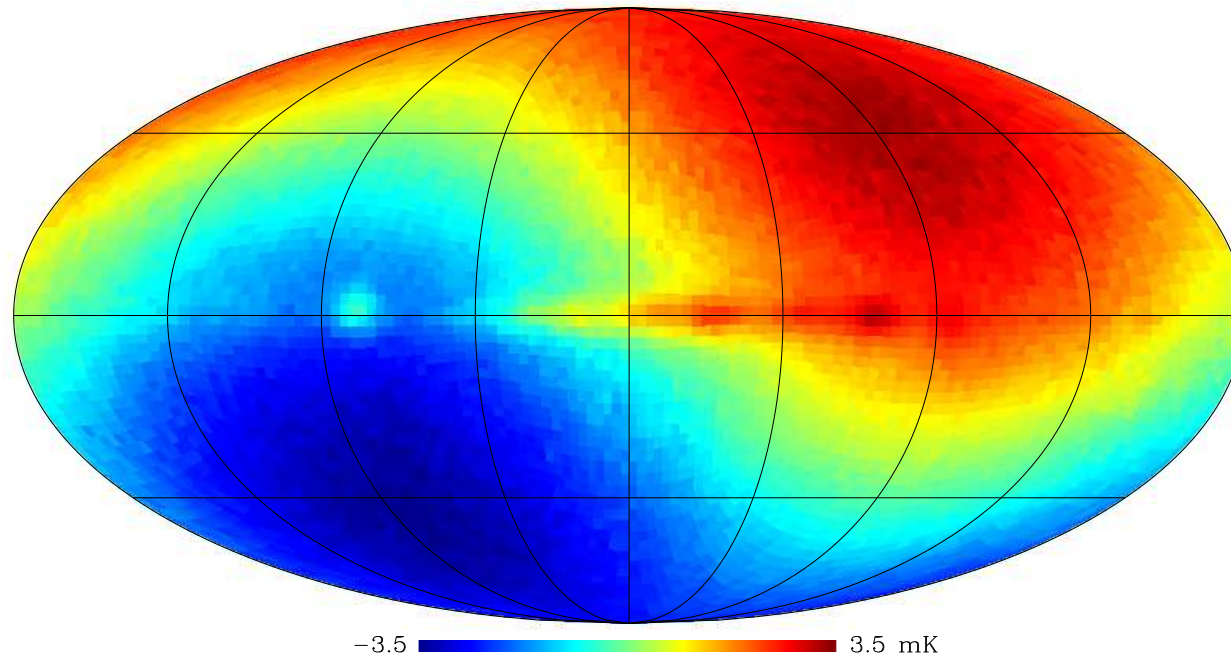
W pierwszym przybliżeniu $(\Delta T \sim 1K)$



promieniowanie tła jest **izotropowe**, wypełnia jednolicie całe niebo.

Promieniowanie tła

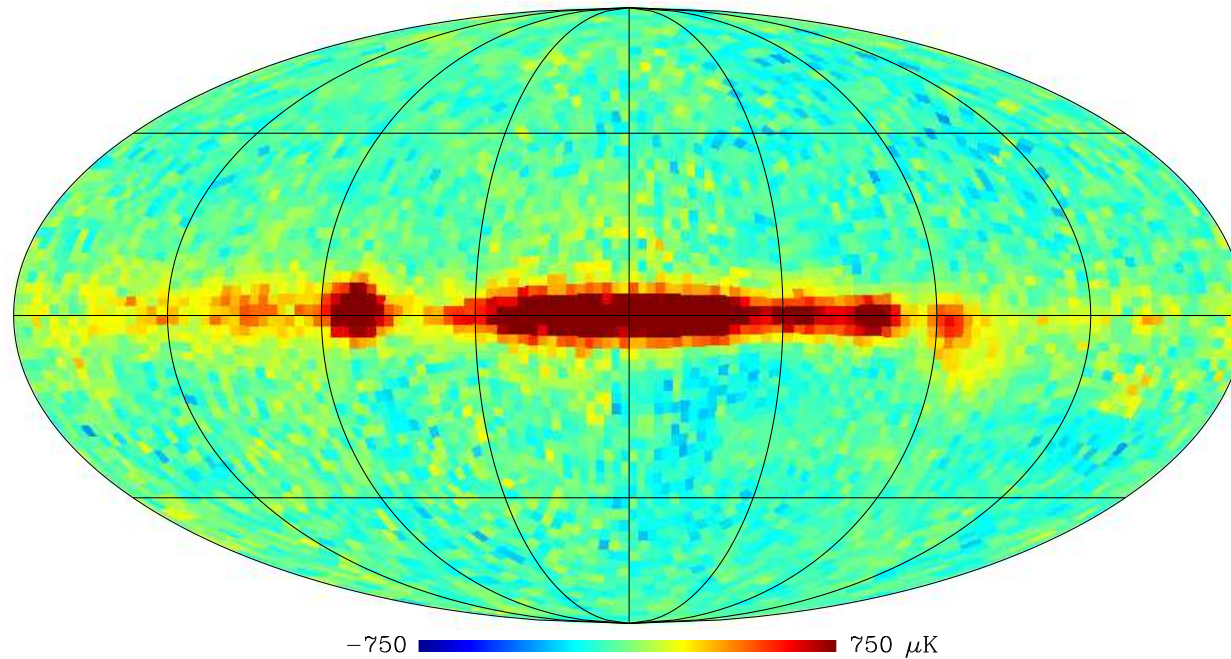
Jednak gdy przyjrzymy się bliżej ($\Delta T \sim 1mK$)



widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem 'globalnego' układu.

Promieniowanie tła

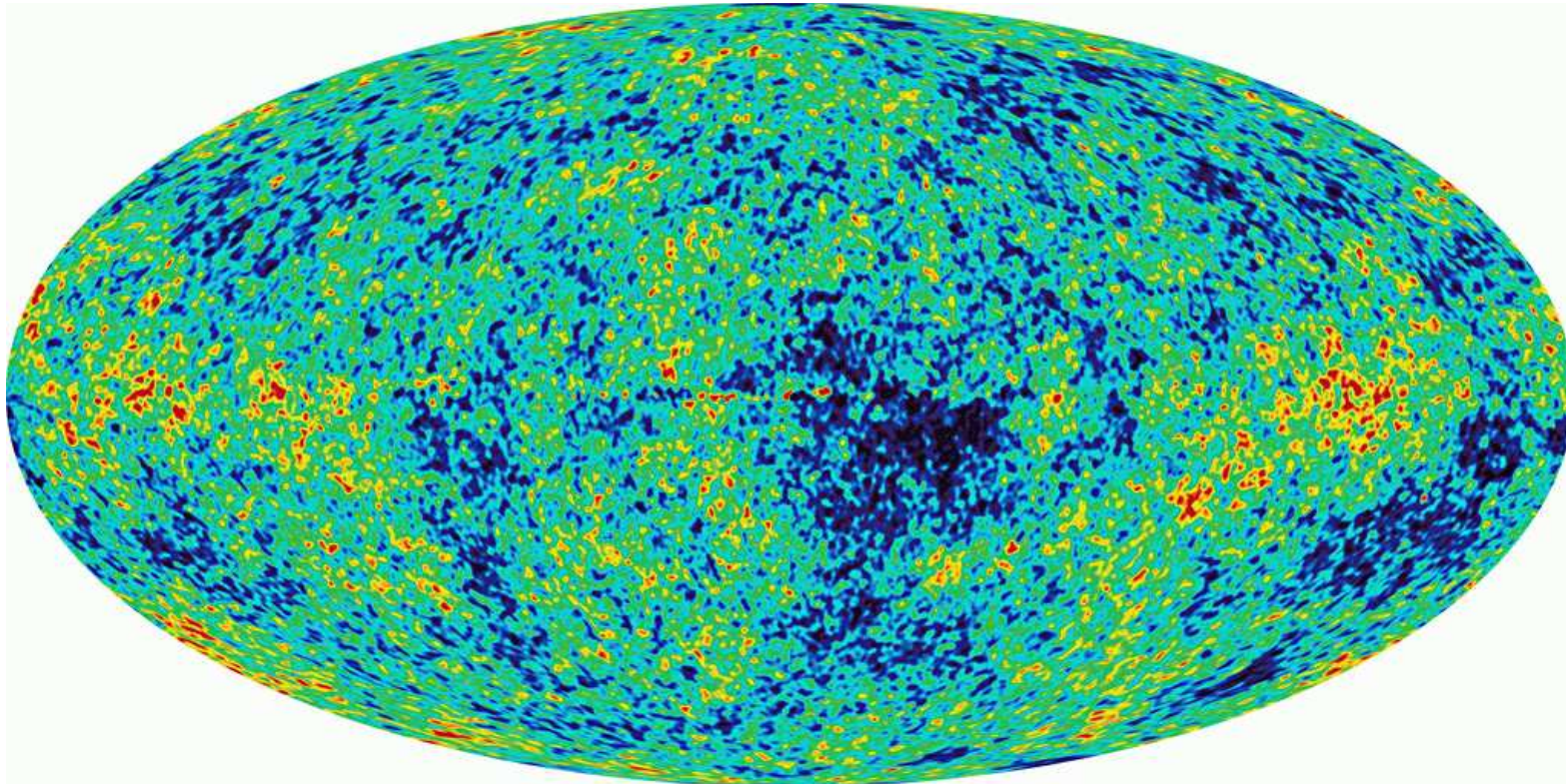
Odejmując wpływ efektu Dopplera ($\Delta T \sim 200 \mu K$)



⇒ widzimy promieniowanie naszej galaktyki (Drogi Mlecznej)...

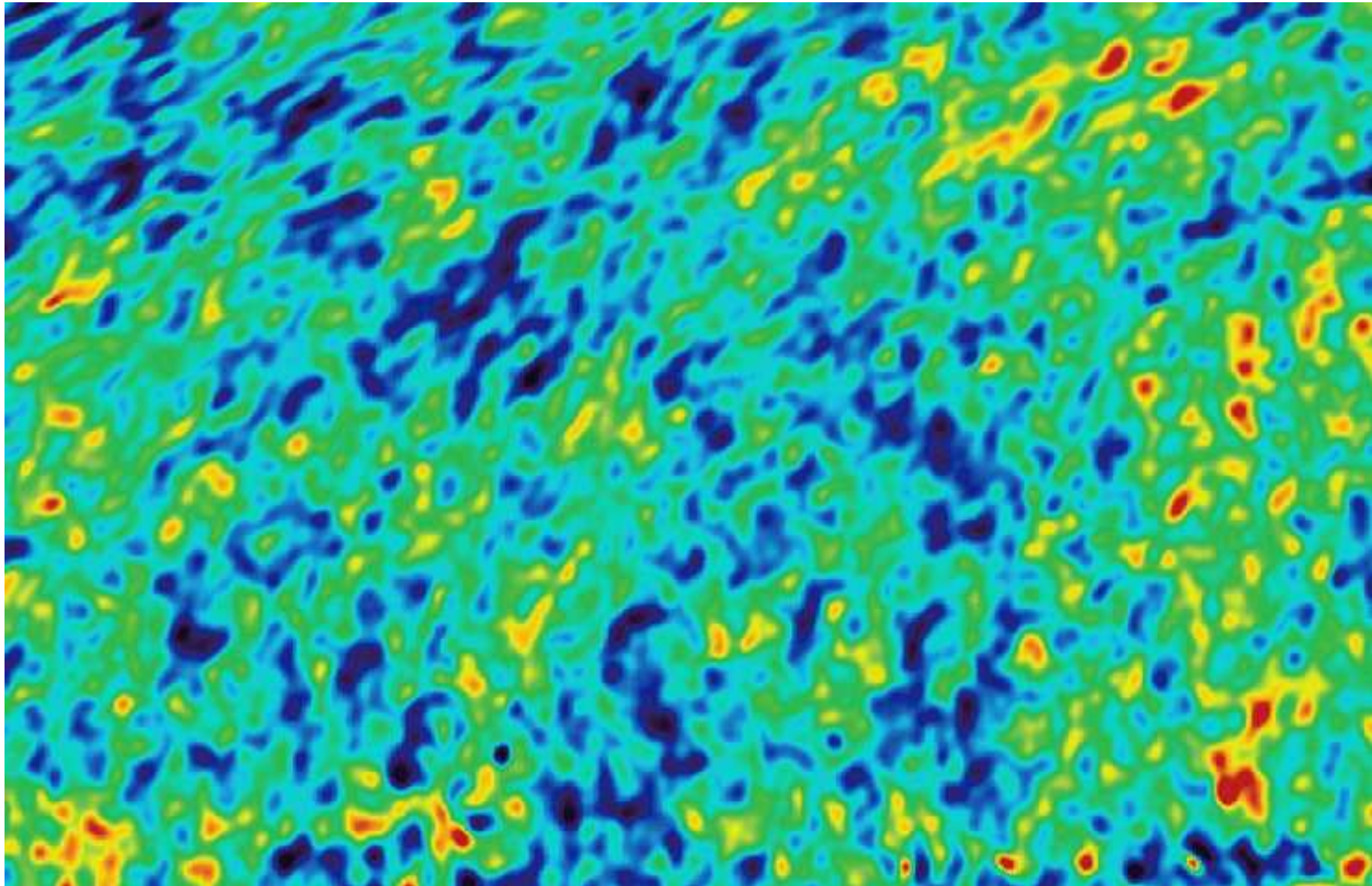
Promieniowanie tła

Odejmując promieniowanie Galaktyki i innych znanych źródeł
($\Delta T \sim 100\mu K$)



widzimy przypadkowe fluktuacje w rozkładzie energii promieniowania
⇒ czy w tym chaosie tkwi jakaś informacja?

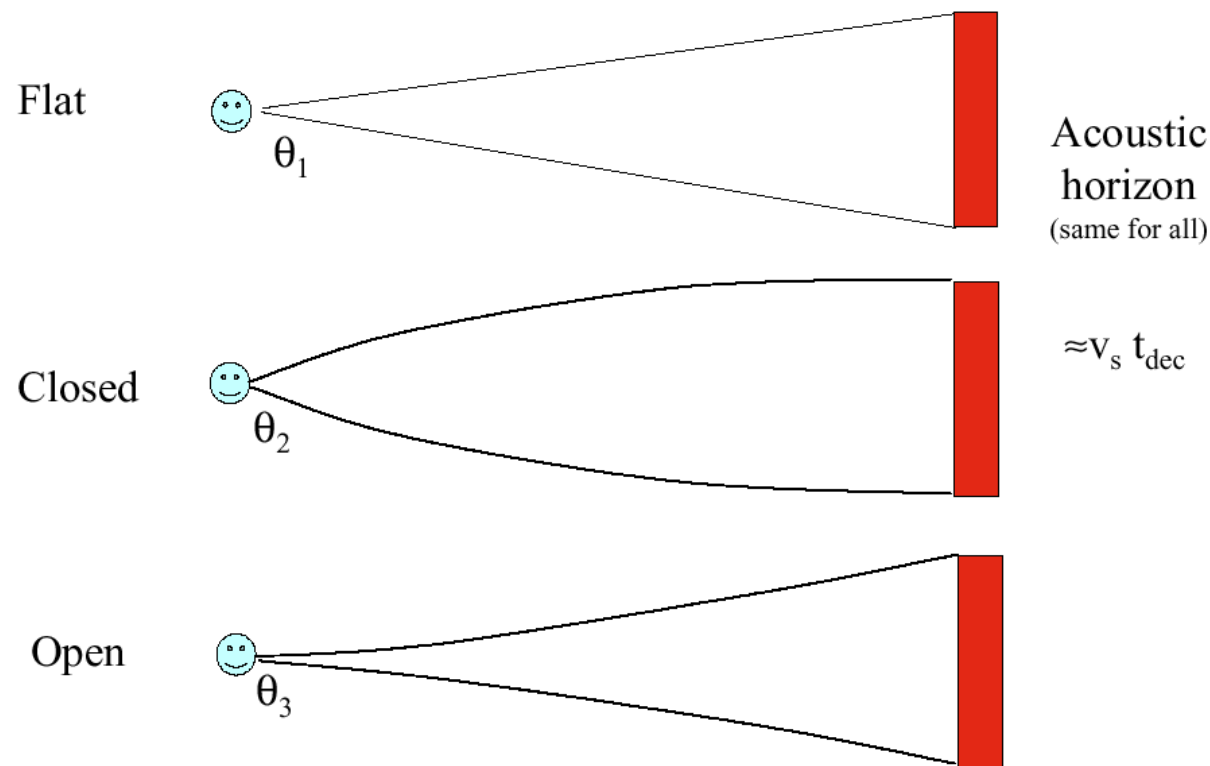
Promieniowanie tła



Promieniowanie tła

Model **Wielkiego Wybuchu** przewiduje jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła.

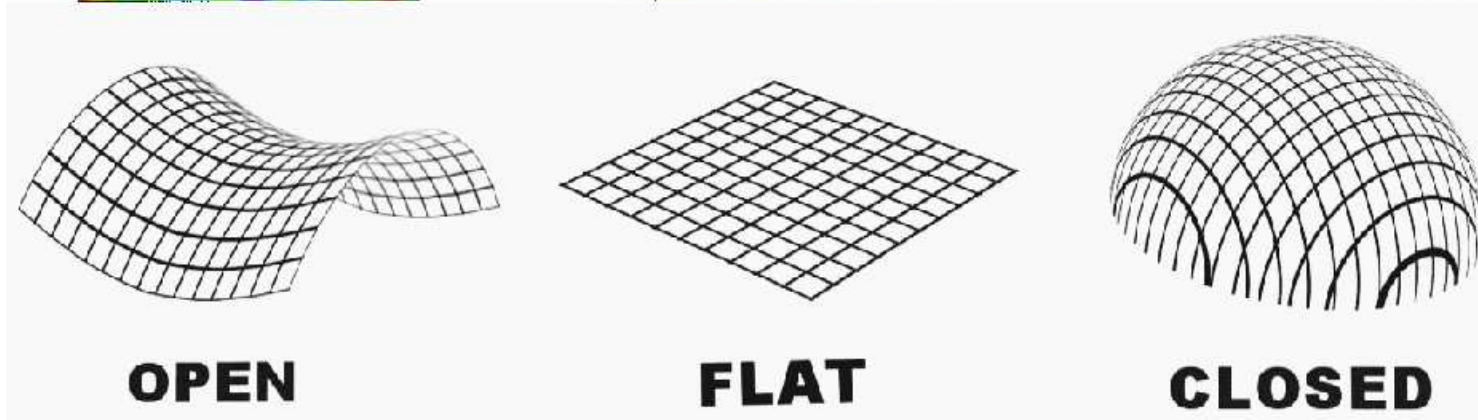
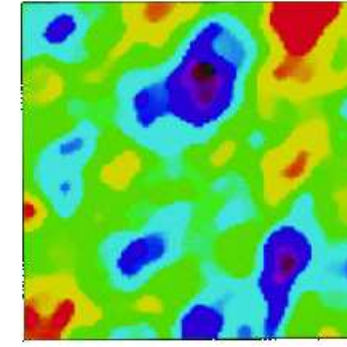
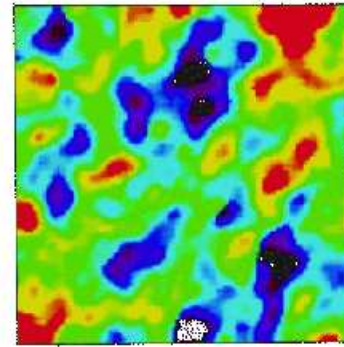
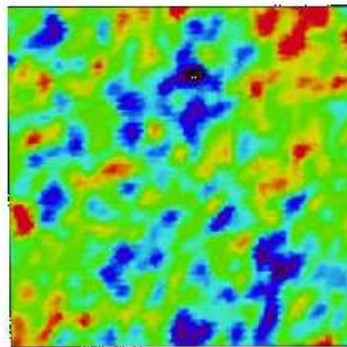
Rozmiary jakie **obecnie** obserwujemy zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



Promieniowanie tła

Model **Wielkiego Wybuchu** przewiduje jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła.

Rozmiary jakie **obecnie** obserwujemy zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**

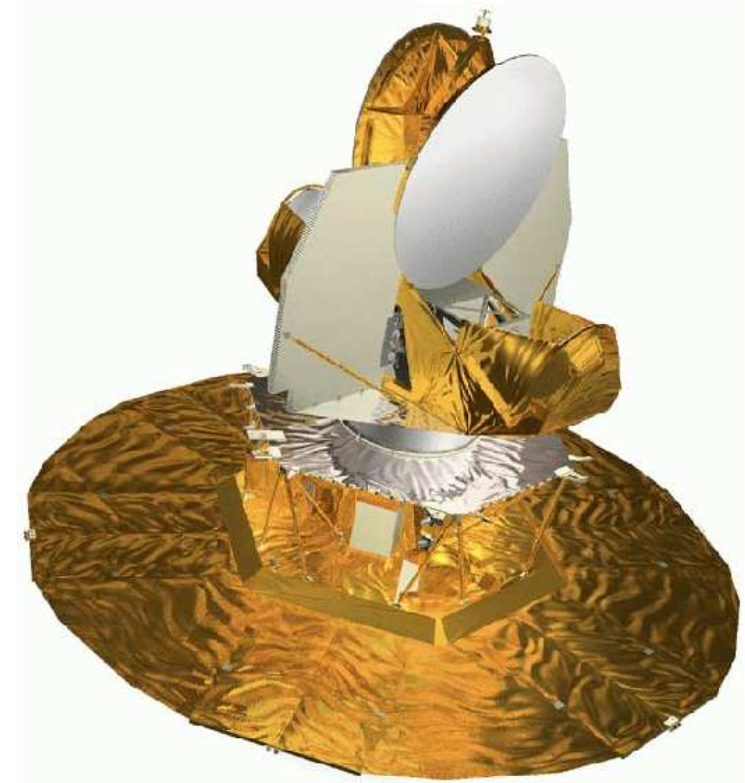


WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.
Pomiar promieniowania mikrofalowego
w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w **różnych zakresach** częstości umożliwia efektywne **odjęcie tła** pochodzącego od Galaktyki.



WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

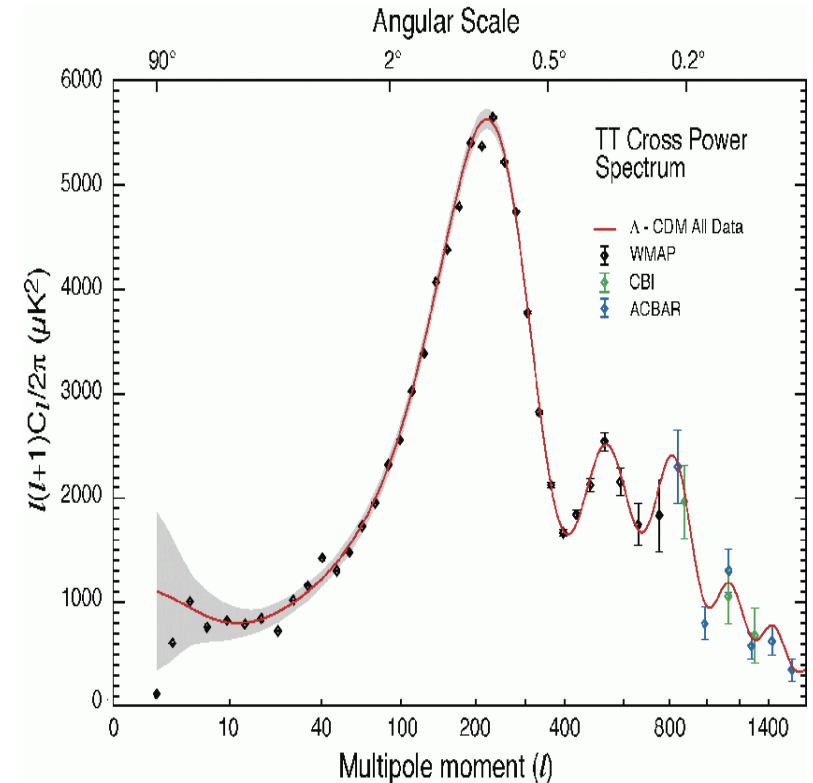
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w **różnych zakresach** częstości umożliwia efektywne **odjęcie tła** pochodzącego od Galaktyki.

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu 0.8°

⇒ Wszechświat jest **płaski** !

⇒ całkowita gęstość materii/energii: $\rho_{tot} = 1.02(\pm 0.02) \rho_c$
(w granicach błędu zgodna z gęstością krytyczną)



Ewolucja Wszechświata

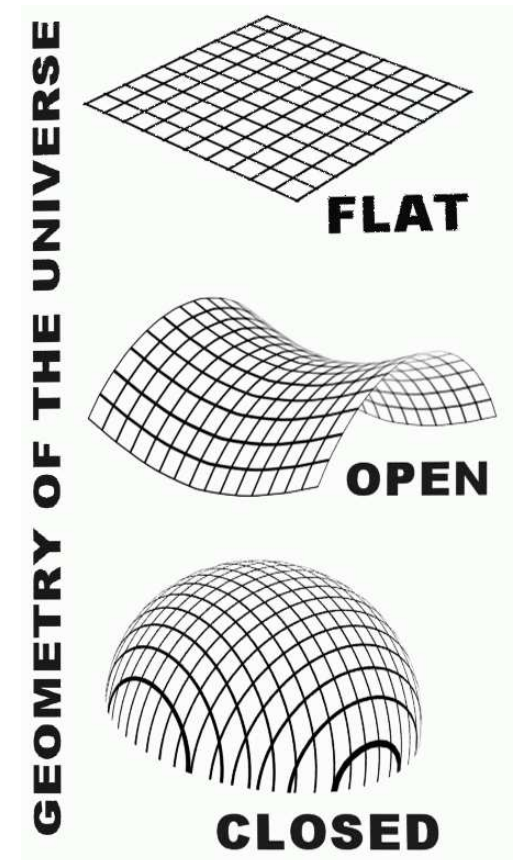
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** wiąże się ściśle z **krzywizną** przestrzeni i zależy od **gęstości** materii ρ .

Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{kg/m}^3$

$\rho = \rho_c$ asymptotycznie “zatrzyma” się

$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

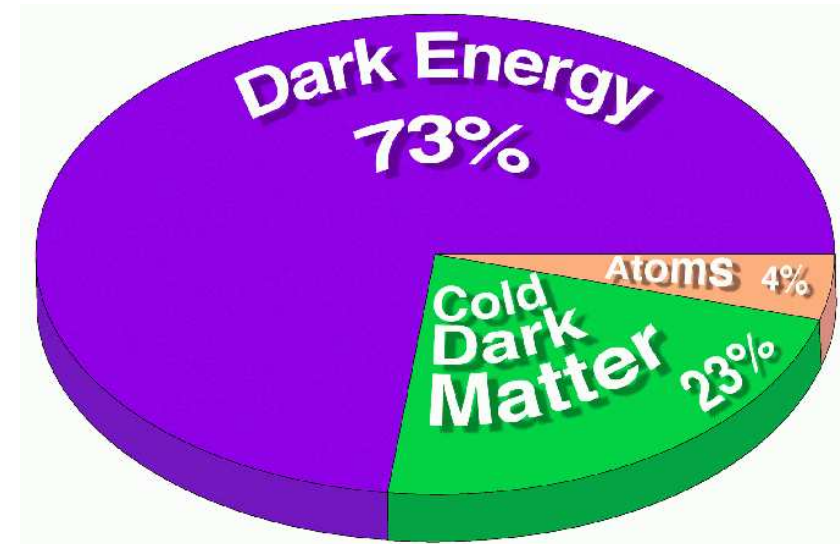


Pomijając wkład od stałej kosmologicznej!

Wyniki

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **4%** Wszechświata.
- **23%** stanowi **ciemna materia**...
- **73%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną (Λ)



Wszechświat zdominowany przez stałą kosmologiczną **rozszerza się coraz szybciej** (!)

Wiek Wszechświata: $T = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr}$

Podsumowanie

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek** \Rightarrow **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (**np. cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie
Wszechświat zbudowany jest z **materii**
 \Rightarrow jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?
Wiemy już, że wymagało to złamania symetrii CP, znacznie silniejszego niż w Modelu Standardowym...
- cząstki o bardzo wysokich energiach w **promieniowaniu kosmicznym**, błyski γ , ...