

Wszechświat cząstek elementarnych

Maria Krawczyk

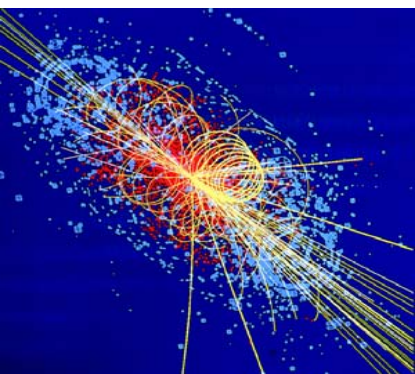
i

A. Filip Żarnecki

Instytut Fizyki Teoretycznej

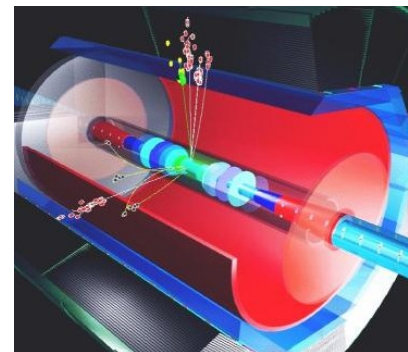
i

Instytut Fizyki Doświadczalnej



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

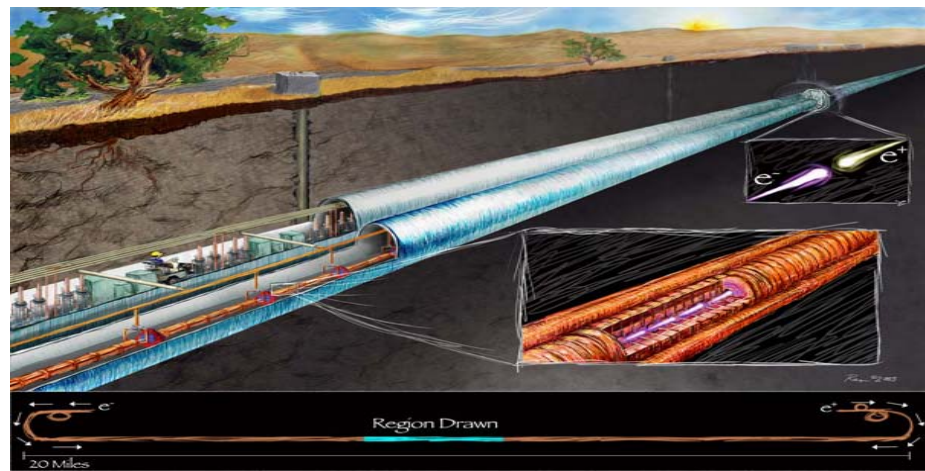
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/wce.html>



Large Hadron Collider



International Linear Collider



Program

1. Wprowadzenie

Ogólne informacje o Modelu Standardowym

2. Detekcje cząstek. Przyspieszacze i zderzacze.

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

Warunki zaliczenia :

1. obecność na wykładach

*dopuszczona jest nieobecność na dwóch wykładach,
kolejne nieobecności obniżają ocenę*

2. 50% punktów z pisemnego egzaminu testowego

30 pytań (max 1 zdanie odpowiedzi)

*Terminy egzaminów będą zaproponowane w
najbliższej przyszłości*

Skąd ten tytuł wykładu?



Notacja naukowa

- W fizyce mamy często do czynienia z bardzo dużymi lub bardzo małymi wielkościami. Chcemy łatwiej się nimi posługiwać.

Przykład: odległość Ziemia-Słońce $1 \text{ AU} = 150\,000\,000\,000 \text{ m}$

notacja naukowa: $1 \text{ AU} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ 11 cyfr po 1

Przykład: atom wodoru – rozmiar $1 \text{ Å} = 0.000\,000\,000\,1 \text{ m}$

notacja naukowa: $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m} = 1/10^{10} \text{ m}$ 1 na 10 miejscu

Notacja naukowa

Wykładnik potęgi 10 określa nam „rzęd wielkości”

1 rząd wielkości:
różnica o czynnik 10



~1 m



~10 m

Notacja naukowa

10 rzędów wielkości:

różnica o czynnik $10^{10} = 10\ 000\ 000\ 000$

Bardzo dużo !!!



$\sim 1\text{ mm} = 10^{-3}\text{ m}$



$\sim 10\ 000\text{ km} = 10^7\text{ m}$



Notacja naukowa

Aby ułatwić zapis wprowadzamy dedykowane nazwy

Duże liczby

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

da	h	k	M	G	T		
10	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}		10^{24}

Małe liczby

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

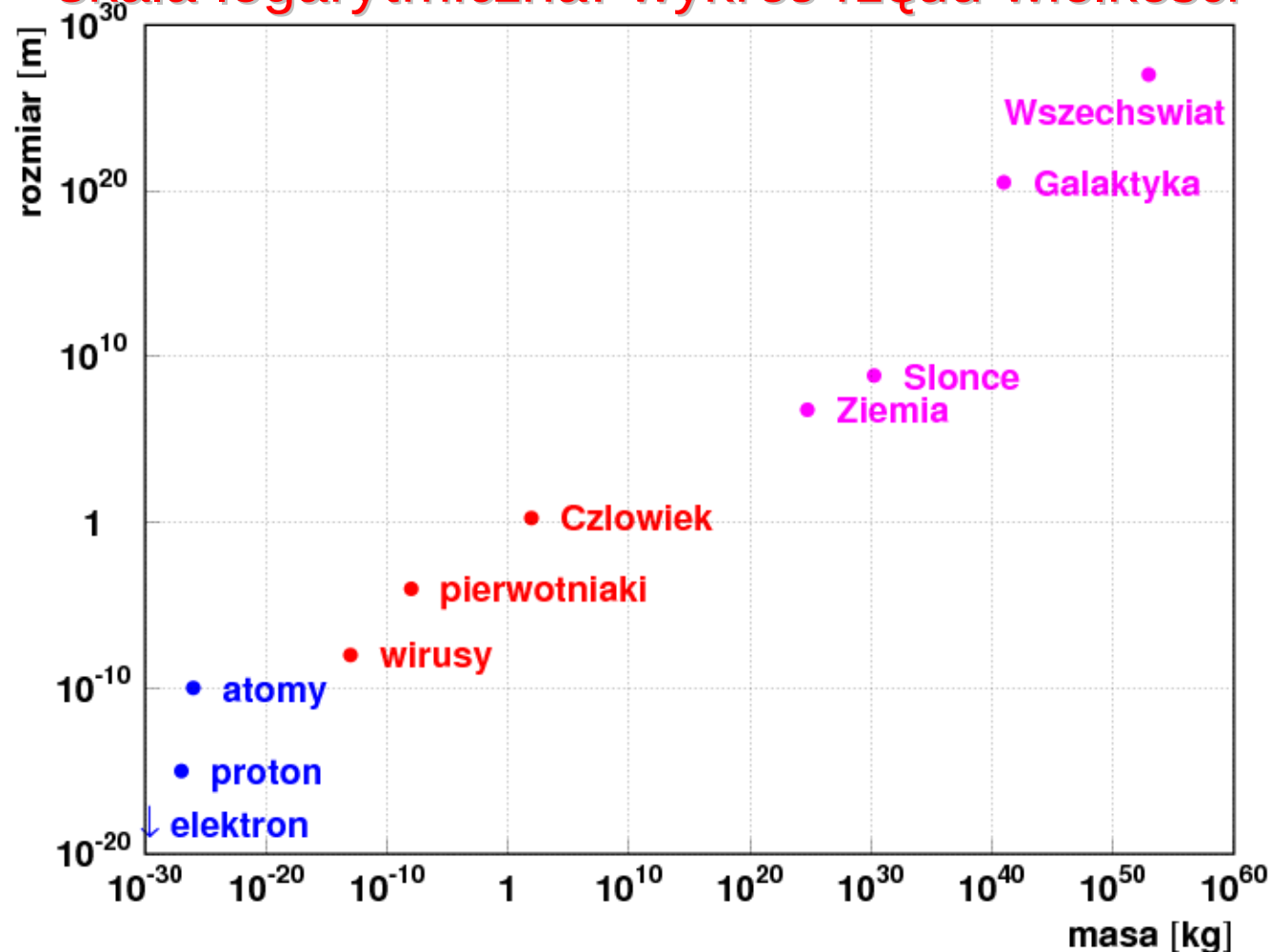
d	c	m	μ	n	p	f	
10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	 10^{-24}

Przykład: $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

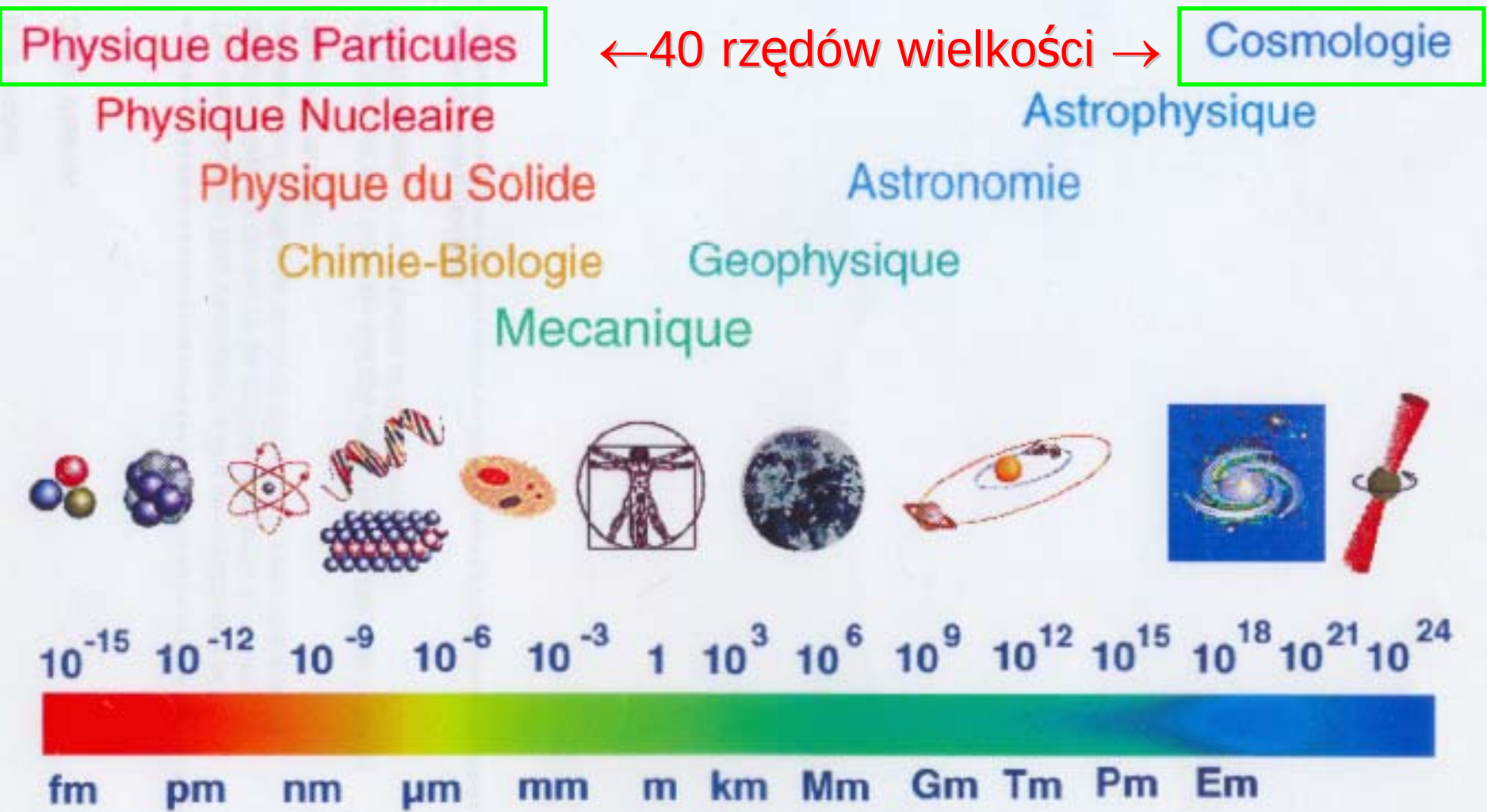
Czym zajmuje się fizyka?

- Staramy się zrozumieć zjawiska zachodzące na najmniejszych i największych odległościach
- Szukamy praw opisujących zarówno zachowanie najmniejszych cząstek i ewolucję wszechświata

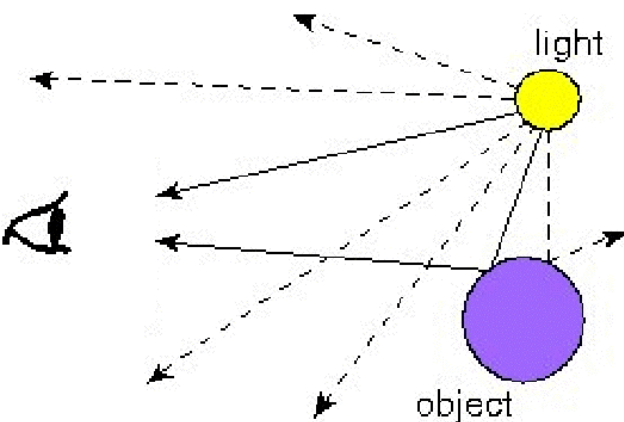
Skala logarytmiczna: wykres rzędu wielkości



Czym zajmuje się fizyka?



Jak badamy cząstki elementarne?



■ Przyglądamy się im...

źródło „światła” → obiekt → detektor

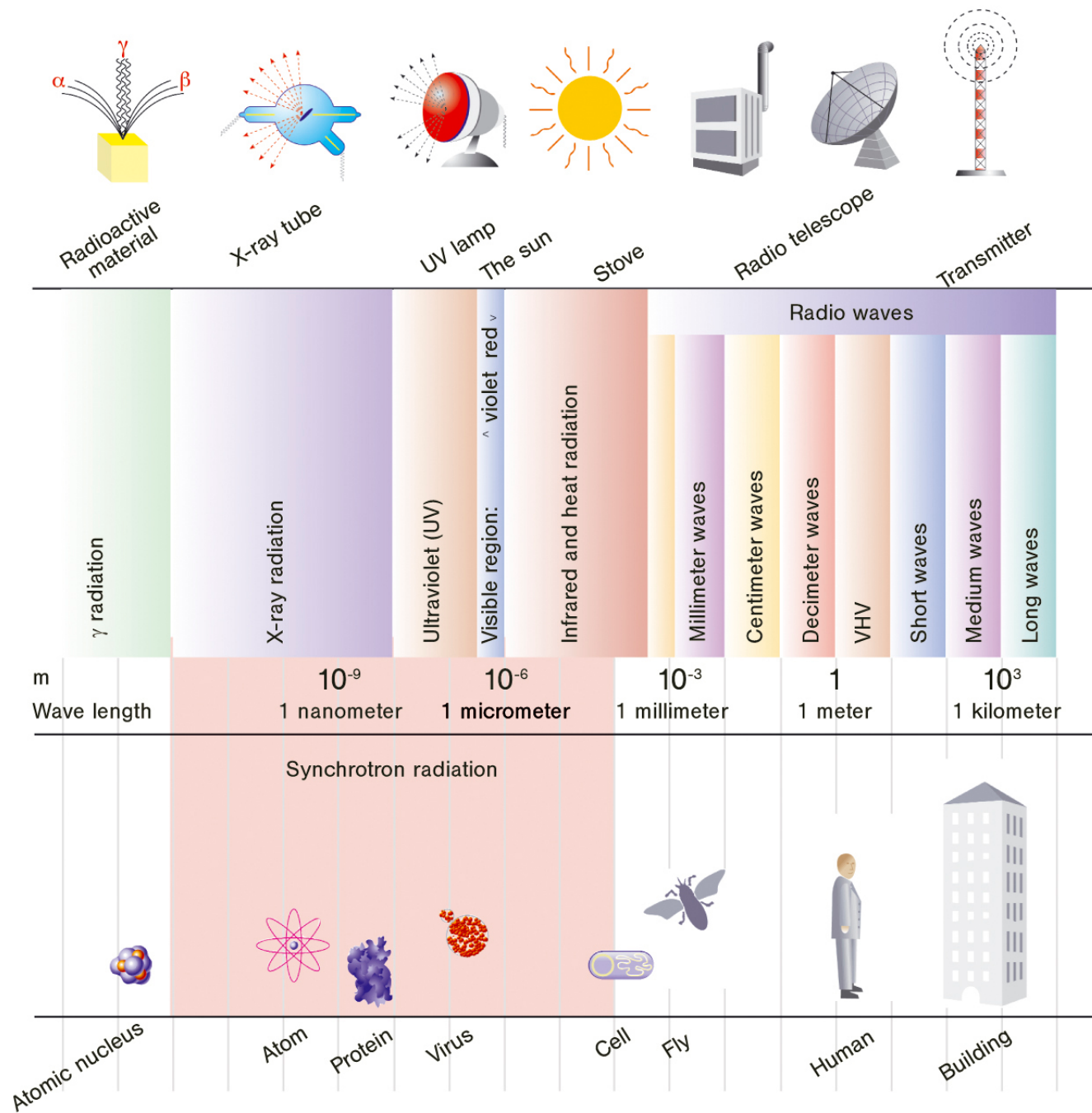
Niestety, cząstek nie możemy zwyczajnie zobaczyć – światło widzialne jest „za grube”

długość fali $\lambda \sim 300-600 \text{ nm}$

rozmiar atomu $\sim 0.1 \text{ nm}$

Musimy szukać innych metod, innych „promieni”...





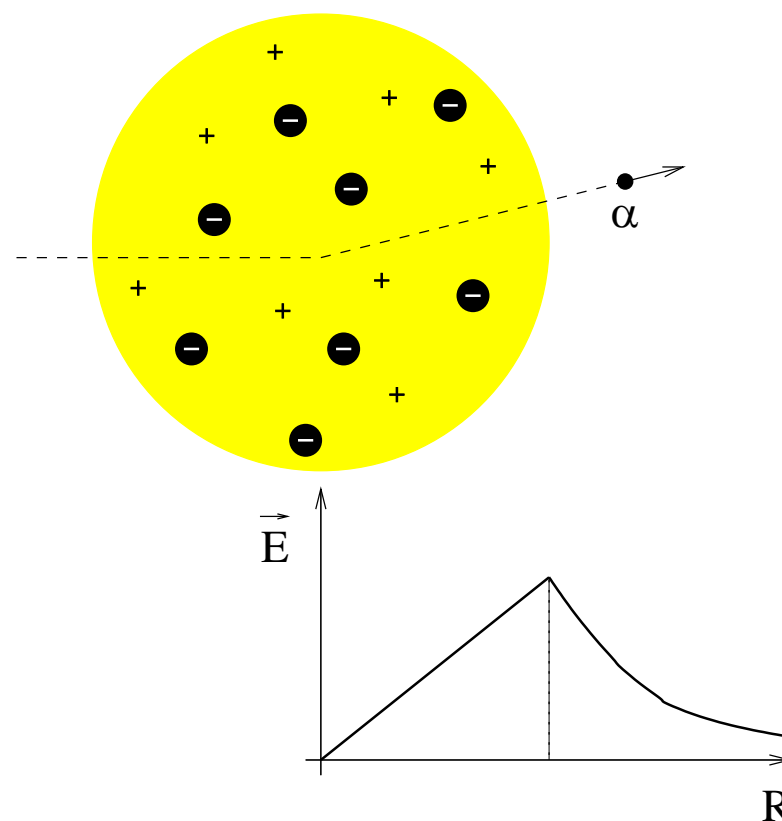
Odkrycie jądra atomowego

Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym



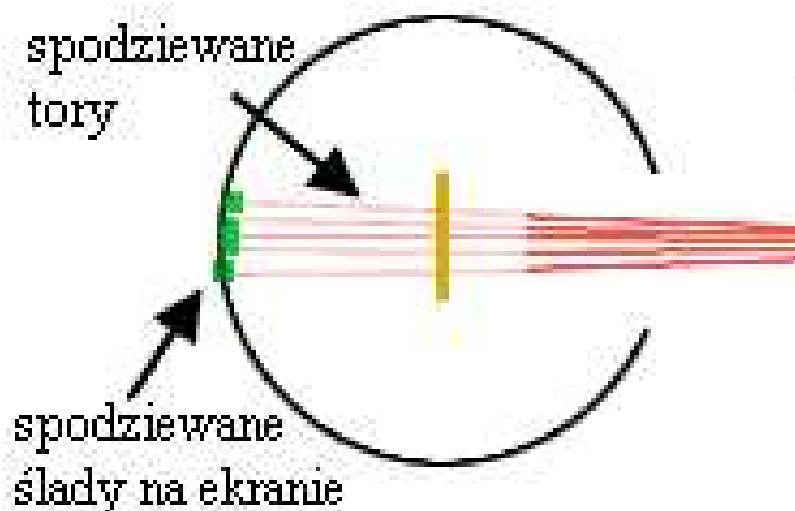
Model Thomsona: cała **objętość** atomu **jednorodnie naładowana dodatnio** ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" **elektrony** ("rodzynki").

Odkrycie jądra atomowego

Doświadczenie Rutherforda

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

Oczekiwane

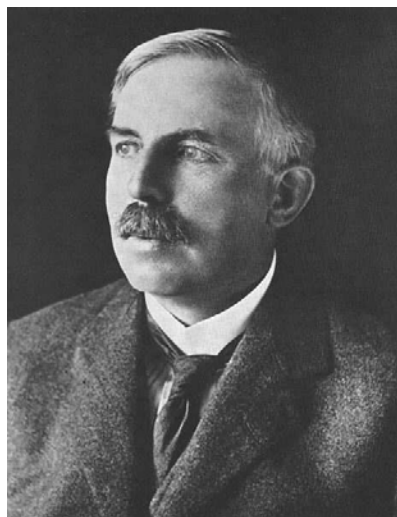


Uzyskane



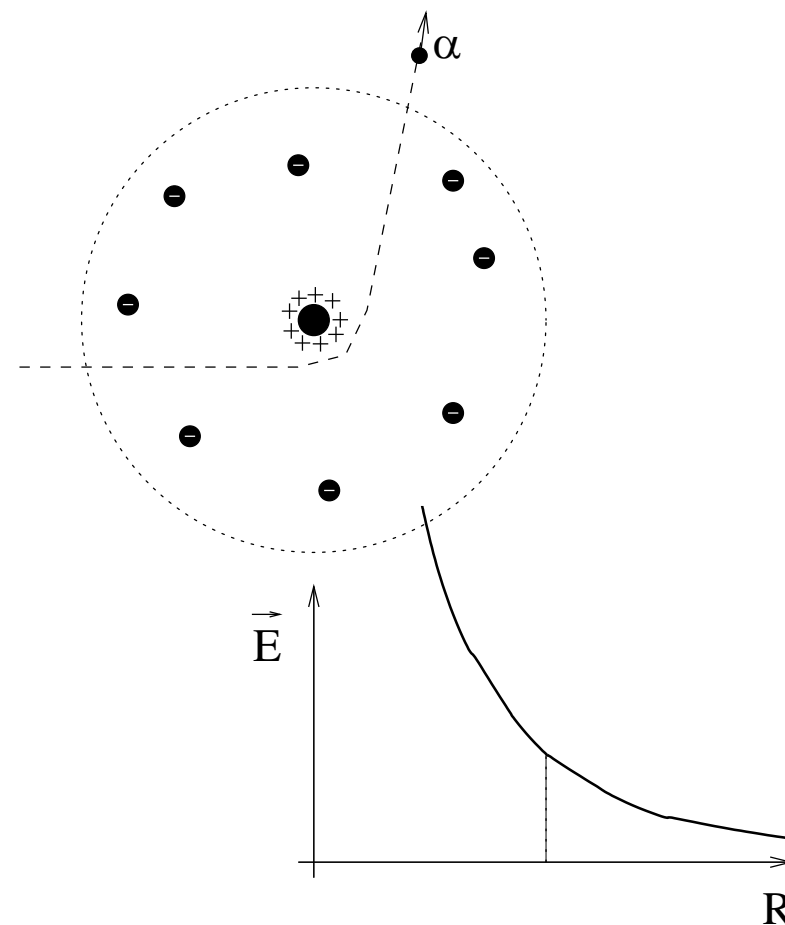
Odkrycie jądra atomowego

Model Rutherforda



Rutherford zaproponował
jądrowy model atomu.

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



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



Jak badamy cząstki elementarne?

- Przyglądamy się im...

źródło „światła” → obiekt → detektor

- Rozbijamy je...

zderzając cząstka → ← cząstka

Patrzymy jakie są produkty zderzenia



Jak badamy cząstki elementarne?

- Przyglądamy się im...

źródło „światła” → obiekt → detektor

- Rozbijamy je...

zderzając cząstka → ← cząstka

Patrzemy jakie są produkty zderzenia

- „Podgrzewamy”...

Dostarczamy dużej energii do układu wielu cząstek (np. w wyniku zderzenia)

patrzemy co „się ugotuje”

jakie cząstki powstaną na końcu



Jak badamy cząstki elementarne?

- Rozdzielczość „promieni” o energii E

$$\Delta x \sim \lambda = hc/E$$

h – stała Plancka, $h=6.626 \cdot 10^{-34}$ Js

c – prędkość światła

Aby badać materię na poziomie cząstek musimy używać fotonów (lub innych cząstek) o wysokich energiach...

- Energia odpowiadająca temperaturze T

$$E = k T$$

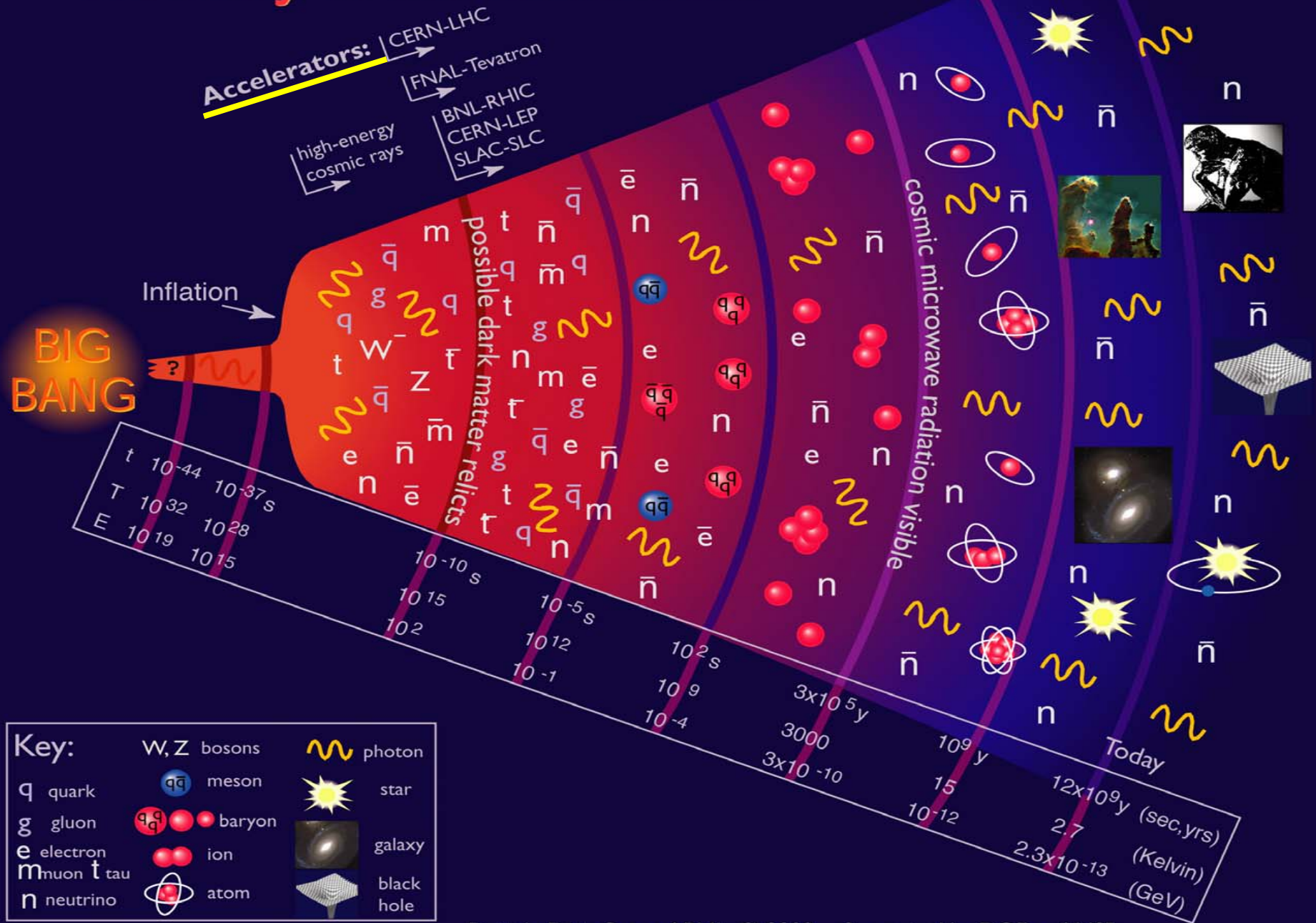
k – stała Boltzmana $k=1.4 \cdot 10^{-23}$ J/K

- Skale rozdzielczości, energii i temperatury są równoważne...

Jednostki energii

- Joule (J) jest jednostką „astronomiczną” w świecie cząstek, potrzebujemy bardziej praktycznej jednostki
- 1 eV (elektronowolt) = energia jaką elektron zyskuje w wyniku działania pola elektrycznego przy napięciu 1V
$$1 \text{ eV} = 1.6 * 10^{-19} \text{ J}$$
- Rozdzielczość: $1 \text{ eV} \sim 1 \mu\text{m}$
- Temperatura: $1 \text{ eV} \sim 10^4 \text{ K}$
- Jednostki pochodne: 1 keV, 1 MeV, 1 GeV, 1 TeV...

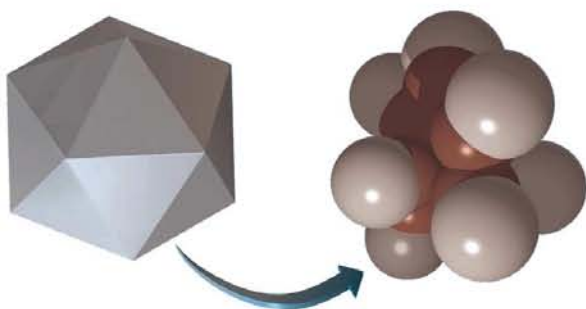
History of the Universe



Wprowadzenie

Budowa materii

Cząsteczka

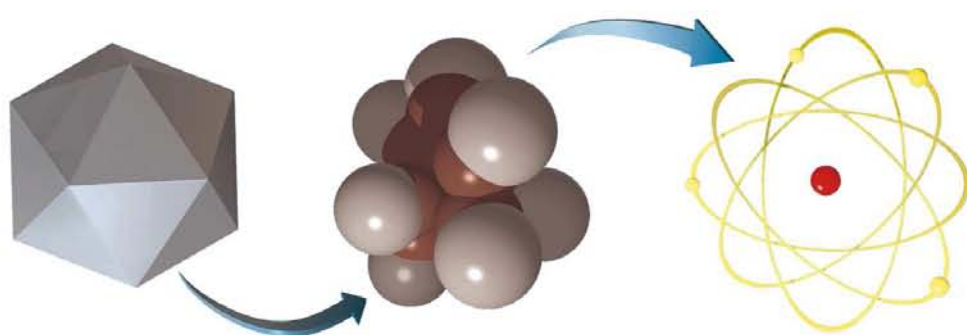


10^{-9} m

Wprowadzenie

Budowa materii

Atom

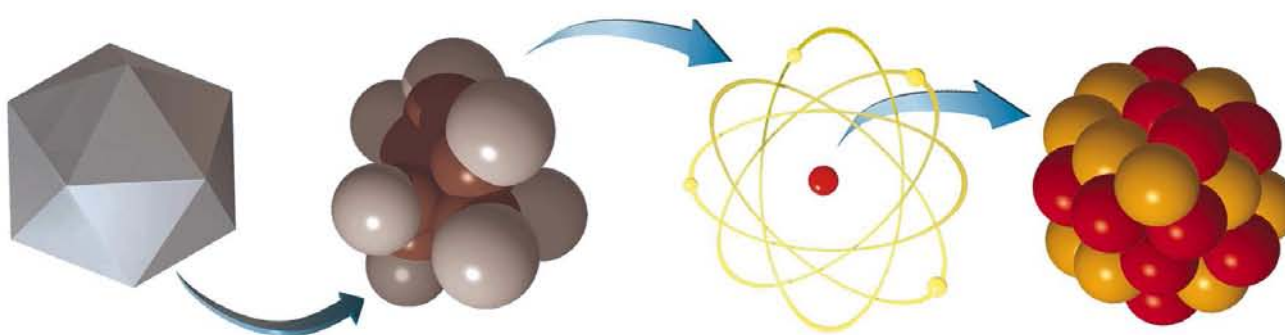


10^{-10} m

Wprowadzenie

Budowa materii

Jądro atomowe

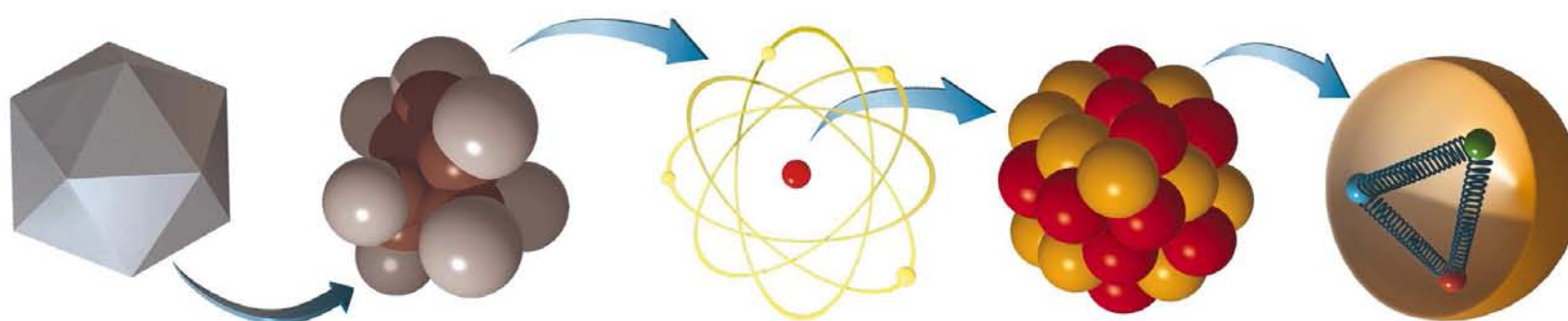


10^{-14} m

Wprowadzenie

Budowa materii

Nukleony



10^{-15} m



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 $D = p + n + e$ - ciężki wodór (-> ciężka woda)

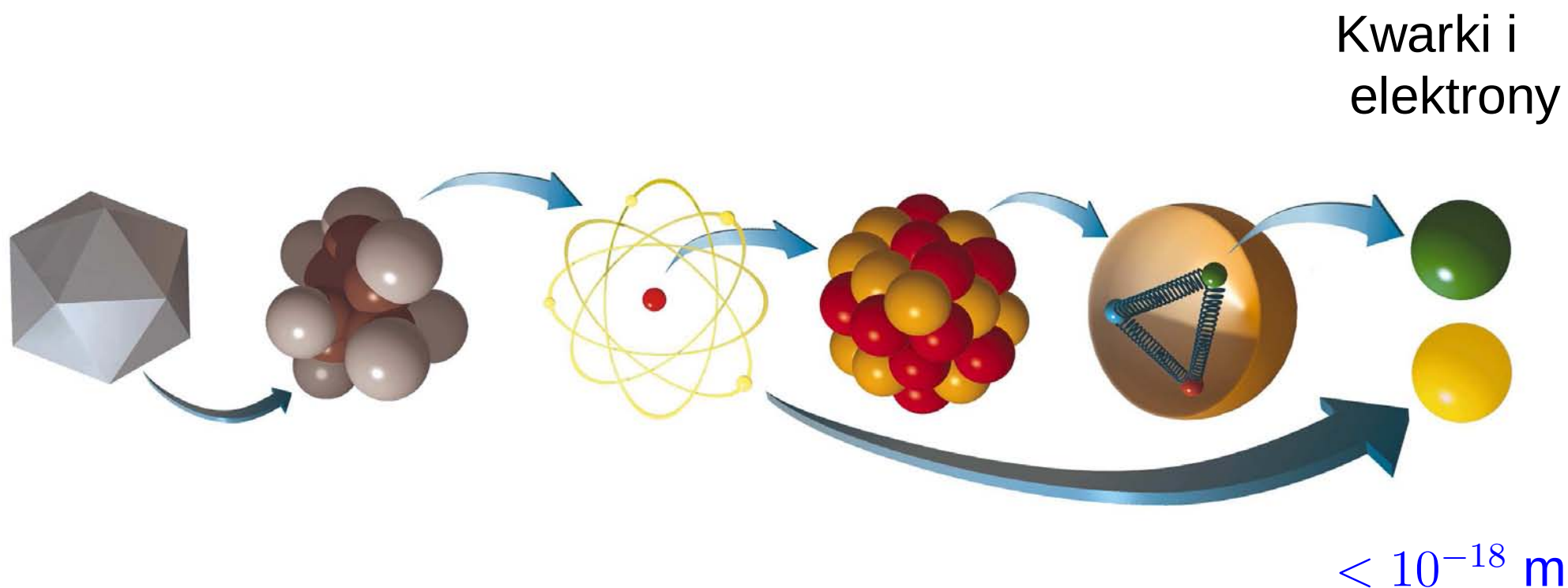
Tryt $T = p + 2n + e$

Hel $He = p + p + 2n + 2e$

Fizyka jądrowa -> badanie jąder atomowych

Wprowadzenie

Budowa materii





Nukleony i kwarki (oraz gluony)

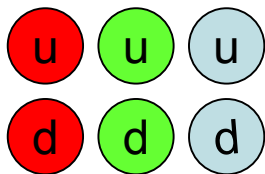
Proton i neutron = 3 kwarki

(różne typy kwarków i ich nazwy...)

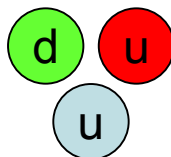
kwarki *u* (*up*) i *d* (*down*)

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

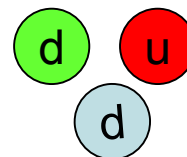
czerwone, zielone i niebieskie – to tylko nazwy



proton



neutron



Kwarki nie mają struktury! Są fundamentalne..

Ale nie występują jako cząstki swobodne – p i n tak

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

Model Standardowy

Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegiełki” (elektron oraz kwarki u i d)

	leptony	kwarki	
	e elektron	d down	u up
ładunek [e]	-1	$-1/3$	$+2/3$

Model Standardowy

Budowa materii

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

	leptony		kwarki	
	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

Model Standardowy

Budowa materii

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

Fizyka cząstek $\Rightarrow$ 12 fundamentalnych “cegielełek” materii, fermionów

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

Model Standardowy

Budowa materii

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

Fizyka cząstek $\Rightarrow$ 12 fundamentalnych “cegiełek” materii, fermionów

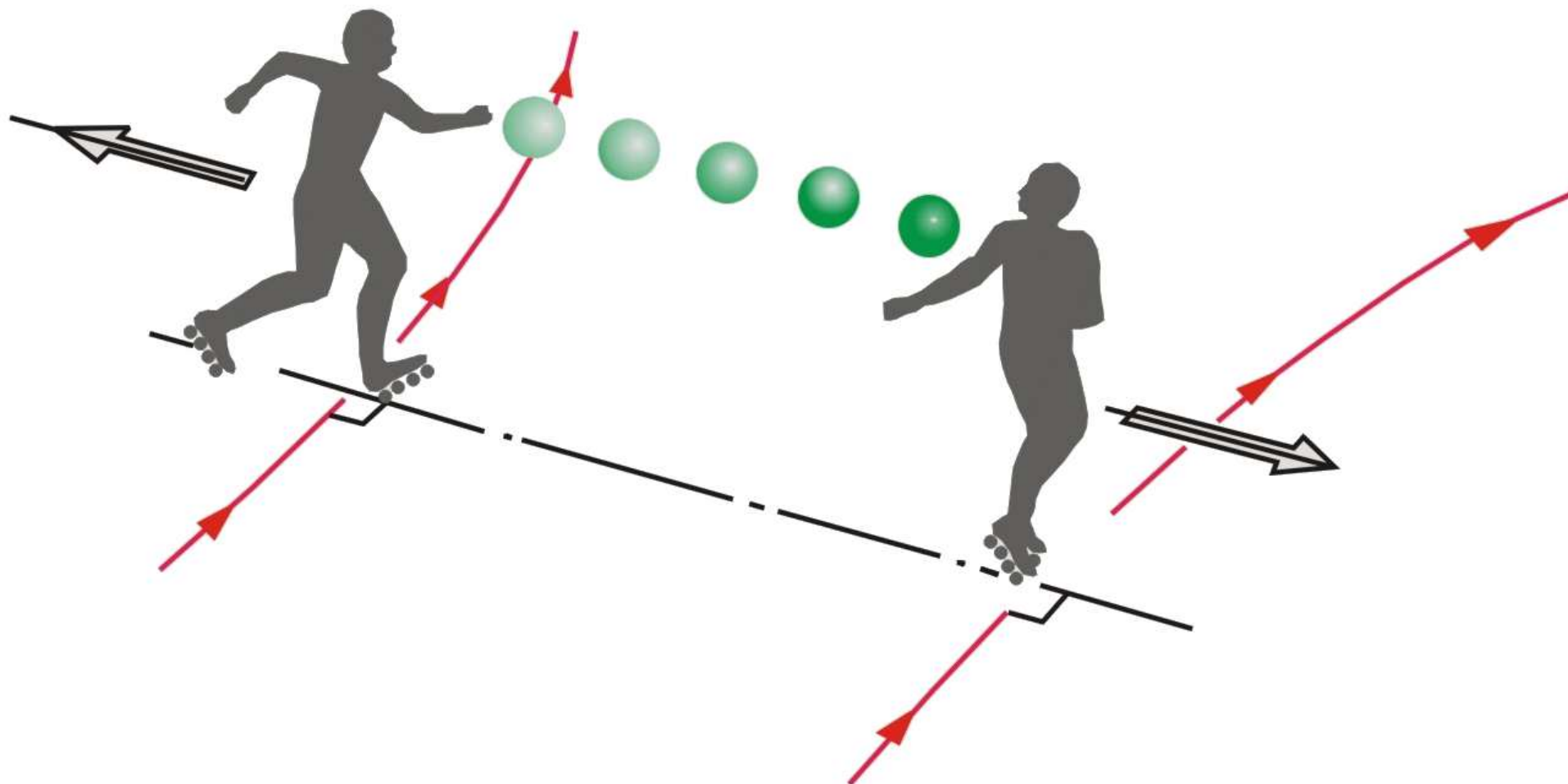
	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek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

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Model Standardowy

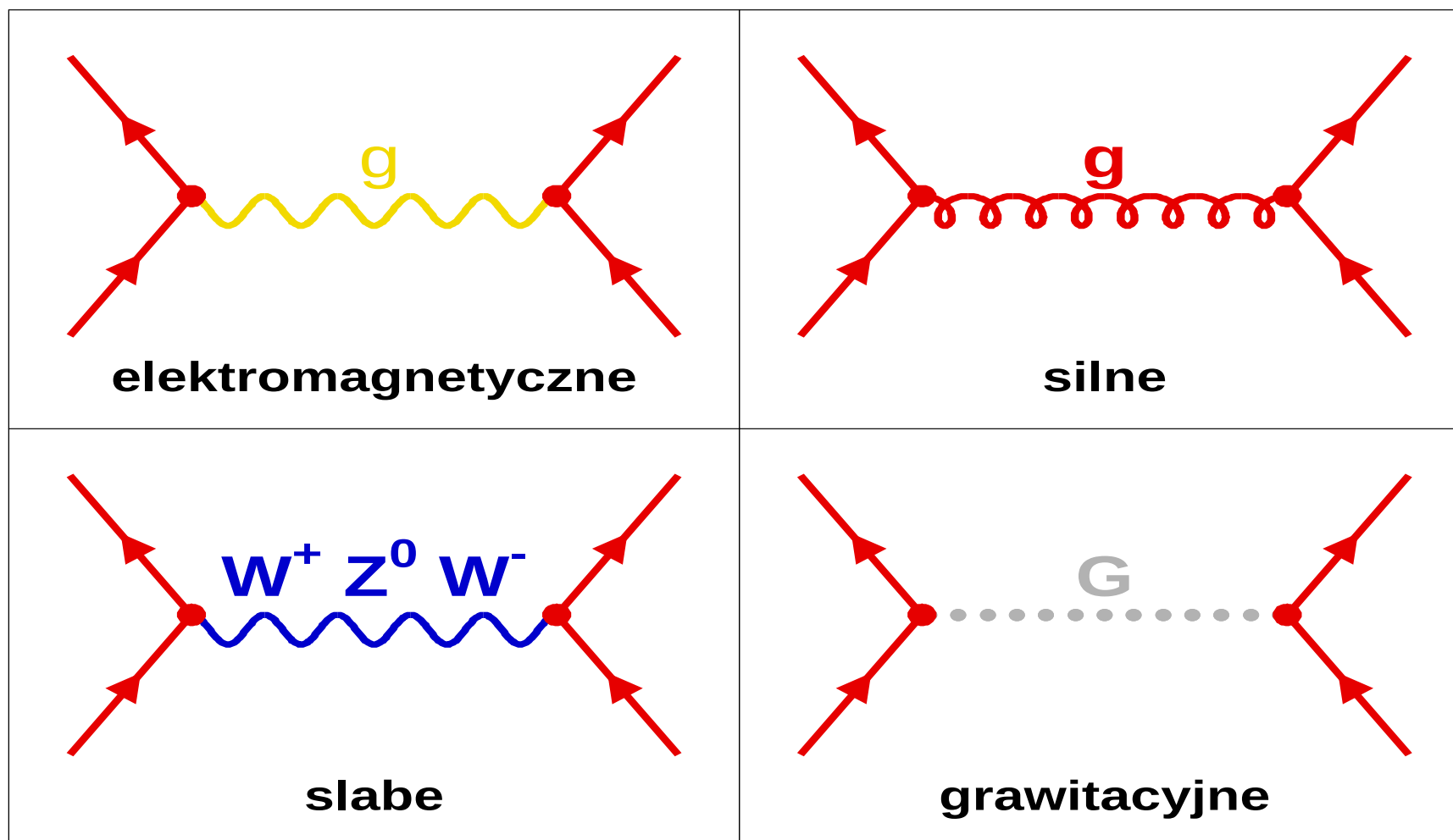
Oddziaływania

Opisujemy je jako wymianę cząstek - “nośników”



Model Standardowy

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



Model Standardowy

Oddziaływania

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

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

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

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





Fizyka cząstek elementarnych

- Wiek XX – niezwykle rozwój fizyki, nowe, fundamentalne idee:
 - pierwsza połowa XX: teoria względności, teoria grawitacji i teoria kwantów
 - druga połowa: fizyka cząstek elementarnych, opis cząstek i oddziaływań w tzw. kwantowej teorii pola

Współczesna teoria cząstek opiera się na „fundamentach” teorii względności i mechaniki kwantowej !



Masa i energia

W fizyce cząstek praktycznie zawsze musimy uwzględniać teorię względności!
Cząstki na ogół poruszają się z prędkościami bliskimi c .

Prędkość przestaje być wygodnym parametrem do opisu procesów.

*Przykład: elektrony w LEP $v=0.999\,999\,999\,995*c$ ($E=100\text{ GeV}$),
protony w LHC $v=0.999\,999\,995*c$ ($E=7\text{ TeV}$)*

Znacznie wygodniejsza do opisu ruchu cząstki jest energia i pęd

Energia w teorii względności :

- Energia spoczynkowa $E_0 = mc^2$
- Energia całkowita $E^2 = E_0^2 + (pc)^2$
- Energia kinetyczna $E_k = E - E_0$

wprowadzona przez Einsteina

p – pęd ciała

Masa jest równoważna energii !

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

⇒ Dzięki temu możemy produkować nowe cząstki i badać ich własności!

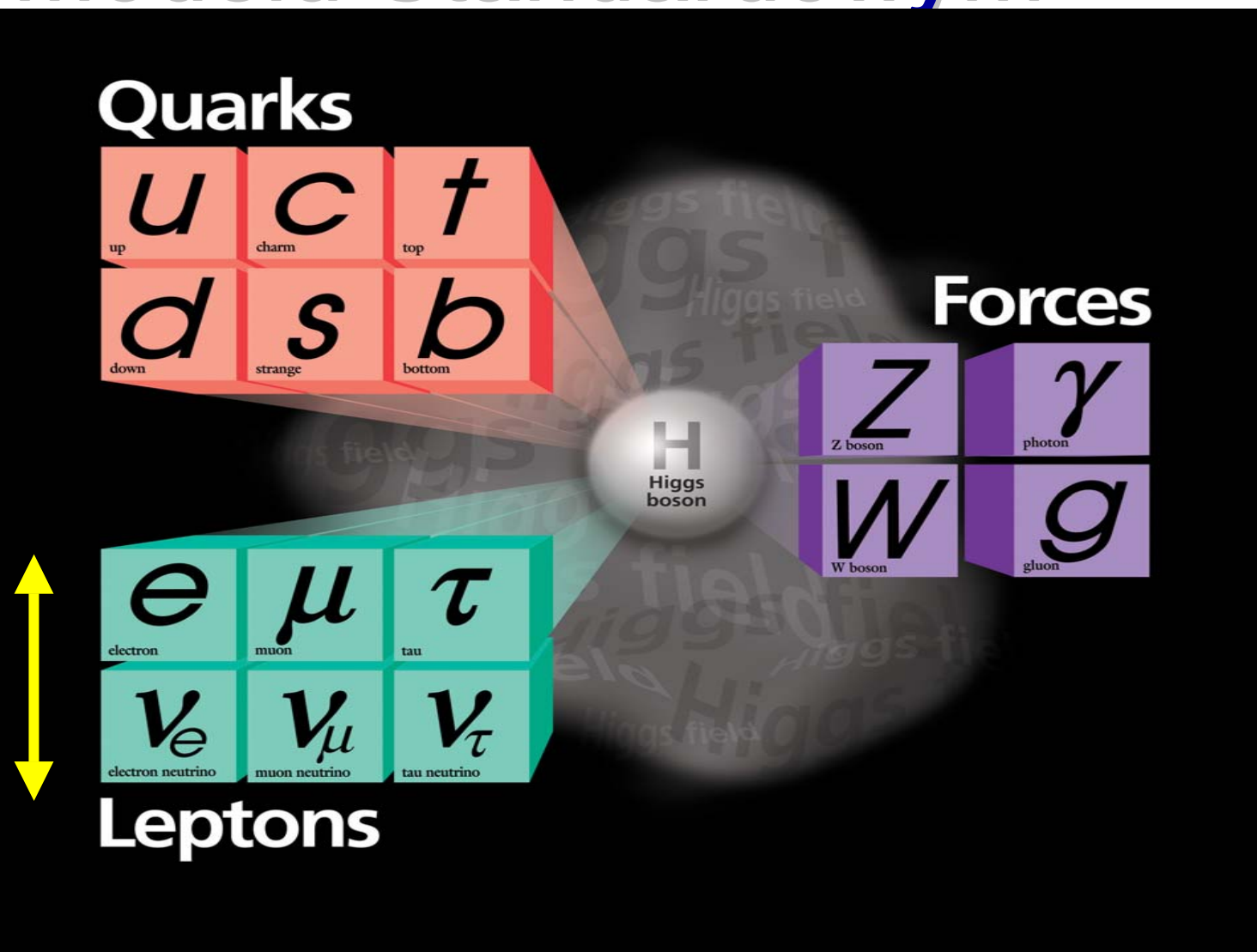


Cząstki elementarne i cząstki fundamentalne

- 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



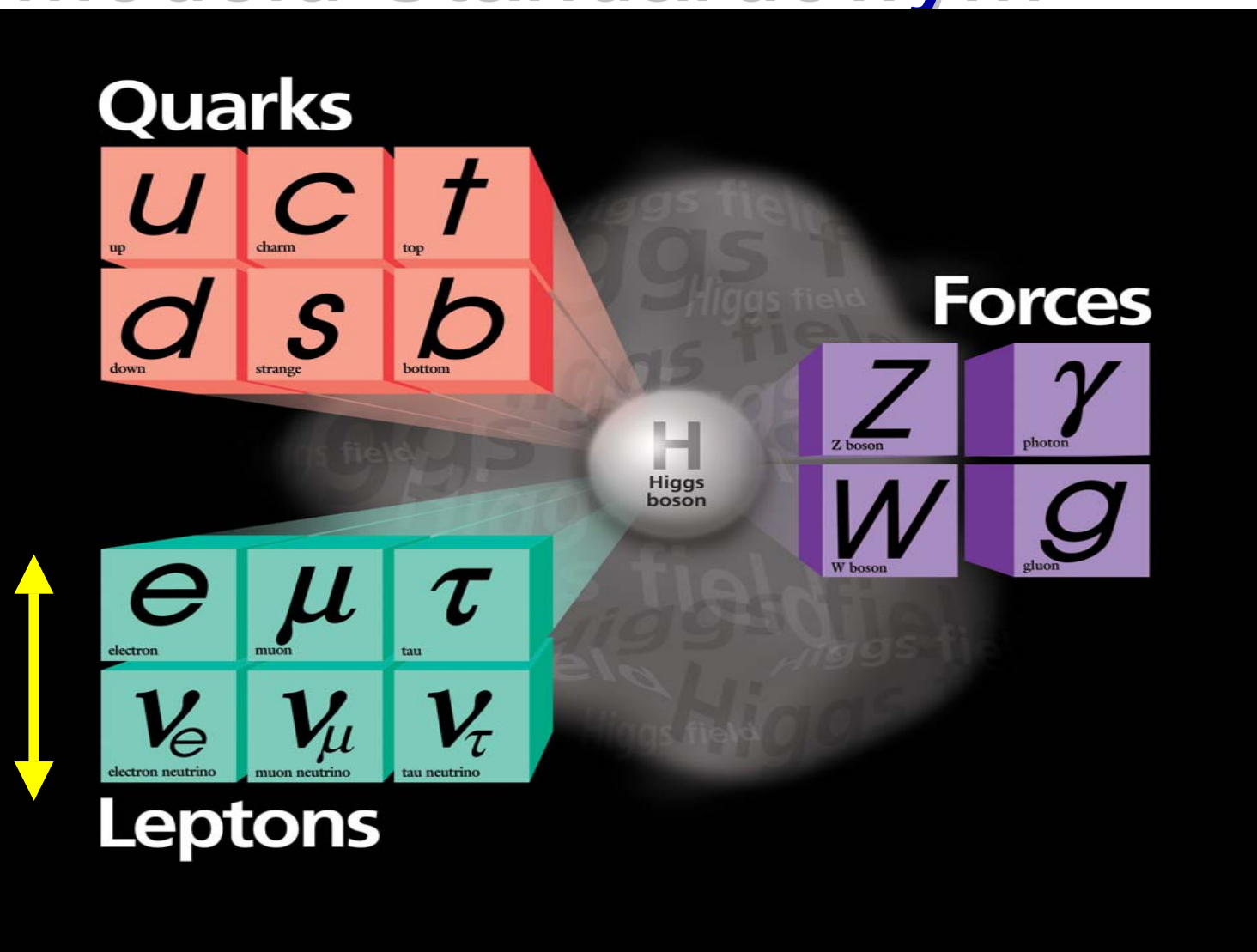
Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym



Wszechświat cząstek elementarnych



Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym



Jak badamy cząstki elementarne?



- Przyglądamy się im...

źródło „światła” → obiekt → detektor

- Rozbijamy je...

zderzając cząstka → ← cząstka

Patrzemy jakie są produkty zderzenia

- „Podgrzewamy”...

Dostarczamy dużej energii do układu wielu cząstek (np. w wyniku zderzenia)

patrzemy co „się ugotuje”

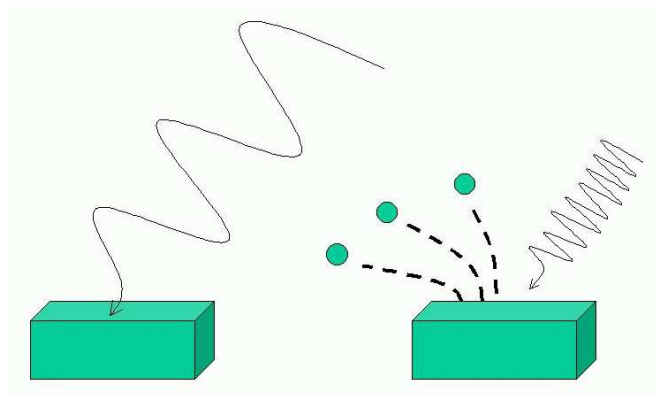
jakie cząstki powstaną na końcu

Cząstki i fale

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

Efekt fotoelektryczny

Hipoteza ta wyjaśniła zależność efektu fotoelektrycznego od długości fali światła

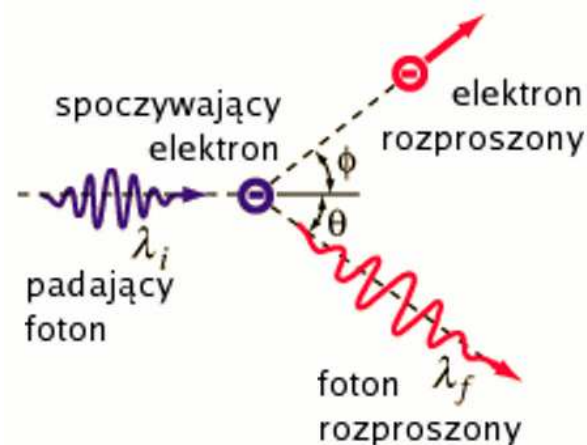


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

Rozpraszanie Comptona

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

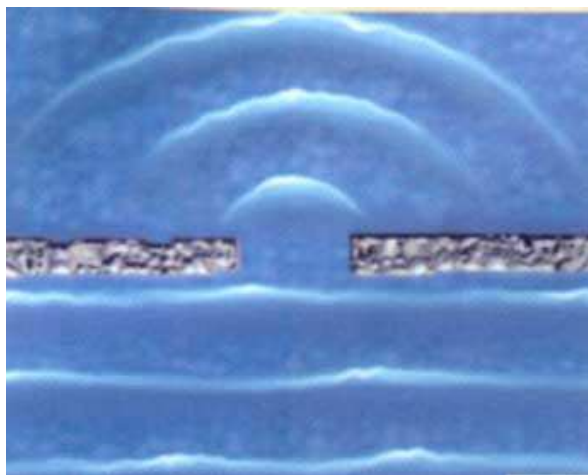


Cząstki i fale

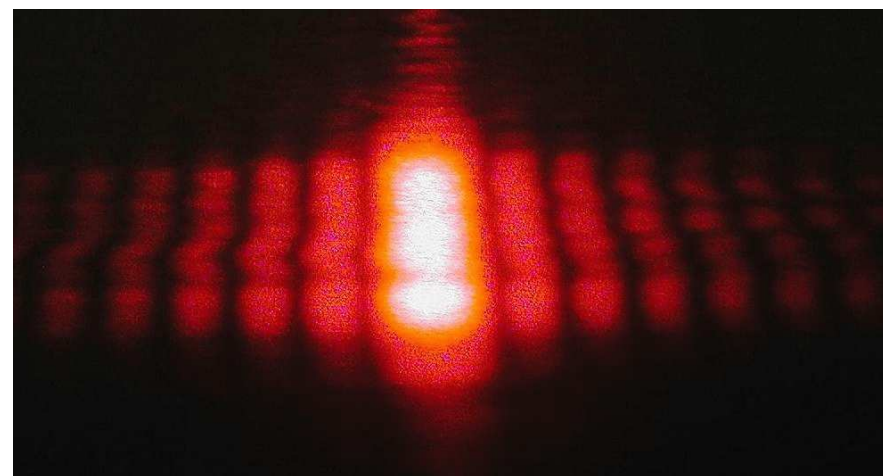
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.
Świadczą o tym m.in. zjawiskodyfrakcji i interferencji światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



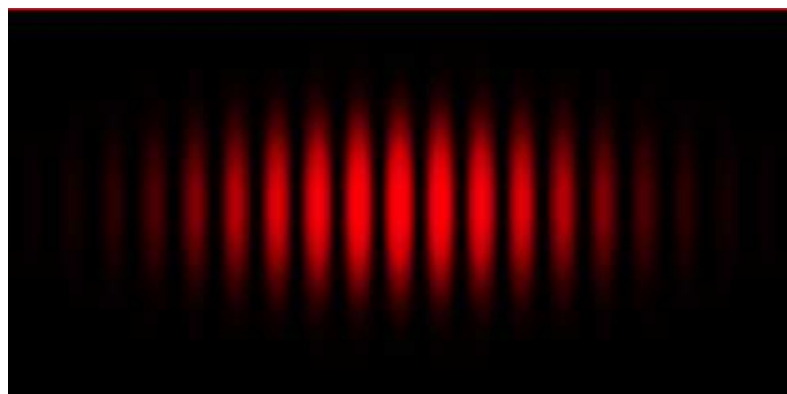
Światło



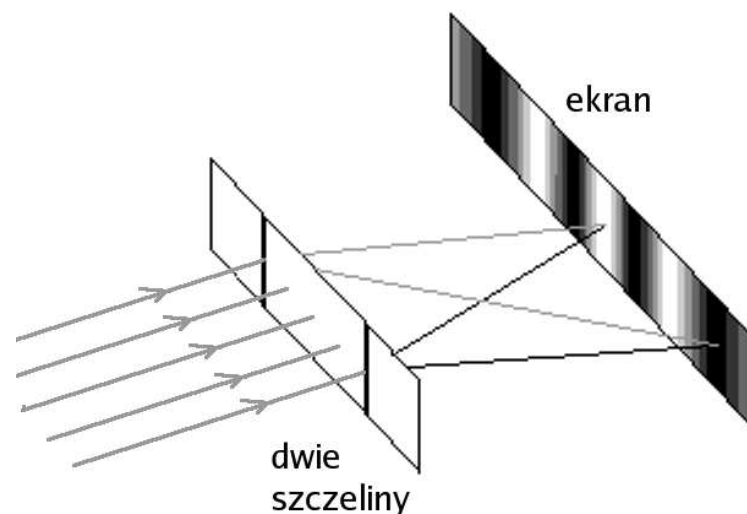
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



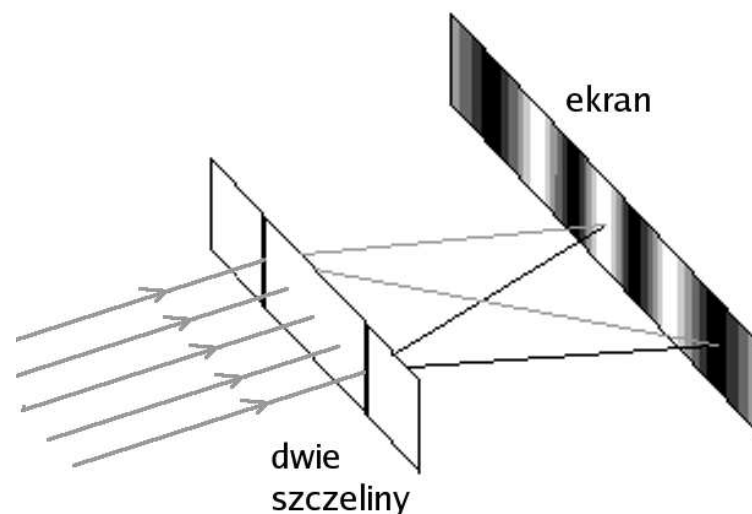
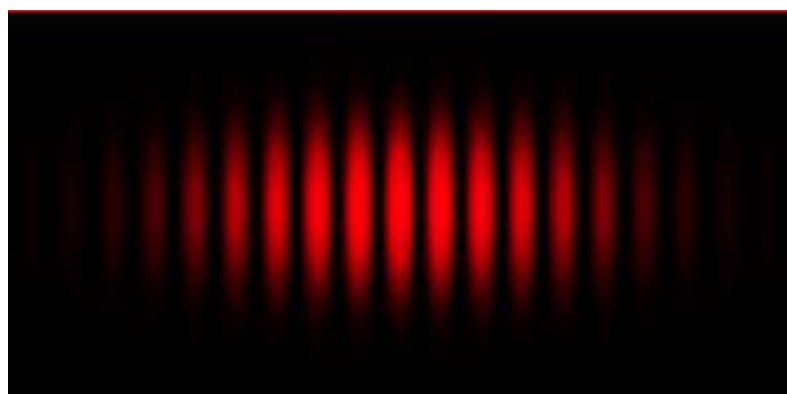
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**



Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



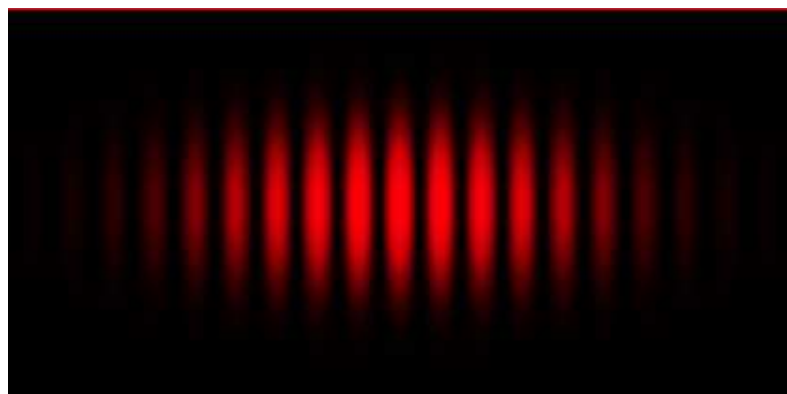
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

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

Cząstki i fale

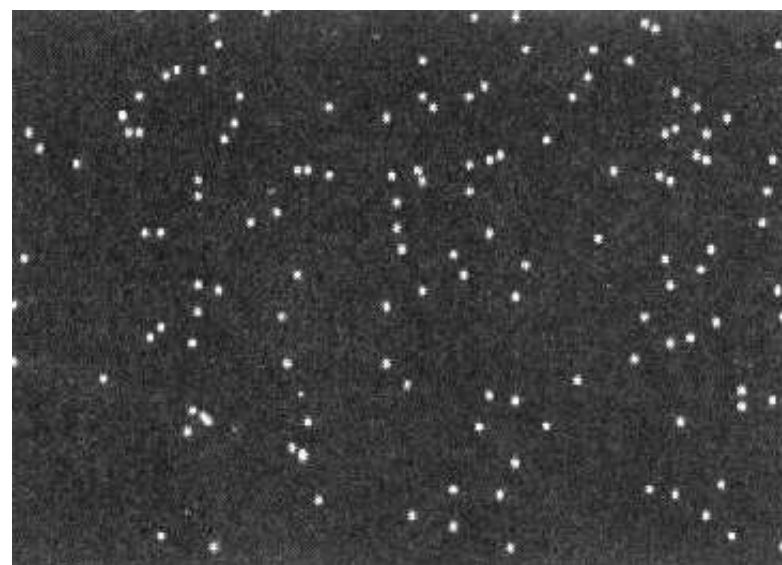
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ prążki interferencyjne

Elektrony

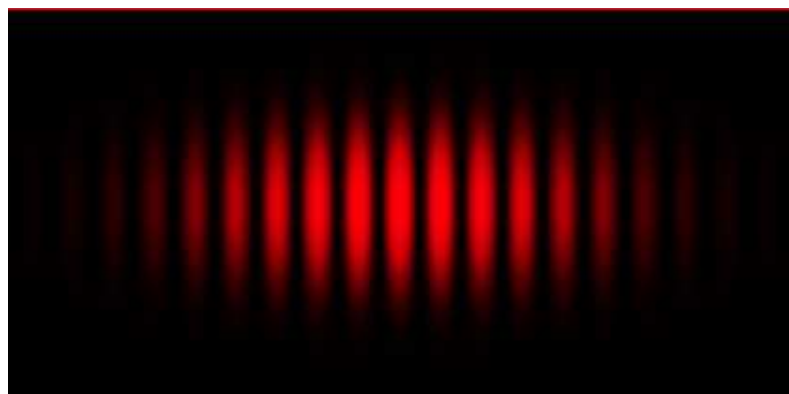


100 elektronów
rozkład przypadkowy ?

Cząstki i fale

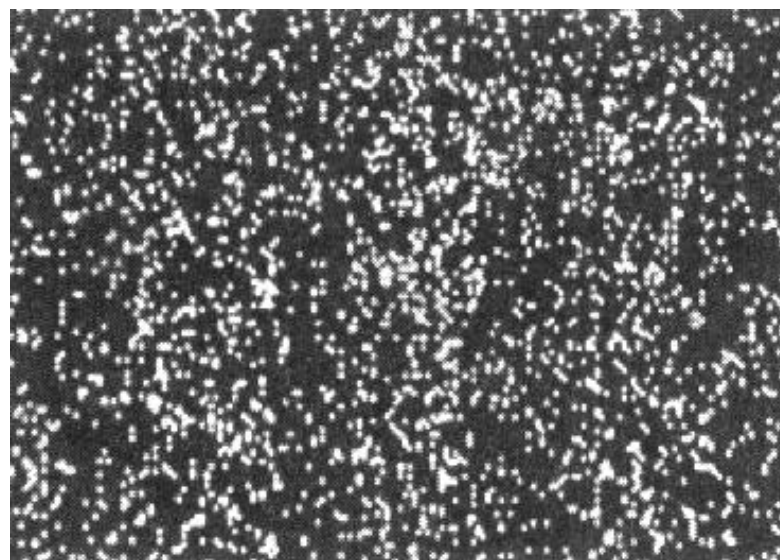
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ prążki interferencyjne

Elektrony

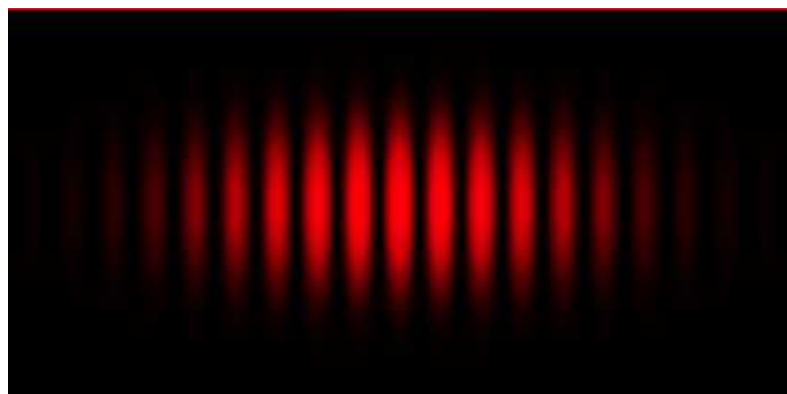


3000 elektronów

Cząstki i fale

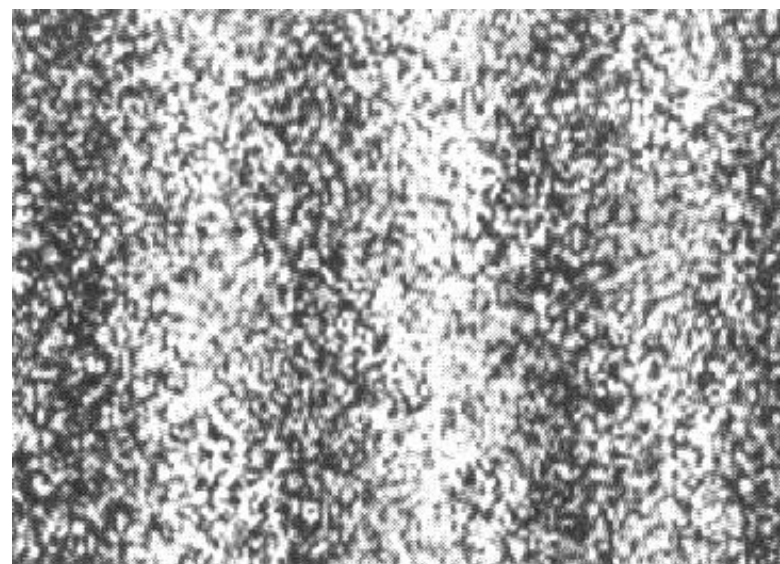
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



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

Elektrony



70000 elektronów

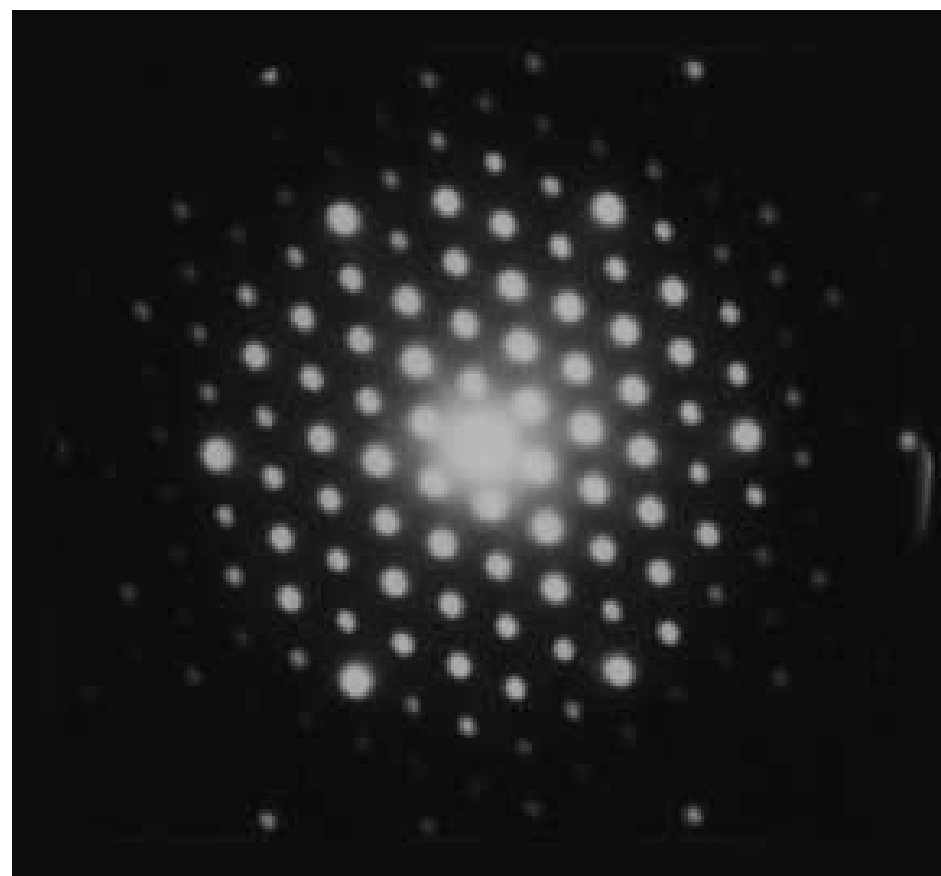
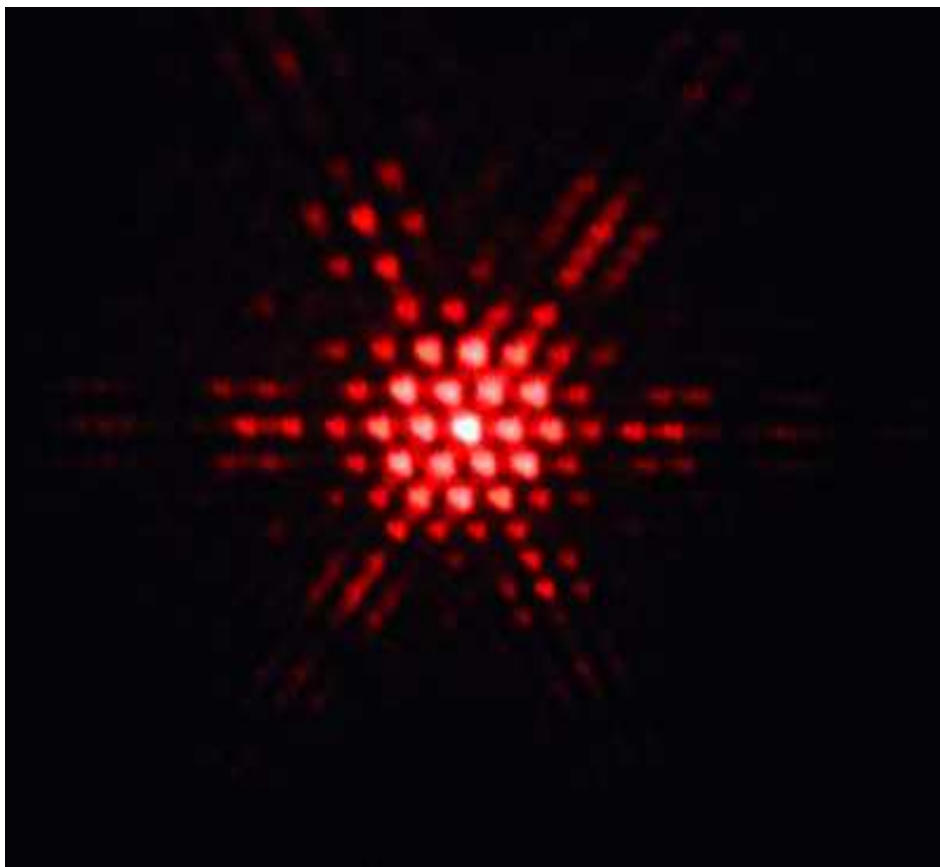
Elektrony też zachowują się jak fale !
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło

Elektrony

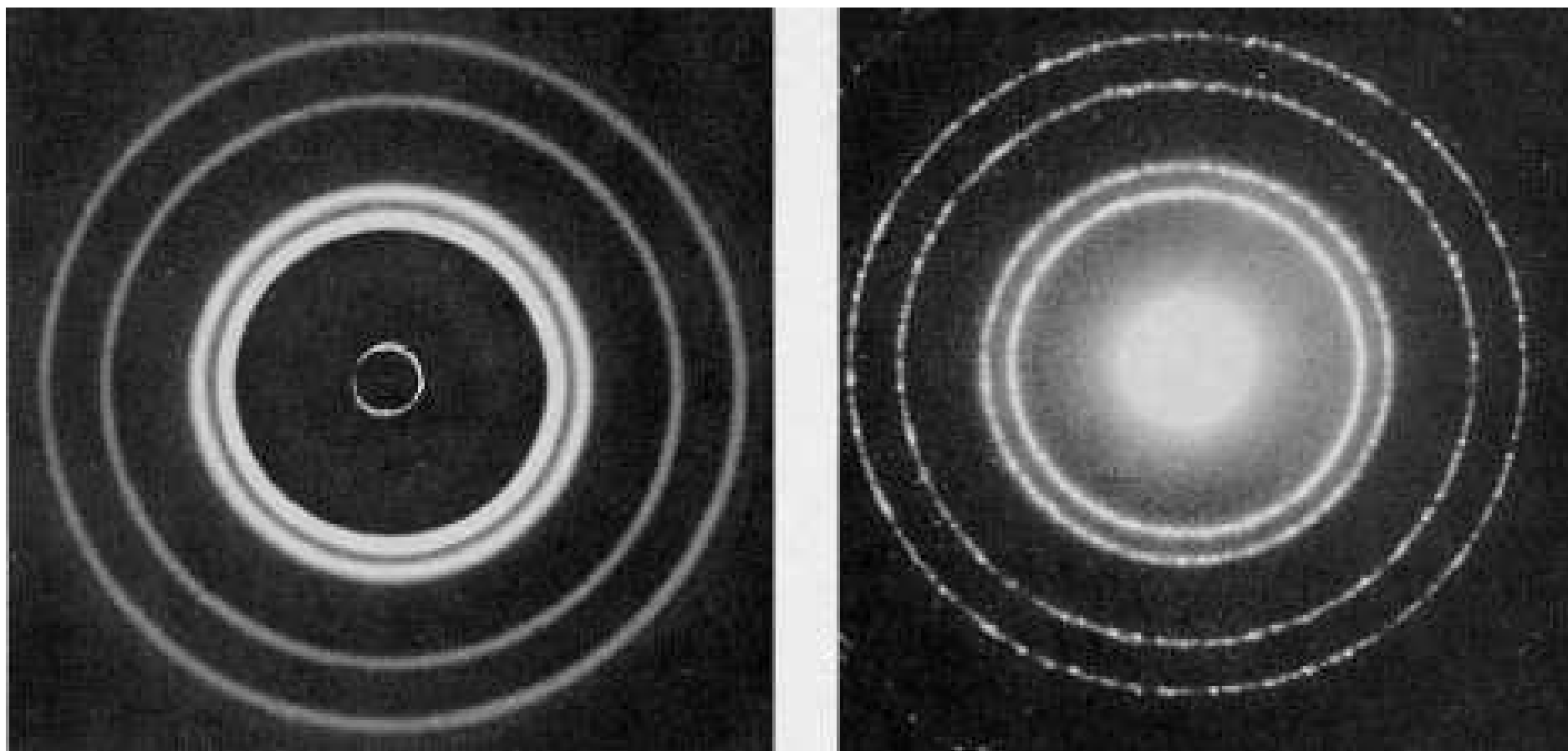


Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony





Zdarzenia (przypadki, ang.events)

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

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

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

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

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

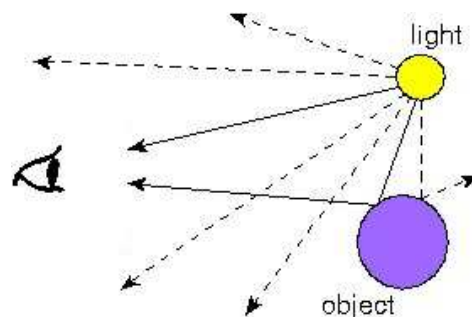
- Znikanie cząstek ale też ich powstawanie – to obserwuje się w doświadczeniach przy akceleratorach. Musimy zebrać dużo przypadków, aby dobrze mierzyć rozkłady różnych wielkości -> wnioskować o teorii

Detekcja cząstek

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

Wprowadzenie

Istota obserwacji



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca obserwowanego procesu



Wprowadzenie

Istota obserwacji

Cząstek nie możemy "zobaczyć" nie zakłócając ich stanu.

W świecie cząstek każdy pomiar wiąże się z jakimś oddziaływaniem.

Obserwujemy nie cząstki, ale (efekty) ich oddziaływania z materią.

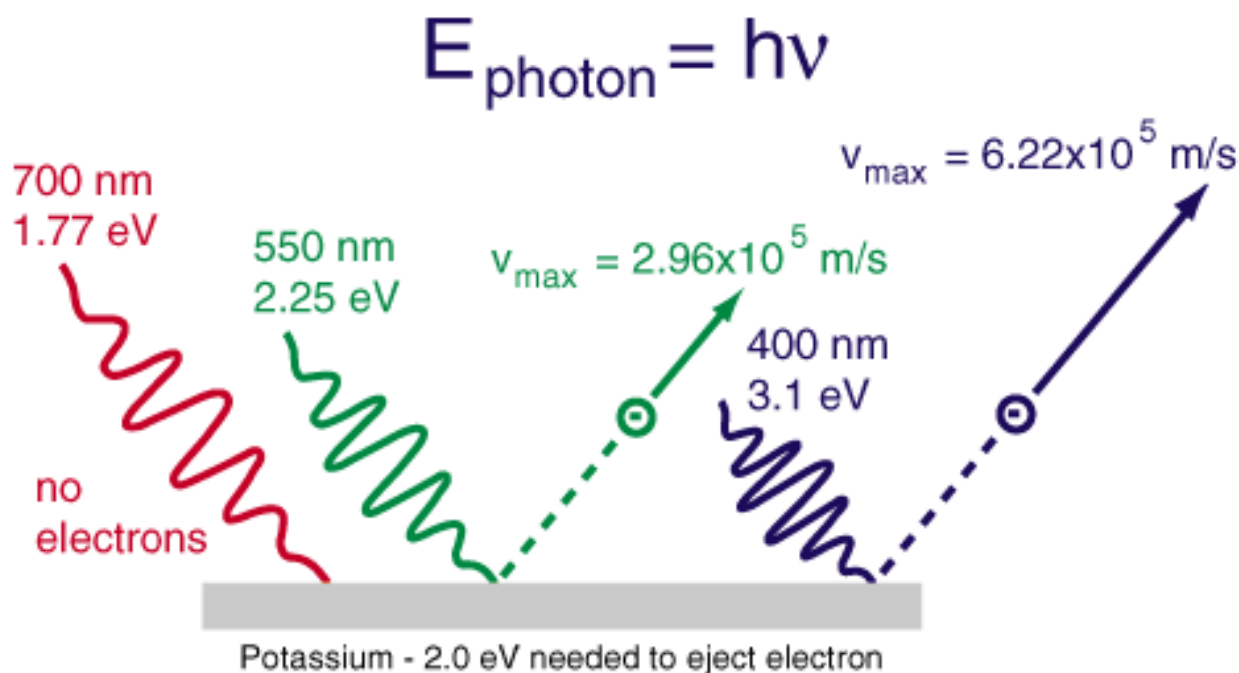
Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

- efekt fotoelektryczny
- jonizacja i scyntylacja
- promieniowanie Czerenkowa

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887.

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



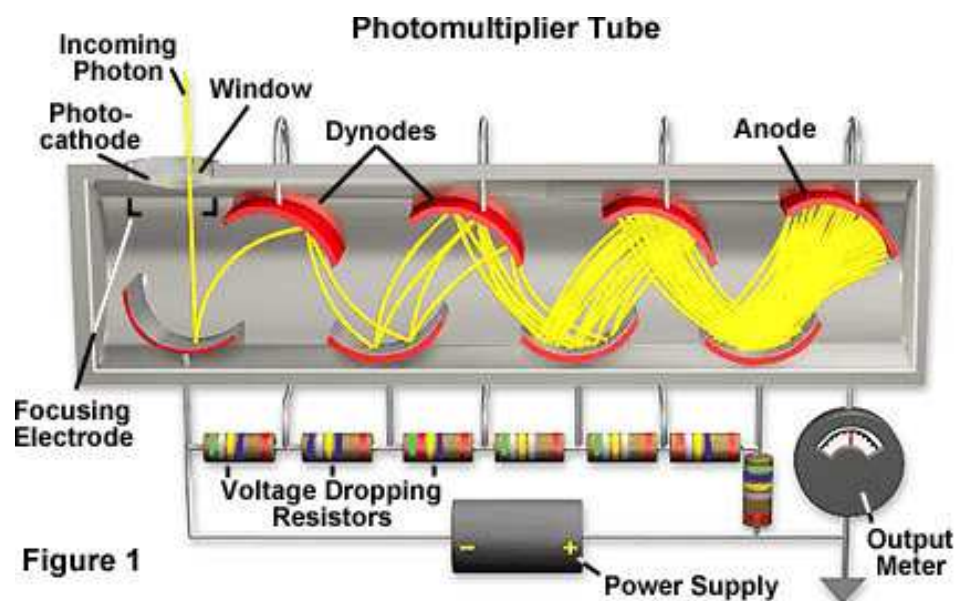
Photoelectric effect



Efekt fotoelektryczny

Fotopowielacz

Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmoć pojawiający się ładunek.

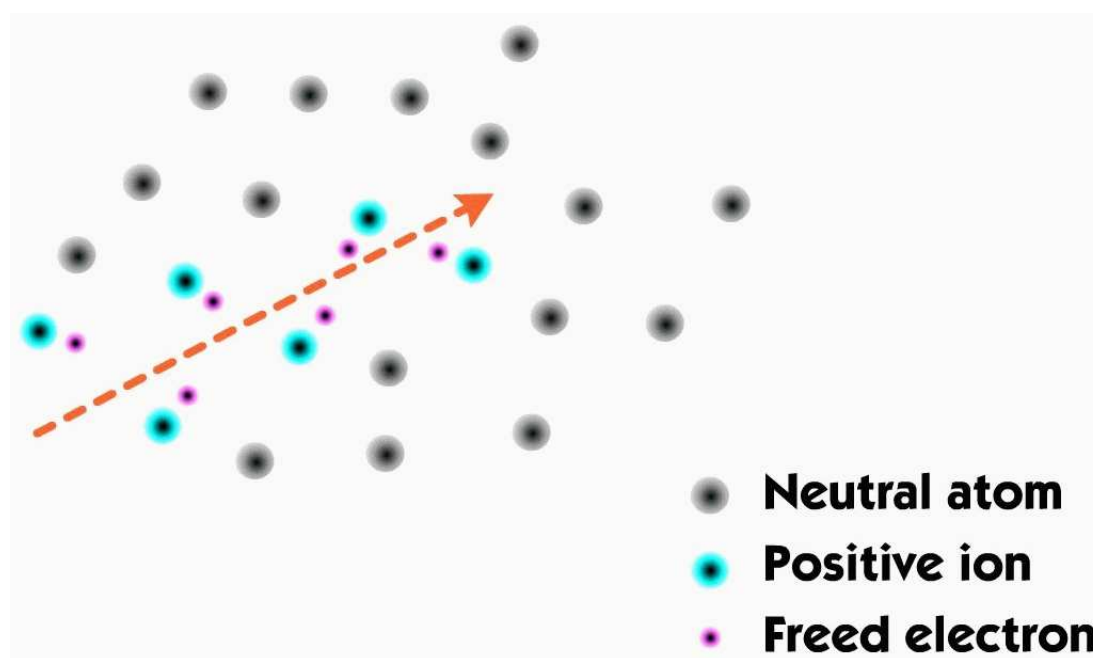


Jeden foton powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detekcja cząstek

Jonizacja

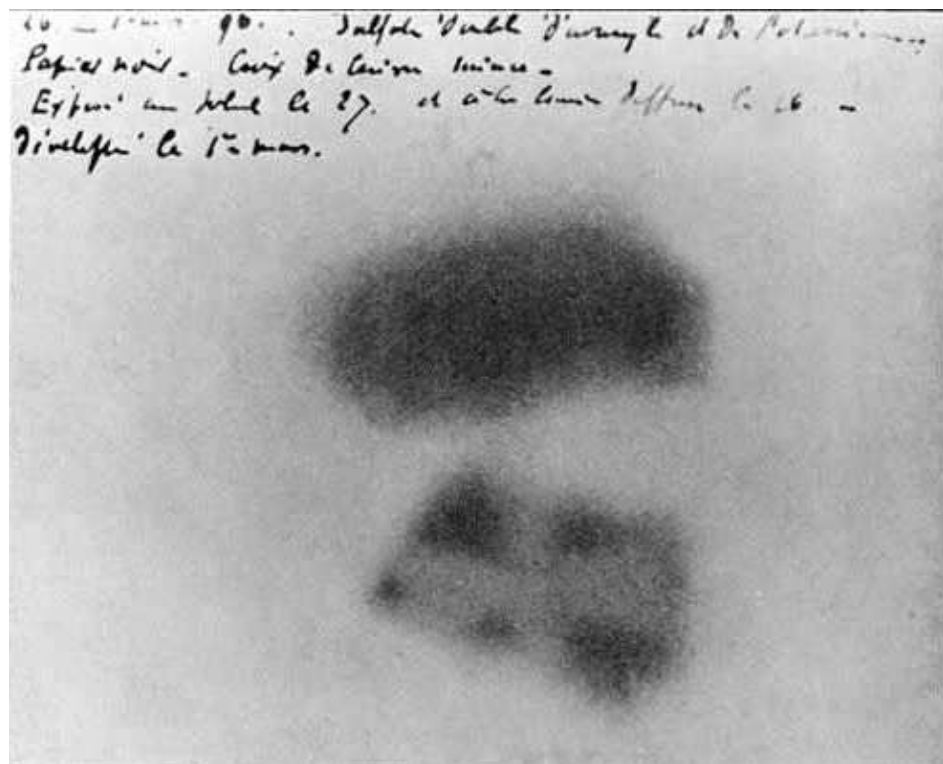
U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:



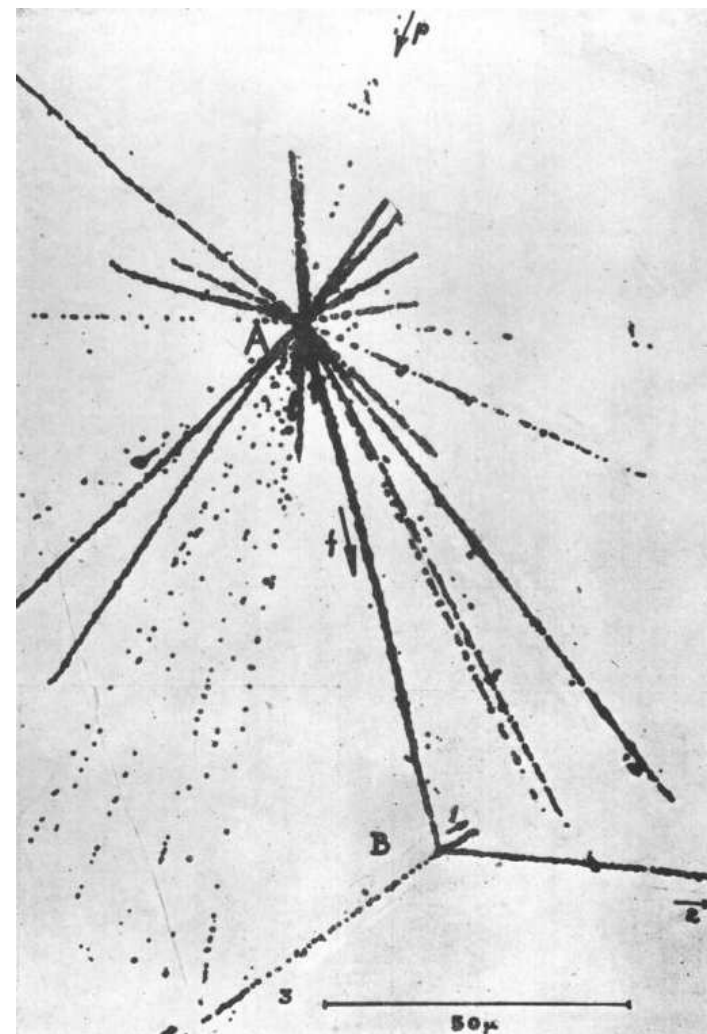
Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów.

Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

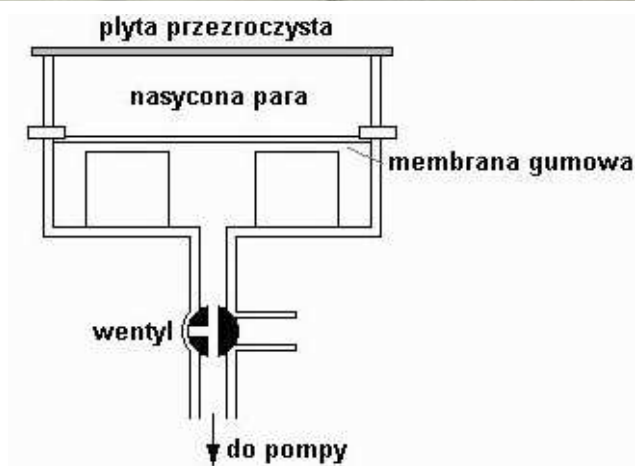
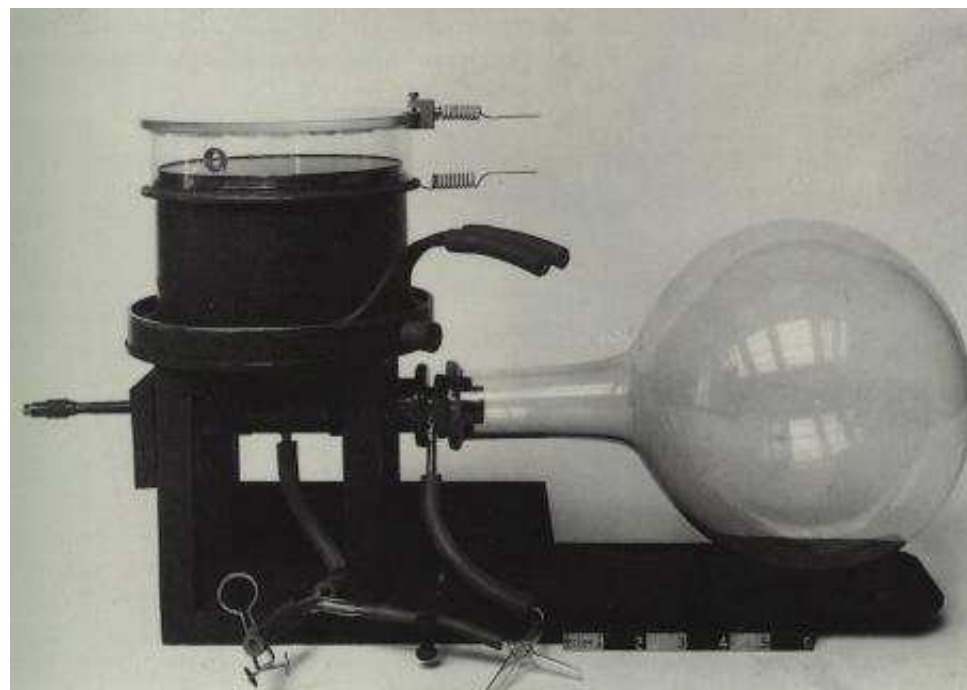


M.Danysz i J.Pniewski, 1953

Detekcja cząstek

Komora Wilsona

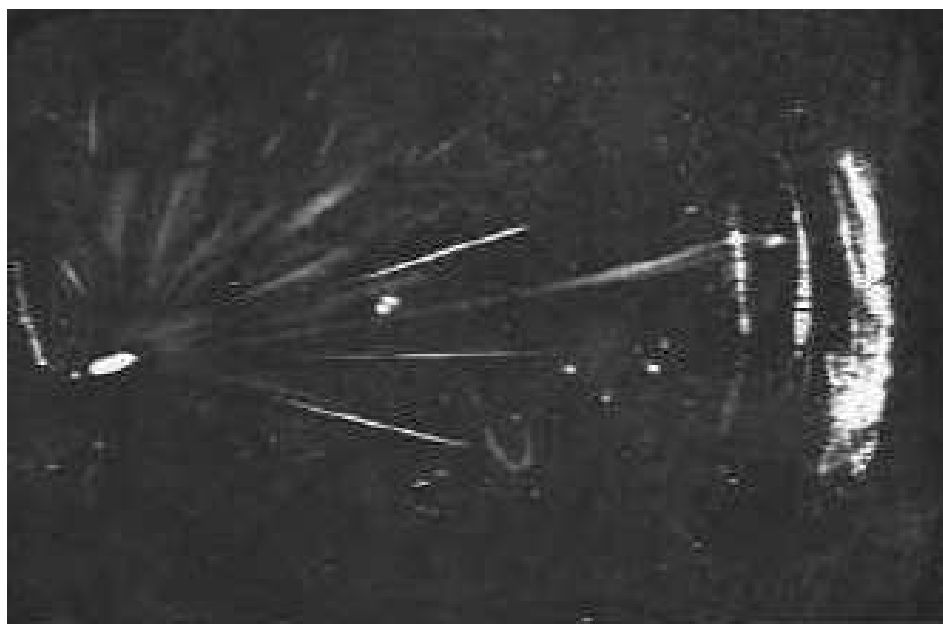
Charles Wilson, 1911



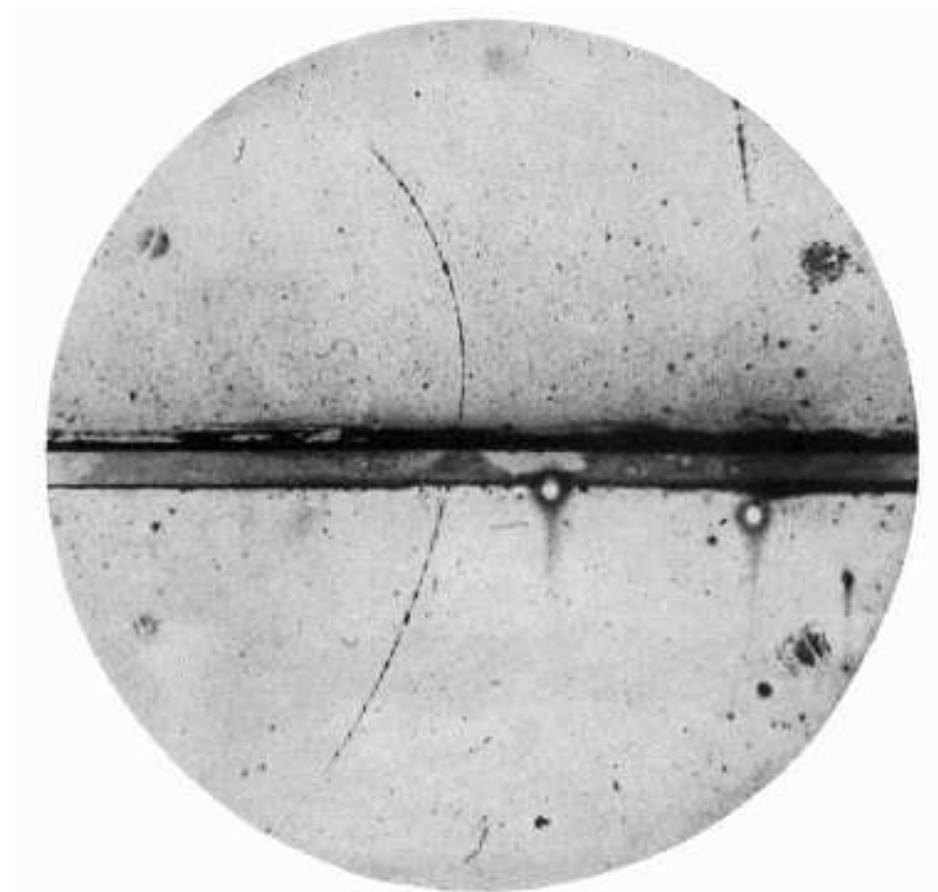
Detekcja cząstek

Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911



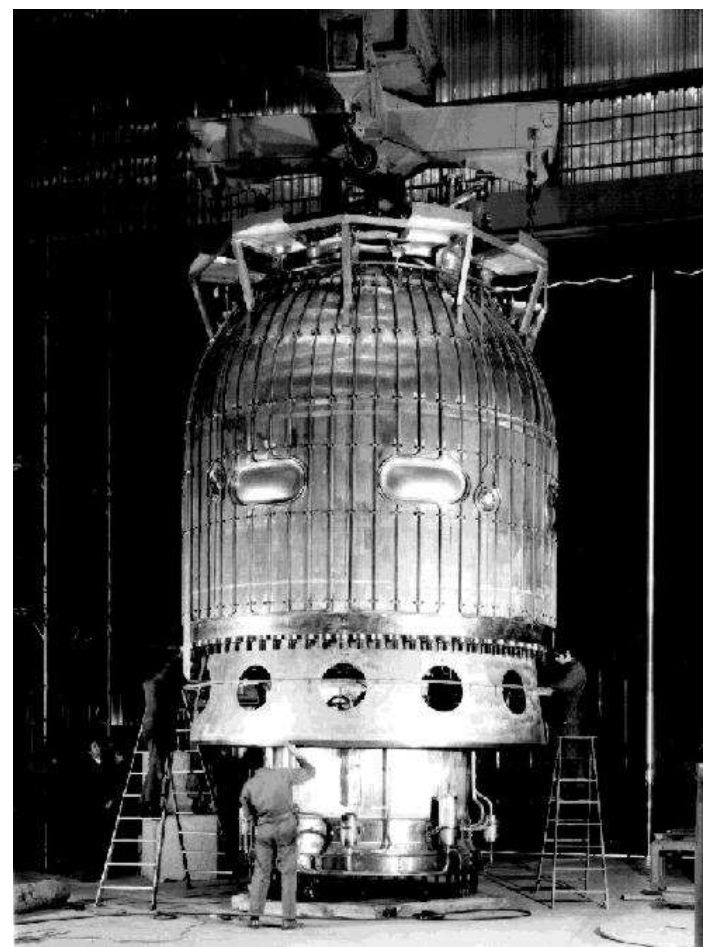
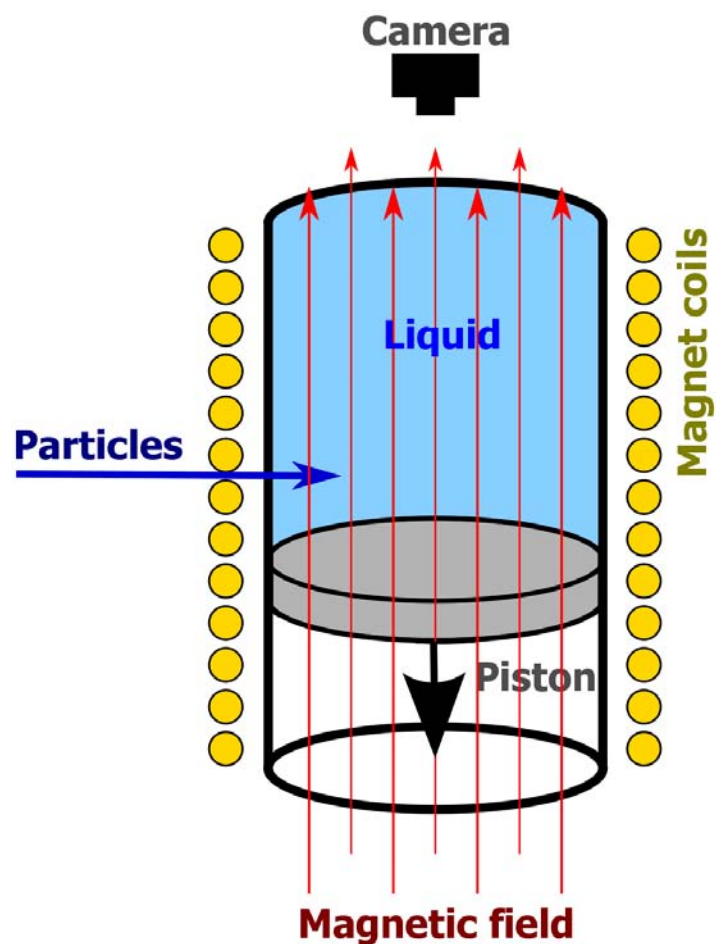
Carl Anderson, 1932



odkrycie pozytonu

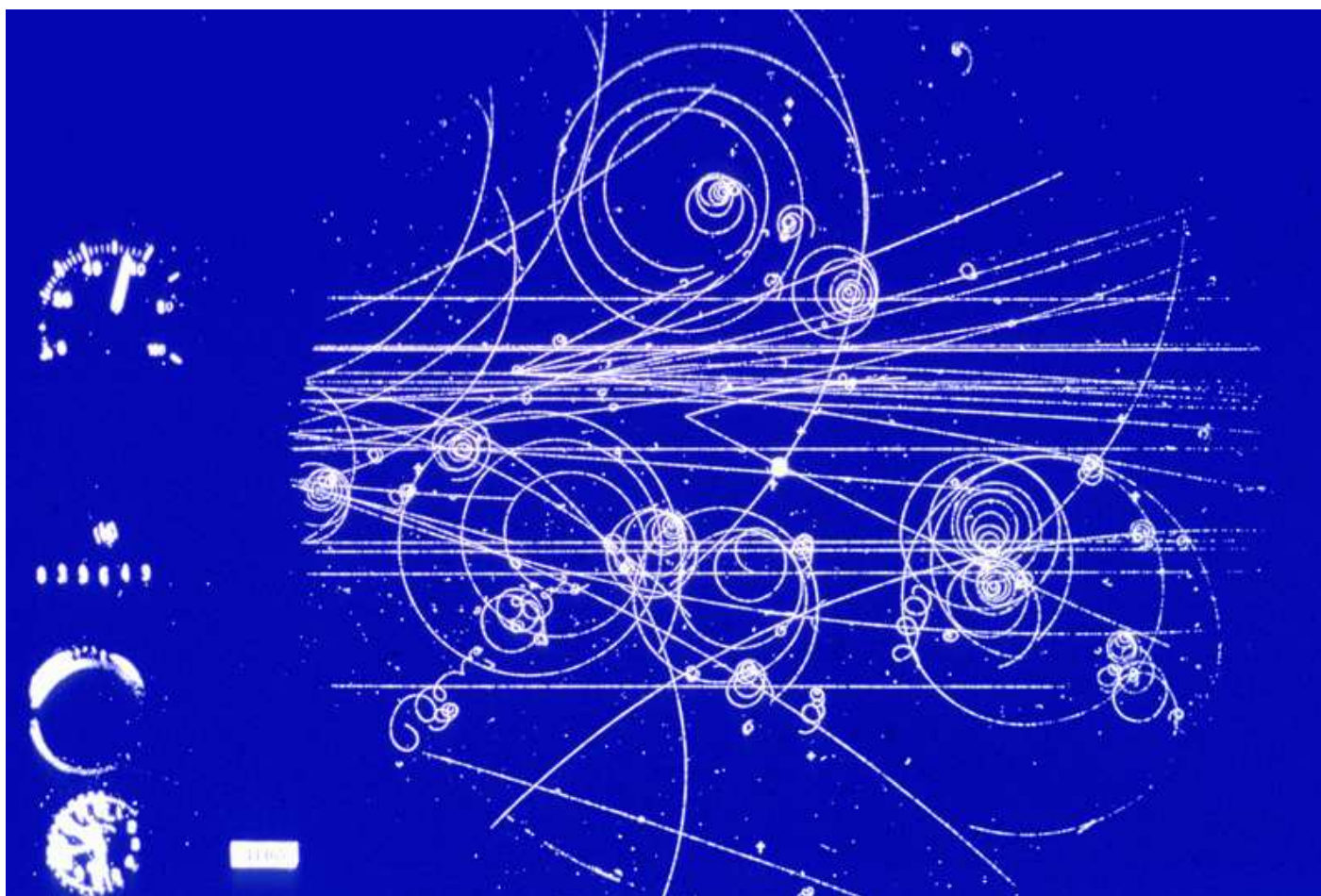
Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa, 1952



Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa

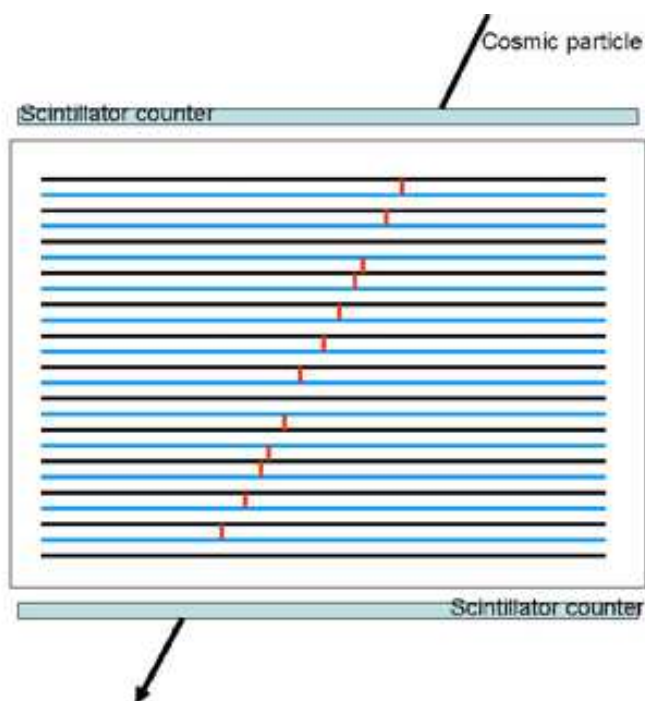


Cząstki wiązki oddziałują z cząstkami cieczy - "tarczy".

Detekcja cząstek

Komora iskrowa

Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



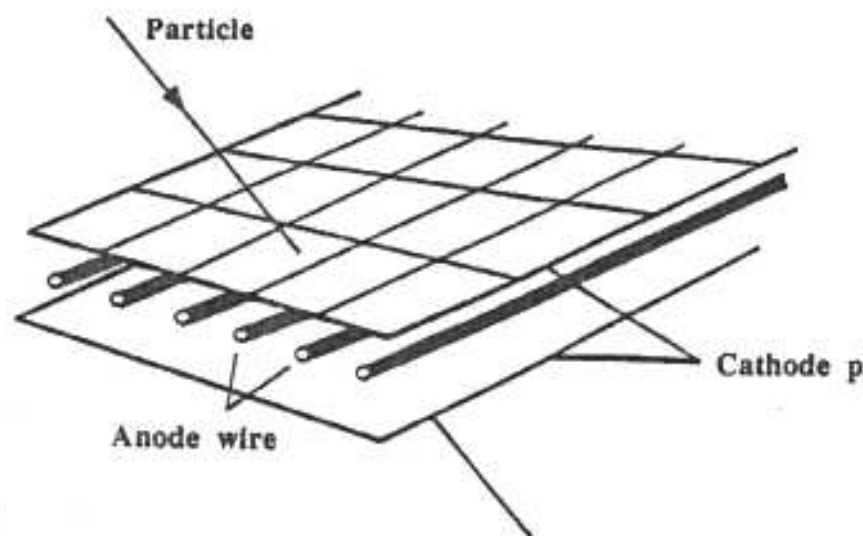
Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)



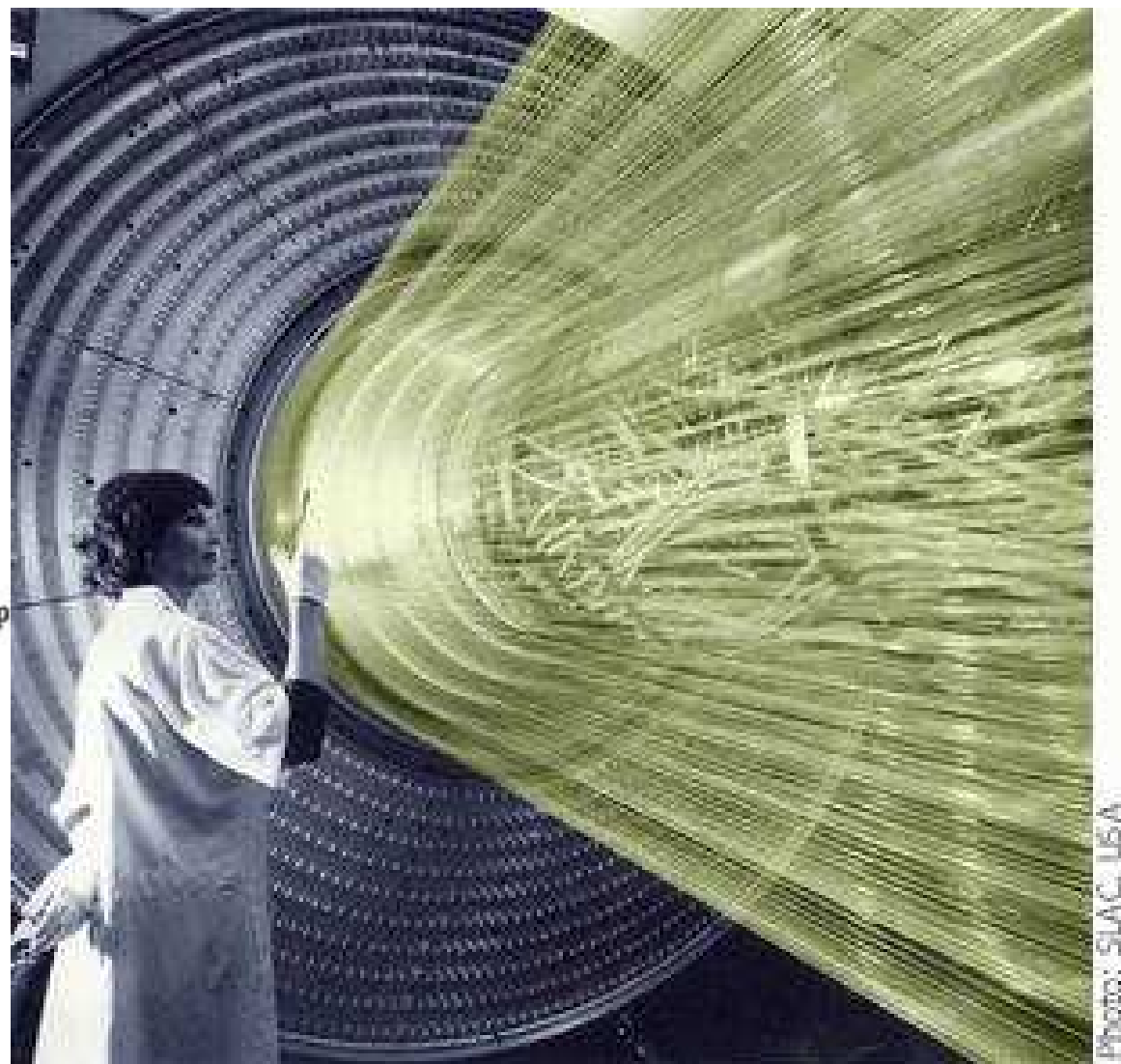
Detekcja cząstek

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



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



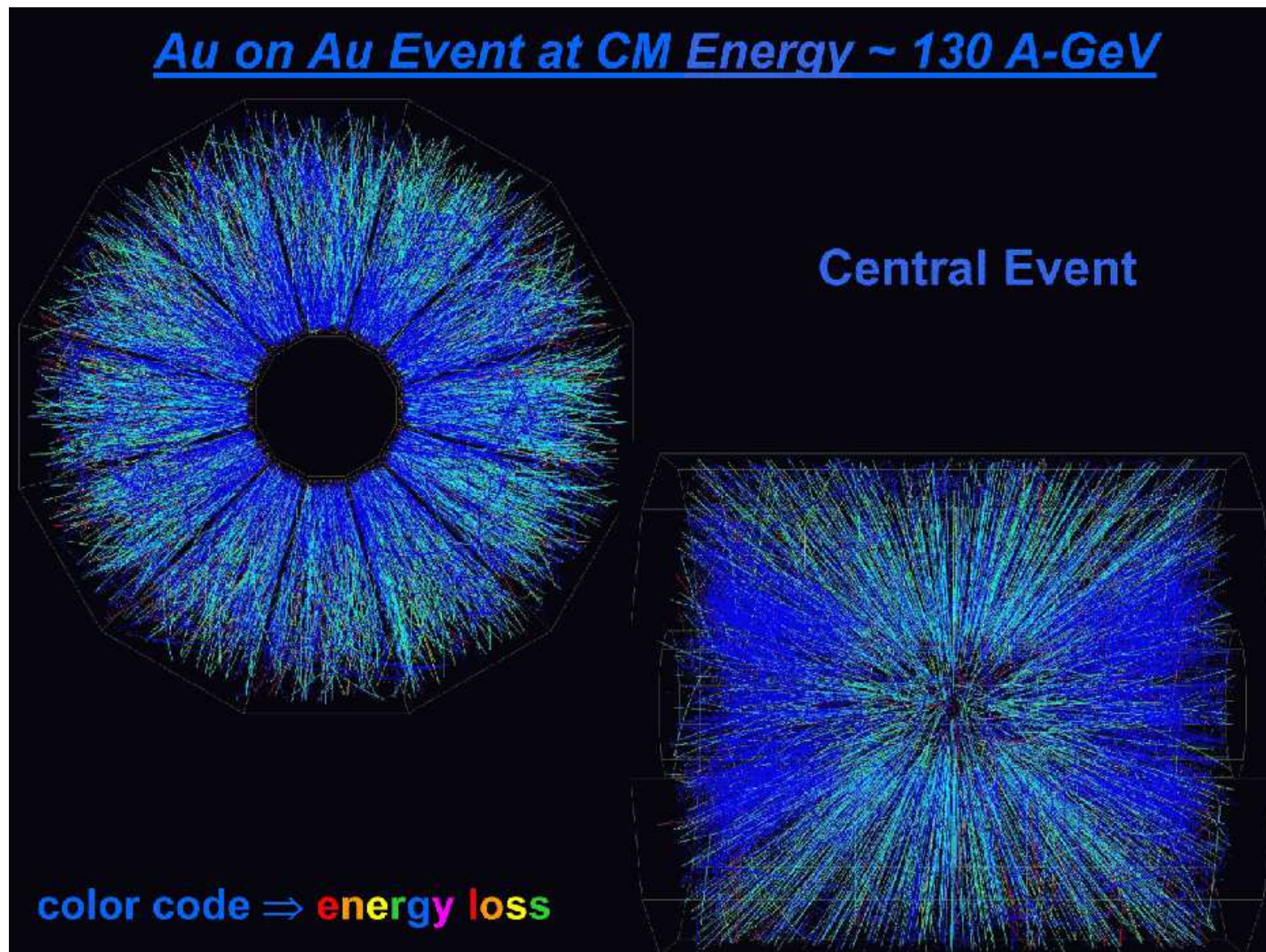
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC

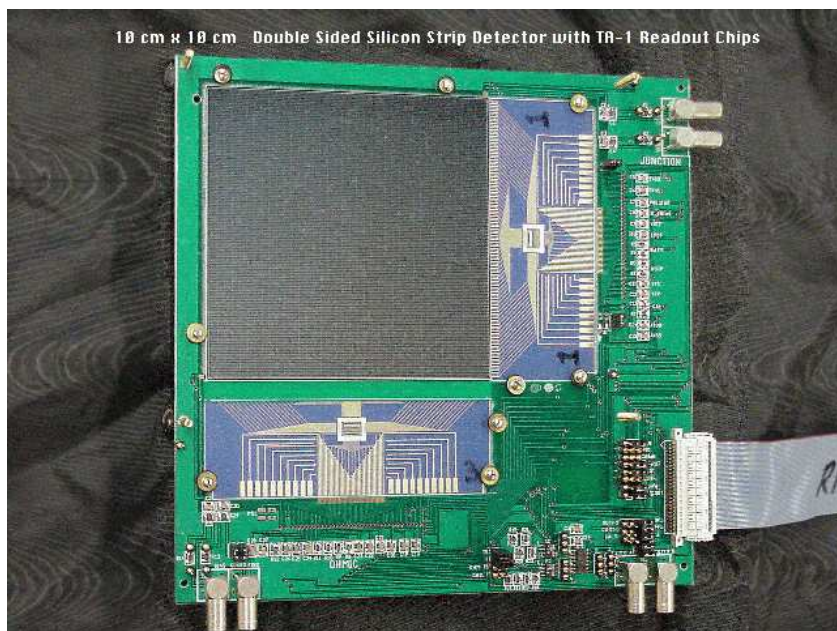


Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

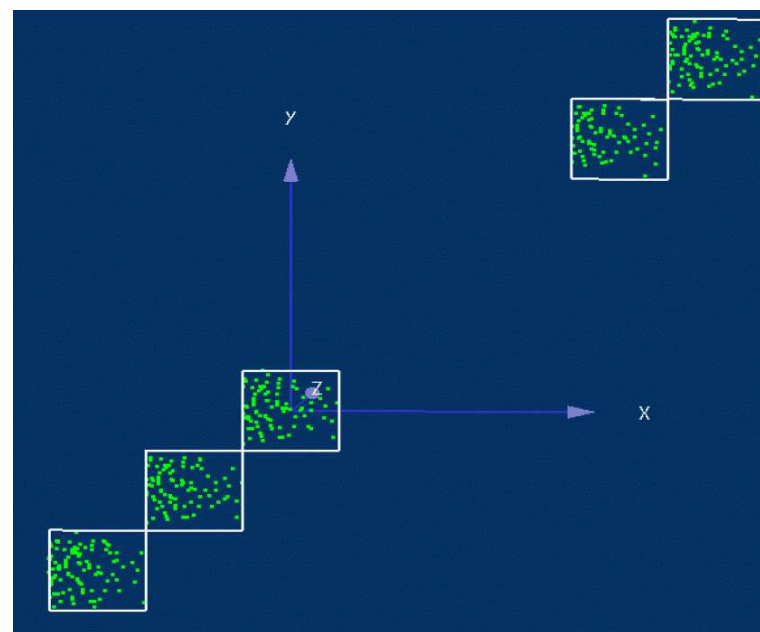
Coraz powszechniej używane.

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



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

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



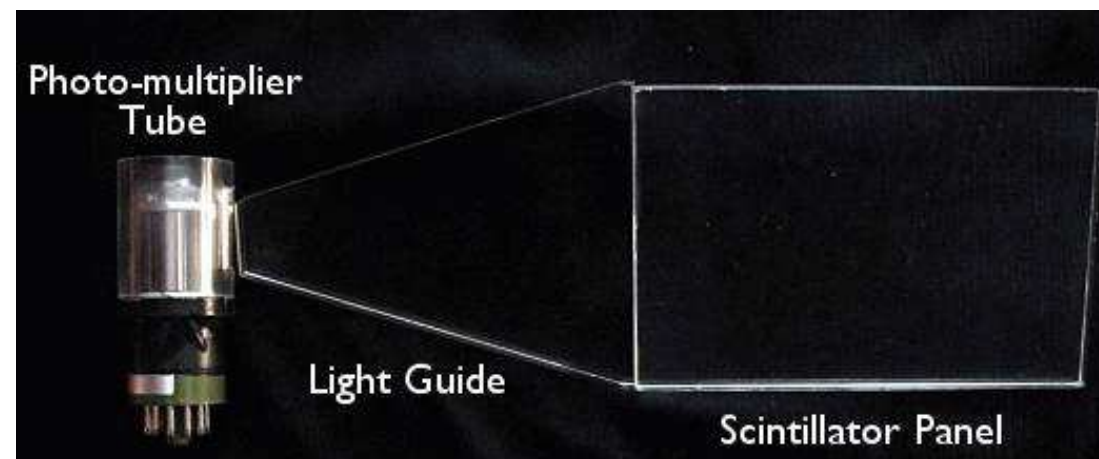
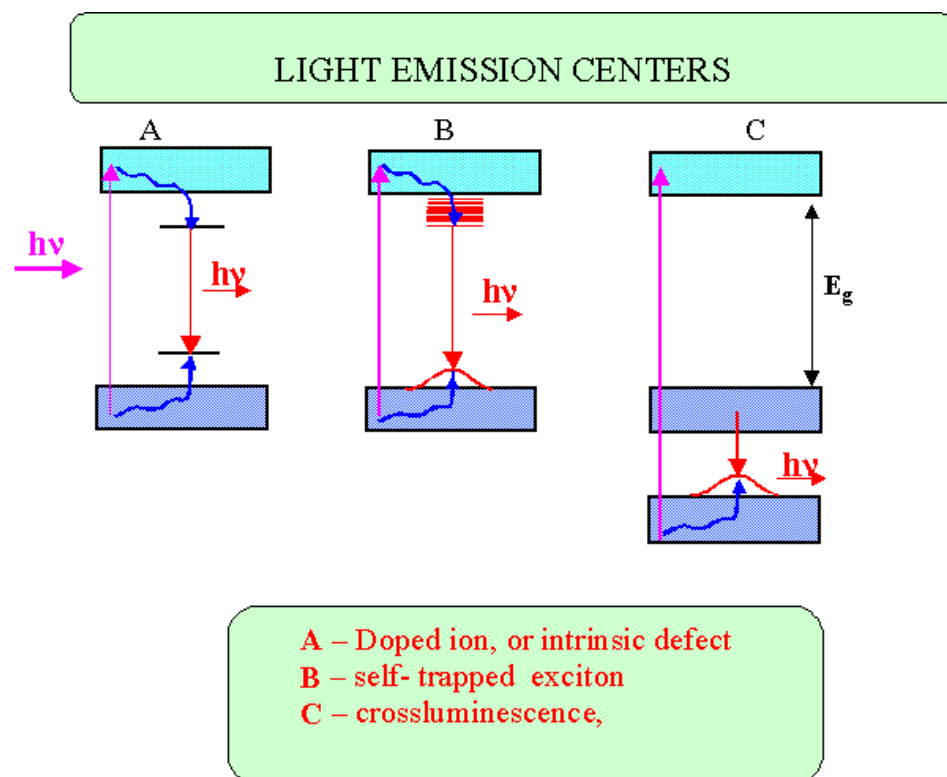
Niestety wciąż drogie...

Detekcja cząstek

Scyntylacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

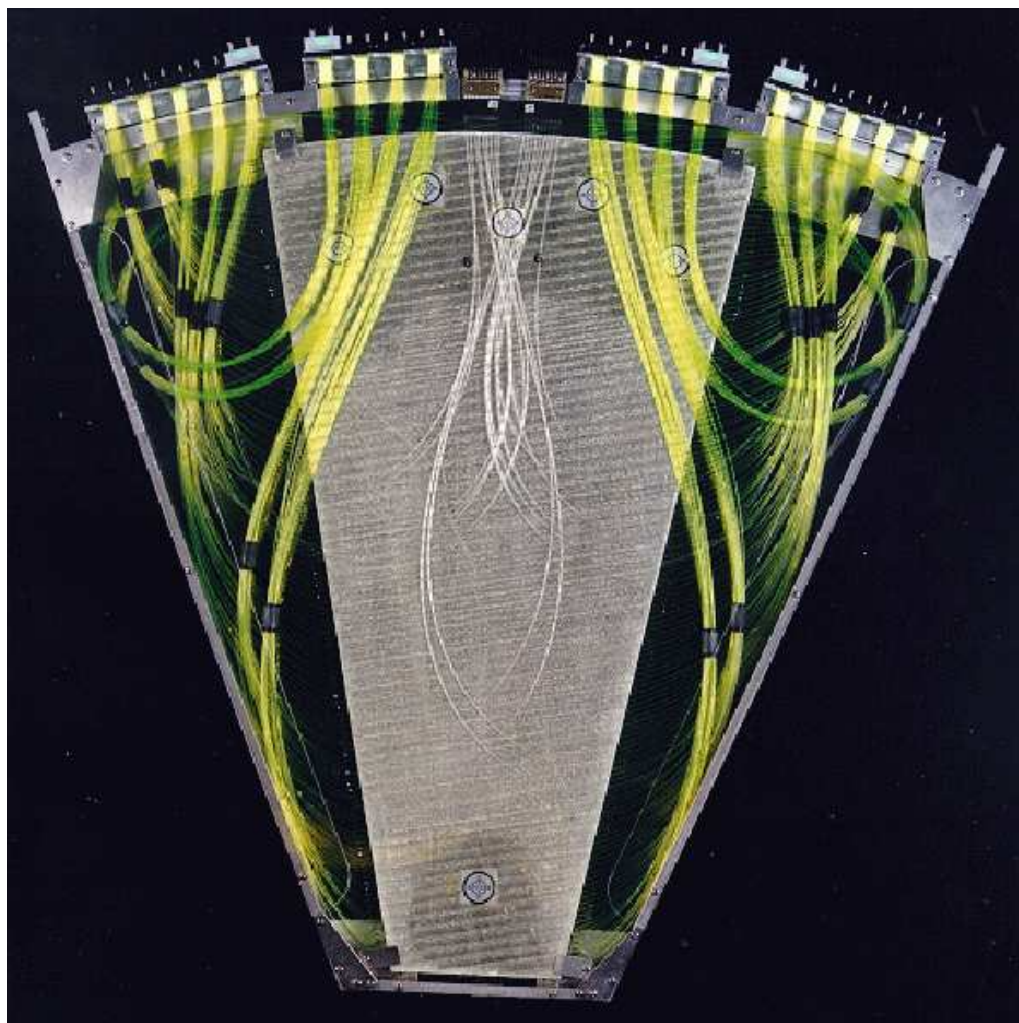
Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza



Brak pomiaru pozycji
Bardzo dobry pomiar czasu
przejścia cząstki

Detekcja cząstek

Detektory scyntylacyjne

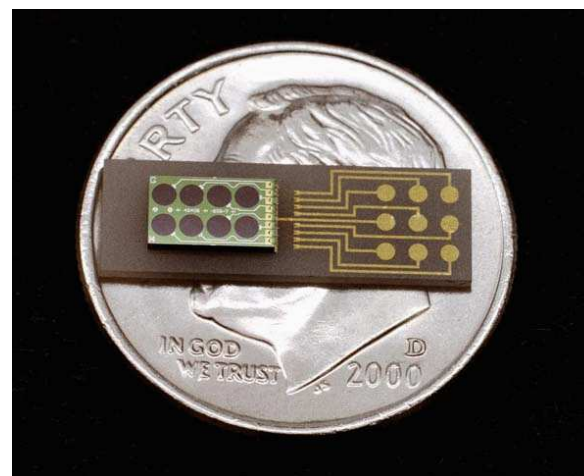


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

⇐ włókna scyntylujące,

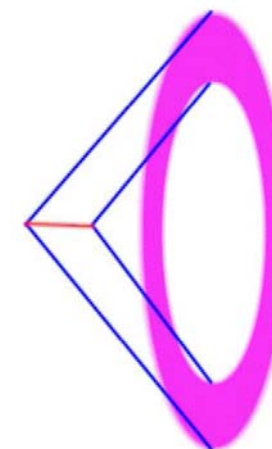
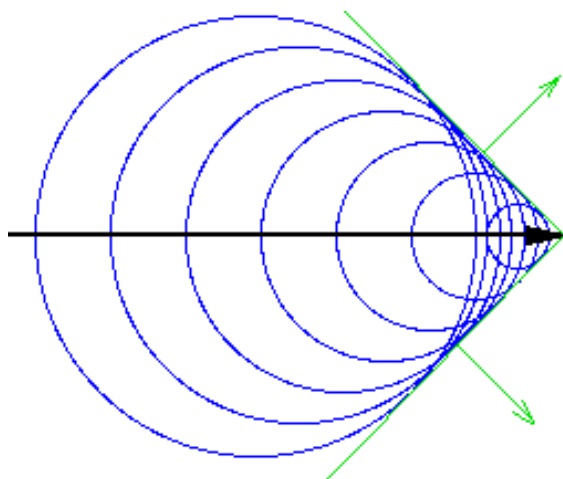
⇓ fotopowielacze krzemowe.



Detekcja cząstek

Promieniowanie Czerenkowa

Emitowane przez cząstkę poruszającą się w ośrodku z prędkością większą niż prędkość światła w tym ośrodku.



Światło emitowane na pewnym odcinku widoczne jest w postaci charakterystycznych pierścieni

Zachodzi w wodzie, lodzie, powietrzu...

Tania technologia dla dużych detektorów!

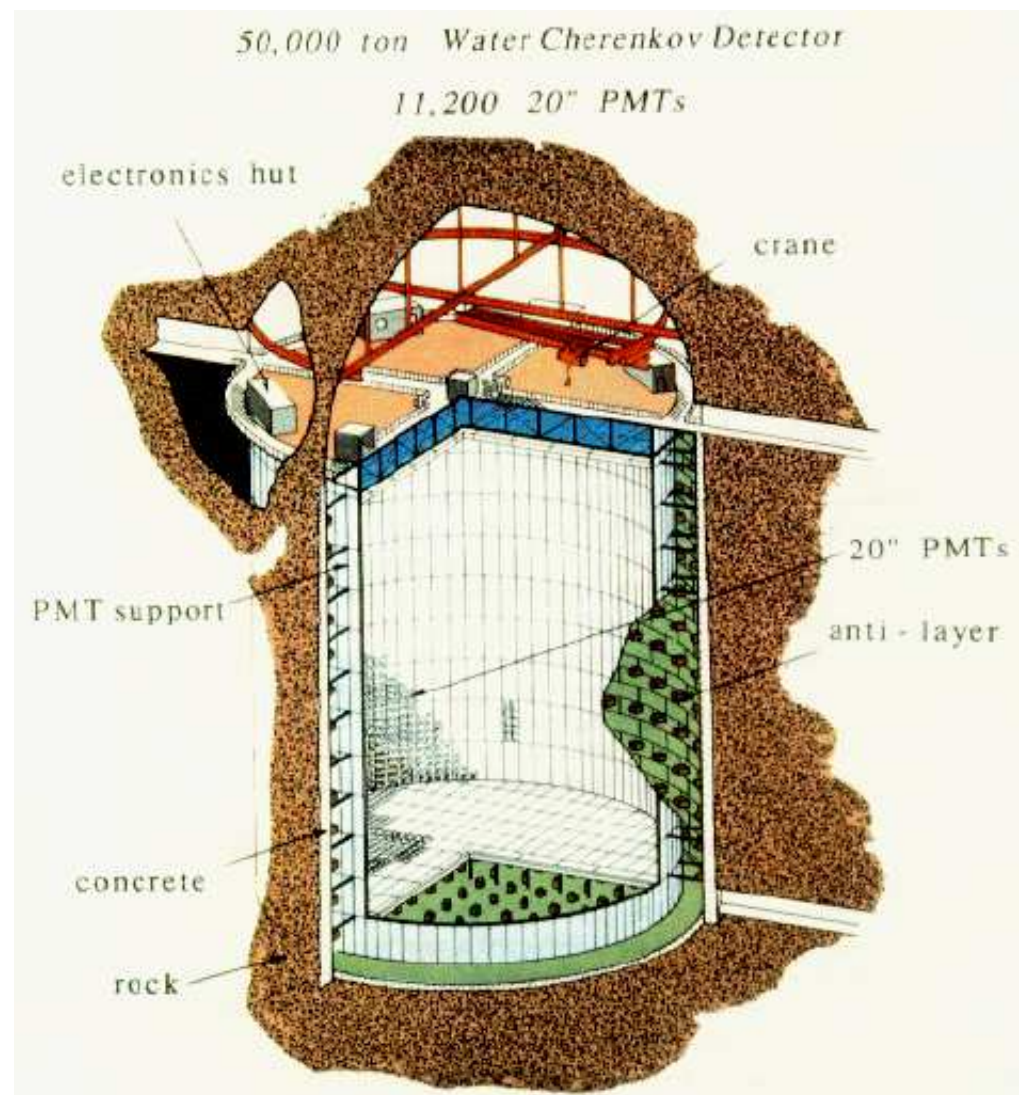
Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande eksperyment neutrinowy

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

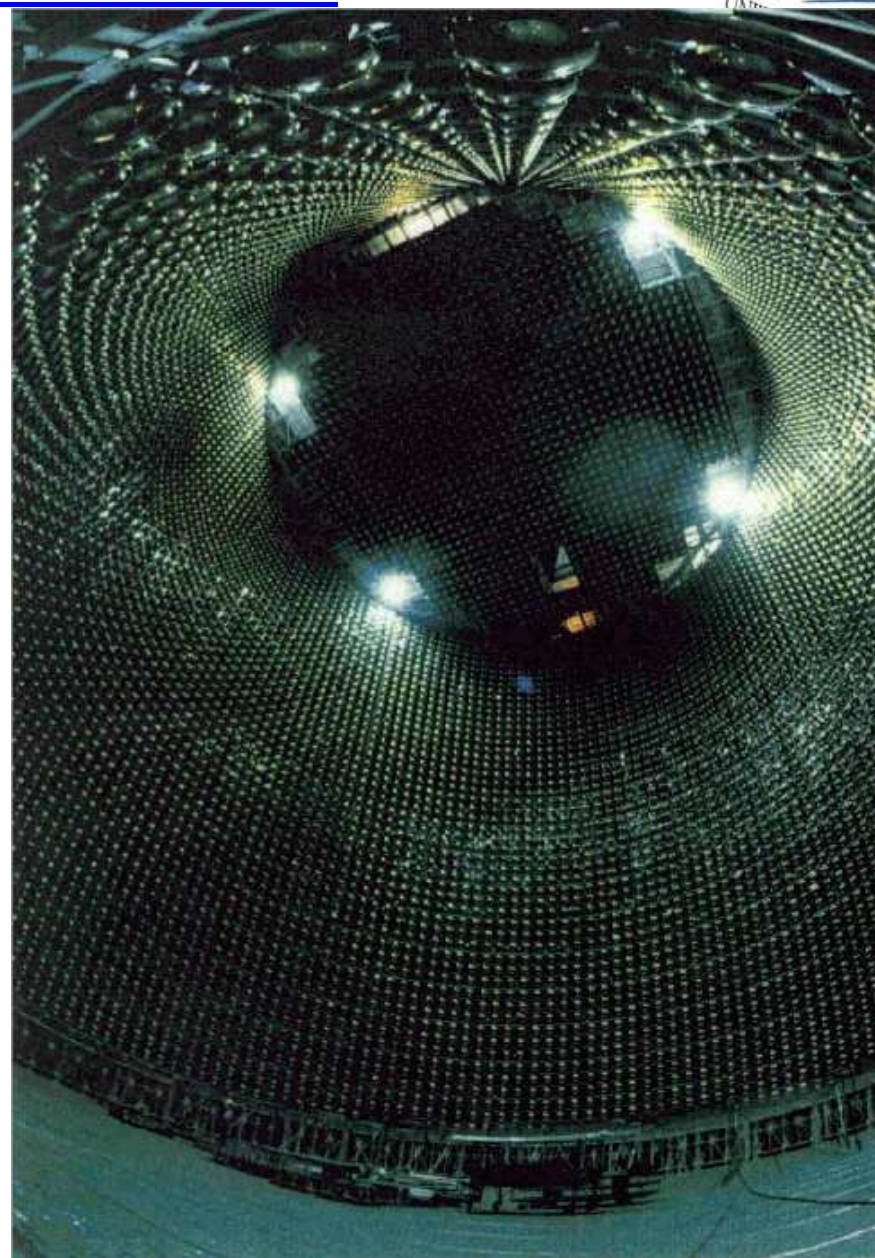
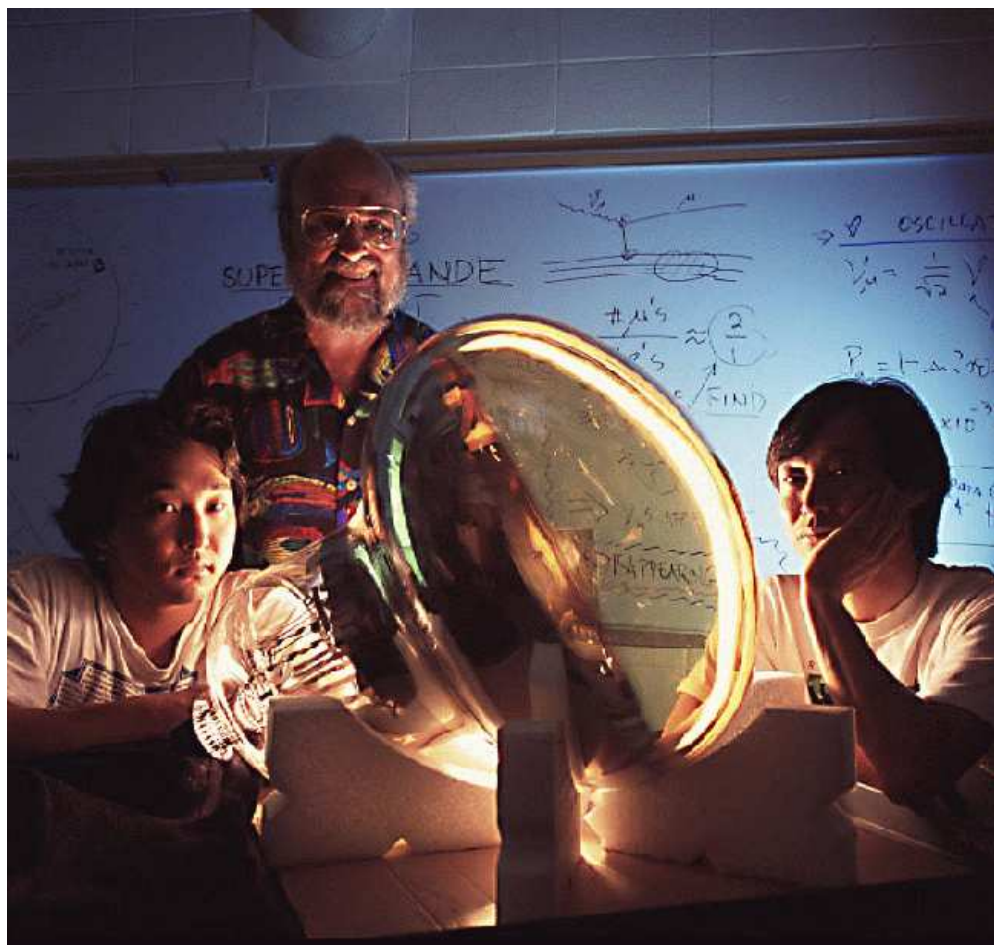
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande



Współczesne eksperymenty

Super-Kamiokande

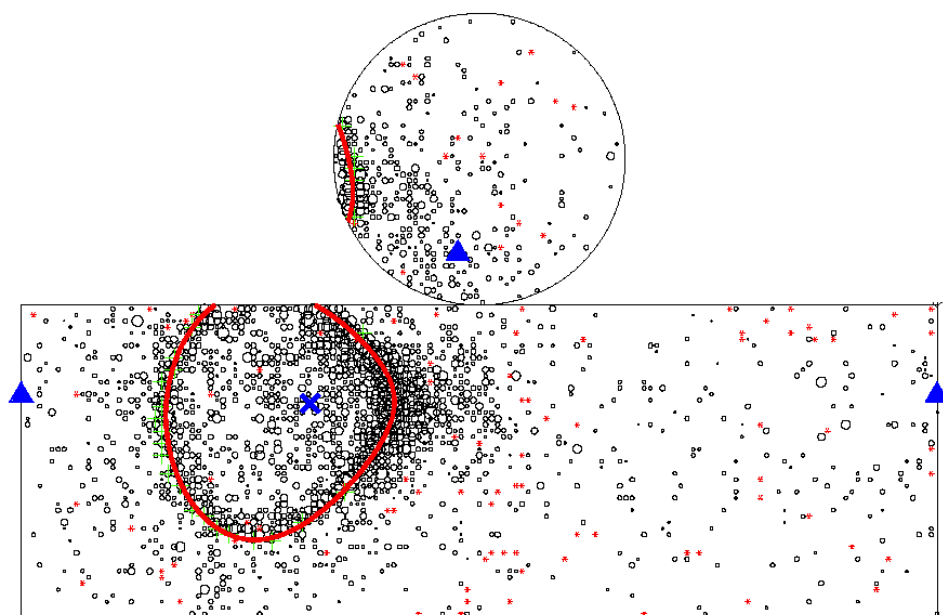
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

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

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

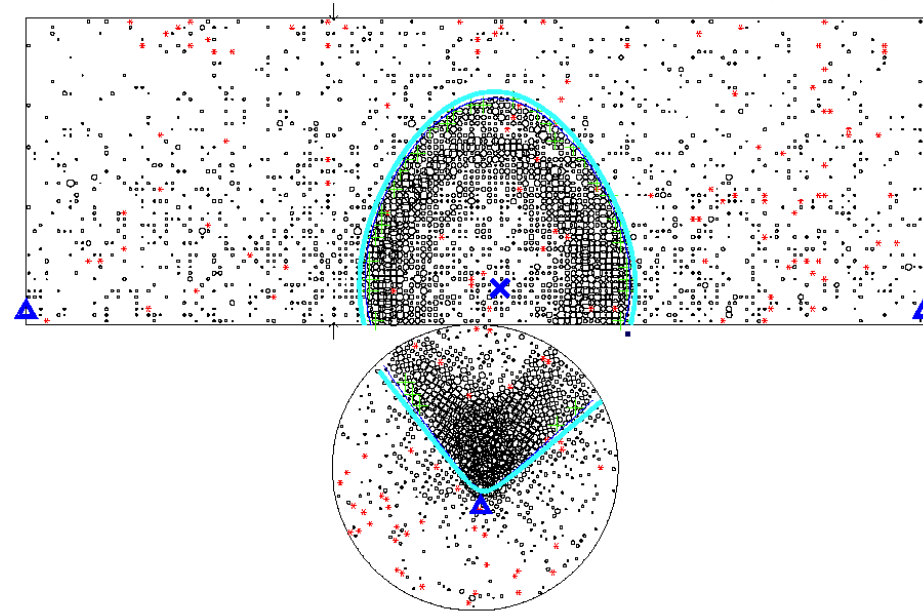


Neutrino mionowe

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

Długa droga mionu w wodzie

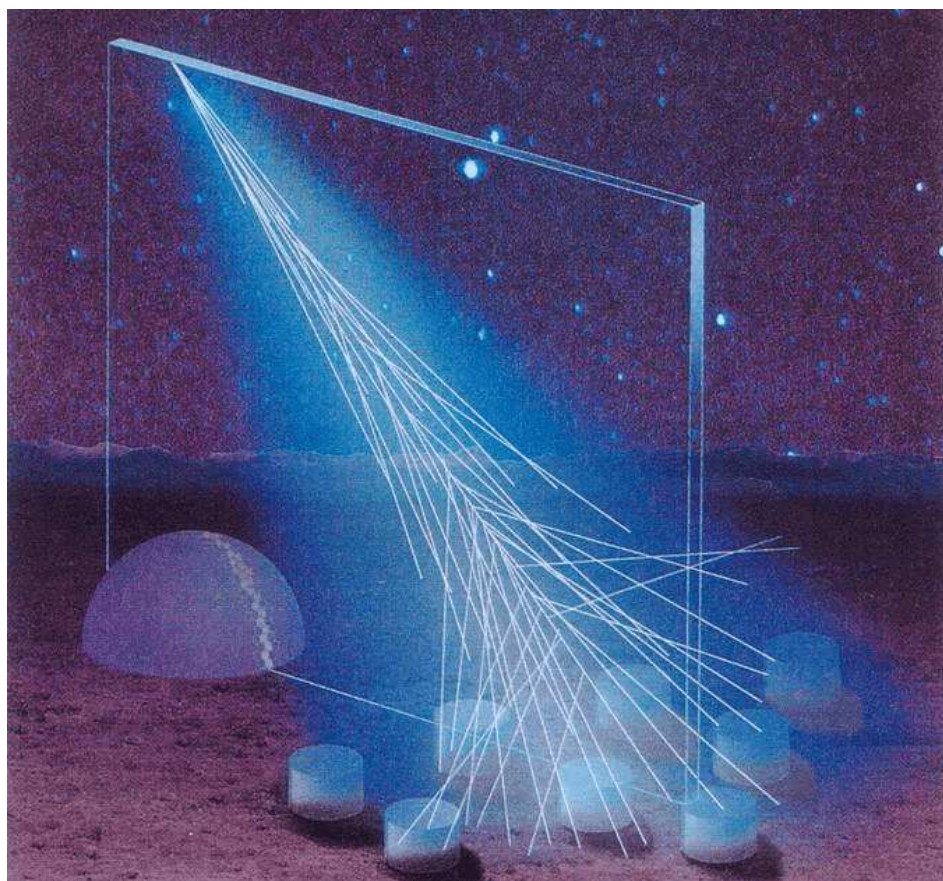
“gruby” pierścień.



Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Obserwacja wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego.

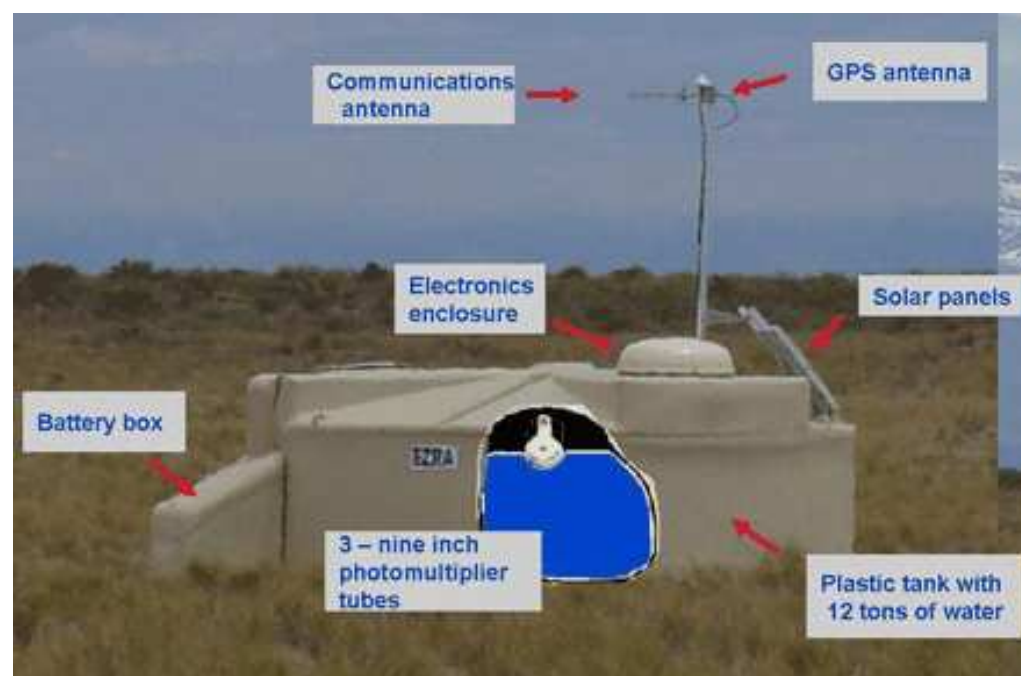


Scyntylacja w powietrzu.
Promieniowanie Czerenkowa w
detektorach na powierzchni.

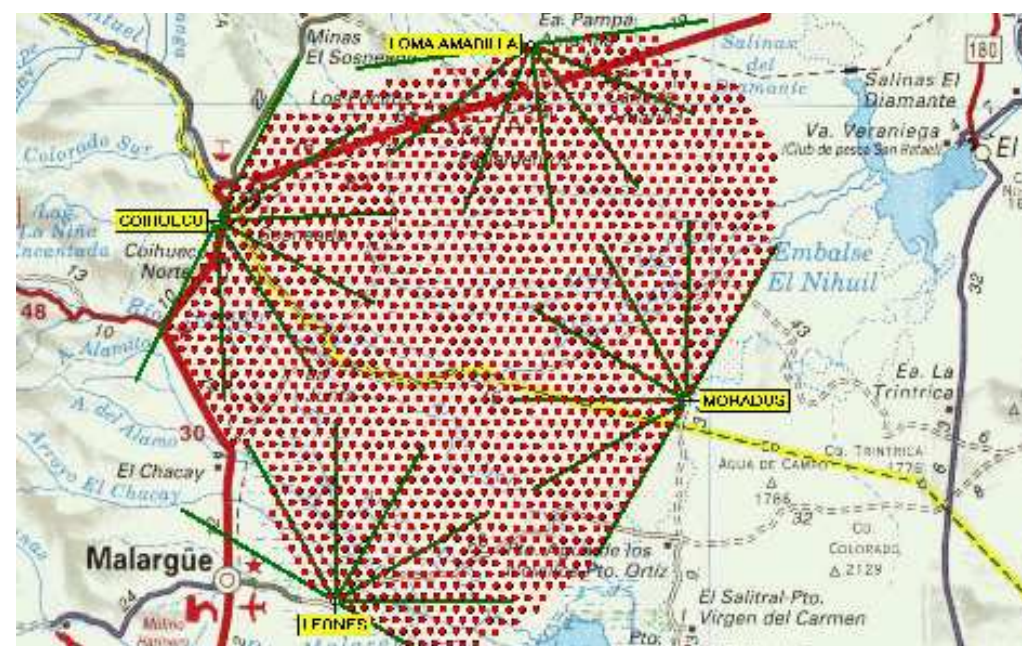
Współczesne eksperymenty

Obserwatorium Pierre Auger

Detektor powierzchniowy



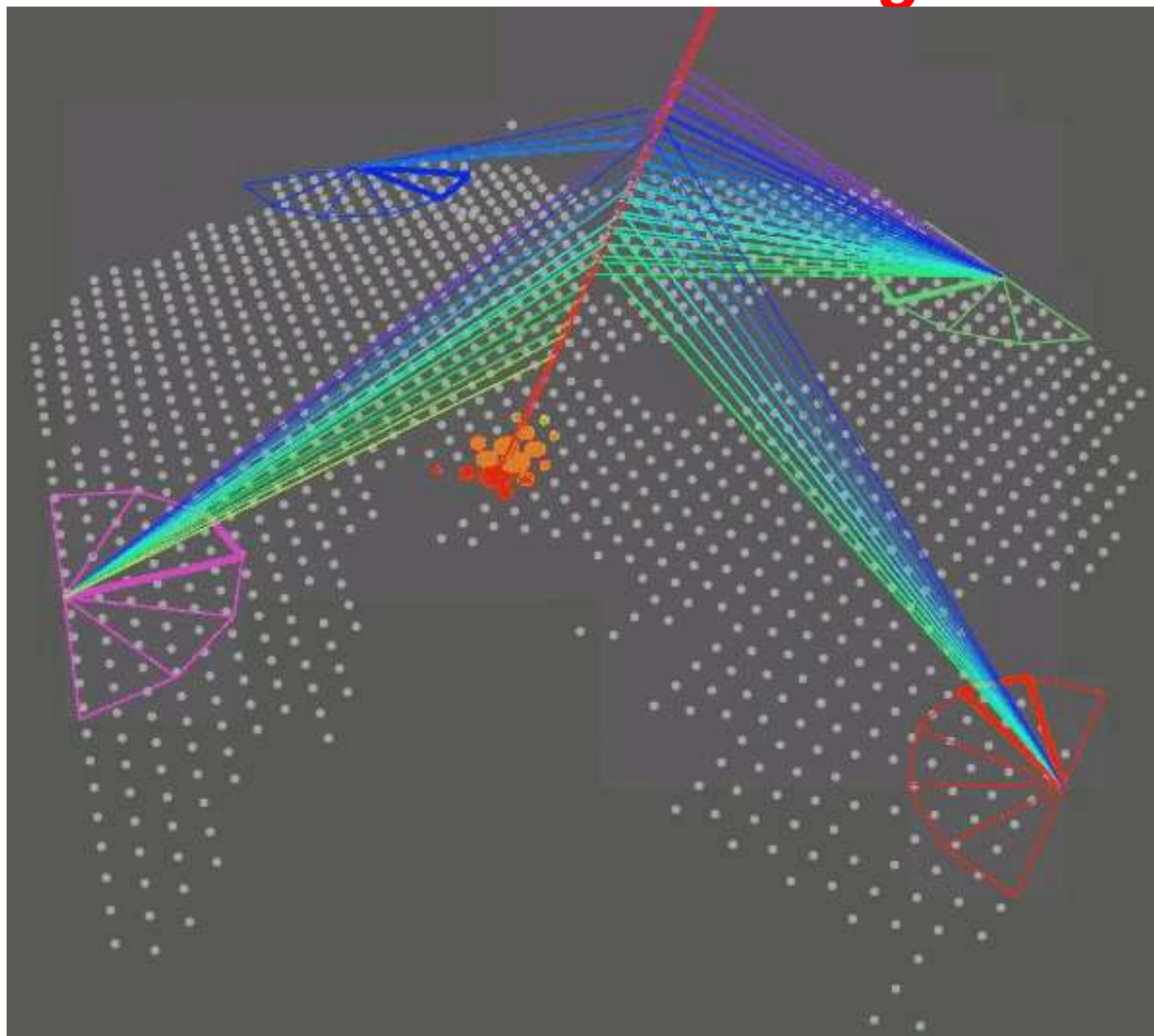
Mapa obserwatorium:



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 "zjęcia" z teleskopów
+ "ślad" na powierzchni

Detekcja cząstek

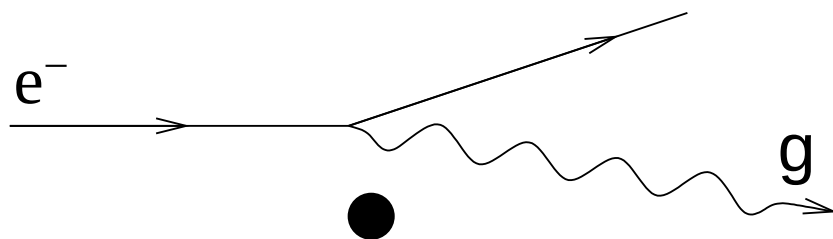
Kalorymetry

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

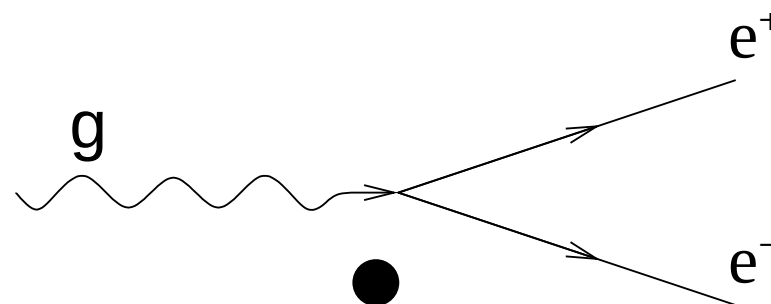
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddawała ją" w całości detektorowi.

Kalorymetr elektromagnetyczny

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



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



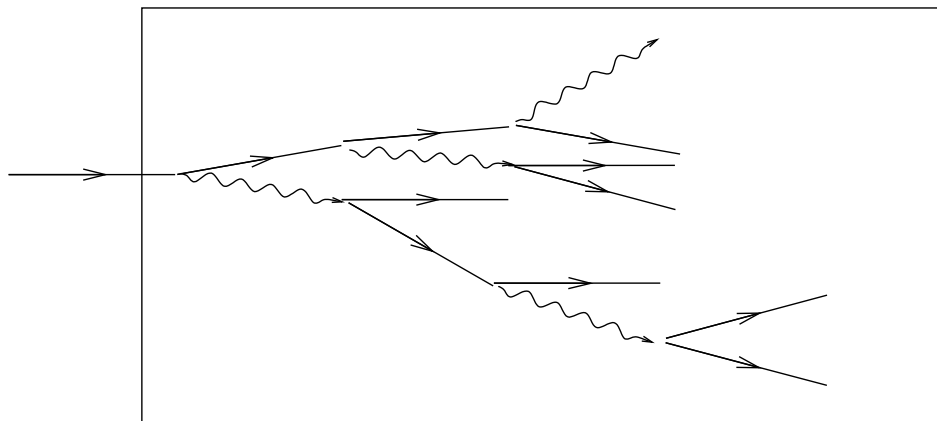
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

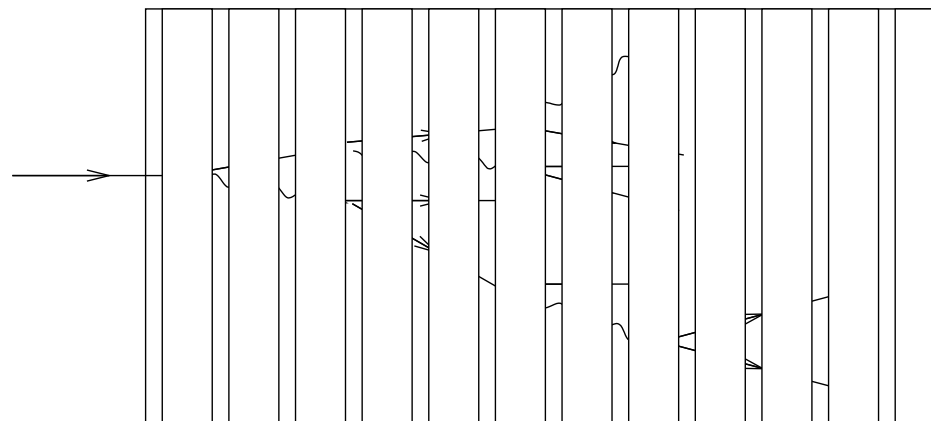
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

Kalorymetr próbkujący

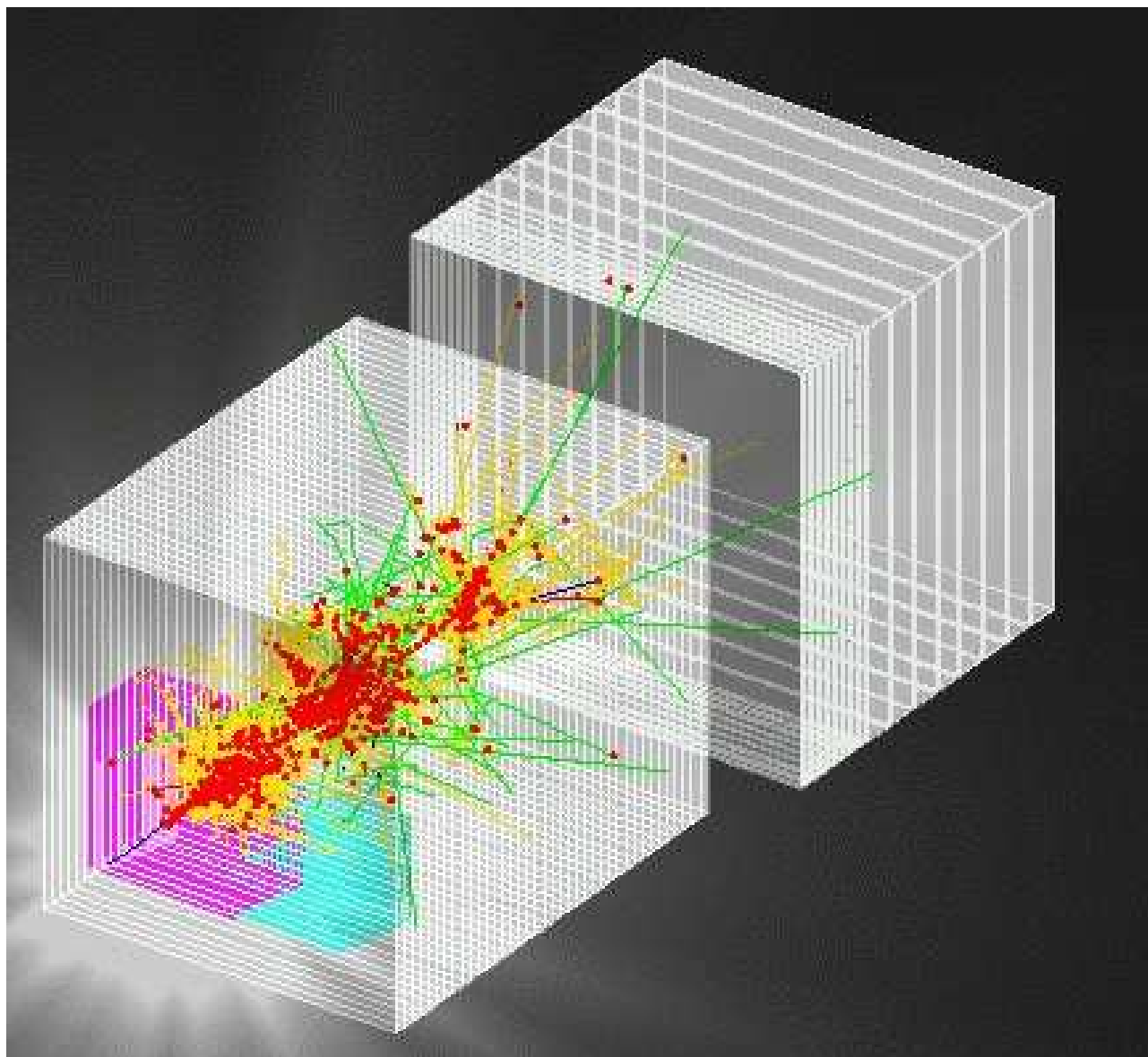


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)



A small inset image showing a complex pattern of particle tracks, likely from a particle detector, with a central point of origin and many branching paths in various colors (red, yellow, blue) against a dark background.

Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 3

4.III.2009

Cząstki elementarne
Odkrycia
Prawa zachowania
Cząstki i antycząstki

Fizyka cząstek elementarnych

- Wiek XX – niezwykle rozwój fizyki, pojawiły się fundamentalne idee:
 - pierwsza połowa to teoria względności, teoria grawitacji i teoria kwantów
 - druga połowa – fizyka cząstek elementarnych (teoria cząstek elementarnych lata 70-e XX w.)
- Teoria względności i prawa mechaniki kwantowej rządzą w świecie cząstek elementarnych.

Obowiązują znane z makroświata prawa zachowania energii i pędu, ładunku elektr.

Teoria kwantów i teoria względności

W badaniu struktury materii stosowane są coraz większe energie, gdyż

- Zasada nieoznaczoności Heisenberga → badanie coraz mniejszych odległości
- Relacja $E = mc^2$ → produkcja nowych bardziej masywnych cząstek

Stosujemy elektrowolt eV jako jednostkę energii i masy ($c = 1$)

Zoo cząstek elementarnych

Definicja: cząstka elementarna- 'obserwowany' obiekt prostszy niż jądro atomowe (wyjątek jądro atom. H = proton)

Cząstki elementarne – AD 2009

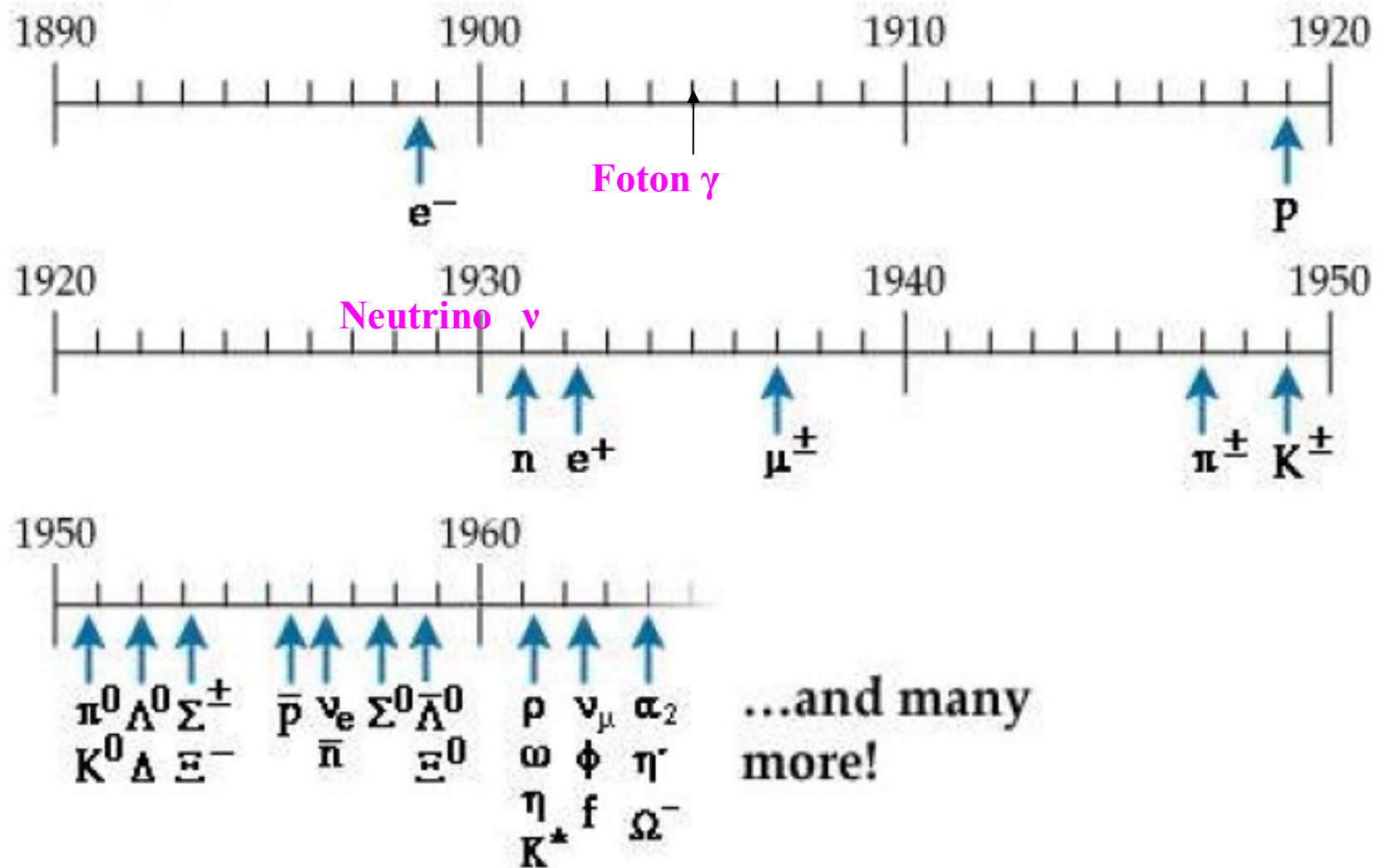
dużo (1000) i różnorodne (Zoo):

Różne masy, czasy życia,
różne ładunki elektryczne,
grupowanie się w układy (multiplety)
różne sposoby oddziaływań

Najprostsze cząstki el. → cząstki fundamentalne
Cząstki elementarne mogą być złożone (proton)

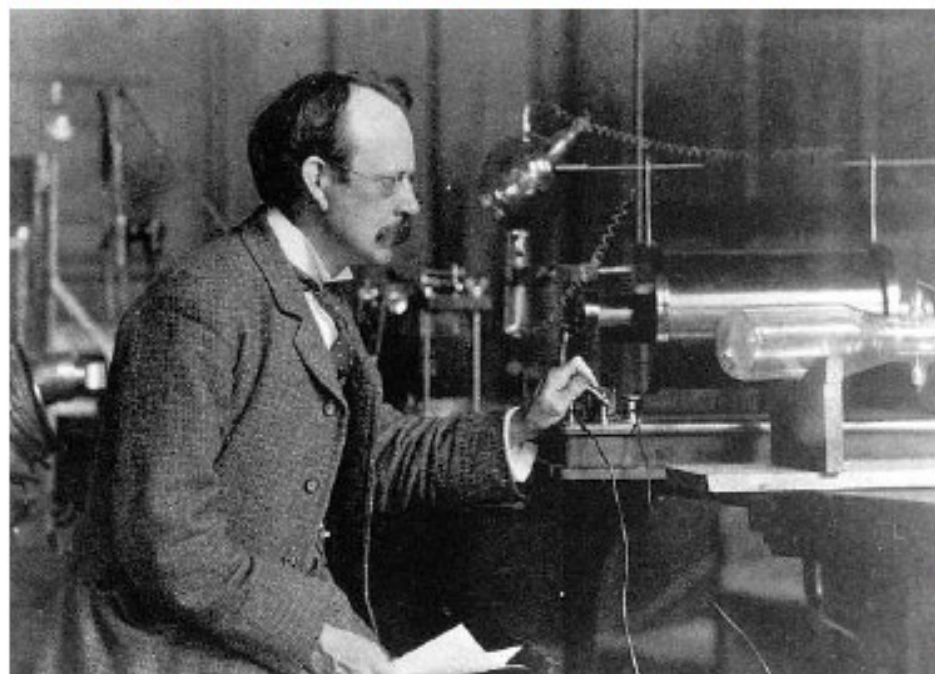
Odkrycia cząstek elementarnych

- 'potop' w latach 50-60 XX w

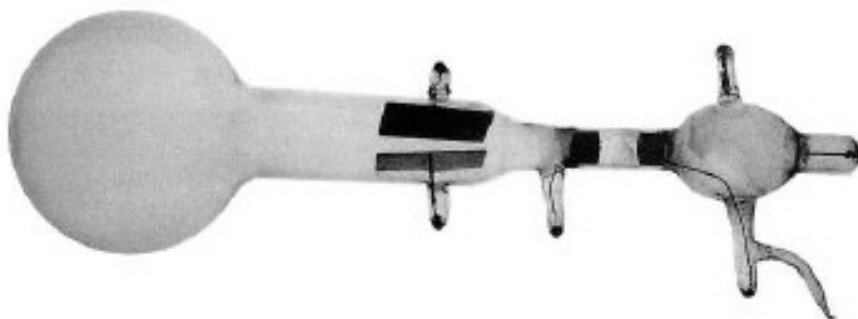


Odkrycie elektronu

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

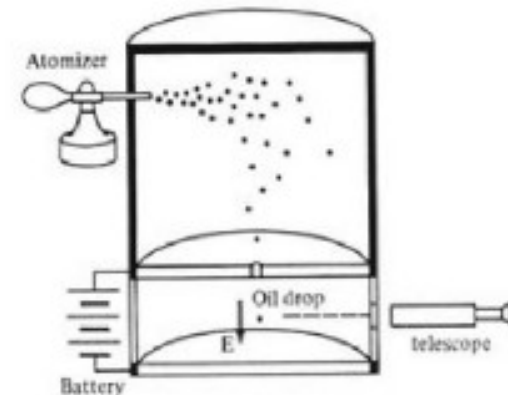
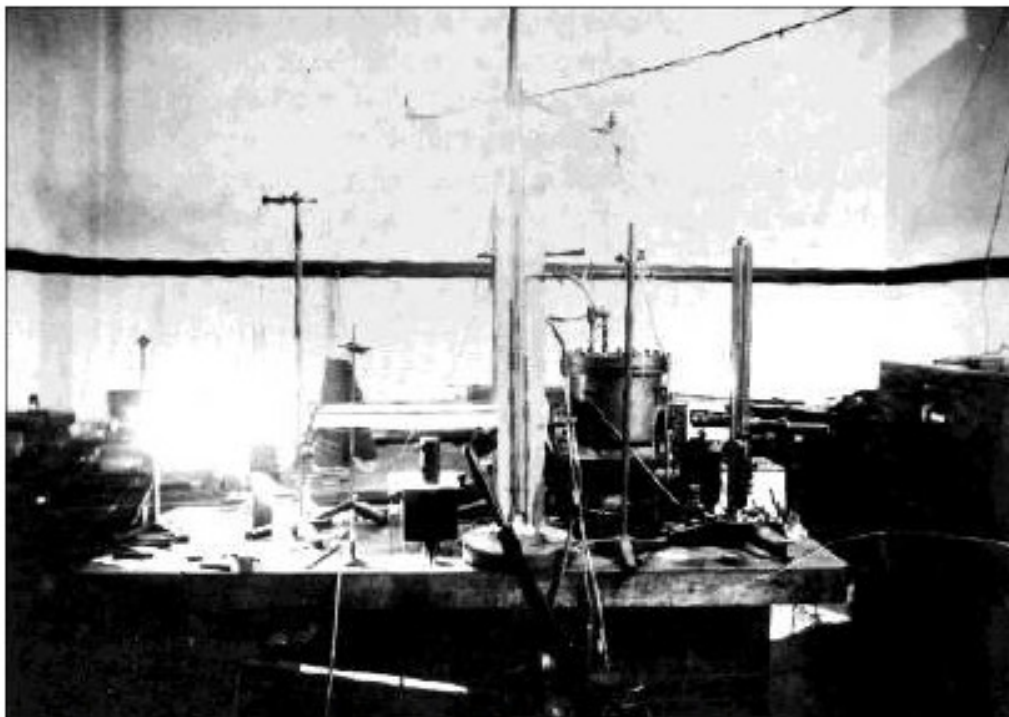
Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

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

Odkrycie elektronu



Robert Millikan 1909

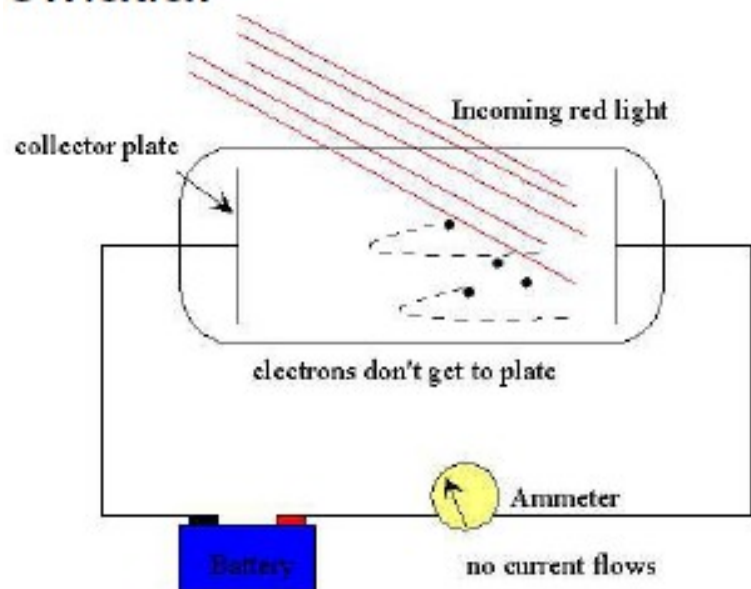


Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył ładunek elektronu, a następnie obliczył jego masę: $m_e = \frac{1}{1837} m_H$

Odkrycie fotonu

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887
W 1902 Philipp Lenard pokazał,
że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



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

Kwant - ur. w 1900, 14 grudnia

Max Planck: radykalne wyjaśnienie promieniowania cieplnego rozgrzanych ciał. Z doświadczenia → całkowita energia promieniowania zależy tylko od temperatury. Ale opis dla idealnego źródła promieniowania ('ciało doskonale czarne') nonsensowny, powinno emitować nieskończoną energię („katastrofa w ultrafiolecie”).

Planck: Dobry opis gdy promieniowanie paczek (kwantów) energii $E = h \nu$Ale to „tragedia”

Odkrycie fotonu

Efekt fotoelektryczny

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

Energia fotonu:

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

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





Foton - (nie)udana hipoteza Einsteina

Warszawa, wrzesień 2005

Maria Krawczyk

Uniwersytet Warszawski

Foton="cząstka" światła (promieniowania) :

Światło = strumień niepodzielnych cząstek (kwantów) -
jedyna wg Einsteina jego rewolucyjna hipoteza (1905 r)

Light quanta - cząstki światła

- 1900 - Planck → kwant energii promieniowania elektromagnetycznego $E = h\nu$ (nagroda Nobla - 1918)
 - 1905 - Einstein → kwant światła (γ) - foton Einsteina : $E = h\nu = pc$ (nagroda Nobla - 1922)
 - 1915 - Millikan badał zjawisko fotoemisji z metalu (nagroda Nobla - 1923)
 - 1922 - Compton (doświadczenie rozpraszania fotonów na elektronach $\gamma e \rightarrow \gamma e$) (nagroda Nobla - 1927)
 - 1925-7 - Born, Heisenberg, Jordan, Dirac → (teoria oddziaływań elektromagnetycznych - elektrodynamika kwantowa QED; foton - bozon przenoszący oddziaływanie)
 - (• 1926 - Lewis (chemik) → nazwał kwant światła - fotonem)
 - 1931 - Wigner → opis właściwości związanych z momentem pędu - spinem; foton - spin 1 $\hbar/2\pi$
-

Zuchwała hipoteza

- Max Planck nie popierał tej idei przeczącej teorii Maxwella - nawet w roku 1914 tłumaczył Einsteina z tego "wybryku" przed Pruską Akademią Nauk:

"Że on nieraz gubił się w swych spekulacjach, jak na przykład w swej hipotezie cząstek światła, nie może być używane przeciwko niemu, gdyż nie można wprowadzać naprawdę nowych idei, nawet w naukach ścisłych, bez podjęcia ryzyka. "

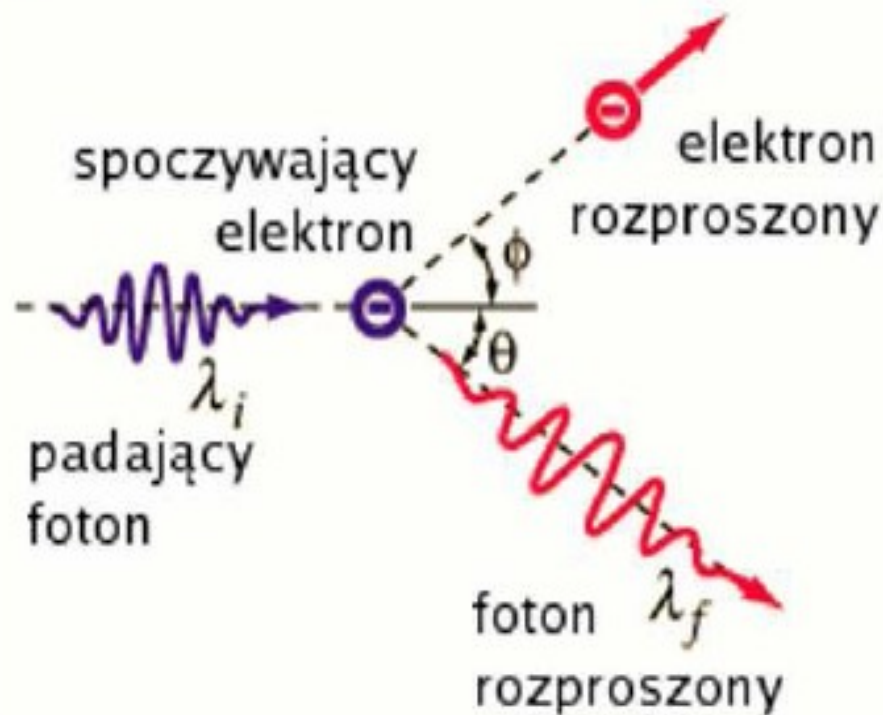
- Millikan był zakłopotany, że ona pasuje do wyjaśnienia pomiarów efektu fotoelektrycznego...

- Bohr - uważał "kwantowość " za własność atomów nie promieniowania (wolał zrezygnować z zachowania energii i pędu..)

- Środowisko w końcu zaakceptowało foton, szczególnie po doświadczeniu Comptona, w którym foton i elektron grają w bilard...

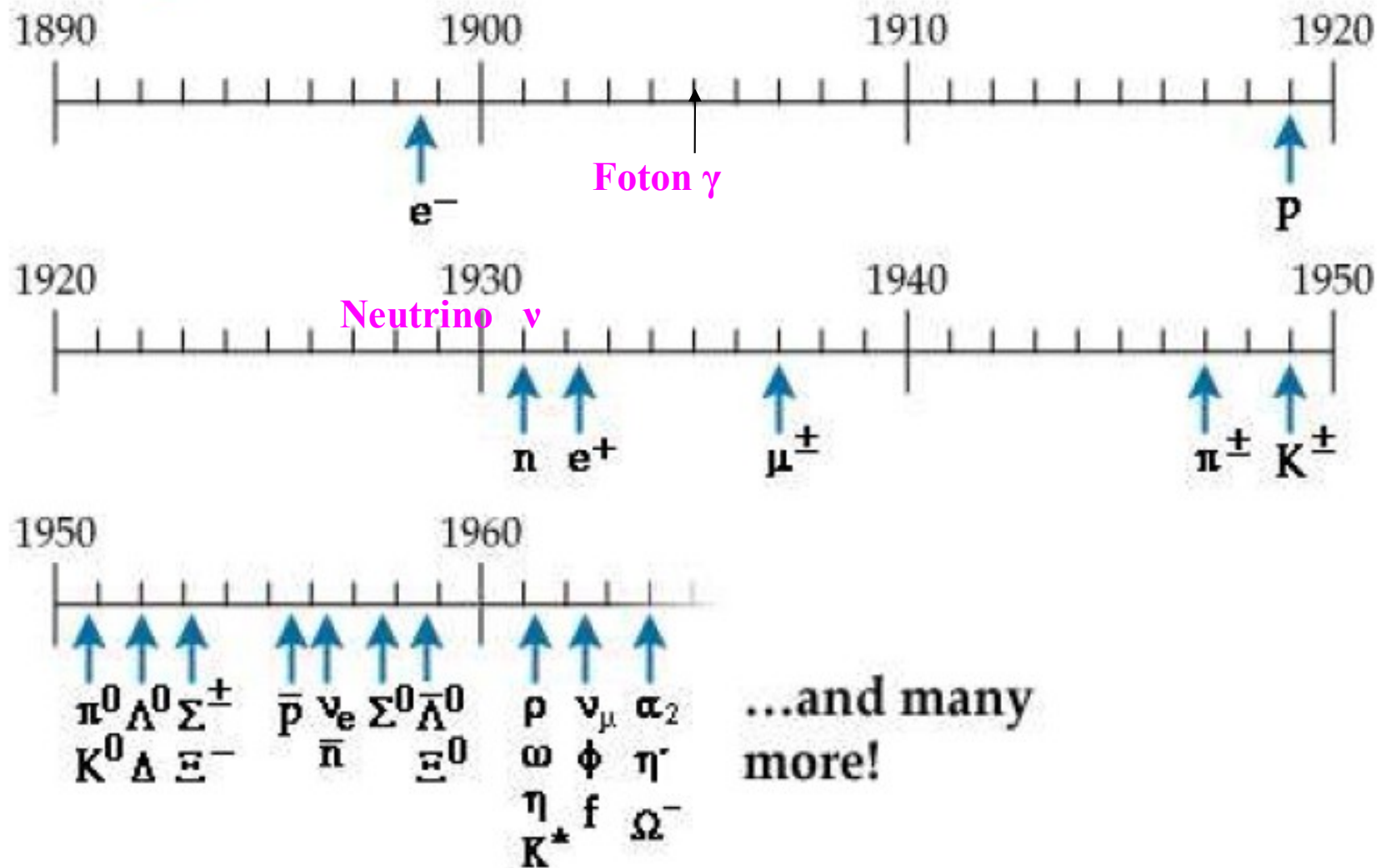
Odkrycie fotonu

Arthur Compton 1923
Rozpraszanie fotonów na elektronach



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

Odkrycia cząstek elementarnych 'potop' w latach 50-60 XX w



Masy

($E=mc^2$, jednostka masy = eV/c^2 ,
często pomijamy stały czynnik c^2)
Neutrino – 0 ?

Elektron – 0.5 MeV

Pion – 140 MeV

Proton, neutron - 1 GeV

Istnieją cząstki masywniejsze niż proton
nawet 200 razy

Pochodzenie mas cząstek – nadal zagadką
Czy masa cząstki = suma mas składników?
bywa, ale np. nie dla p, n

Czasy życia cząstek elementarnych

Czas życia układu – czas po którym połowa układów danego typu przestaje istnieć

Czasy życia cząstek elementarnych τ

cząstki trwałe – np. elektron i proton

($> 4.6 \cdot 10^{26}$ lat i $> 10^{30}$ lat)

cząstki rozpadające się b. szybko 10^{-24} s

cząstki rozpadające się powoli:

mion $2 \cdot 10^{-6}$ s, piony naładowane $2.6 \cdot 10^{-8}$ s

Prawdopodobieństwo rozpadu małe, gdy

czas życia długi i odwrotnie

Rozpad cząstki elementarnej

Rozpad cząstki to swobodne przejście do innego stanu (to nie jest rozpad na składniki cząstki złożonej, ale przeorganizowanie składu).

Np. rozpad β : neutron (ddu) $\rightarrow$ p(uud) e i 'coś'
(czas życia neutronu 886 s = 14,8 min)

1914 J. Chadwick: energia elektronu zmienna
więc to nie może być rozpad na dwie cząstki

Bohr – energia się nie zachowuje

Pauli 1931-'coś' bez masy i ładunku (..bez wiary)

Fermi 1932-nazwa neutrino(neutralne maleństwo)

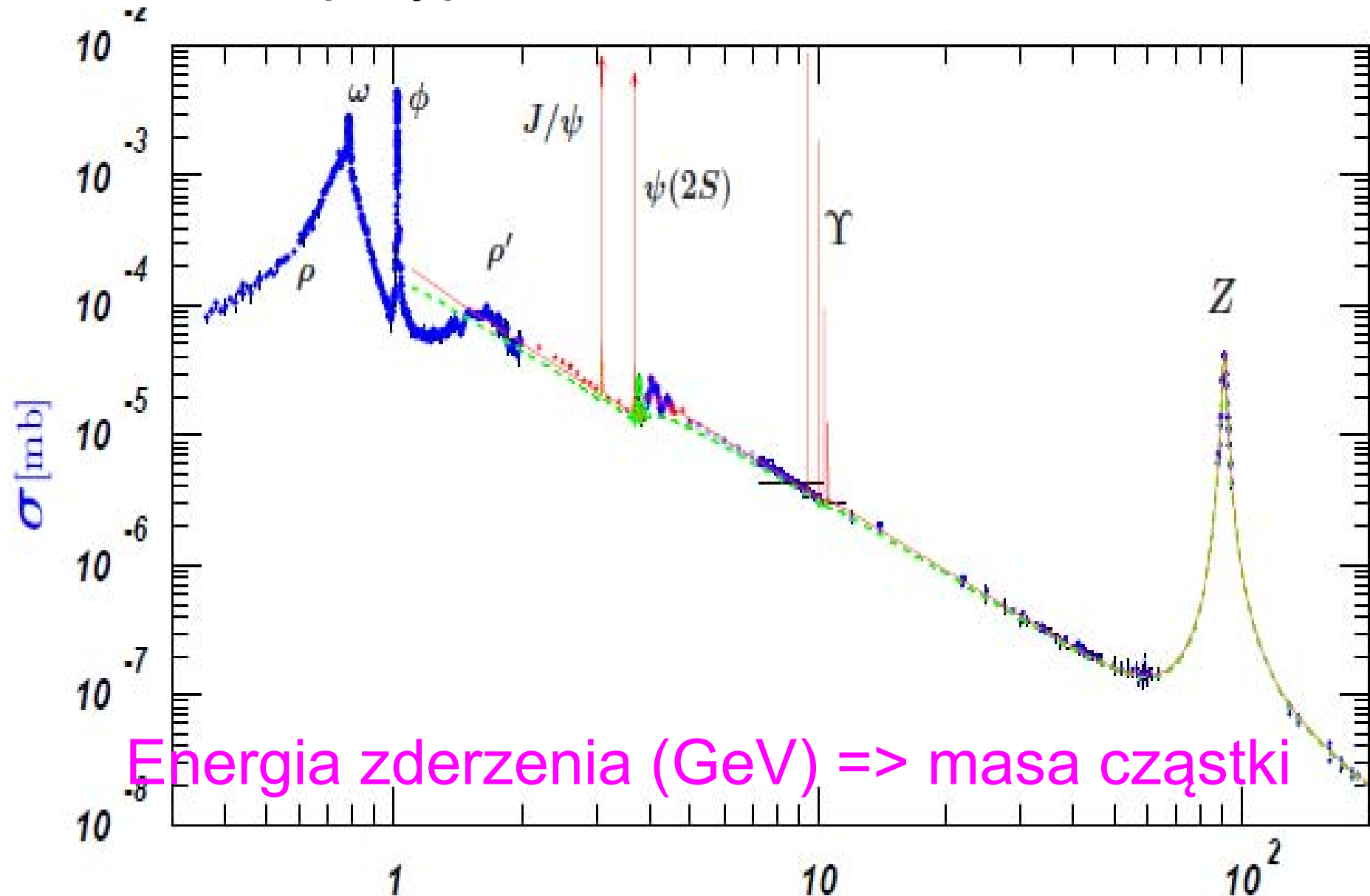
Produkcja cząstek elementarnych

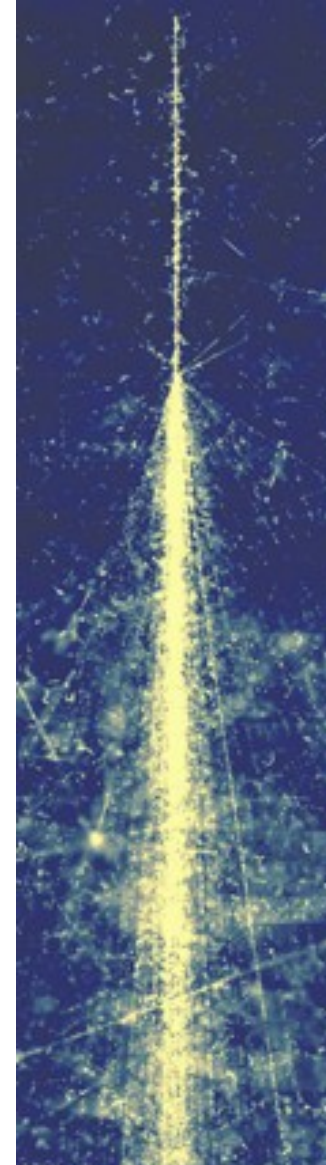
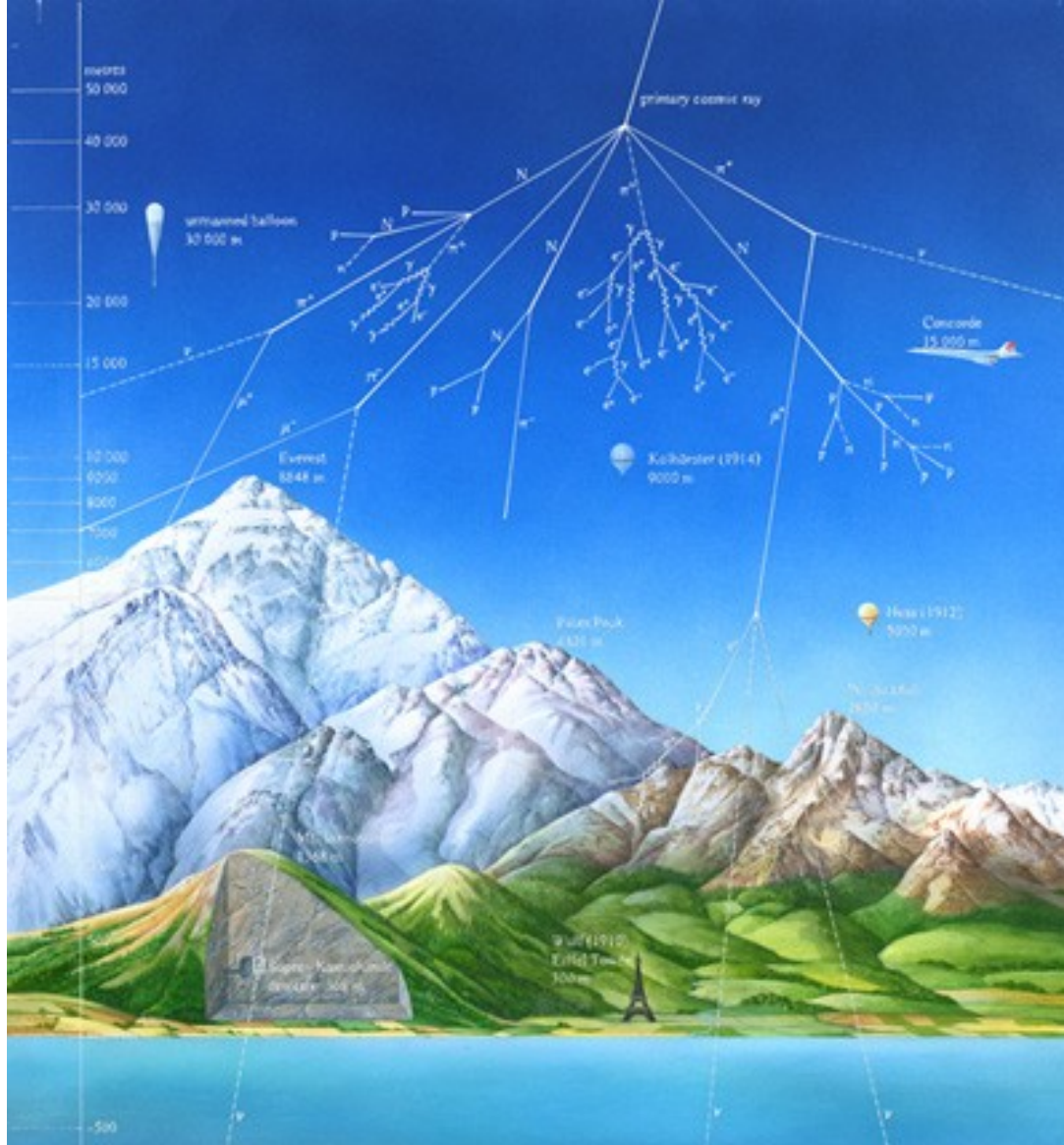
W zderzeniach cząstek danego typu produkcja dwóch, trzech,..N cząstek - zawsze w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu

Energia zderzenia może się zamienić całkowicie na energię spoczynkową jednej nowej cząstki, zgodnie z $E=mc^2$ - produkcja rezonansowa -

tak odkryto wiele cząstek

Liczba przypadków w zderzeniach e^+e^-



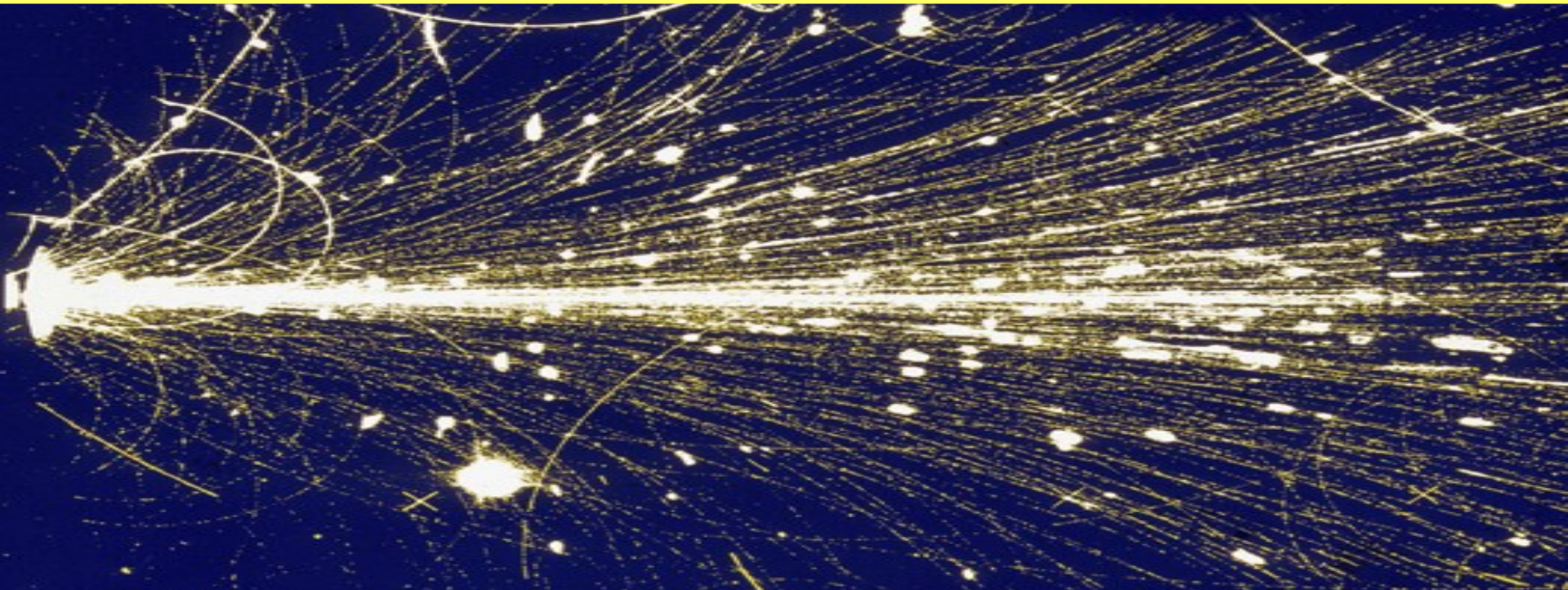


Zderzacz kosmiczny: w promieniowaniu kosmicznym odkryto wiele nowych zjawisk w tym cząstki dziwne

1955 CERN accelerators replicate cosmic rays on Earth...



...record the images and reveal the real heart of matter....



the beginnings of modern high energy particle physics [Close]

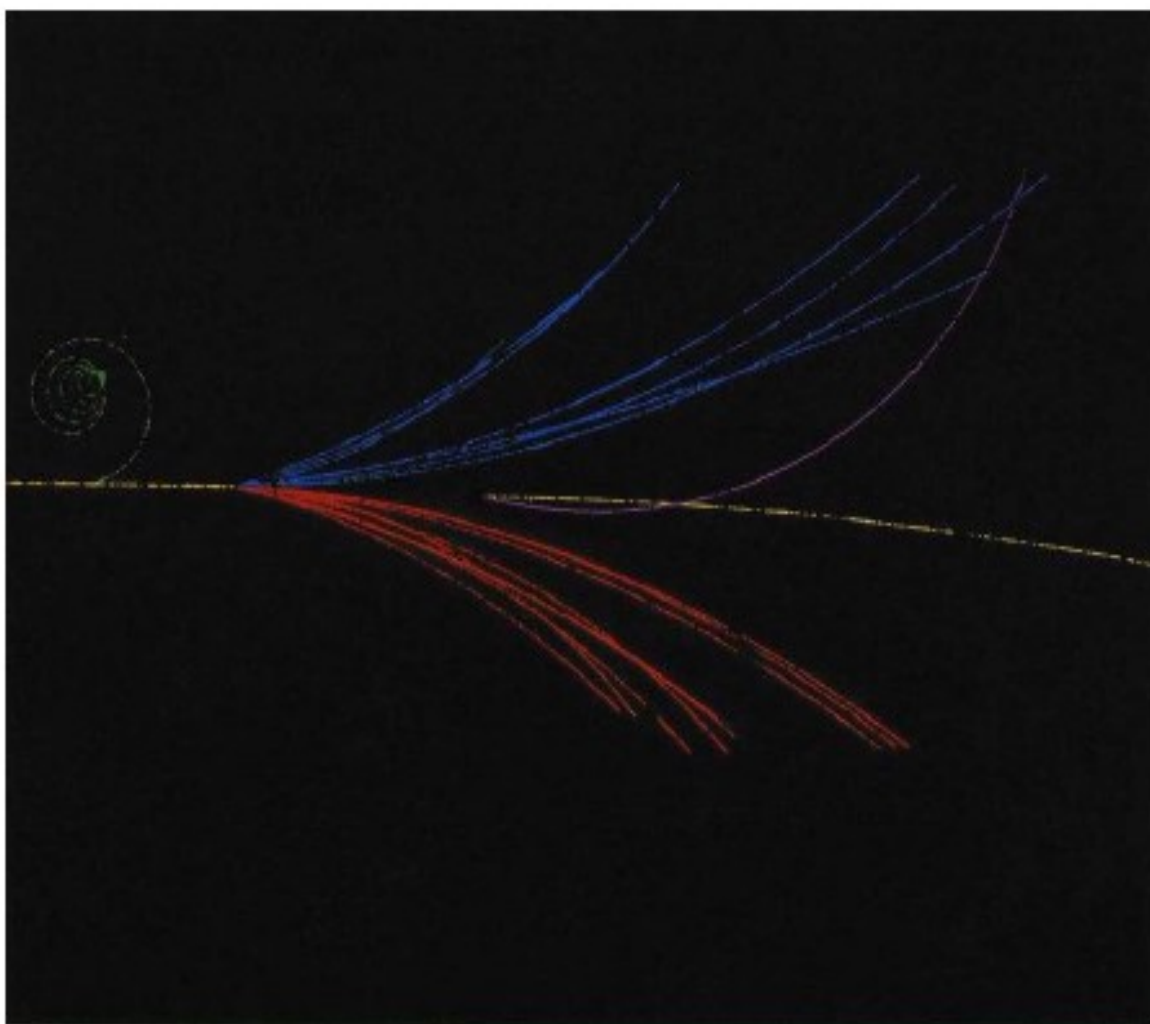
Cząstki dziwne

Czas życia
znacznie dłuższy
od spodziewanego

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$
$$\tau \approx 3 \cdot 10^{-10} s$$

$$\Delta \rightarrow p + \pi^-$$
$$\tau \sim 10^{-23} s$$

Produkcja i rozpad cząstki Λ :



Własności cząstek elementarnych - liczby kwantowe

Cząstki dziwne mają cechę S (dziwność różną od zera); wartości S : 1, 2, 3.. (i ujemne)

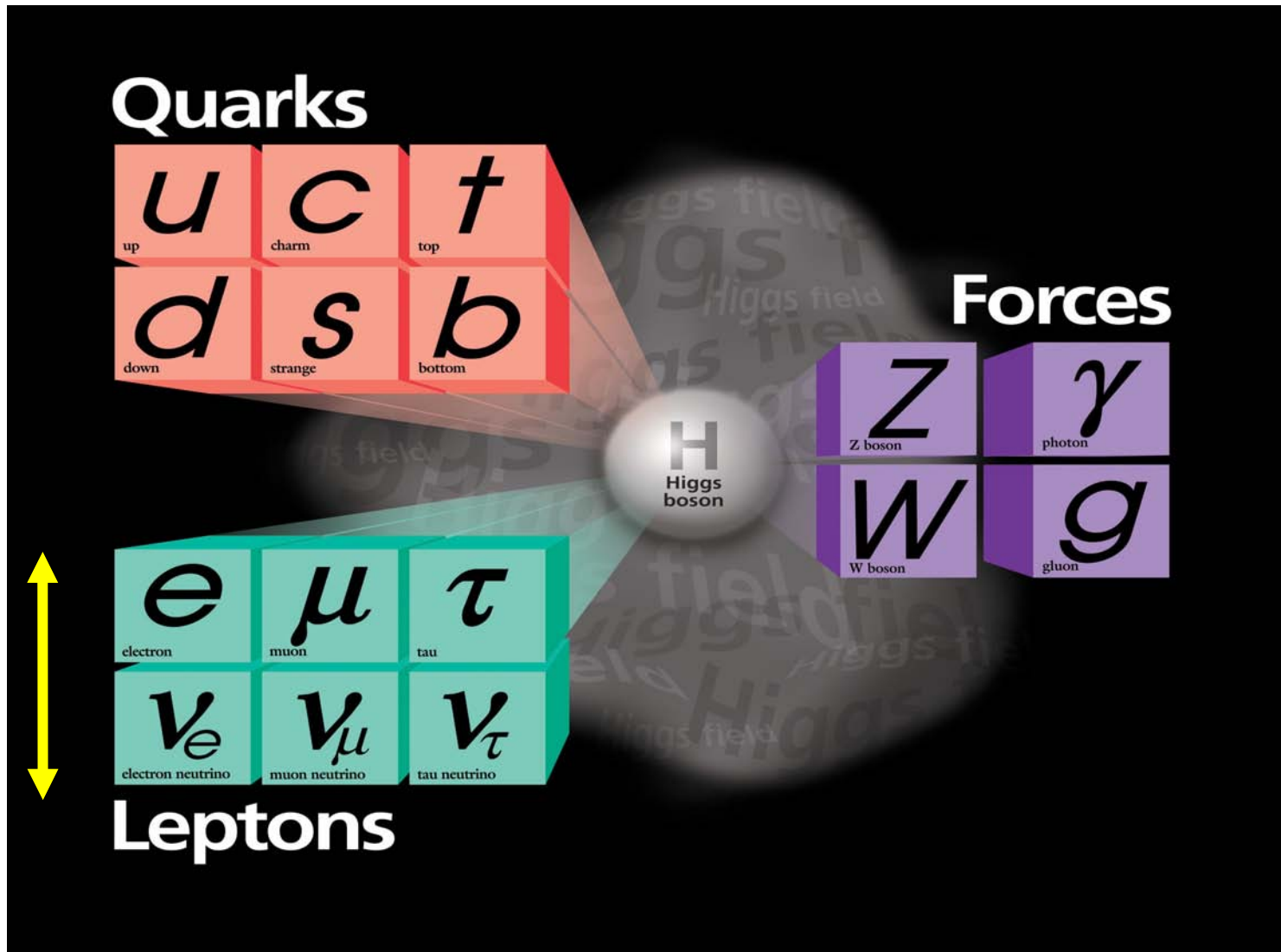
Nukleony= proton i neutron $S=0$

Piony $S=0$

Inne cechy (liczby kwantowe)– powab, piękno itp. wszystkim cząstkom przypisujemy odpowiednie liczby kwantowe.

Te liczby kwantowe dodają się i zachowują (jak ładunek elektryczny) w **niektórych** procesach

Nośnikami tych liczb kwantowych są kwarki



Nukleony i zwykłe kwarki (oraz klej)

Proton i neutron = 3 kwarki

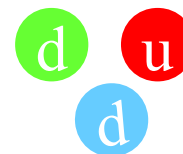
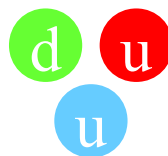
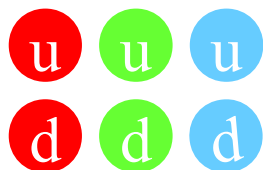
(różne typy kwarków i ich nazwy...)

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

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

- nowa liczba kwantowa

czerwone, zielone i niebieskie – to tylko nazwy



Kwarki nie mają struktury! Są fundamentalne..

Ale nie występują jako cząstki swobodne – p i n tak

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

Antycząstki (antymateria)

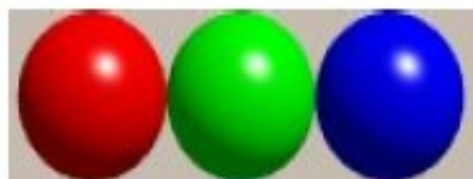
- Antycząstki to też cząstki, choć mogą się różnić od swoich „partnerów” pewnymi właściwościami.
Cząstki i antycząstki mają tę samą masę i czas życia
- Np. elektron i pozyton – to para cząstka-antycząstka (ale która jest którą to sprawa umowy), różnią się znakiem ładunku elektrycznego (pozyton ma dodatni ładunek).

Elektron odkryto w 1897 a pozyton w 1932

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

Kolor

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



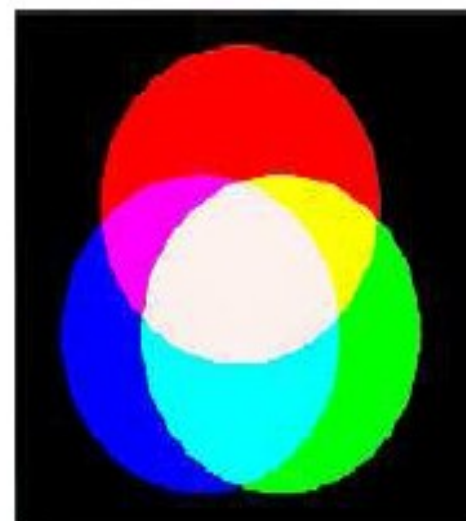
Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): $\bar{R}$, $\bar{G}$, $\bar{B}$.



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

$$R + G + B = 0$$

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



Kolor – cd

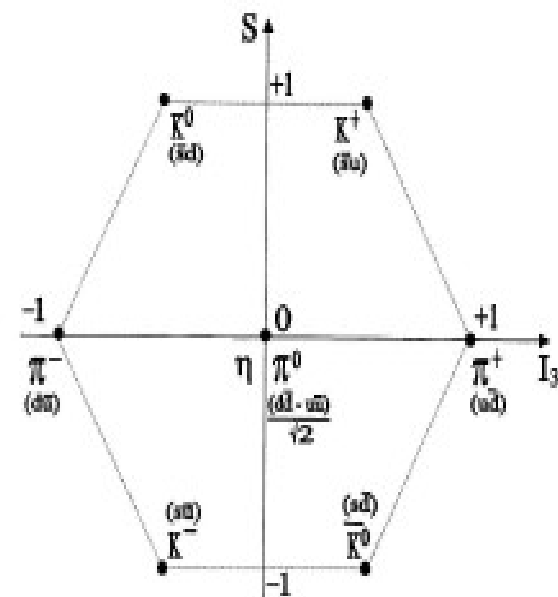
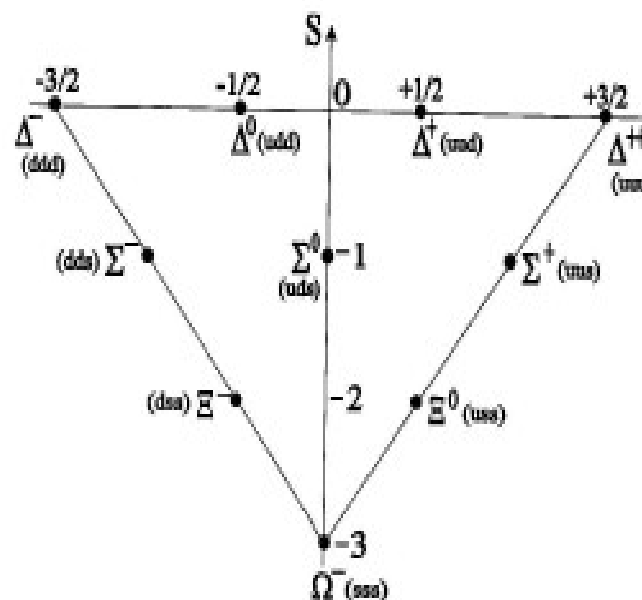
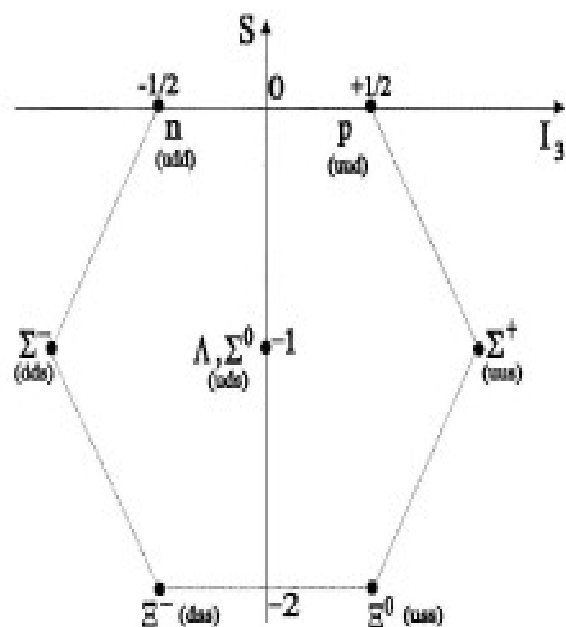
- wszystkie kwarki są kolorowe
- gluony – też mają kolor ale „podwójny” kolor i antykolor
np. gluon czerwono- antyniebieski
- foton „czuje ładunek el.”, gluon – ładunek kolorowy – (oddziałuje z.., sprzęga się do..)
- makroskopowo – ładunek kolorowy nie występuje, bo kwarki nie występują pojedynczo

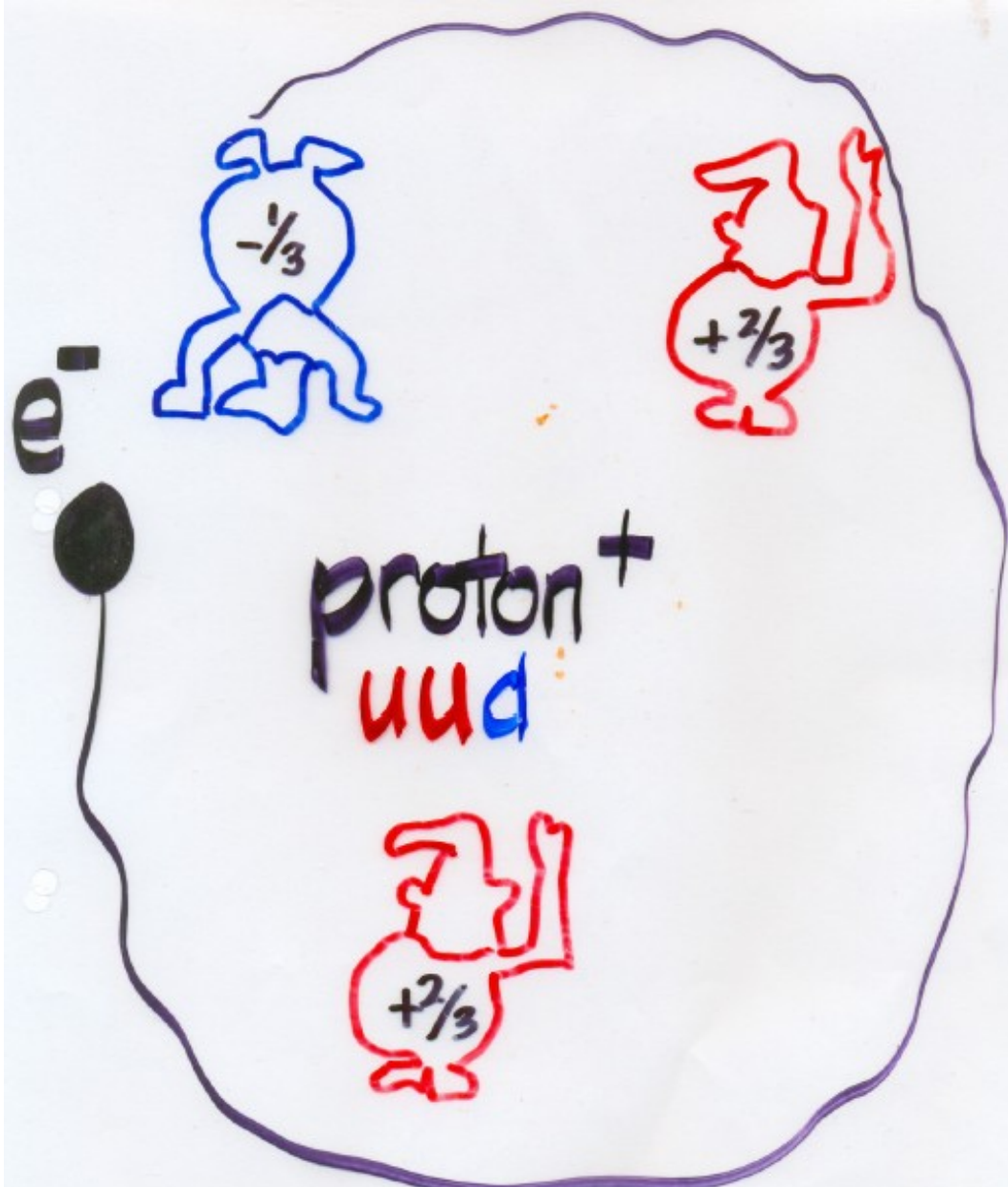
Model kwarkowy

W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** doprowadziła **Gell-Mann'a** i **Zweig'a** do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

Para kwark-
antykwarik mezony:





F. Close

uud

Life, ^{much} of the Universe, ^{but} not everything

Stable (ordinary) matter

- up-quark (charge $+2/3$)
- down-quark (charge $-1/3$)
- electron (charge -1)
- neutrino (no charge and $\approx$ zero mass)



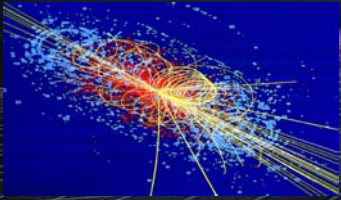
proton



neutron

what is the neutrino needed for ??

Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 4

11.III.2009

Liczby kwantowe
i prawa zachowania

Spin

Rodziny

Neutrino

Zasada zachowania energii

W każdej reakcji (zderzeniu, rozpadzie):

energia końcowa = energia początkowa

- Każda cząstka o masie m ma związana z nią energię

$$E=mc^2$$

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

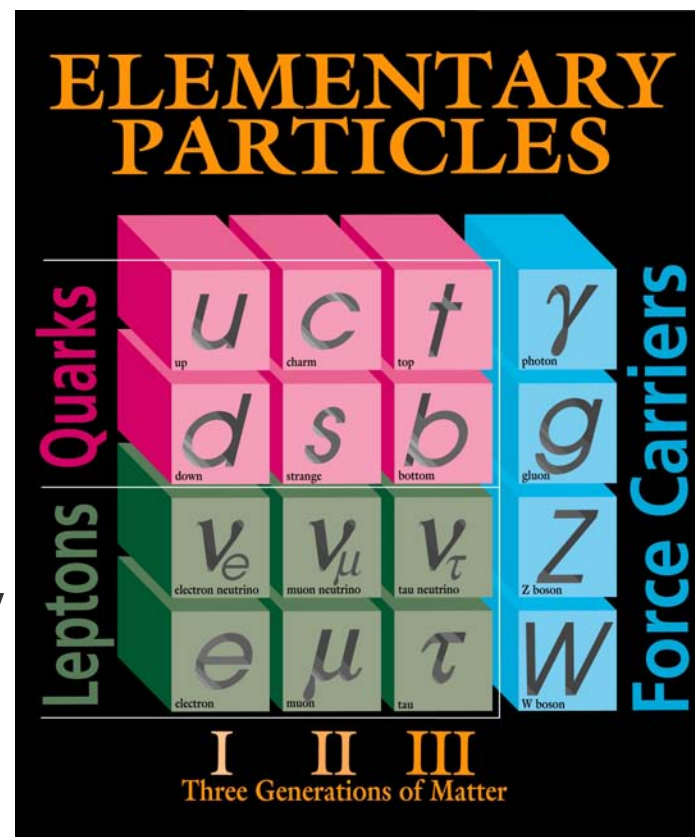
- Zasada zachowania energii – ściśle przestrzegana przez Naturę

Przykład rozpadu neutronu: bilans masy
($939.5 - [938.3 + 0.5 + 0] = 0.70$) MeV/c²

-> energia kinetyczna produktów rozpadu

Masy kwarków

3 MeV	1.25 GeV	172 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 (mion)	τ (taon)
0.511 MeV	105.7 MeV	1.78 GeV



i LEPTONÓW: (*lepton* - „lekki”)
elektron, mion, taon i ich neutrina

Różnica mas kwarku u i d

- Kwarki te tworzą proton (uud) i neutron (ddu)
[$m_p=938.3 \text{ MeV}/c^2$, $m_n=939.5 \text{ MeV}/c^2$, $\Delta m=1.2 \text{ MeV}/c^2$]

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

Hipotetyczny rozpad protonu

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

Ale dlaczego proton się nie rozpada?

Czy to naruszałoby jakąś zasadę?

Zachowanie ładunku elektrycznego

- Zasada zachowania ładunku elektrycznego
 - ściśle przestrzegana w przyrodziedlatego np. proton nie mógłby się rozpaść na elektron plus antyneutrino (el. neutralne)
- Ładunek **cząstek elementarnych** – tylko w określonych porcjach → **skwantowanie ładunku**
Niech ładunek el. elektronu = -1,
wtedy ładunek el. protonu +1,
ale kwarku u wynosi $2/3$! - **ułamkowy**!
- **Obserwowane** cząstki elem. mają ładunek elektr. będący wielokrotnością ładunku elektr. elektronu – czyli $n=0,1,2,\dots$ lub $-1,-2,\dots$
($n=0$ – cząstka neutralna lub obojętna)

Liczba ładunkowa

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

Liczba barionowa B

- Rozpad protonu nie jest zabroniony przez zasadę zachowania ładunku elektr. ani zasadę zachowania energii

$$\text{np. } p \rightarrow \bar{e} + \nu_e$$

Więc co zabrania?

- Stückelberg (1938) – nowy pomysł:
inna liczba kwantowa (i jej zachowanie)
- Doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy-
różne testy , np

dlaczego neutron nie rozpada się na: $e + \bar{e}$?

- Nowa liczba kwantowa: liczba barionowa
proton=+1, neutron=+1; antycząstki $\bar{p}$, $\bar{n} = -1$
zachowana w Naturze (baryon, z greckiego-ciężki)

Liczby kwantowe kwarków

- Liczba barionowa B dla p i $n = +1$
Stąd kwarki mają liczbę barionową $= 1/3$
- Ładunek elektryczny
kwarków $q = 2/3$ lub $-1/3$
antyekwarków $\bar{q} = -2/3$ lub $1/3$
 $u = 2/3, d = -1/3 \rightarrow$ ład. el. $p = +1, n = 0$

Liczby kwantowe **zapachowe** (np. S)

Hadrony – stany związane kwarków

Hadrony

Bariony ($B \neq 0$)

3 kwarki

Mezony ($B = 0$)

kwark-antykwar

Liczby leptonowe: elektronowa

- Często elektronowi towarzyszy neutrino (lub anty-neutrino np. w rozpadzie n)
- **Liczba elektronowa**: dla elektronu $e=+1$,
dla neutrina elektronowego $\nu_e=+1$
dla ich antycząstek $= -1$ (dla innych $=0$)

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

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

- Podobnie $\rightarrow$ **liczba mionowa i taonowa**

Liczba leptonowa L

Liczba leptonowa = suma
indywidualnych liczb leptonowych

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

Spin

Własność zwana spinem – własny moment pędu związany z obrotem (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, $\frac{3}{2}$..)

Dodawania spinów – jak wektorów

W przyrodzie jedynie dwa typy cząstek elementarnych

cząstki o spinie połówkowym

- **fermiony** (statystyka Fermiego)

nie mogą zajmować tego samego
stanu kwantowego

cząstki o spinie całkowitym

- **bozony** (statystyka Bosego)

lubią zajmować ten sam stan
kwantowy

Kwarki i leptony
to fermiony o spinie $\frac{1}{2}$

Model Standardowy 11.03.09

Cząstki materii

Podsumowanie – cząstki
fund. o spinie $1/2$ $h/(2\pi)$,
 $\pi=3.14..$

(h – stała Plancka)

Kwarki (wszystkie) :

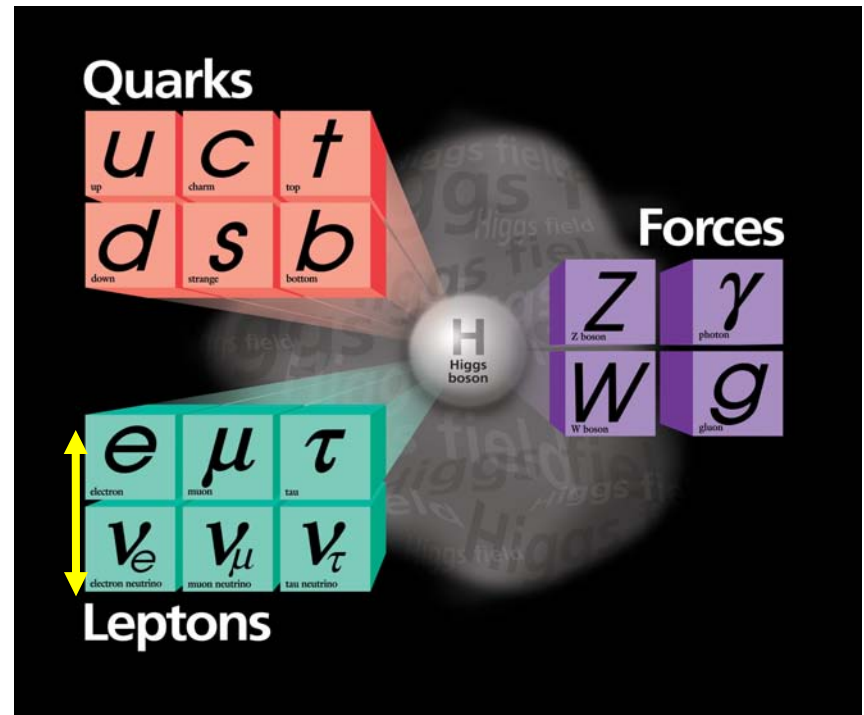
l. barionowa $B=1/3$

Leptony (wszystkie) :

l. leptonowa $L = 1$

Antykwarki $B= -1/3$

antyleptony $L= - 1$



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

Kwarki: indywidualne zapachy

Pierwsza rodzina

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

Siły elektromagnetyczne e-m – nośnikiem foton.

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

Np.. Oczywiście istnieje też pierwsza antyrodzina

Ale co definiuje rodzinę ?

Oddziaływanie słabe, odpowiedzialne za rozpad beta

Oddziaływanie słabe

- Cząstki u i d , antyneutrino elektronowe i elektron występują w parach np. w rozpadzie neutronu, za co są odpowiedzialne siły zwane słabymi
- Bozony oddz. słabych – odpowiedniki fotonu dla oddz. e-m

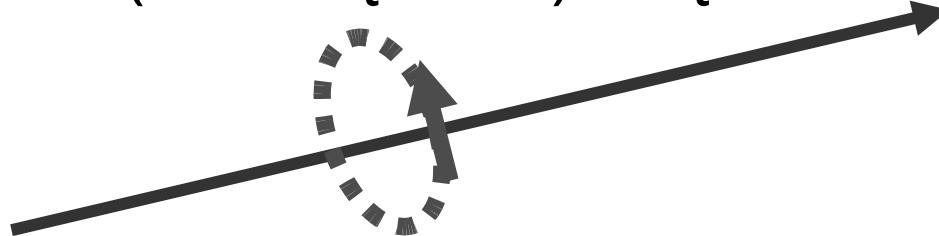
więcej na następnym wykładzie

Rodziny i cząstki przenoszące oddziaływania

- Kwarki i leptony – spin $\frac{1}{2}$
pierwsza rodzina: kwarki u, d i leptony e, ν_e ,
druga rodzina: kwarki c, s i leptony μ, ν_μ
trzecia rodzina: kwarki t, b i leptony τ, ν_τ
- Cząstki oddziaływań – foton, gluony, bozony
oddziaływań słabych- spin 1
- Spin 0?? – cząstka Higgsa?

Lewe i prawe cząstki o spinie $1/2$

- Lewa (lewo-ręczna) cząstka pęd



(left-handed)

Ale to jest może być 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 (?)

W Modelu Standardowym – masa $\nu = 0$

- Neutrino – cząstka lewa
 - Antyneutrino – cząstka prawa
-
- Ale ostatnie doświadczenia wskazują, że neutrina mają niezerową masę
 - Model Standardowy wymaga modyfikacji
- więcej o tym później*

3 generacje (rodziny) - uwagi

- Czy są dalsze rodziny?
Doświadczenie: raczej nie, o ile neutrino lekkie.
Teoria: ?
- To tablica cząstek fundamentalnych
generacje uporządkowane ze względu na masy
I- najmniejsze masy, III- największe,
ale bez głębszej zasady – inaczej niż dla tablicy
Mendelejewa
- Skąd te masy?
Nie wiemy – mechanizm Higgsa?

Life, ^{much} of the Universe, ^{but} not everything

Stable (ordinary) matter

- up-quark (charge $+2/3$)
- down-quark (charge $-1/3$)
- electron (charge -1)
- neutrino (no charge and $\approx$ zero mass)



proton



neutron

what is the neutrino needed for ??

The Ghostly Neutrino

- goes through almost everything
- "impossible" to stop/detect
- the "smallest" of the particles
- the first fossil in the Universe
- Messenger from the earliest Processes in the Universe
- determines the Expansion Rate of the Universe: Abundance of the first (light) Elements
- essential in cooking the Heavy Elements needed for Life
- Neutrino astronomy looks "inside" the Sun and Supernovae

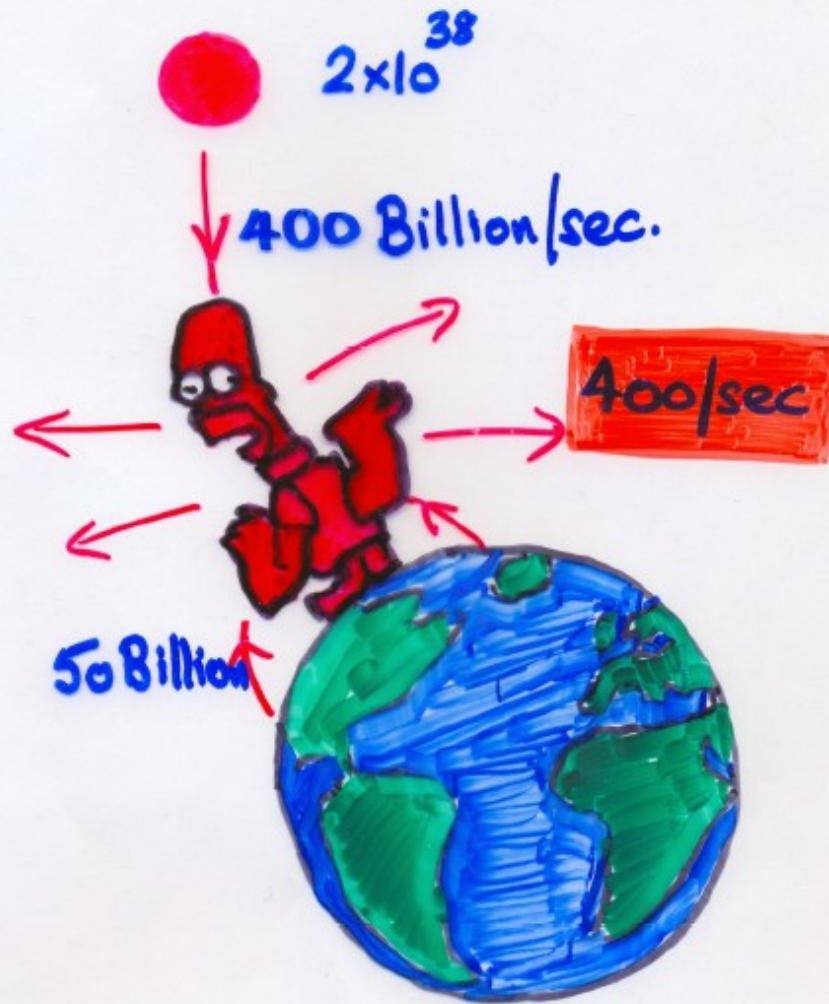
SOME NEUTRINO STATISTICS

each second :

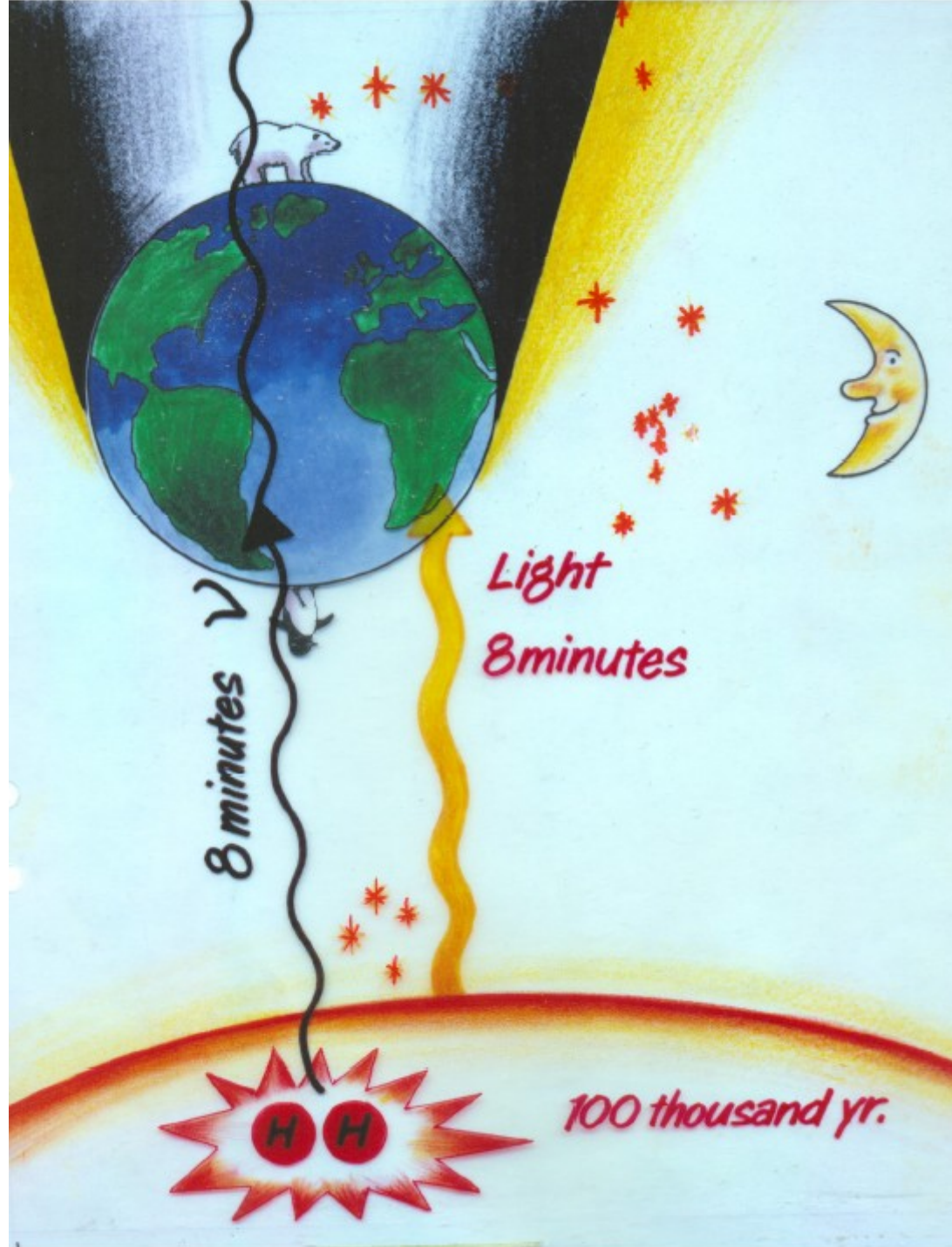


SOME NEUTRINO STATISTICS

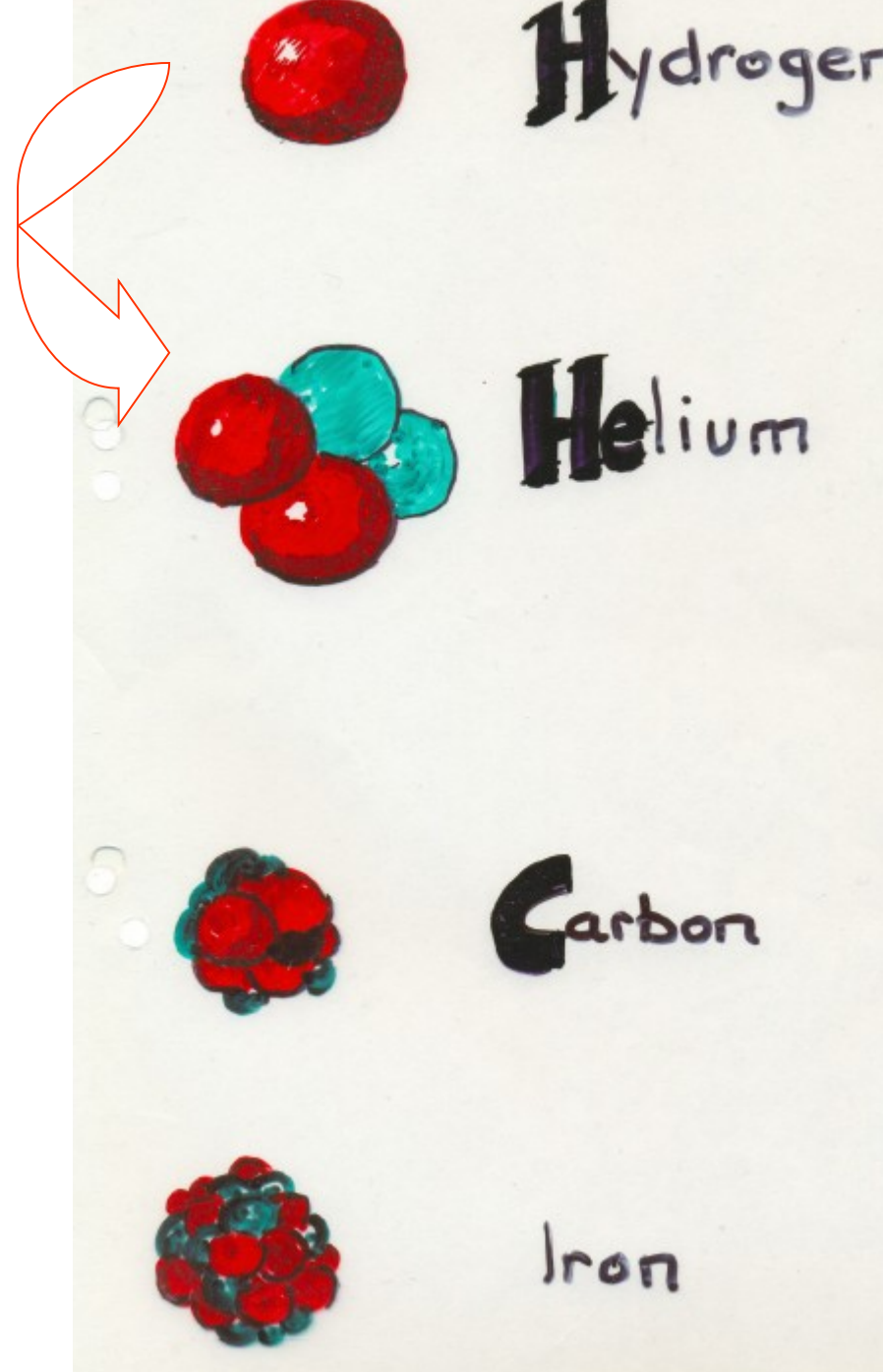
each second:



1 hr. x this audience $\Rightarrow$ 100 million neutrinos



STRONG



At the heart of the Sun:



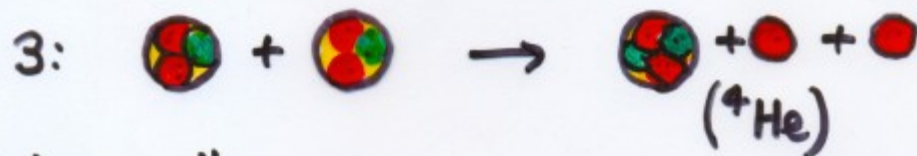
 **Proton**

 **neutron**

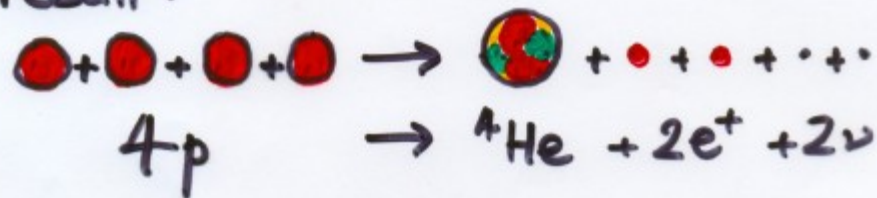
 **positron**

 **neutrino**

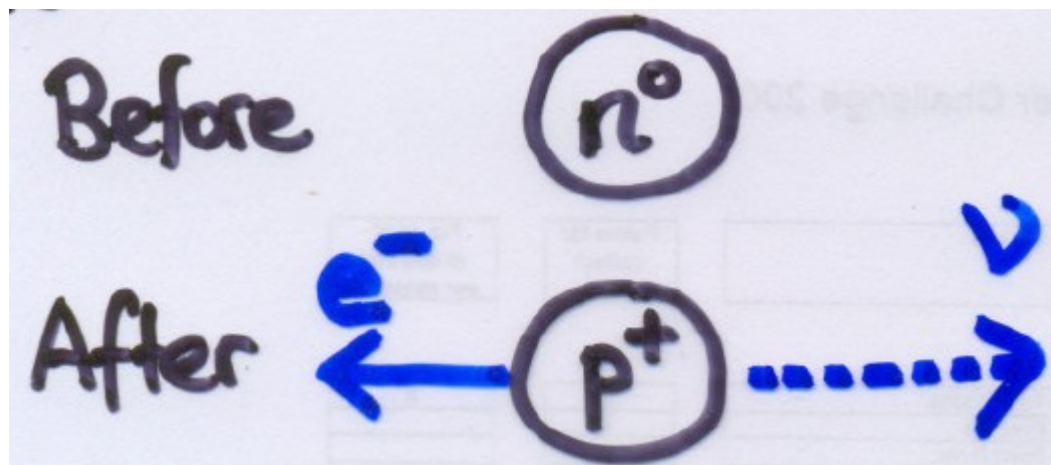
 $\swarrow$ deuteron



Net result:

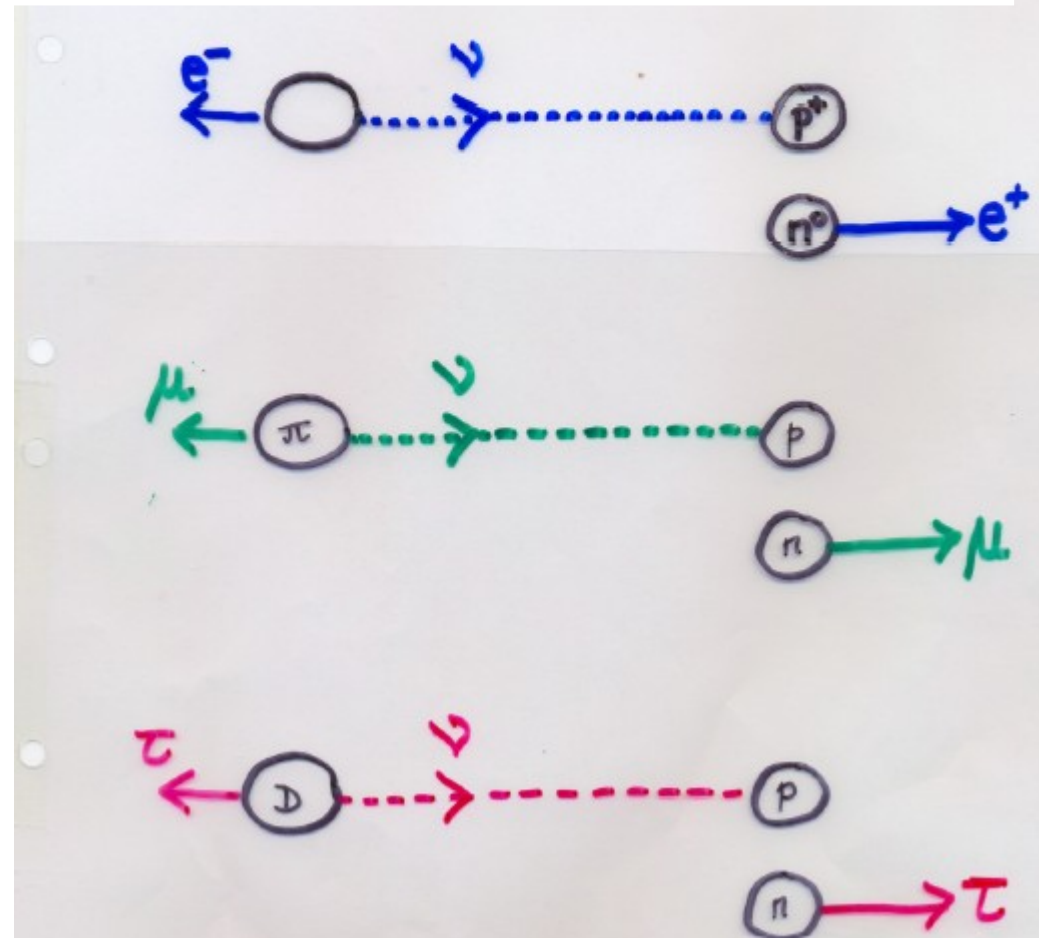
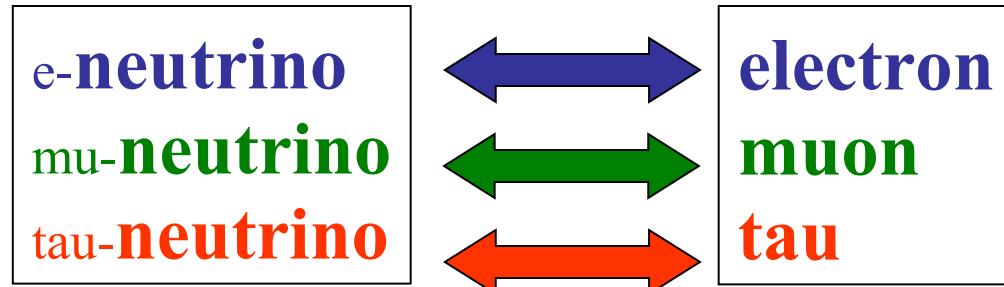


Rozpad neutronu

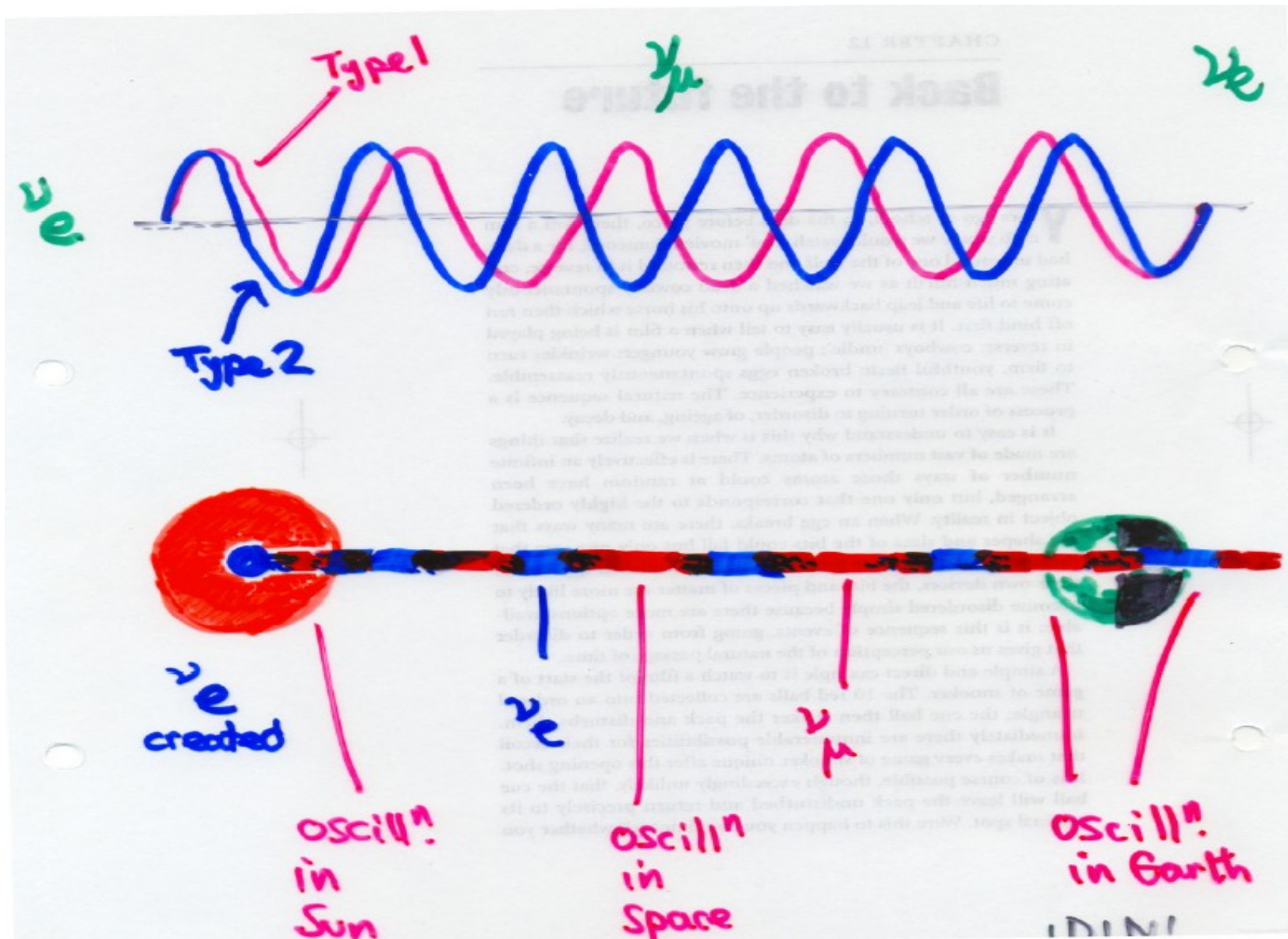


Skąd wiemy, że neutrino powstało?

Neutrino (dokładnie antyneutrino) uderza nukleony po drodze i przekształca się w naładowany lepton, który jest rejestrowany



Ale jeśli neutrino masywne , to mogą oscylować



BUT! If ν have mass

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ can oscillate back + forth

$$\text{"wavelength"} L \sim \frac{\text{Energy of } \nu}{m_1^2 - m_2^2} \equiv \frac{E}{\Delta m^2}$$

Probability $a \rightarrow b$

$$\sim \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 (\text{eV})^2 L (\text{km})}{E (\text{GeV})} \right)$$

$$\text{Probability } a \rightarrow a = 1 - \sin^2(\dots)$$

a disappears b appears

$$\Delta m^2 \lesssim 10^{-N}$$

$\therefore$ Need large L at high E

e.g. CERN to Gran Sasso Italy

Oscylacje neutrin

Wiązki neutrin powstałych w reakcjach jądrowych w różnych laboratoriach (CERN, Fermilab, KEK)

Pomiar intensywności w pobliżu laboratorium
I setki km dalej

Ewidencja znikania neutrin pewnego typu z wiązki

Więcej na następnych wykładach

Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 5

18.III.2009

Oddziaływania
grawitacyjne

elektromagnetyczne
słabe i silne

Dziś: wstęp, oddziaływania e-m i silne

Pytania egzaminacyjne

<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/wce08.html>

Na egzaminie wolno korzystać TYLKO z własnoręcznych notatek i kopii materiałów z wykładów.

Przygotujemy czarno-białą wersję wykładów

Kilka kopii materiałów będzie dostępnych na egzaminie oraz dwa notebooki z wykładem w wersji kolorowej

Przykłady pytań testowych

Kiedy powstała fizyka cząstek elementarnych ?

Ile jest cząstek elementarnych a ile fundamentalnych?

Ile jest generacji cząstek?

Podaj szacunkowe rozmiary atomów i jąder atomowych.

O ile mniejsze jest jądro od atomu np.dla złota?

Doświadczenie Rutherforda - na czym polegało?

Ile wynosi ładunek elektryczny atomu? A ile jądra atomowego?

Z czego zbudowany jest atom wodoru, deuteru, helu?

Co to jest nukleon?

Z jakich kwarków zbudowany jest proton, a z jakich neutron?

Wypisz 10 cząstek fundamentalnych i 10 elementarnych, złożonych z cząstek fundamentalnych.

Wypisz cząstki z pierwszej generacji.

Czego dotyczyły hipoteza Plancka i hipoteza Einsteina?

Światło widzialne ma większą czy mniejszą energię niż fale radiowe?

Kiedy odkryto pozyton?

Jaka jest masa pozytonu?

Jaka cząstka jest antycząstką fotonu?

Cztery podstawowe siły

Oddziaływanie grawitacyjne

Działa między wszystkimi cząstkami, jest to zawsze przyciąganie. Odpowiedzialne za tworzenie Układu Słonecznego, galaktyk itp.

Oddziaływanie elektromagnetyczne

Ładunki elektryczne mogą się odpychać lub przyciągać. Odpowiedzialne za tworzenie wiązań atomowych.

Oddziaływanie silne (jądrowe i kolorowe)

Siły jądrowe działają między nukleonami – przyciąganie; odpowiedzialne za tworzenie jąder atomowych. Wewnątrz nukleonów i innych hadronów (cząstek oddziałujących silnie) - kwarki i

Cztery podstawowe siły- cd

Oddziaływanie silne (jądrowe i kolorowe) powtórzenie

Siły jądrowe działają między nukleonami – przyciąganie; odpowiedzialne za tworzenie jąder atomowych. Wewnątrz nukleonów i innych hadronów (cząstek oddziałujących silnie - kwarki i siły kolorowe między nimi).

Oddziaływanie słabe (elementarne i fundam.)

Rozpady promieniotwórcze niektórych jąder
np. rozpad neutronu na p i antyneutrino el.
Na poziomie fundamentalnym realizowane między kwarkami, we współpracy z oddziaływaniem e-m (oddz. elektroslabe)

Te dwie siły jedynie w mikroświecie i na dwóch

Stałe fundamentalne:

c – fizyka relatywistyczna

prędkość światła

$\hbar$ – fizyka kwantowa

stała Plancka $h/2\pi$

G – grawitacja

stała grawitacyjna
(Newtona)

Wielkości charakterystyczne

Ładunek elektryczny e

Wielkość ($e^2/\hbar c = 1/137$) – α

(stała struktury subtelnej)

ważna w relatywistycznej, kwantowej teorii

ładunku elektrycznego

Elektrodynamika kwantowa (lata 20-30 XXw)

α - miarą siły oddziaływania (sprzeżenia)

elektronów i fotonów (prom. e-m)

Grawitacja i elektromagnetyzm

- znane w makroświecie

Oddziaływania elektromagnetyczne są znacznie silniejsze – więc dlaczego grawitację znano wcześniej??

W dużych ciałach ładunki elektryczne się znoszą – zaś grawitacja się wzmacnia...

Siła przyciągania dwóch ładunków elektrycznych, np. dla protonu i elektronu w atomie wodoru

$$F_{\text{el}} = e^2 / r^2 \quad \text{zaś} \quad F_{\text{gr}} = G M m / r^2$$

Stosunek tych sił $GMm/e^2 = 10^{-40}$

Grawitacja - skala Plancka

- Zaniedbujemy grawitację dla pojedynczych cząstek elementarnych i przy obecnych energiach
- Kiedy może być ważna w mikroświecie?
Z G , h i c możemy utworzyć wielkości o wymiarze energii i długości $\rightarrow$

Skala Plancka :

Długość 10^{-35} m, lub energia 10^{19} GeV

- Wtedy relatywistyczna, kwantowa grawitacja -



Introduction to Particle Physics (for non physics students)

3. FORCES

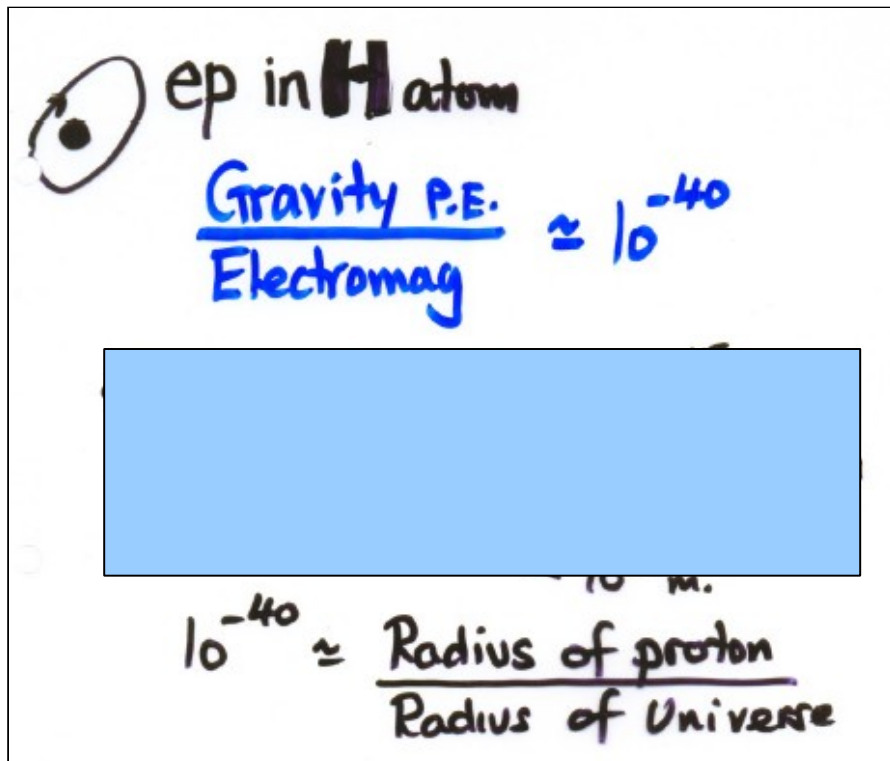


*PROFESSOR FRANK CLOSE
EXETER COLLEGE
UNIVERSITY OF OXFORD*

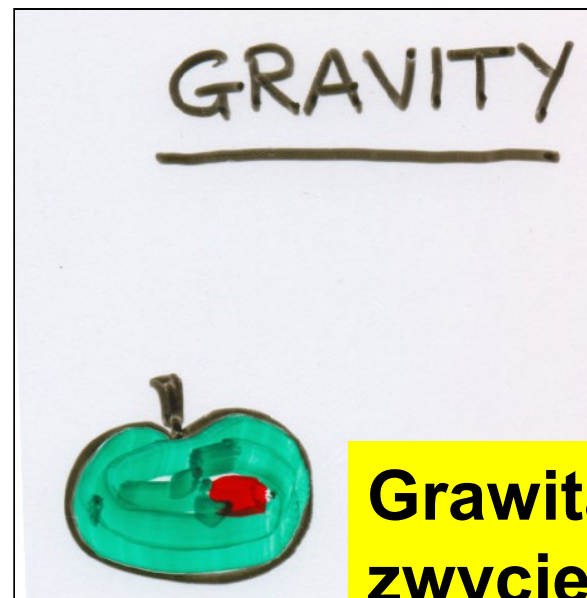


SIŁY – czyli oddziaływania:

grawitacyjne
elektromagnetyczne, słabe, silne

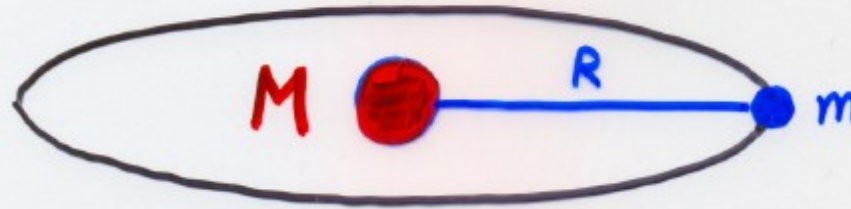


Zaniedbujemy grawitację dla pojedynczych cząstek elementarnych i przy obecnie dostępnych energiach



Grawitacja zwycięża dla dużych ciał i dostarcza zagadek, które mogą się wiązać z cząstkami

Prędkość ciała o masie m w ruchu wywołanym przyciąganiem grawitacyjnym wokół masy M

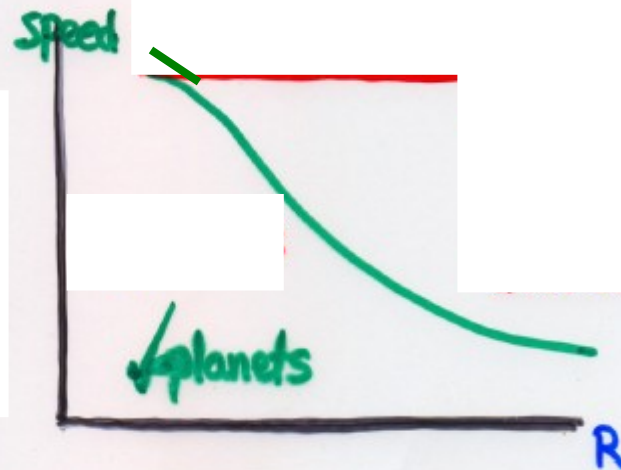


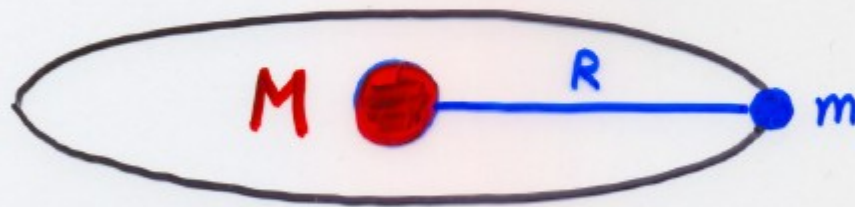
Newton: $F = G \frac{M m}{R^2} = \frac{m v^2}{R}$

➔ $v^2 = \frac{GM}{R}$

Speed goes down as $\sqrt{R}$

Prędkość maleje gdy promień R rośnie

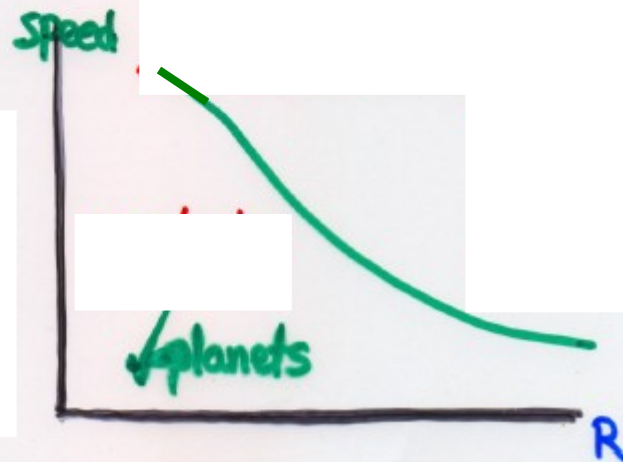




Newton: $F = G \frac{Mm}{R^2} = \frac{mv^2}{R}$

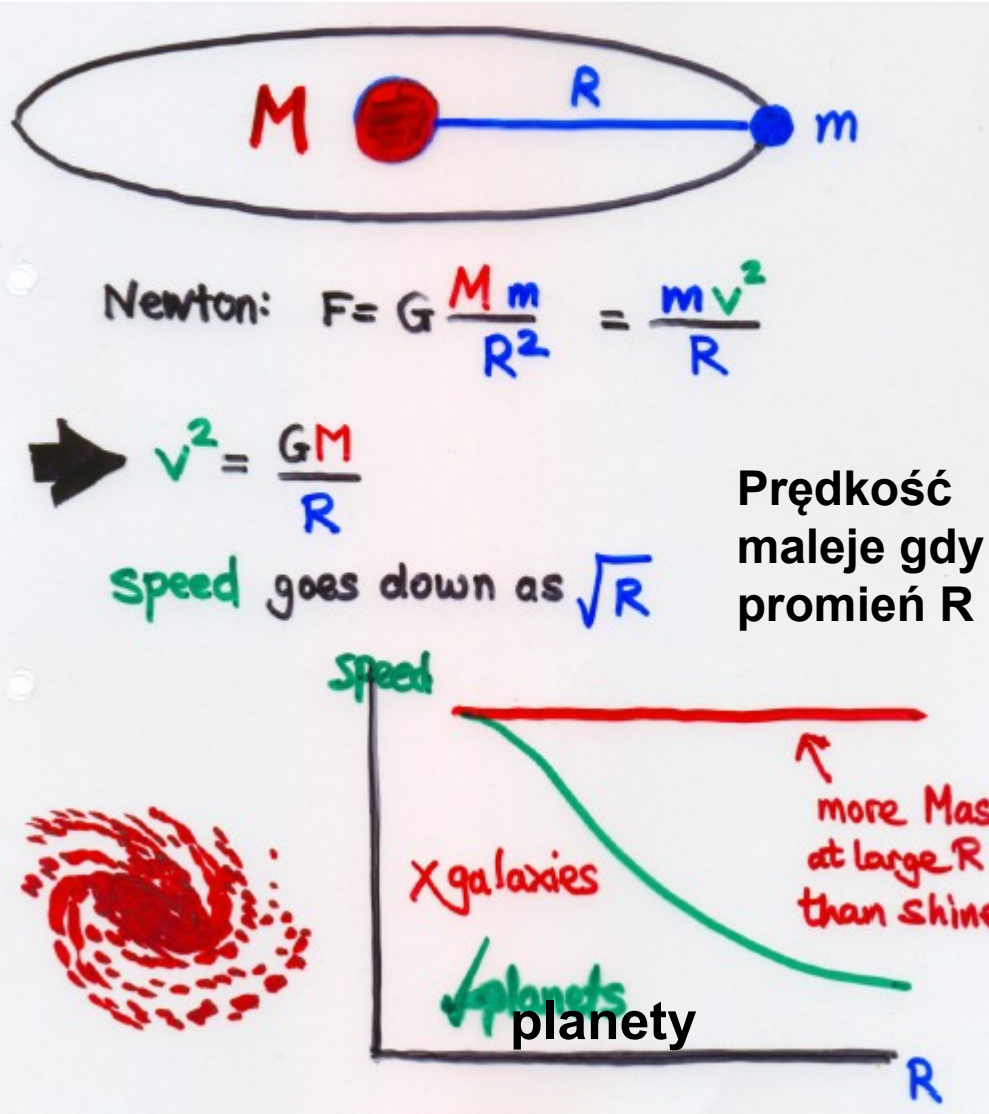
$\Rightarrow v^2 = \frac{GM}{R}$

Speed goes down as $\sqrt{R}$



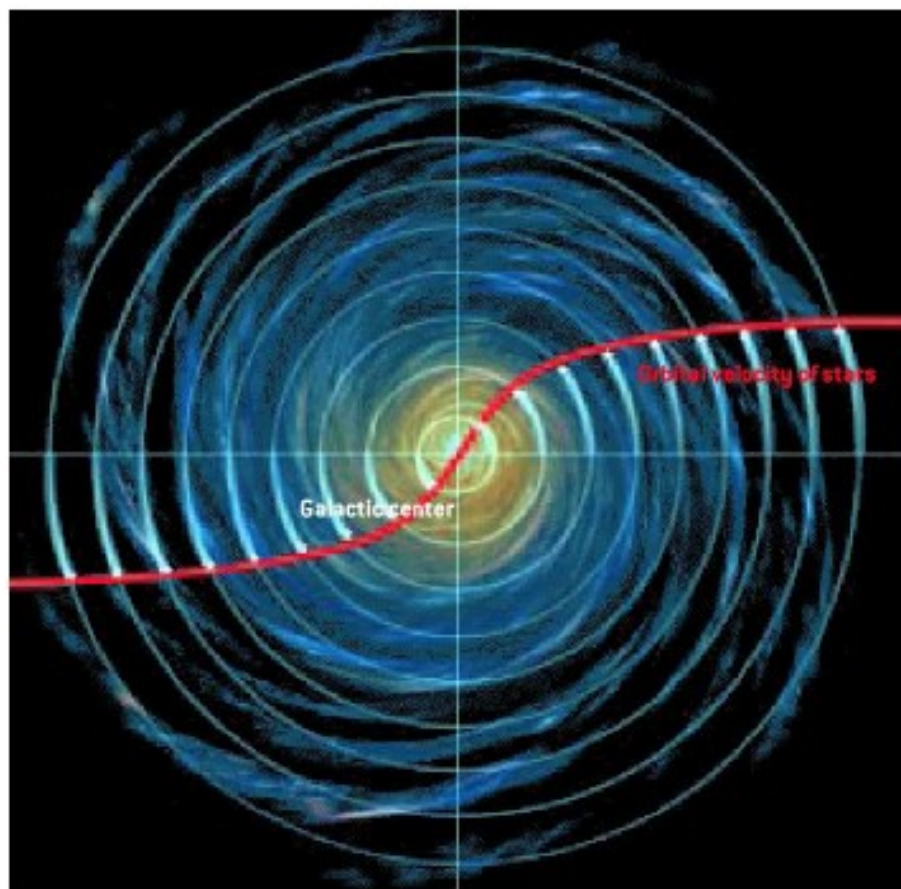
CIEMNA MATERIA

Prędkość w ruchu wywołanym
przyciąganiem grawitacyjnym wokół masy M

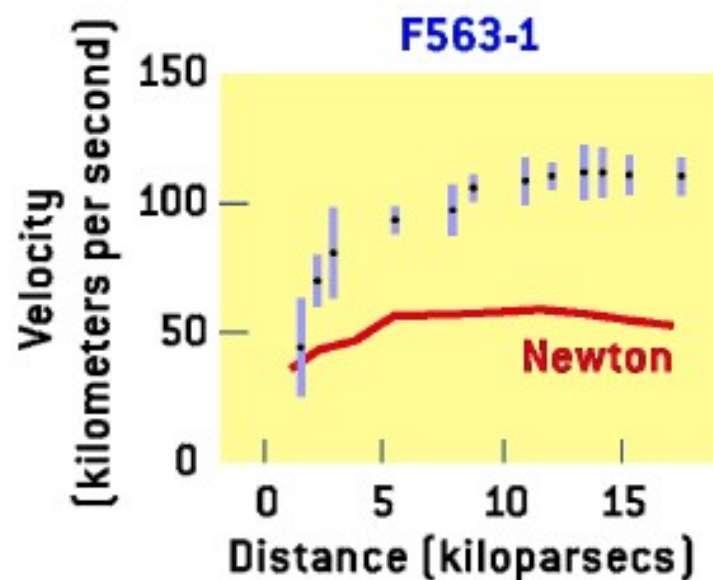


Więcej masy M
dla dużych R
niż świeci

Oddziaływania grawitacyjne



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.



Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

Co to jest ciemna materia?

- nie wiemy, ale powinna być

- neutralna elektrycznie**
- gorąca ciemna materia**
 - lekkie cząstki jak neutrina**
- zimna ciemna materia**
 - ciężkie cząstki**

więcej na następnych wykładach

Kolor i oddziaływania silne

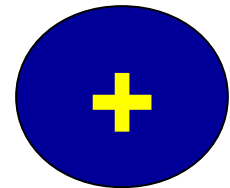
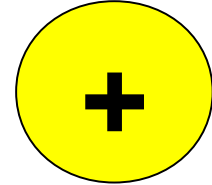
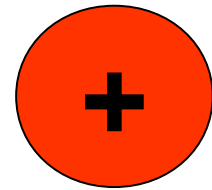


CHROMOSTATYKA

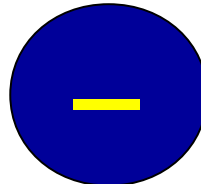
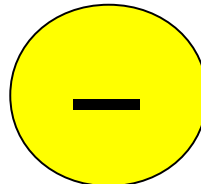
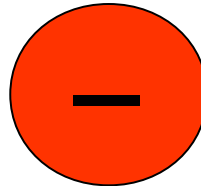
Jak elektrostatyka ale z 3 typami ładunków +/-

3 ładunki kolorowe

kwarki



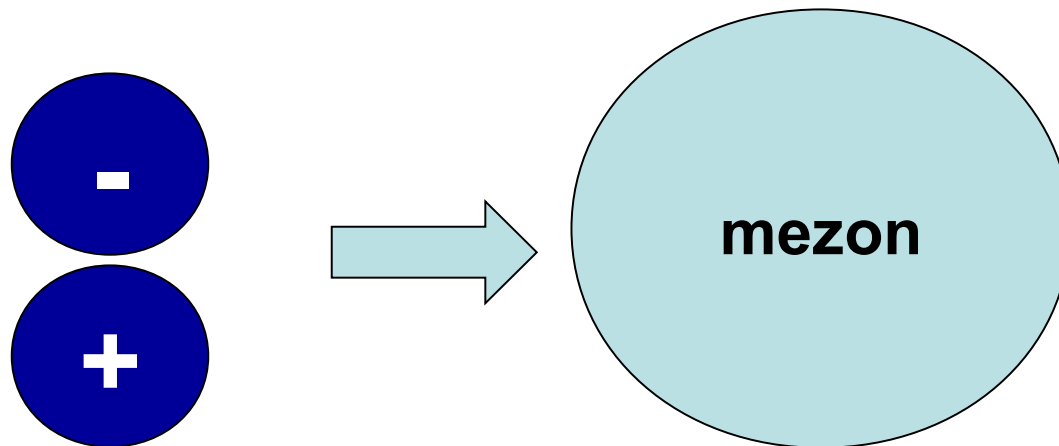
antykwarki



Znane reguły

**“Takie same kolory
się odpychają
przeciwnie - przyciągają”**

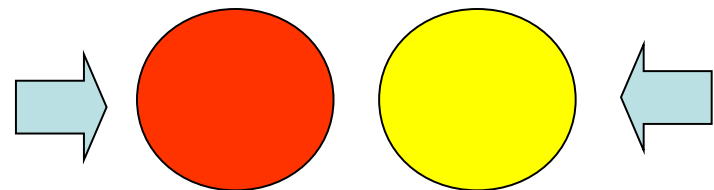
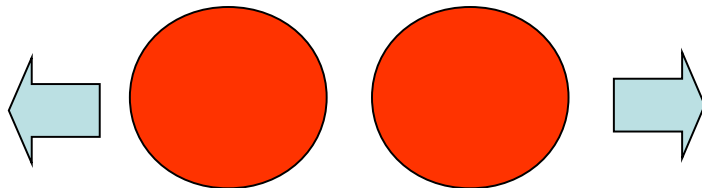
Najprostsza sytuacja: mezon

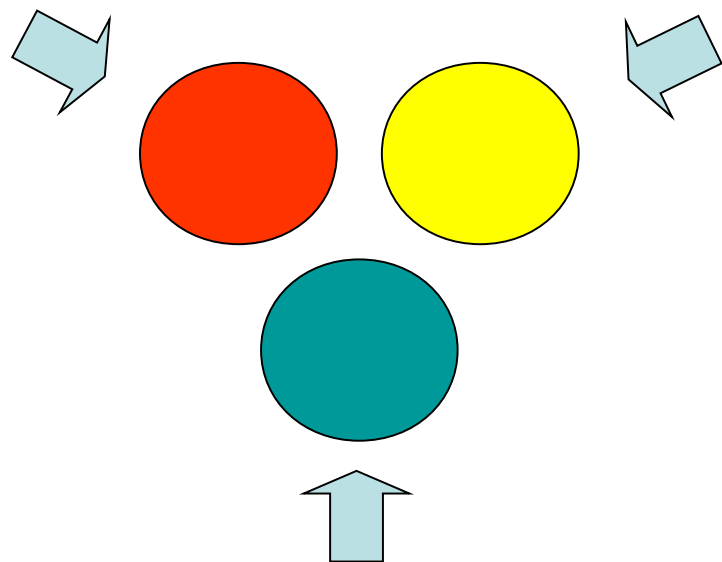


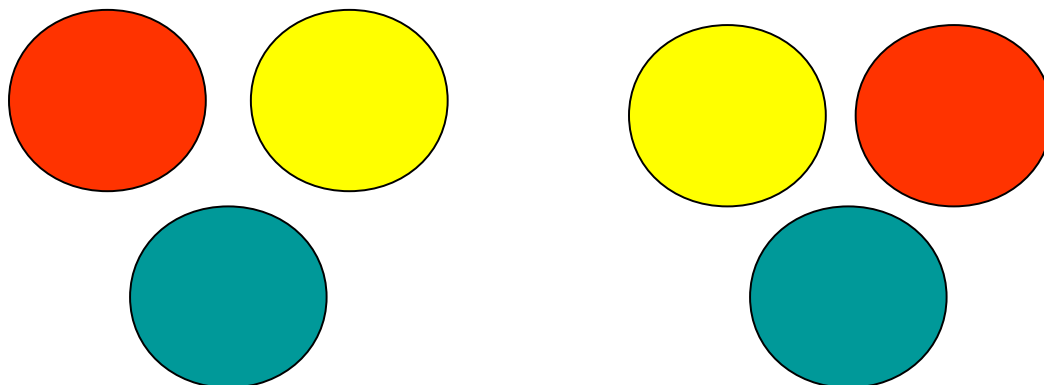
TRZY kolory

Potrzebne aby powstały bariony

(np. proton)

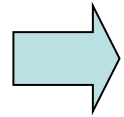




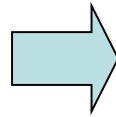


Proste jądro (deuter)

**Ładunek
elektryczny**

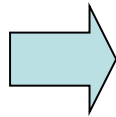


Atomy

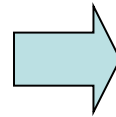


**Molekuły
(cząsteczki)**

**Ładunek
kolorowy**



Nukleony



Jądra

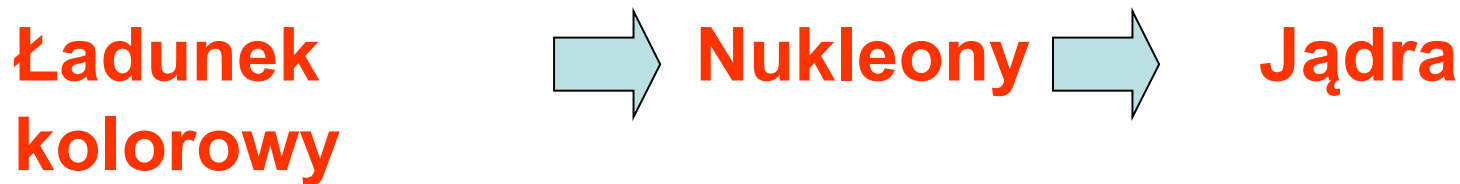
Elektrodynamika kwantowa

Quantum Electrodynamics: QED

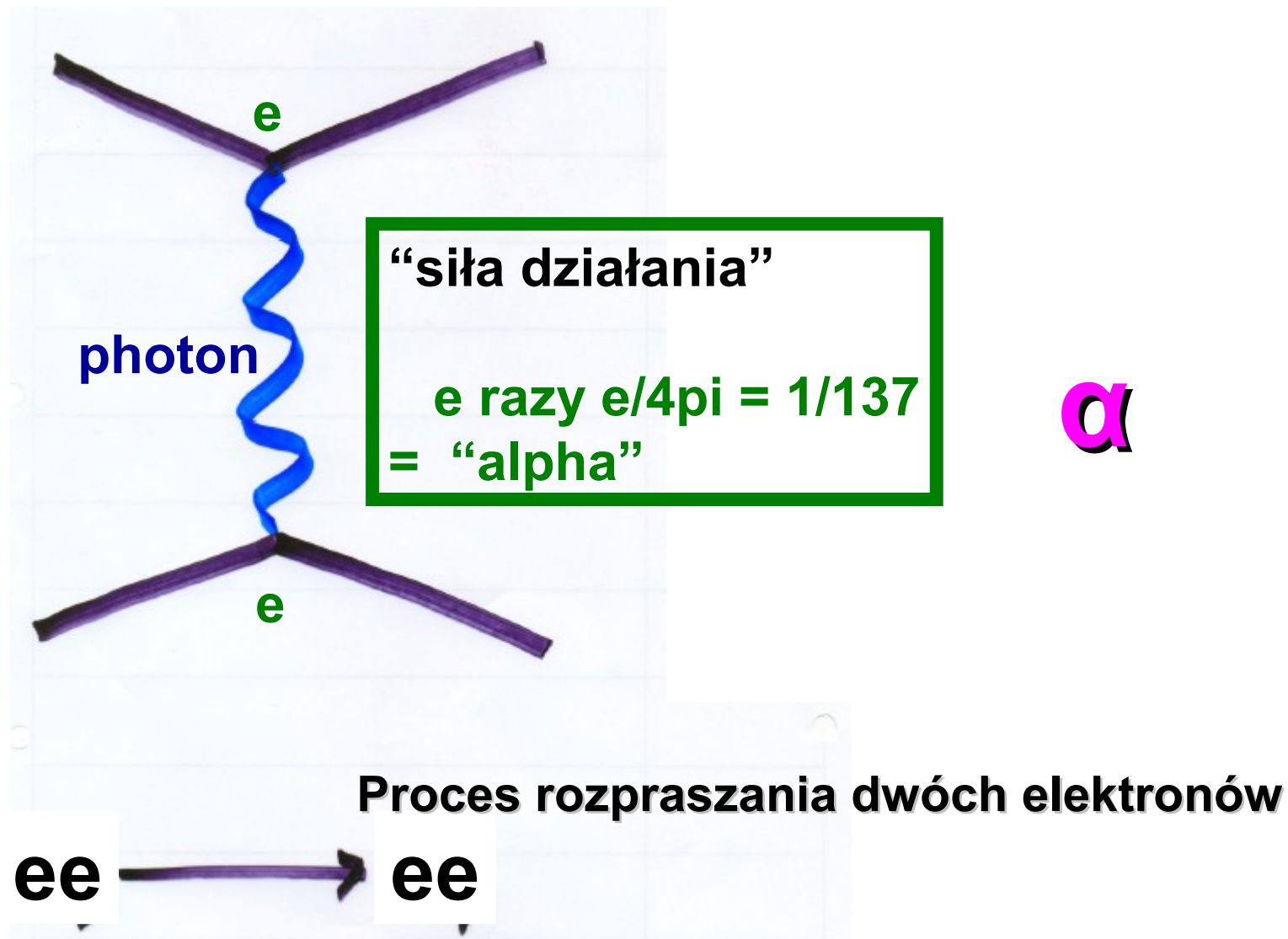


Chromodynamika kwantowa

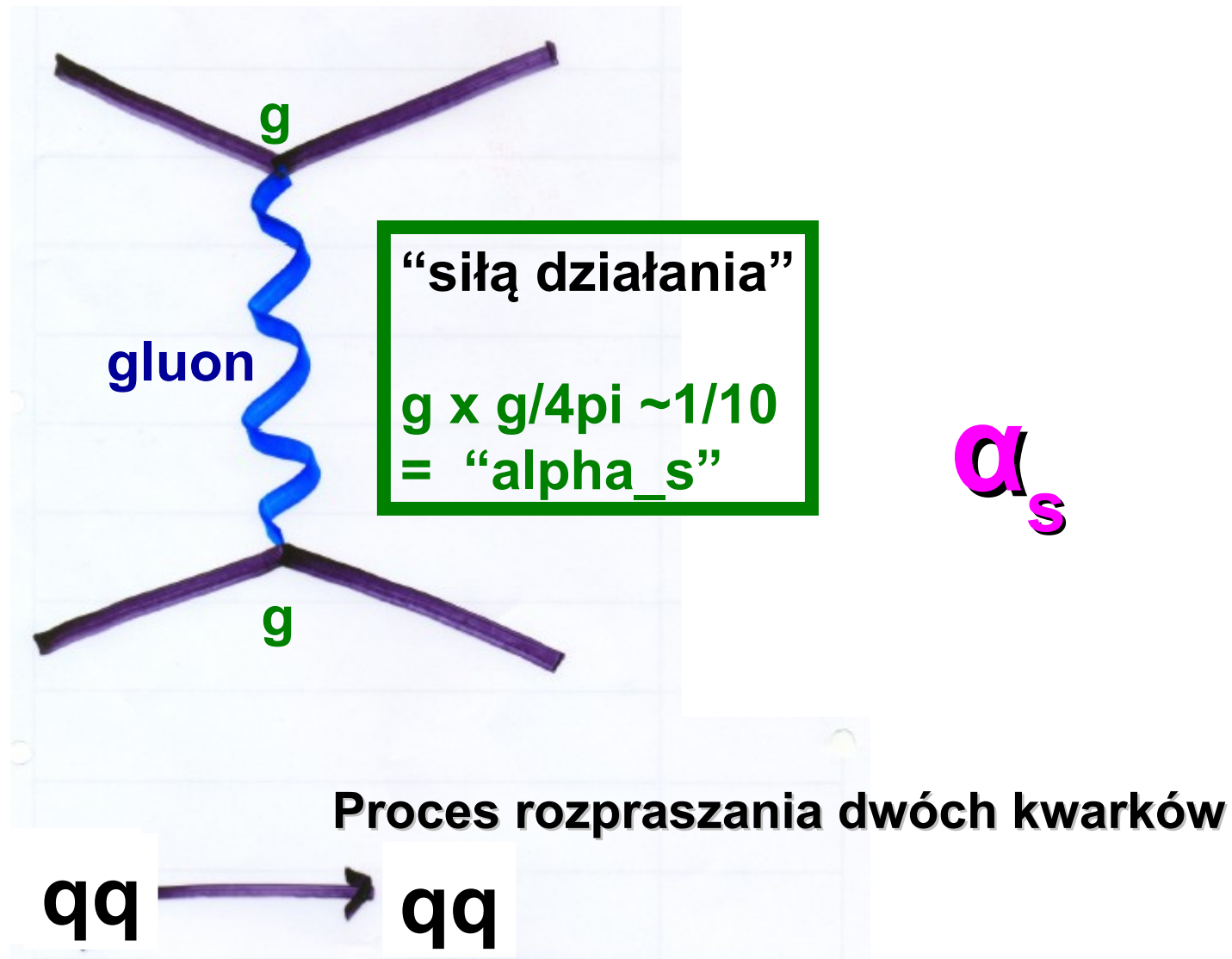
Quantum Chromodynamics: QCD



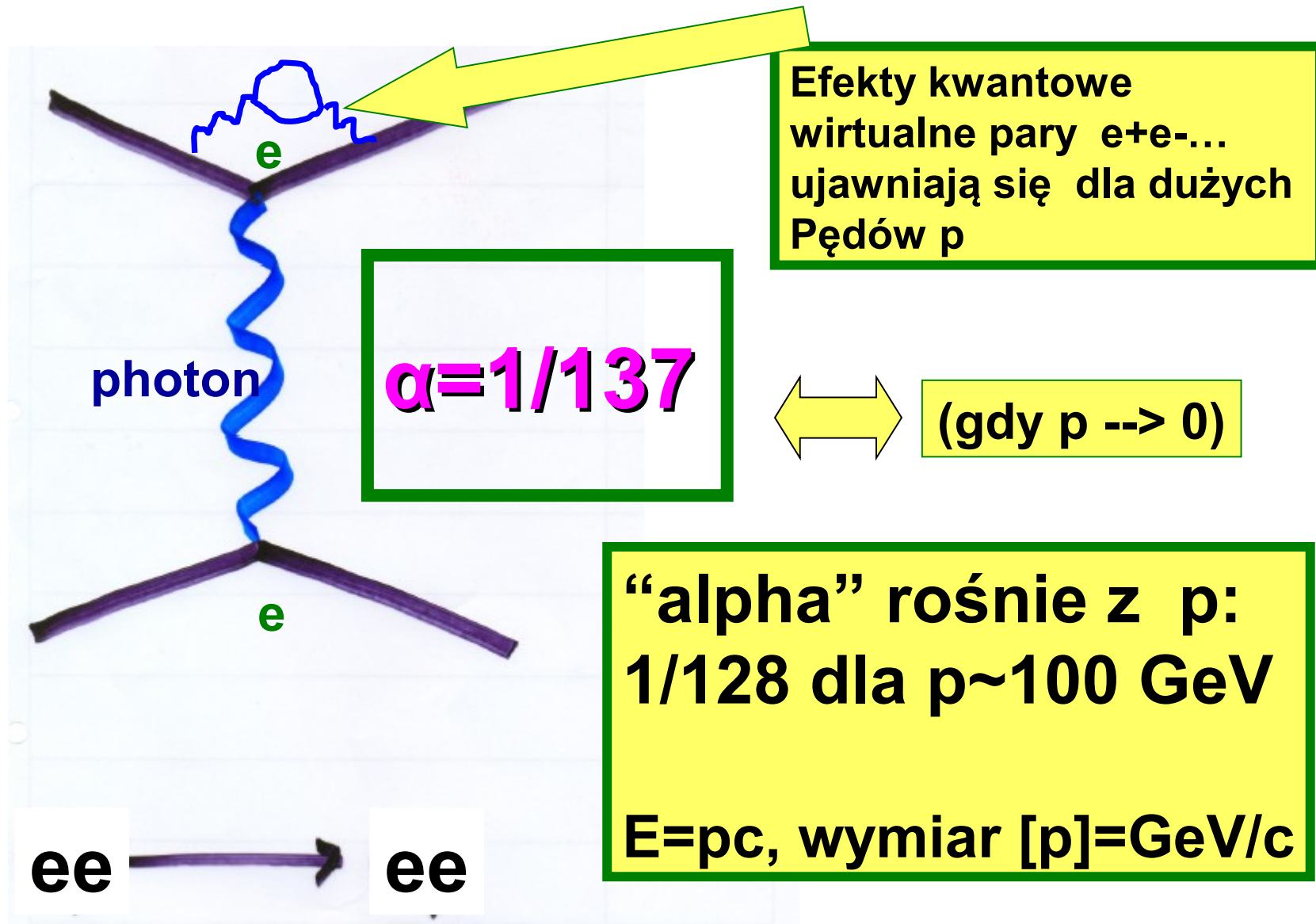
Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



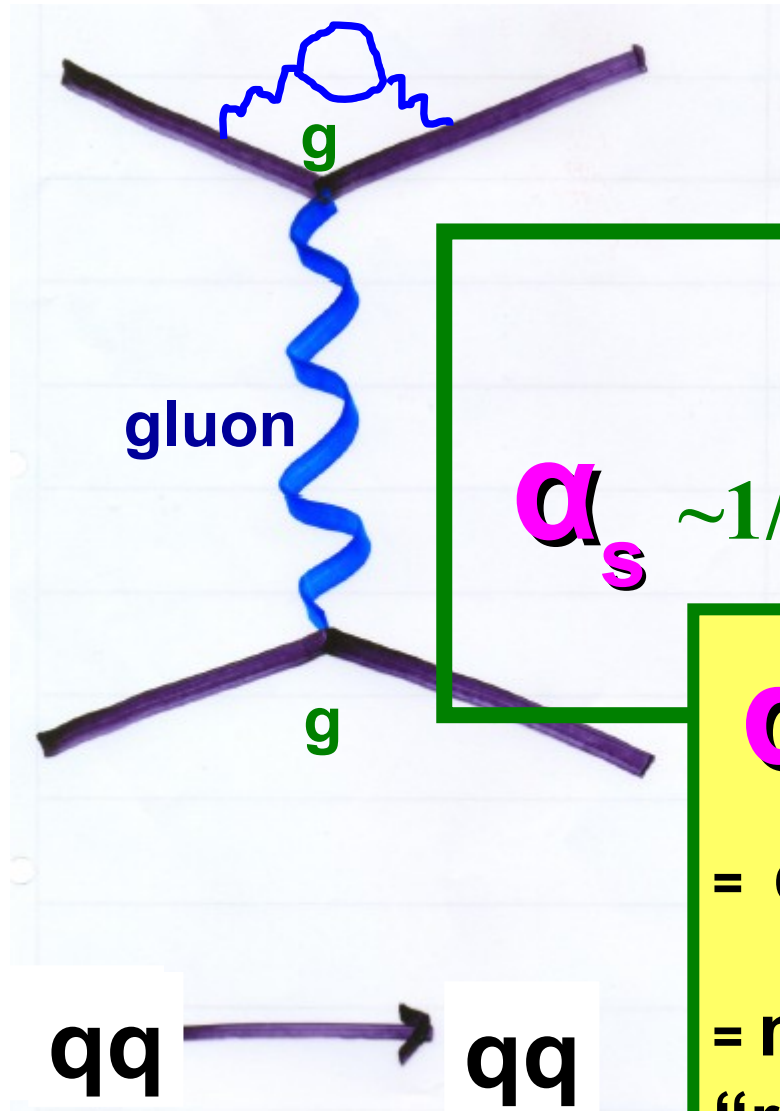
Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych



Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Feynman diagrams for chromomagnetic interaction



Jak w QED, w QCD



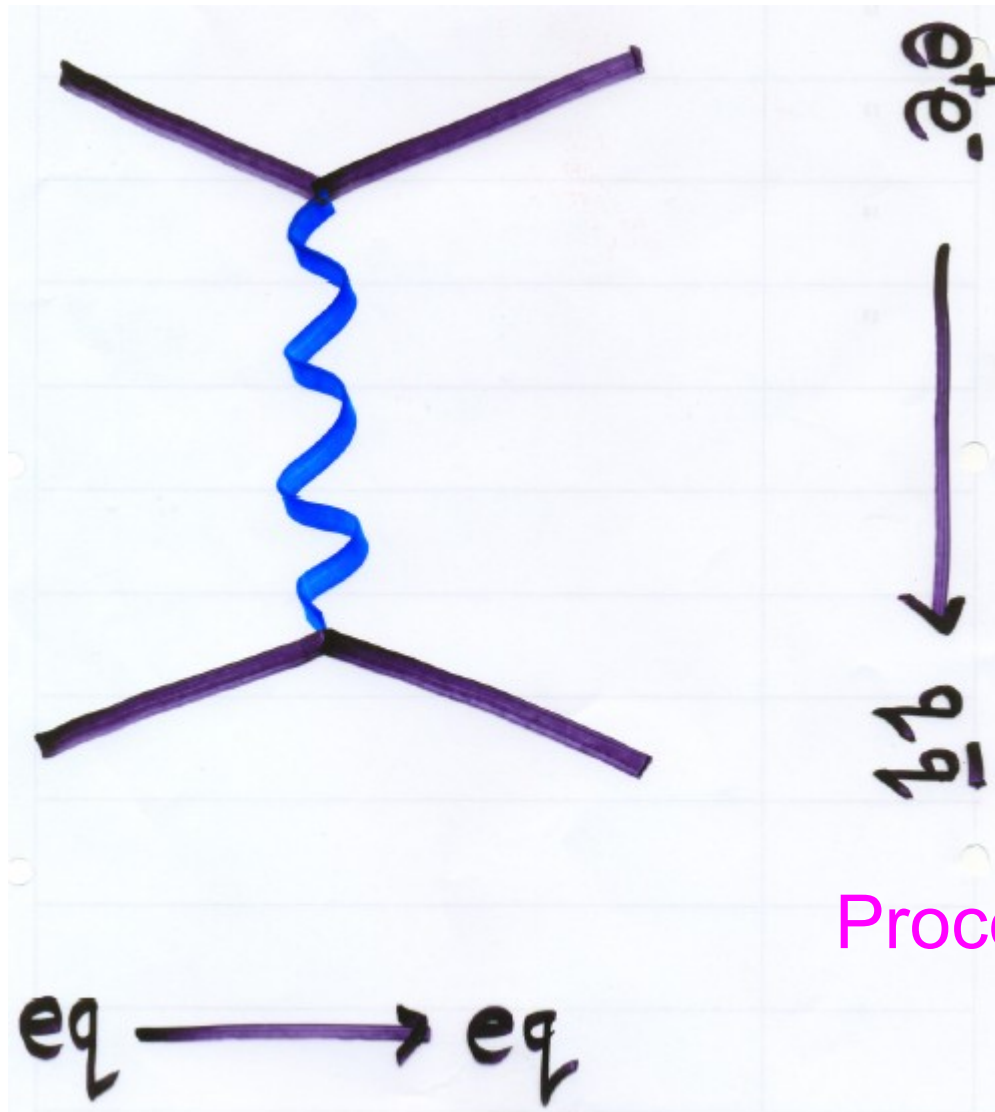
$$\alpha_s \sim 1/10$$

α_s maleje z p

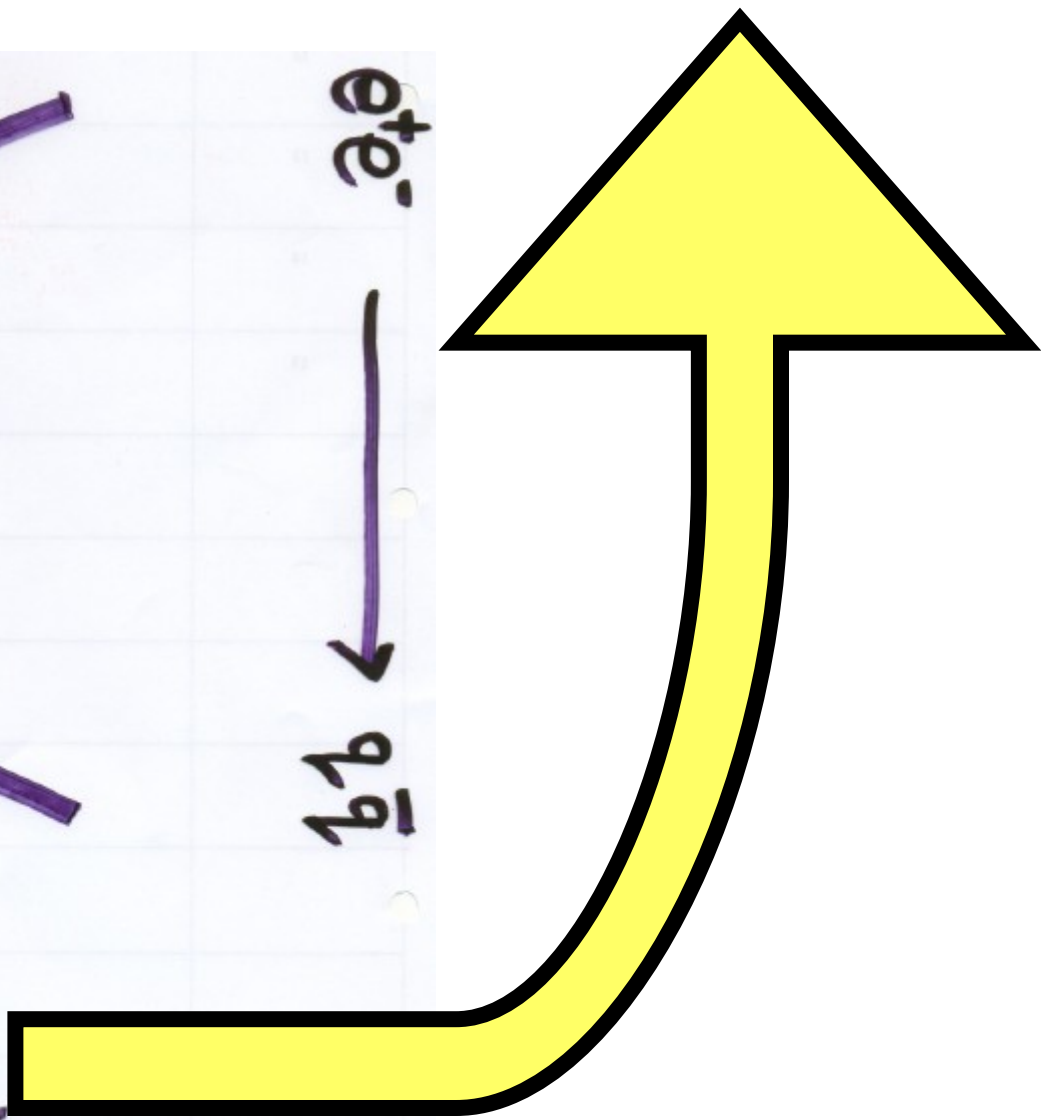
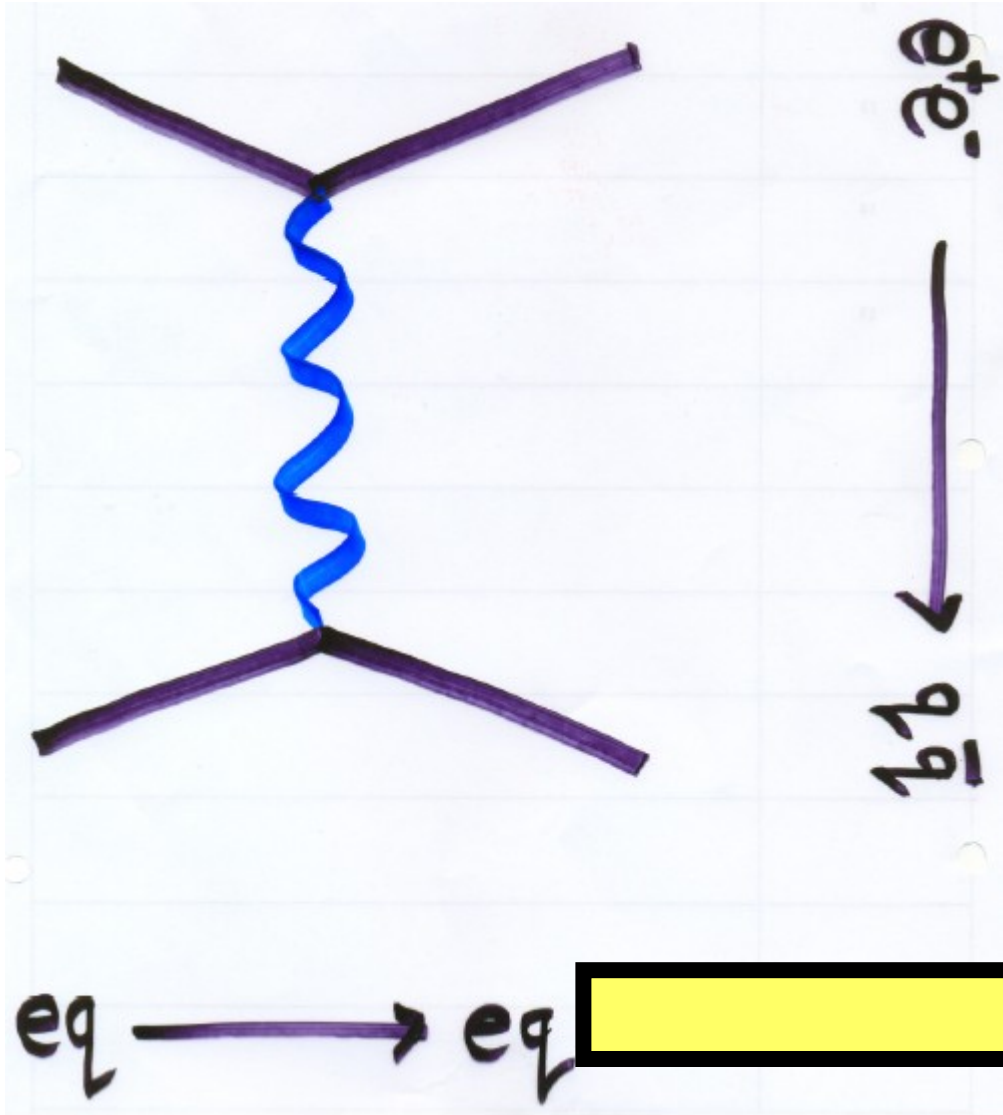
= duża dla małych p
SILNE ODDZIAŁYWANIA!

= mała dla dużych p
“rachunek zaburzeń QCD”

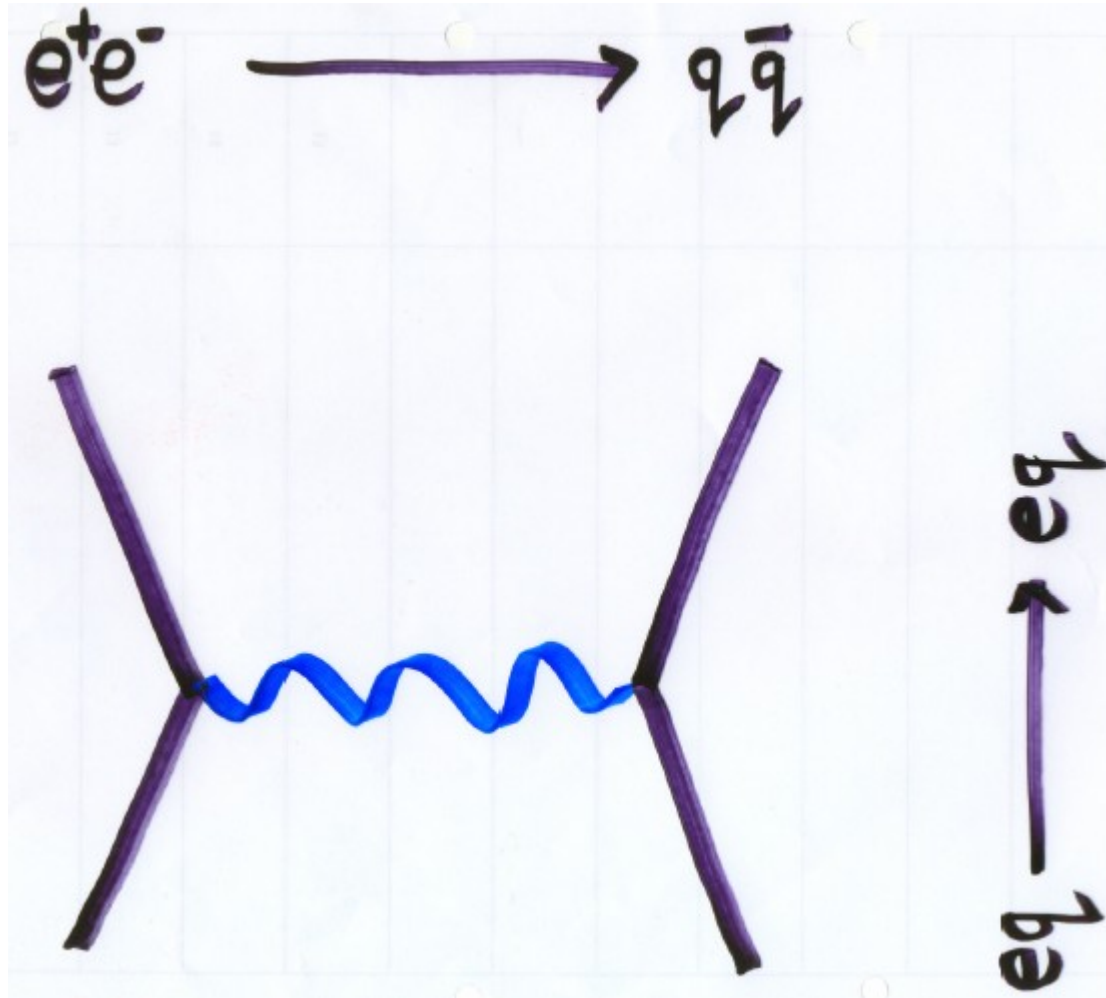
Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Procesy skrzyżowane

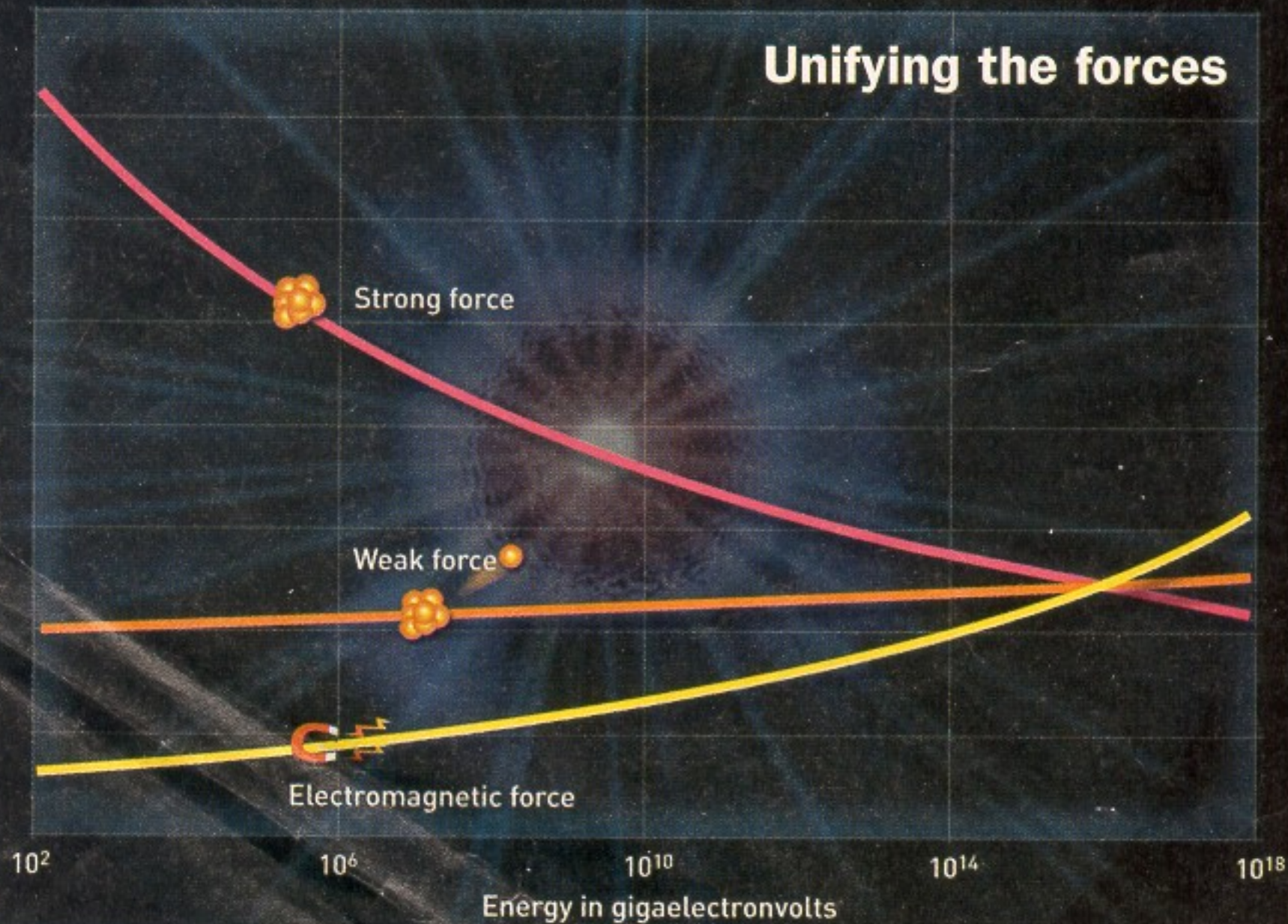


Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Unifying the forces

Force strength



Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 6

25.III.2009

Oddziaływania słabe

Cztery podstawowe siły

Oddziaływanie grawitacyjne

Oddziaływanie elektromagnetyczne

Oddziaływanie silne (jądrowe i kolorowe)

Siły jądrowe działają między nukleonami – przyciąganie; odpowiedzialne za tworzenie jąder atomowych. Wewnątrz nukleonów i innych hadronów (cząstek oddziałujących silnie) - kwarki i siły kolorowe między nimi.

Oddziaływanie słabe (elementarne i fundam.)

Rozpady promieniotwórcze niektórych jąder np. rozpad neutronu na p i antyneutrino el. Na poziomie fundamentalnym realizowane między kwarkami, we współpracy z oddziaływaniem e-m(oddz.elektrosłabe)

Siły -> oddziaływania fundamentalne

- Oddziaływania na poziomie fundamentalnym = emisja i pochłanianie bozonów (foton, W/Z, gluon, grawiton?)

Klasyfikacja: zasięg (z zasady Heisenberga $M \sim 1/x$)
grawitacyjne i elektromagnetyczne – zasięg nieskończony $\rightarrow$ masa fotonu (grawitonu?) = 0

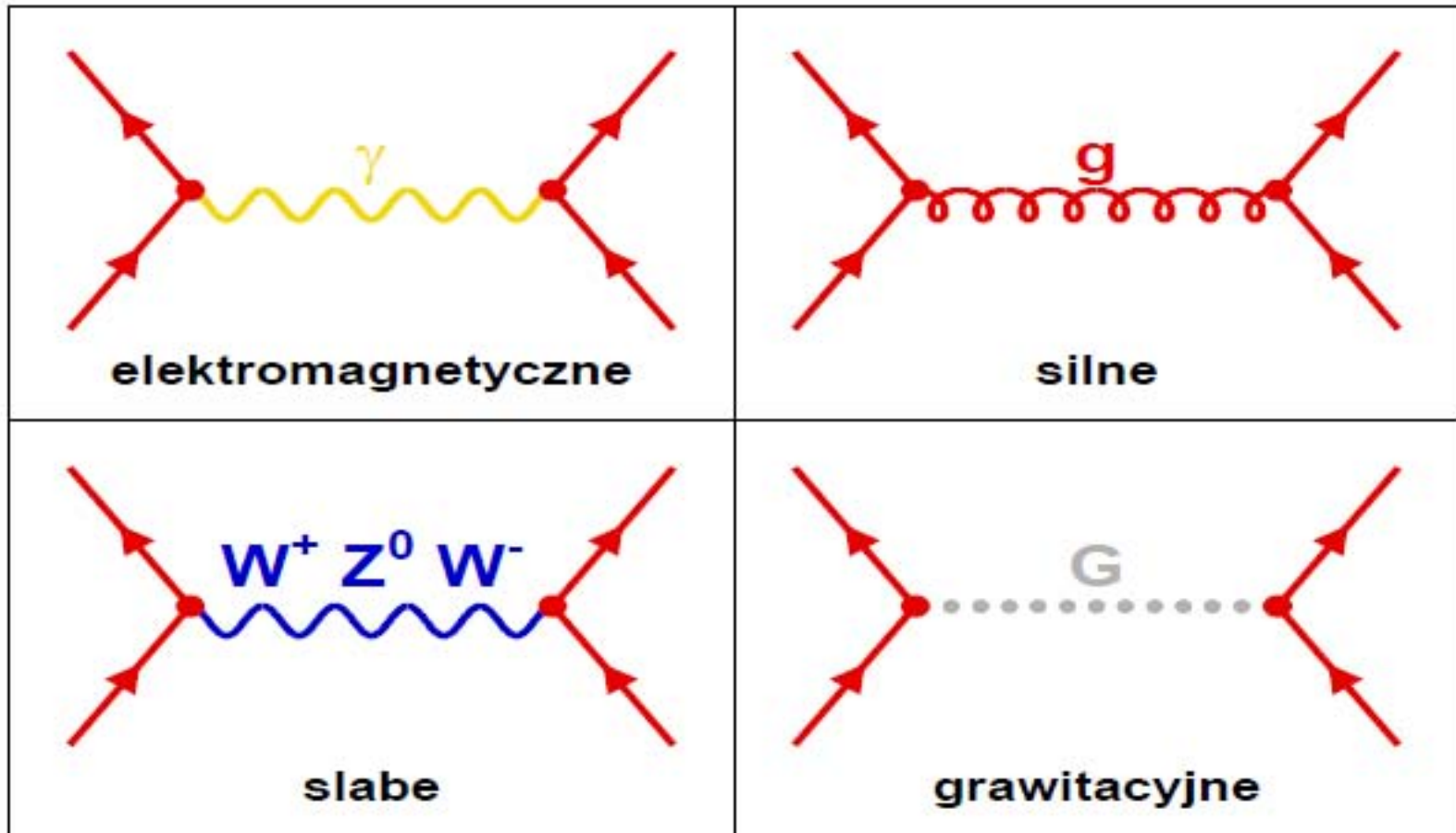
silne – zasięg rozmiar protonu 10^{-15} m (tu uwięzienie)

słabe – zasięg 10^{-18} m (masa nośników 80-90 GeV)

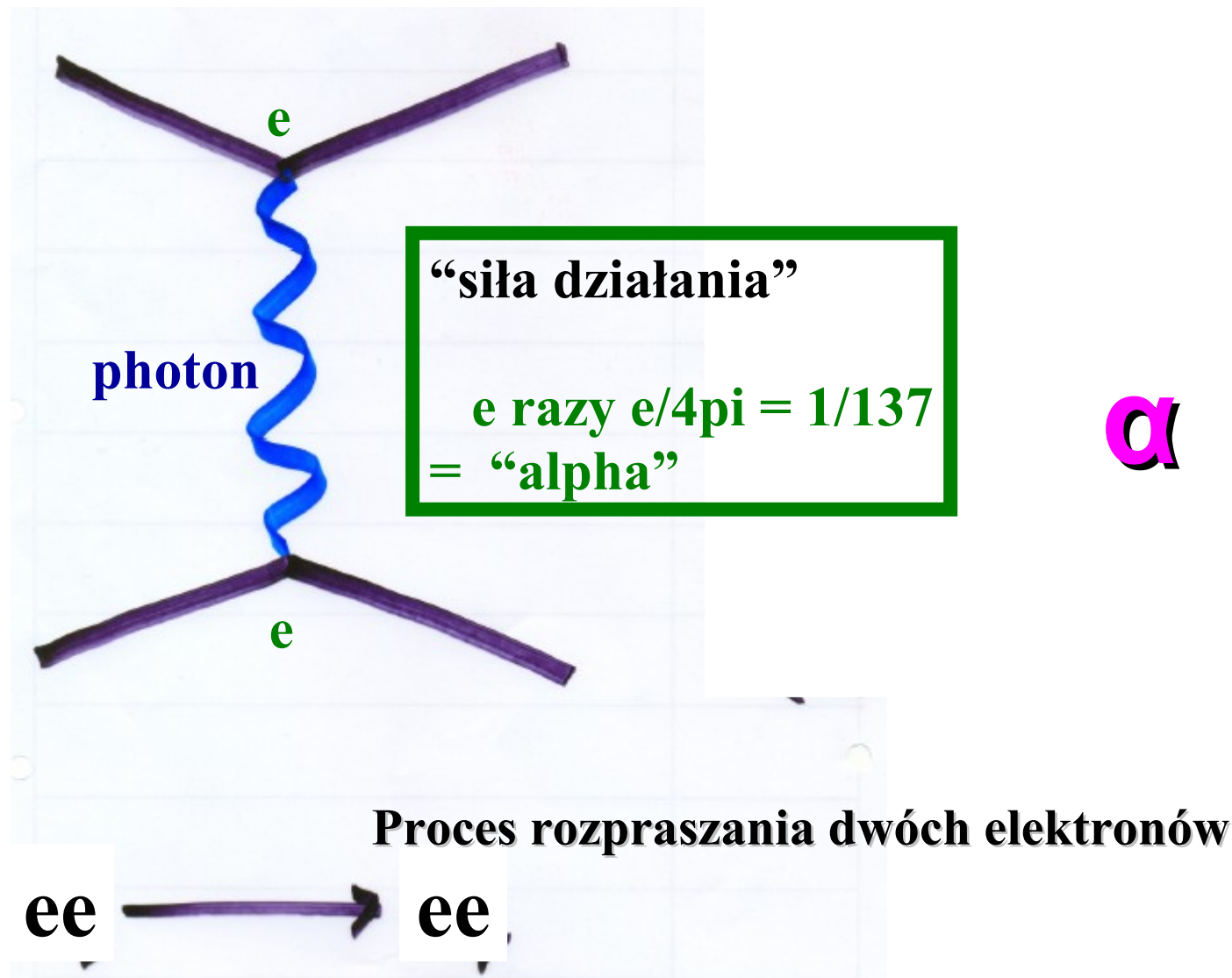
- Klasyfikacja: „siła” (strength) inaczej natężenie siły
- stałe sprzężenia α i α_s ...

Silne > elektromagnetyczne > słabe > grawitacyjne

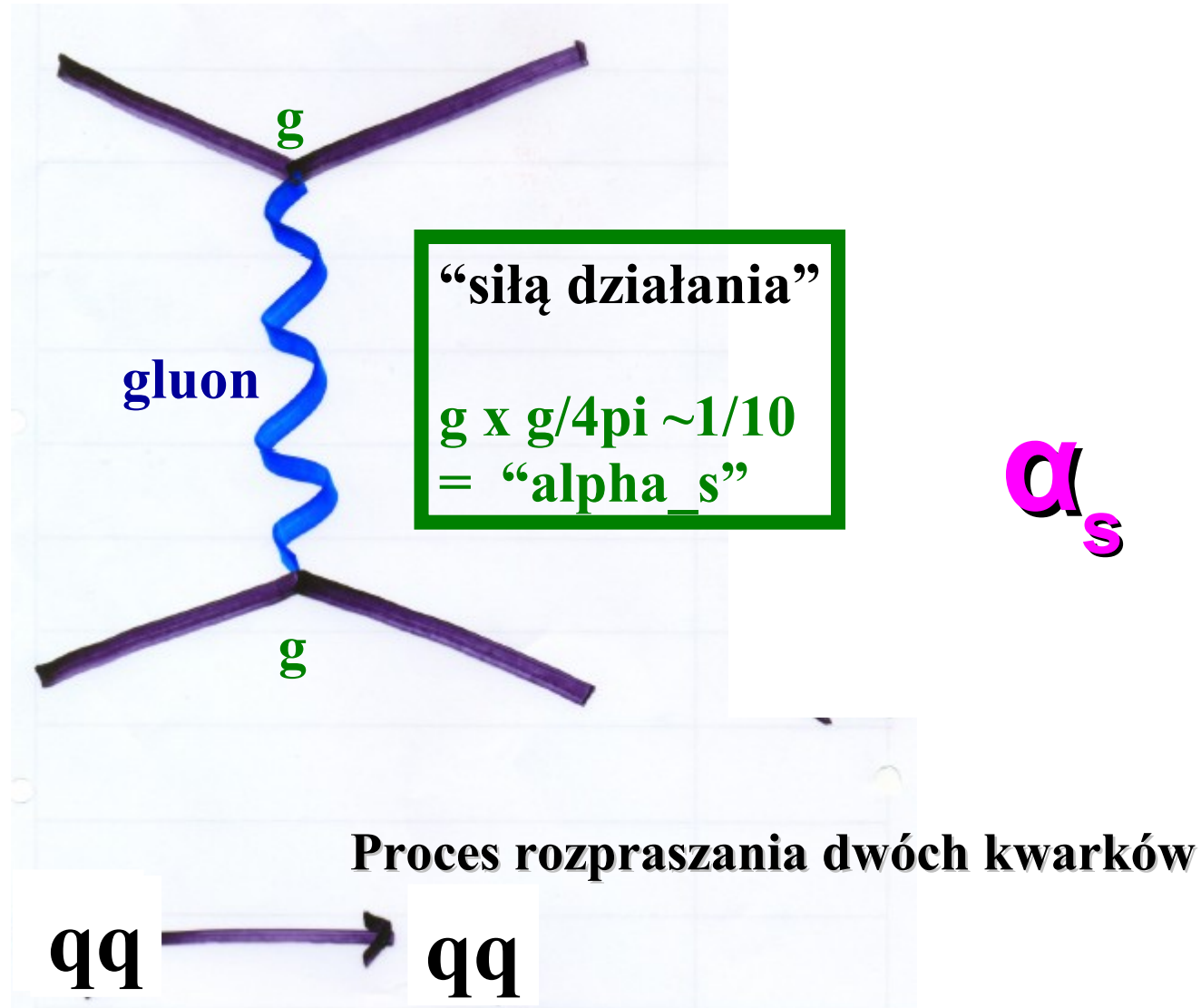
Diagramy Feynmana



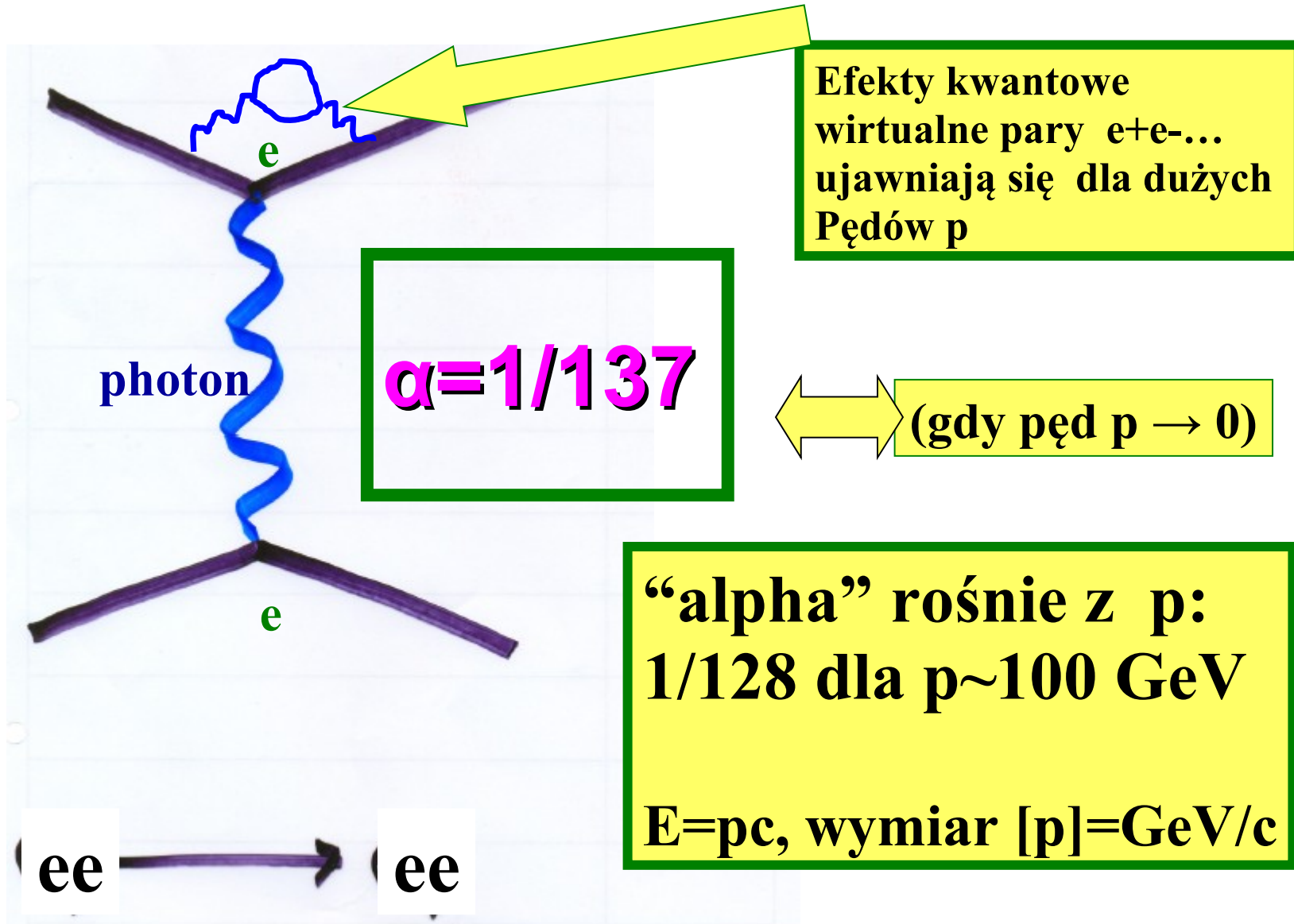
Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



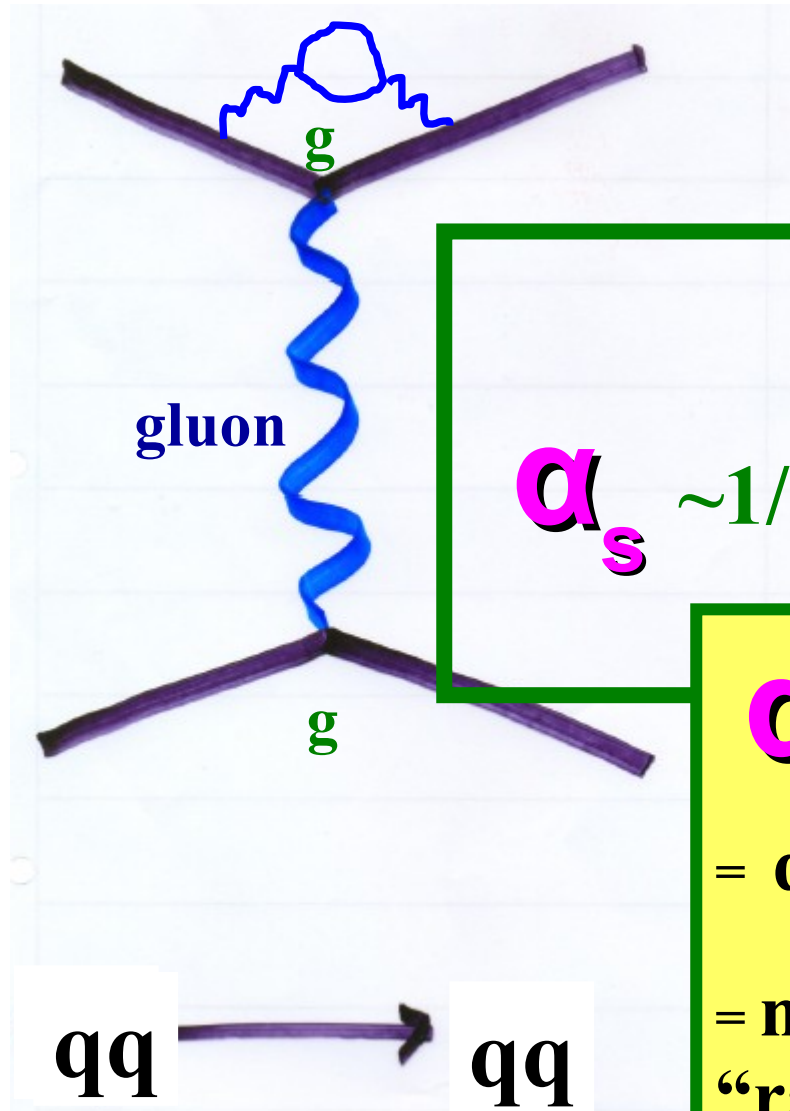
Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych



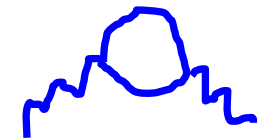
Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Feynman diagrams for chromomagnetic interaction



Jak w QED, w QCD



ale również



$$\alpha_s \sim 1/10$$

α_s maleje z pędem

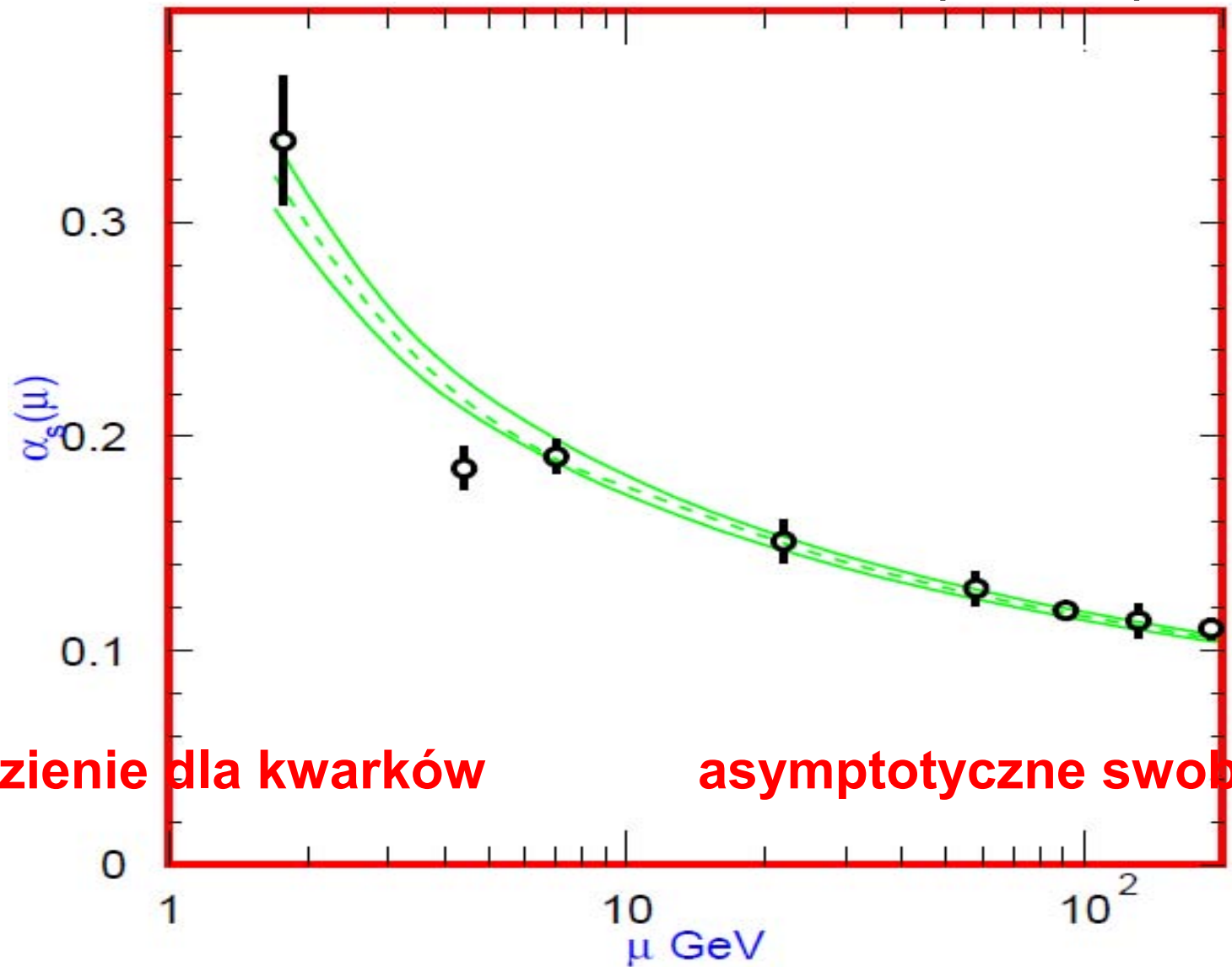
= duża dla małych p

SILNE ODDZIAŁYWANIA!

= mała dla dużych p

“rachunek zaburzeń QCD”

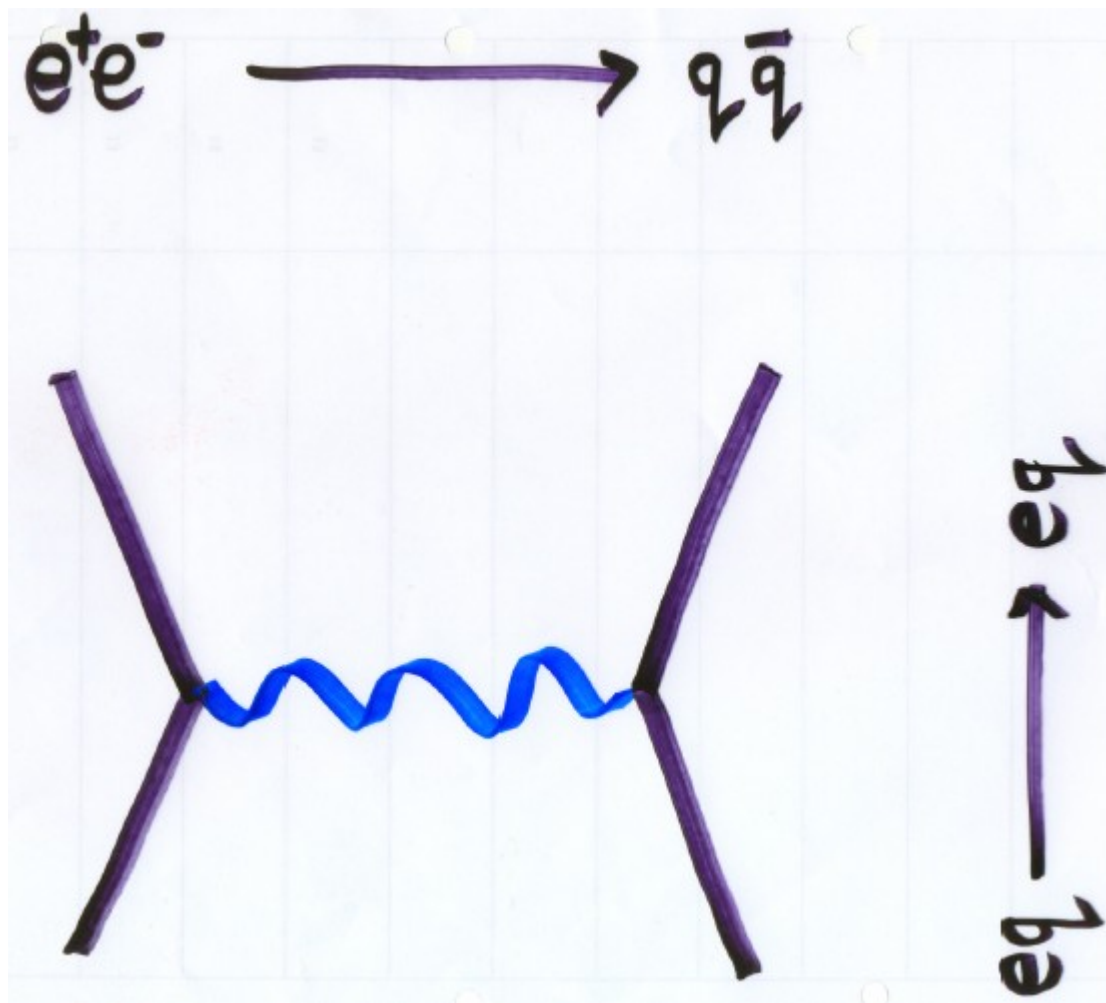
Biegnąca stała sprzężenia – dane doświadczalne (2008)



← **więzienie dla kwarków**

asymptotyczne swoboda →

Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Nośniki sił

foton

e-m

gluon

silne

Diagram Feynmana dla QCD analogicznie

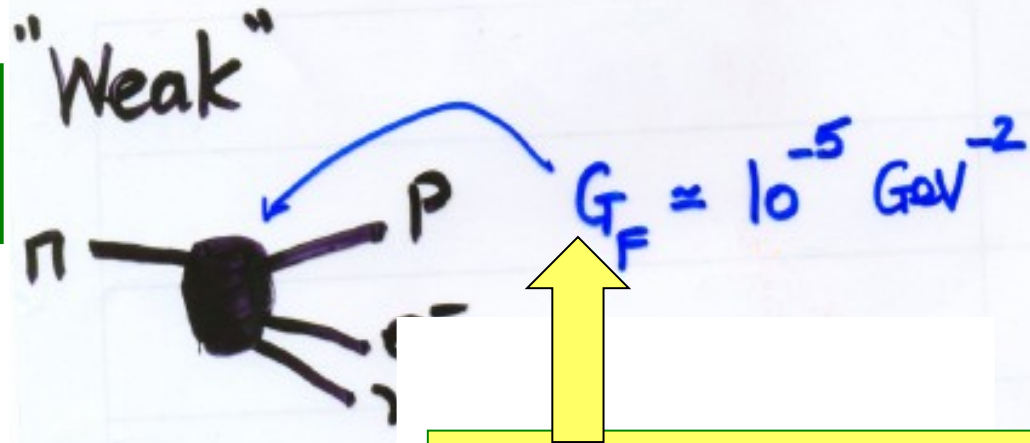
QED: elektron; pozyton; foton

QCD: kwark; antykwark; gluon

Historia elektroslabych oddziaływań wg F. Closa

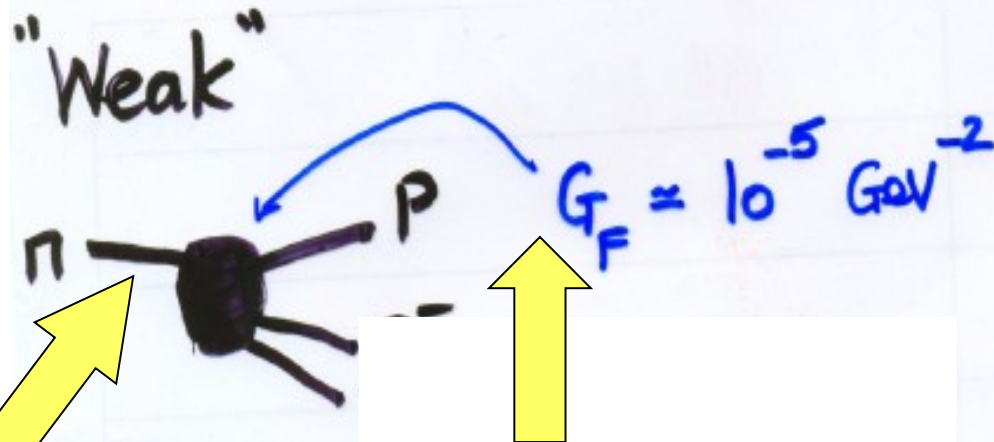
Sily słabe

Model Fermiego (1934)
Dla rozpadu beta neutronu



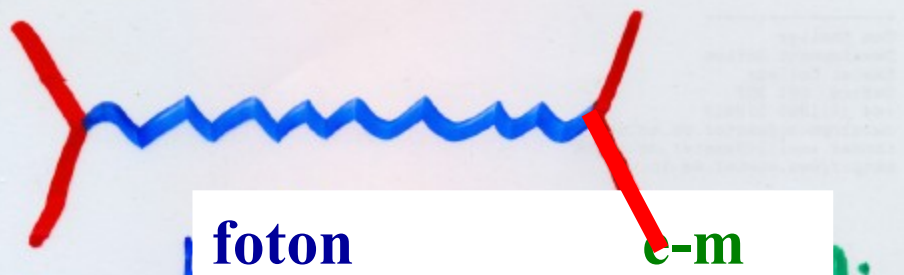
Efektywna „siła”
“ G_F ” “stała Fermiego”
- wyznaczona z danych

**Model Fermiego (1934)
Dla rozpadu beta n**



Teraz przyglądamy się tej czarnej skrzynce z dzisiejszą zdolnością rozdzielczą i widzimy wymianę bozonu W

Efektywna „siła”
“ G_F ” “stała Fermiego”
- wyznaczona z danych



foton

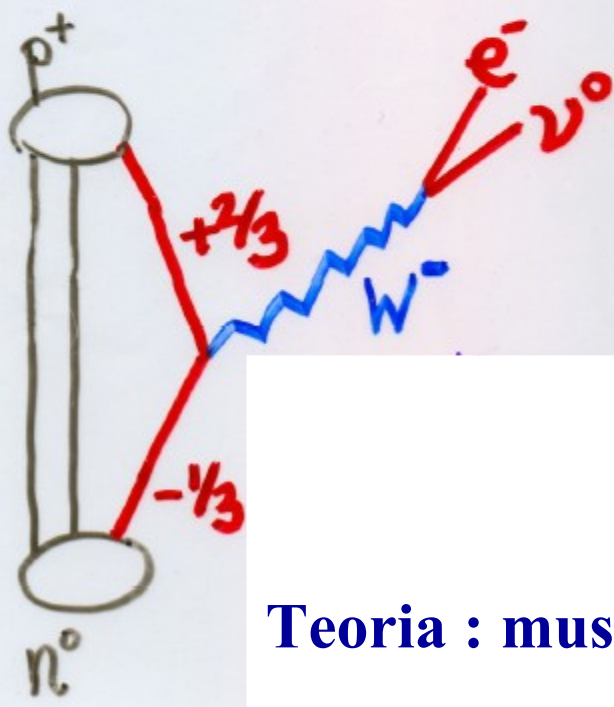
e-m

gluon

silne

W

słabe



Teoria : musi istnieć neutralny partner $W^{+/-} \Rightarrow Z$ odkryty

The Electroweak Story F. Close

1864

Maxwell unifies electricity and magnetism
→ electromagnetism

100 years later

Glashow Salam Weinberg propose
unification of Electromagnetic and weak
electro-weak

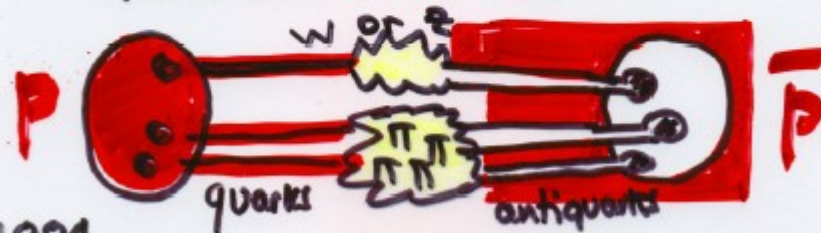
They use Higgs mechanism

→ predict force carriers

→ masses predicted. $W^+ W^- Z^0$ $(m_\gamma = 0)!$

1983-84

W and Z particles found by CERN
experiments UA1 + UA2



1984

Rubbia + van der Meer → Nobel Prize

1989-95 LEP



$$\text{Tune } E_+ + E_- = M_Z c^2 = 91 \text{ GeV}$$

LEP 4 experiments
20 million Z^0

Z rozpada się demokratycznie na

$q\bar{q}$ e^+e^- $\mu^+\mu^-$ $\tau^+\tau^-$
 $\nu_e\bar{\nu}_e$ $\nu_\mu\bar{\nu}_\mu$ $\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$



1/czas życia
~ liczba dziur
~ liczba
różnych rozpadów

Czas życia bozonu Z

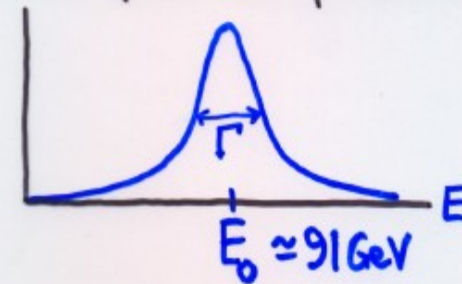
zasada nieoznaczoności
Heisenberga

$$\Delta E \Delta t = 6 \cdot 10^{-25} \text{ GeV/sec}$$

jeżeli Δt – czas życia cząstki
to

$$\Rightarrow \Delta E = \Delta M c^2 = \frac{6 \times 10^{-25} \text{ GeV}}{\Delta t \text{ (sec)}}$$

$e^+e^- \rightarrow Z$ (production probability)

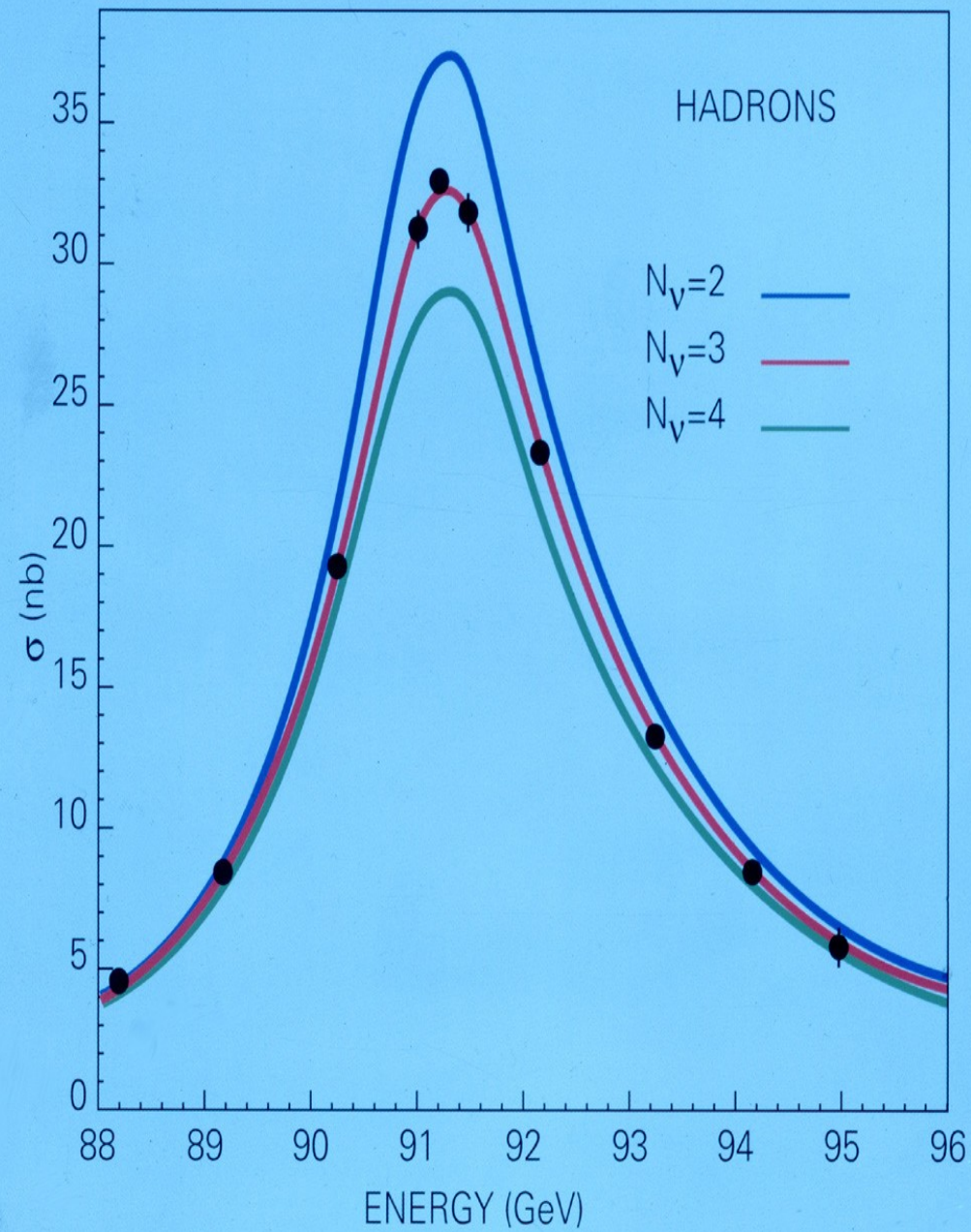


$$\Gamma = \Delta E = 2.5 \text{ GeV}$$

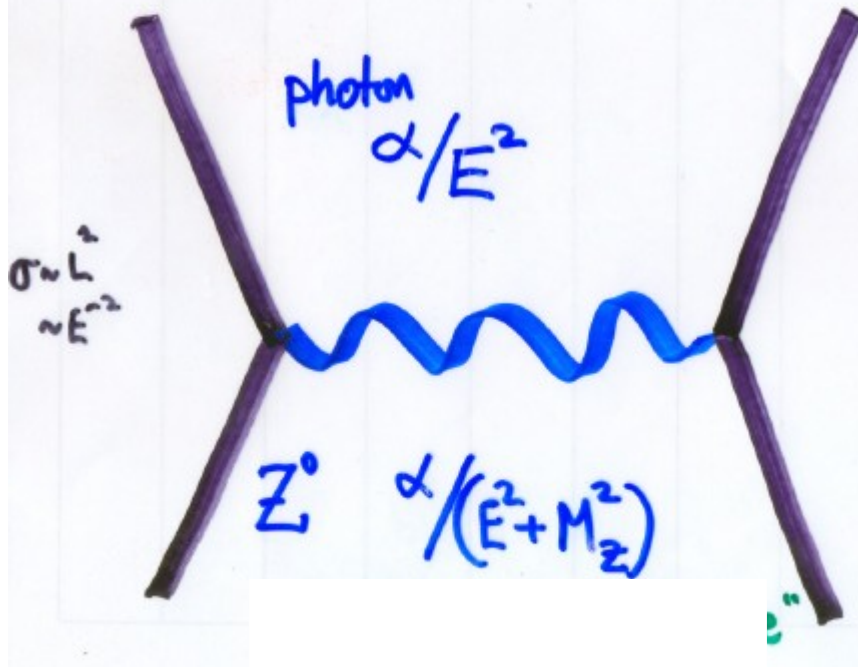
Czas życia

$$= 10^{-25} \text{ sec}$$

ALEPH

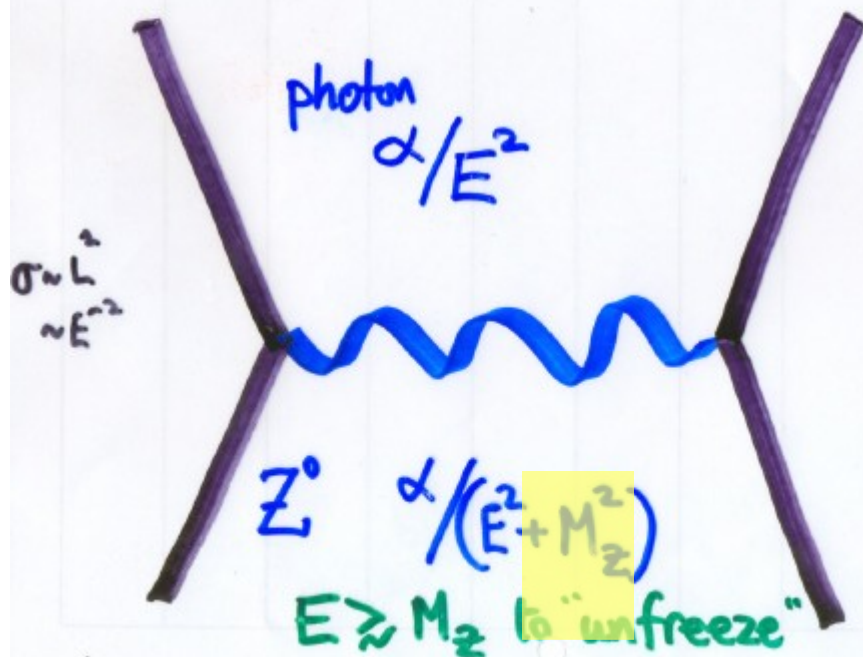


Wymiana bozonu Z i fotonu - porównanie



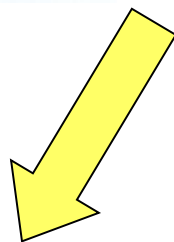
Reguła Feynmana

Jeżeli energię E przenosi
“wirtualna”
cząstka (foton; Z)
to czynnik $1/(E^2 + M^2)$

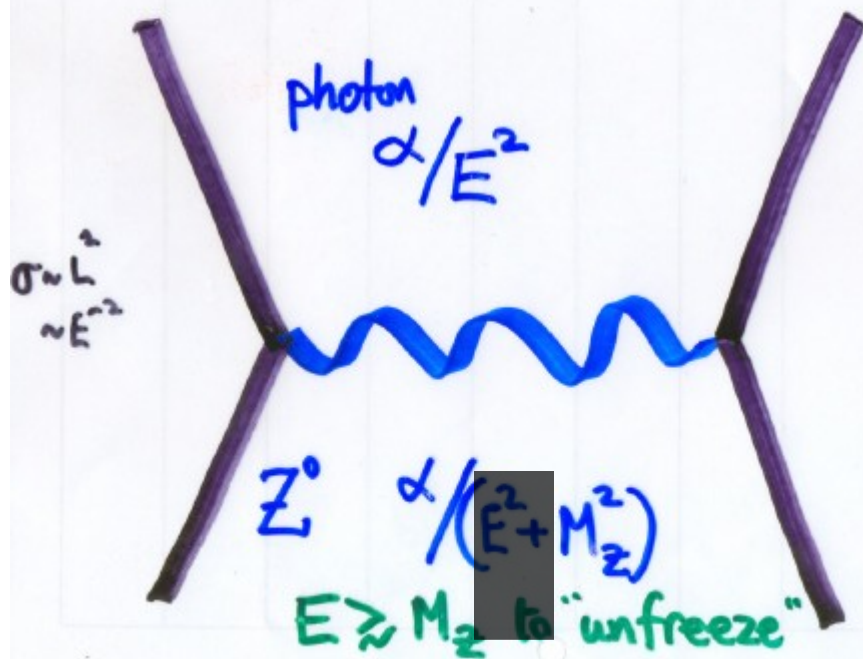


Reguła Feynmana

Jeżeli energię E przenosi
 "wirtualna"
 cząstka (foton; Z)
 to czynnik $1/(E^2 + M^2)$

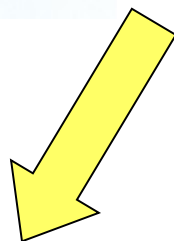


Dla $E \gg M$ to w przybliżeniu czynnik $1/E^2$...jak dla fotonu



Reguła Feynmana

Jeżeli energię E przenosi
 "wirtualna"
 cząstka (foton; Z)
 to czynnik $1/(E^2 + M^2)$



Dla $E \gg M$ to w przybliżeniu czynnik $1/E^2$...jak dla fotonu

Dla $E \ll M$ to tylko $1/M^2$

$$\sigma \sim L^2 \sim E^{-2}$$

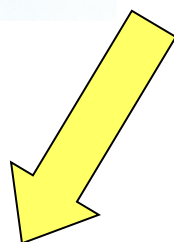
Model Fermiego

$$Z^0 \propto 1/(E^2 + M_Z^2)$$

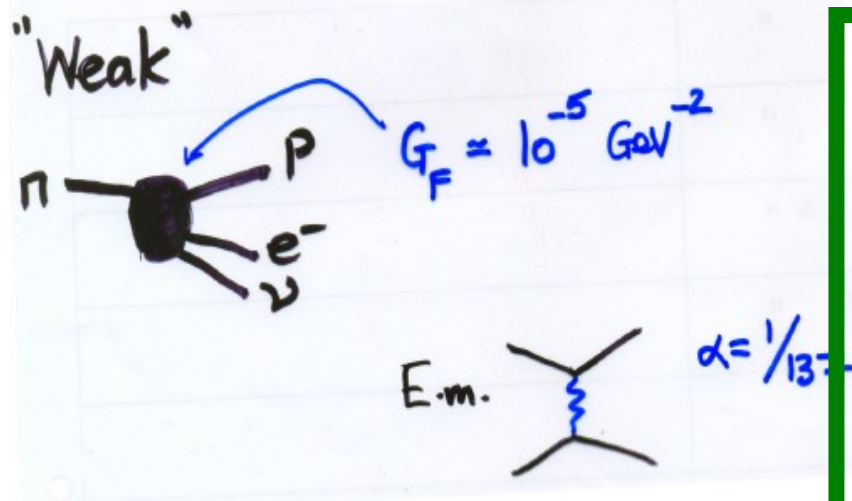
$E \gtrsim M_Z$ to "unfreeze"

Reguła Feynmana

Jeżeli energię E przenosi
"wirtualna"
cząstka (foton; Z)
to czynnik $1/(E^2 + M^2)$



Dla $E \ll M$ to tylko $1/M^2$



**Czy “słaba siła” bo sprzężenie małe,
czy dlatego, że masa W duża??**

Odpowiedź = duża masa W

Model Weinberga-Salama

Masa bozonu $W^{+/-} = 80 \text{ GeV}$

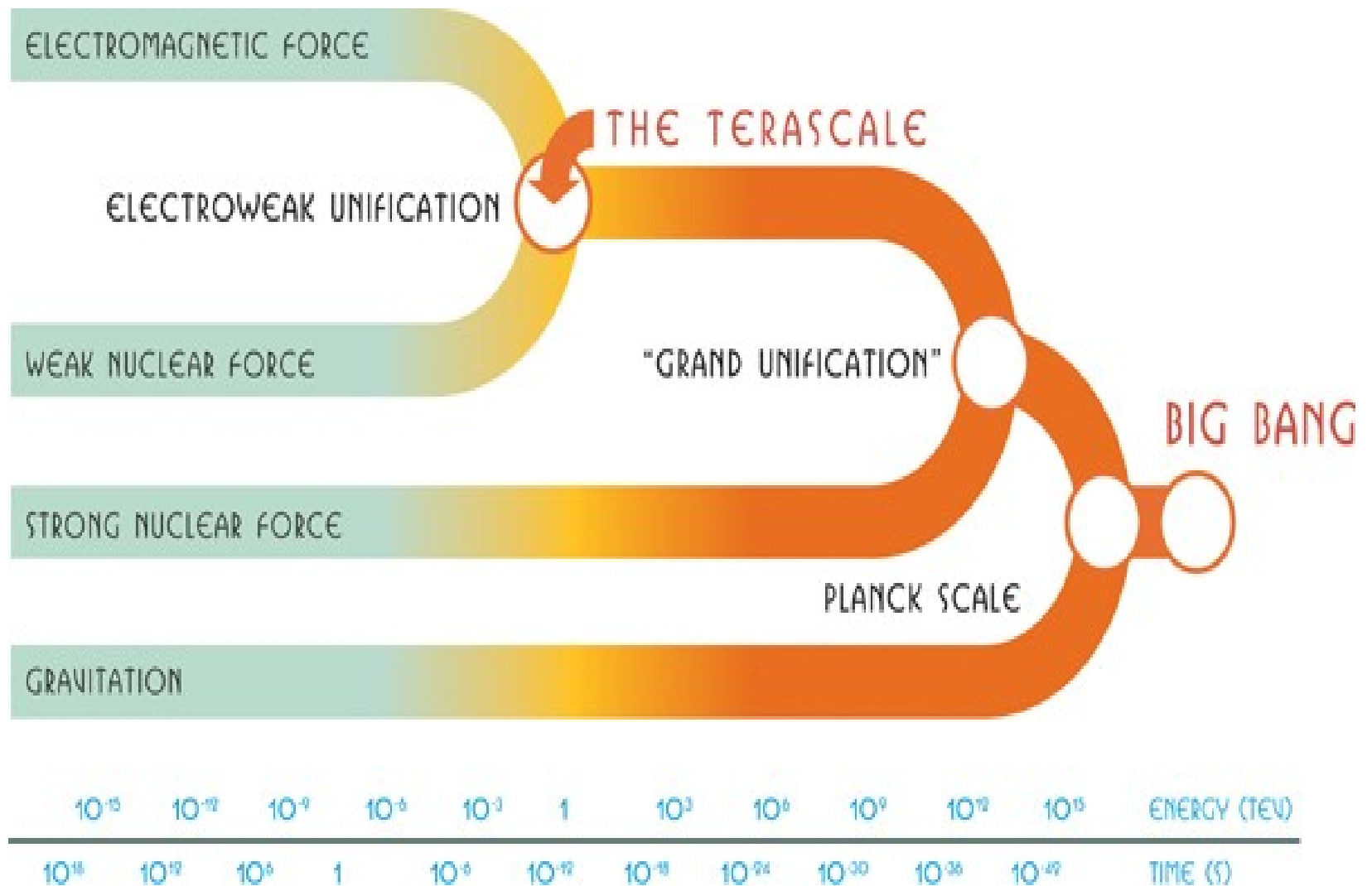
Masa bozonu $Z = 91 \text{ GeV}$

jedyne masywne nośniki fundamentalne

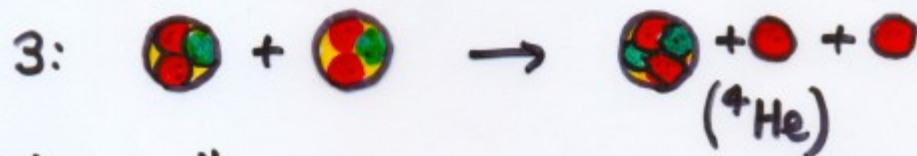
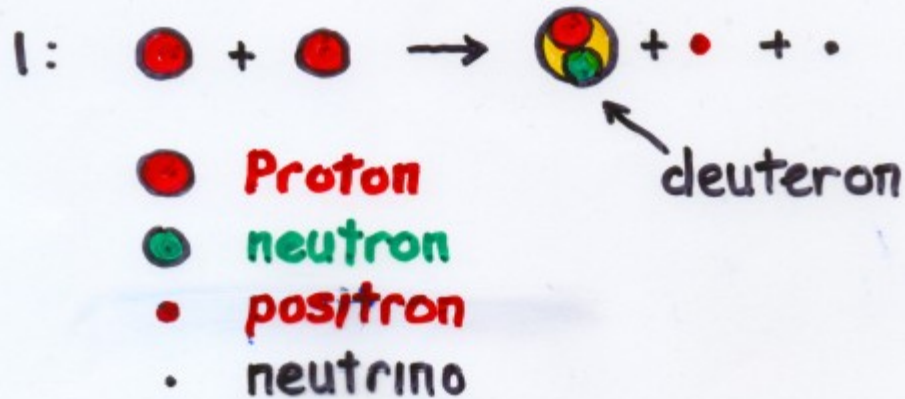
Oddziaływania słabe i e-m – podobna „siła”
oddziaływania dla dużych energii $\sim 1 \text{ TeV}$

Opis teoretyczny wspólny $\rightarrow$ oddz. elektroslabe

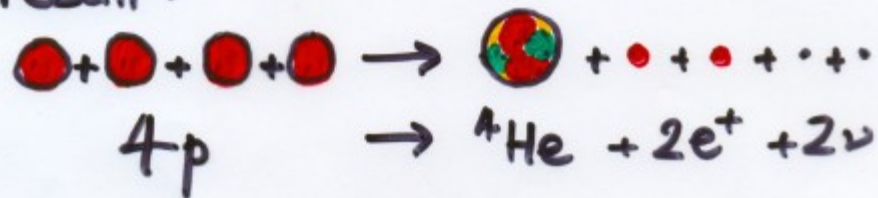
UNIFIKACJA



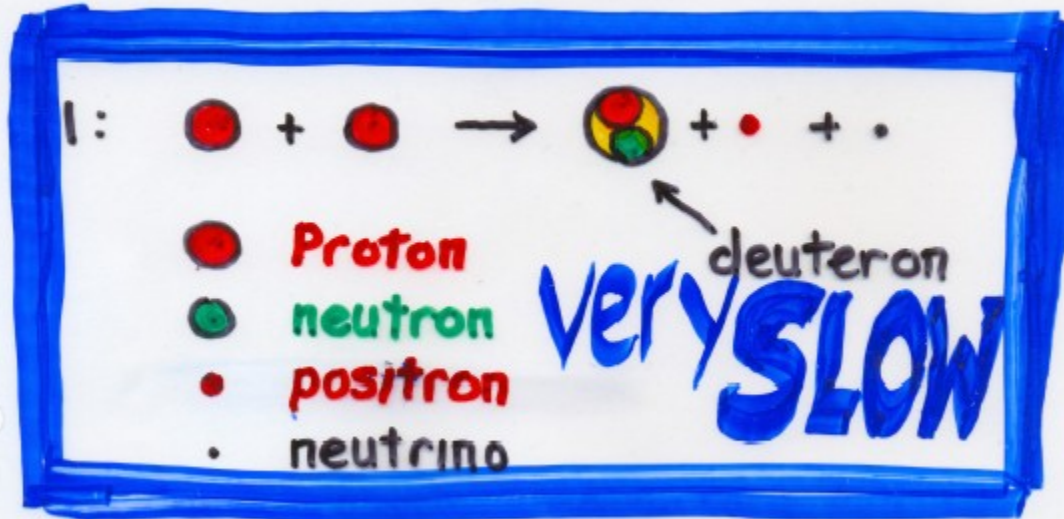
At the heart of the Sun:



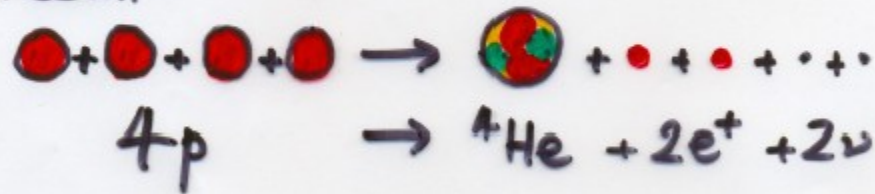
Net result:



At the heart of the Sun:

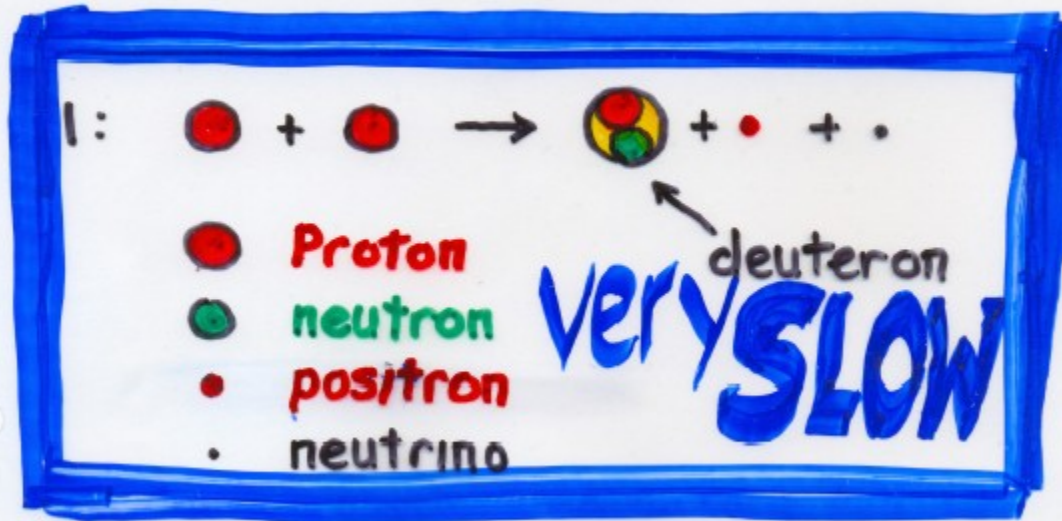


Net result:

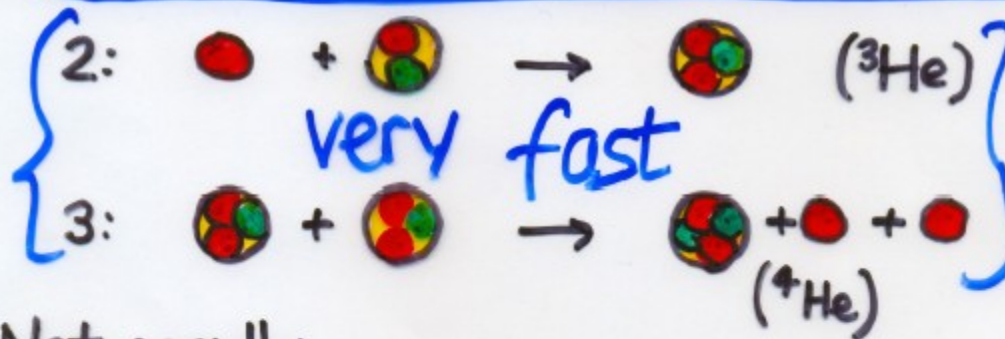


$\Delta E = \Delta M c^2: \quad ^4\text{He} + 4p \approx 28\text{MeV}$

At the heart of the Sun:

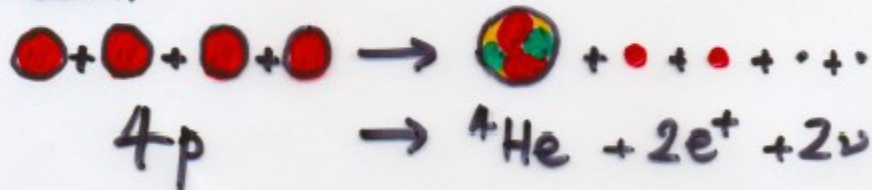


WEAK



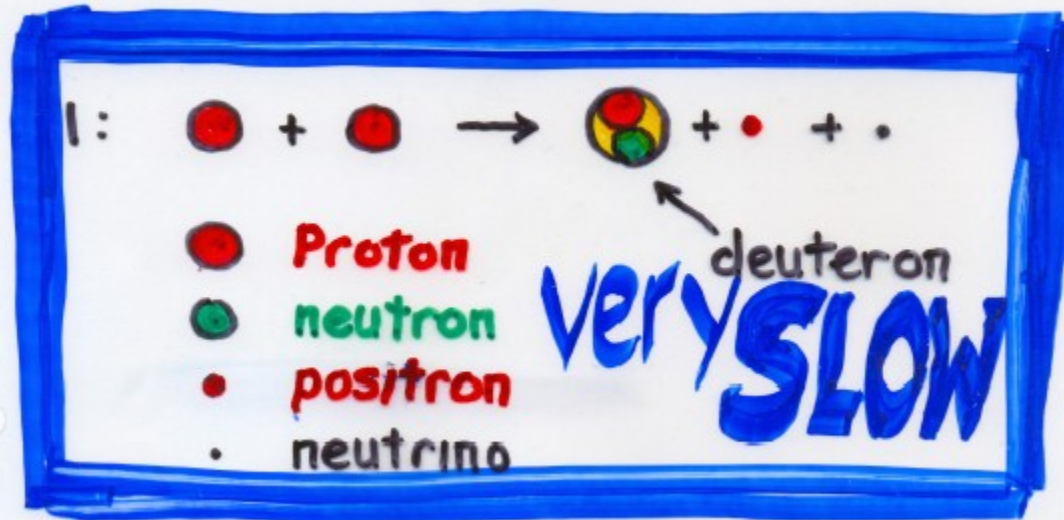
STRONG

Net result:



$\Delta E = \Delta M c^2: {}^4\text{He} + 4p \approx 28\text{MeV}$

At the heart of the Sun:

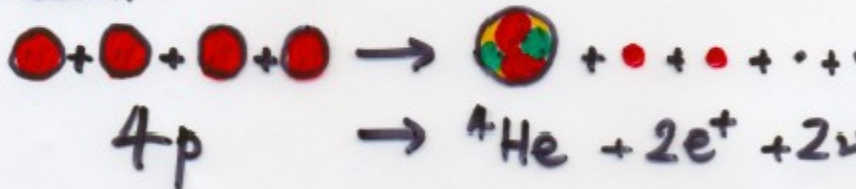


WEAK



STRONG

Net result:



$\Delta E = \Delta M c^2: {}^4\text{He} + 4p \approx 28\text{MeV}$

→ dlatego Słońce
świeci od 5 Miliardów
lat i rozwinęło się życie

↖ wypromieniowana energia

Słabe oddziaływania słabe w Słońcu .

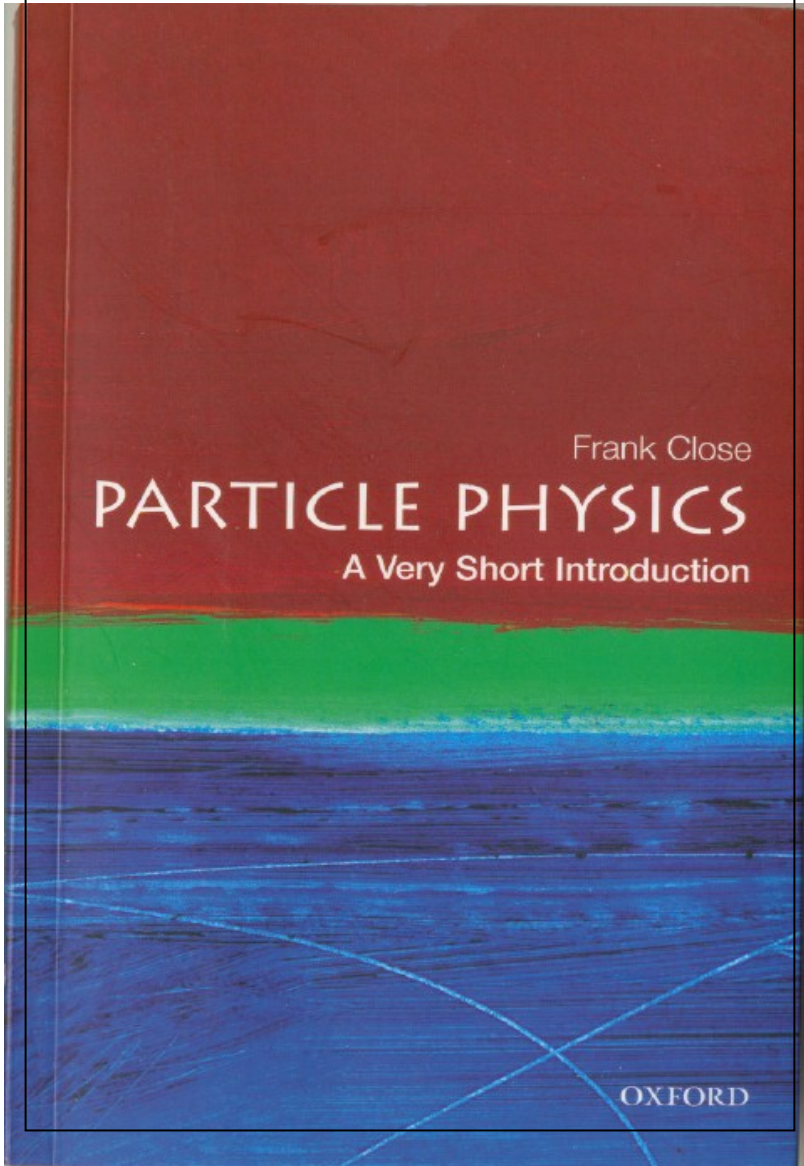
..ponieważ $10,000,000\text{K} \sim 1\text{ keV} \ll 80\text{ GeV}$

**...to dlatego Słońce tak długo aktywne
że mogliśmy powstać i prowadzić te rozmowę**

→ We exist because $M(W)$ is not zero

→ Mass matters

A Very Short Introduction

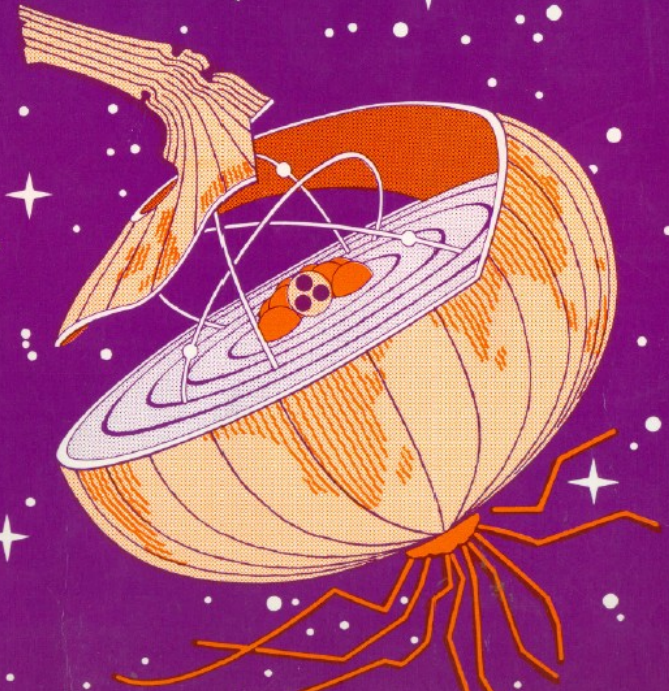


Coming out in December

NEW

THE COSMIC ONION

Quarks and the Nature of the Universe



Frank Close

CEL teoretyka

- .. dotrzeć do tych uniwersalnych elementarnych praw przyrody, z których kosmos może być zbudowany przez czyste wnioskowanie

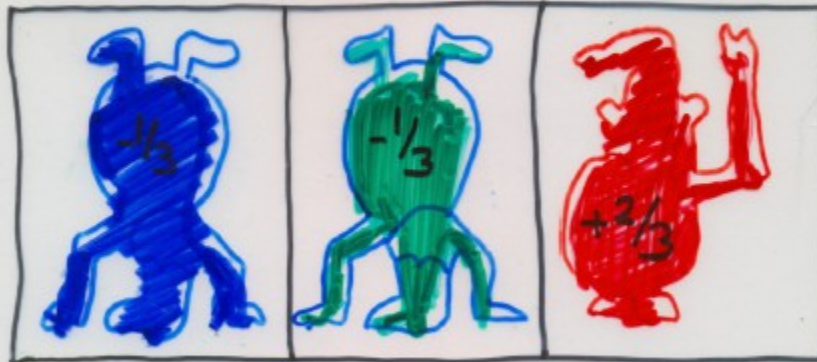
Albert Einstein

1960s

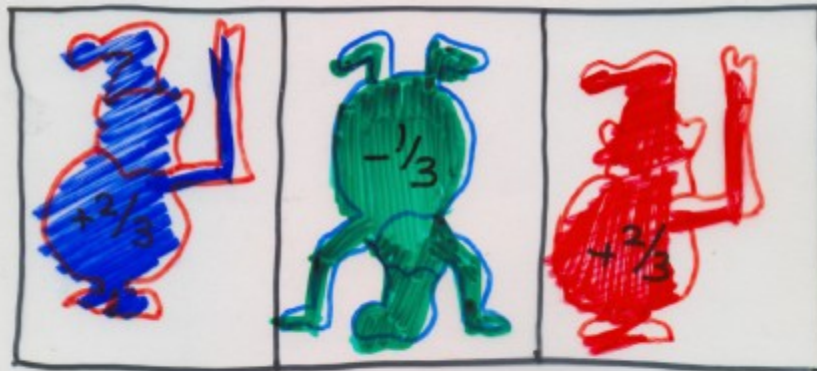
QUARKS

STRONG force
gives them

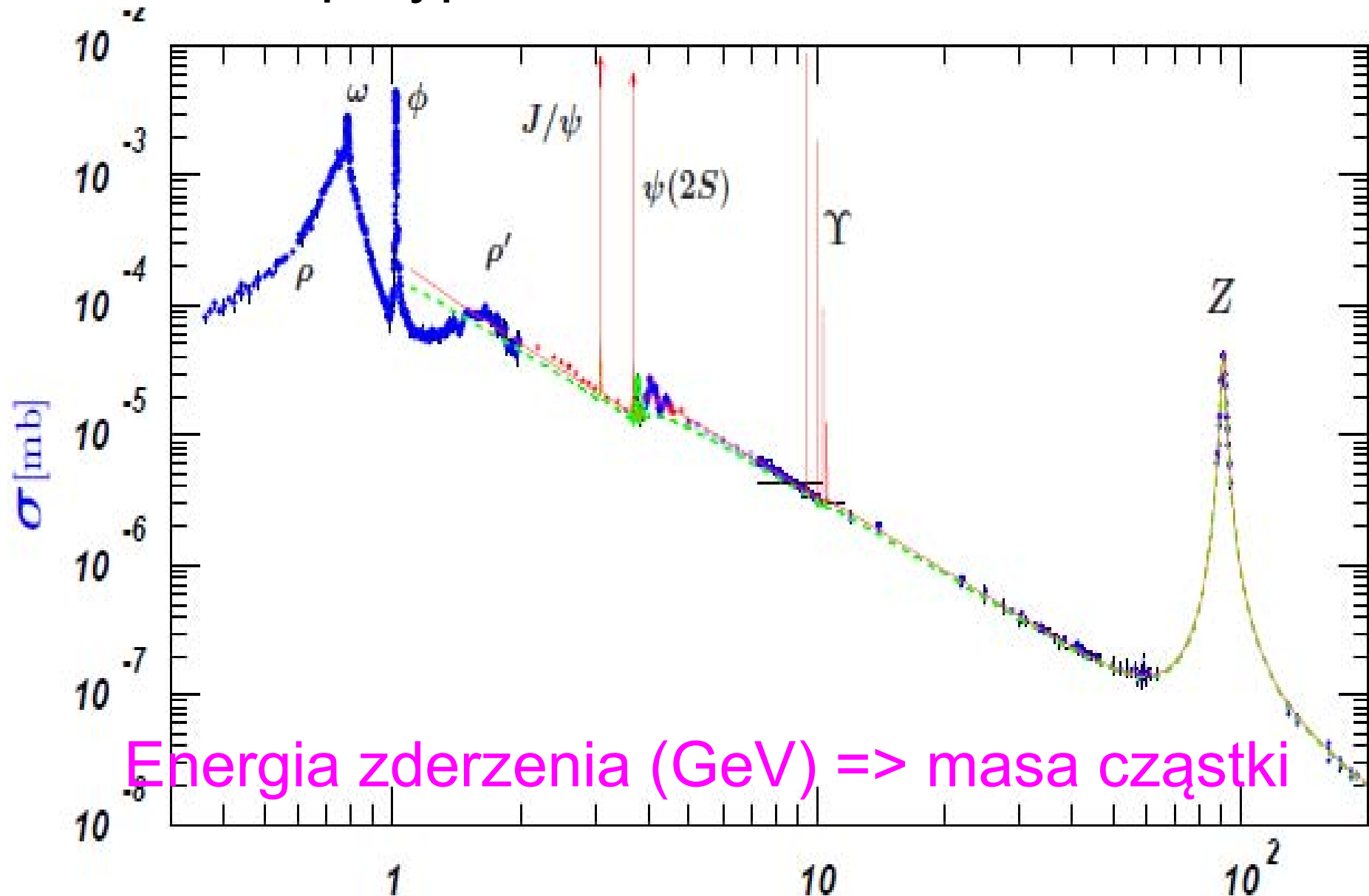
n^0



P^+



Liczba przypadków w zderzeniach e^+e^-



Odkrycie spinu elektronu

<http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html>



Leiden 1924. From left to right: Dieke, Goudsmit, Tinbergen, Ehrenfest, Kronig, Fermi.
Note: Tinbergen later changed from physics to economy and became the first Nobel laureate in economy (1969).

Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 7

2₁IV.2009

TEORIA

Symetria i jej łamanie

CEL

- .. dotrzeć do tych uniwersalnych elementarnych praw przyrody, z których kosmos może być zbudowany przez czyste wnioskowanie.

I want to know how God created this world. I am not interested in this or that phenomenon.. I want to know His thoughts, the rest are details.

Albert Einstein

Są prawa i prawa

W fizyce wiele praw fenomenologicznych typu prawa Hooke'a:

Siła z którą ściskamy metalową sprężynę jest tym większa im bardziej ściśnięta jest sprężyna.

W latach 30-tych XXw → to wynika z własności oddziaływań elektromagnetycznych w metalu.

Opis fundamentalny → jak najmniej prostych praw

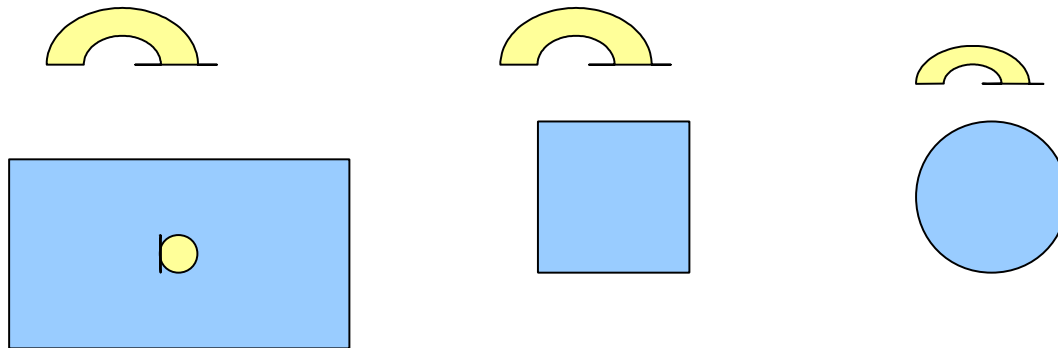
Piękno w fizyce = symetria

„Oh, how ugly” - Einstein

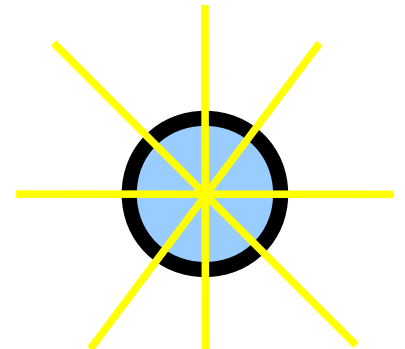
Symetria i niezmienniczość

Figura geometryczna symetryczna względem pewnych operacji, jeśli te operacje nie zmieniają jej:

obróć
wokół
środka



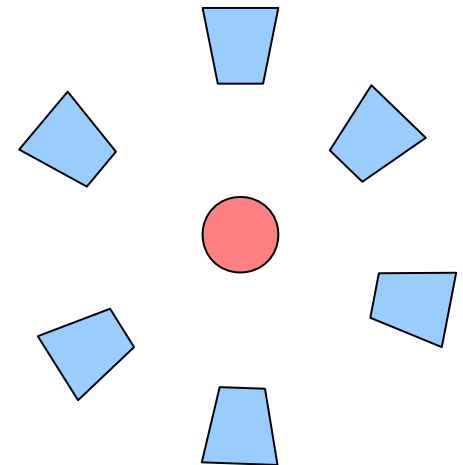
odbicie względem płaszczyzny (linii)



W fizyce – symetria czyli niezmienniczość praw

E. Wigner 1930- czy emisja światła przez atom zależy od kierunku? Doświadczenie: detektory światła ustawiono wokół emitującego atomu, wszystkie dały takie same wyniki
→ symetria obrotowa

Podobnie można badać zależność od przesunięcia w przestrzeni
→ symetria wzg. przesunięcia



Fundamentalne prawa przyrody związane są z symetrią

Emma Noether, 1918

■ Prawa zachowania pędu i energii

Można je powiązać z symetriami względem przesunięć w przestrzeni i w czasie.

zachowanie pędu $\rightarrow$ symetria wzg. przesunięć w przestrzeni

zachowanie energii $\rightarrow$ symetria wzg. przesunięć w czasie

Prawo zachowania ładunku elektrycznego

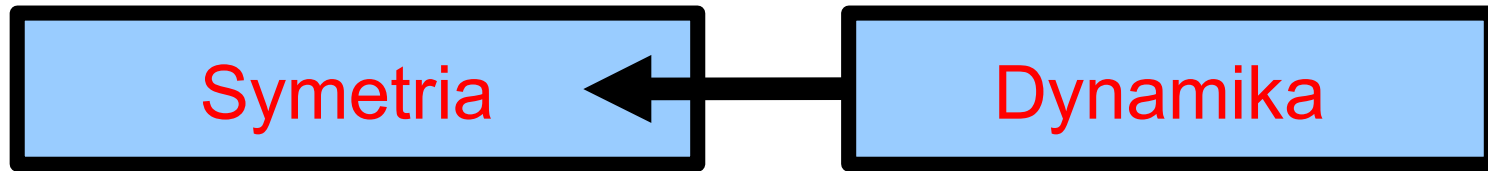
Ale z jaką symetria się wiąże? O tym później..

■ Powyższe prawa obowiązują również w mikroświecie, ale tu mamy również inne ładunki i prawa zachowania np. liczby leptonowej L

SYMMETRIA

Przed EINSTEINEM

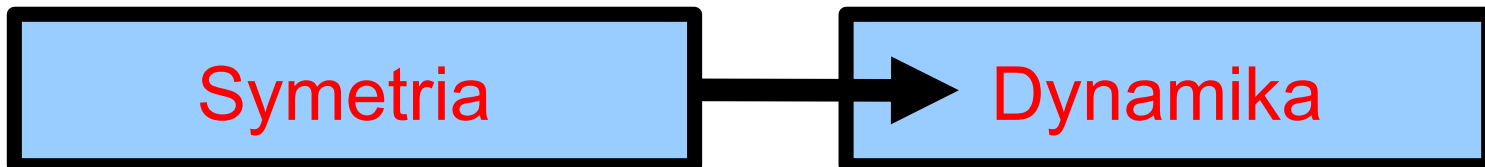
Symetria jako konsekwencja dynamicznych praw przyrody



Po EINSTEINIE

Einstein zauważył relatywistyczną symetrię praw Maxwella i wypromował ją na symetrię czaso-przestrzeni.

→ *Geometryzacja symetrii*



Symetria jest pierwotną własnością natury, która określa możliwe dynamiczne prawa natury

SYMETRIA czyli NIEZMIENNICZOŚĆ

GLOBALNA (czyli nie zależy od miejsca i czasu):

Regularności praw ruchu i fizycznych zdarzeń; Przekształcenia symetrii daje różne fizyczne sytuacje ale wszystkie obserwacje są niezmiennie. Tradycyjne symetrie odkryte w przyrodzie są tego typu.

LOKALNA (zależy od miejsca i czasu)

zwana również symetrią **CECHOWANIA**):

Całkowicie inna, dotyczy samych praw natury. Przekształcenie symetrii nie prowadzi do różnej fizycznie sytuacji. Weyl 1918: niezmienniczość pomiarów od skali, wycechowania pręta pomiarowego

LOKALNA SYMETRIA WYZNACZA DYNAMIKĘ

1912-17



grawitacja

1968-73

niezmienniczość cechowania



oddz. elektroslabe i silne

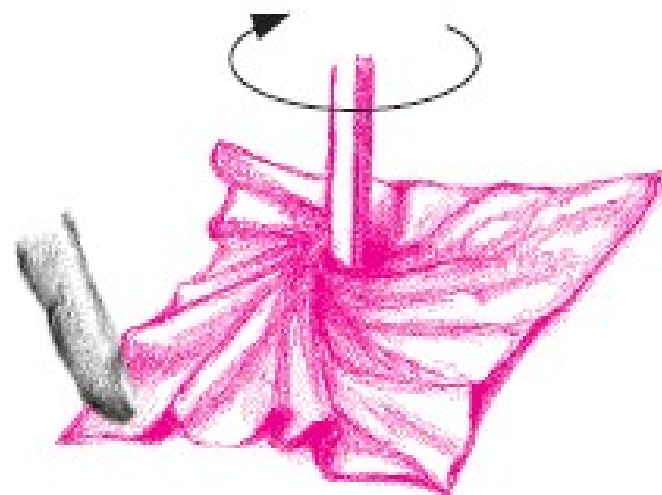
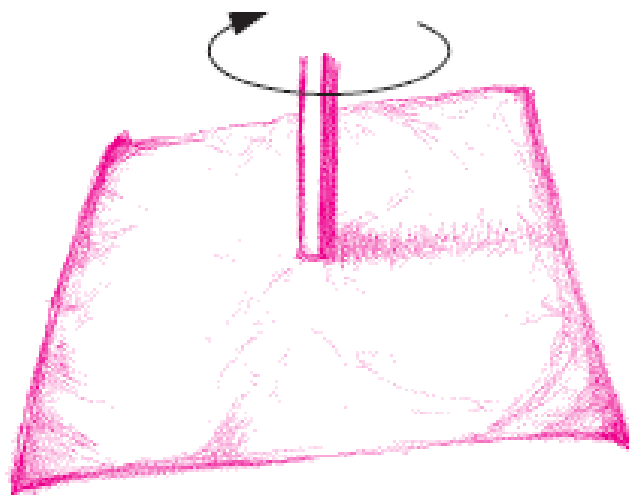
Weyl – symetria cechowania

„Niezmienność pręta pomiarowego” (1918)

czyli niezależność układu fizycznego od zmiany skali (wycechowania) przyrządu pomiarowego: zmiana kalendarza, skali temperatury czy położenie zerowego południka nie zmienia odstępu czasu, ciepła potrzebnego do wrzenia cieczy czy długości podróży. Przychody i rozchody,

zyski i straty są **globalnie** niezmiennicze gdy zmienimy „miarę” jaką jest pieniądz. Ale jeśli te zmiany miałyby zachodzić lokalnie → chaos.

Globalna i lokalna symetria



Symetria materii-materia symetrii

M. Krawczyk

DELTA 5 (312) 2000

Fale - fale można usunąć

Falec uniemozliwia tu obrót całą serwetą

ale przykładając siłę, czyli

trzeba dodać odpowiednie oddziaływanie (i to wszędzie!)

- potrzebne bezmasowe nośniki sił (bozony cechowania)

Czy możliwa jest niezmienniczość lokalna dla układu fiz. ? Tak, ale:

Muszą istnieć dodatkowe obiekty, których zmienność lokalna będzie kompensować lokalne zmiany rozważanego elementu

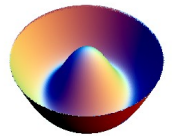
Pojawia się oddziaływanie (określonego typu !) i stąd ścisłe związki między formą oddziaływania a istnieniem symetrii lokalnej.

Przykład- jeśli wartość pieniądza zależy od miejsca (czasu) – zjawiska kompensujące (spekulacja..)...

Symetria – główna idea współczesnej fizyki cząstek elementarnych

(Nobel'08)

- Klasyfikacja cząstek elementarnych (lata 60' XXw)
 - Opis oddziaływań (od lat 50' XXw)
 - Symetrie ścisłe i przybliżone
 - Symetrie globalne i lokalne
 - Spontaniczne łamanie symetrii (mechanizm generacji mas; przewidywania: bozon(y) Higgsa)
- SEKTOR HIGGSA – klucz do głębszej teorii



Fundamentalne cząstki Modelu Standardowego

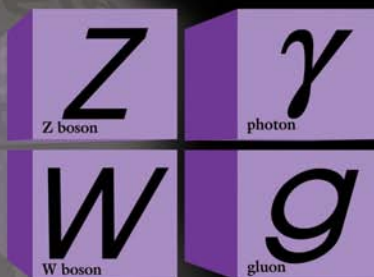
Quarks



Leptons

3 rodziny

Forces



z ich
cząstki

$\rightarrow e^+$
 $\rightarrow \bar{u}$

$\rightarrow W^-$

$\rightarrow Z$

Opis wszystkich oddziaływań fundamentalnych oparty jest o zasadę cechowania

Niezmienniczość wzg lokalnej zmiany (fazy) funkcji falowej elektronu wymaga istnienia pola elektromagnetycznego i takiej formy sprzężenia foton-elektron aby skompensować tę zmianę – *elektrodynamika kwantowa*.

To jest zasada cechowania, którą stosujemy do opisu innych sił fundamentalnych. Nośniki pola – bozony cechowania (foton, $W^{+/-}$ i Z , g)

Lokalne zmiany (fazy) funkcji falowej tworzą grupę

Te zmiany = przekształcenia symetrii tworzą zbiór zwany grupą

np. grupa obrotów, odbić, przesunięć..

Tw. Noether – z każdą symetrią wiążą się prawa zachowania.

Prawo zachowania ładunku elektrycznego wynika z symetrii oddziaływań e-m wzg. przekształceń unitarnych $U(1)$

Fundamentalne siły i lokalne symetrie (grupy symetrii)

- Elektromagnetyczne: nośnik-foton; grupa $U(1)_{em}$
- Słabe (rozpad beta: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ antyneutrino
fundamentalne $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$ antyneutrino)
E-m i fundamentalne słabe = elektrosłabe (EW)
nośniki: bozony pośredniczące W^+, W^- i Z
oraz foton; grupa $SU(2) \times U(1)$
- Silne (jądrowe pp, pn, nn - między hadronami
fund. jądrowe inaczej **kolorowe** między
kwarkami i gluonami) grupa $SU(3)$

Lokalna symetria a masa bozonów cechowania

Bozony cechowania muszą być bezmasowe, aby kompensować wszędzie efekt zmiany fazy.

Więc masa bozonów cechowania $=0$, gdyż tylko bezmasowe bozony mają nieskończony zasięg.

Masa bozonów pośredniczących W/Z

- Wiemy, że W/Z są bardzo masywne ok. 80-90 GeV
Ale symetria cechowania wymaga: masa zero !
Chcemy mieć ciastko i zjeść ciastko..

W/Z z masą mają trzy polaryzacje, foton tylko dwie !

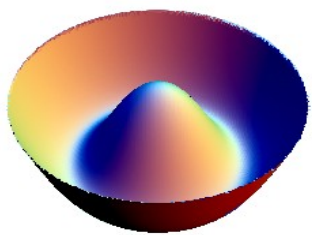
Dodajemy dublet skalarów (SU(2)) oddziałujący z W i Z.

Energia potencjalna: najniższy stan to próżnia,

ale tu wiele stanów równoważnych na okręgu!

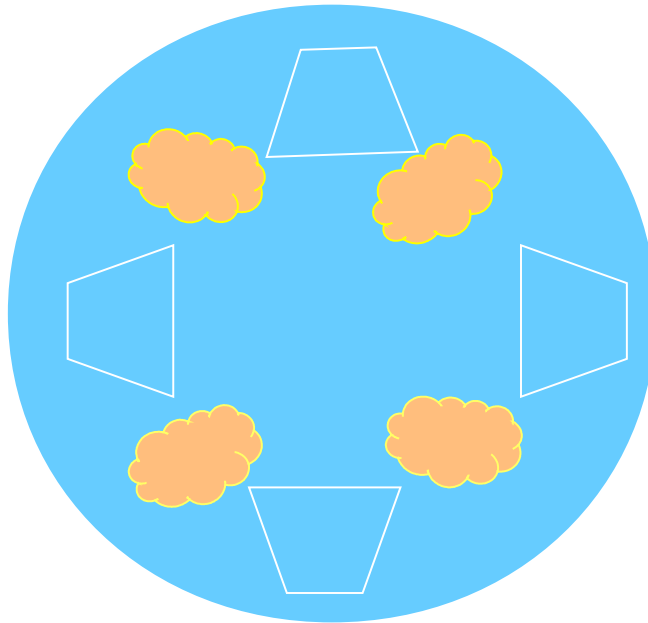
Wybierając jeden z możliwych stanów próżni łamiemy spontanicznie istniejącą symetrię

Promień „rowu” – parametr próżniowy v



Spontaniczne łamanie symetrii

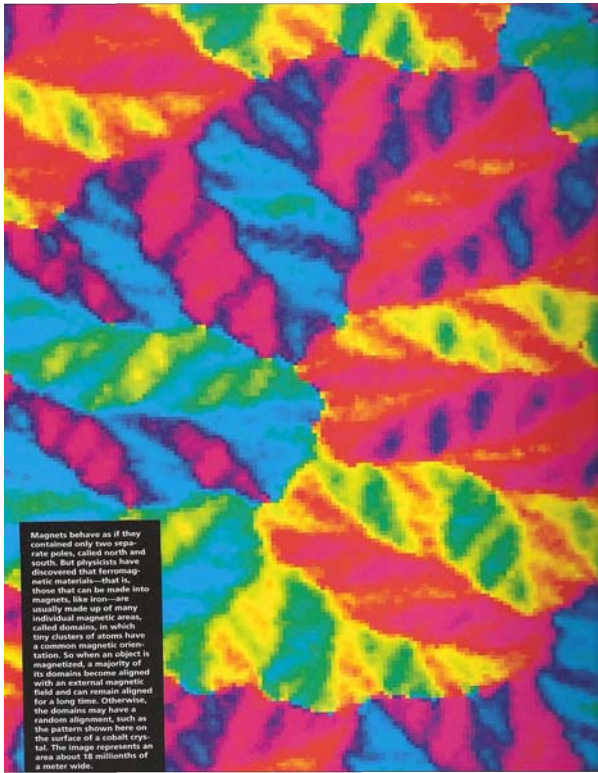
- Wybierz ciasteczko (lewe-prawe) –
a inni muszą się
dostosować



- Pionowy kij – gdzie upadnie?

Spontaniczne łamanie symetrii

Ferromagnetyk ma domeny poniżej temp. Curie, w których grupy atomów mają ten sam kierunek dipoli magnetycznych . Ale różny w różnych domenach...



rozmiar 10^{-6} m

Suplee, Physics in the 20-th century

Spontaniczne łamanie symetrii



Struktura
czyli mniejsza symetria
gdy zimno (mała energia)



**Struktura znika a
symetria wzrasta
gdy ciepło
(duża energia)**

Generacja mas w Modelu Standardowym

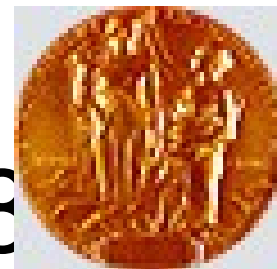
- Model Standardowy
masy od 0 do 175 GeV
- Generacja mas W/Z – spontanicznie! ~ 1960
Mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa (B-E-H):
masa $\sim g v$ – siła oddz. i parametr próżniowy
- Masy kwarków i leptonów
również w wyniku oddziaływania z dubletem
(ale tu dodatkowe parametry)

Przewidywania B-E-H → bozon Higgsa w MS

- Neutralna, spin 0, cząstka H_{SM}
- Masa nieznana $M = \sqrt{2\lambda}v \sim 100\text{-}200 \text{ GeV}$
- Oddziałuje ze sobą: λHHH , $\lambda^2 HHHH$
- Znane sprzężenia do bozonów W i Z i do kwarków i leptonów (oddz. Yukawy)
proporcjonalne do ich mas
- I dokładnie takie jakie trzeba aby prawdopodobieństwo procesów EW nie większe od 100% - groźba dla en. 300 GeV



Yoichiro Nambu NOBEL 2008



Za wprowadzenie spontanicznego łamania symetrii do fizyki cząstek elementarnych

Naukowcy, którzy pracowali z Yoichiro Nambu nazywają go wizjonerem, wyprzedzającym swoją epokę. Fizyk Bruno Zumino z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley:

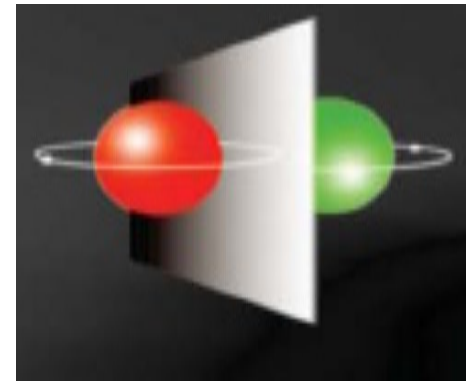
"Wydawało mi się, że jeśli zrozumiem to, nad czym aktualnie rozmyśla Nambu, będę 10 lat do przodu. Więc prowadziłem z nim długie rozmowy. Ale zanim zrozumiałem co powiedział mijało 10 lat".

Spin - przypomnienie

- 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, $\frac{3}{2}$...).
- Fermiony- spin $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$.. bozony - 0,1,2,..
- Prawe i lewe cząstki o spinie $\frac{1}{2}$

Lewe i prawe stany elektronu

- Elektron w stanie L i elektron w stanie R
- W oddz. e-m ważne tylko że elektron ma ładunek el. a nie czy jest L czy R
- W oddz. elektroślabych – tylko stany L
- Symetria P (odbicia) złamana !
- Symetria C: zmiana ładunku el. na przeciwny.



Symetria kombinowana CP prawie zachowana.

- Prawie robi różnicę - wiąże się z brakiem symetrii materia-anymateria we Wszechświecie



Kobayashi i Maskawa



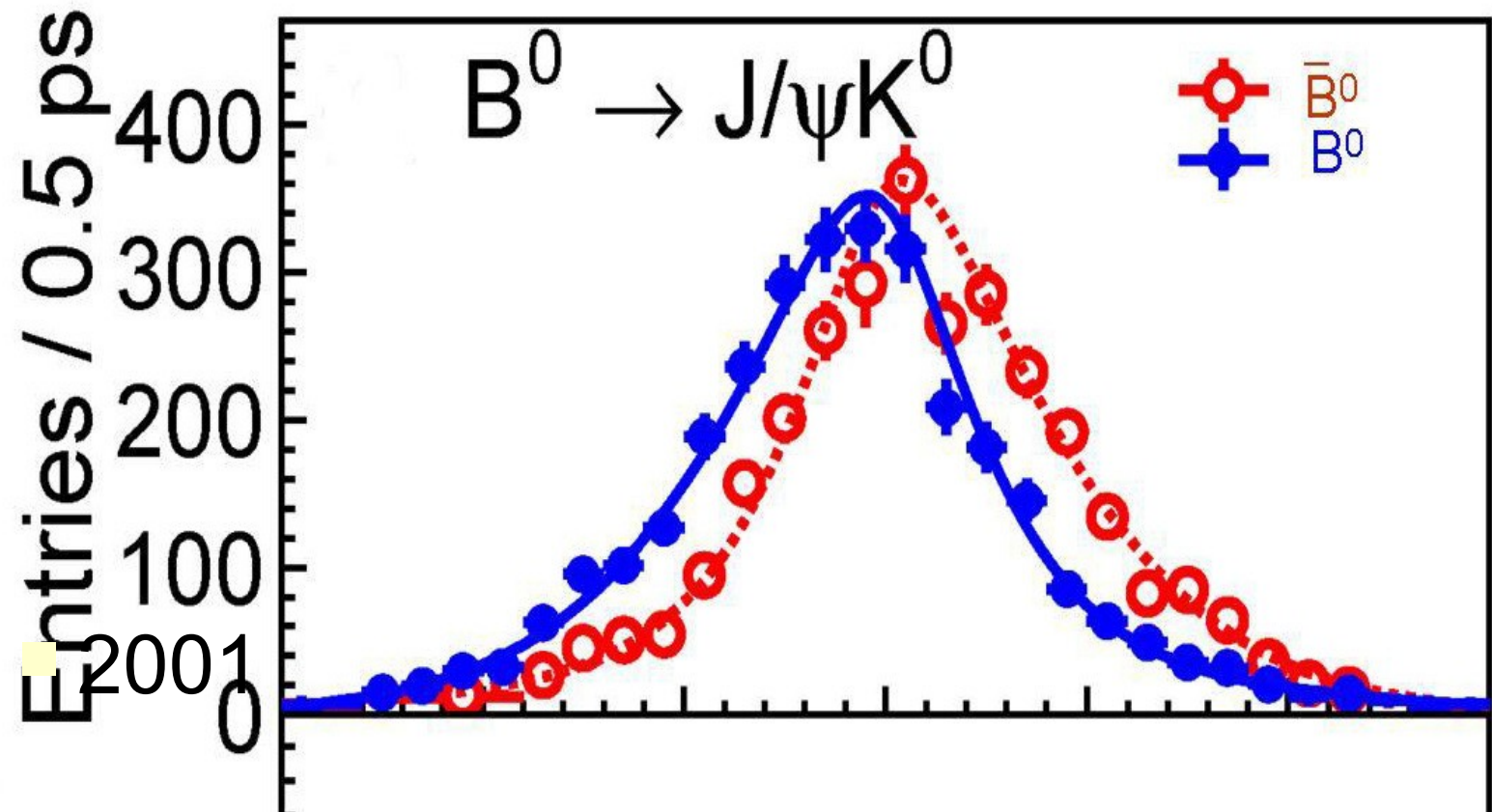
a wyjaśnienie zjawiska naruszenia symetrii między materią i antymaterią, tzw. łamania symetrii CP, zaobserwowanego w rozpadach mezonów K w eksperymencie Fitcha i Cronina w 1964

Kobayashi i Maskawa wykazali w 1973 r., że efekt łamania CP można wyjaśnić, jeżeli w przyrodzie występują trzy pary kwarków.

A znano tylko trzy kwarki (dwa z pierwszej i kwark dziwny z drugiej generacji). Odkrycie w 1977 r. „pięknego” kwarku b z trzeciej generacji uwiarygodniły mechanizm Kobayashiego-Maskawy. Jednak ostateczne jego potwierdzenie wymagało zaobserwowania nowych przejawów łamania CP, zwłaszcza w procesach z udziałem cząstek z kwarkiem b.



Asymetria w rozpadach B i $\bar{B}$



MATERIA - ANTYMATERIA

- Unifikacja – równowaga materii i antymaterii

- Sacharow ~1960:

Na początku Wszechświata jest równo, ale jeśli łamana jest symetria C i CP...

może pojawić się mała nadwyżka materii

- W wyniku ekspansji ten mały efekt doprowadził do stanu obecnego – gdy antymaterię wytwarza się tylko w laboratoriach, no i w promieniowaniu kosmicznym.

Asymptotyczna swoboda

- Dla grup symetrii nieabelowych (nieprzemiennych) $SU(2)$, $SU(3)$

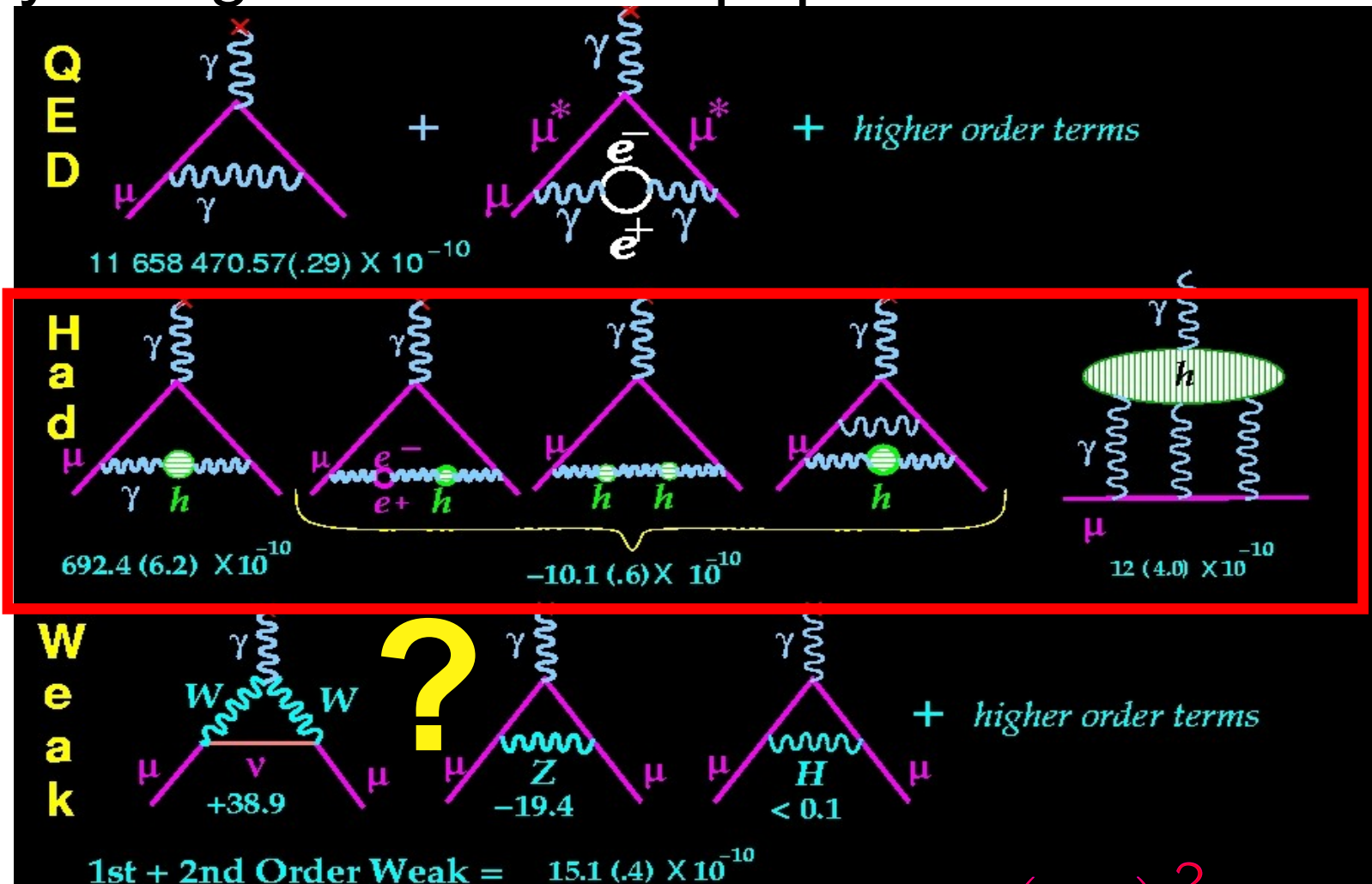
nośniki sił „naładowane” i oddziałują ze sobą

- To powoduje, że siła sprzężeń maleje wraz z wzrostem energii oddziaływania (lub maleniem odległości między cząstkami (odwrotnie dla oddz. el.-magn.) - **asymptotyczna swoboda**
- To dzięki temu kwarki mogą oddziaływać słabo i rachunek zaburzeń możliwy dla LHC
- Ale to też prowadzi do **uwięzienia kwarków** - dlatego w LHC zderzenia protonów a nie kwarków

Model Standardowy w znakomitej zgodności z doświadczeniem

Więcej na następnych wykładach

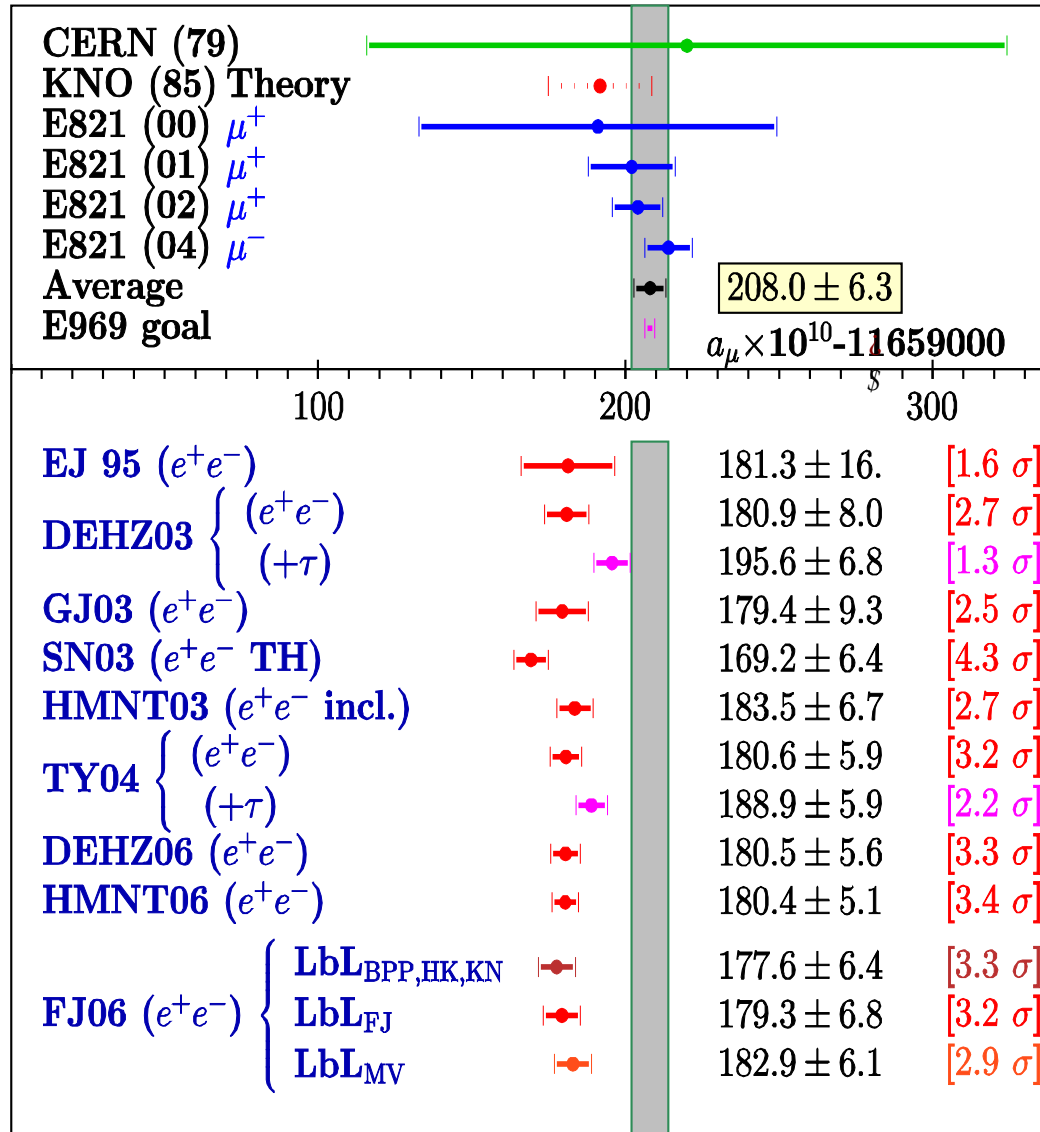
Przewidywania MS dla momentu magnetycznego dla mionu - poprawki kwantowe



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

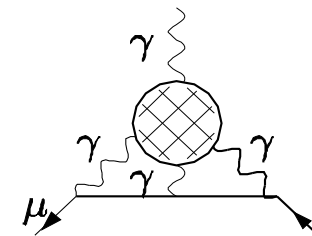
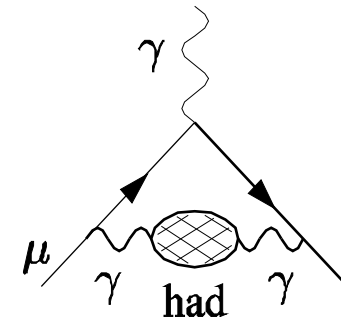
Dane – teoria (MS) = „nowa fizyka”

(Jegerlehner'07)



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

3.2 σ



Problemy Modelu Standardowego

- Wiele parametrow (np.masy)
- Dlaczego trzy rodziny
- Niezerowa masa neutrin
- Problem hierarchii- poprawki kwantowe
 $M_H \ll M_{\text{Planka}} (10^{19} \text{ GeV})$
- Grawitacja?
- Opisuje 4 % wszechświata – brak kandydatów na ciemną materię

Odstępstwa od Modelu? No, i gdzie jest Higgs?

Źródła cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 8

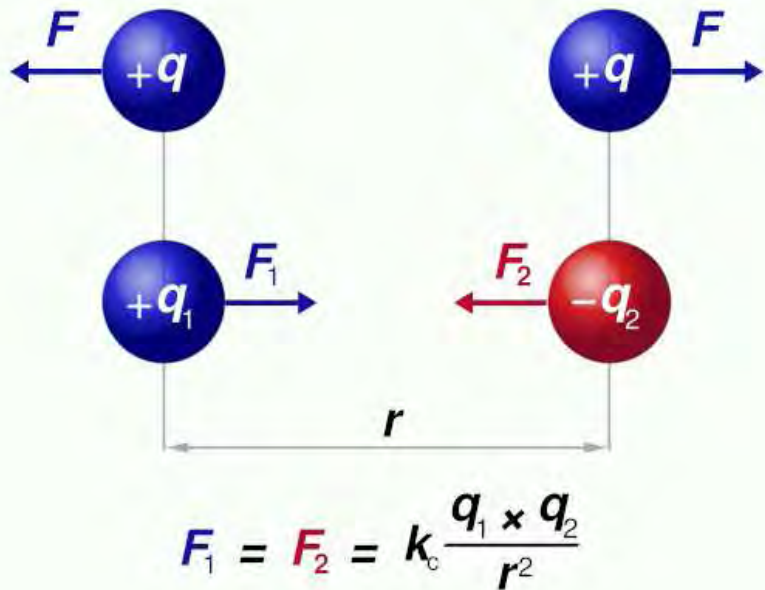
- Wprowadzenie
 - Pole elektryczne i magnetyczne, jednostki
- Naturalne źródła cząstek
 - Źródła promieniotwórcze, promieniowanie kosmiczne
- Akceleratory cząstek
 - Akceleratory elektrostatyczne, liniowe i kołowe
 - Współczesne akceleratory i ich ograniczenia

Wprowadzenie

Pole elektryczne

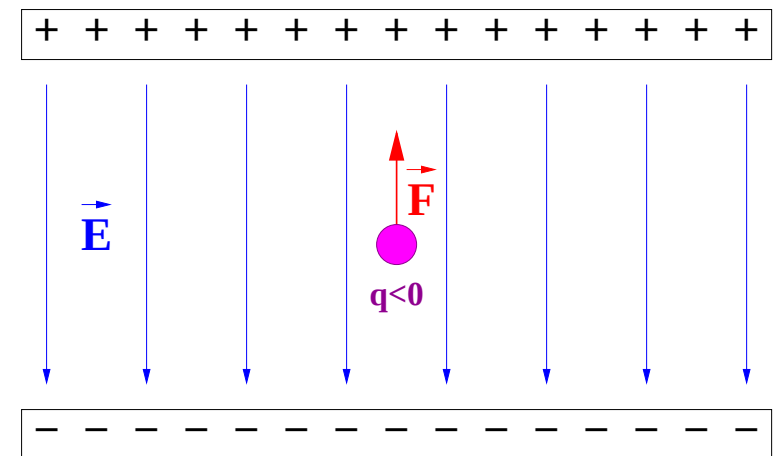
Prawo Coulomba

siła oddziaływania między ładunkami:



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" $\vec{E}$:



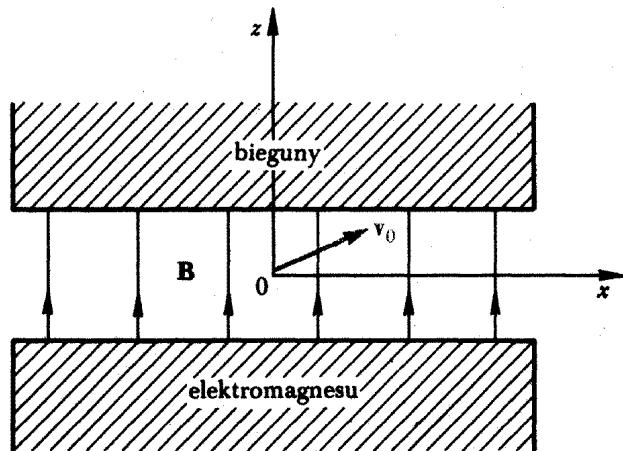
Siła działająca na ładunek q :

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

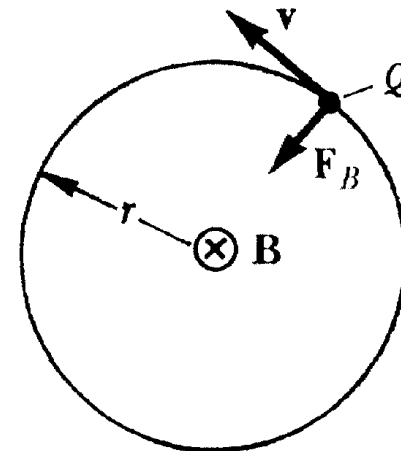
Wprowadzenie

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:

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

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:

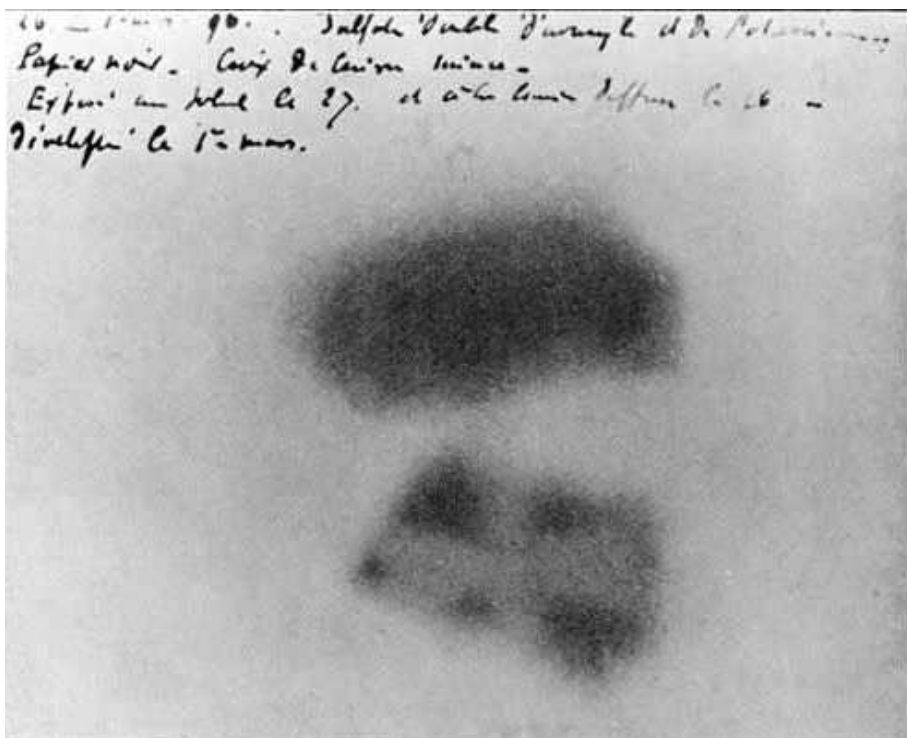
elektron	e	511 keV	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
proton	p	938 MeV	$1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

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

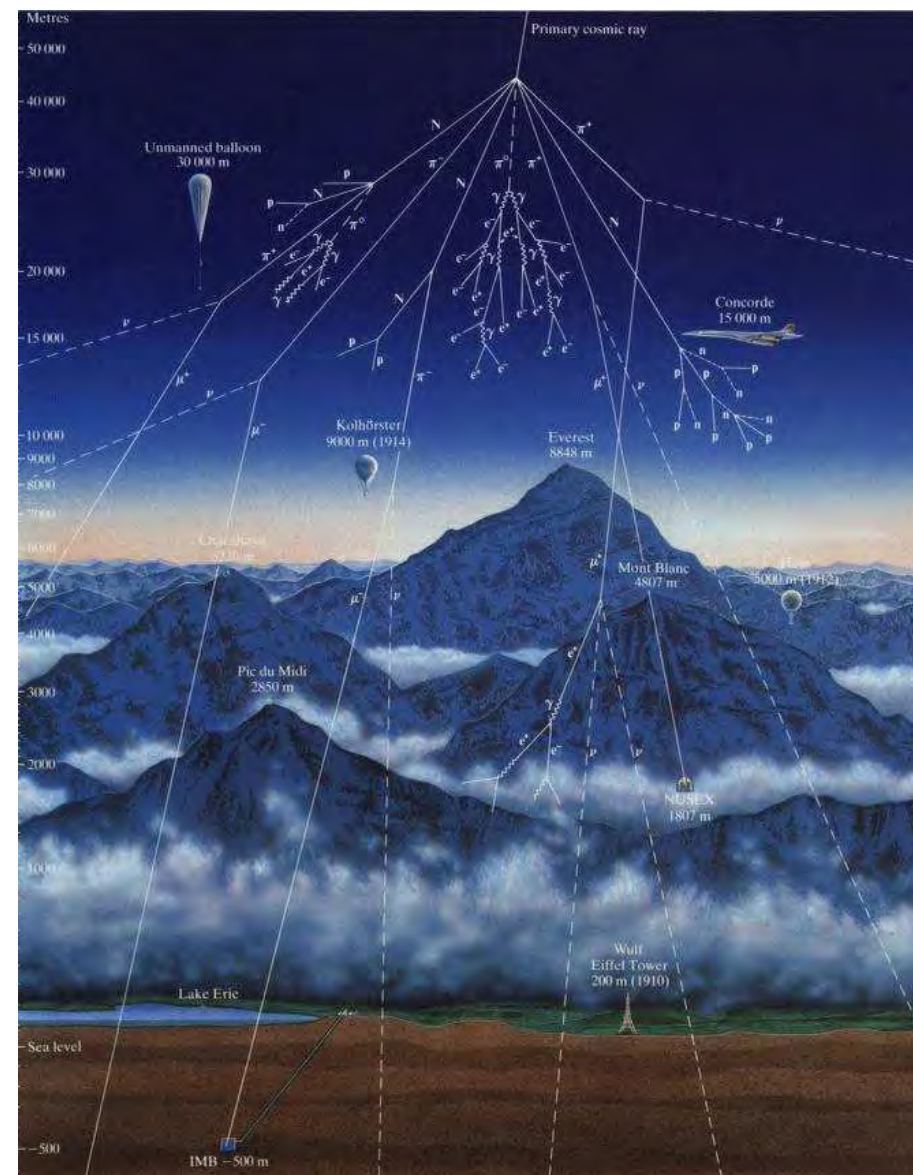
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony** i **kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

Docierają do **powierzchni Ziemi**

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

Łącznie około $180 \text{ na } m^2 \cdot s$

Nie licząc bardzo licznych neutrin...



Promieniowanie kosmiczne

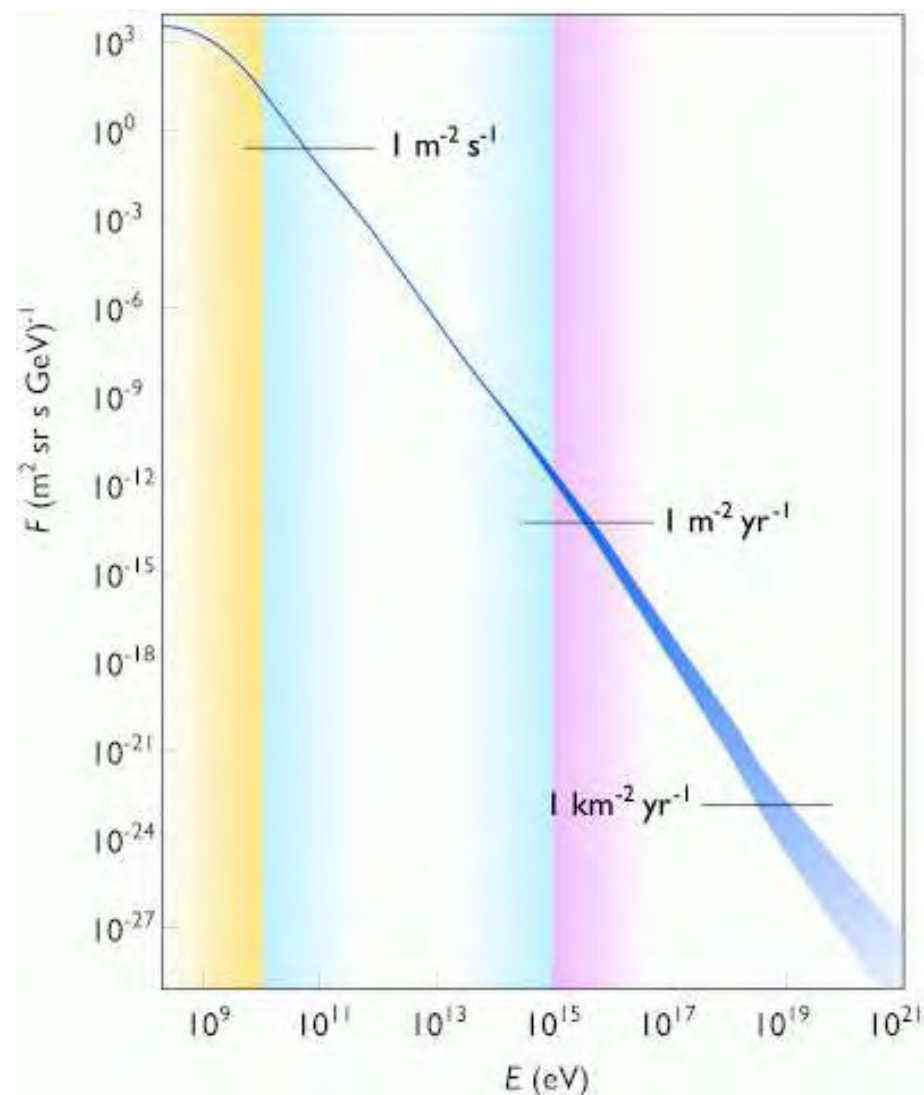
Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

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...



Akcelerator

Dlaczego je budujemy?

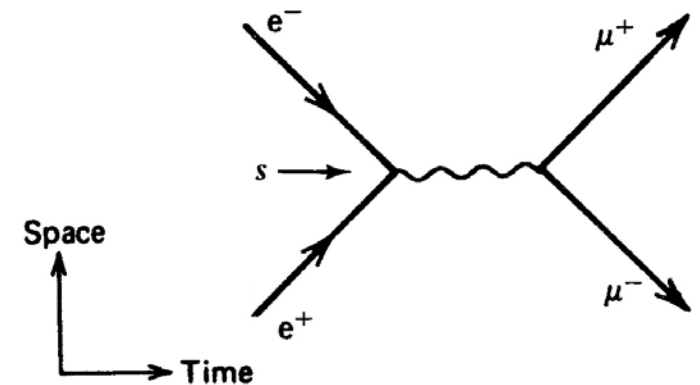
Chcielibyśmy badać oddziaływania cząstek w dobrze kontrolowanych warunkach: znać rodzaj zderzającej się cząstki, jej energię i dokładny moment zderzenia.

Wiemy też, że oddziaływania cząstek zależą od ich energii.

Przykład - **anihilacja** e^+e^- :

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$

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.

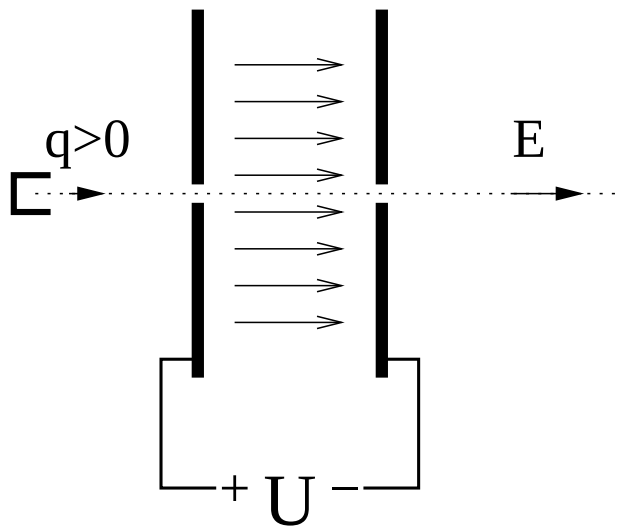
Akcelerator

Akcelerator 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

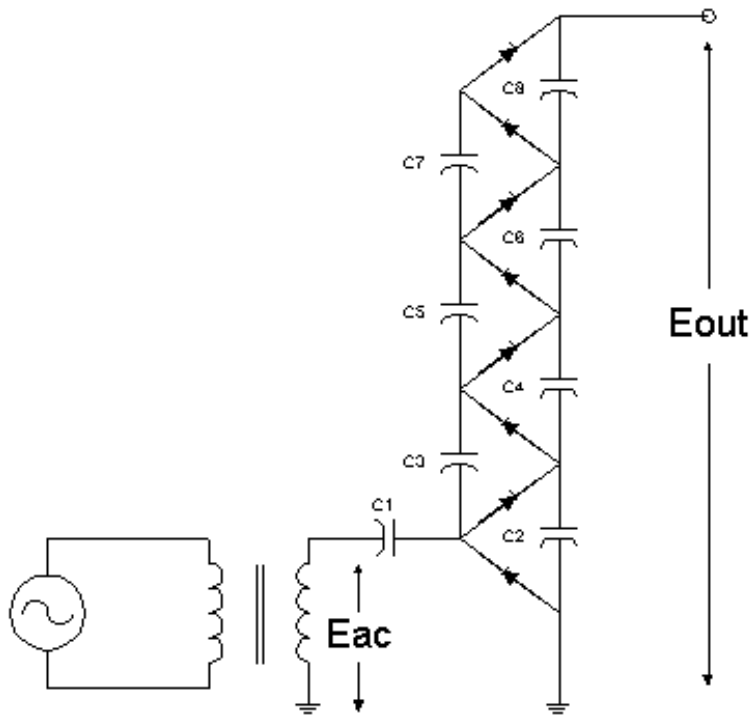
Uzyskiwana energia:

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

Akcelerator

Generator Cockrofta-Waltona

Schemat



Współczesne urządzenie



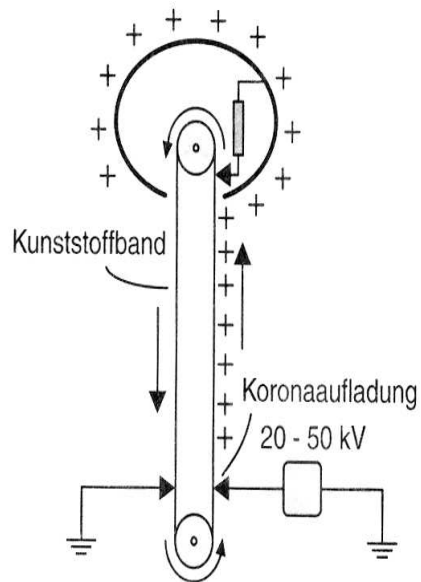
Akcelerator

Generator Van de Graaffa

Schemat

Historia

Współczesne urządzenie



Van-de-Graaff-Generator



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

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

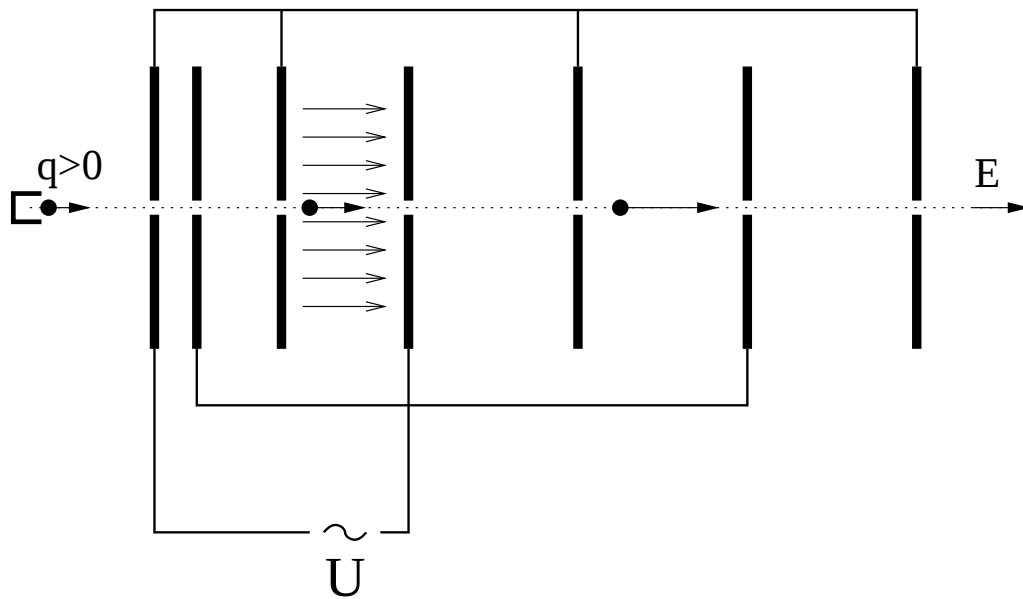
$\Rightarrow$ **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

Akcelerator

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.

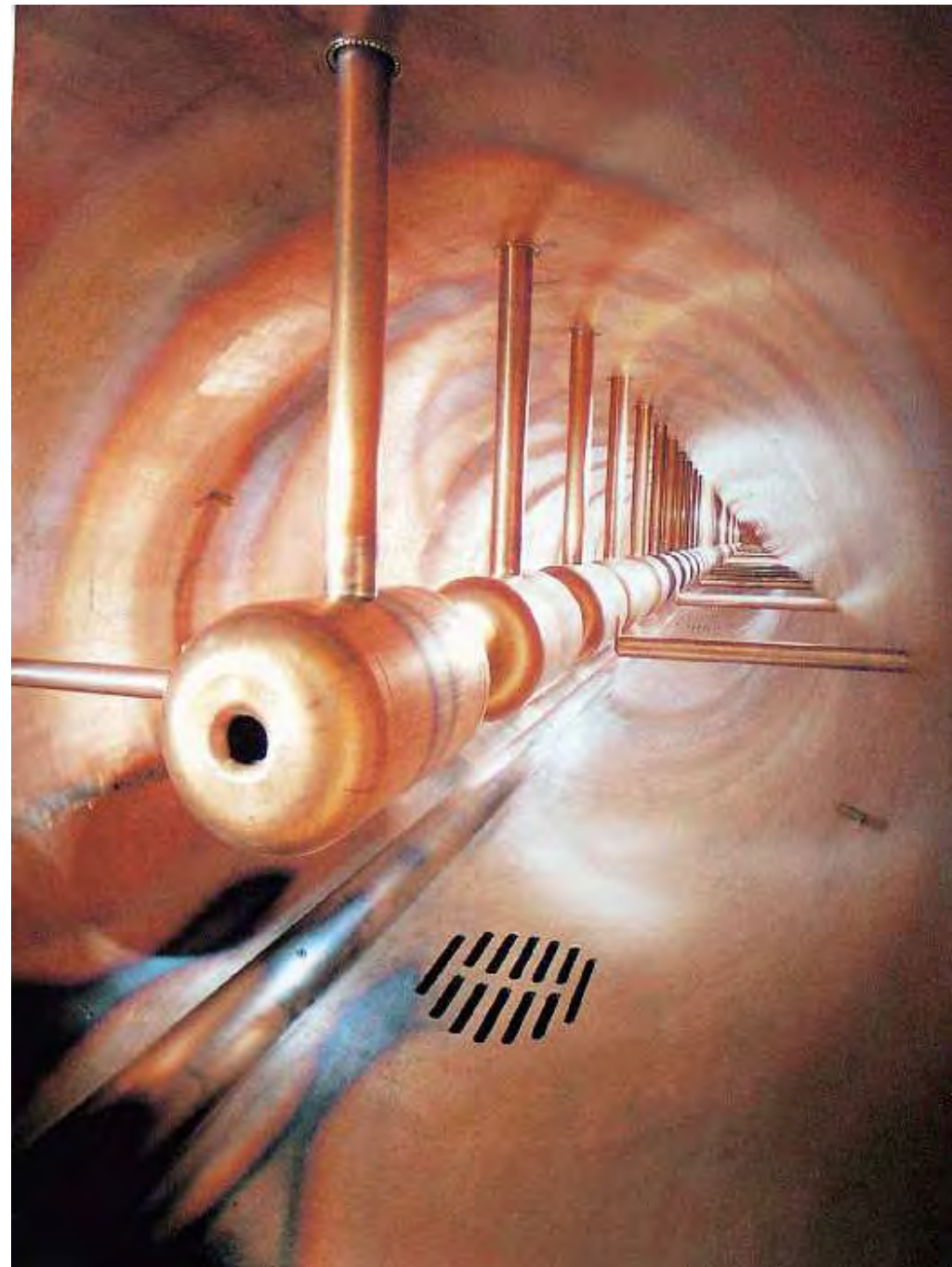
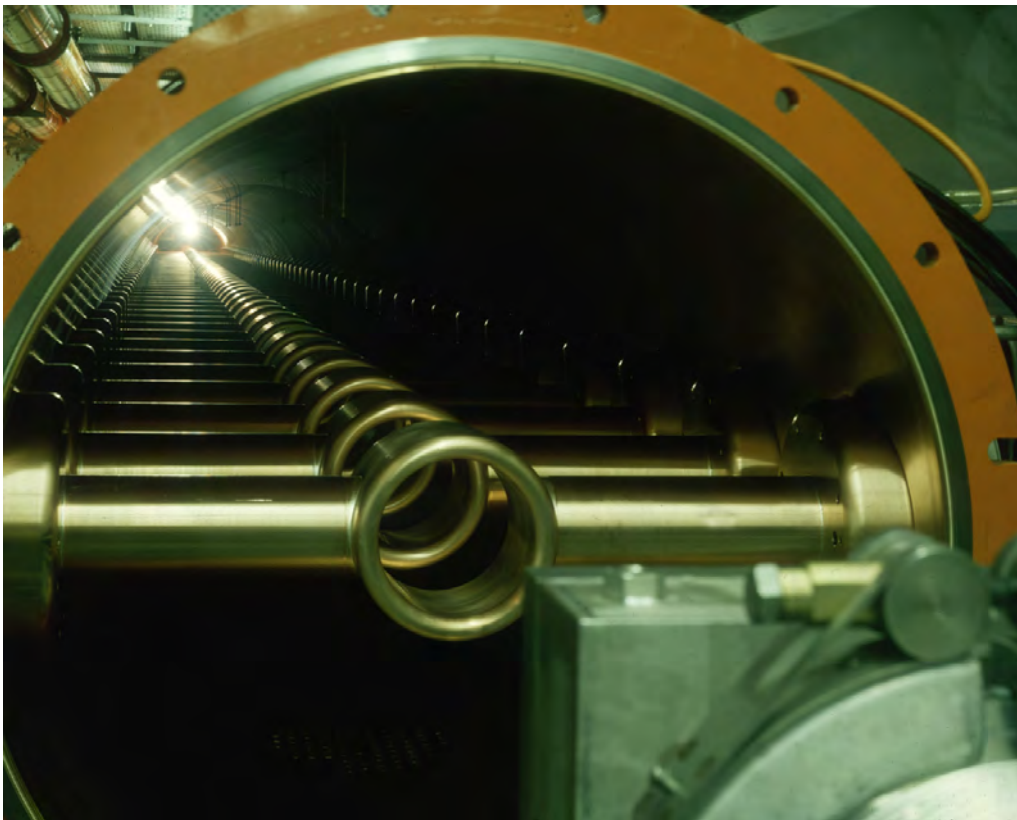
⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

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)

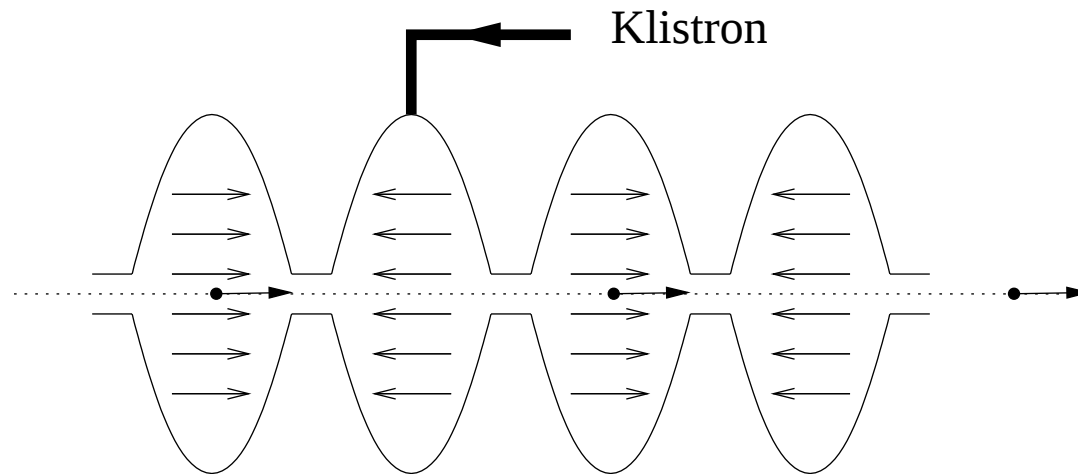
SPS at CERN



Akceleratorzy

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy tzw. wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

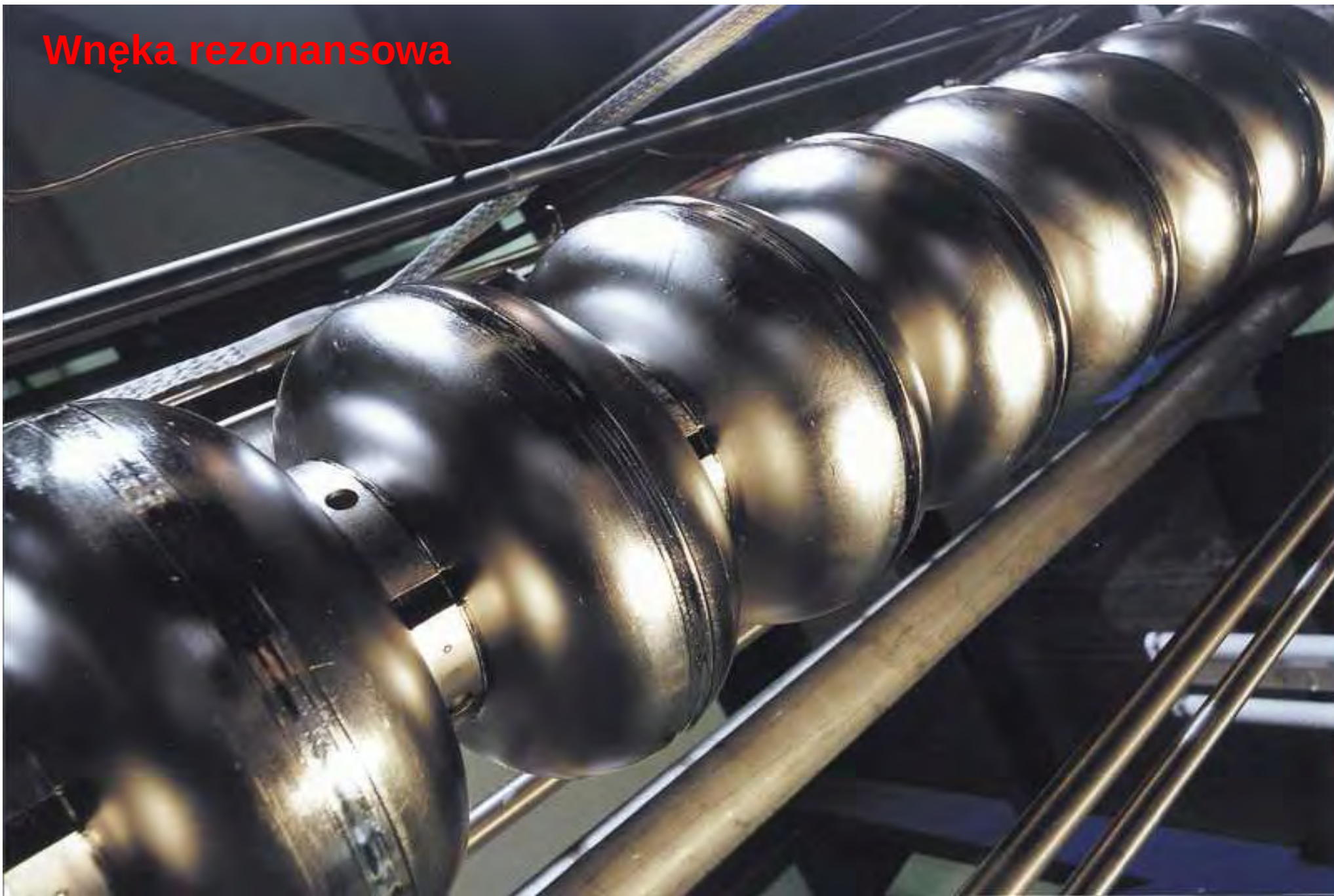
Długość fali/wnęki jest tak dobrana, że cząstka zawsze trafia na pole przyspieszające.

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

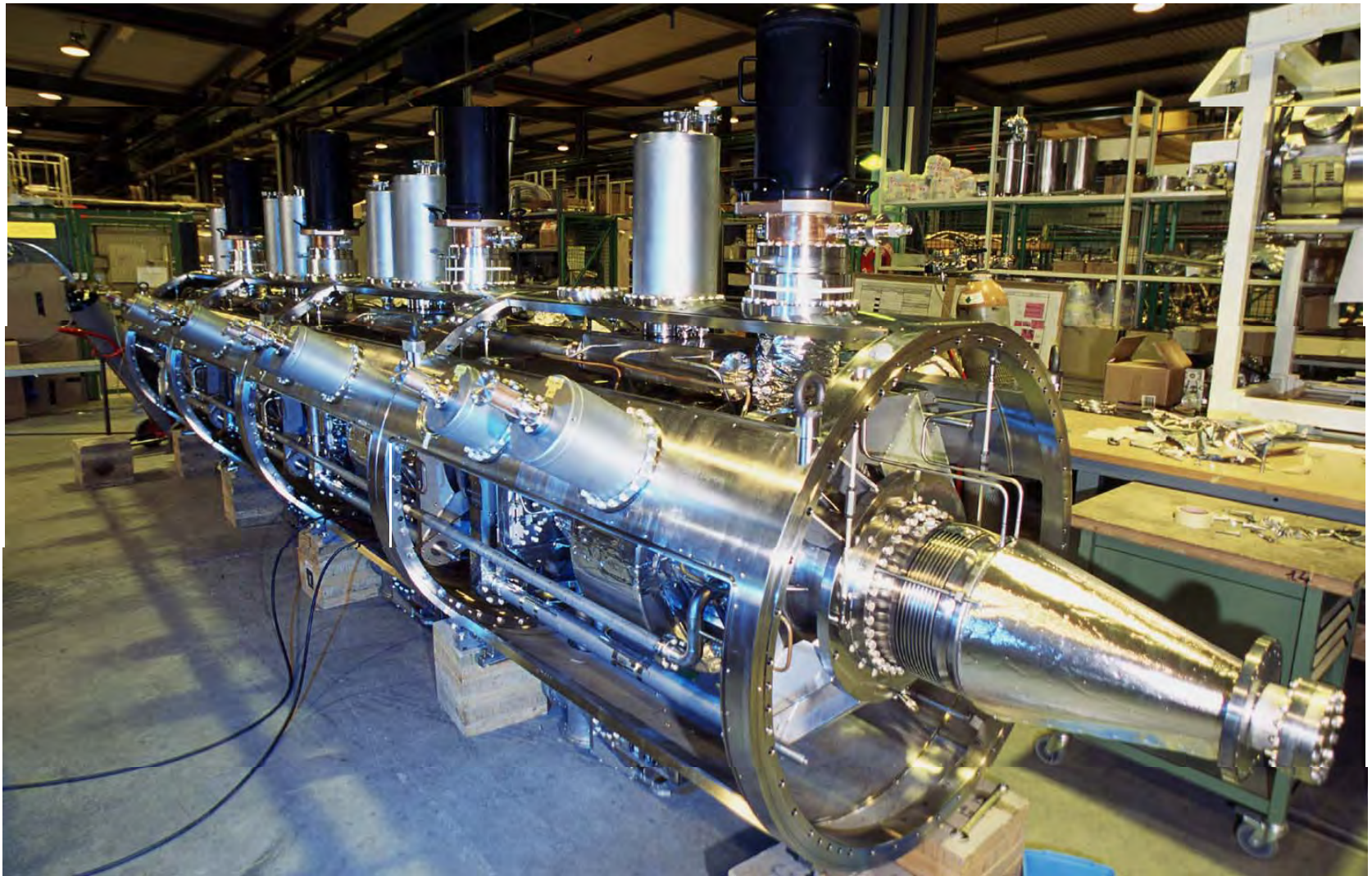


Wnęki nadprzewodzące dla LHC

Częstość pracy 400 MHz

Łącznie 16 wnęk: 8 wnęk na wiązkę

Napięcie przyspieszające: 16 MV/okrażenie



Akcelerator

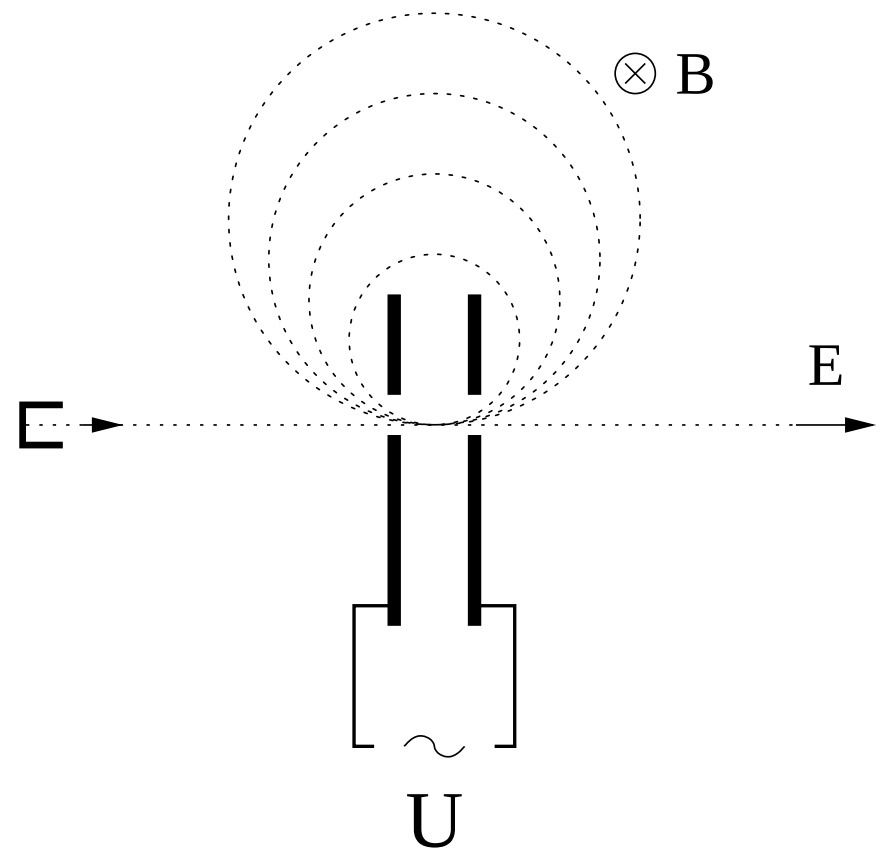
Akcelerator kołowy

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:



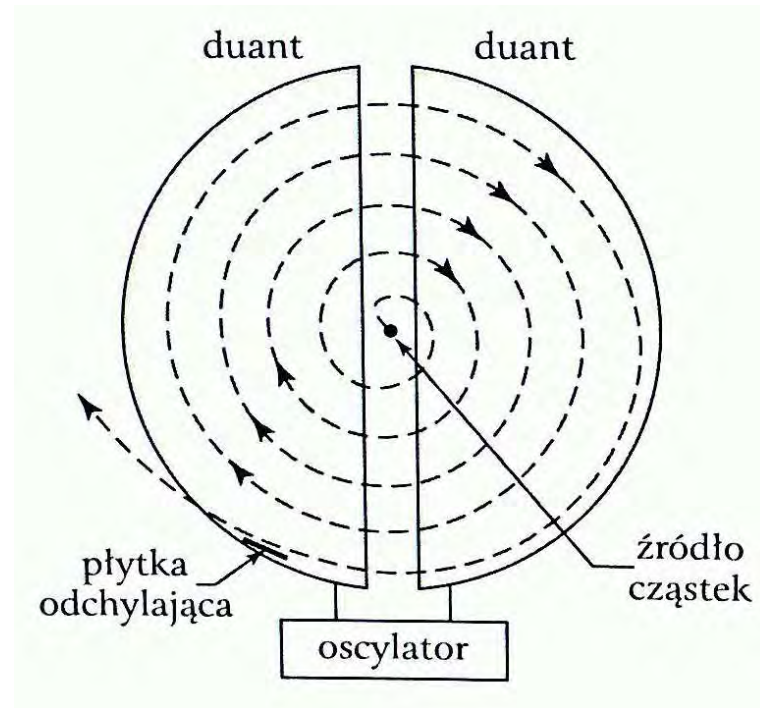
Akcelerator

Cyklotron

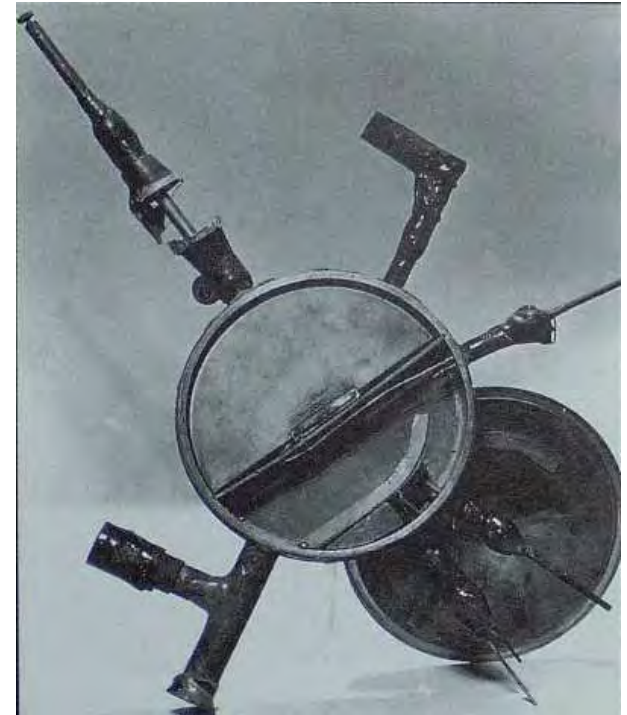
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



Akceleratorzy

Synchrotron

1955

Rosnące pole magnetyczne
utrzymuje cząstki na stałej
orbicie



LHC Tunnel view



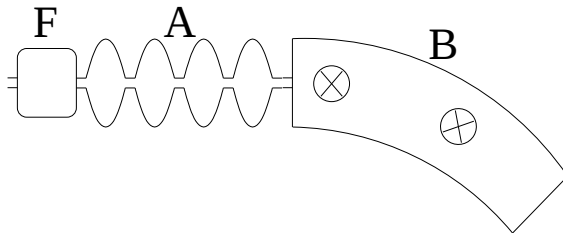
Akcelerator

Akcelerator kołowy

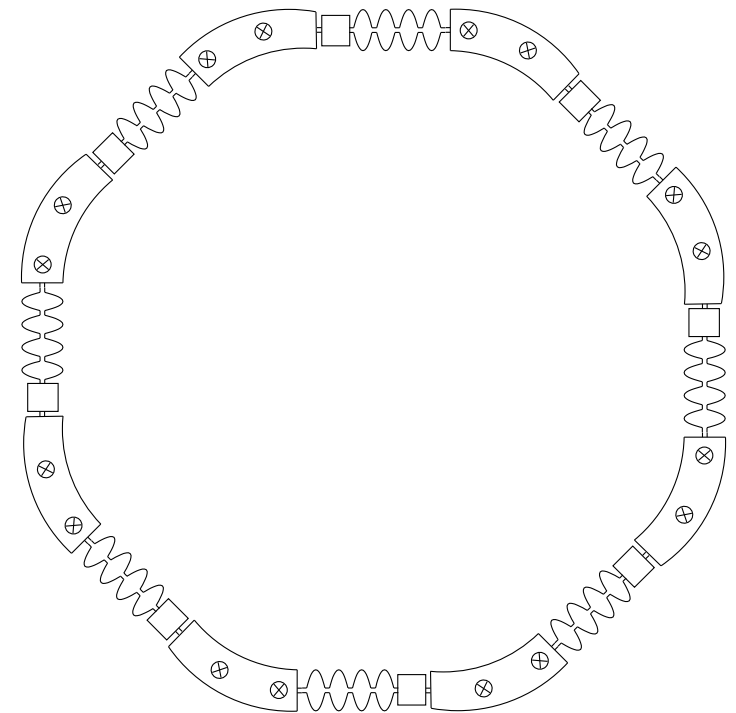
W praktyce akcelerator kołowy zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

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



Schemat akceleratora:



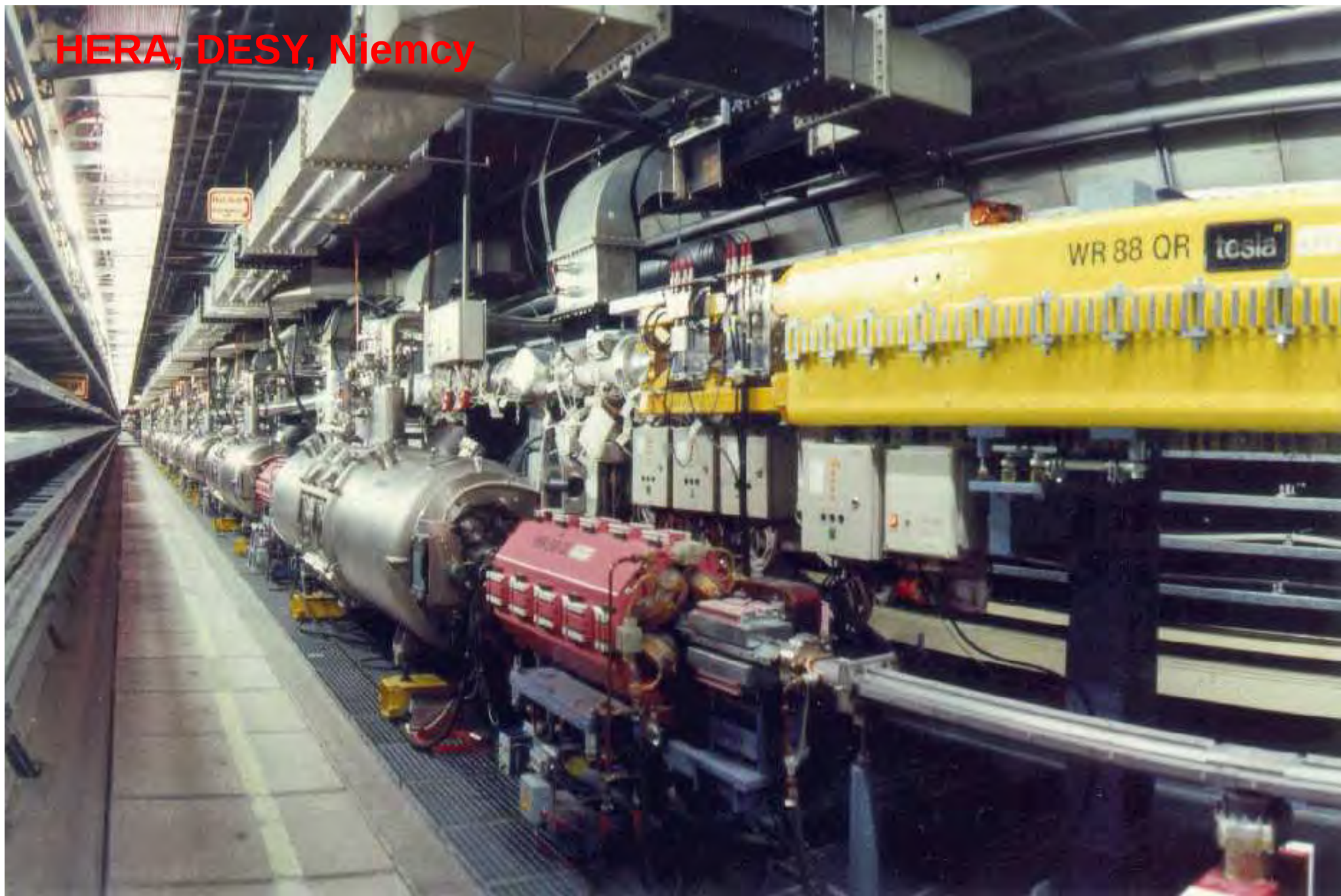
Ogniskowanie wiązki

kierunek poziomy

Do ogniskowania wiązki wykorzystujemy magnesy kwadrupolowe (czterobiegunowe).
Pojedynczy magnes ogniskuje wiązkę albo w poziomie albo w pionie. Układ wielu magnesów może utrzymać wiązkę zogniskowaną w obu płaszczyznach.

kier. pionowy

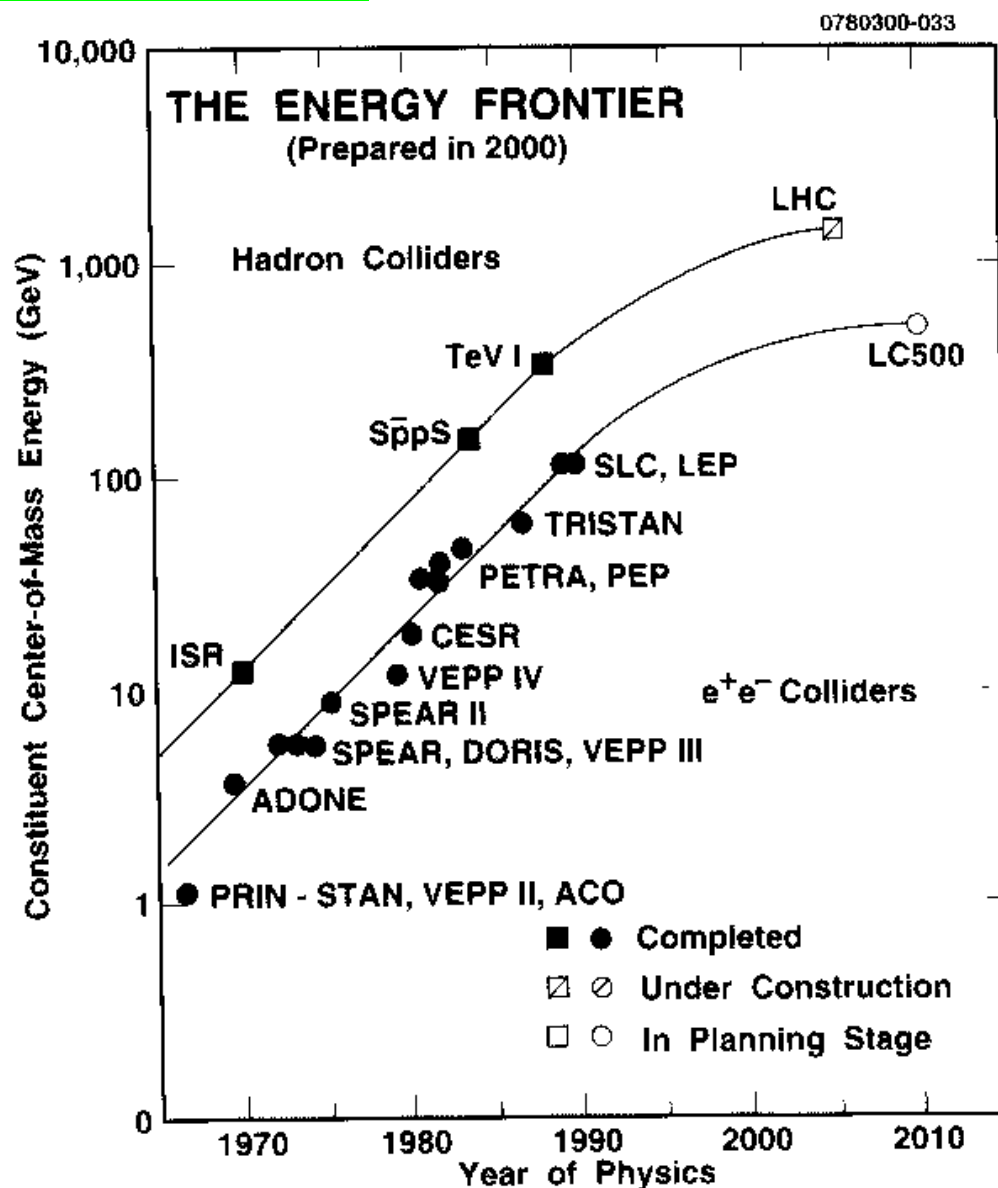
HERA, DESY, Niemcy



Akceleratorzy

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

Niestety, mechanizm przyspieszania cząstek pozostał niezmieniony - akceleratorzy muszą być coraz większe i coraz... kosztowniejsze.



Akceleratorzy

Największe akceleratorzy

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



Akceleratorzy

Ograniczenia

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

Dlaczego !?

Co ogranicza energie uzyskiwane w akceleratorach ?

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

Pole magnetyczne musi rosnąć 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"

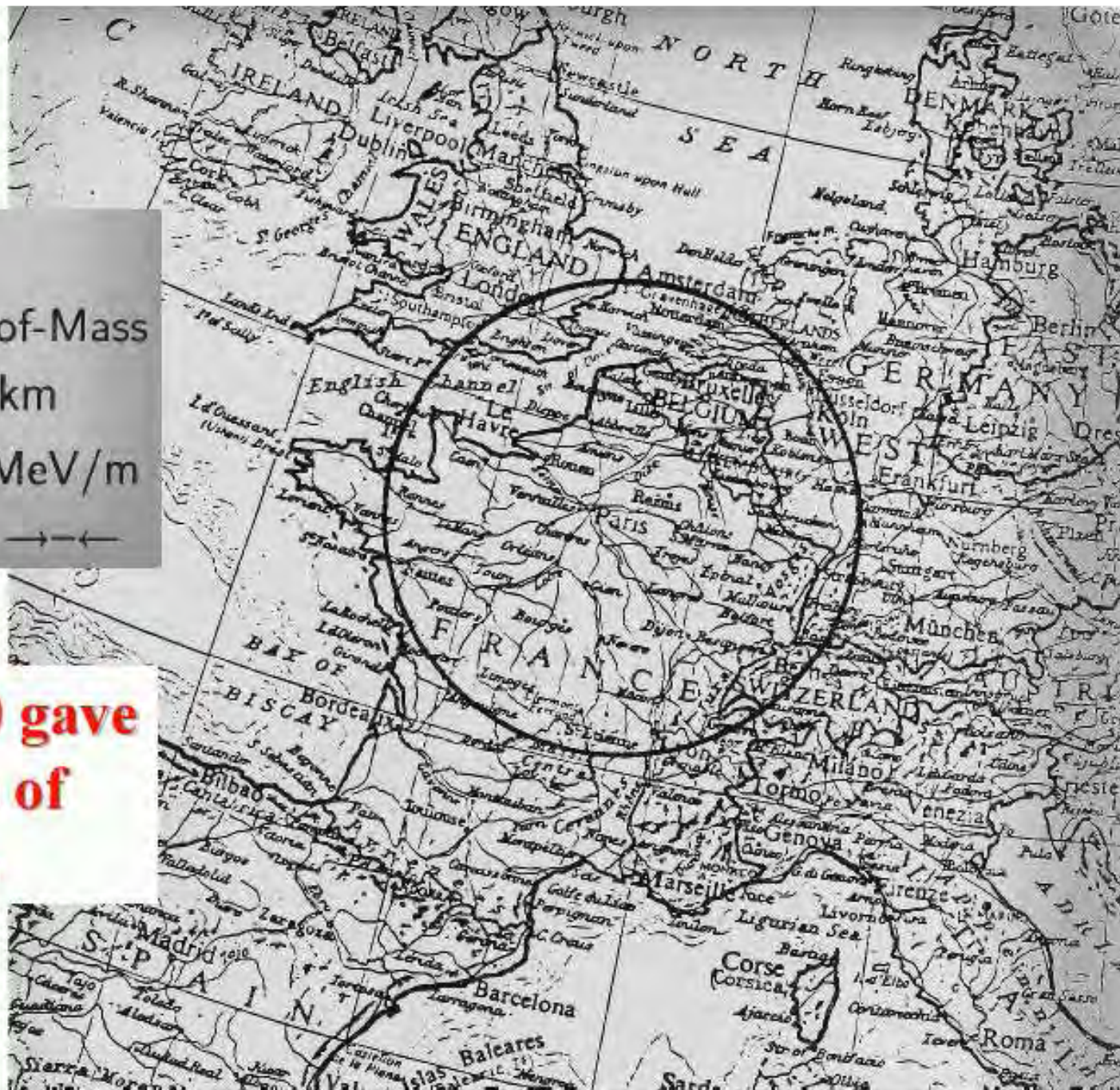
2 TeV in Center-of-Mass

Diameter ≈ 900 km

Linear Collider at 50 MeV/m

Length = 40 km $\rightarrow \leftarrow$

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



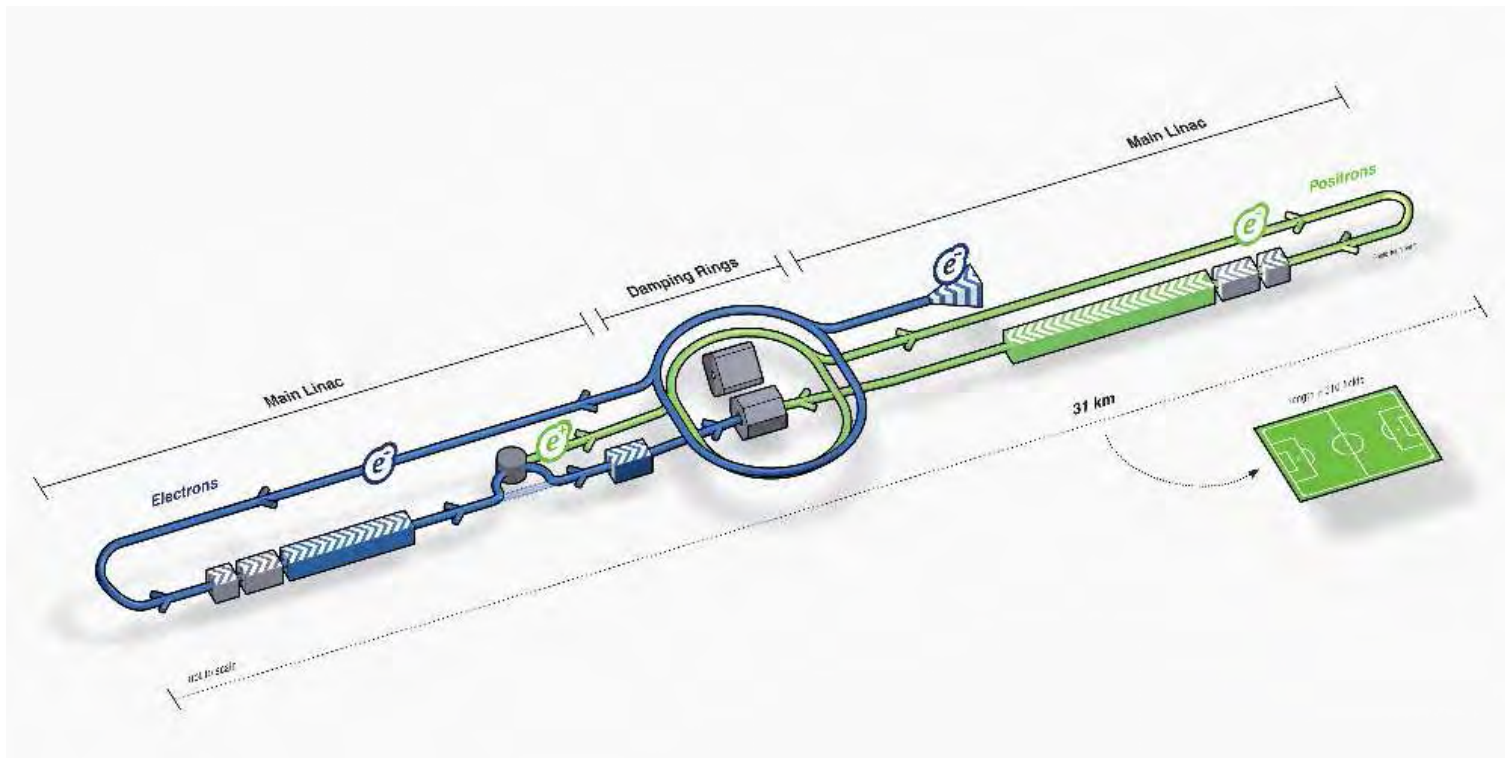
Akceleratory

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

Świetłość

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

Wraz ze wzrostem energii zderzenia potrzebujemy coraz większych świetności!

Świetność zależy od:

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

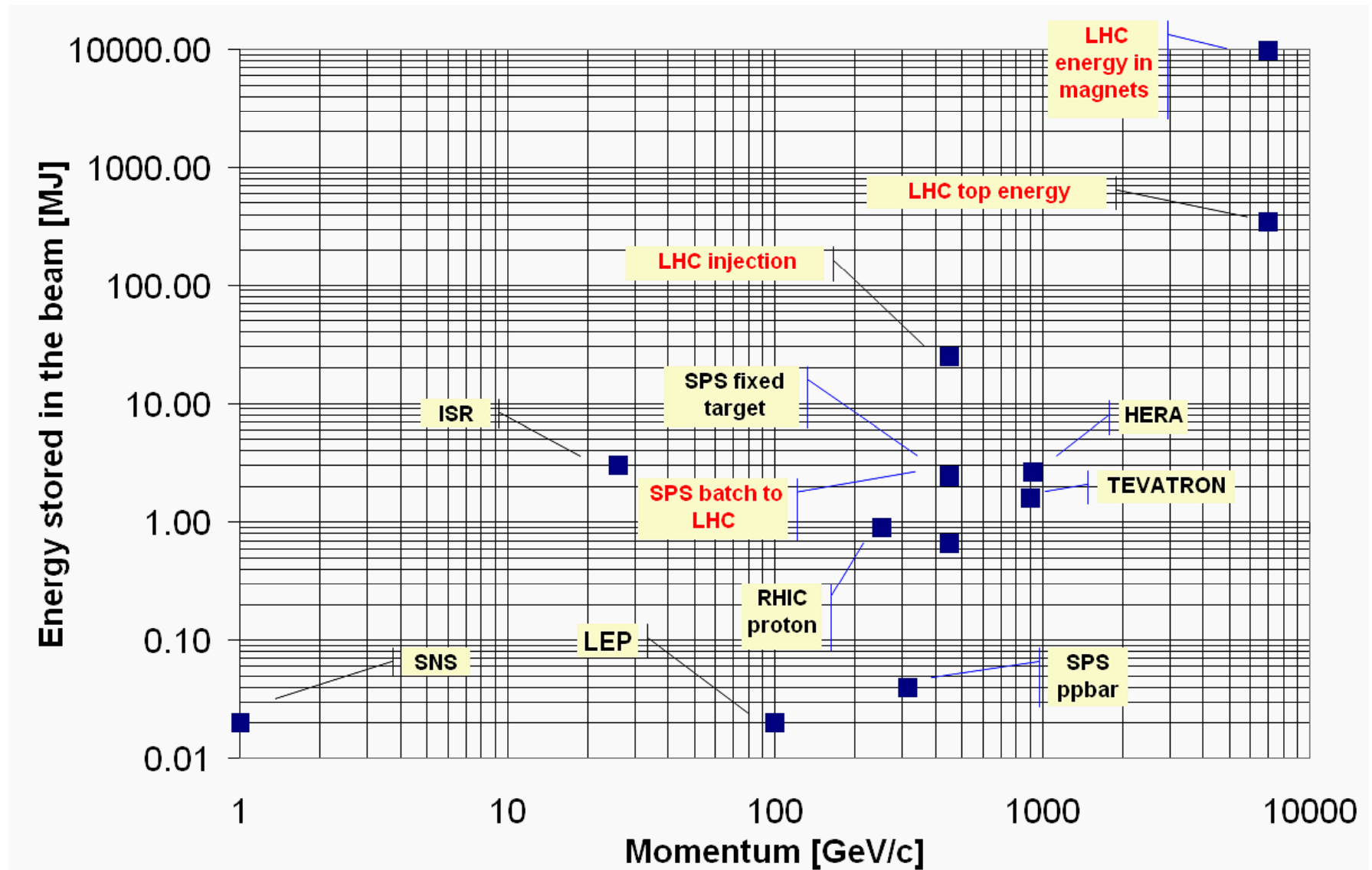
Problem zwłaszcza w akceleratorach liniowych: po jednym “przecięciu” wiązka tracona

⇒ konieczne jest uzyskanie bardzo małych rozmiarów poprzecznych wiązek.

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

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

Zmagazynowana Energia



Comparison...

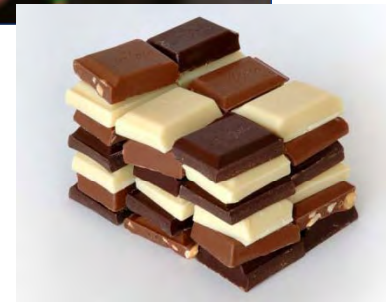
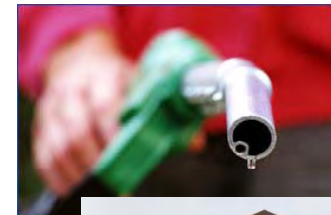
The energy of an A380 at 700 km/hour corresponds to the energy stored in the LHC magnet system :

Sufficient to heat up and melt 12 tons of Copper!!



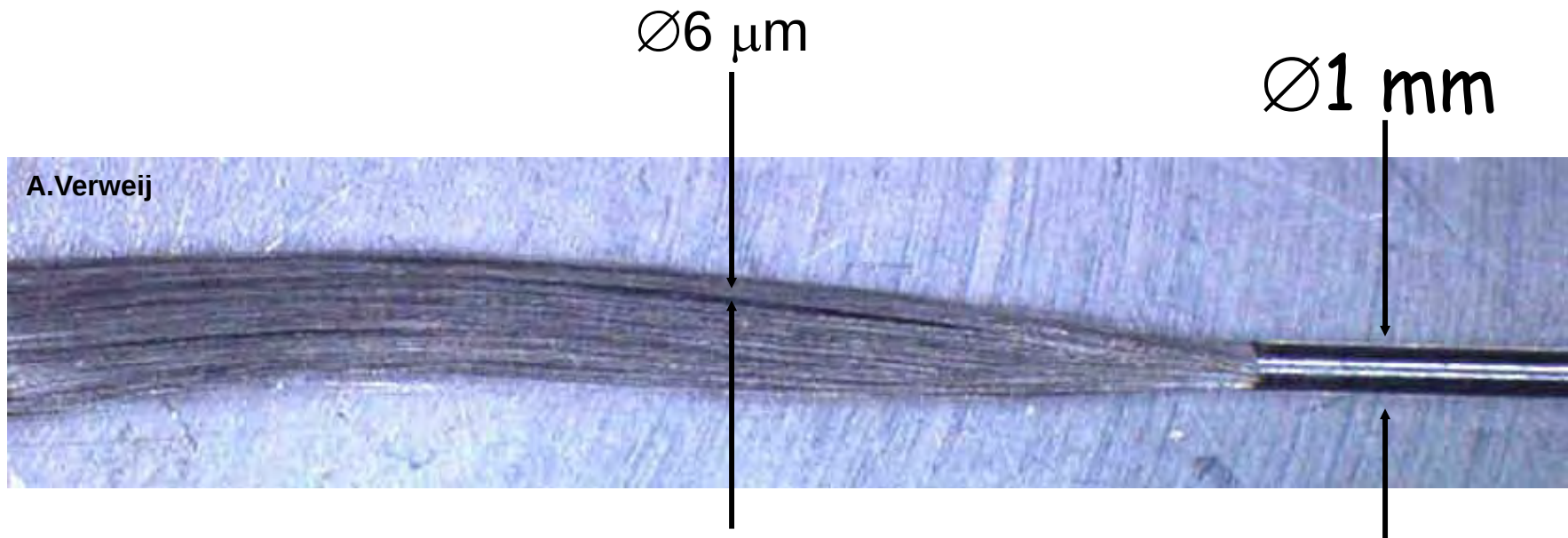
The energy stored in one LHC beam corresponds approximately to...

- 90 kg of TNT
- 8 litres of gasoline
- 15 kg of chocolate

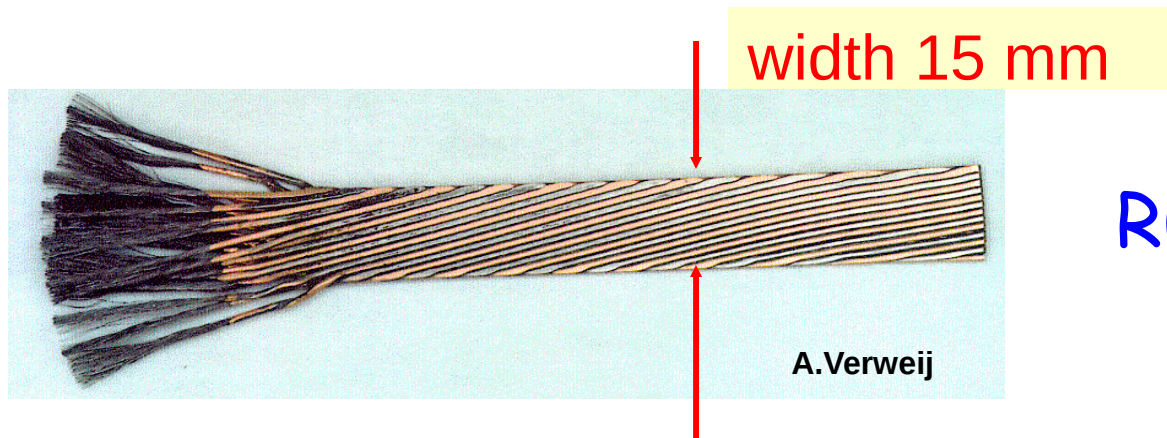


It's how ease the energy is released that matters most !!

The superconducting cable



Typical value for operation at 8T and 1.9 K: 800 A



Rutherford cable

If it does not work...

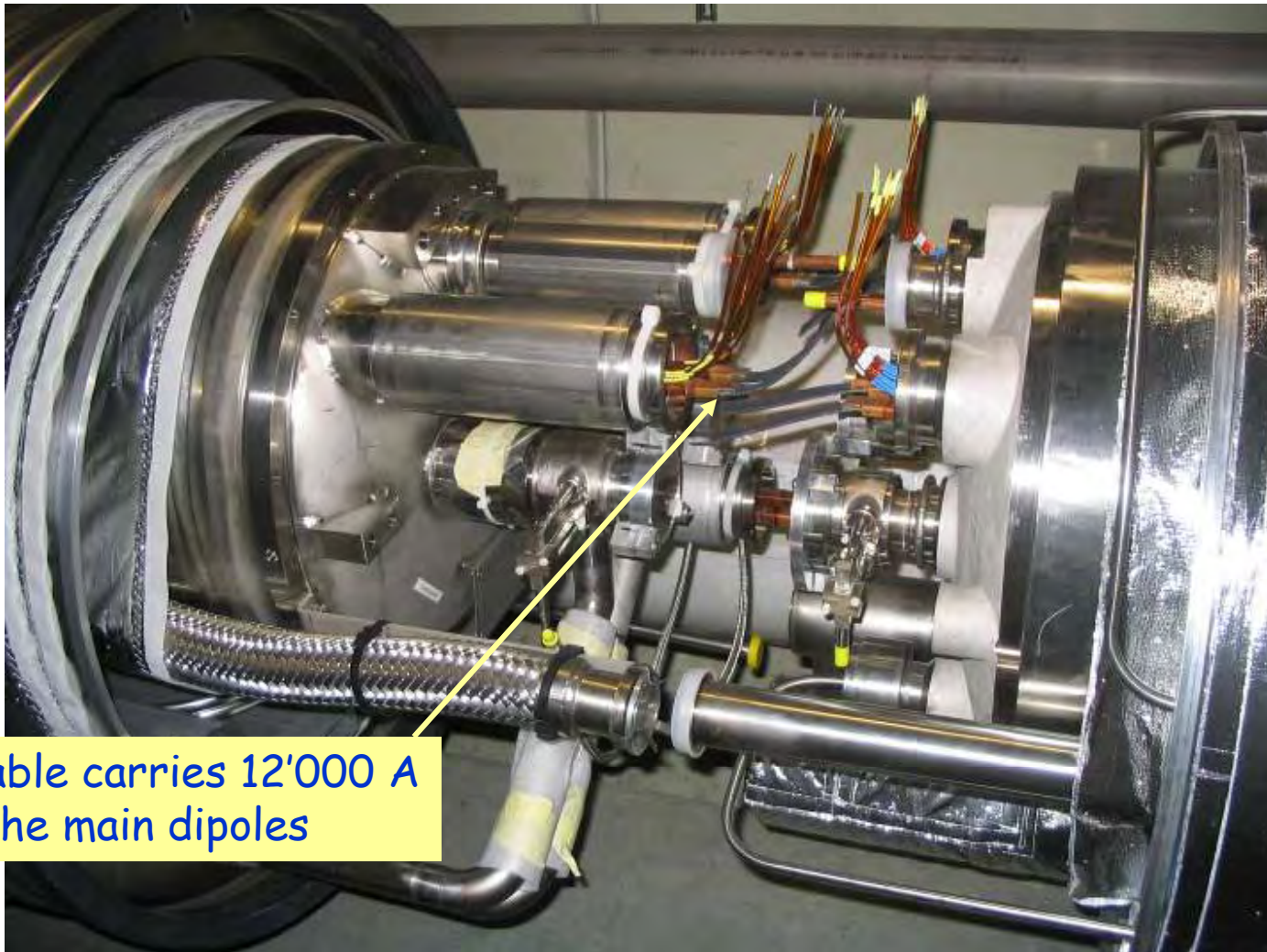


During magnet testing the 7 MJ stored in one magnet were released into one spot of the coil (inter-turn short)

P.Pugnat

Complex interconnects

Many complex connections of super-conducting cable that will be buried in a cryostat once the work is finished.



This SC cable carries 12'000 A for the main dipoles

Awaria LHC

Wadliwy kontakt między dwoma magnesami doprowadził do utraty nadprzewodnictwa na złączu

- => wydzielanie dużej ilości ciepła
- => wyparowanie dużej objętości helu
- => eksplozję kriostatu (zbyt małe zawory bezpieczeństwa)



Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 9: Współczesne eksperymenty

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Detekcja cząstek

- Przypomnienie
 - Kolajdery cząstek
 - Podstawowe typy detektorów
- Budowa detektora uniwersalnego (hybrydowego)
 - zasada budowy
 - przykładowe konstrukcje
- Co rejestrują detektory
 - Co jest obserwowanym wynikiem zderzenia?
- 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



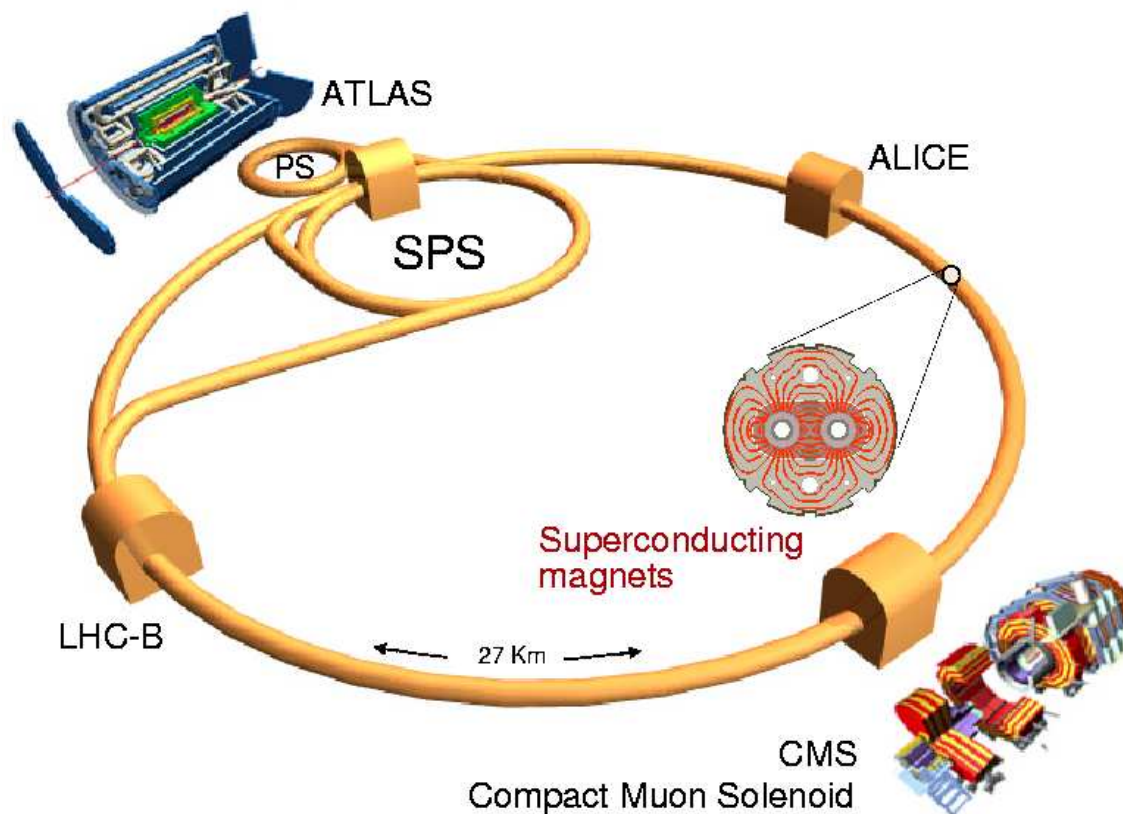
Kolajdery

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 Higgsa **na godzinę** !

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

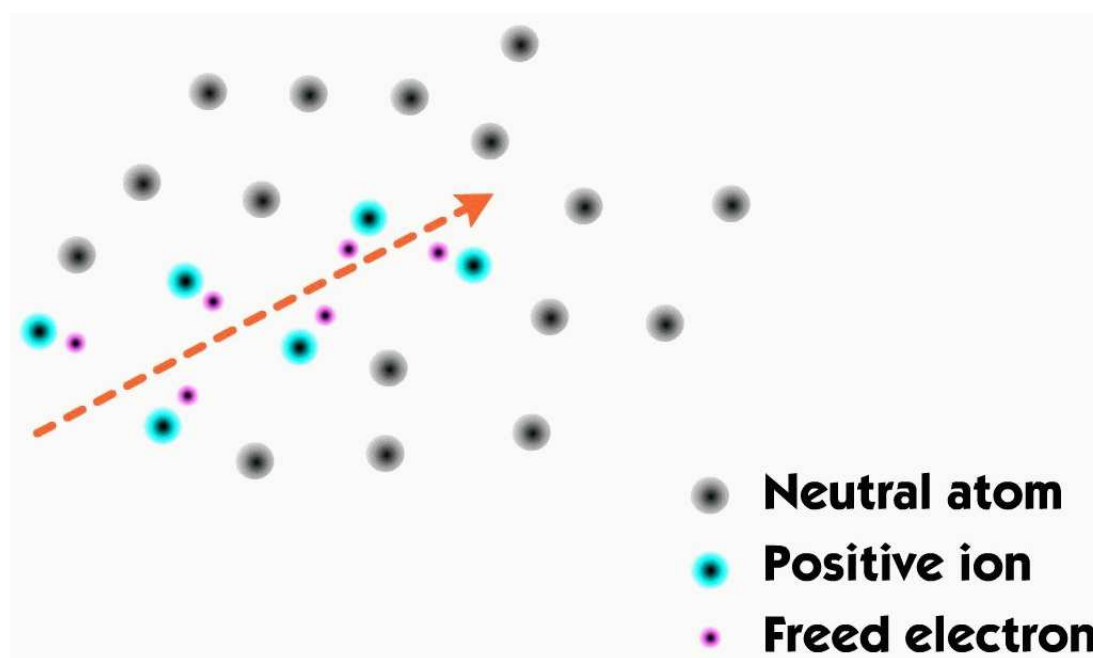
The Large Hadron Collider (LHC)



Detekcja cząstek

Jonizacja

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



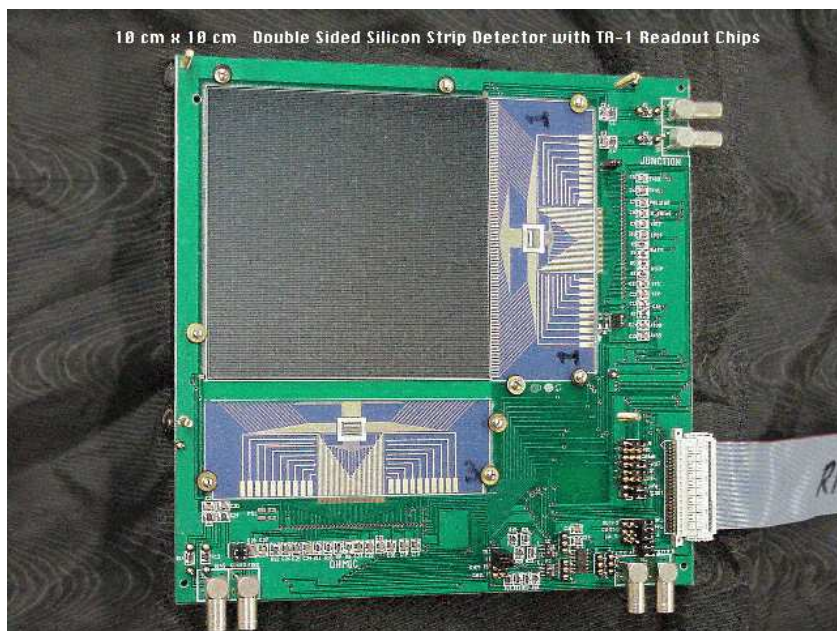
Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii “wybijając” je z atomów.

Detekcja cząstek

Detektory półprzewodnikowe

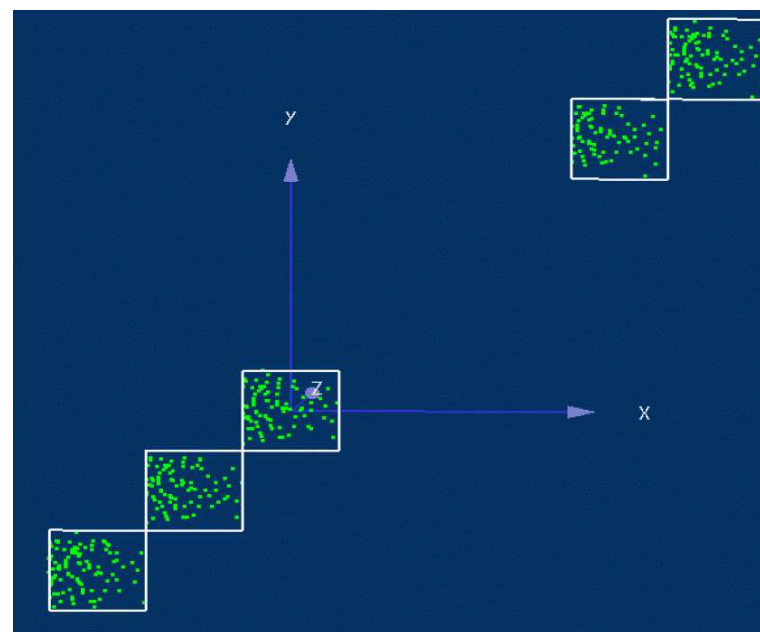
Coraz powszechniej używane.

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...

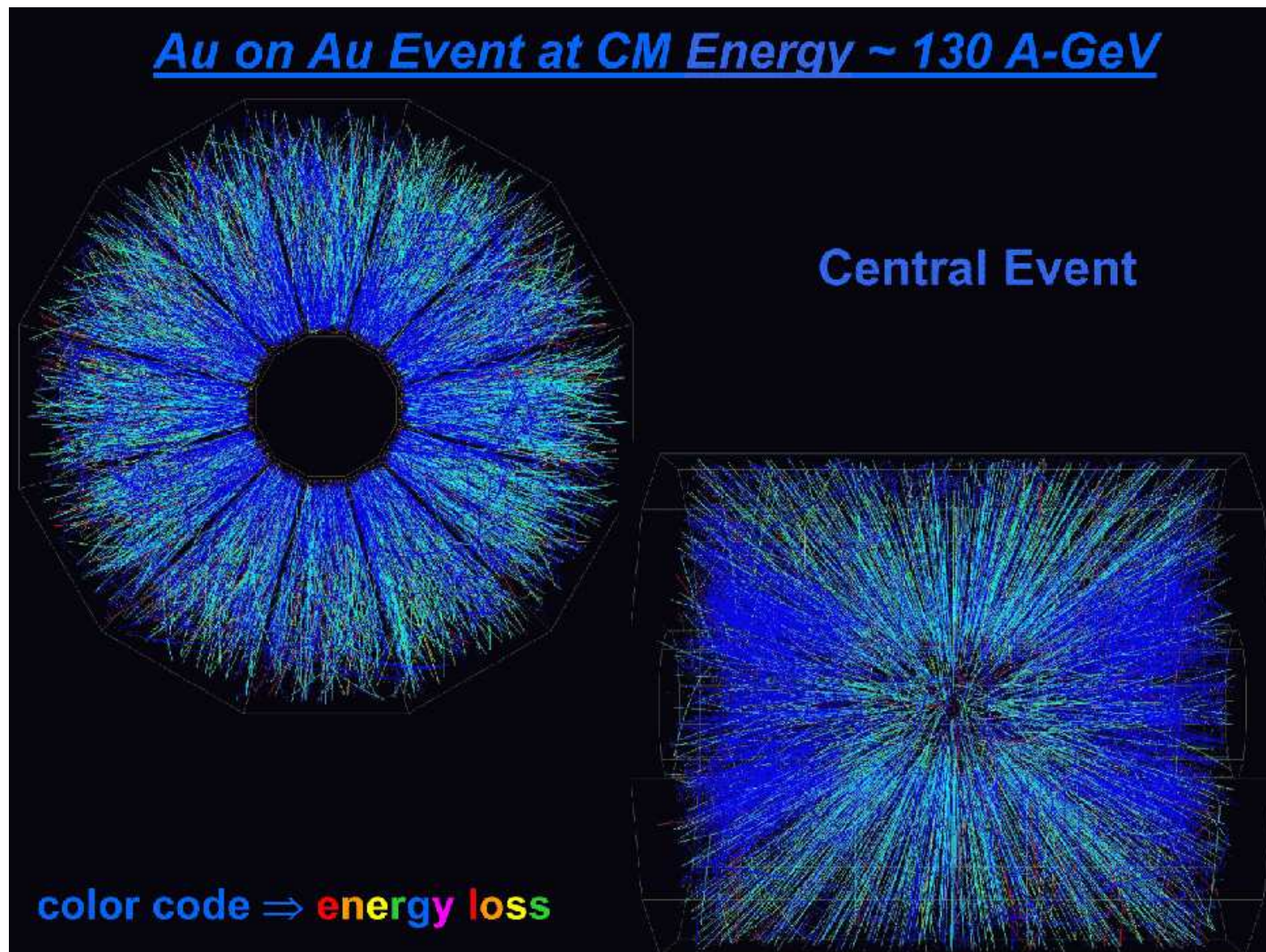
Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich
jonów

detektor
STAR
przy RHIC



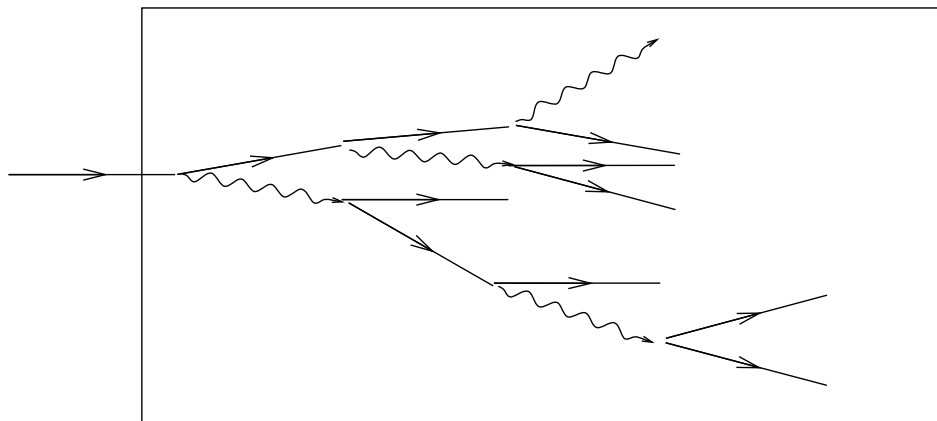
Detekcja cząstek

Kalorymetry

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

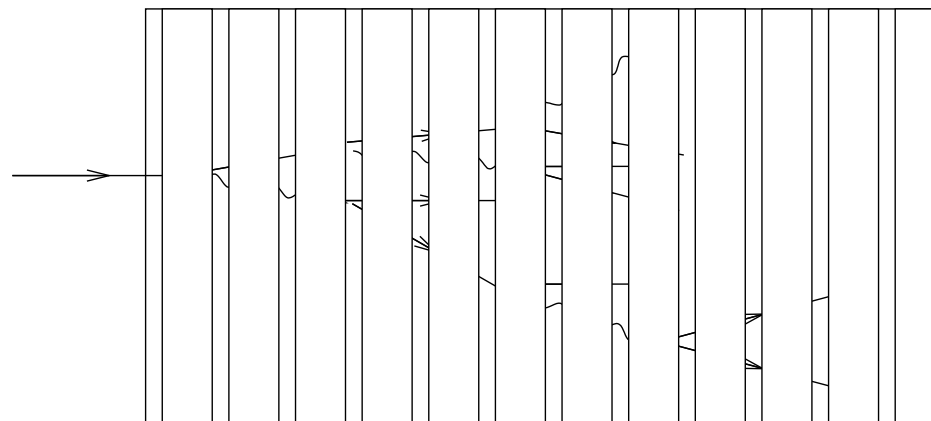
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntylatora

Kalorymetr próbkujący

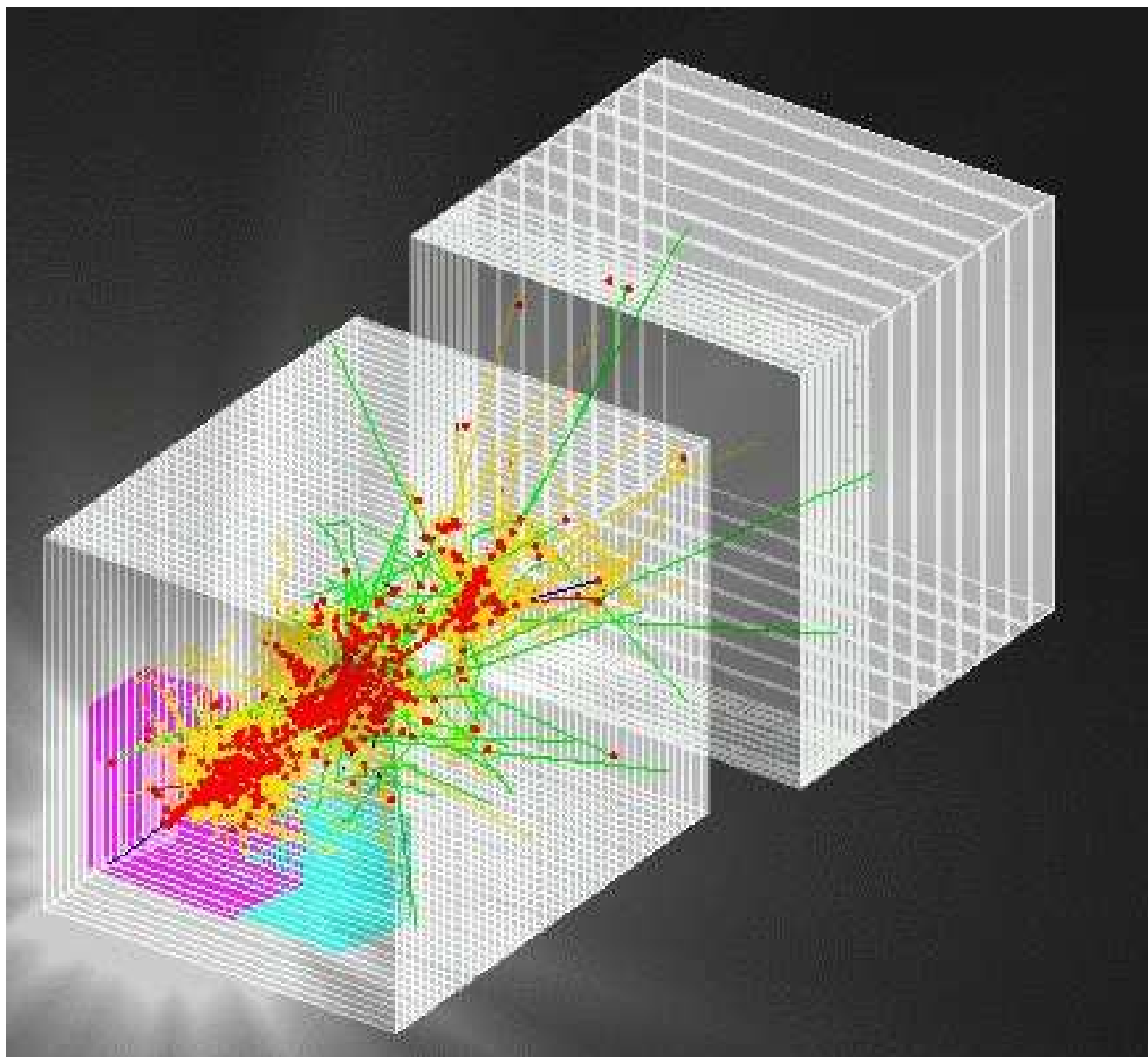


warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Detekcja cząstek

Kalorymetry

Symulacja rozwoju
kaskady hadronowej
(pomiar energii protonu)



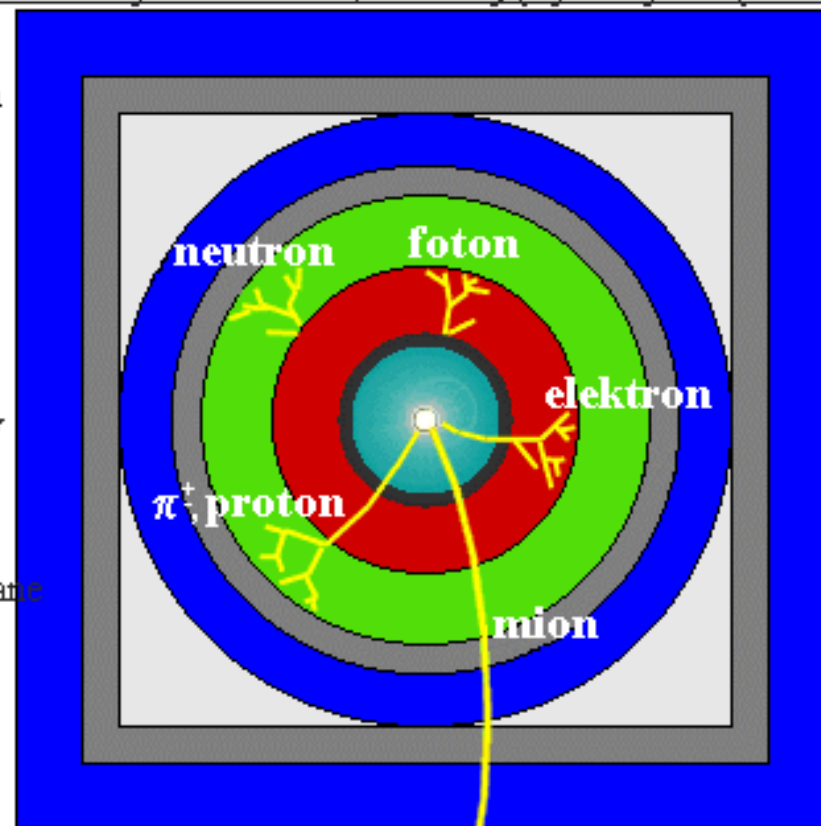
Współczesne eksperymenty

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:

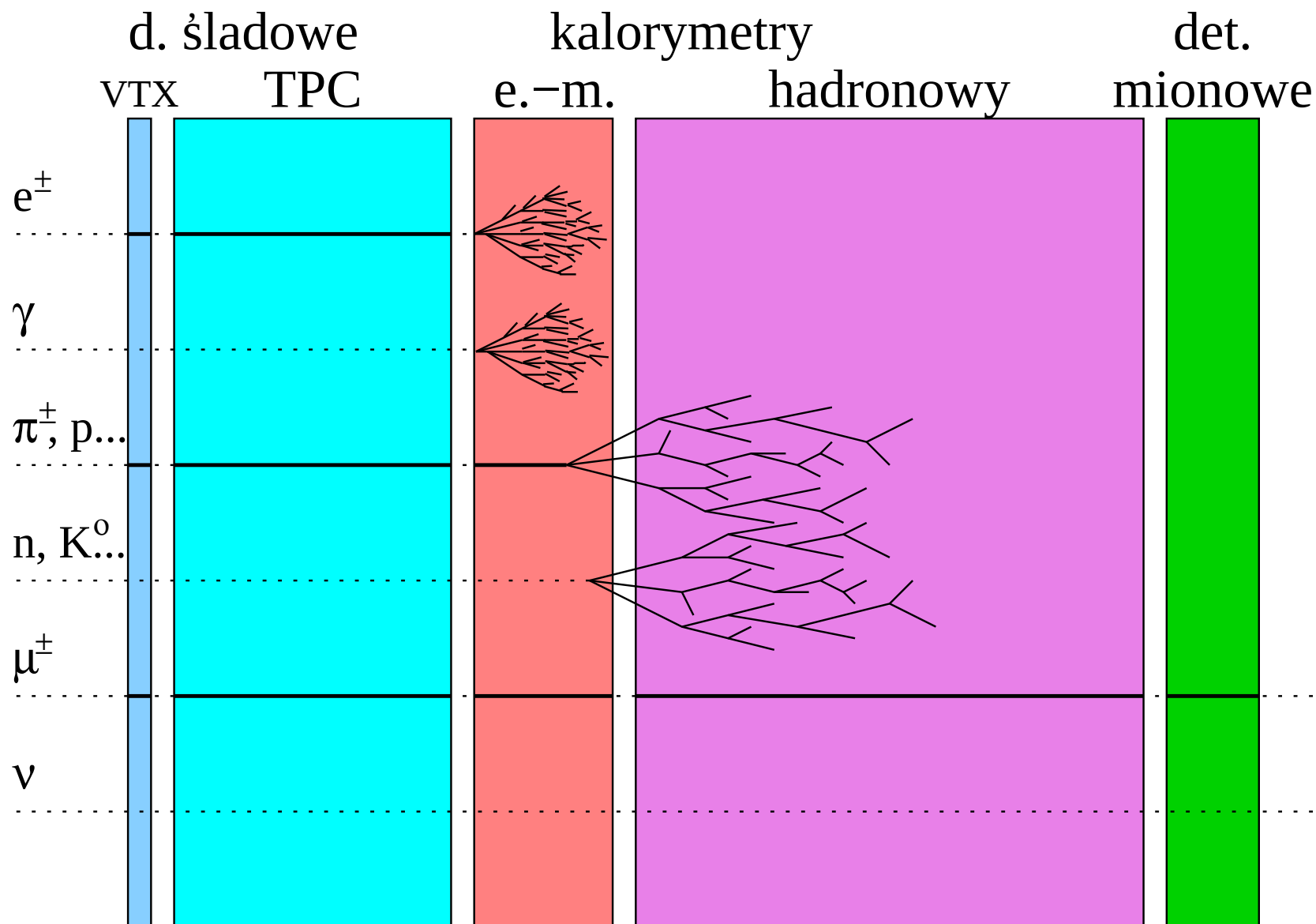
- detektor wierzchołka
jak najbliżej osi wiązki, określa gdzie zaszło zderzenie,
identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych
(tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów
cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym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

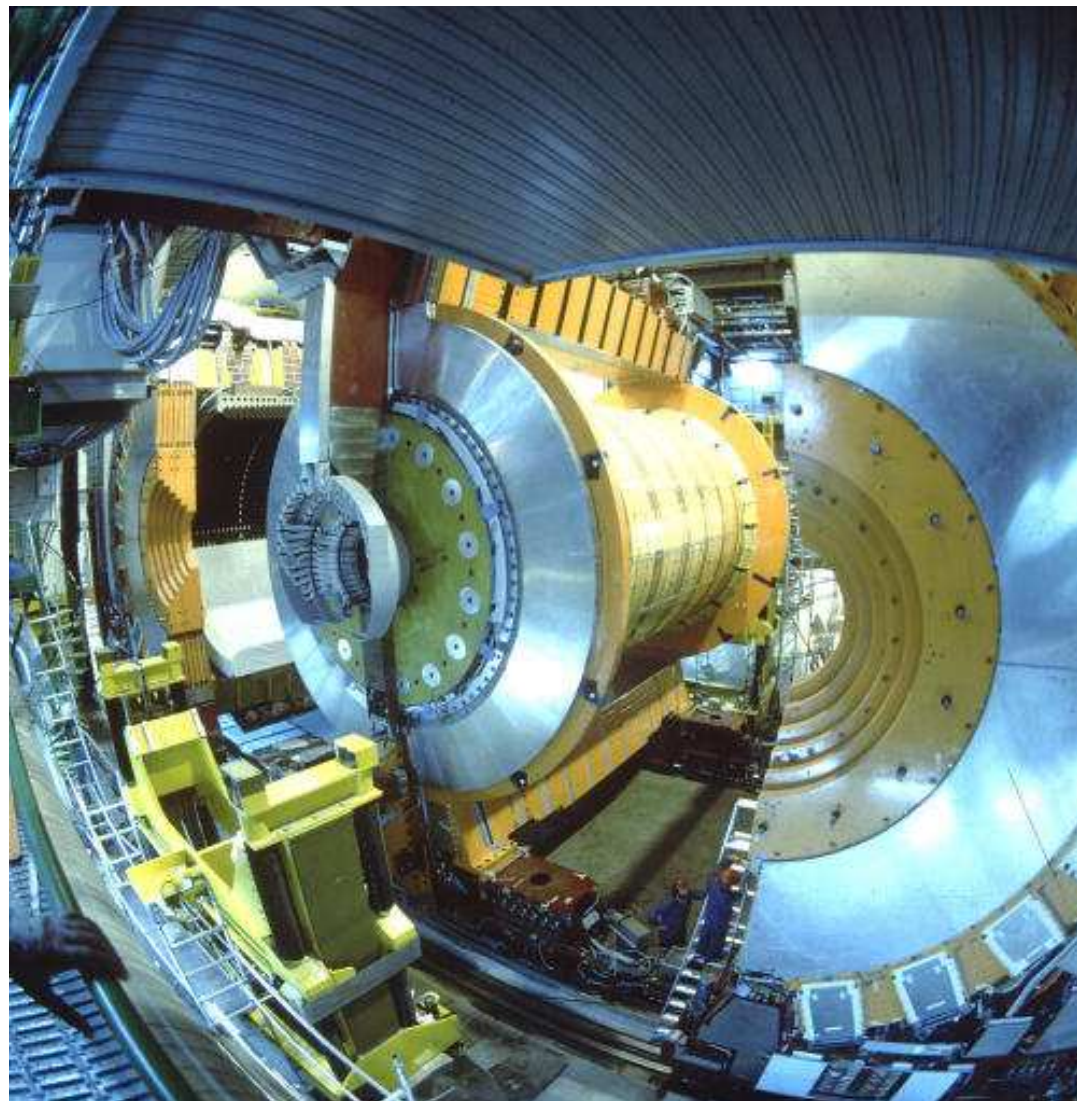
Współczesne eksperymenty



Współczesne eksperymenty

OPAL

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

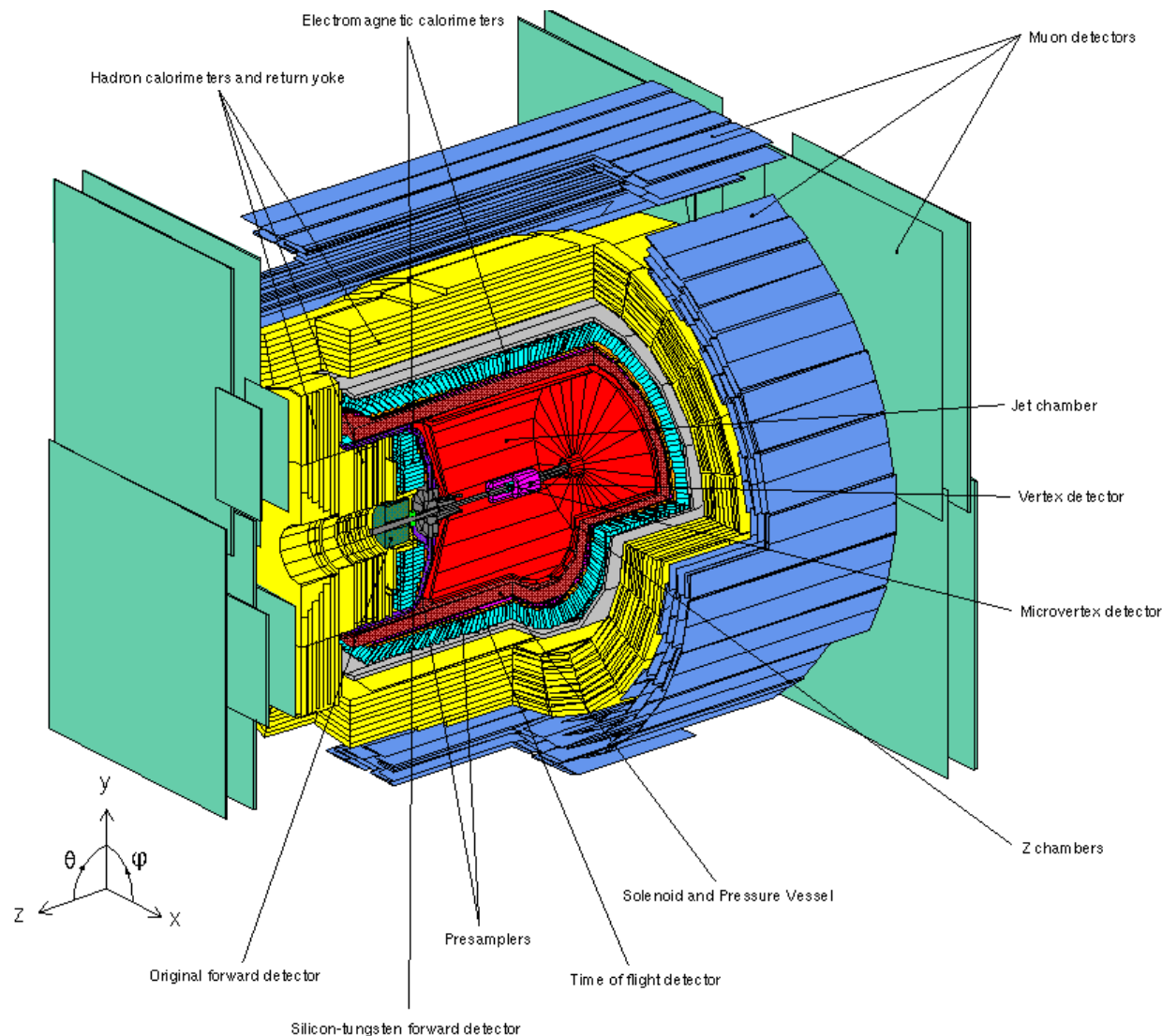


Współczesne eksperymenty

OPAL



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



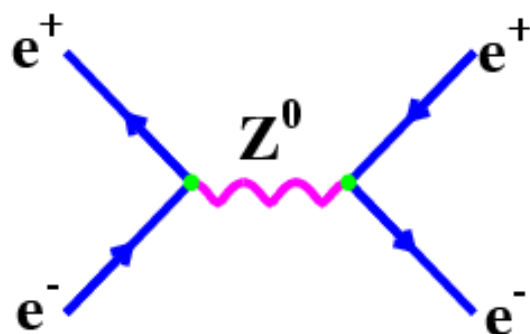
Co rejestrują detektory

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

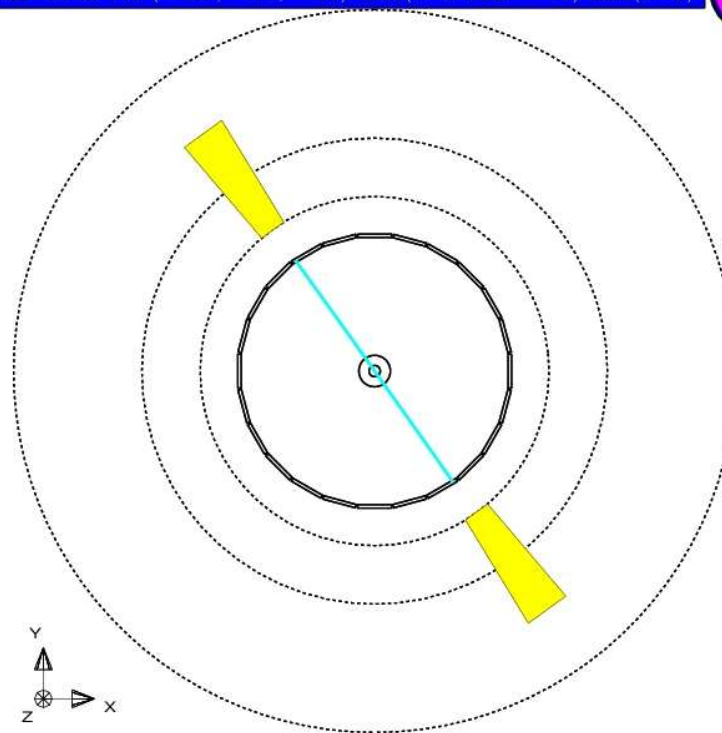
Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

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



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



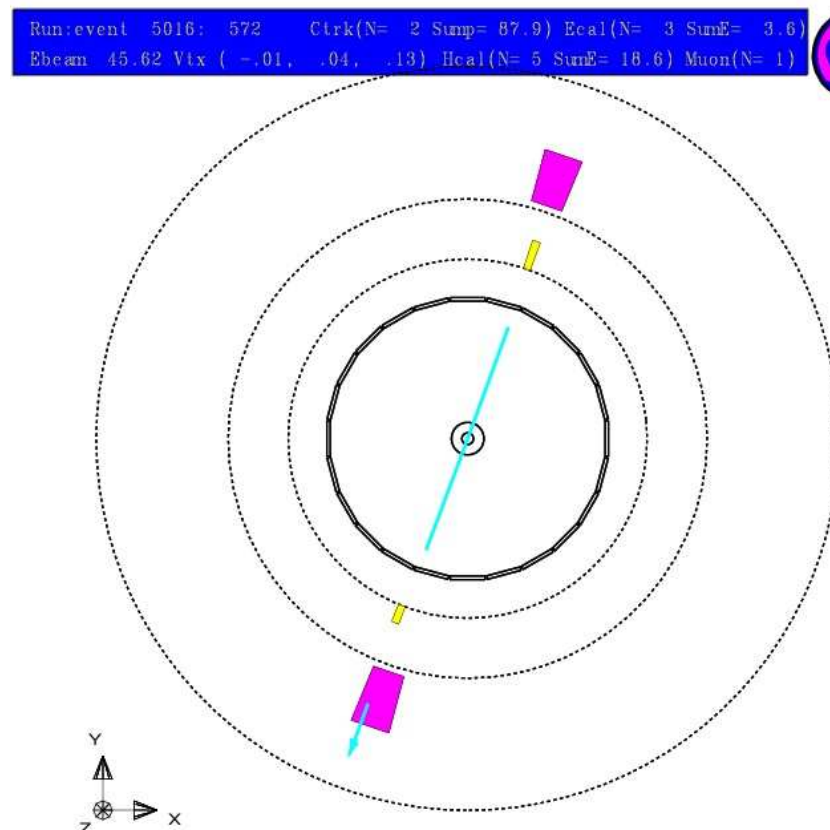
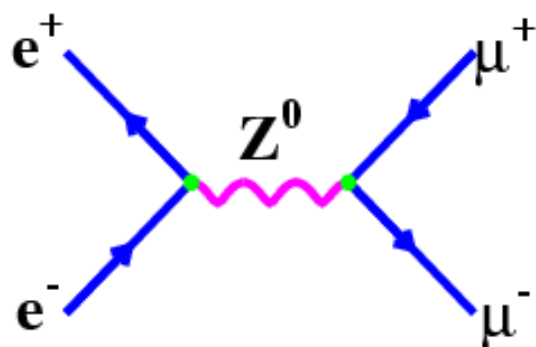
Co rejestrują detektory

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

Co jest wynikiem zderzenia? Co pokazuje nam detektor?

Najprostszy przypadek

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



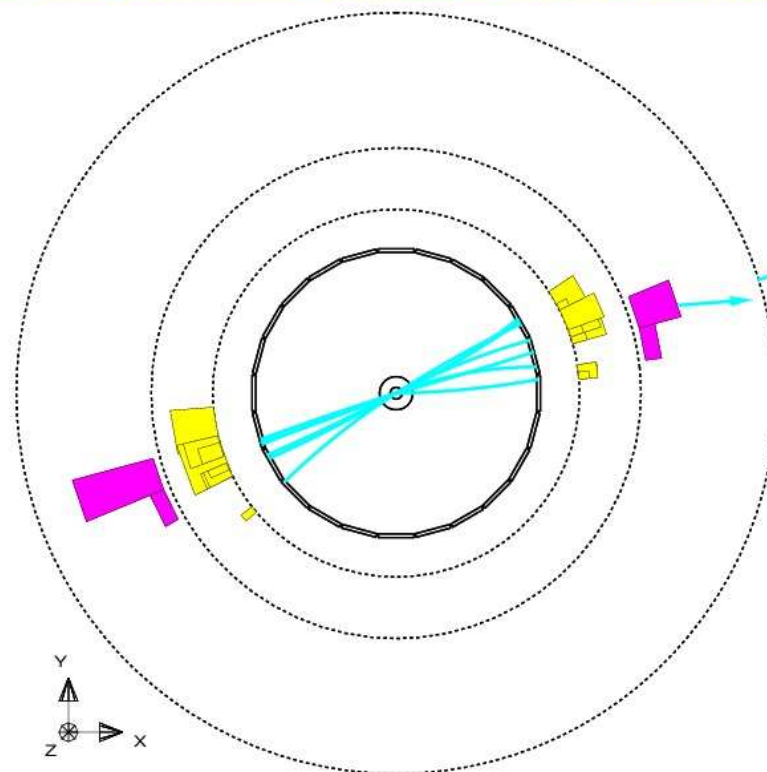
Co rejestrują detektory

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

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony?

A jak interpretować taki przypadek?

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



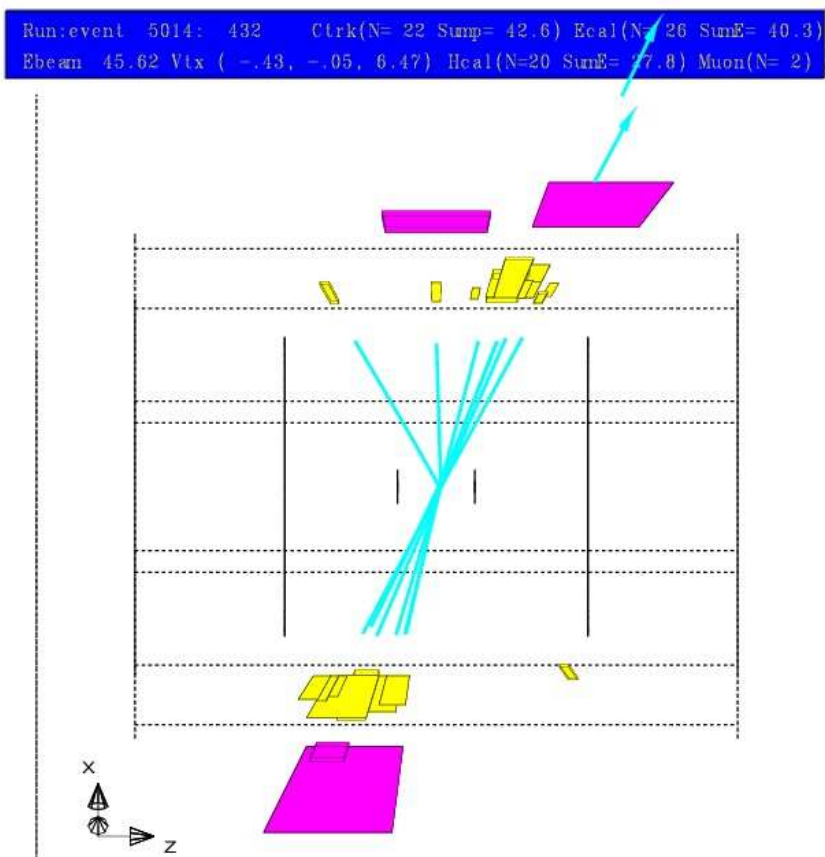
Co rejestrują detektory

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

W około 10% przypadków widzimy powstające elektrony lub miony?

A jak interpretować taki przypadek?

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



Hadronizacja

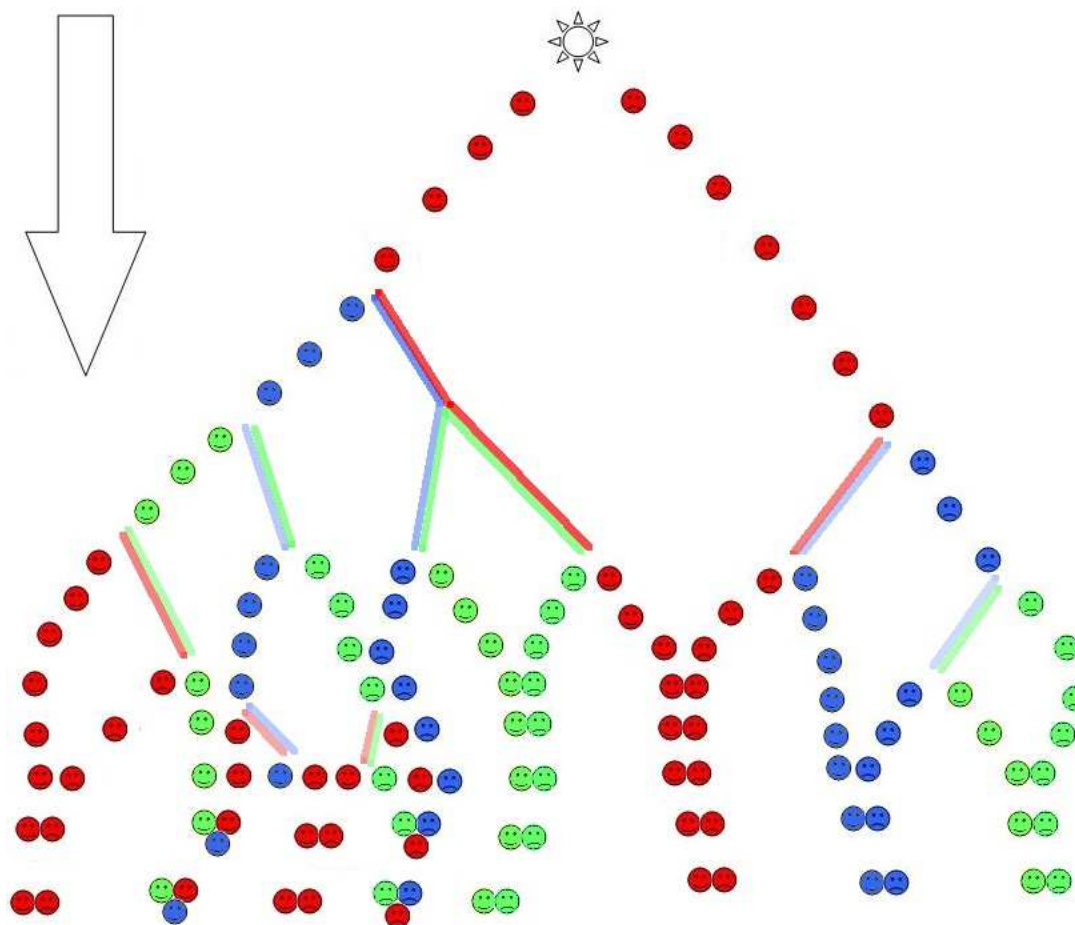
W zderzeniu powstaje para kwarków: $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

Kwarki oddalają się od siebie, rośnie oddziaływanie kolorowe

Dochodzi do emisji gluonów

Gluony konwertują na pary kwark-antykwarek

Kwarki i antykwarki formują “białe” hadrony



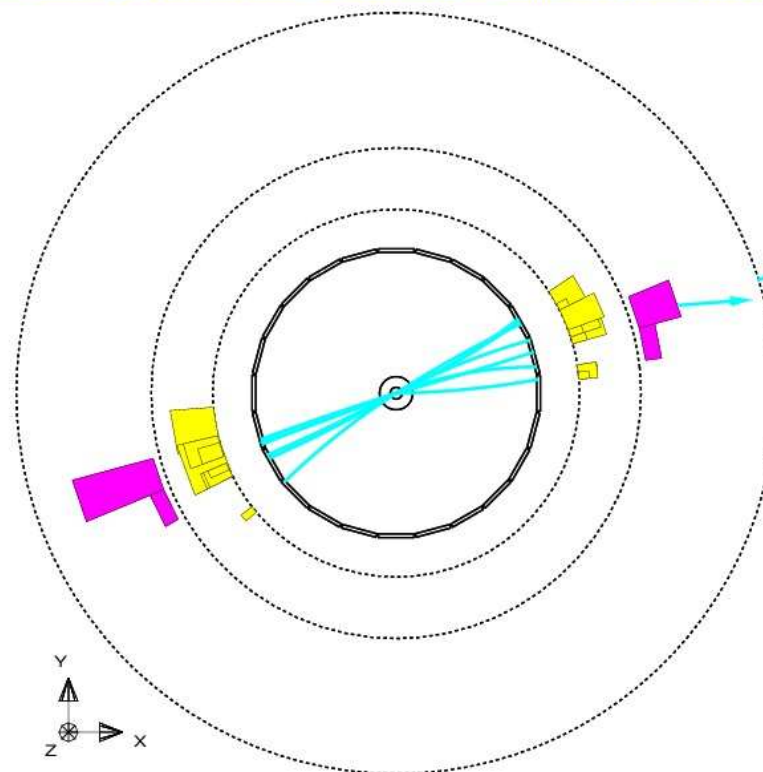
Co rejestrują detektory

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

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

Naogół powstają 2 jety

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



Co rejestrują detektory

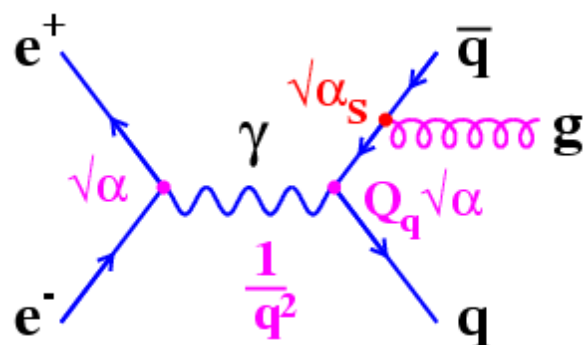
W akceleratorze **LEP** zderzano elektrony i pozytony przy energii dostępnej $\sqrt{s} = 90 - 210 GeV$.

W prawie 90% przypadków widzimy powstające jety hadronowe.

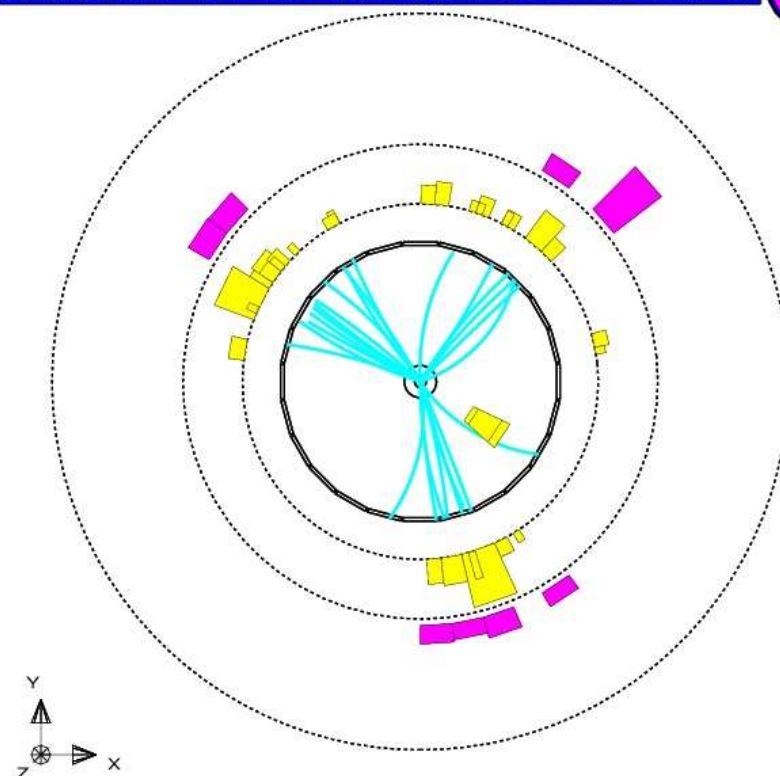
Naogół powstają 2 jety

Ale możliwe też:

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



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

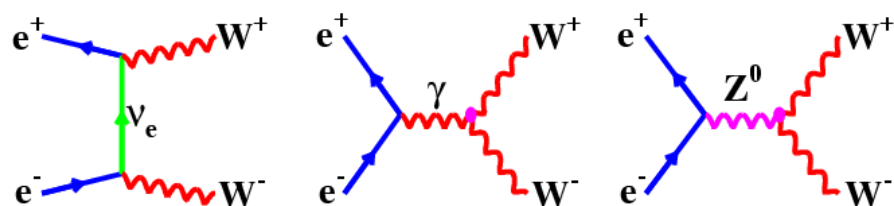


Co rejestrują detektory

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

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

Trzy możliwe diagramy:

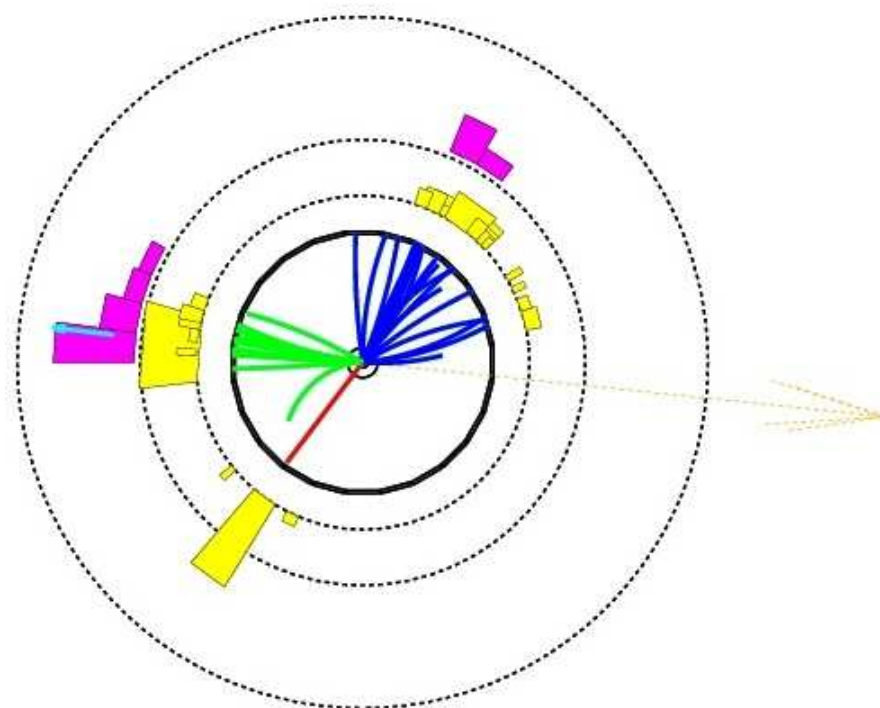


W przedstawionym przypadku

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

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

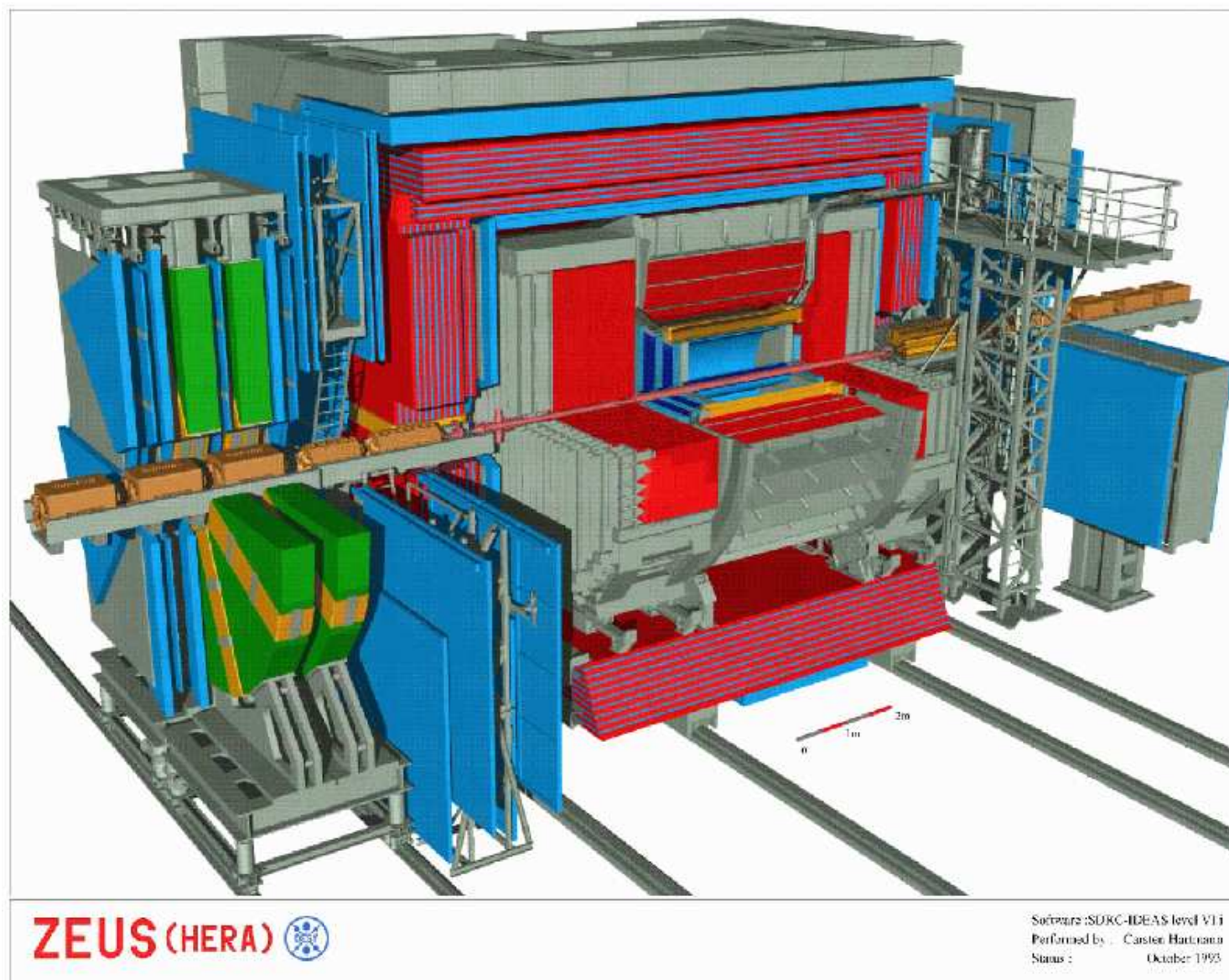
neutrino rekonstruujemy z zasady zachowania energii i pędu



Współczesne eksperymenty

ZEUS

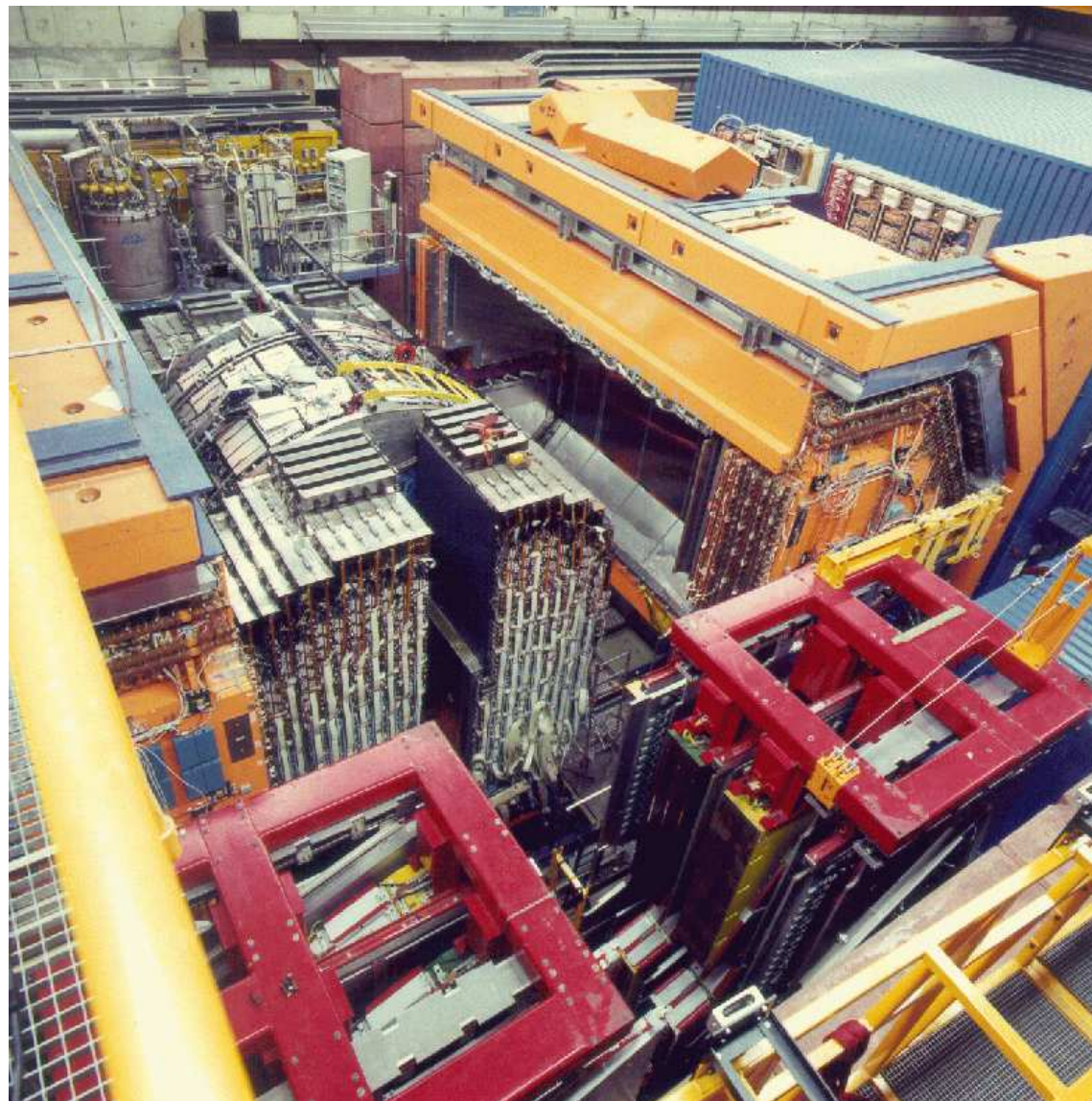
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Współczesne eksperymenty

ZEUS

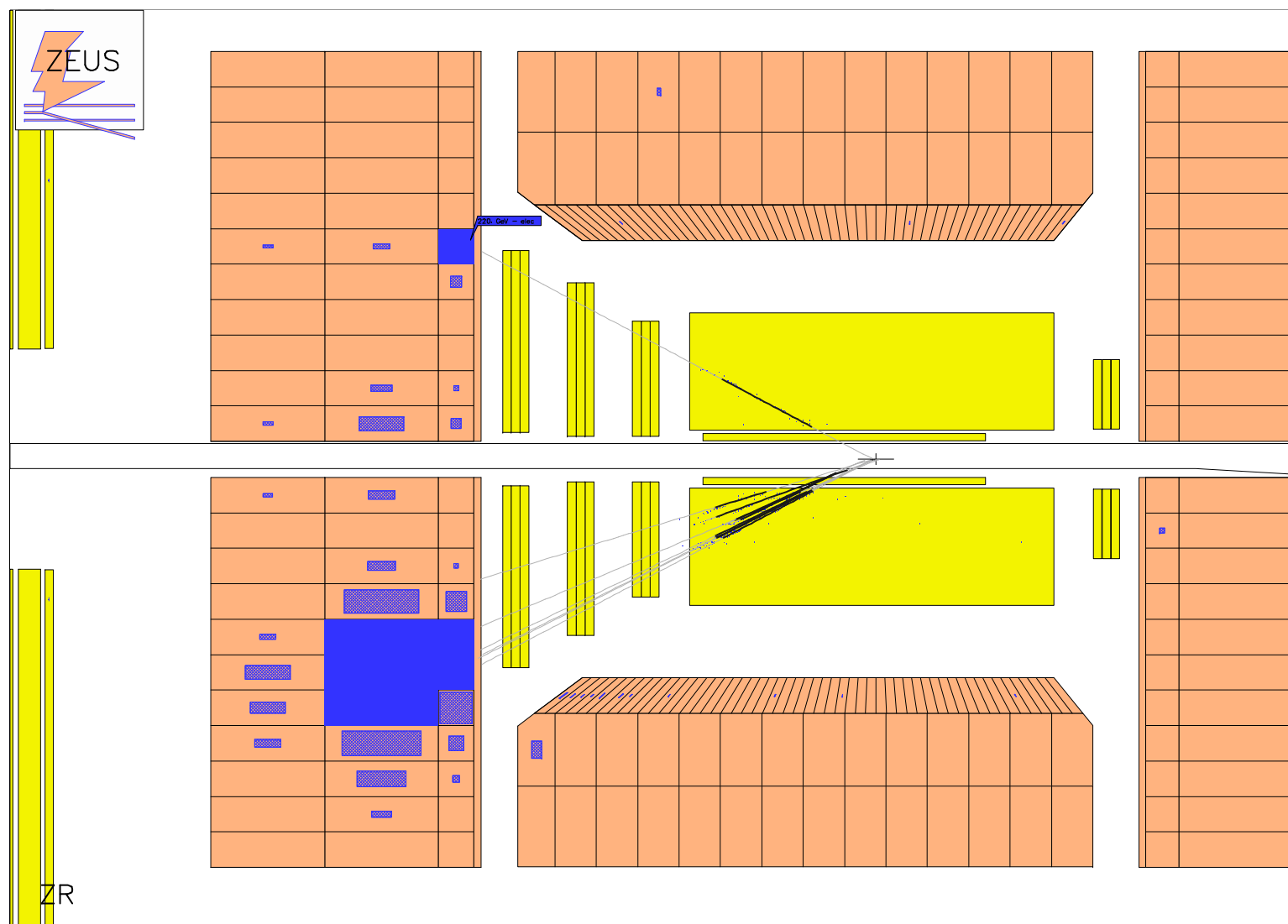
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Współczesne eksperymenty

ZEUS

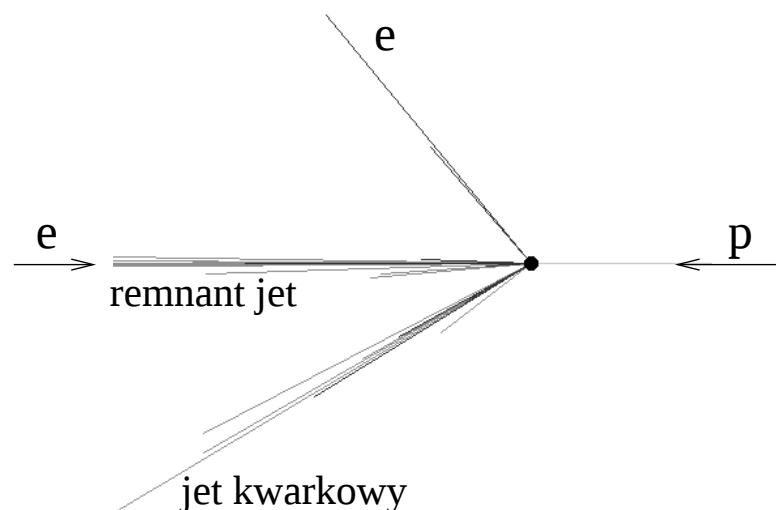
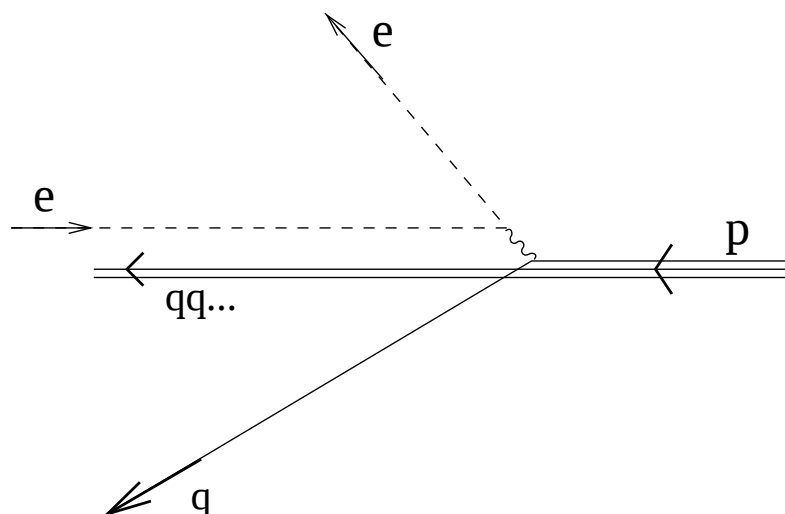
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Współczesne eksperymenty

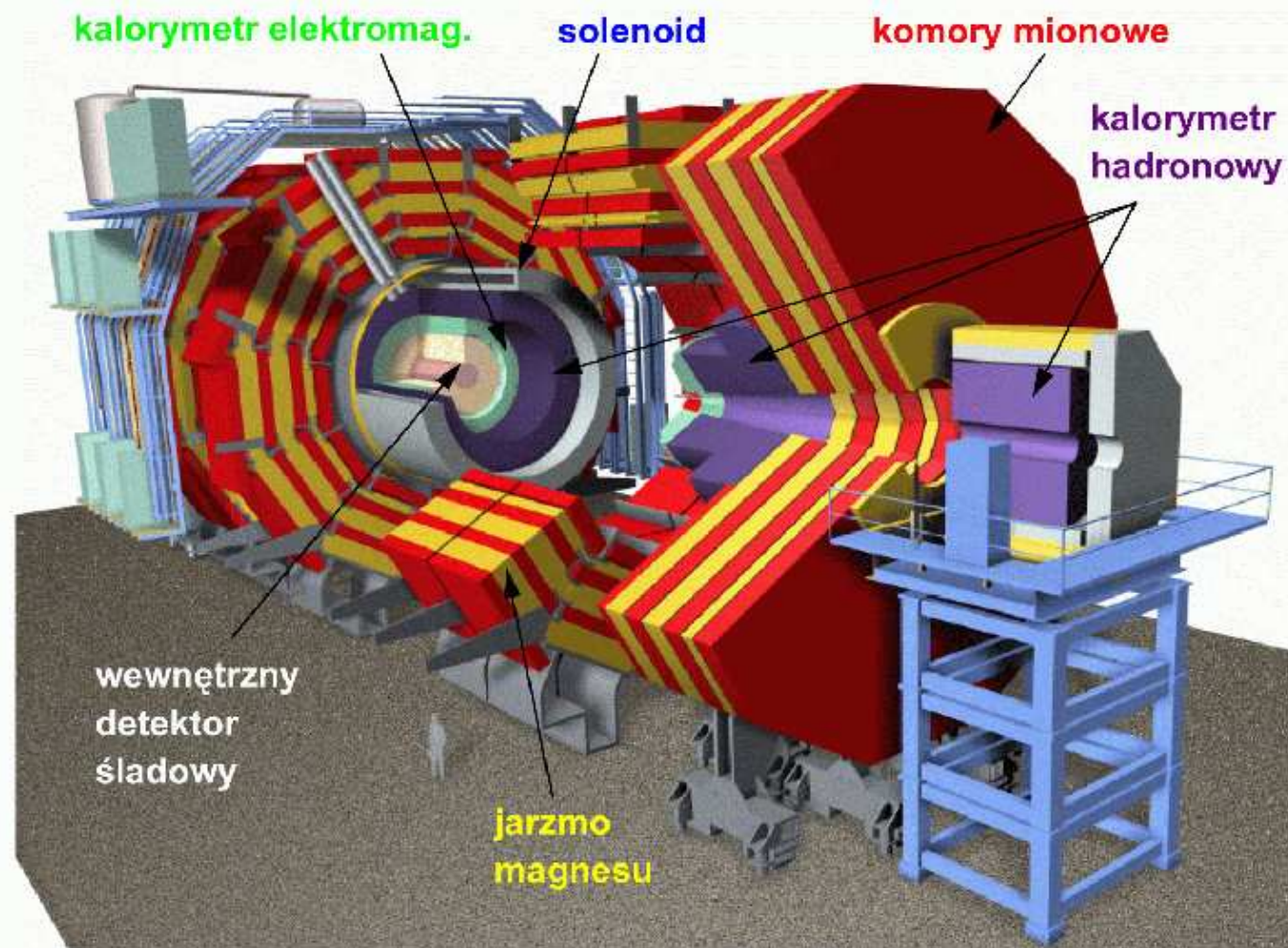
ZEUS

W pierwszym przybliżeniu pojedynczych kwarków nigdy nie rozproszeniu ulega **elektron** obserwujemy. **Oddziaływania** i **pojedynczy kwark**. Reszta **silne** prowadzą do tzw. **hadronizacji**: powstają wtórne pary $q\bar{q}$ i swój 'lot' jako tzw. **"remnant"** kwarki zamieniają się w **jety**.
(pozostałości)



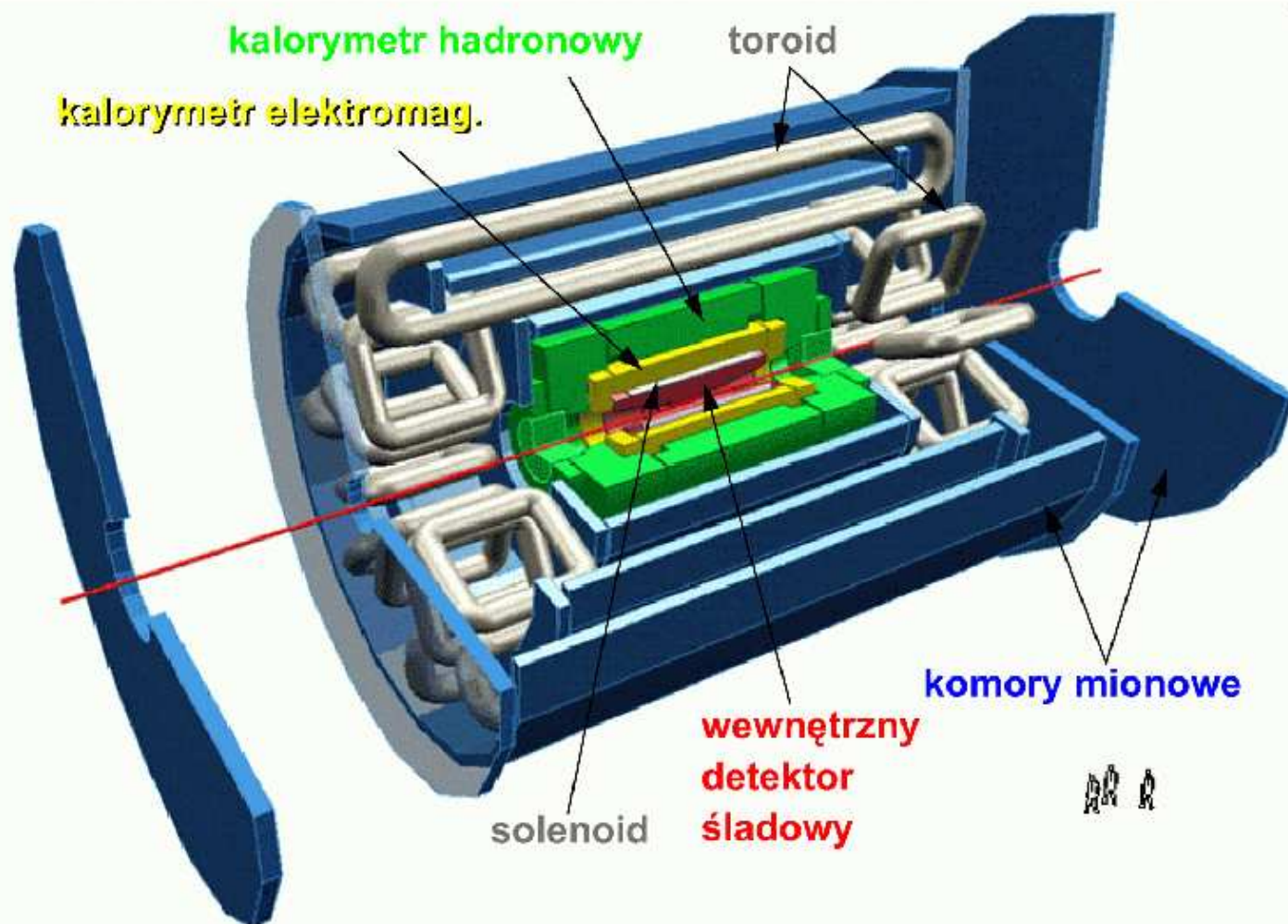
Współczesne eksperymenty

Compact Muon Solenoid



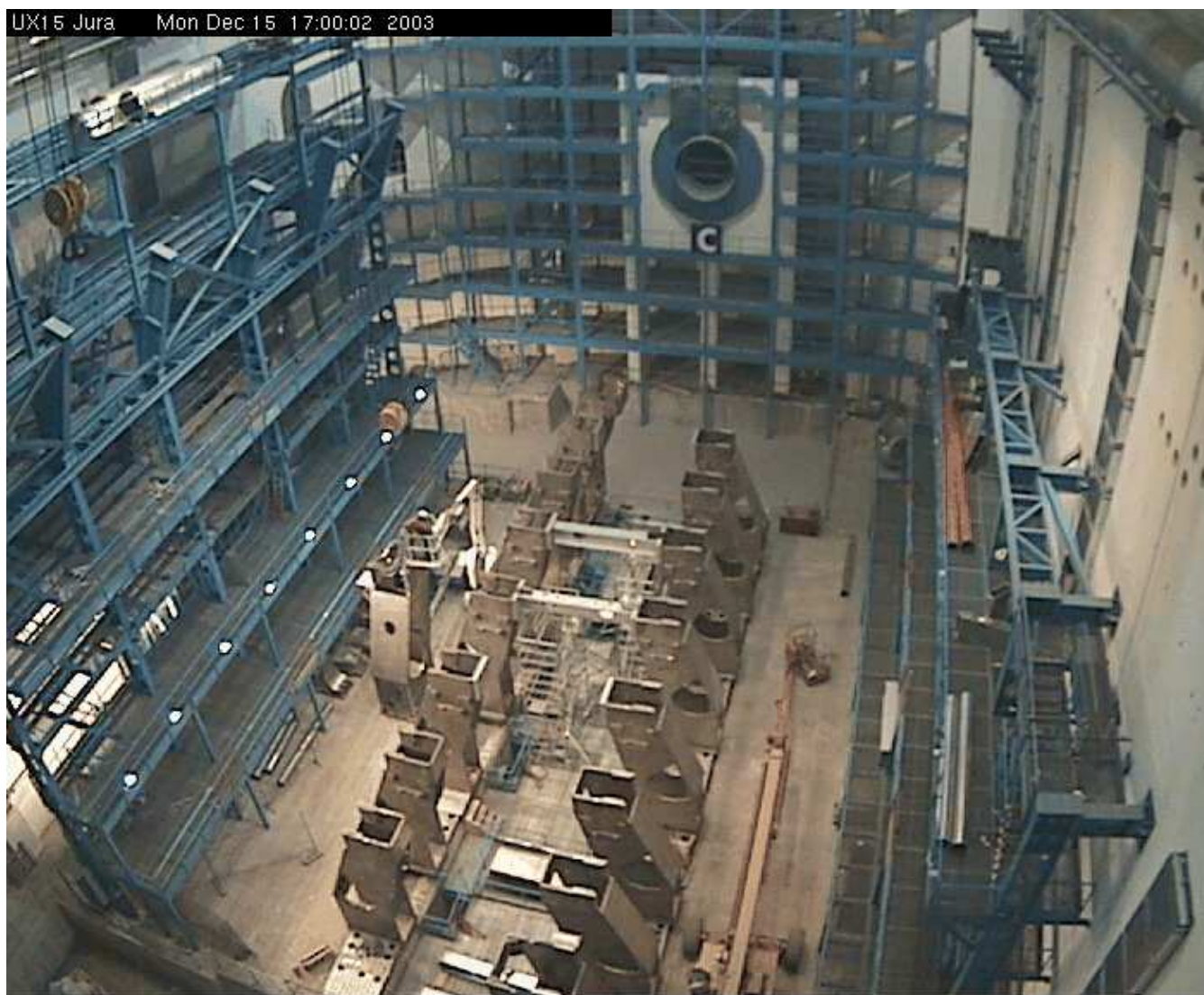
Współczesne eksperymenty

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2003



Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2004



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2004



Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2005



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2005

UX15 Jura Thu Dec 15 17:00:07 2005



Lata przygotowań - ATLAS

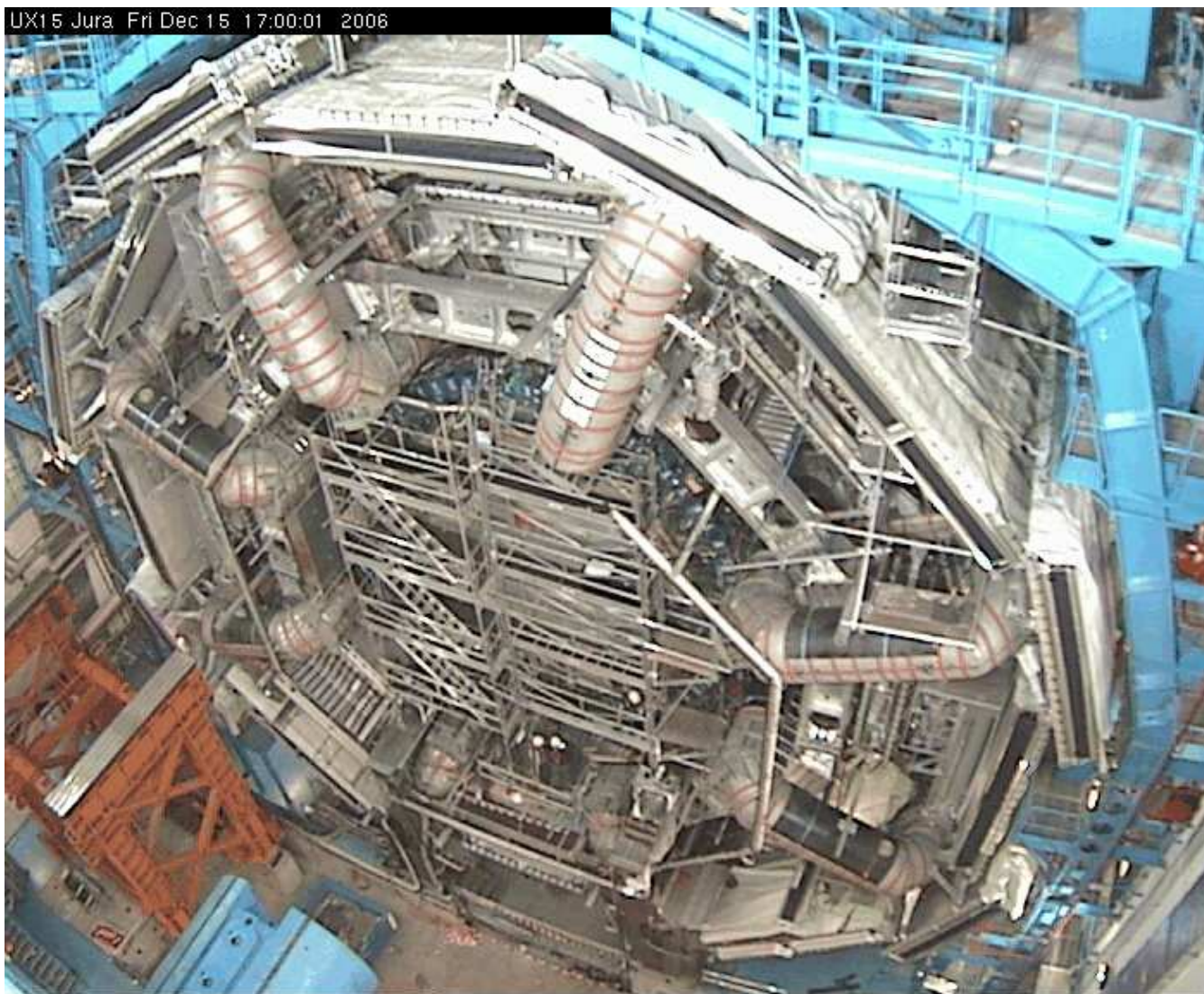
15 czerwca 2006

UX15 Jura Thu Jun 15 17:00:02 2006



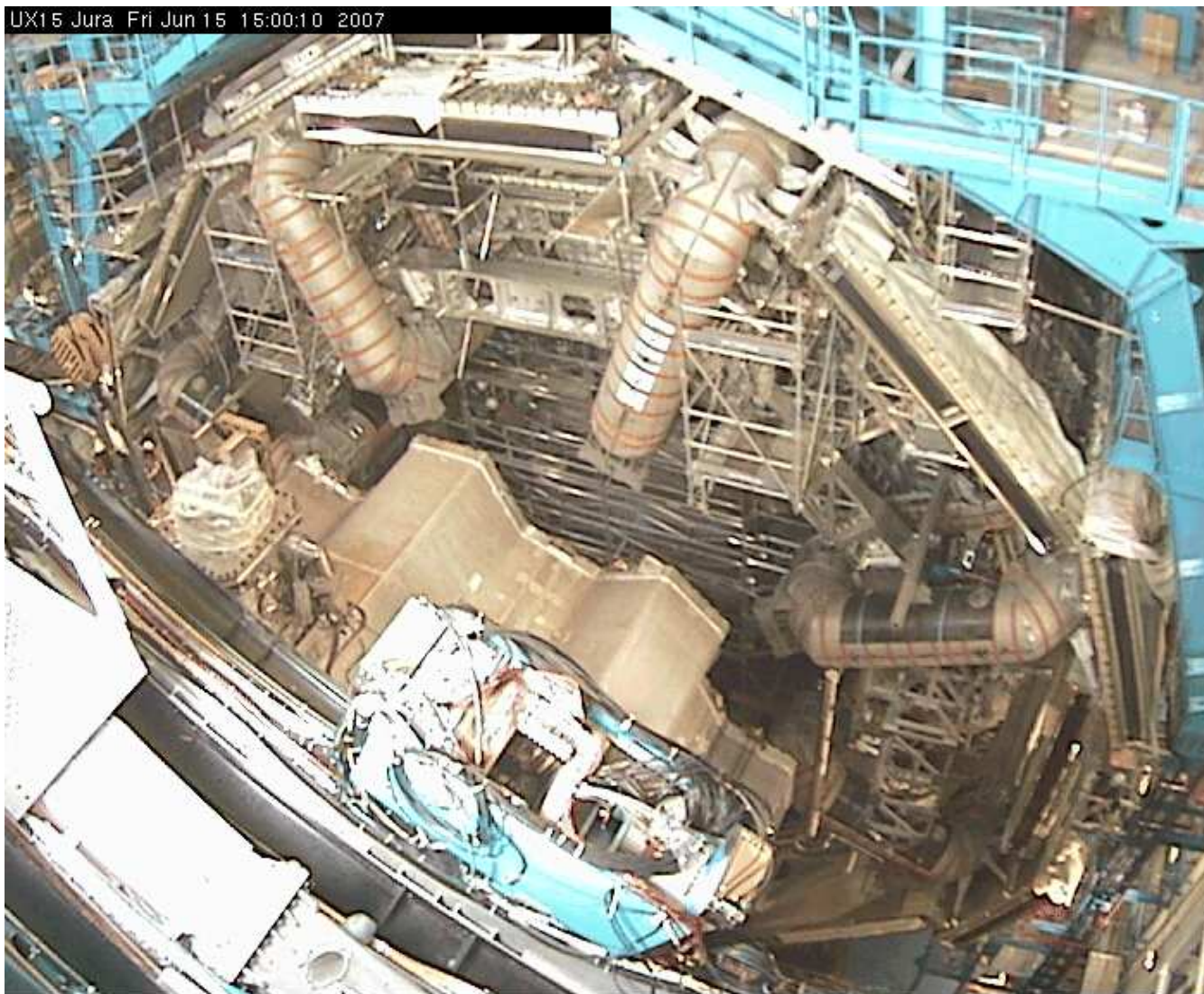
Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2006



Lata przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2007



Lata przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2007



Lata przygotowań - ATLAS

23 luty 2008

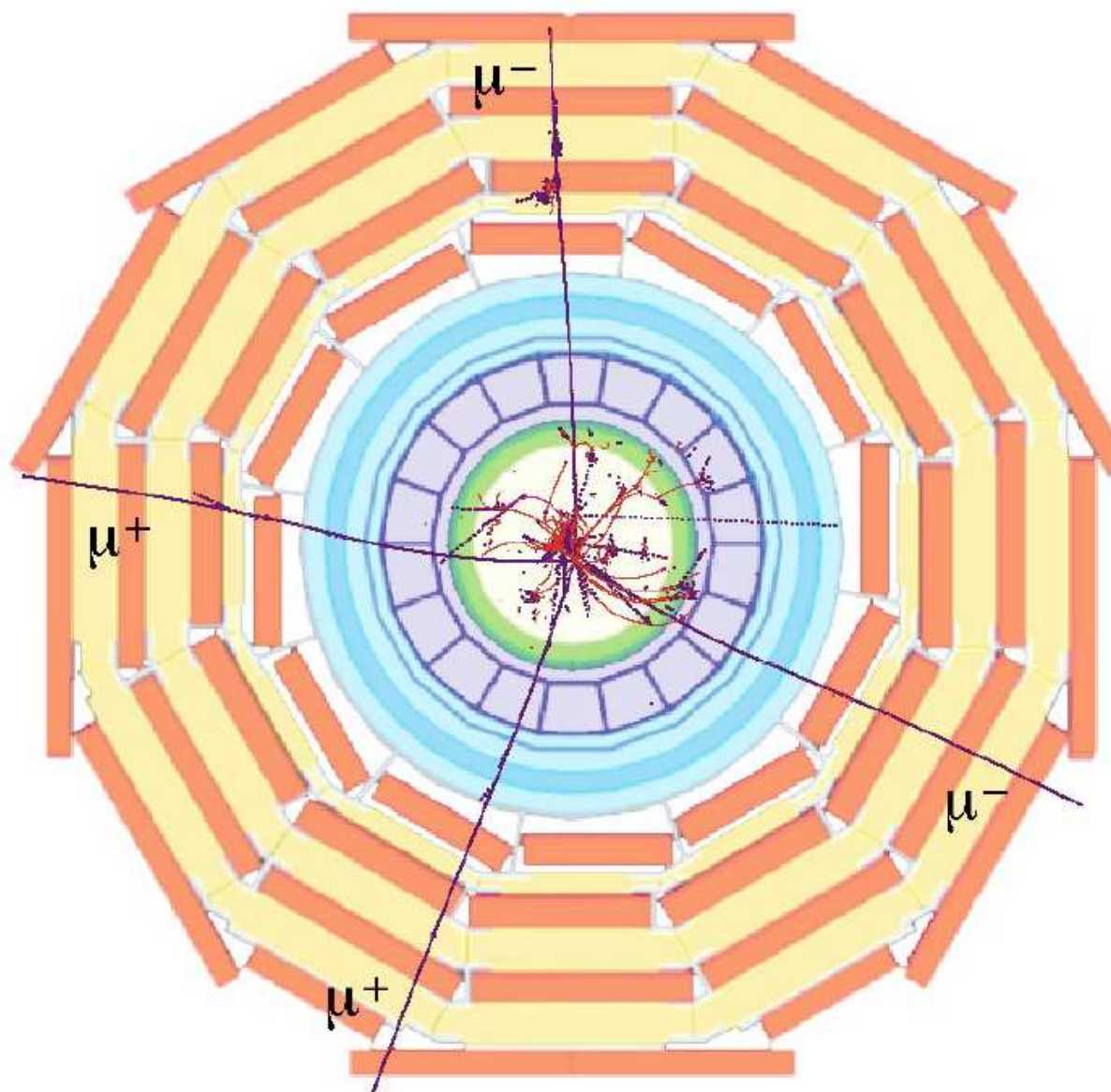


Współczesne eksperymenty

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

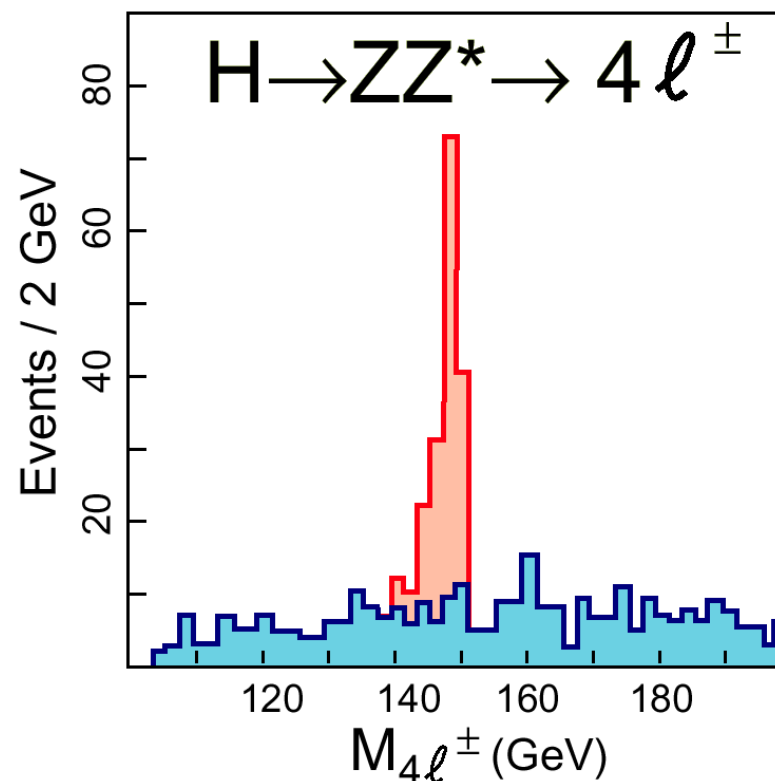
Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań w LHC.

Najbardziej obiecujący jest **kanal**:

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

gdyż naładowane leptony ($e^\pm$ i $\mu^\pm$) można **łatwo zidentyfikować** (kalorymetr elektromagnetyczny, komory mionowe)

Ale wciąż nie będzie to łatwe zadanie!



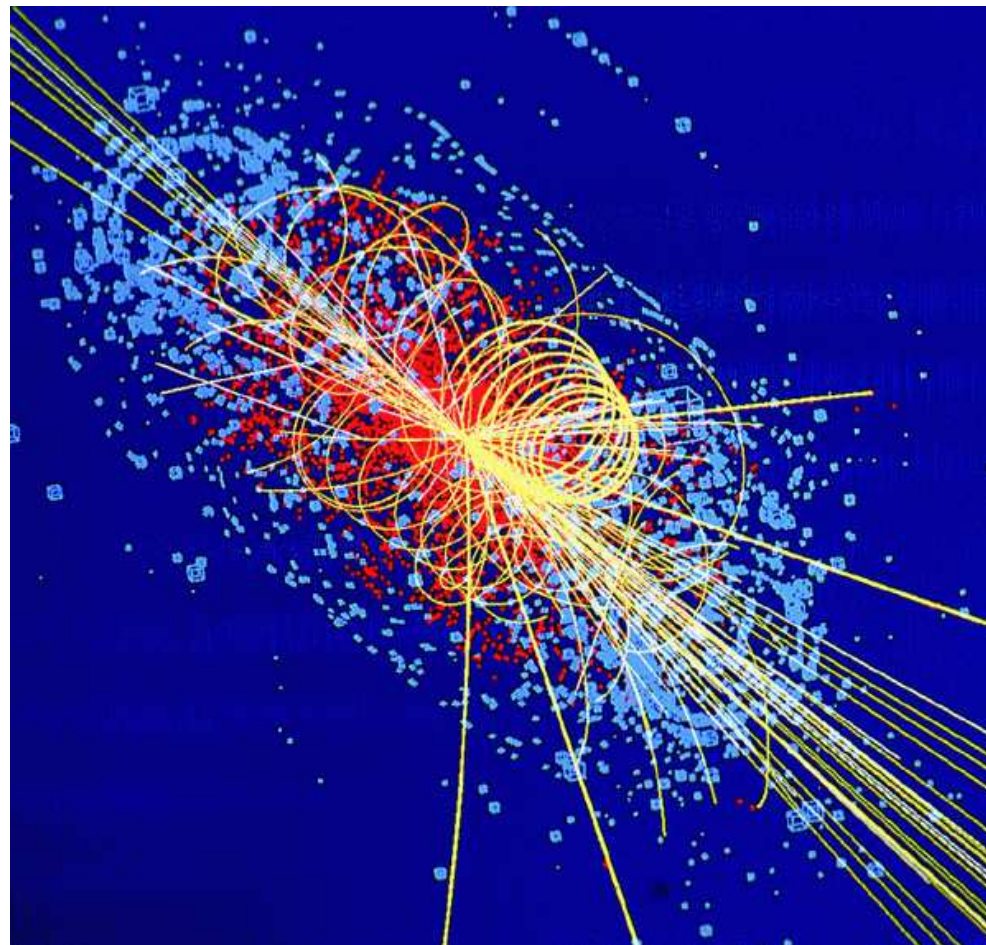
Współczesne eksperymenty

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

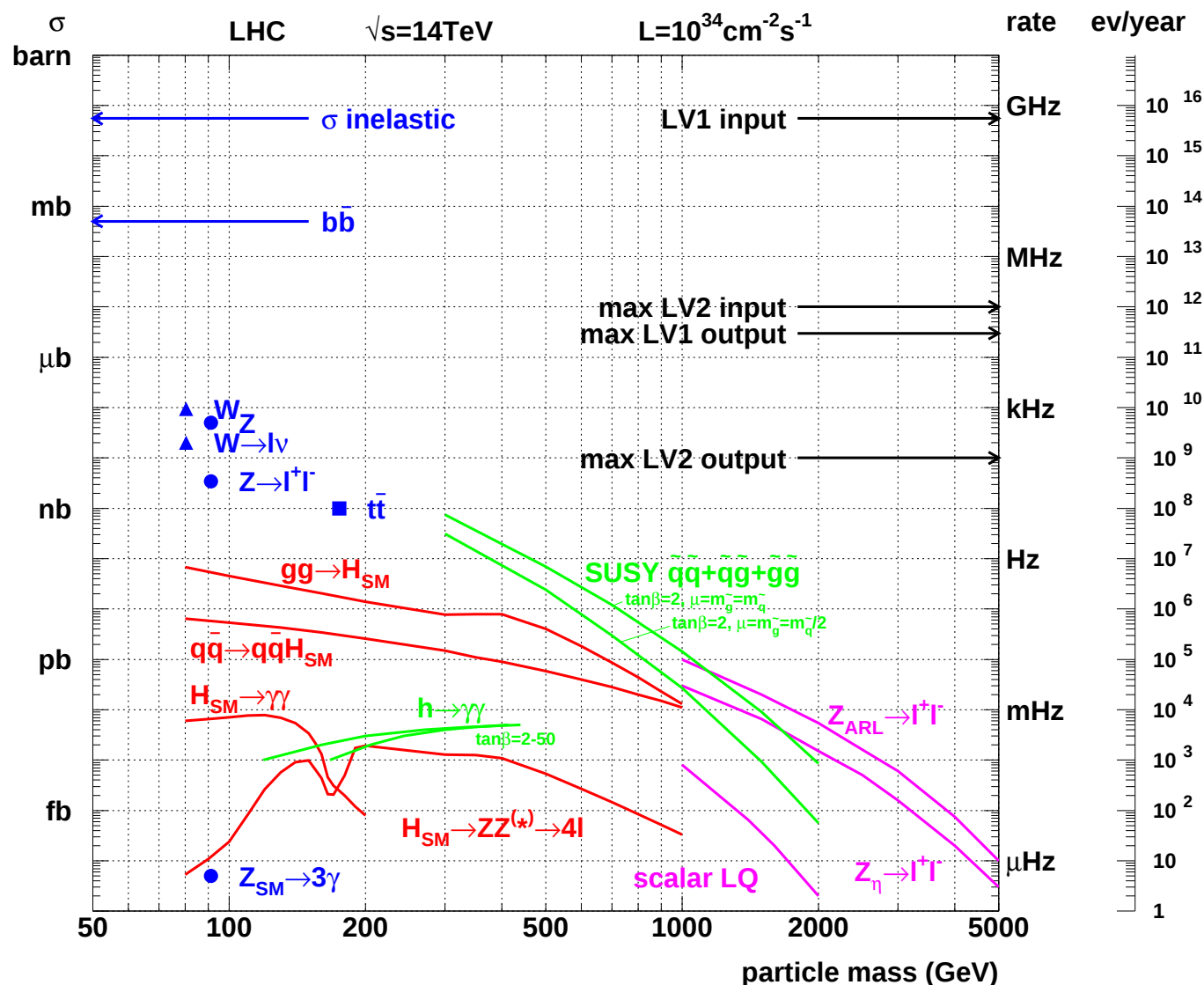
Układ wyzwala

Sygnały z detektora są na bieżąco “podglądane” przez dedykowane układy elektroniczne.

Tylko “ciekawe” sygnały 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.

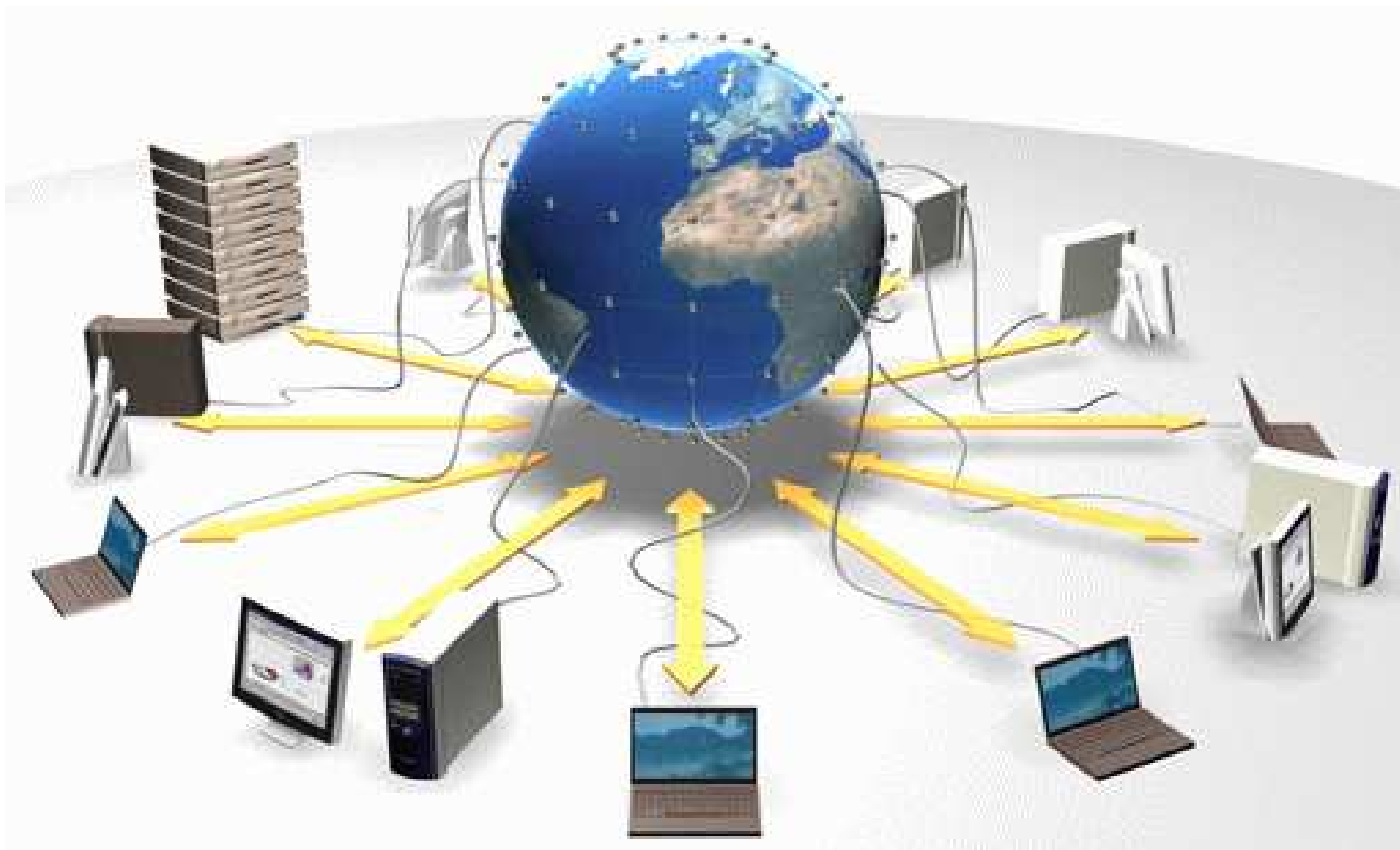
1 przypadek to MB danych

zbieramy miliony przypadków

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

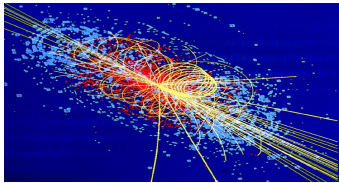


GRID dla LHC



Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 10

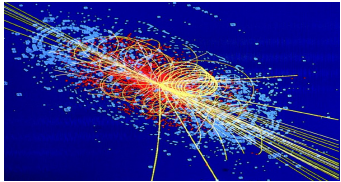


29.04.2009

**Prawdopodobieństwo procesów
dla dużych energii
i konieczność istnienia cząstki Higgsa**

Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 11



6.05.2009

Konieczność istnienia cząstki Higgsa

Supersymetria

Więcej wymiarów

Teoria relatywistyczna (względności)

- Najbardziej bezpośredni przejaw t. relatywistycznej to czas życia cząstek – dłuższy jeśli cząstka się porusza jest to tzw. dylatacja czasu.

Podobny efekt - skrócenie (długości) Lorentza

- Rola pomiaru - transf. Lorentza wiąże pomiary w różnych układach odniesienia

Niezmienniczość relatywistyczna wzg zmiany układu odniesienia (układy poruszające się ze stałą prędkością)

- Niezmienniczość relatywistyczna:
obrotowa, przesunięcia w czasie i przestrzeni
- znane wcześniej (przed Einsteinem)
- Prędkość światła stała w układach odniesienia poruszających się ze stałą prędkością względem

Niezmienność Lorentza, niezmienność Poincare

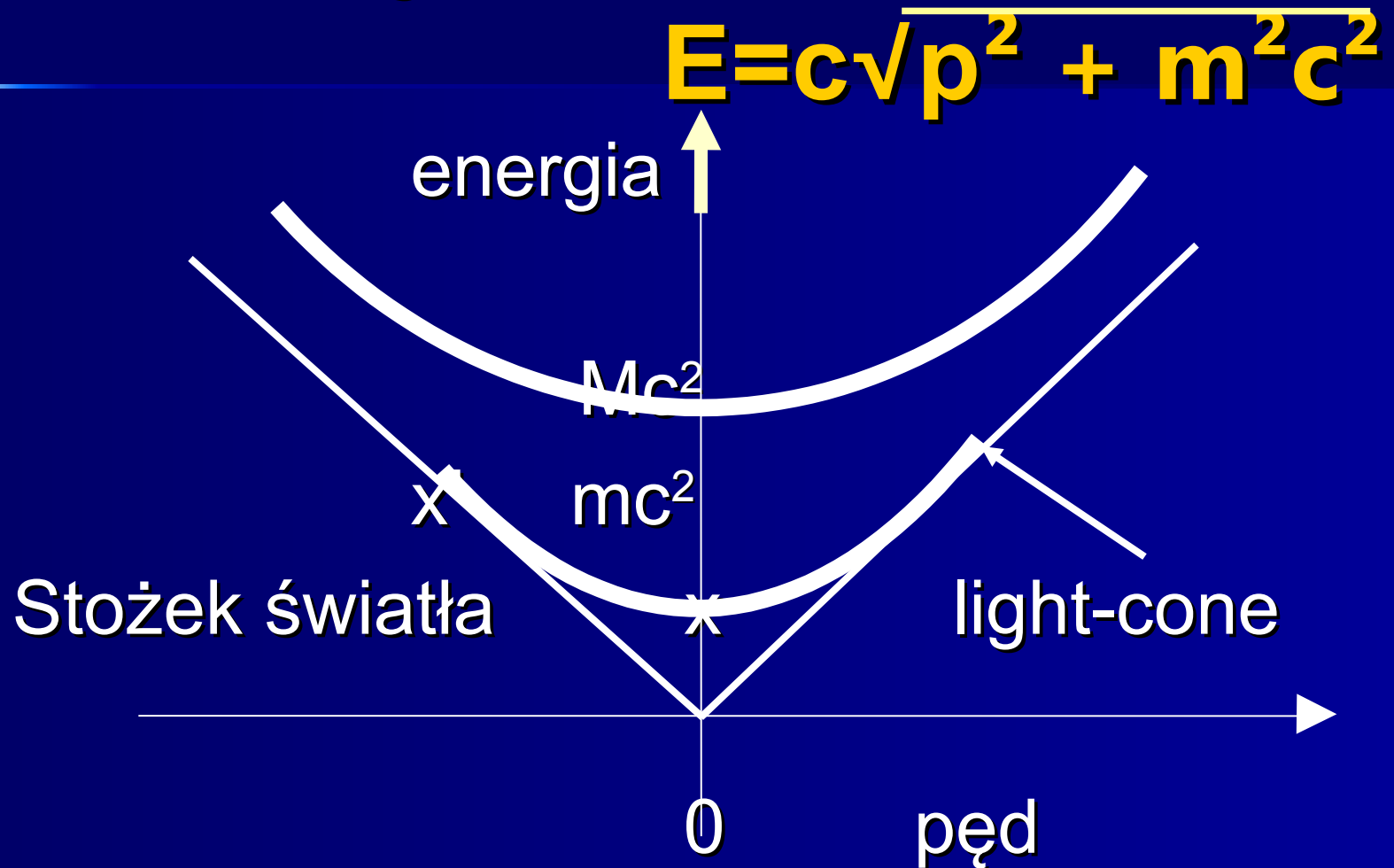
- Obroty i zmiana układu (stała prędkość) →
niezmienność Lorentza
Niezmienność Lorentza plus niezmienność
wzg przesunięcie w czasie i przestrzeni →
niezmienność Poincare

NIE WSZYSTKO JEST WZGLĘDNE!!

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

Energia i pęd dla cząstki swobodnej

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



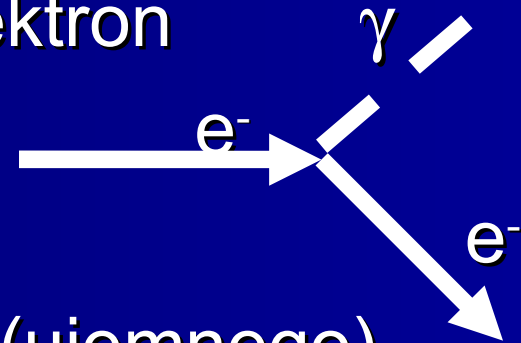
Zmiana układu odniesienia: $x \rightarrow x'$ (powłoka masy)

Teoria cząstek elementarnych

- 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
(nieskończoności w poprawkach kwantowych)
ale istnieje sposób obejścia → 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)

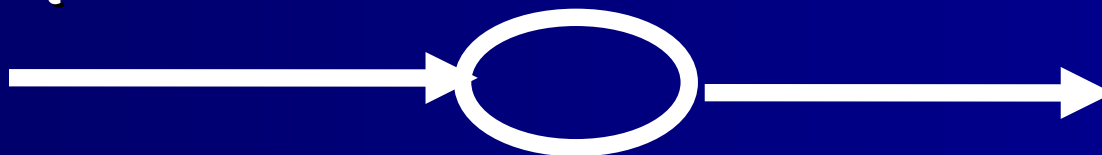
Diagramy Feynmana

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



strzałki – przepływ ład. el. (ujemnego)

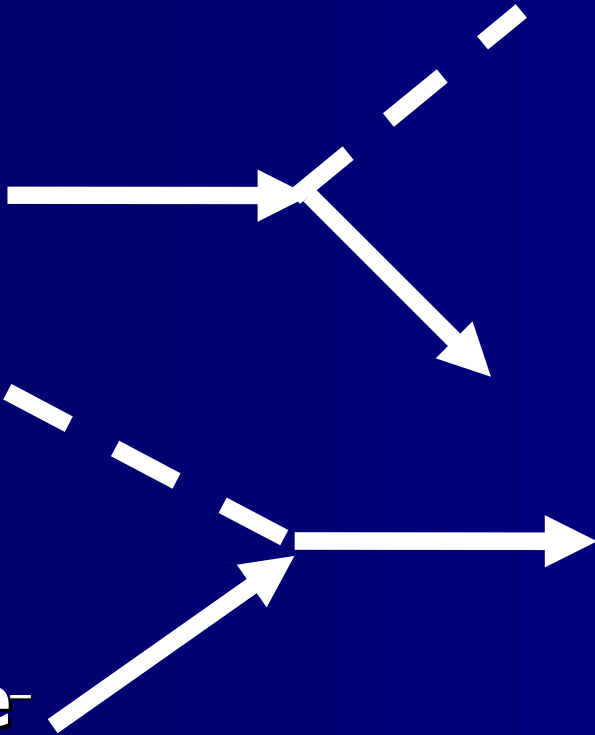
- Pętle



Procesy skrzyżowane: $ee\gamma$

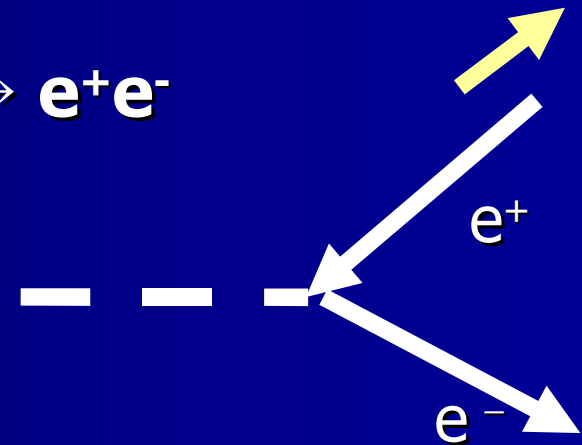
Czas $t \rightarrow$

$e^- \rightarrow e^- \gamma$



$\gamma e^- \rightarrow e^-$

$\gamma \rightarrow e^+ e^-$



Pęd e^+

strzałka do tyłu –
ładunek dodatni

Zasada zachowania energii i pędu

- Dla swobodnego elektronu proces $e \rightarrow e \gamma$ nie może być zrealizowany. Dlaczego?

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

Jest to możliwe dla elektronu w atomie -elektron przechodzi do niższego stanu. W materii emisja fotonów $\rightarrow$ promieniowanie hamowania (bremsstrahlung)

- Dla swobodnego fotonu rozpad na e^+e^- też nie jest możliwy, bo obserwator lecący w kierunku fotonu widzi foton o niższym pędzie (energii).
Ale w pobliżu jądra – może

Linie wewnętrzne w diagramach

- Mechanika kwantowa pozwala na istnienie cząstek z niedostępnymi (tzn niezgodnymi z zasadą zachowania) energiami ale przez krótki czas (zasada Heinsenberga $\Delta E \sim 1/\Delta t$ ($c=1$))
Np. elektrony mogą mieć zerowa a nawet ujemną energię, lub b. dużą energię. Procesy kreacji i anihilacji par możliwe



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

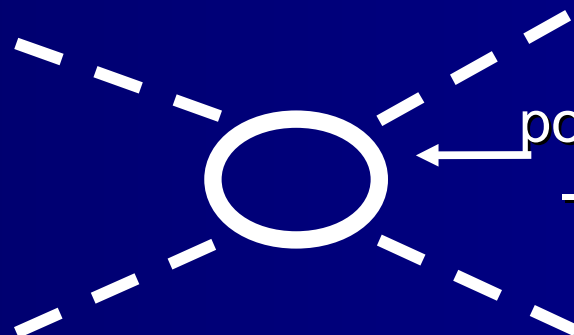
Diagramy Feynmana cd

Typowe zderzenie: $a+b \rightarrow c+d$



- Dzięki cząstkom wirtualnym
 - uwzględniamy interferencję
 - możliwe jest rozpraszanie światła na świetle

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



pośredniczą cząstki naładowane
- fotony jako cząstki neutralne
nie oddziałują wprost ze sobą

Amplitudy i prawdopodobieństwa procesów

- Jeżeli znamy własności cząstek i sprzężeń → obliczenia prawdopodobieństwa procesów
- Cząstki początkowe wytwarzamy lub przygotowujemy
ale końcowe możemy tylko obserwować
- Interferencja: z określonego stanu początkowego do określonego stanu końcowego na wiele sposobów (*kanały procesu*) -wiele diagramów należy uwzględnić
(→ suma amplitud nie prawdopodobieństw)
- 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.
- Procesy z cząstkami wirtualnymi (o różnych energiach) ale w niektórych z nich cząstki te mogą mieć dowolnie wielkie energie.

Pytanie: czy te wkłady są tłumione?

- Nieraz nie są tłumione → nieskończone prawdopodobieństwo procesu

Tłumienie wkładu od pętli

- **Tłumienie większe dla cząstek bardziej wirtualnych**
- **Tłumienie zależy od typu cząstki, szczególnie ważne jest jaki jest spin cząstki**
(Zachowanie całkowitego momentu pędu: 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

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

Rachunek zaburzeń

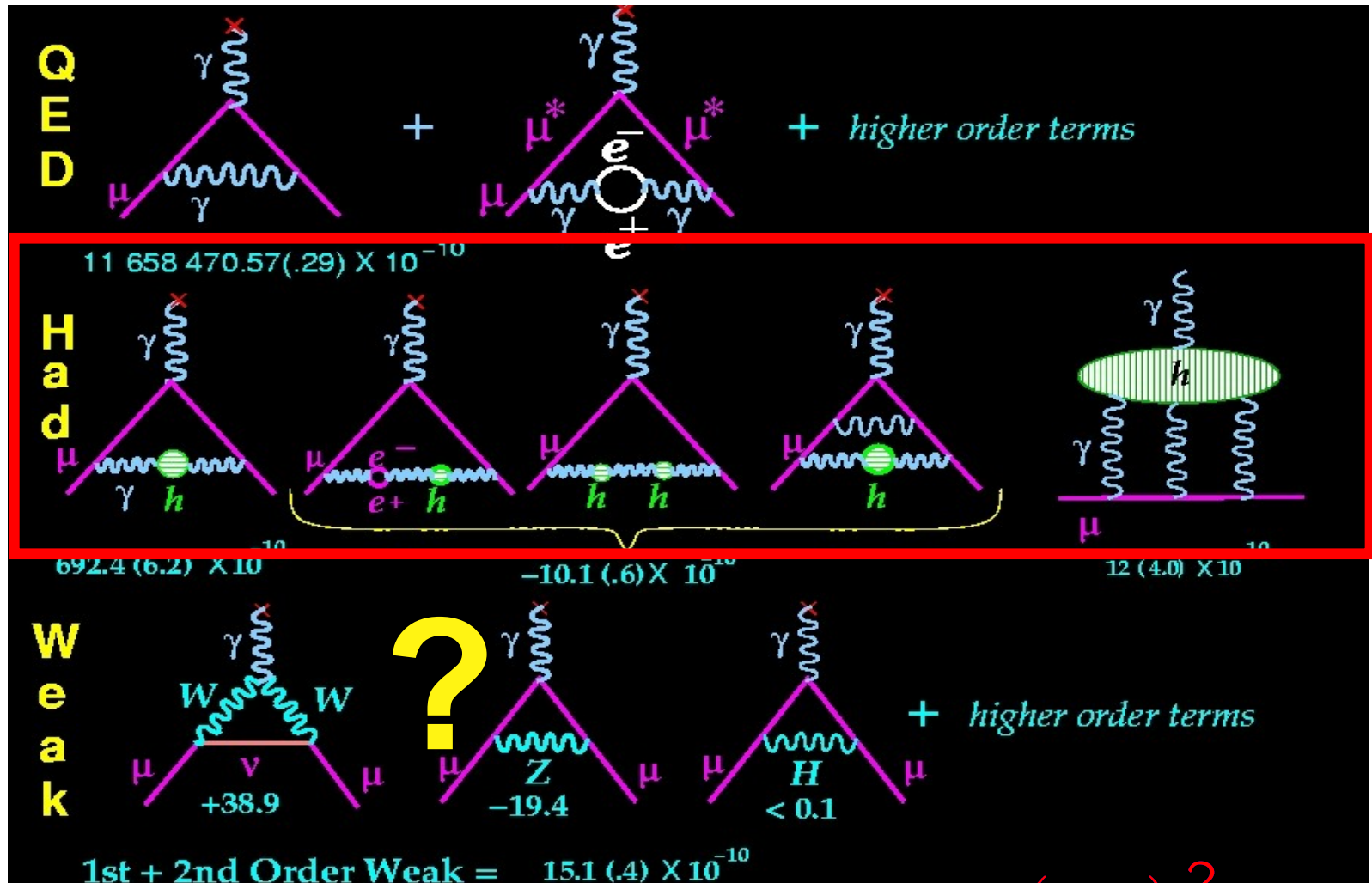
- Musimy sumować wkłady, w tym z większą liczbą wierzchołków
- Ale to jest nieskończony szereg...
- W wielu wypadkach nie musimy sumować do końca – np. w QED sprzężenie proporcjonalne do ładunku elektrycznego – to jest małe sprzężenie

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

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

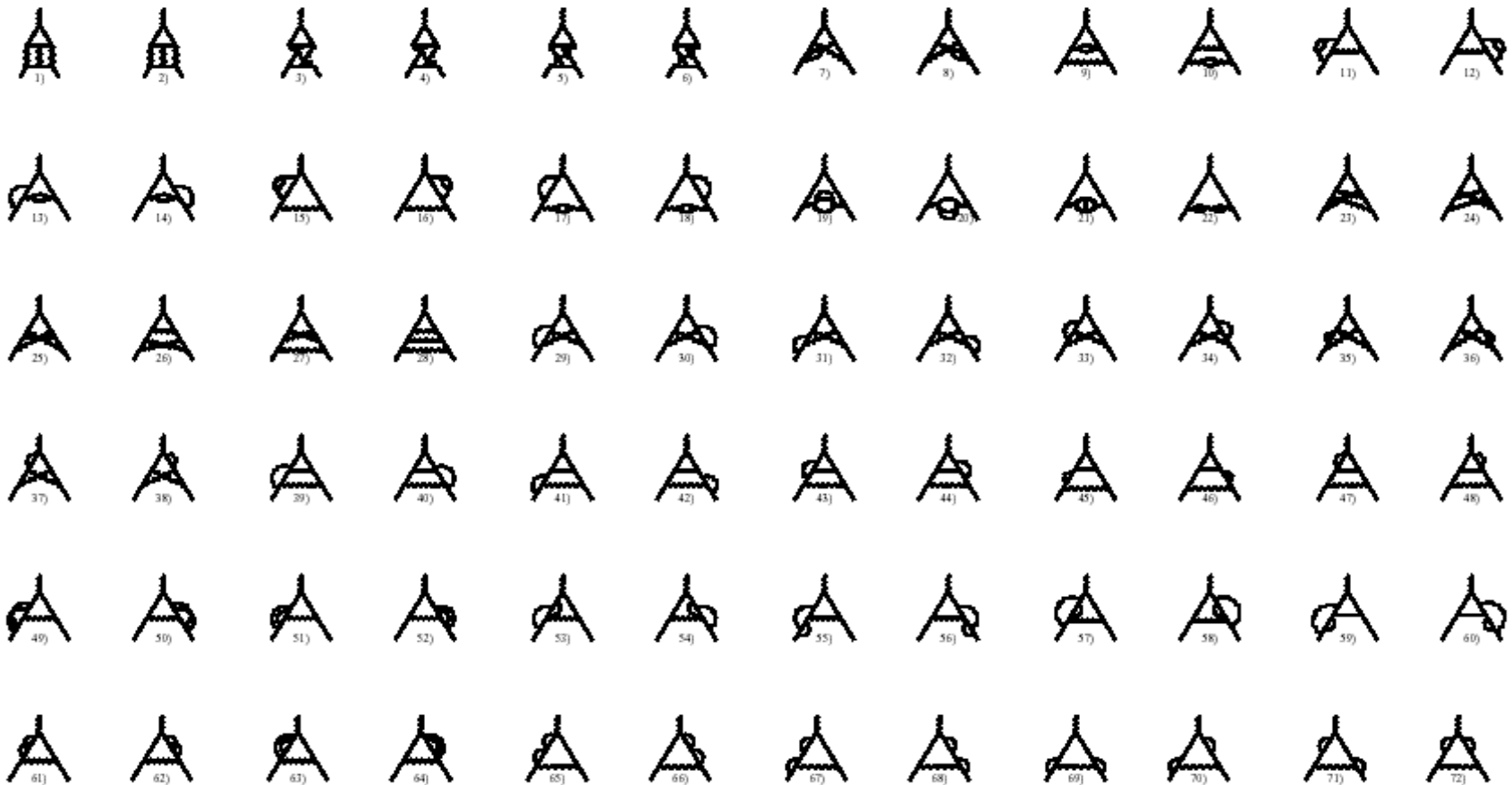
- Rachunek zaburzeń (r.perturbacyjny) - precyzja

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}

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

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):

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

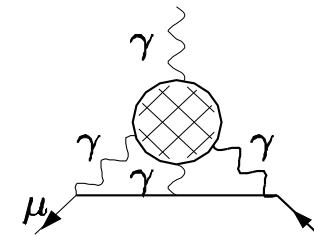
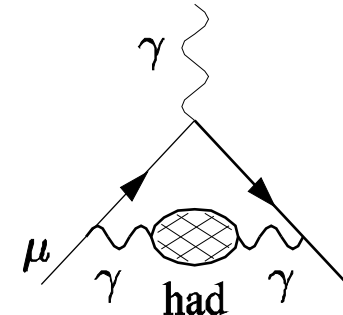
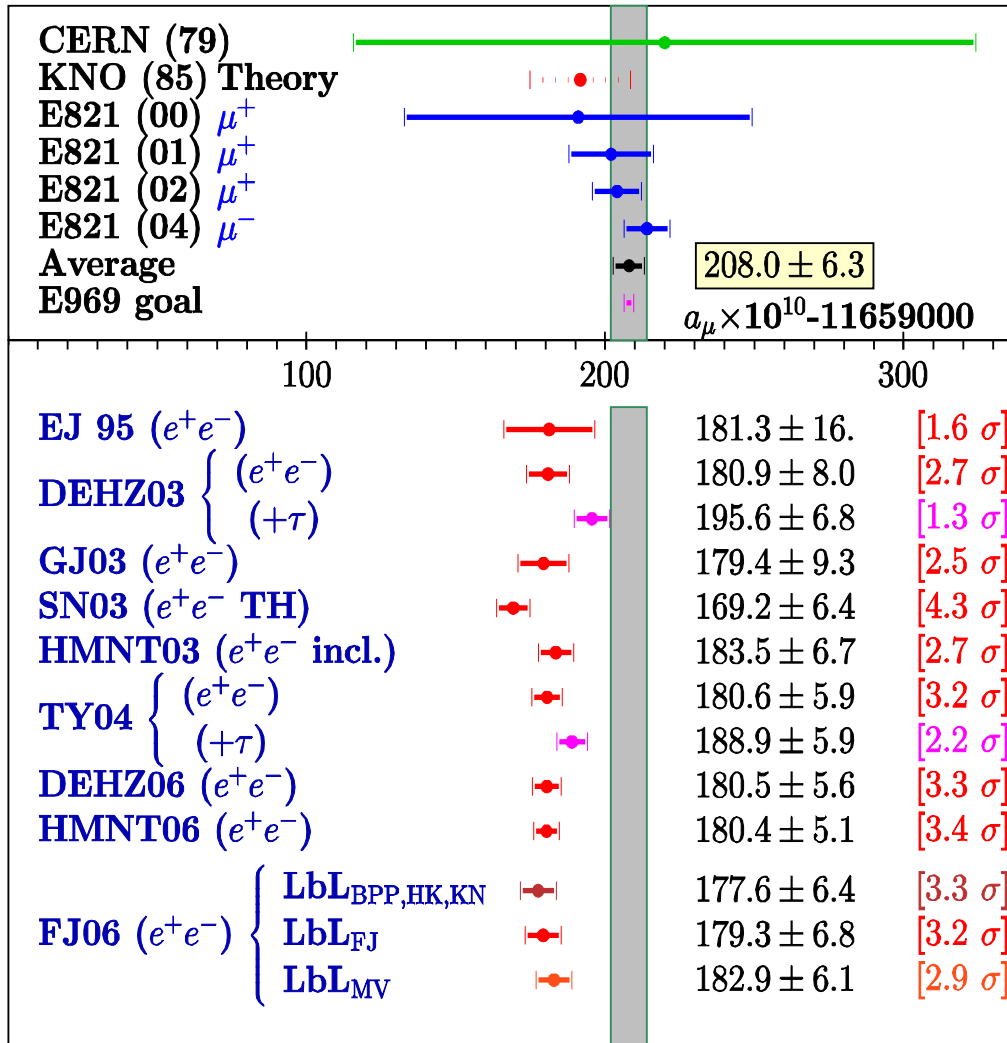
The errors are due to: a/ $\mathcal{O}(\alpha^5)$, b/ α

g-2 for muon (Jegerlehner'07)

New Physics?

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

3.2 σ



Idea renormalizacja

- **Możliwa 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. przyjąć 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 el. jest wolnym (wyjściowym) 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

ale można je izolować

ALE w bardzo dobrej zgodności z danymi

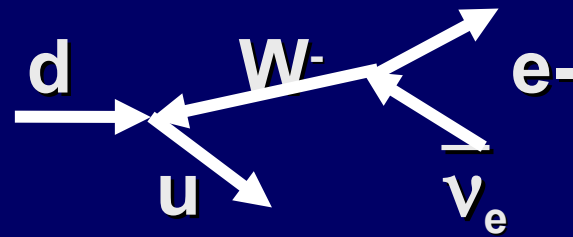
Nierenormalizowalność

- 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

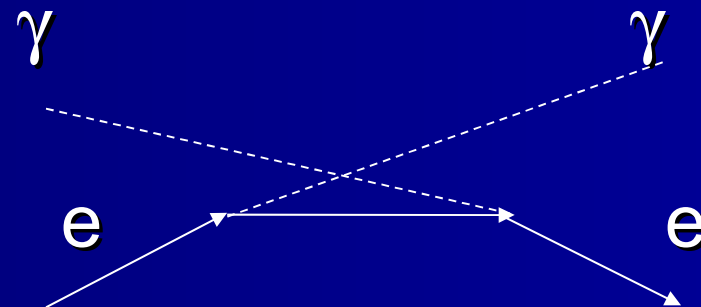
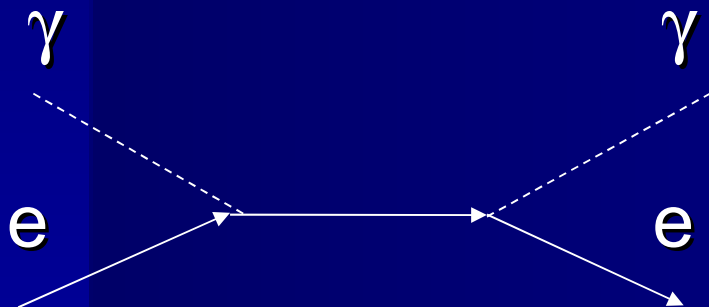
Oddziaływania słabe

- 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”) $\alpha_w = g^2/4\pi = 1/32$
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^+

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
(dwa diagramy) $\gamma e \rightarrow \gamma e$



Zachowanie teorii dla dużych energii

- Żle 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)

Obliczenia prawdopodobieństw-reguły Feynmana

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

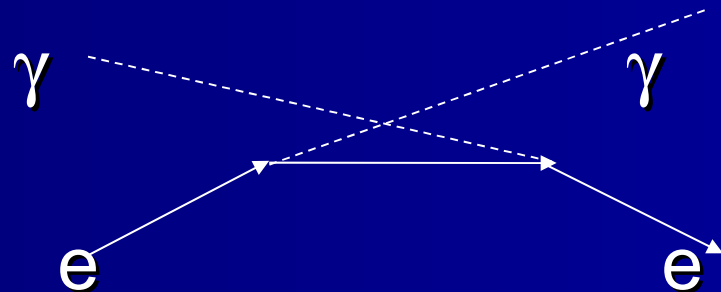
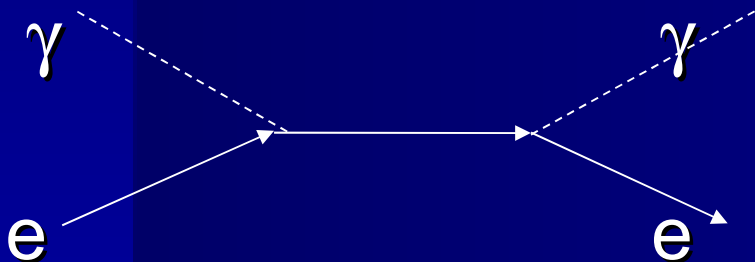
Dla tego procesu amplituda rośnie z energią jak

$$E^2 (\sqrt{E})^2 1/E = E^2$$

(zaś prawdopodobieństwo E^4)

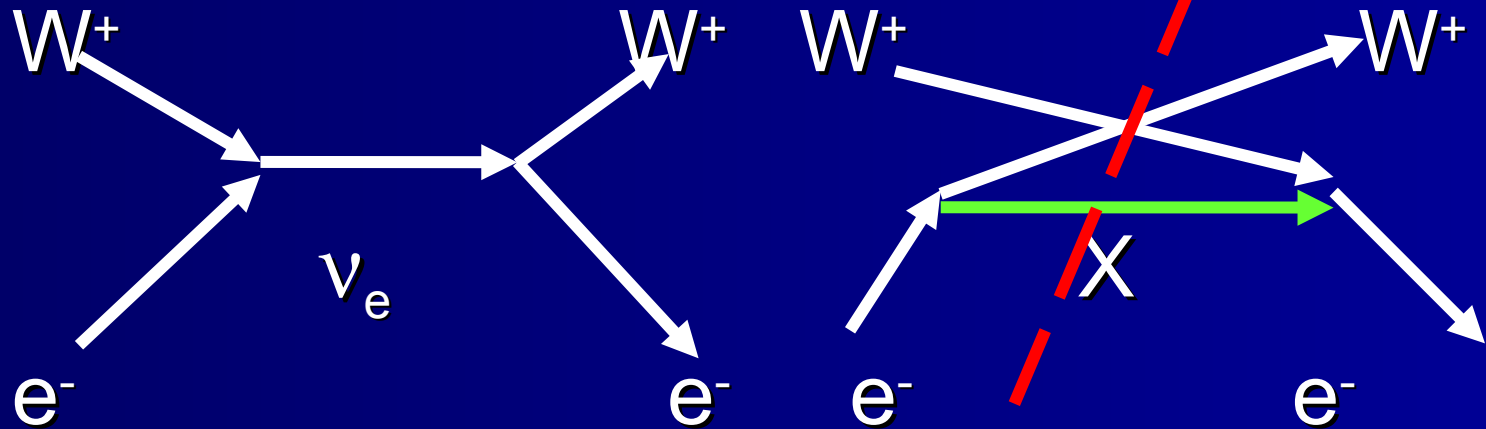
Złe zachowanie każdego z diagramów,
ale w sumie (dodajemy amplitudy!)
kasuje się te wkłady i uzyskany wynik jest
niezależny od energii

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



Rozpraszanie W

- Zastępując γ przez W



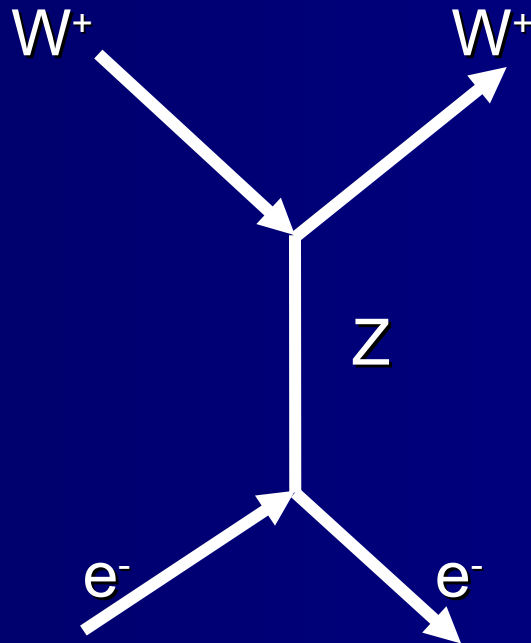
Zachowanie ładunku: X^{--} podwójnie naładowana cząstka –

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 $WWZ \sim E$**)/ $E^2 = E^2$, i
dobry znak sprzężenia WWZ – kasowanie jak dla
procesu Comptona !

**Cena: nowa cząstka bozon Z
z określonym oddziaływaniem**

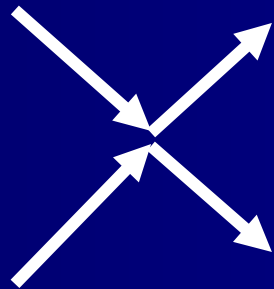
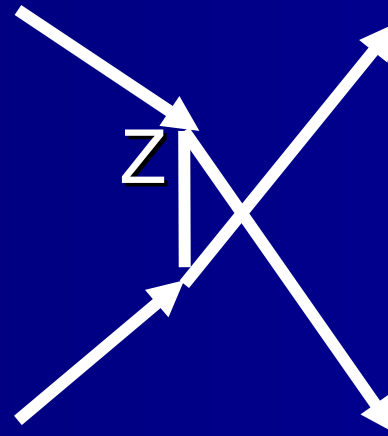
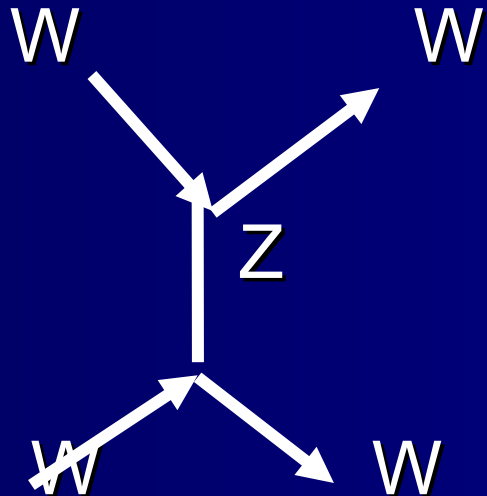
Znaleziono ją – to bozon Z !

→ sukces teorii

Rozpraszanie bozonów W na sobie

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

- Procesy z samymi bozonami W



Nowy typ procesu!

kasowanie członu E^4

ale nie E^2

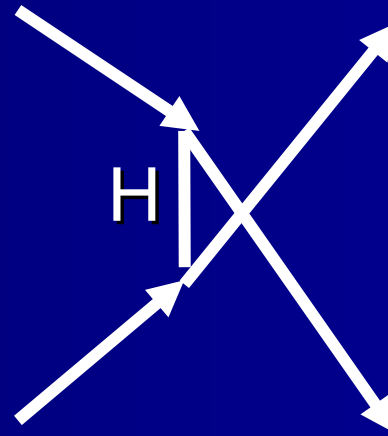
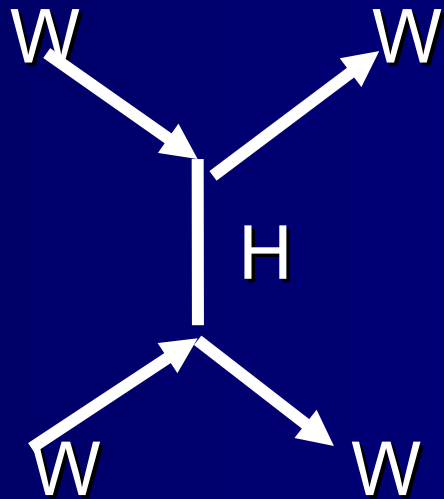
Człon E^2 to w istocie to $E^2 M^2$

- uwaga cząstka Higgsa!

- Z analizy wymiarowej wynika, że w amplitudzie 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 $\rightarrow$

dobrze zachowanie dla procesu $WW \rightarrow WW$

Koniec?

- Konieczność istnienia cząstki 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 (Model Standardowy)

Generacja masy?

- Ponieważ H sprzęga się do masy zakłada się powszechnie, że cząstka Higgsa jest również związana z generacją mas cząstek

Spontaniczne łamanie symetrii → przewidywania dotyczące cząstki H identyczne jak z analizy prawdopodobieństw dla rozpraszania $WW \rightarrow WW$

- Masy- więc oczekiwany związek z grawitacją (i strukturą Wszechświata)

Parametr ρ

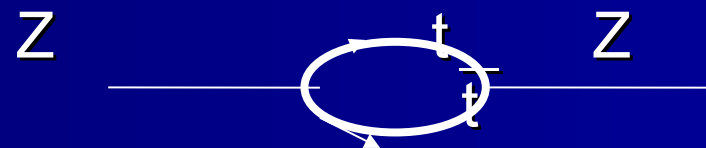
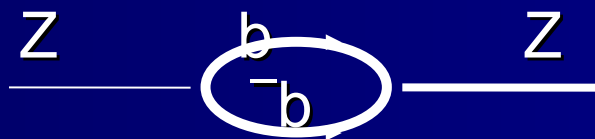
- Inne procesy rozpraszania typu WZ, ZZ
 - wszystkie problemy „rozwiązuje” tylko jedna cząstka H o ile określony związek mas W i Z
$$\rho = M_W^2 / (M_Z^2 \cos^2 \theta_W) = 1$$
- Poprawki kwantowe (wyższe rzędy szeregu) modyfikują ten związek nieco
- Kwark t daje poprawkę rosnącą z m_t^2
 - to pozwoliło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

Nobel 1999 (Veltman, t'Hooft)

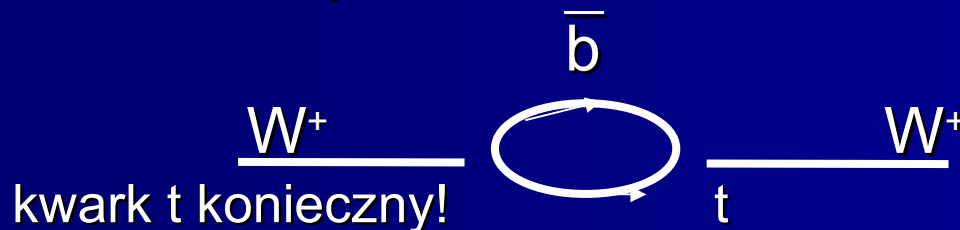
- Struktura poprawek zgodna z symetrią cechowania

Poszukiwanie cząstki Higgsa

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

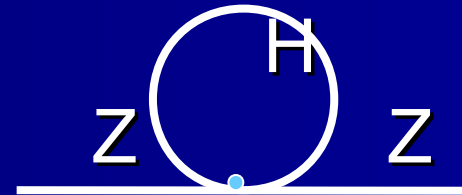
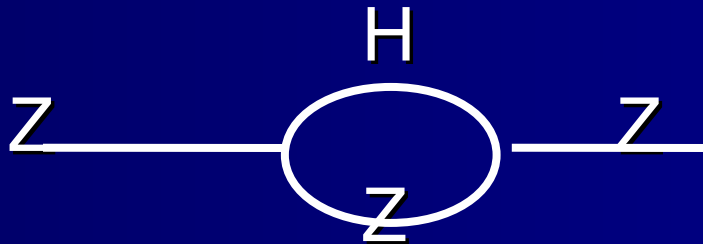


- Poprawki do masy W



Poprawki do mas W/Z od H

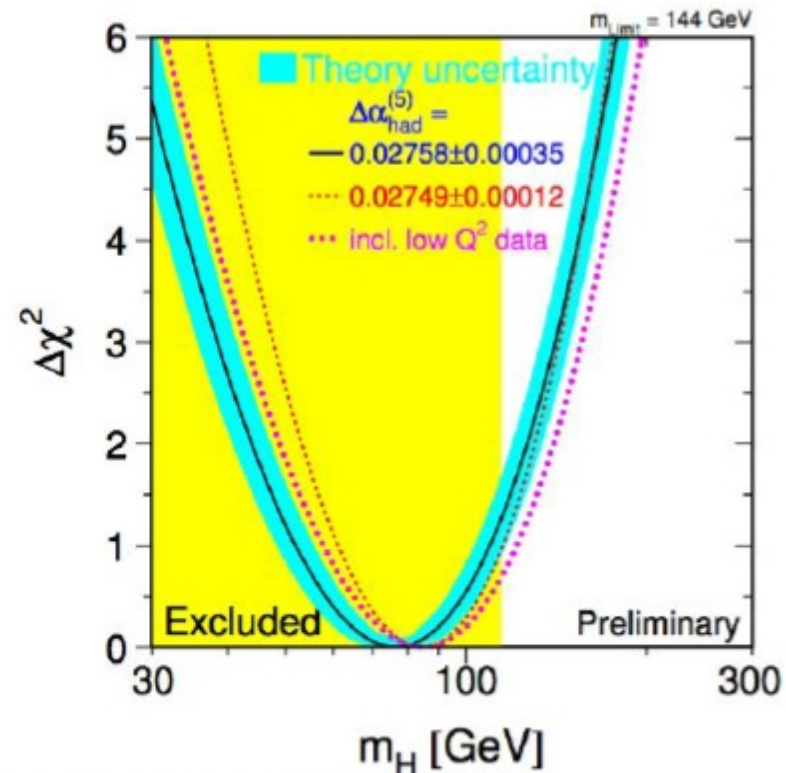
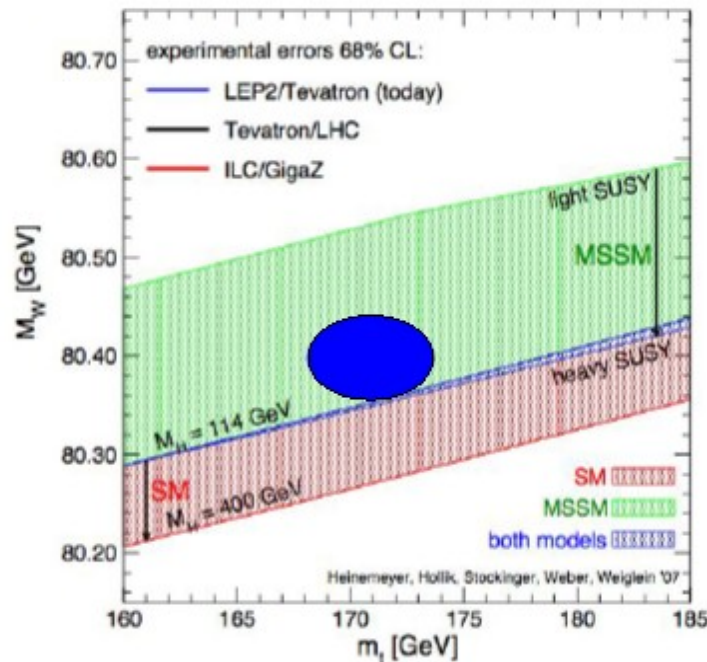
- Pętle z H



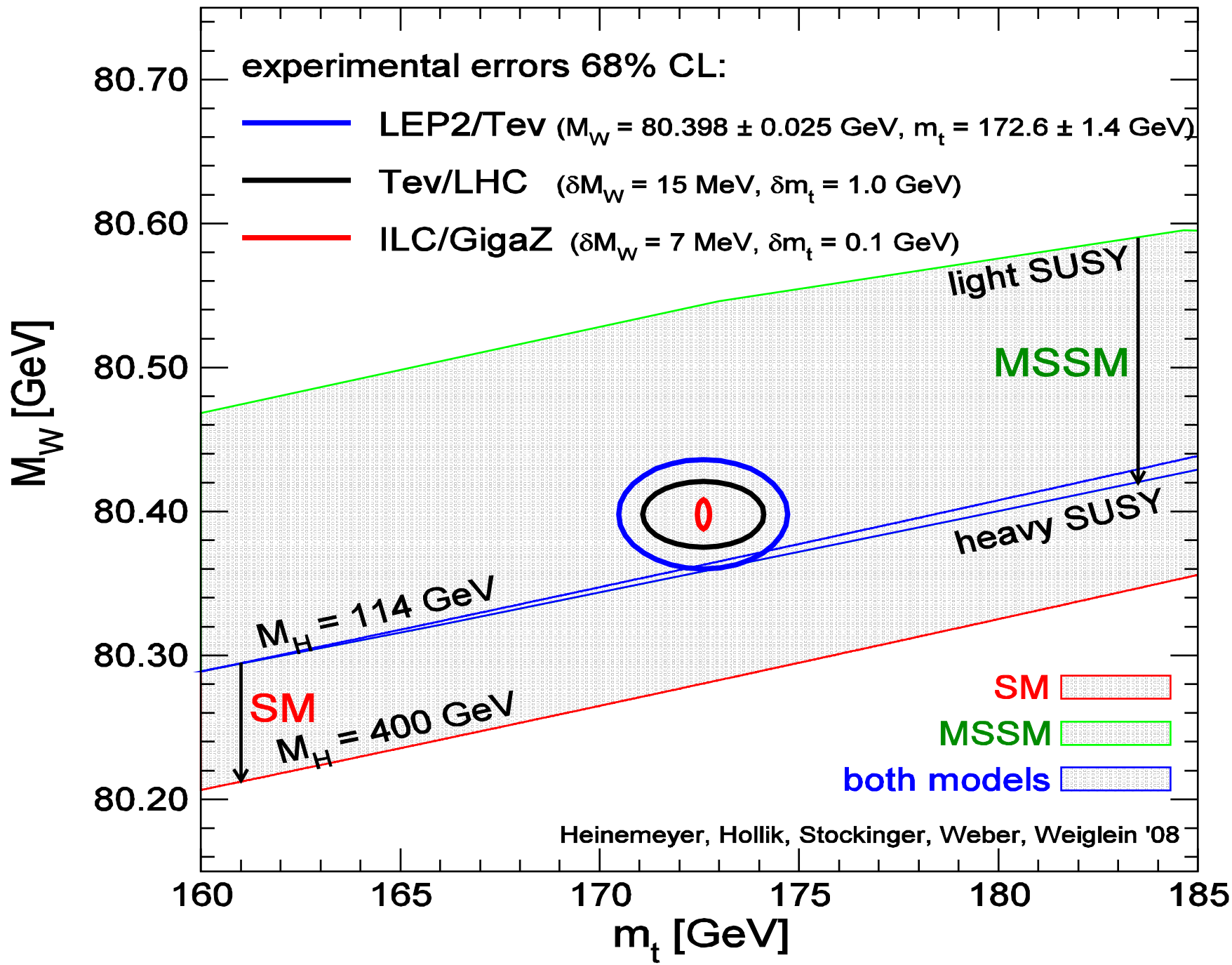
- Zmieniają stosunek mas W i Z ale znacznie mniej niż b i t
- Ale te wkłady od H powodują że przewidywania dla mas t niepewne 5%
Po odkryciu kwarku t → oszacowania na masę H około 100 GeV

M_W , m_{top} and m_{Higgs}

Heinemann



- Indirectly: $m_H < 144$ GeV@95%CL
- Directly (LEP): $m_H > 114$ GeV@95%CL
 - Standard Model excluded at 68% CL



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

Więcej na następnych wykładach

The theory ends here -

Veltman

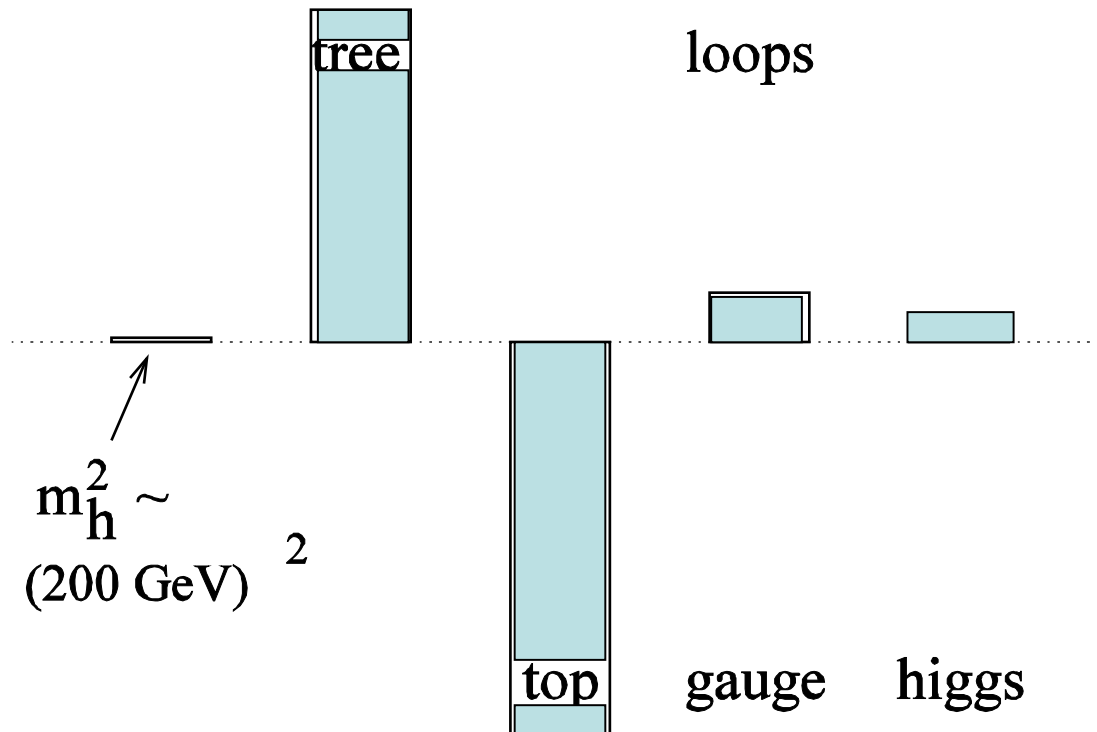
- Samo-oddziaływanie H proporcjonalne do masy H
- Dla dużych mas (>500 GeV) załamuje się rachunek zaburzeń
- *The theory ends here. We need help. Experiments must clear up this mess.*
→ LHC pp,
ILC e^+e^- (PLC $\gamma\gamma$, $e\gamma$)

Problemy Modelu Standardowego

- Wiele parametrow (np.masy)
- Dlaczego trzy rodziny?
- Niezerowa masa neutrin
- Problem hierarchii- poprawki kwantowe
 $M_H \ll M_{\text{Planck}} \text{ (} 10^{19} \text{ GeV)}$
- Grawitacja?
- Opisuje 4 % wszechświata – brak kandydatów na ciemną materię

Odstępstwa od Modelu? No, i gdzie jest Higgs?

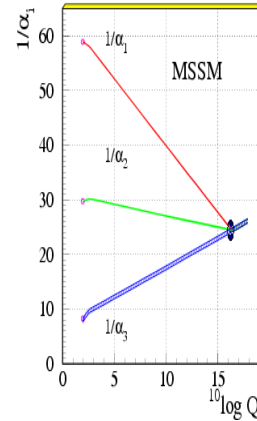
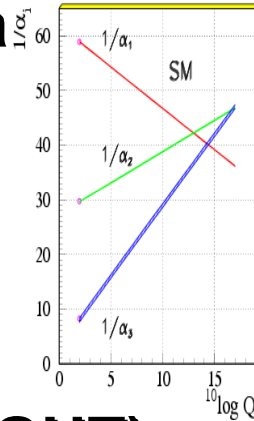
Fine tuning



Poza Modelem Standardowym

- **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 ?**

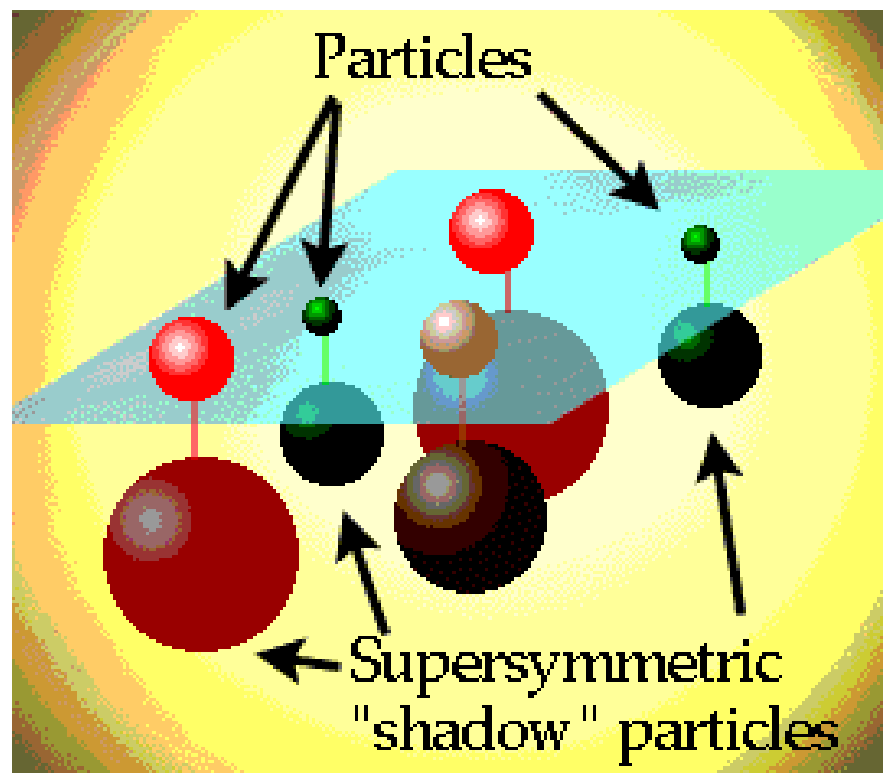
**W grawitacji – naturalną skalą jest skala Plancka
masa Plancka $M = (\sim c / G_N) = 1.2 \cdot 10^{19}$ GeV**

G_N – stała Newtona długość Plancka $1.6 \cdot 10^{-35}$ m

SUPERSYMETRIA

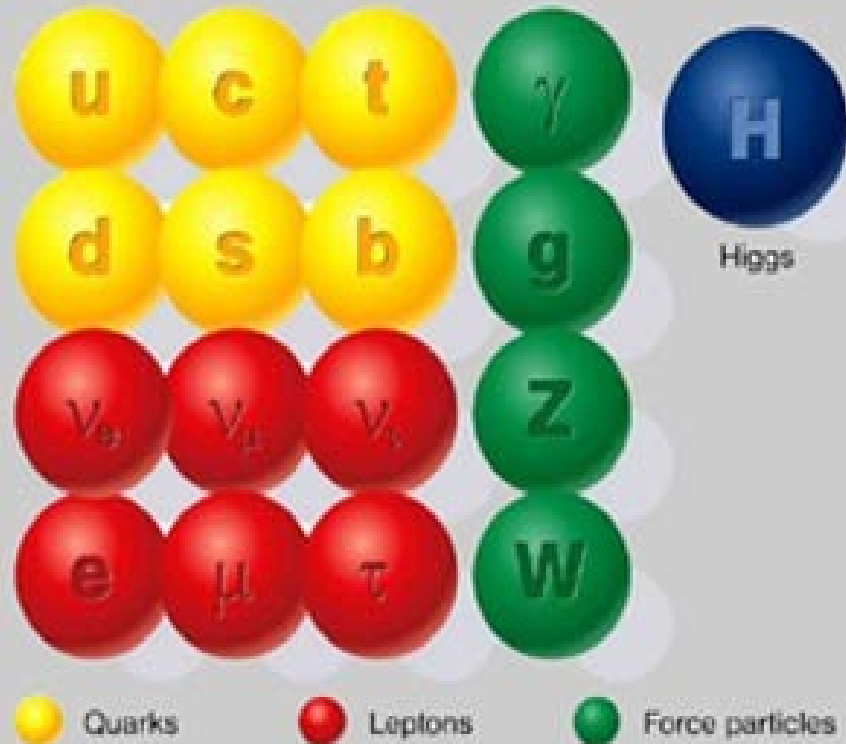
- Symetria fermion – bozon
czyli podwojenie składu
cząstek

Cząstki SUSY muszą
być b. masywne bo ich
nie obserwujemy.
Supersymetria musi
być łamana

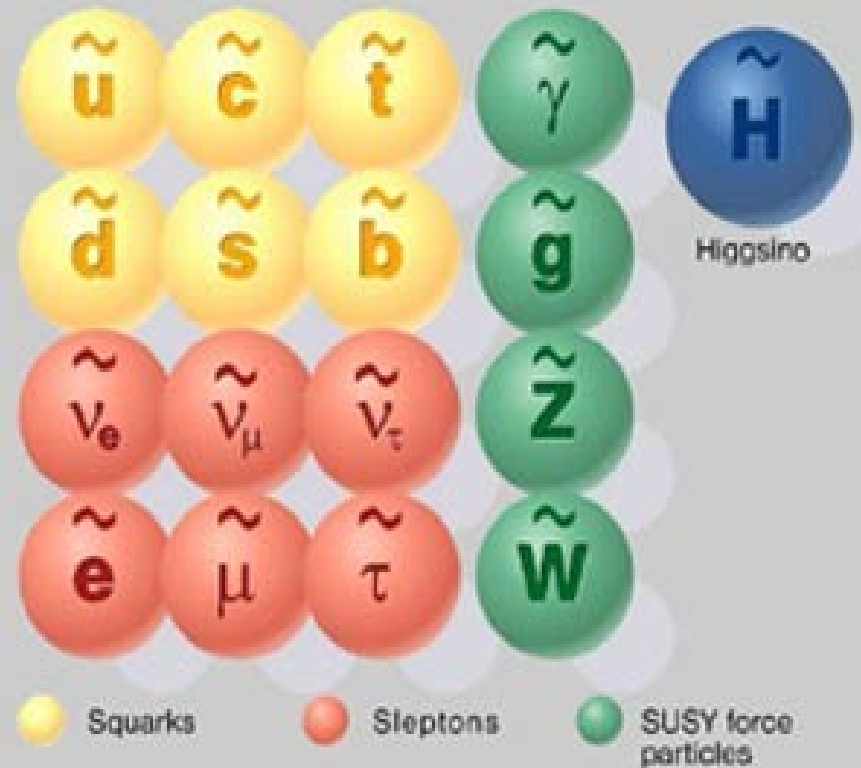


Słodcy partnerzy

Standard particles



SUSY particles

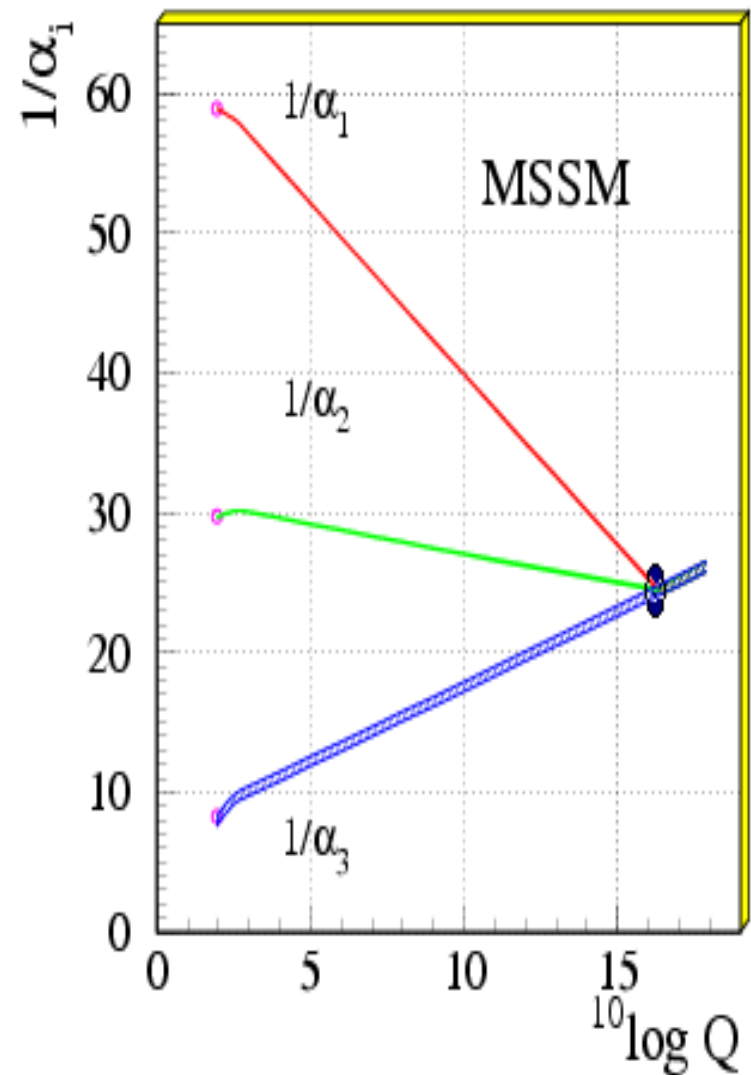
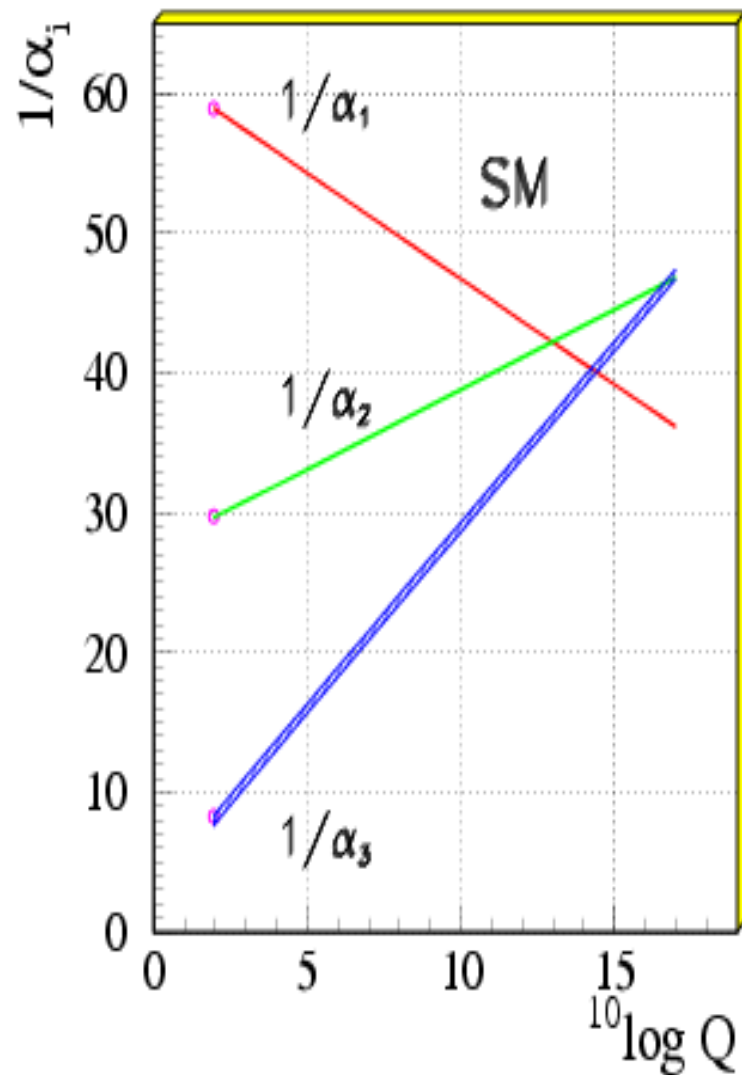


Masy ~ 1 TeV

Supersymetria jest super

- Problem hierarchii usunięty – kasowanie się wkładów od fermionów i bozonów
- Unifikacja oddziaływań: lepsze „zbieganie” stałych sprzężenia
- Nowa liczba kwantowa R , więc najlżejsza cząstka SUSY jest trwała → kandydat/ka na ciemną materię

Unifikacja sił



SUPERSYMETRIA

wg D. Grossa

Odkrycie supersymetrii -

**To jak odkrycie kwantowych
wymiarów czaso-przestrzeni**

**Naturalne i unikatowe rozszerzenie
relatywistycznych symetrii natury**

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)

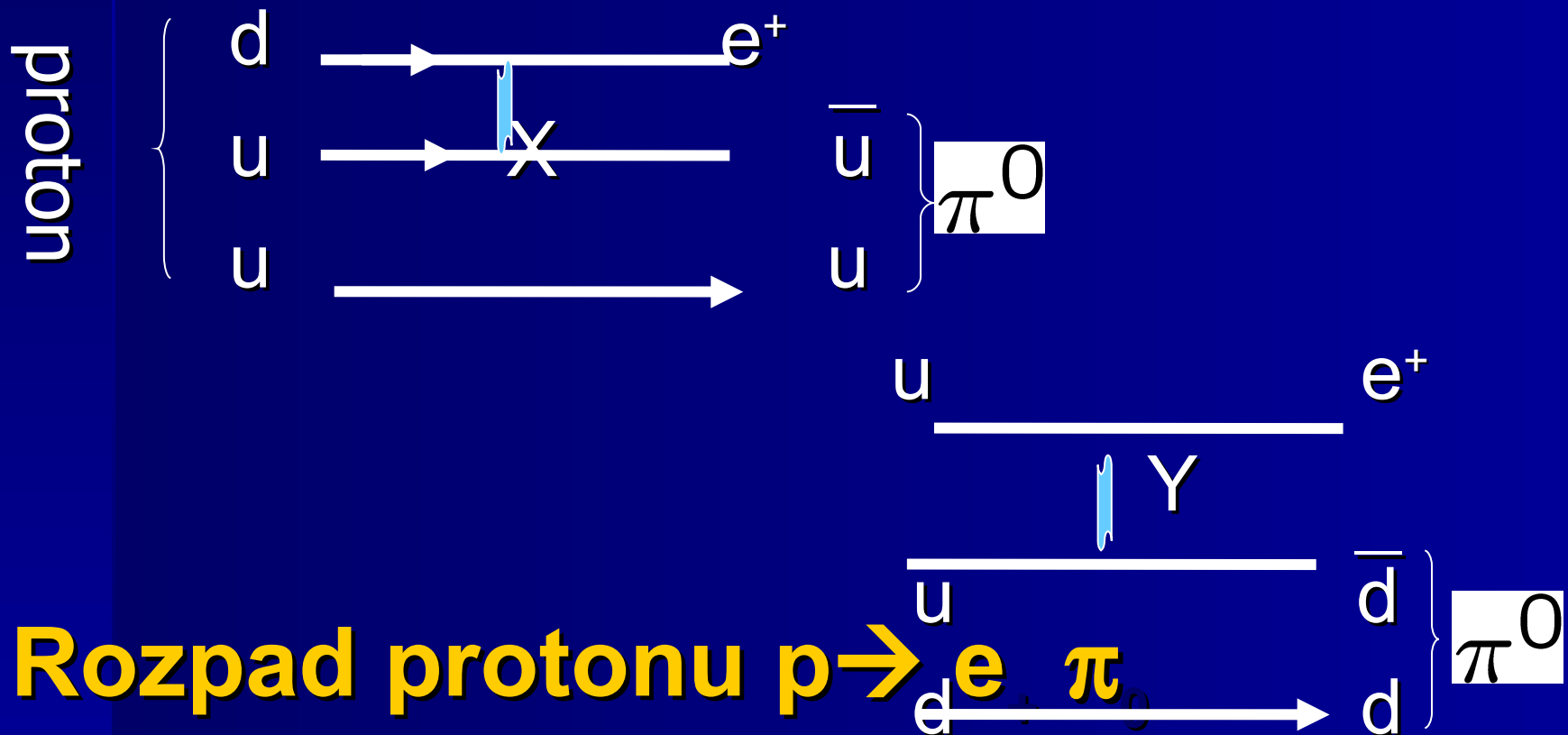
higgsina o spinie $\frac{1}{2}$

- Gejdżina mieszają się z higgsinami
→ 4 fizyczne cząstki neutralna i 4 czardżina

Teoria Wielkiej Unifikacji: SU(5)

- Symetria cechowania SU(5) (zawiera $SU(2) \times U(1) \times SU(3)$ jako podgrupę)
zapropozowano w 1974
- W multipletach zarówno kwarki jak i lepton -
możliwość zamiany kwarków w lepton 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.
 $u_c, u_s, u_n, d_c, d_s, d_n, e^-, \nu_e$ 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^{30-31} lat

■ Przykłady procesów z wymianą X i Y



KALUZA-KLEIN THEORY

D.Gross



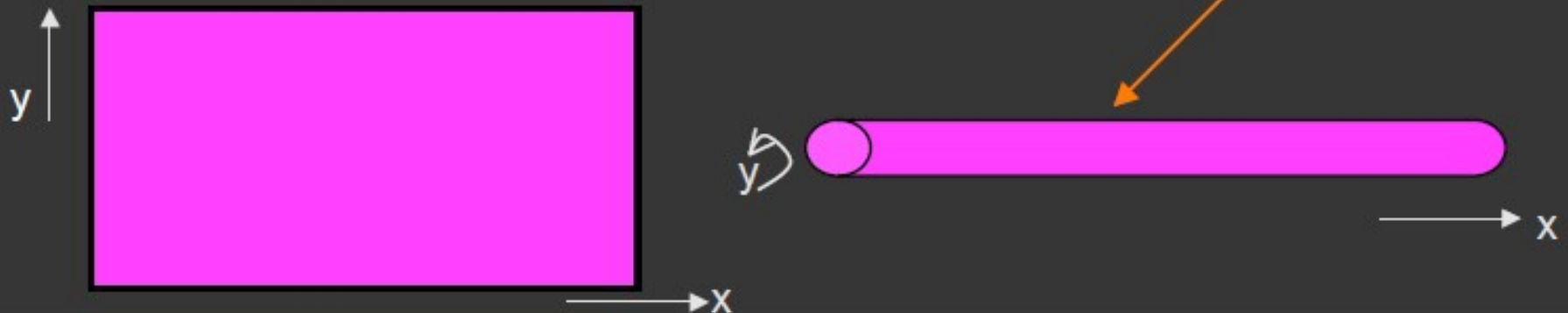
(1919-21) If space-time is dynamical there might exist new, curled up, spatial dimensions.

Jeśli czaso-przestrzeń jest dynamiczna mogą istnieć nowe, zwinięte, wymiary przestrzenne
To może wyjaśnić oddziaływania e-m jako efekt grawitacji w 5 wymiarach !



Einstein was fascinated by this idea and came back to it over and over again---for over 30 years.

Can explain
E&M as an
effect of gravity
in 5 dimensions



Superstruny

- Teoria Wszystkiego (Theory of Everything)
połączenie 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 teoria dla oddz. silnych ale tu grawiton (bezmasowa cząstka o spinie 2) się pojawia w wersji supersymetrycznej
- Parametr opisujący struny α' -..Brak przewidywań

THE ACHIEVEMENTS OF STRING THEORY

- A Consistent, Logical Extension of the Conceptual Framework of Physics

REVOLUTIONS IN PHYSICS

Relativity	c	Velocity of light
Quantum Mechanics	h	Quantum of action
String Theory	G	Planck length

- A Consistent and Finite Quantum Theory of Gravity
- A Rich Structure That Could Yield a Unique and Comprehensive Description of the Real World (a T.O.E)

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.

Testy Modelu Standardowego

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat Cząstek Elementarnych

Wykład 12

- bozony $W^\pm$ i Z^0
- kwark t
- kolor kwarków
- liczba neutrin
- pomiary precyzyjne
- poszukiwania bozonu Higgsa
- poszukiwanie “nowej fizyki” (poza Modelem Standardowym)

Wprowadzenie

Nagrody Nobla

1979 - Sheldon L. **Glashow**, Abdus **Salam** i Steven **Weinberg**

Za stworzenie model oddziaływań elektro-słabych
oraz przewidzenie istnienia bozonów $W^{\pm}$ i Z^0

1984 - Carlo **Rubia** i Simon **Van der Meer**

Za odkrycie bozonów $W^{\pm}$ i Z^0

1999 - Gerardus 't **Hooft** i Martinus J.G. **Veltman**

Za wykazanie spójności modelu

2004 - David J. **Gross**, H. David **Politzer** i Frank **Wilczek**

Za stworzenie podstaw opisu oddziaływań silnych

Model oddziaływań elektro-słabych + **chromodynamika kwantowa** (QCD):

Model Standardowy

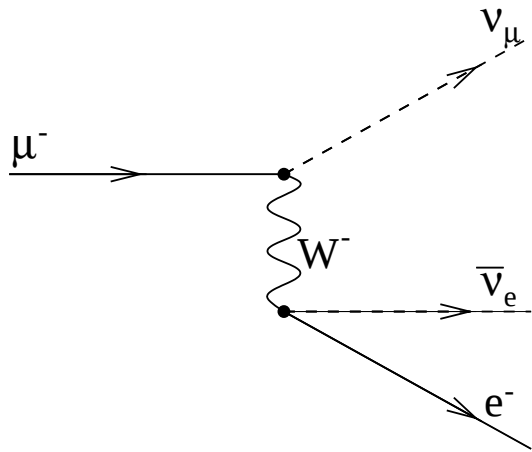
Bozony $W^\pm$ i Z^0

Model Weinberg'a-Salam'a

Nowy model oddziaływań słabych (1968)

Oddziaływanie zachodzi przez wymianę bardzo masywnego bozonu $W^\pm$ lub Z^0 .

Rozpad mionu:



“Słabość” oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z **dużej masy bozonu**:

$$G_F \sim \frac{g^2}{m_W^2}$$

Przyjmując, że **sprzężenie** g powinno być takie jak dla oddziaływań **EM**, **Weinberg** i **Salam przewidzieli** masy $W^\pm$ i Z^0 :

$$m_W \sim 80 \text{ GeV}$$

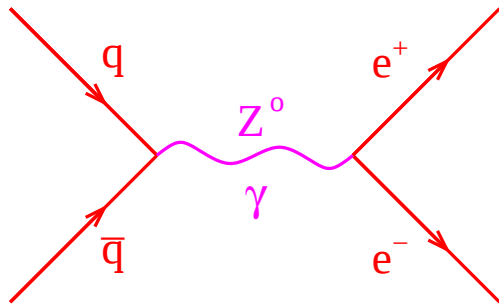
$$m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

Oddziaływania neutrin z wymianą bozonu Z^0 (tzw. **wymiana prądów neutralnych**) - 1973

Bozony $W^\pm$ i Z^0

Odkrycie akcelerator SPS w CERN

W zderzeniach $p\bar{p}$ możliwa jest anihilacja pary $q\bar{q}$ w wirtualny foton lub bozon Z^0 , które następnie mogą się rozpaść na parę leptonów (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$):



Jest to tzw. process **Drela-Yana**. Wkład od wymiany $Z^0 \Rightarrow$ maksimum w **masie niezmienniczej** pary leptonów.

Wyniki UA1 (1983):

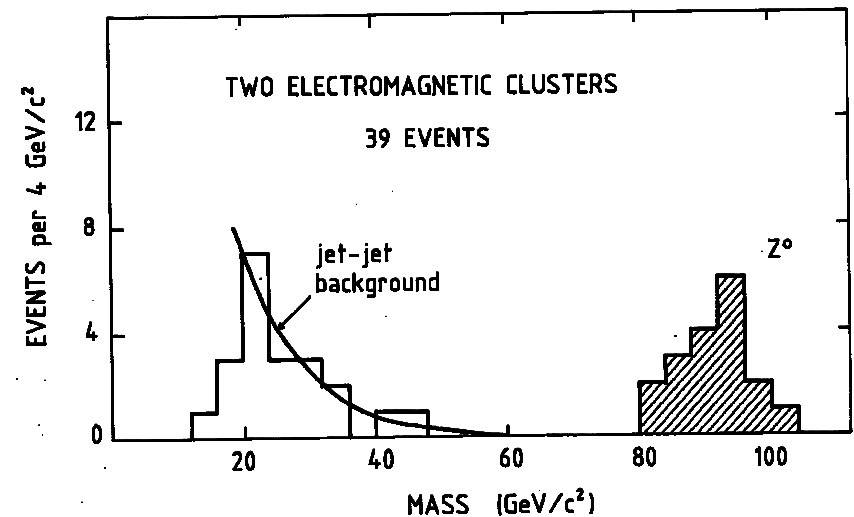
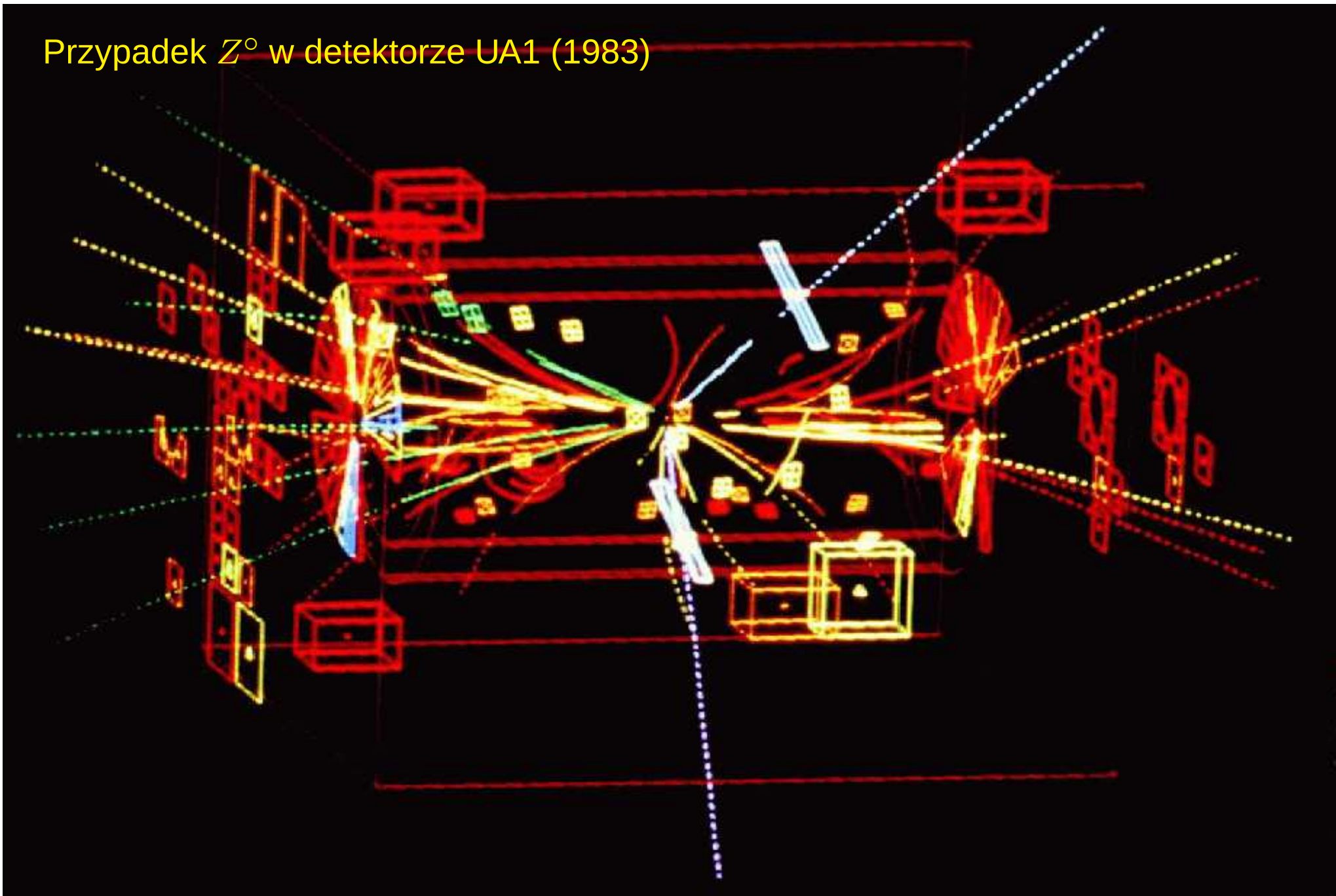


Fig. 1

Przypadek Z^0 w detektorze UA1 (1983)



Bozony $W^\pm$ i Z^0

Odkrycie

W zderzeniach $p\bar{p}$ możliwa jest też “anihilacja” pary $q\bar{q}'$ w bozon $W^\pm$:

$$u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

Proces z **produkcją neutrina**

⇒ niezachowanie pędu poprzecznego

Odkrycie bozonów $W^\pm$ i Z^0 przypisujemy eksperymentom **UA1** i **UA2** przy akceleratorze SPS w CERN.

Wyniki UA1 (1983):

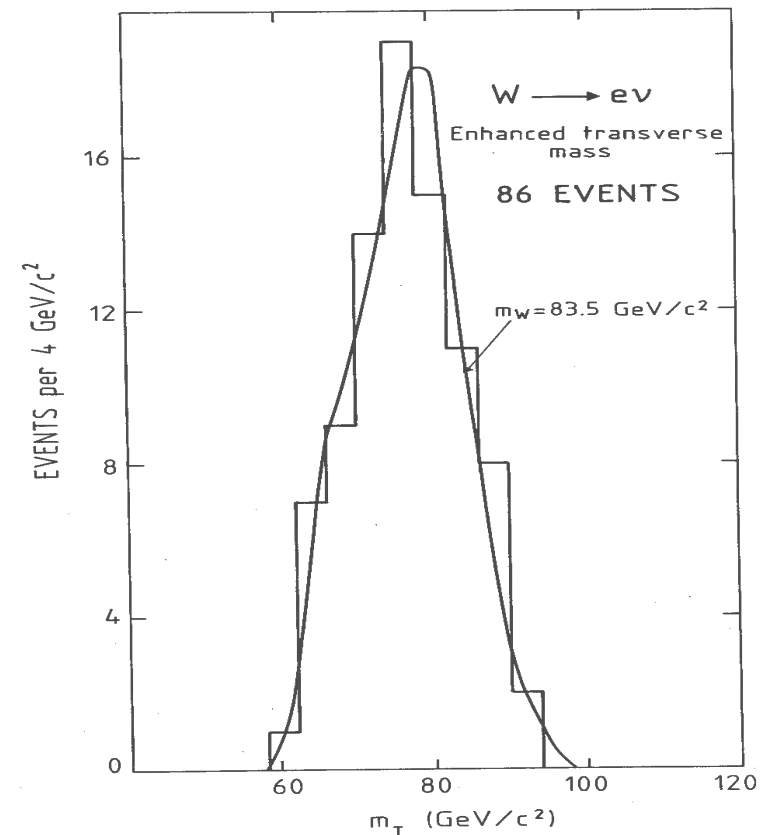
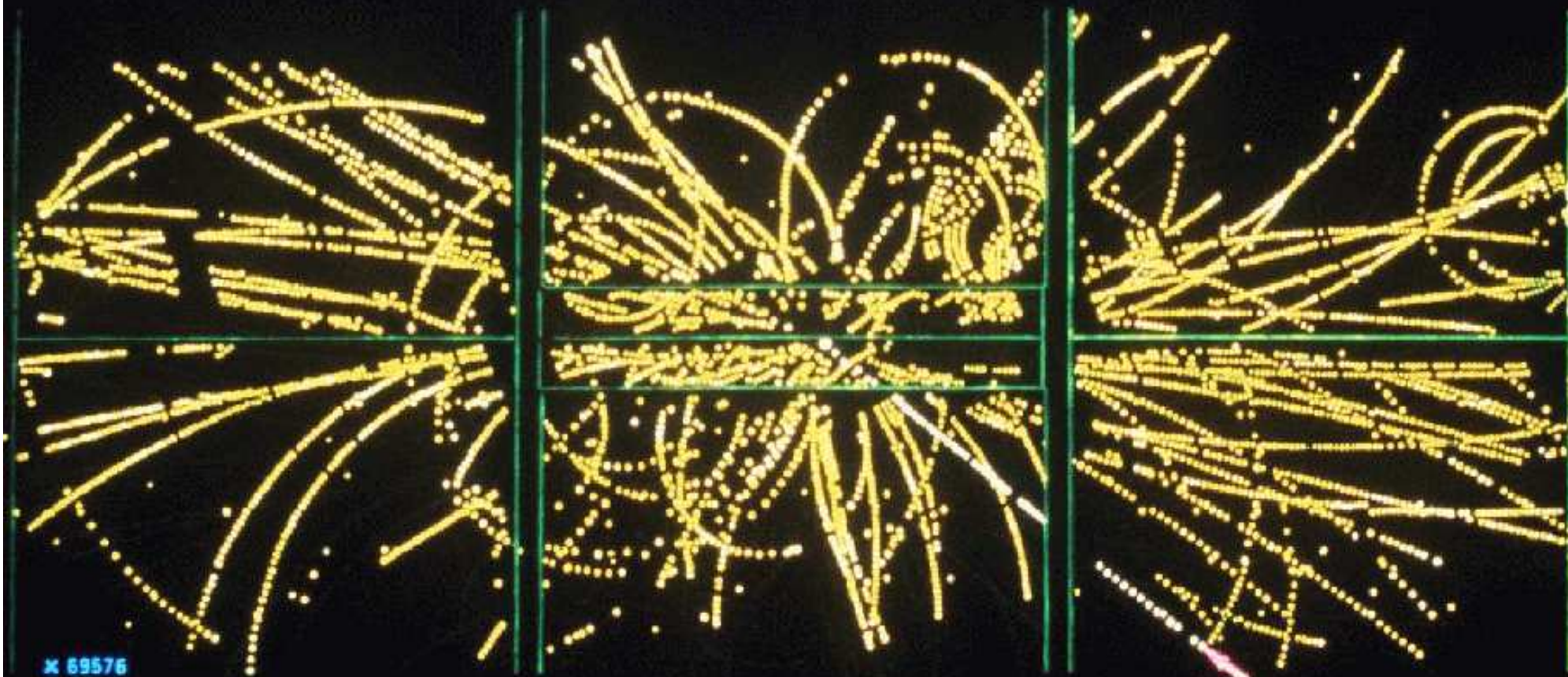


Fig. 3b

EVENT 2958. 1279. Przypadek W^- w detektorze UA1 (1983)



Bozony $W^\pm$ i Z^0

Rozpraszanie elektron-proton

Q^2 - kwadrat przekazu czteropędu
skala energetyczna rozpraszania

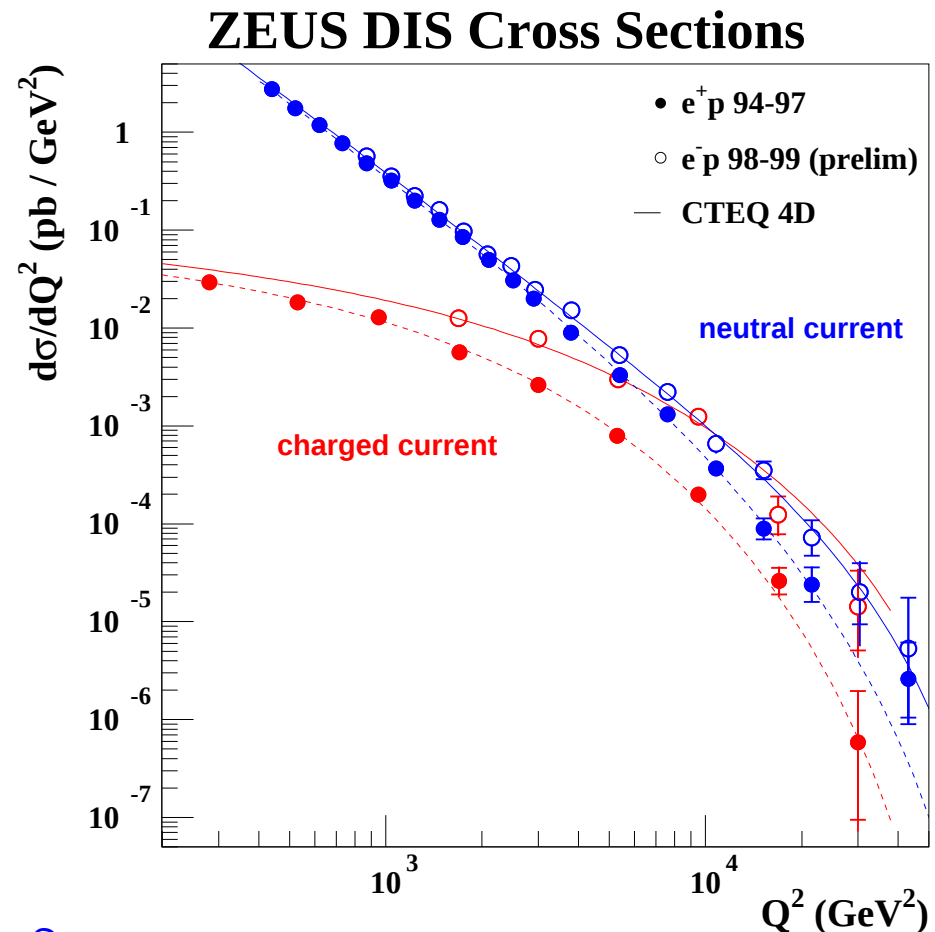
Wymiana prądów neutralnych (NC)
(dominuje wymiana γ):

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{1}{Q^4}$$

Dla wymiany $W^\pm$ (CC):

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{1}{(M_W^2 + Q^2)^2}$$

W obszarze bardzo dużych Q^2 “unifikacja”:



Gdy $Q^2 \geq M_W^2$ oddziaływania słabe porównywalne z EM

Kwark t

Krótką historia

- 1964 - Gell-Mann i Zweig, koncepcja 3 kwarków: u, d, s
- 1970 - Glashow, Iliopoulos i Maiani proponują 4 kwarki: u, d, s, c
- 1973 - Kobayashi i Maskawa dodają 2 kwarki (t i b), żeby wytłumaczyć łamanie CP
- 1974 - Ting, Richter: odkrycie kwarku c
- 1977 - Lederman (Fermilab): odkrycie kwarku b

Własności kwarku b (ładunek, izospin, sprzężenia do bozonów cechowania) odpowiadają kwarkom “dolnym” (d i s) $\Rightarrow$ musi istnieć “górny” partner: **top**

Pierwsze przewidywania (reguła “3”):

$$m_s = 0.5 \text{ GeV} \quad m_c = 1.5 \text{ GeV} \quad m_b = 4.5 \text{ GeV} \quad \Rightarrow \quad m_t \sim 15 \text{ GeV}$$

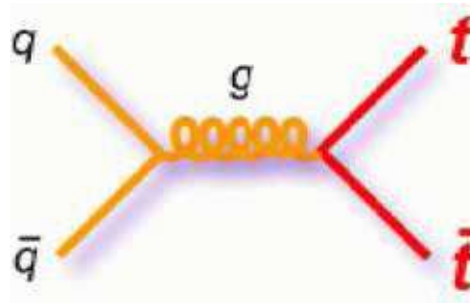
Pierwsze “odkrycie”: CERN SPS, 1984, $m_t \sim 40 \text{ GeV}$ (potem odwołane)

Poszukiwany także w LEP i HERA, bez powodzenia...

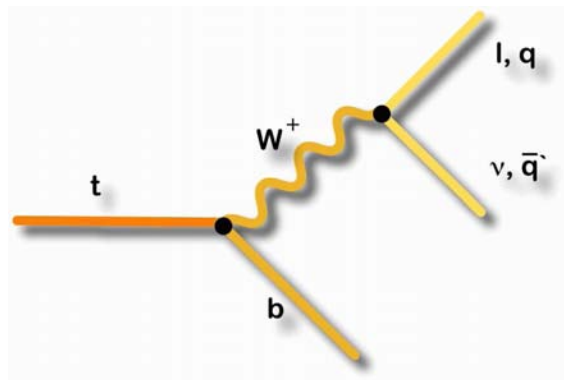
Kwark t

Tevatron zderzenia $p\bar{p}$ przy energii $\sqrt{s} \sim 2 \text{ TeV}$

Kwark t najczęściej produkowany w wyniku anihilacji kwark-antykwar:



Rozpada się prawie natychmiast (nie tworzy żadnych cząstek):



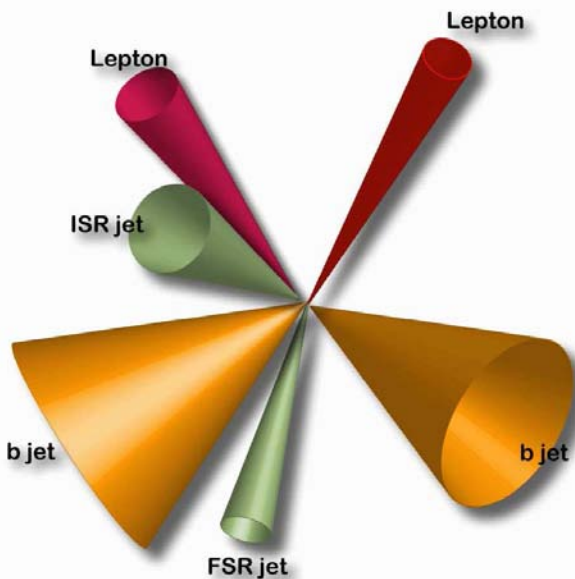
Obserwujemy powstający **kwark b** oraz **lepton** i **neutrino** (brakujący pęd poprzeczny) lub **parę jetów** o masie niezmienniczej odpowiadającej masie W

Kwark t

Tevatron

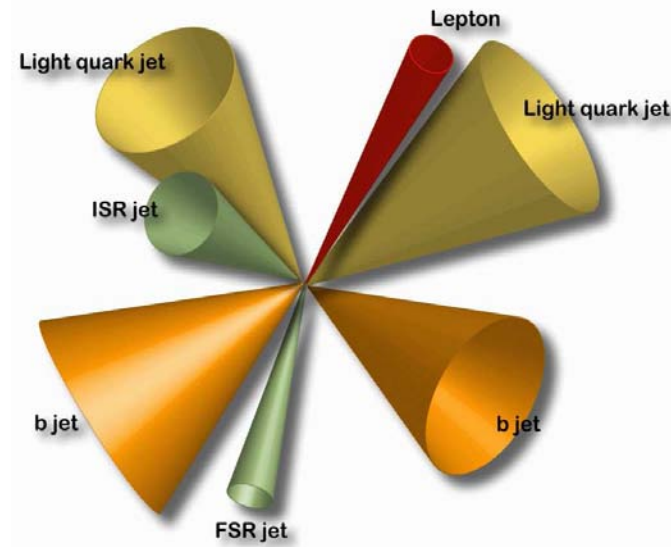
Ponieważ kwark t produkowany jest parami ($t\bar{t}$) mamy 3 możliwe klasy przypadków

leptonowe



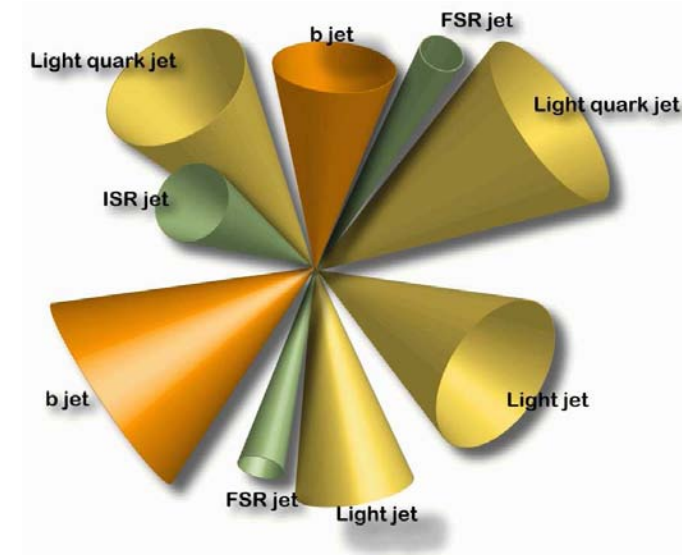
“złota próbka” ale tylko
~4% przypadków
(e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ i $e^\pm\mu^\pm$)

półleptonowe



~30% przypadków
(tylko $e^\pm$ i $\mu^\pm$)
małe tło

hadronowe



~46% przypadków
bardzo duże tło
trudna identyfikacja

Kwark t

Tevatron

Jeden z pierwszych przypadków

$e^+ + 4 \text{ jet event}$

40758_44414

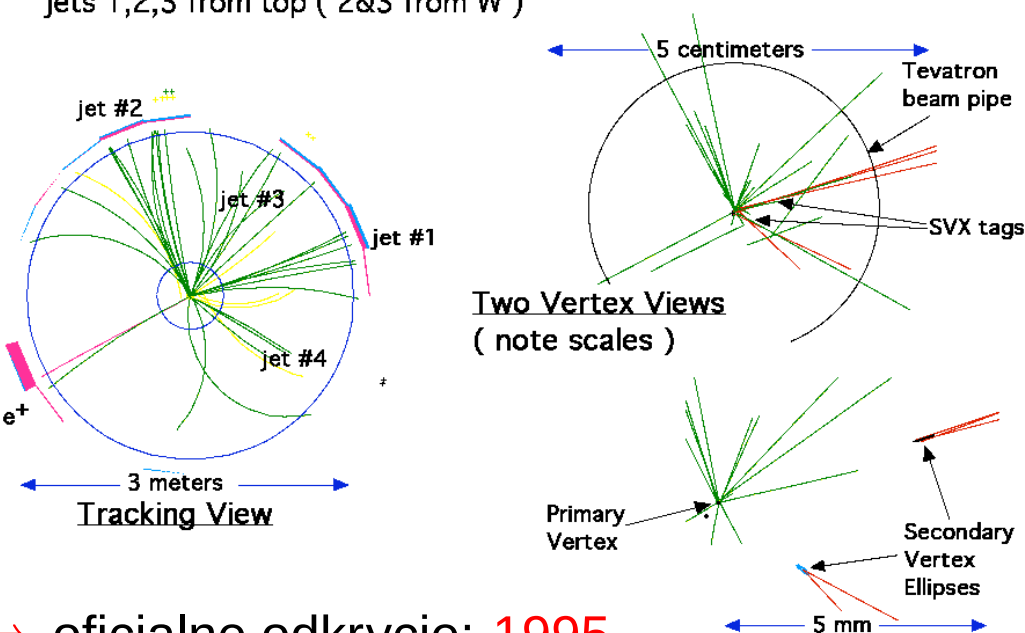
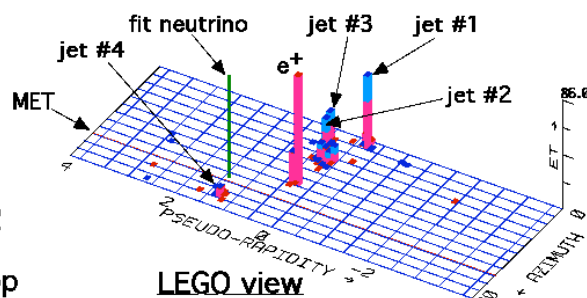
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

fit top mass is $175 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$

e^+ , Missing E_t , jet #4 from top

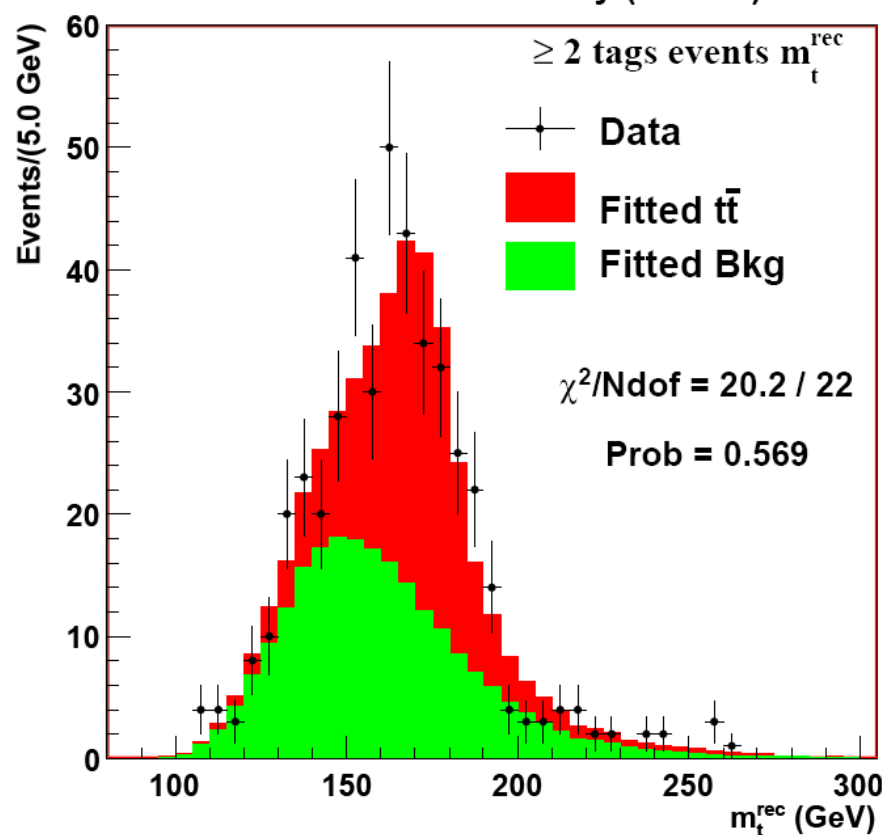
jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



⇒ oficjalne odkrycie: 1995

Najnowsze dopasowanie masy

CDF Run II Preliminary (2.9 fb^{-1})

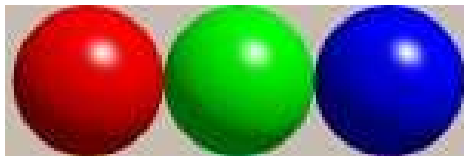


CDF + D0: $m_t = 173.1 \pm 1.3 \text{ GeV}$

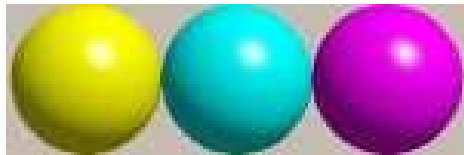
Kolor

Przypomnienie

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

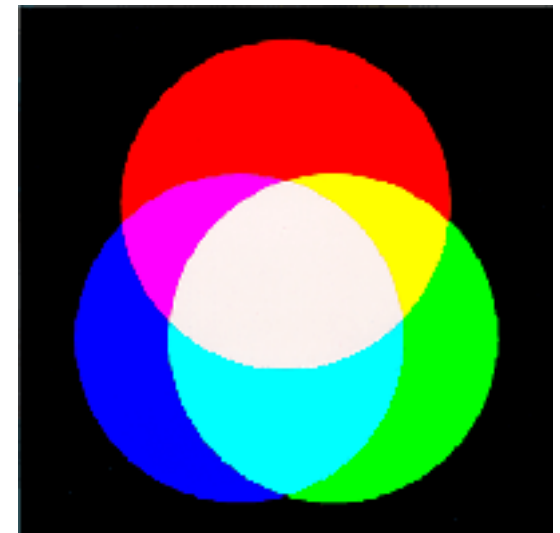


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): $\bar{R}$, $\bar{G}$, $\bar{B}$.



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

$$\begin{aligned} R + G + B &= 0 \\ R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} &= 0 \end{aligned}$$



Kolor

Liczenie kwarków

Wirtualny foton (lub bozon Z^0) powstający w wyniku anihilacji e^+e^- rozpada się na wszystkie dostępne cząstki. Liczbę kwarków można sprawdzić mierząc:

$$R^{e^+e^-} = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \text{hadrony})}{N(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \approx \sum_q e_q^2$$

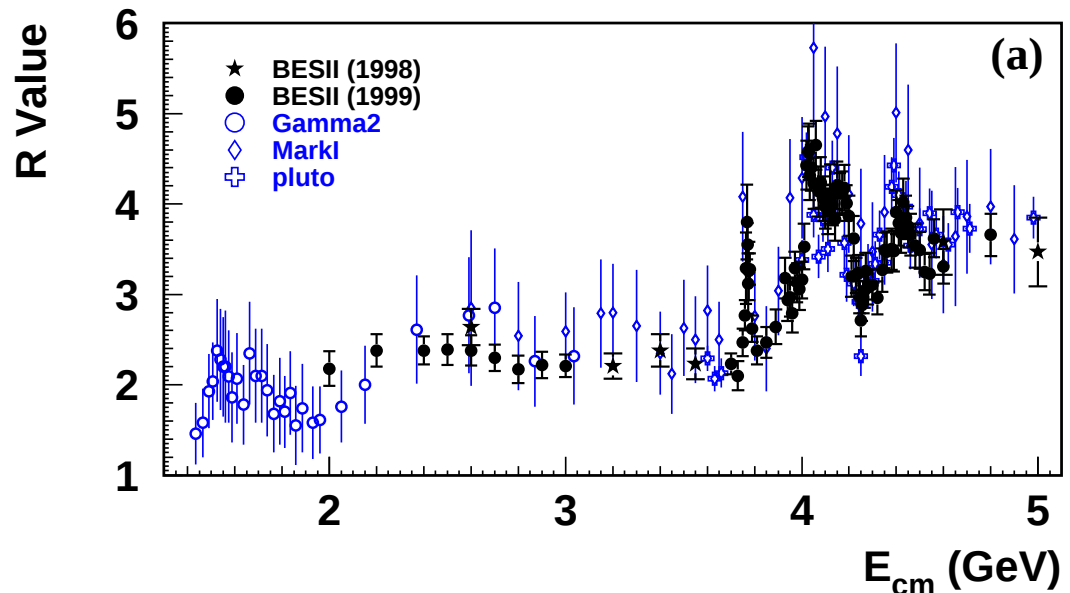
Oczekiwalibyśmy:

dla 3 kwarków (u,d,s): $R \approx \frac{2}{3}$

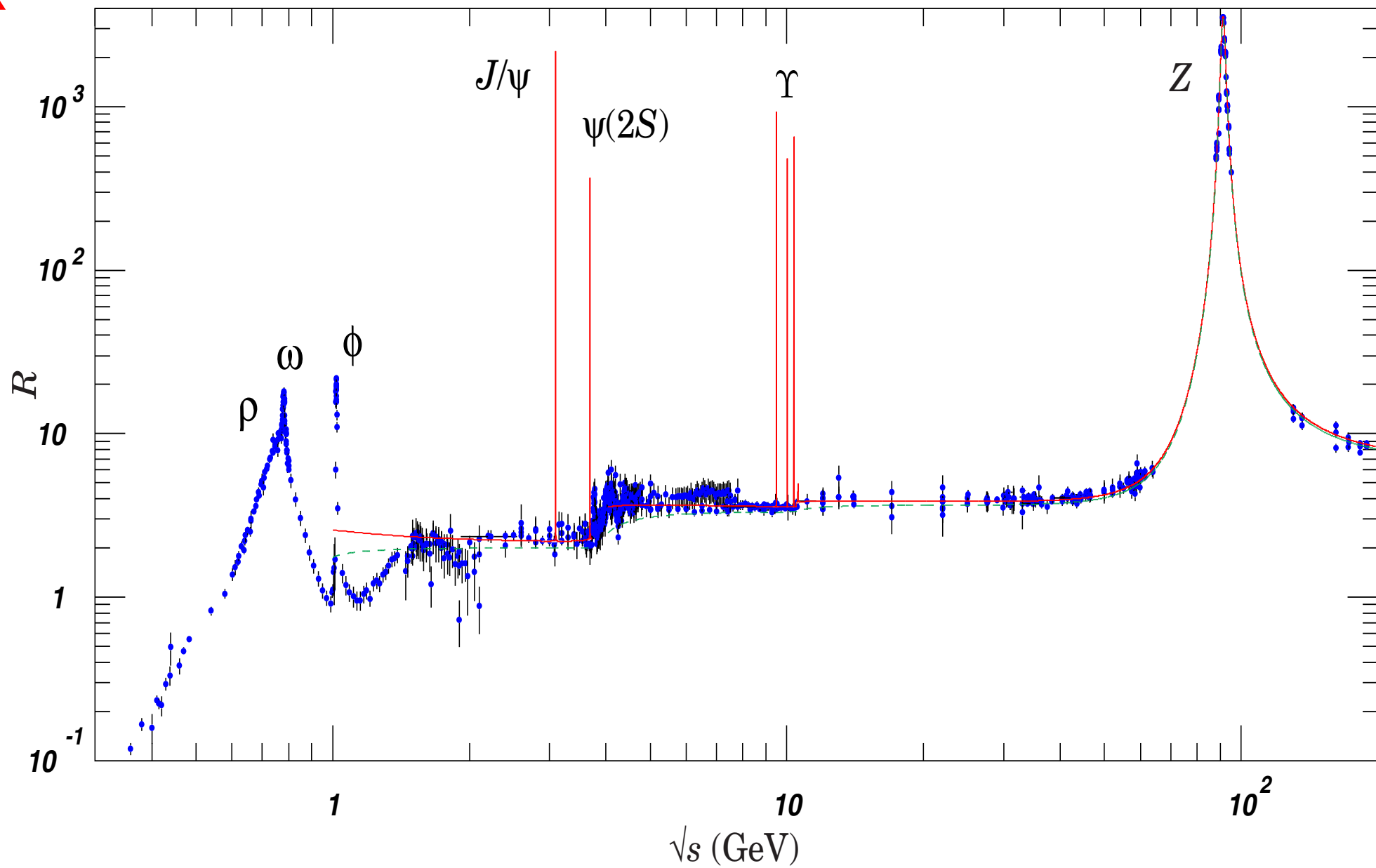
dla 4 kwarków (u,d,s,c): $R \approx \frac{10}{9}$
($E_{CM} > 4 \text{ GeV}$)

W doświadczeniu uzyskujemy wartości 3 razy większe!

⇒ każdy kwark w 3 kolorach !



R



LEP, CERN, Genewa

Niezwykłe precyzyjne testy Modelu Standardowego



Pomiary precyzyjne w LEP

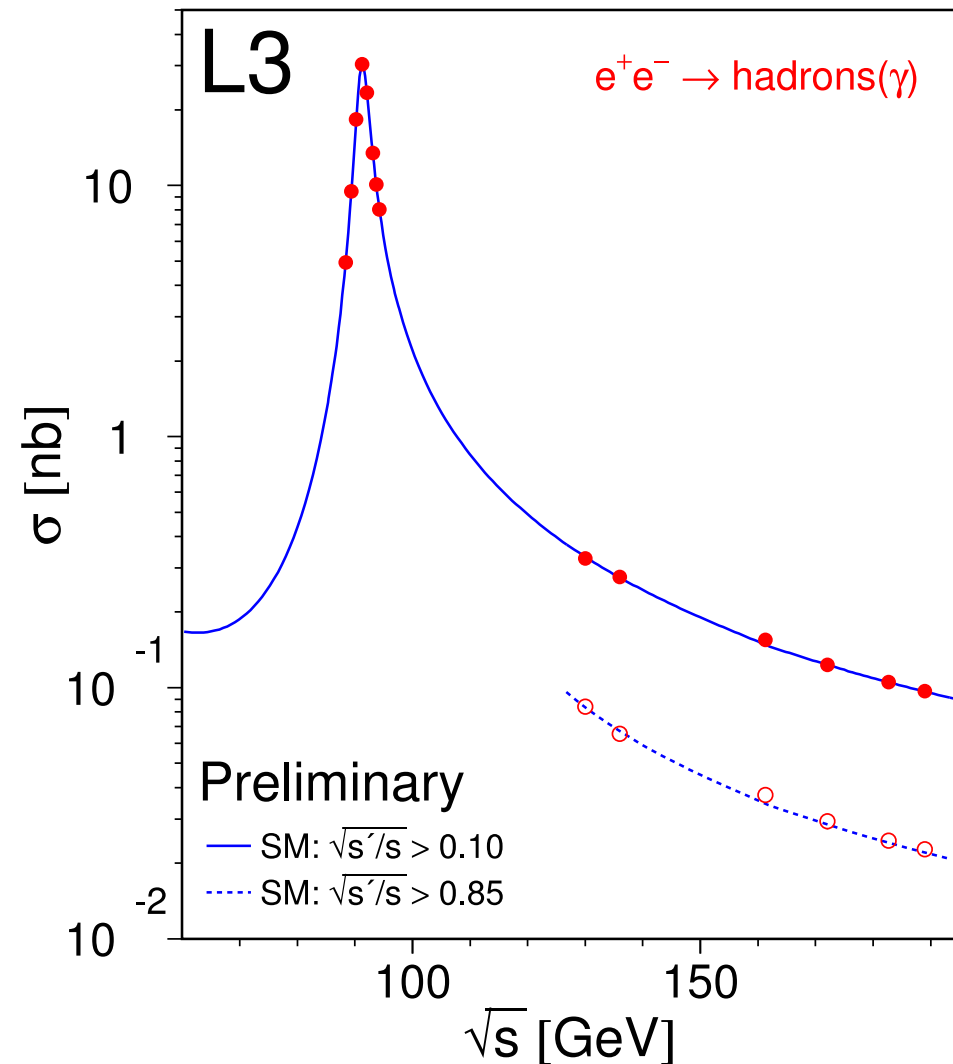
$$e^+e^- \rightarrow Z^0$$

Model Standardowy został bardzo dokładnie **przetestowany** w zderzeniach e^+e^- w akceleratorach **LEP** i **SLC**.

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

Szerokość maksimum odpowiada **naturalnej szerokości** bozonu Z^0 .

Ponieważ jest to cząstka niesłychanie krótkożyciowa, jej masa nie jest dokładnie określona...

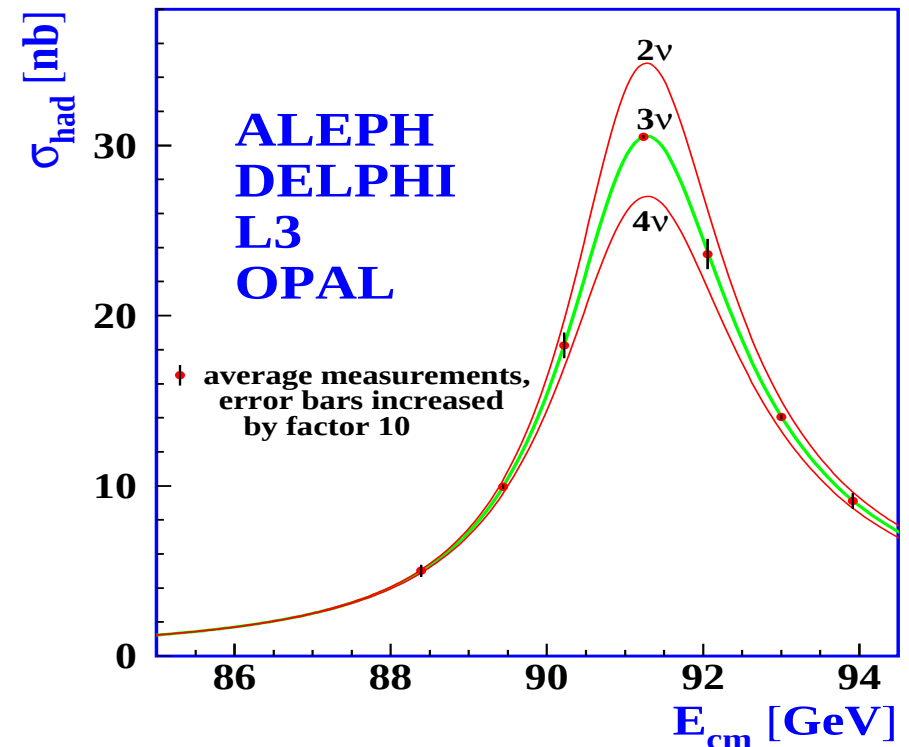


Pomiary precyzyjne w LEP

Liczba neutrin

Z^0 rozpada się na kwarki, naładowane leptony i neutrina. Stosunki rozpadów proporcjonalne są do liczby stanów. Im więcej neutrin tym mniej rozpadów na inne cząstki.

⇒ mierząc całkowity przekrój czynny w rezonansie Z^0 możemy wyznaczyć liczbę bezmasowych neutrin



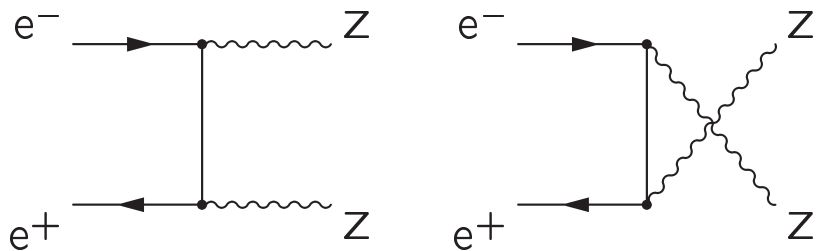
$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$

final 2005 (LEP+SLC)

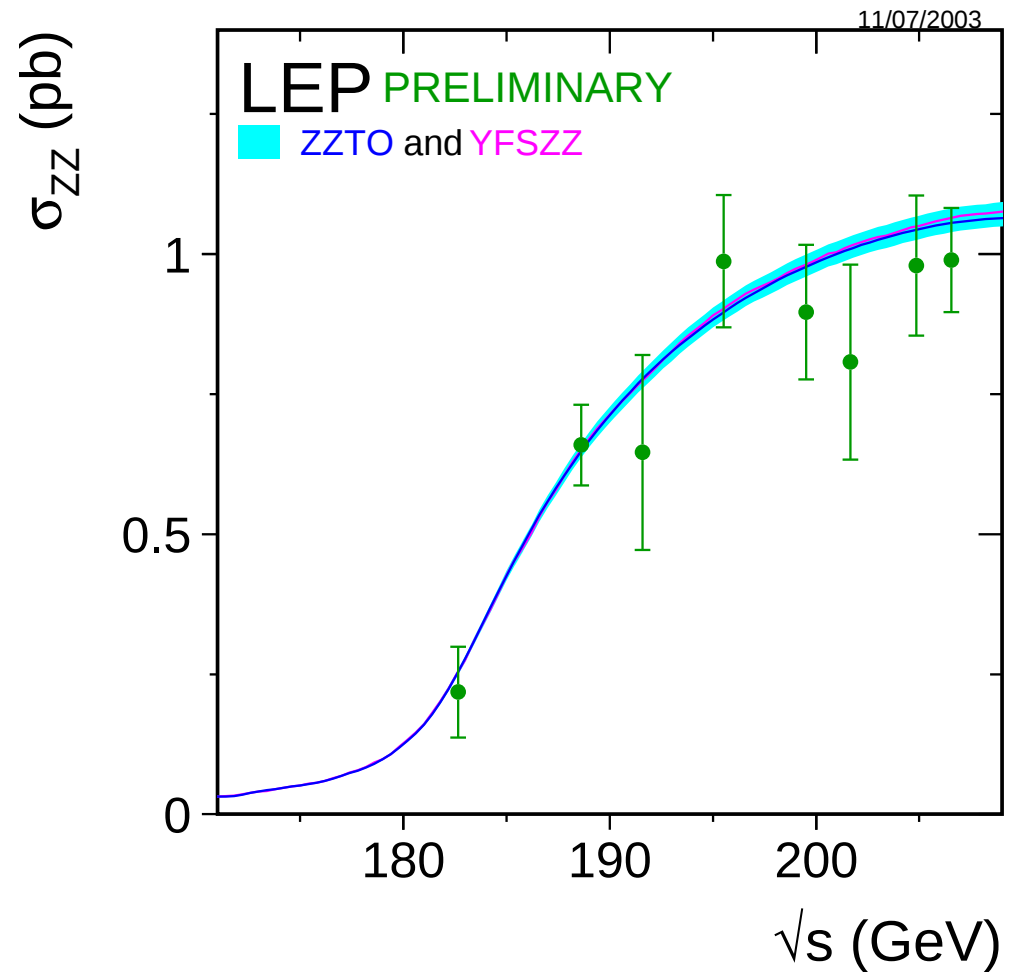
Pomiary precyzyjne w LEP

$$e^+e^- \rightarrow Z^0 Z^0$$

Dla $\sqrt{s} > 2M_Z$ możliwa jest produkcja pary bozonów Z^0



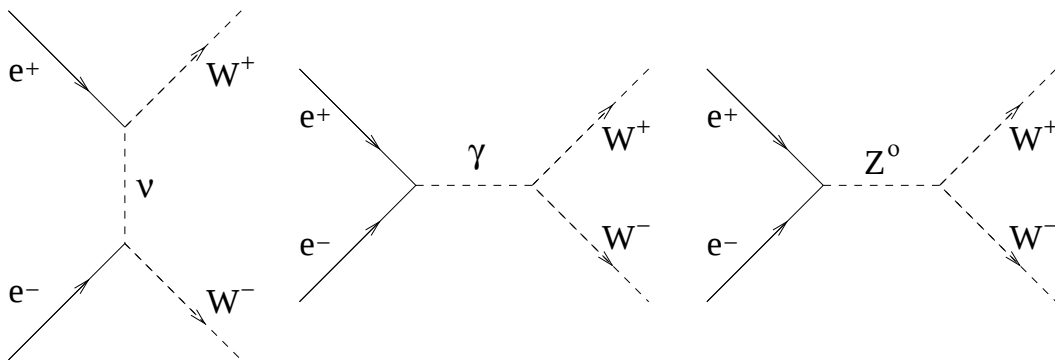
Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami Modelu Standardowego $\Rightarrow$



Pomiary precyzyjne w LEP

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

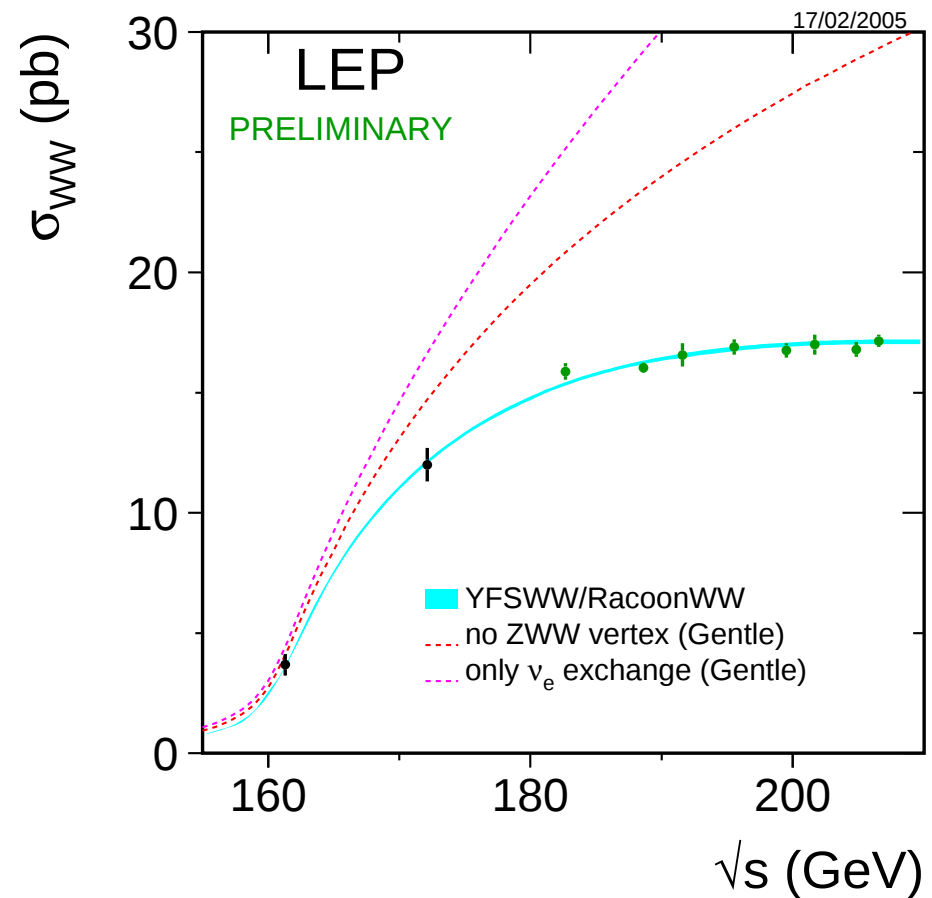
Wkład od **trzech** różnych **procesów**:



Sprężenia wynikają z przyjętych **symetrii cechowania**

⇒ **ściśle przewidywania modelu**

Doświadczalnie potwierdzone **kasowanie wkładów** od różnych procesów ⇒



Pomiary precyzyjne w LEP

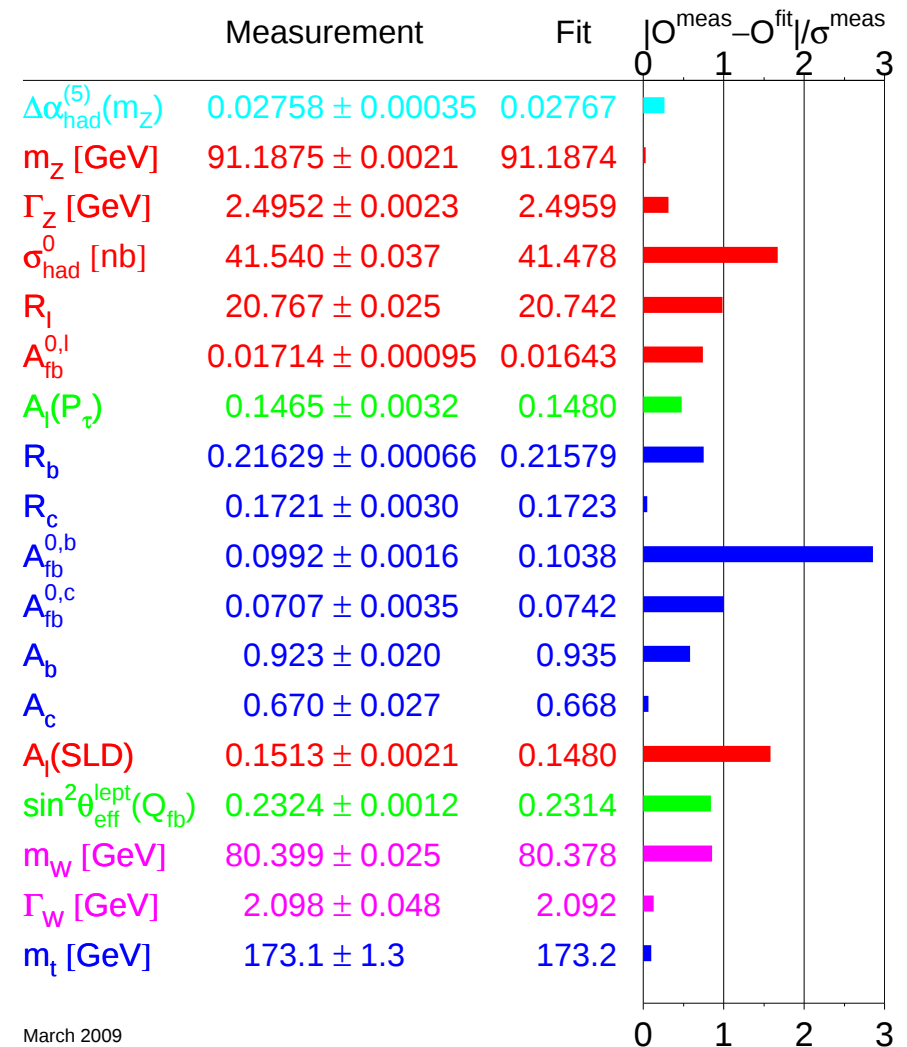
Porównanie

Model Standardowy ma jedynie **trzy wolne parametry** opisujące oddziaływania (+ masy fermionów i Higgsa).

Można wybrać np. α_{em} , G_F i M_Z .

Model tłumaczy **wyniki wszystkich** dotychczasowych **pomiarów** oddziaływań **elektrosłabych** !

Miara zgodności: $\text{pull} \equiv \frac{|X_{meas} - X_{SM}|}{\sigma_X} \Rightarrow$



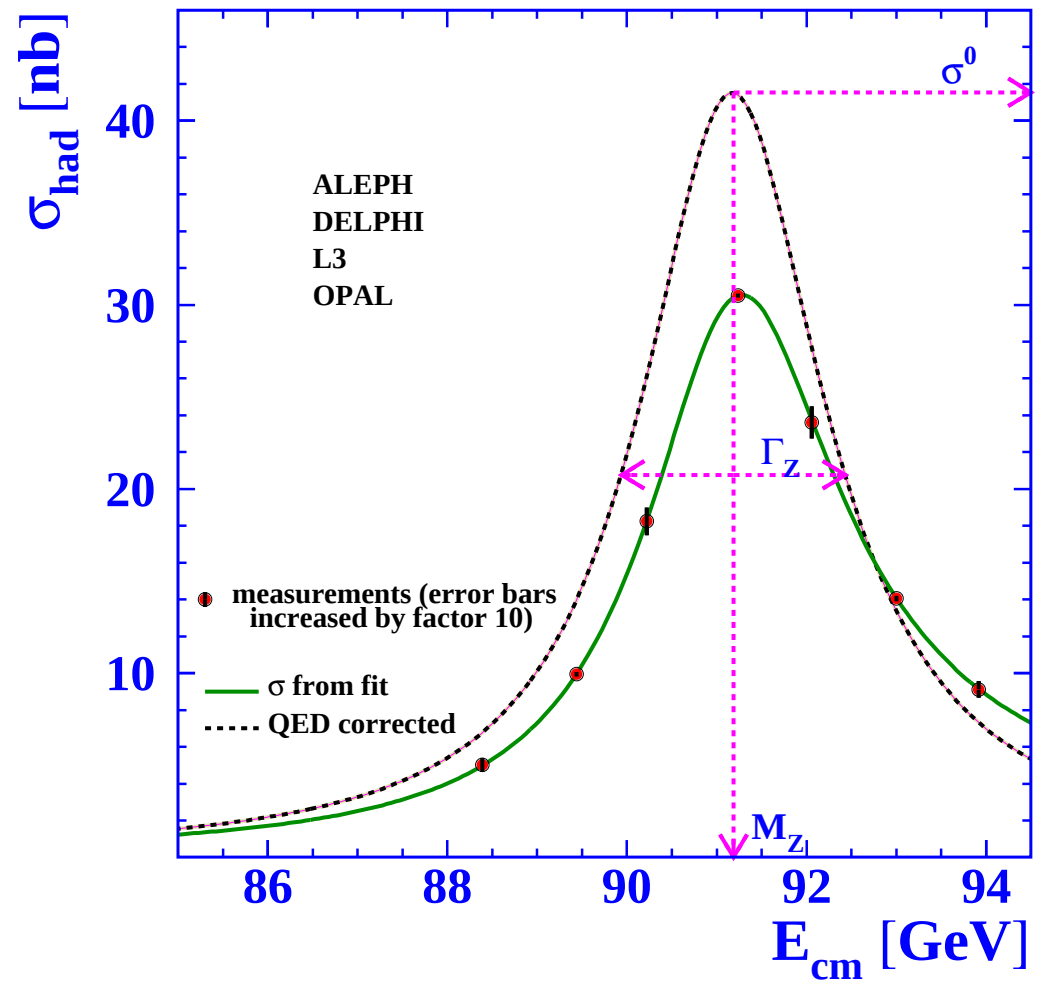
Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

Wielkości fizyczne **zmierzone** w LEP **czułe** są na **poprawki** “**wyższych rzędów**”.

Poprawki pochodzą w szczególności od **procesów** z wirtualną wymianą **bozonu $W^\pm$** , **kwarku t** , **bozonu Higgsa** lub innych ciężkich cząstek...

Precyzyjne pomiary w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masach** tych cząstek, nawet jeśli ich bezpośrednio nie obserwujemy!

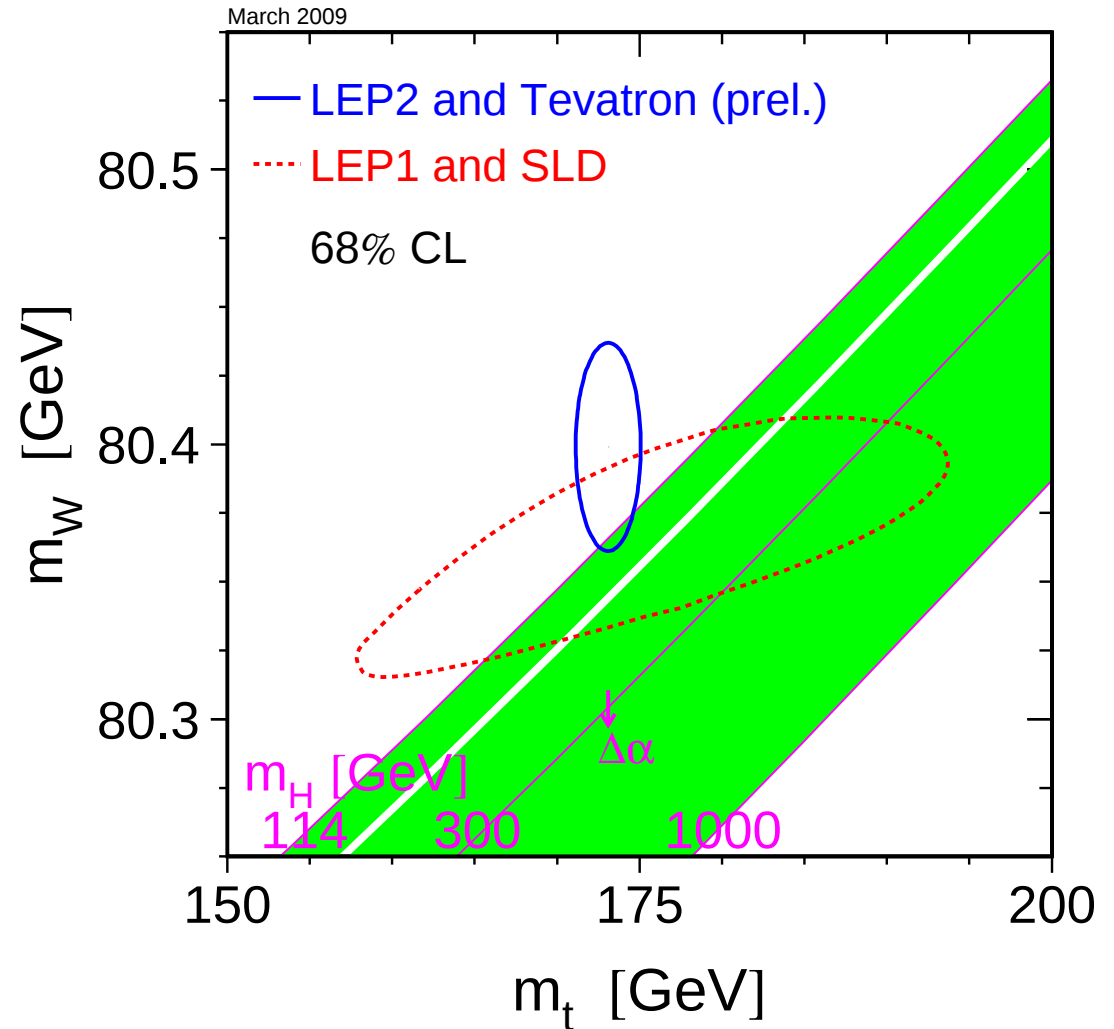


Pomiary precyzyjne w LEP

Poprawki

Możemy wyznaczyć **masy ciężkich cząstek** na podstawie analizy **precyzyjnych pomiarów** przy **niższych energiach**.

Dla bozonu $W^\pm$ i kwarku t wyniki bardzo dobrze zgodziły się z **bezpośrednimi pomiarami**



Pomiary precyzyjne w LEP

Masa higgsa

Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** wskazuje, że masa Higgsa powinna wynosić **około 100 – 200 GeV**

$$m_h = 90^{+36}_{-27} \text{ GeV}$$

lub: $m_h < 163 \text{ GeV}$ (95% CL)

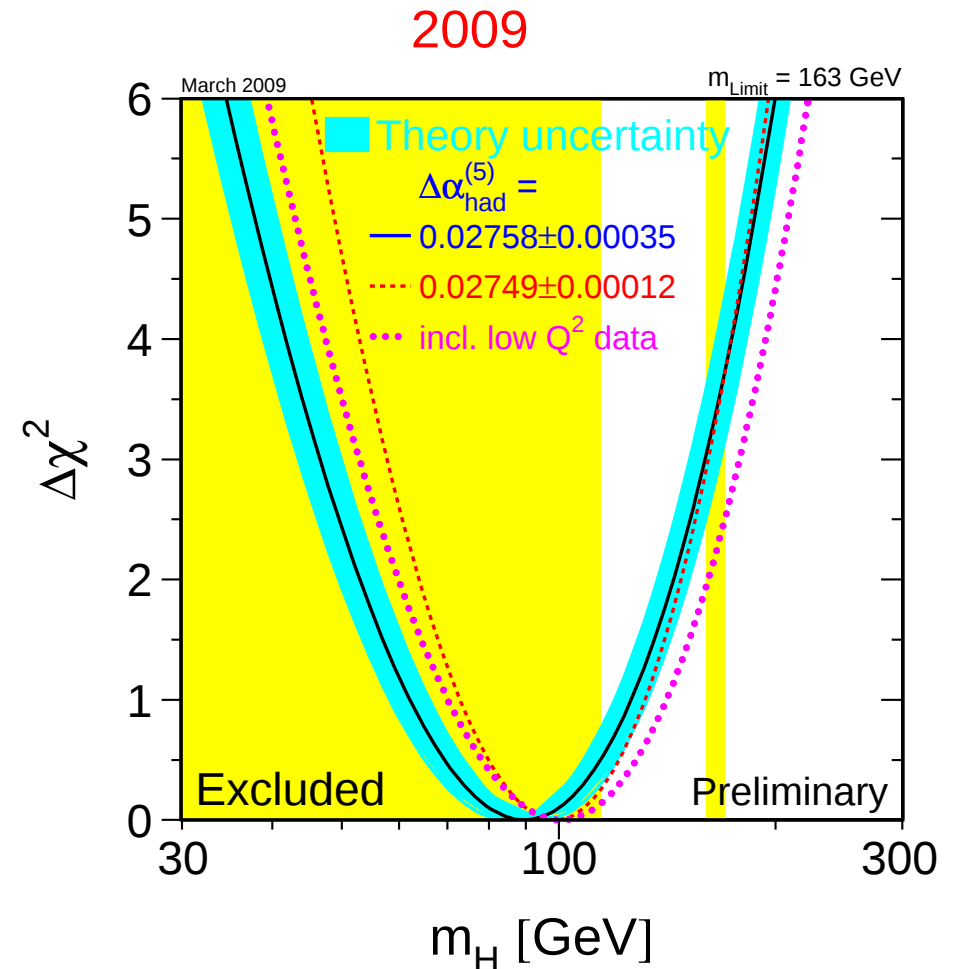
Dlaczego wciąż go nie widzimy ?...

Z bezpośrednich poszukiwań:

$$m_h > 114.4 \text{ GeV} \text{ (95\% CL)}$$

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

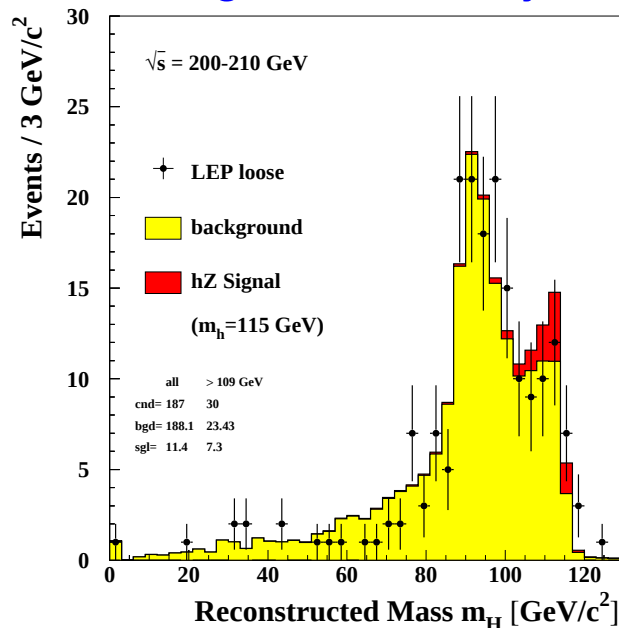


Poszukiwanie Higgsa w LEP

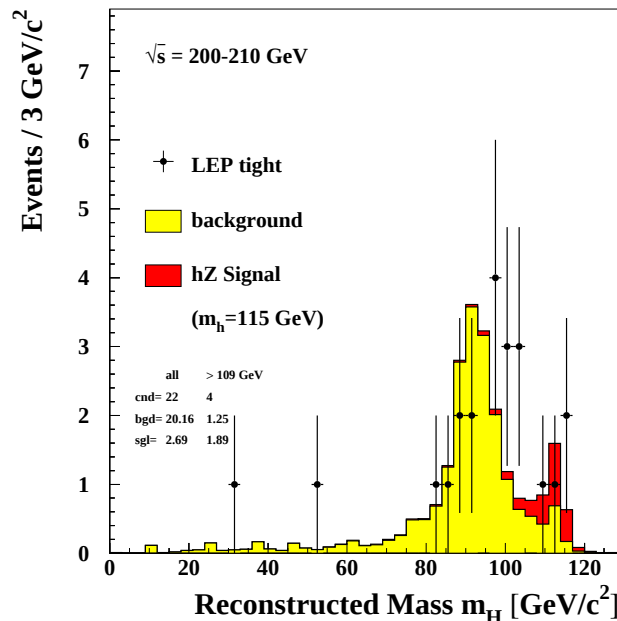
Rozkład masy

rozpad w pary $b\bar{b}$...

łagodna selekcja



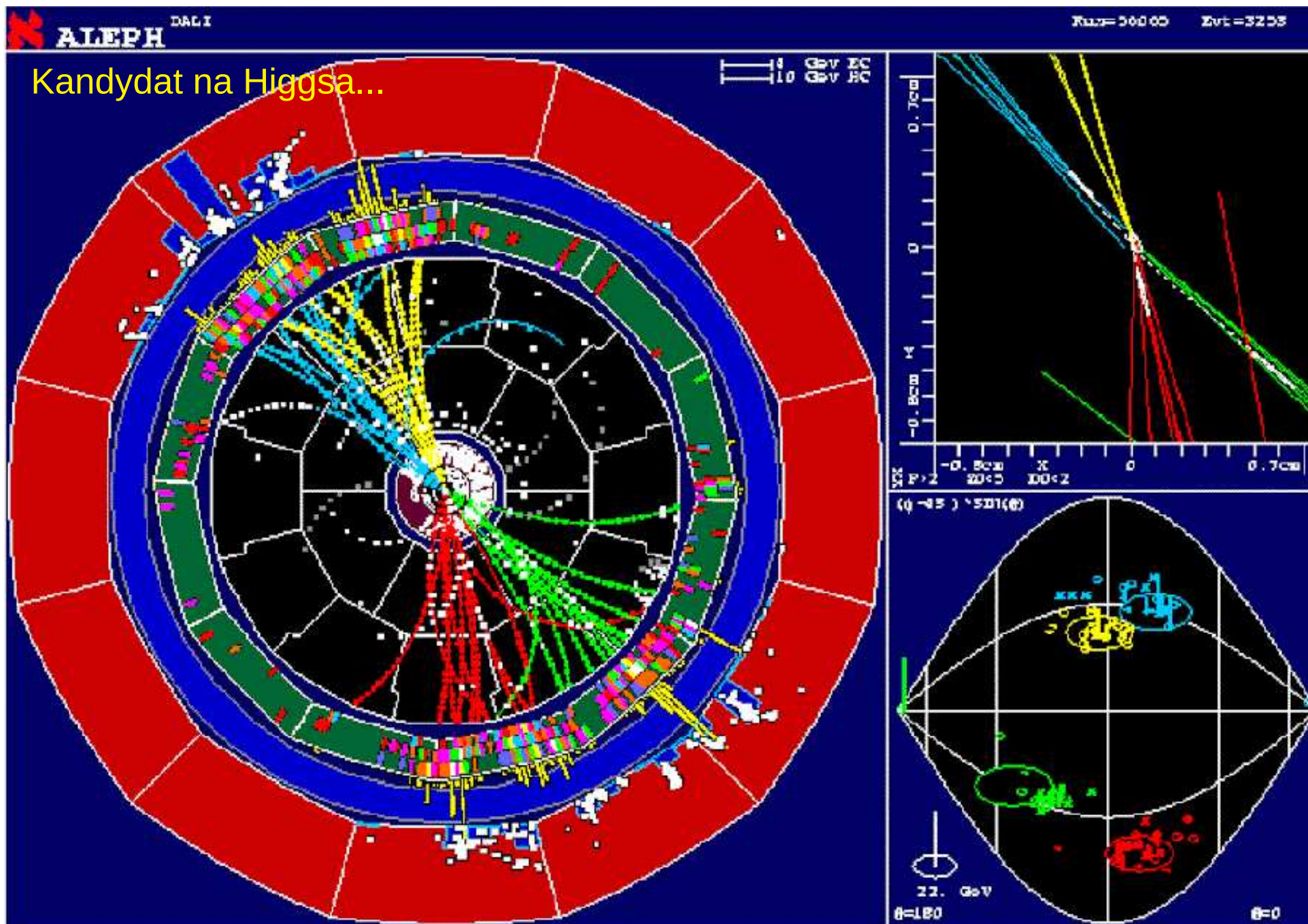
ostra selekcja



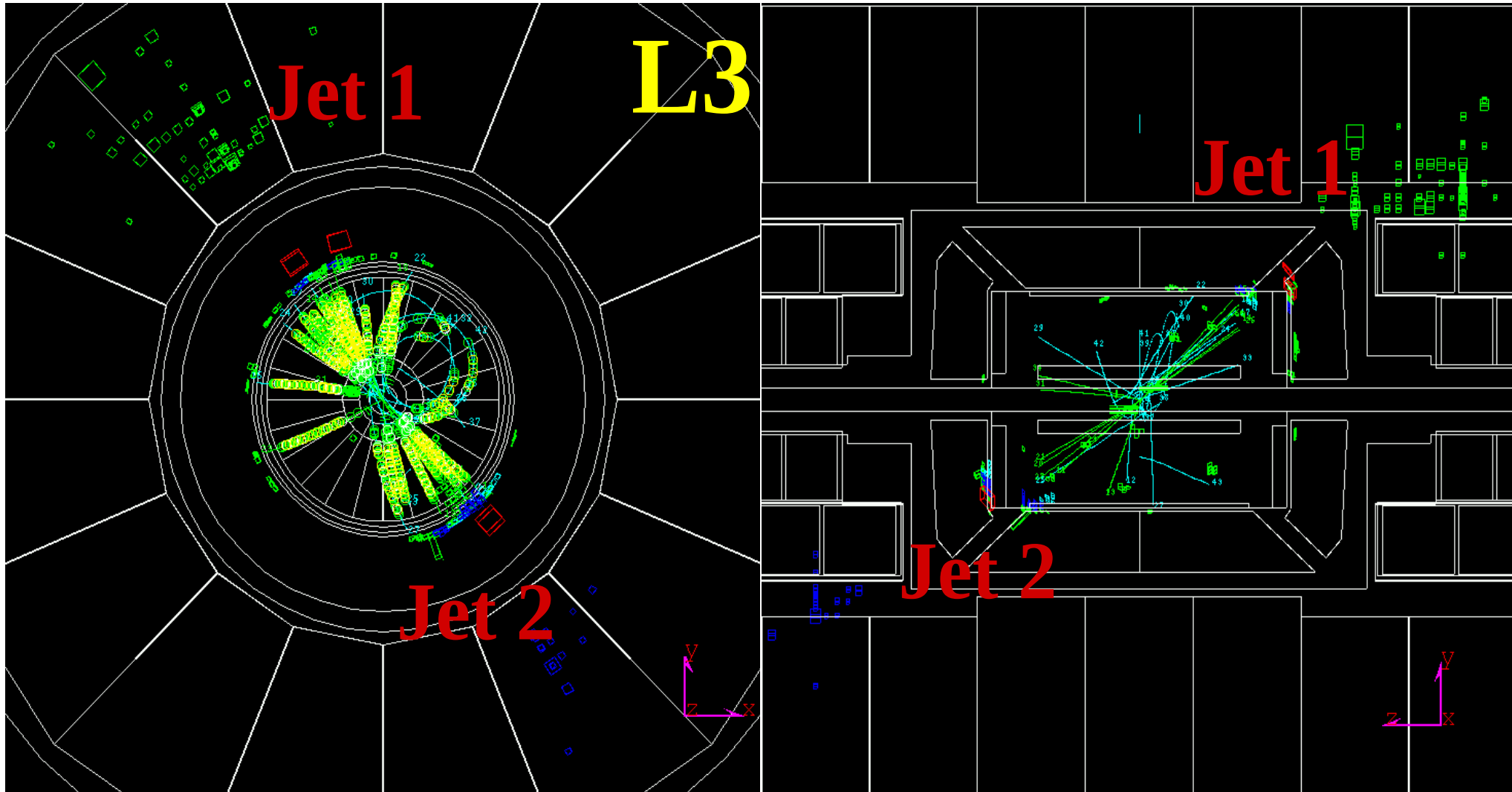
W obszarze $m_h \sim 115$ GeV widać niewielki nadmiar przypadków, który może pochodzić od produkcji Higgsa

Niestety, jest to efekt na poziomie $\sim 2\sigma$

LEP wyłączono zanim zdołał wyjaśnić ten efekt...



candidate for
 $e^+e^- \rightarrow H\nu\bar{\nu} \rightarrow 2 \text{ jets} + \text{missing energy}$



Poszukiwanie Higgsa

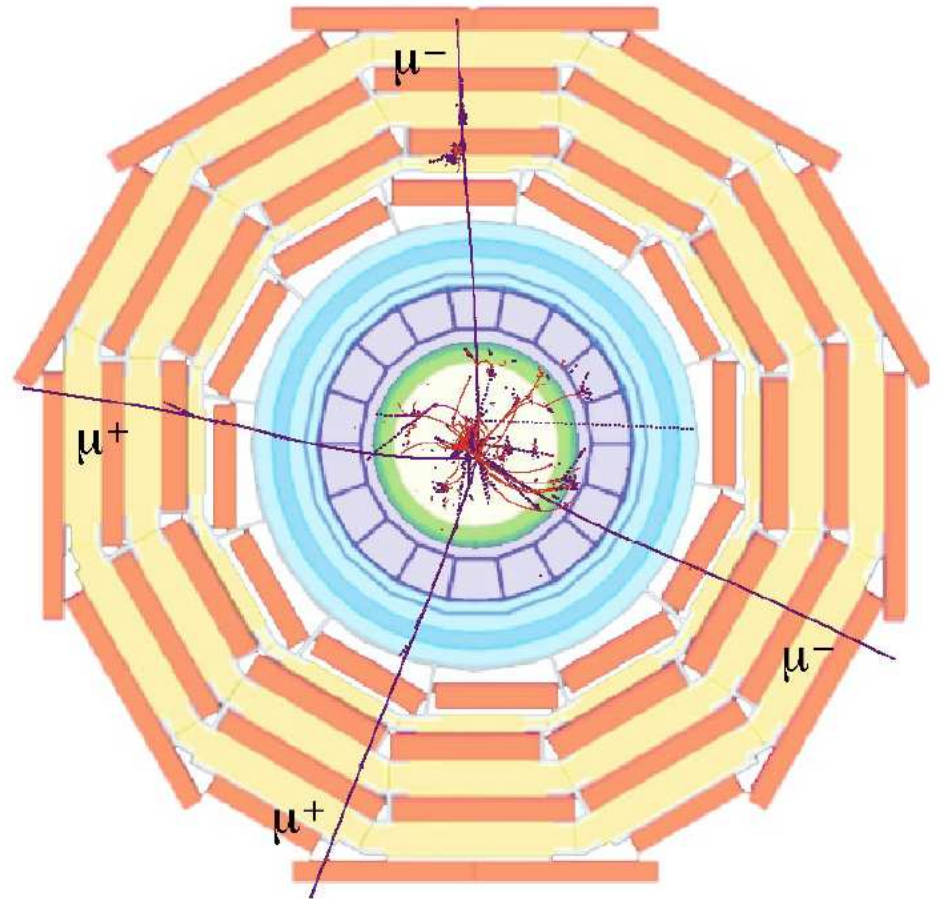
LHC

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

W zderzeniach pp tło hadronowe jest bardzo duże. Najbardziej obiecujący jest **kanal**:

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

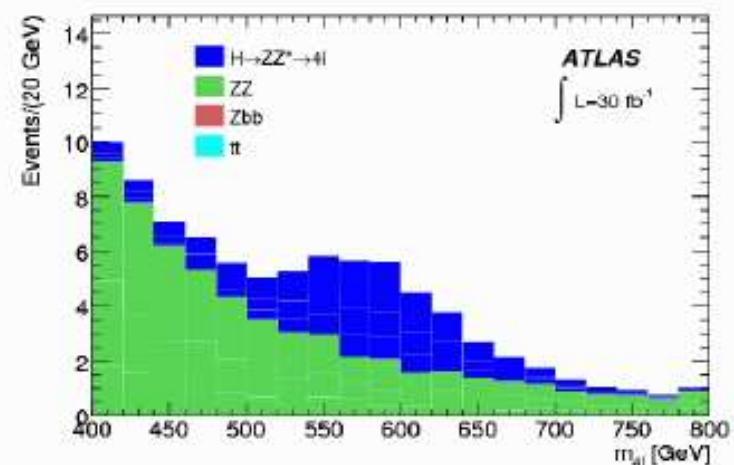
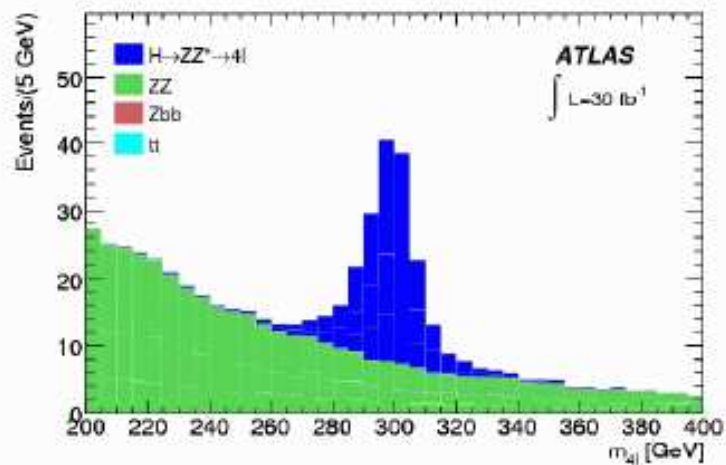
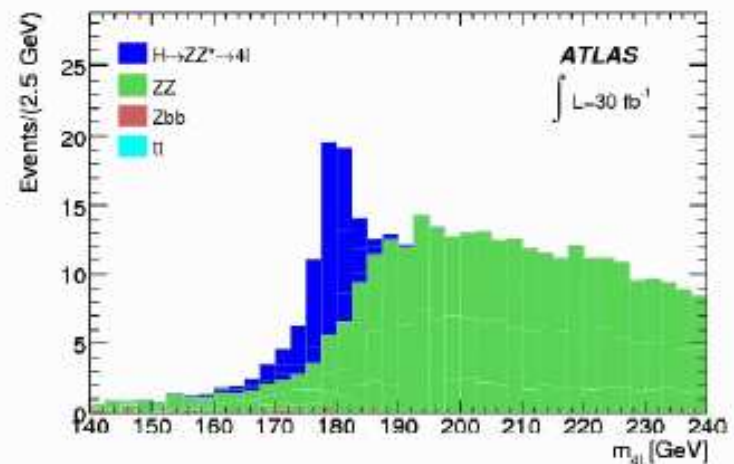
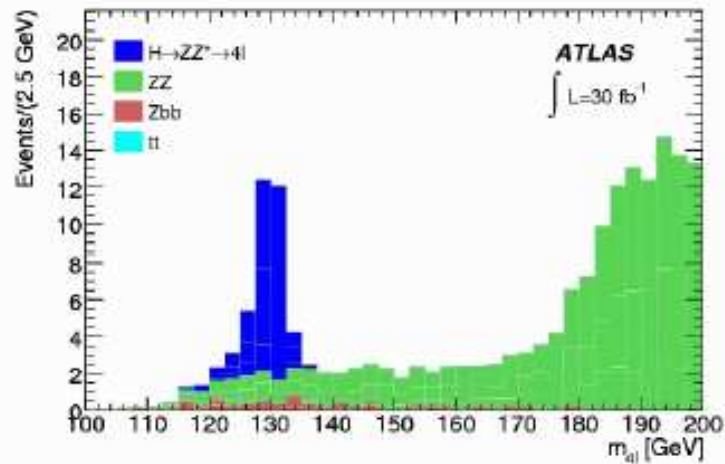
gdyż naładowane leptony ($e^\pm$ i $\mu^\pm$) można **łatwo zidentyfikować**



Poszukiwanie Higgsa

LHC

oczekiwany sygnał w detektorze ATLAS (dla różnych m_H)

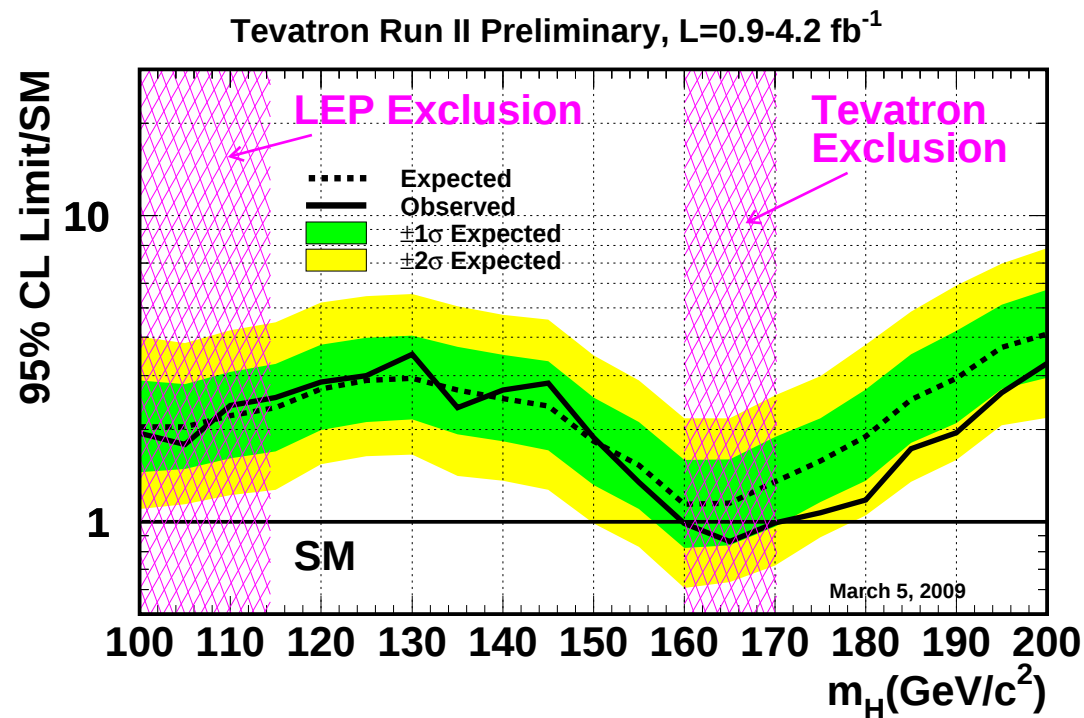


Poszukiwanie Higgsa

Tevatron

Zbieranie danych idzie “pełną parą”.

Ostatnio zaprezentowano pierwsze wyniki ograniczające dostępny zakres mas bozonu Higgsa (w ramach SM)



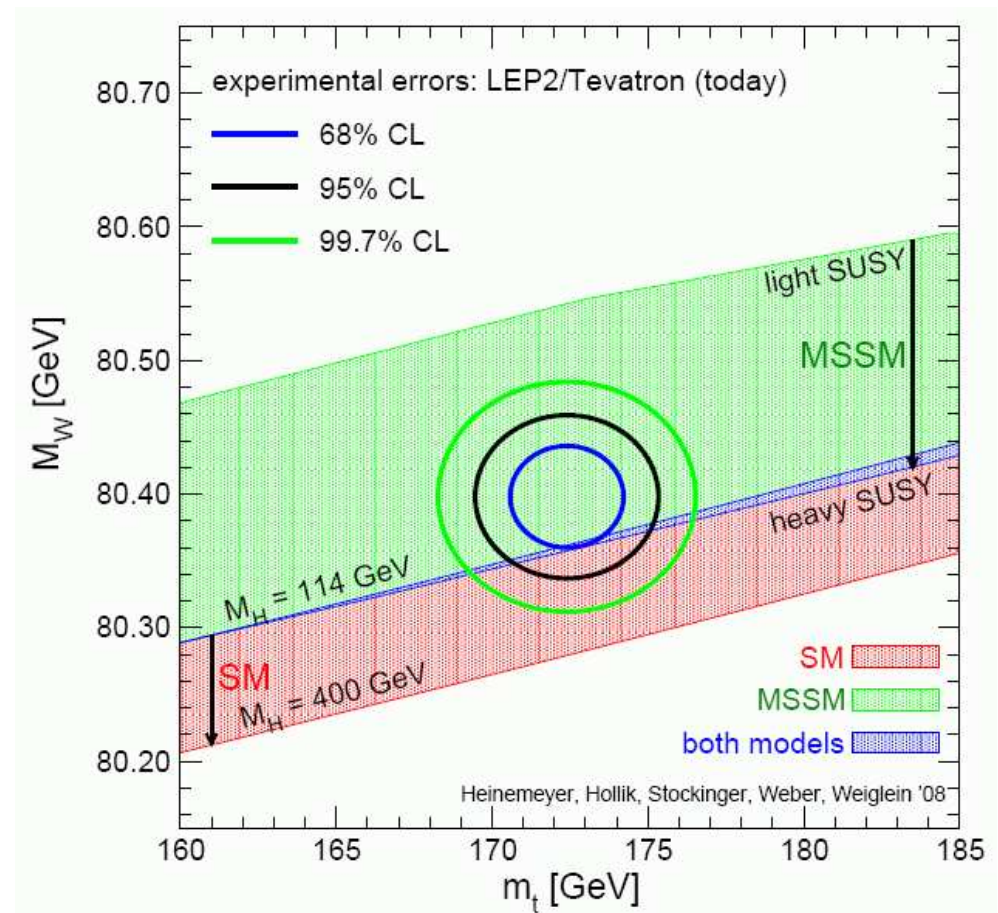
Poza Modelem Standardowym

SUSY

Choć wszystkie dostępne dane zgadzają się bardzo dobrze z SM to nie wyklucza to różnych jego rozszerzeń.

W szczególności modele supersymetryczne dają bardzo dobry opis danych...

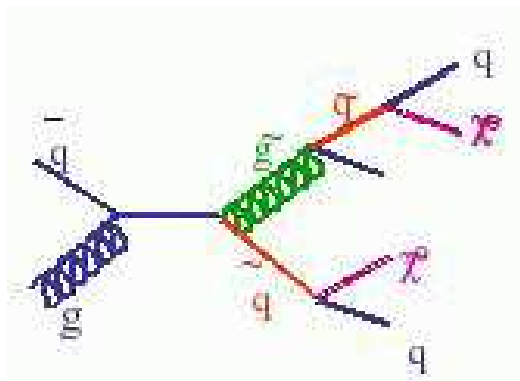
Porównanie mierzonych mas t i W z przewidywaniami **SM** i **MSSM**



Poza Modelem Standardowym

SUSY

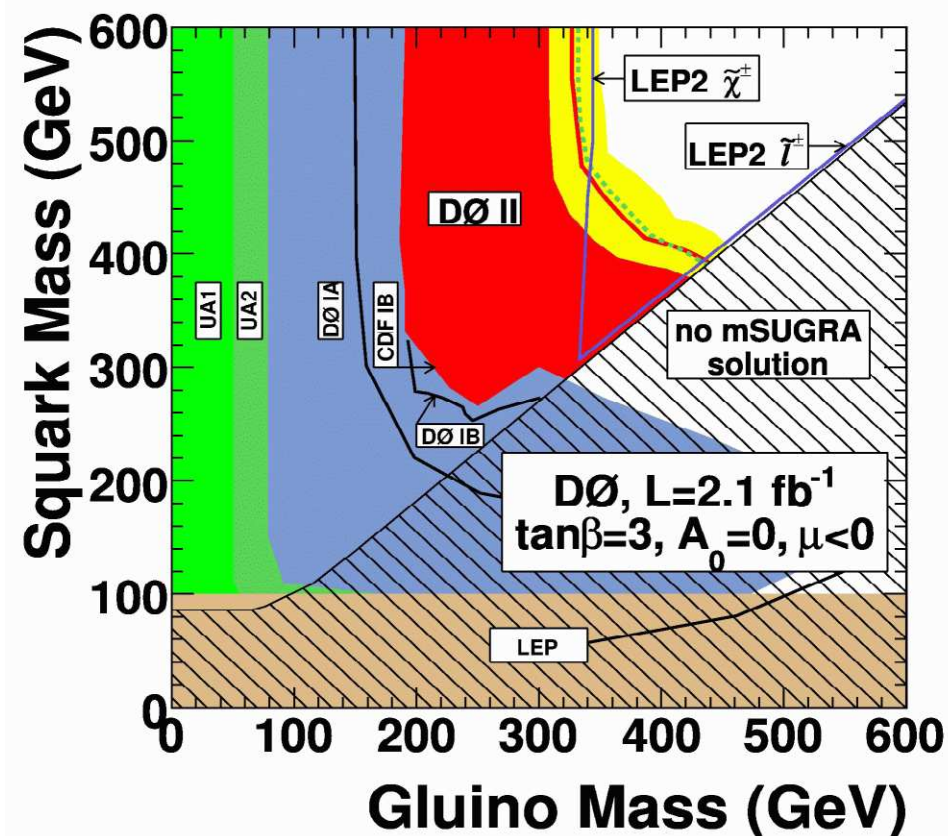
Intensywne poszukiwania w Tevatronie



Sygnał: jety hadronowe
+ brakujący pęd poprzeczny

Najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP) zachowuje się jak neutrino - nie oddziałuje ze "zwykłą" materią

Dotychczas bez powodzenia
Wykluczony obszar mas:

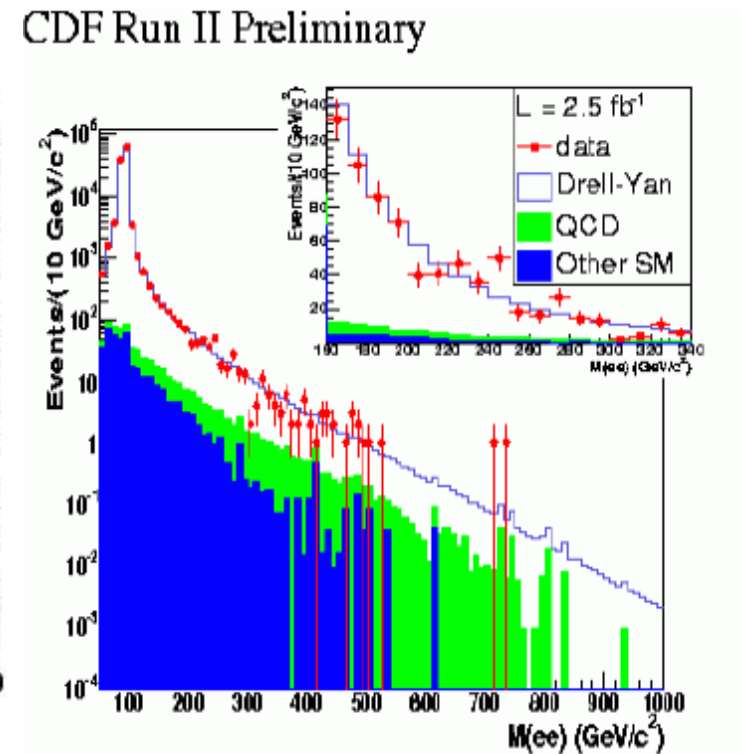
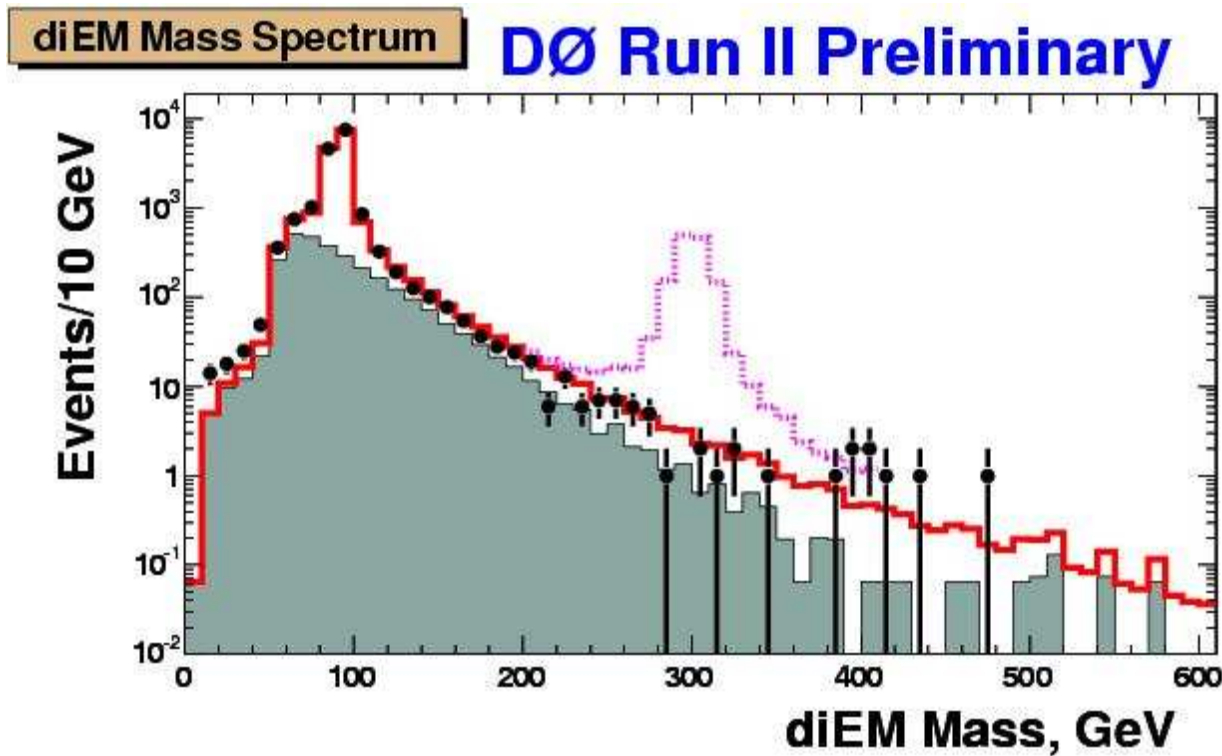


Poza Modelem Standardowym

Poszukiwanie stanów rezonansowych

np. dodatkowych bozonów Z'

Przekrój czynny na proces Drell'a-Yan'a w Tevatronie



masa niezmiennicza l^+l^-

Obecnie Tevatron wykluczył istnienie tego typu stanów do mas rzędu 1 TeV.

Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 13: Ewolucja Wszechświata

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Ewolucja Wszechświata

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

Wprowadzenie

Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem. Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji. Bardzo długo nie dostrzegano związku między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

Wprowadzenie

Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem. Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji. Bardzo długo nie dostrzegano związku między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

Newton 1687

Prawo powszechnego ciążenia:

Każda cząstka we wszechświecie przyciąga każdą inną cząstkę siłą proporcjonalną do **iloczynu ich mas** i odwrotnie proporcjonalną do **kwadratu odległości** między nimi.

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Wprowadzenie

Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem. Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji. Bardzo długo nie dostrzegano związku między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

Newton 1687

Prawo powszechnego ciążenia:

Każda cząstka we wszechświecie przyciąga każdą inną cząstkę siłą proporcjonalną do **iloczynu ich mas** i odwrotnie proporcjonalną do **kwadratu odległości** między nimi.

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G_N \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s}$$

Nie widzimy oddziaływania między dwoma jabłkami, bo grawitacja zbyt słaba...



Wprowadzenie

Grawitacja

Prawo powszechnego ciążenia Newtona było bardzo proste, a jednocześnie uniwersalne. Tłumaczyło wszystkie znane nam zjawiska związane z oddziaływaniami grawitacyjnymi.

Uniwersalność praw natury widoczna też w podobieństwie do prawa Coulomba (**oddziaływanie ładunków elektrycznych**):

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \Leftrightarrow F_{el} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

W wiek XX wchodziliśmy z prostym i eleganckim opisem praktycznie wszystkich znanych zjawisk...

Jednak **Einstein** dostrzegł, że “**powszechność**” ciążenia stanowi problem w opisie grawitacji na **dużych skalach** - nie mamy “punktu odniesienia” względem którego moglibyśmy badać ruch ciał...

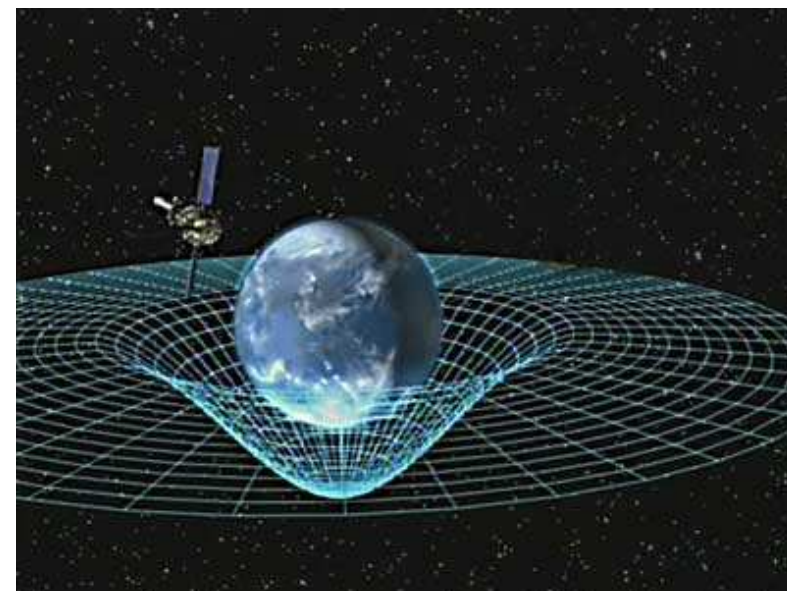


Wprowadzenie

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



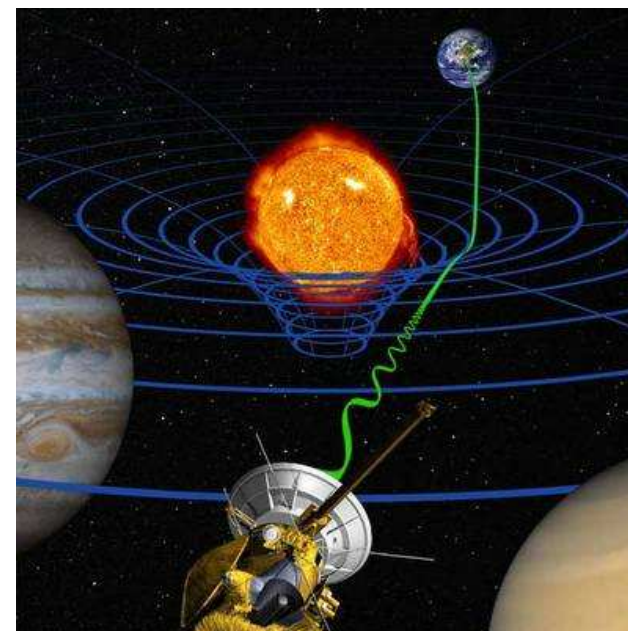
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.
Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii.

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.

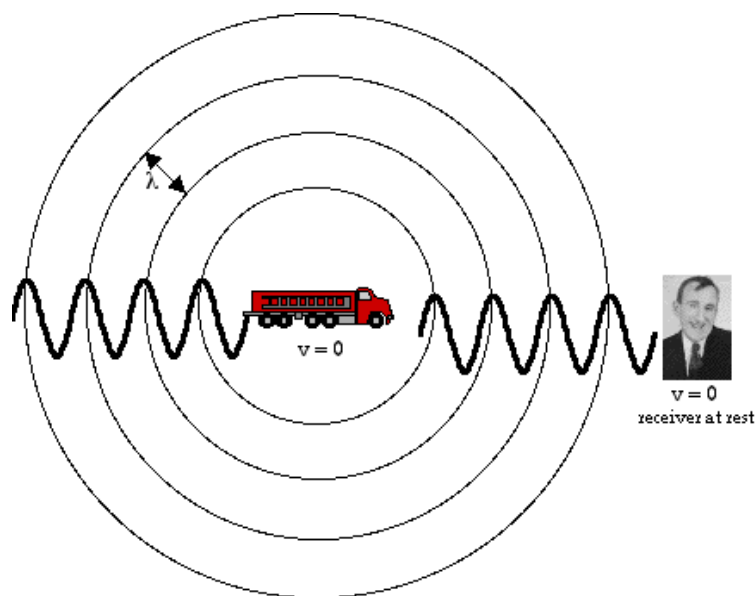
Problem teorii Einsteina: nie istniało statyczne rozwiązanie.

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

Efekt Dopplera

W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

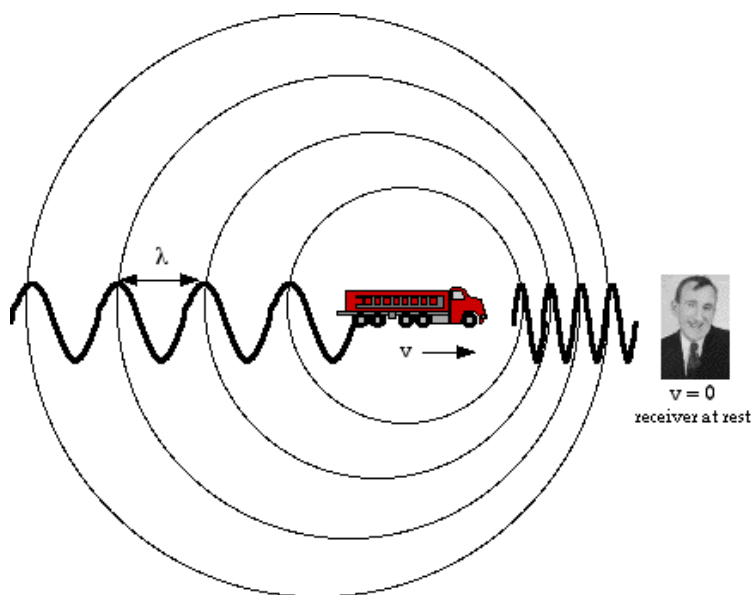
Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej** częstotliwości.



Efekt Dopplera

W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

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



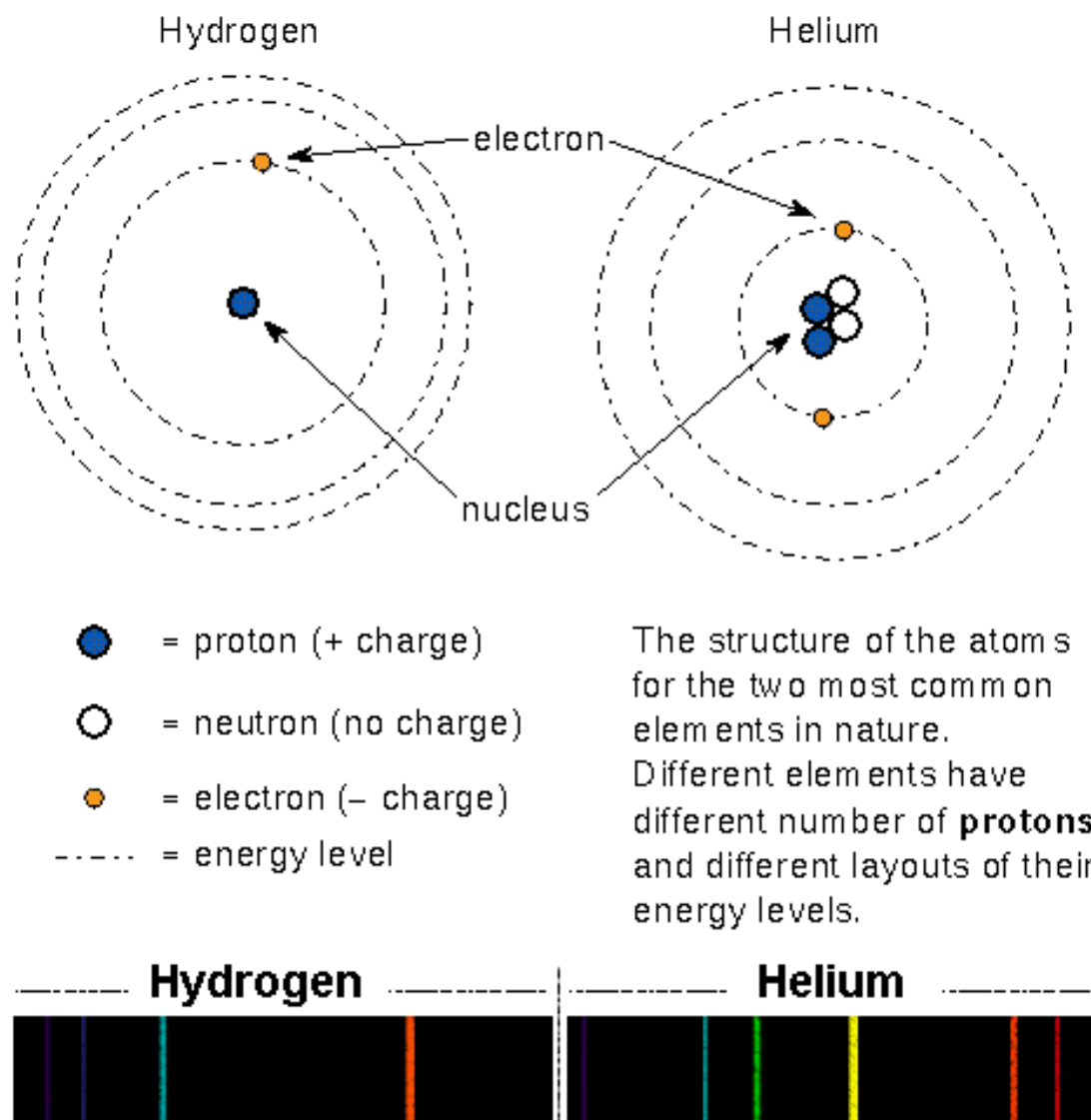
Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

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

Linie widmowe

Linie emisyjne

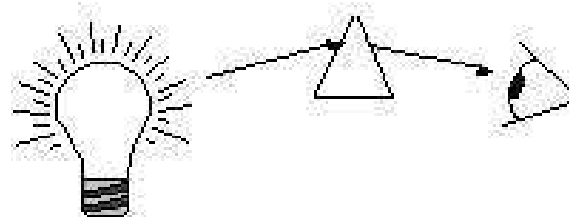
Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



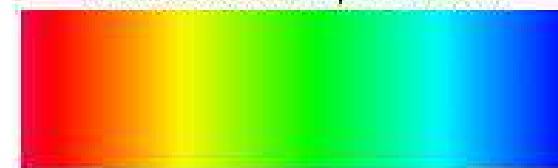
Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

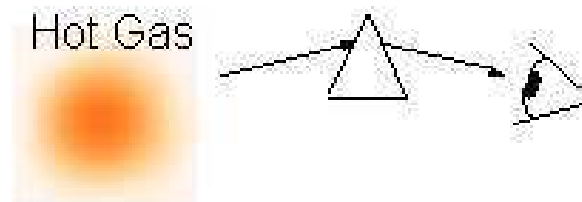


Continuum Spectrum

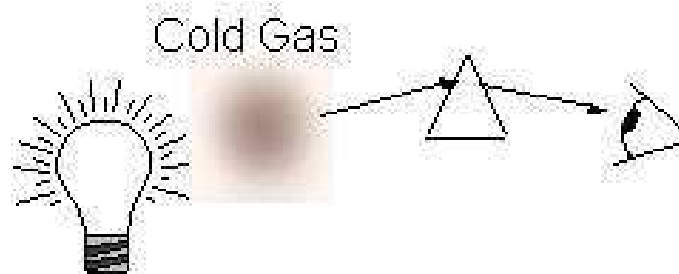
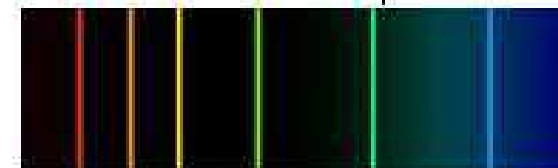


Linie absorpcyjne

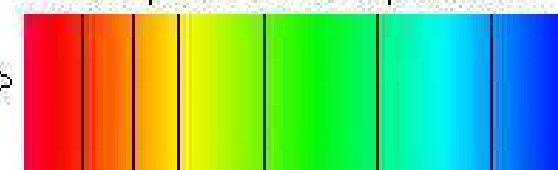
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



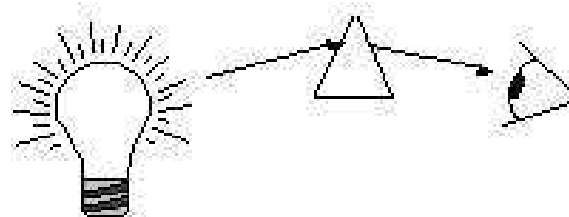
Absorption Line Spectrum



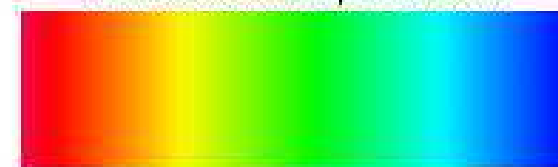
Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

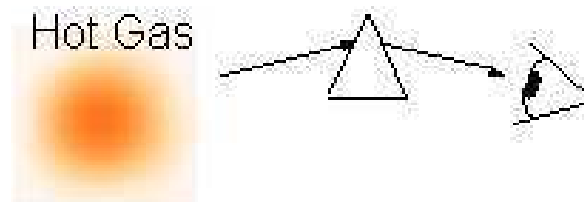


Continuum Spectrum

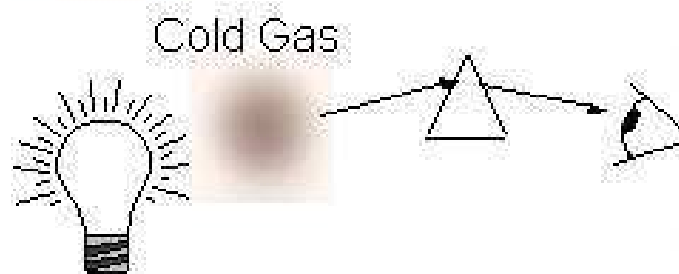
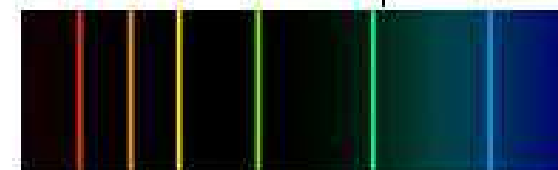


Linie absorpcyjne

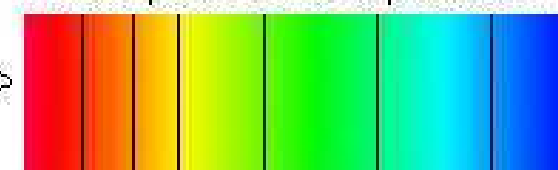
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



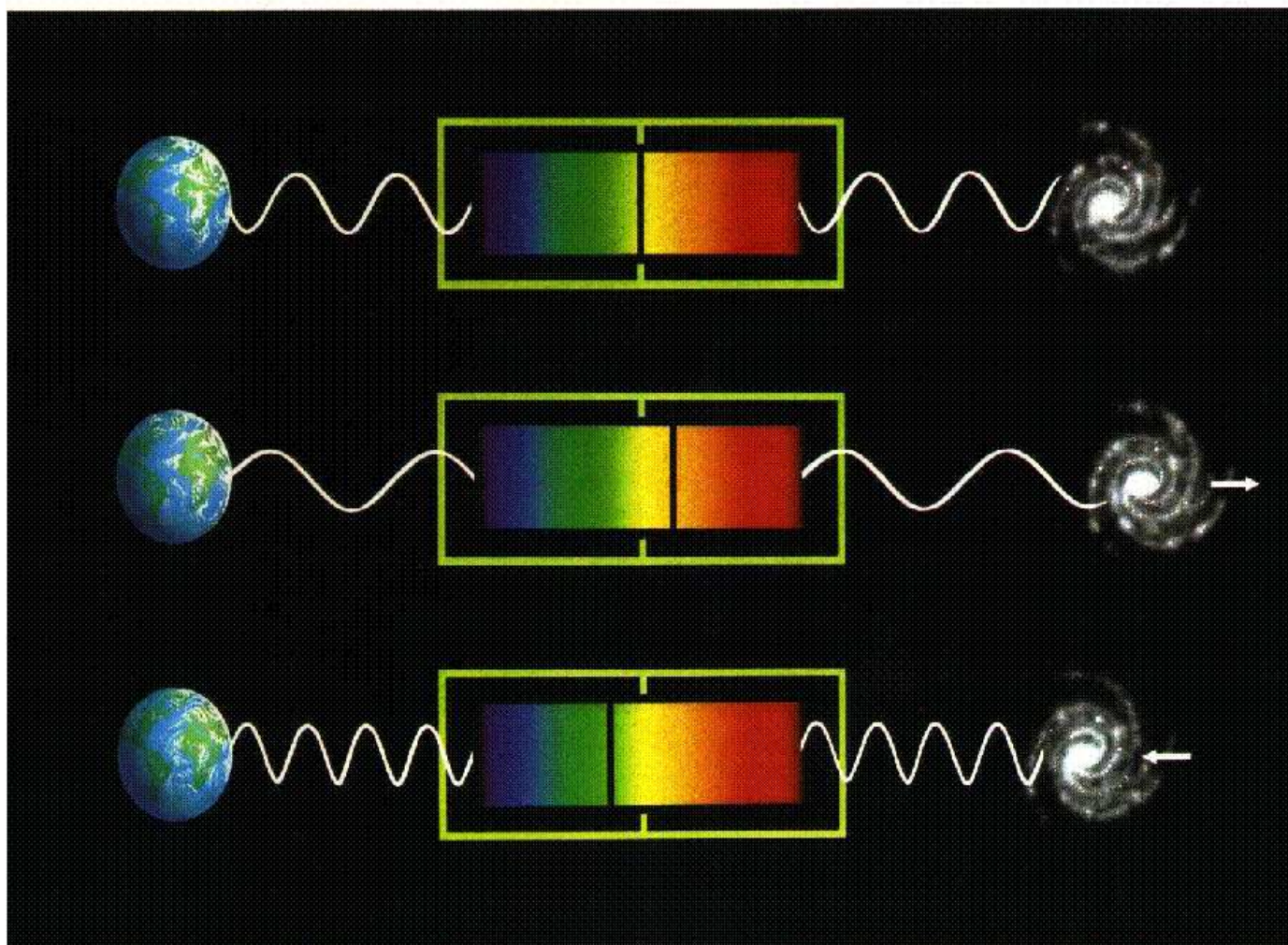
Absorption Line Spectrum



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

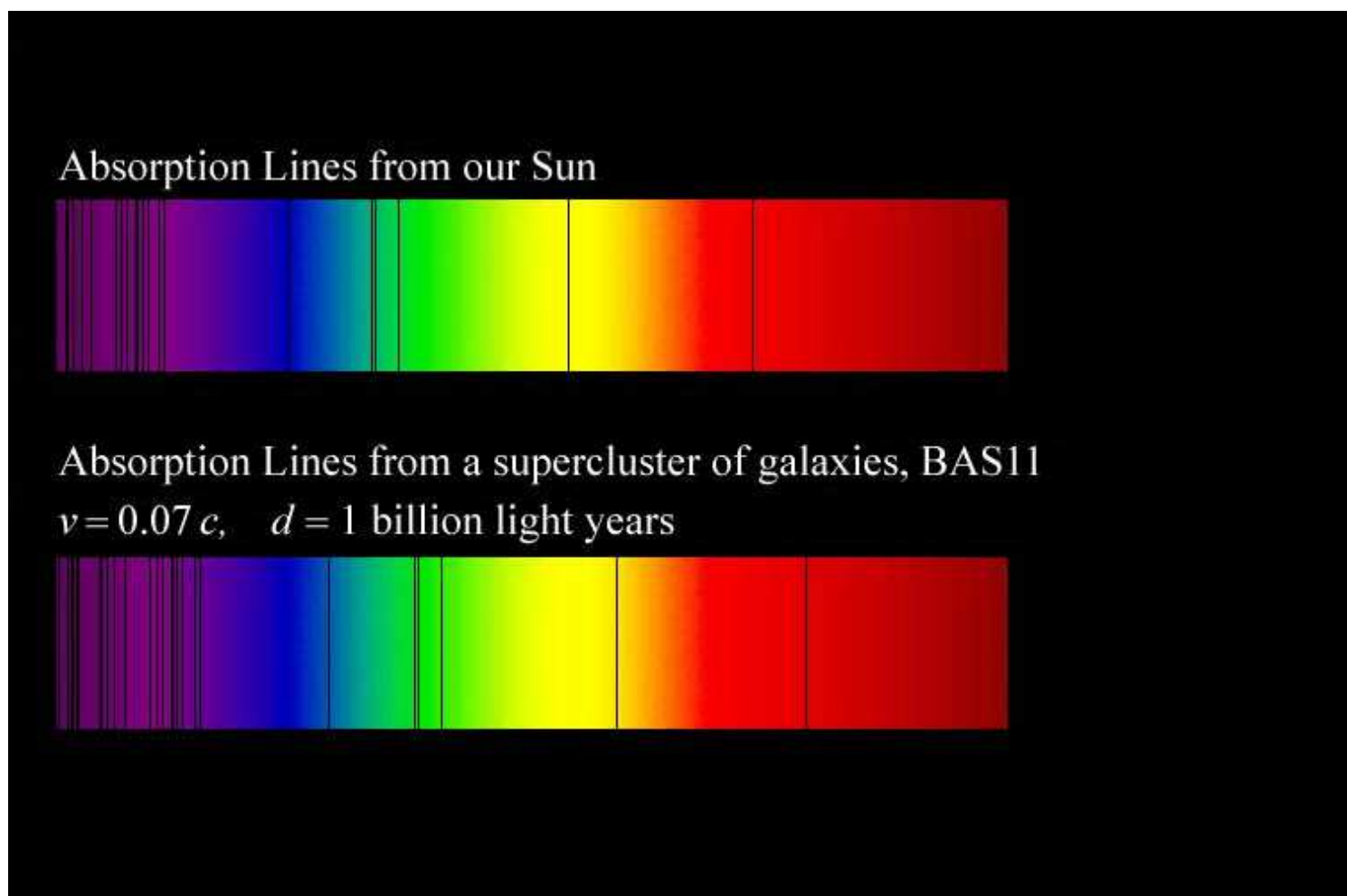
Efekt Dopplera dla światła

Mierząc linie absorpcyjne w widmie galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu



Efekt Dopplera dla światła

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

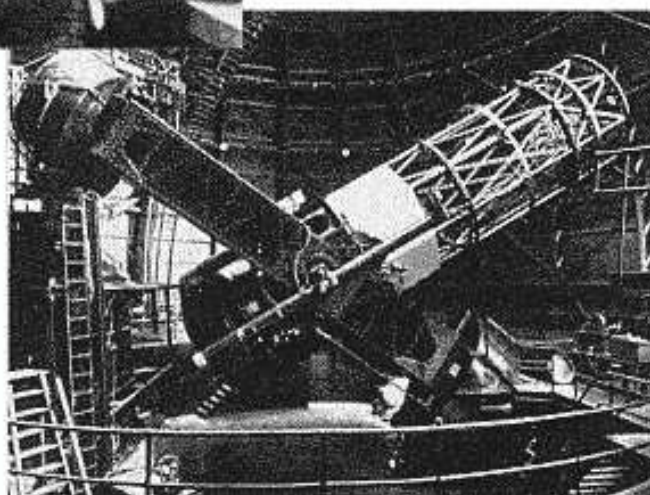
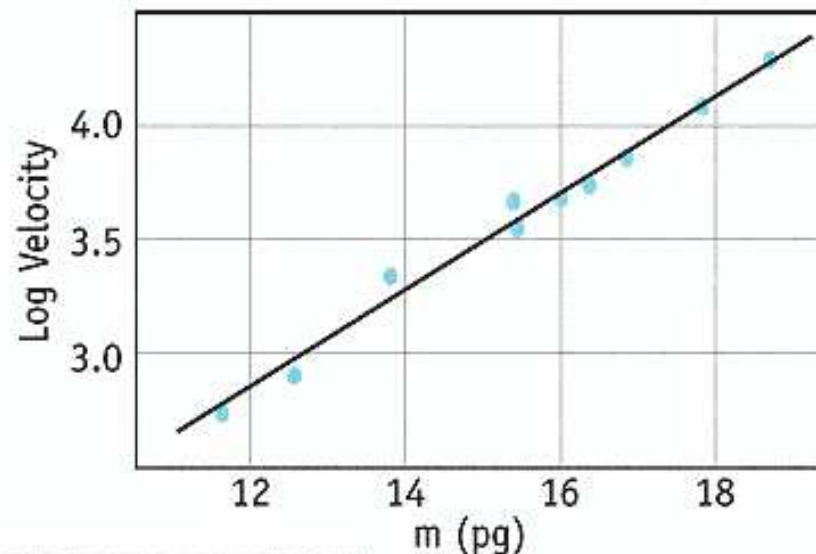


Prawo Hubblea (1929)

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

Prawo Hubble'a (1929)

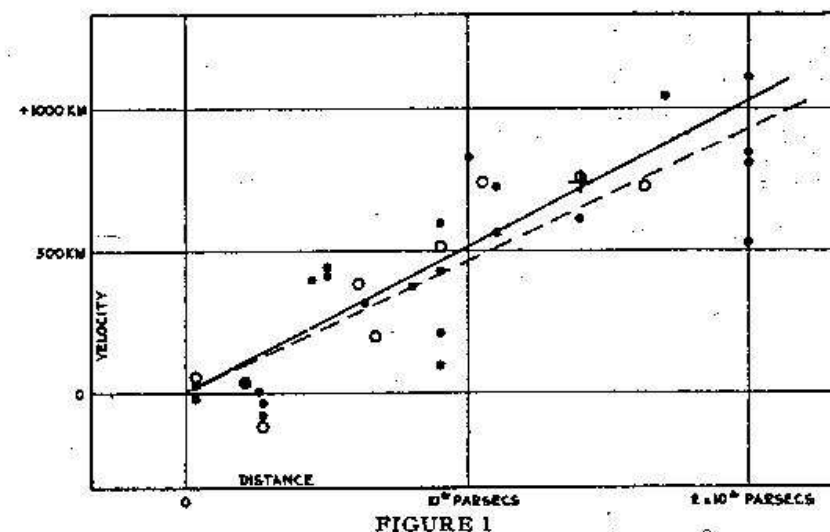
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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

$$v = H \cdot r$$

r - odległość, H - stała Hubble'a

Oryginalne wyniki Hubble'a:



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:

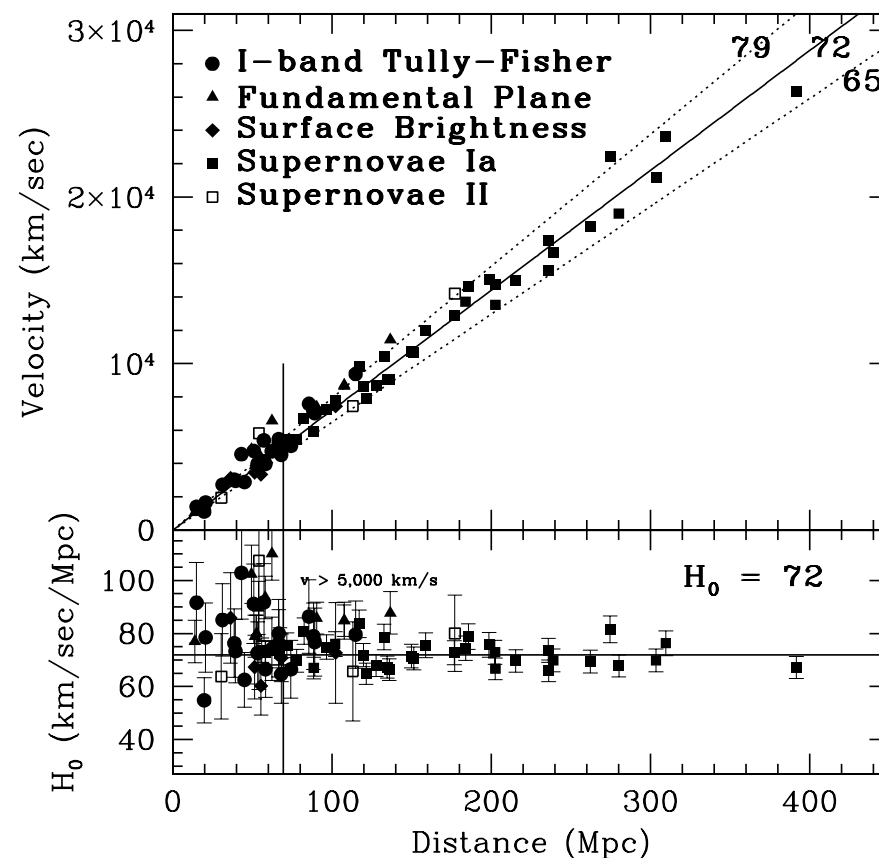
$$v = H \cdot r$$

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".

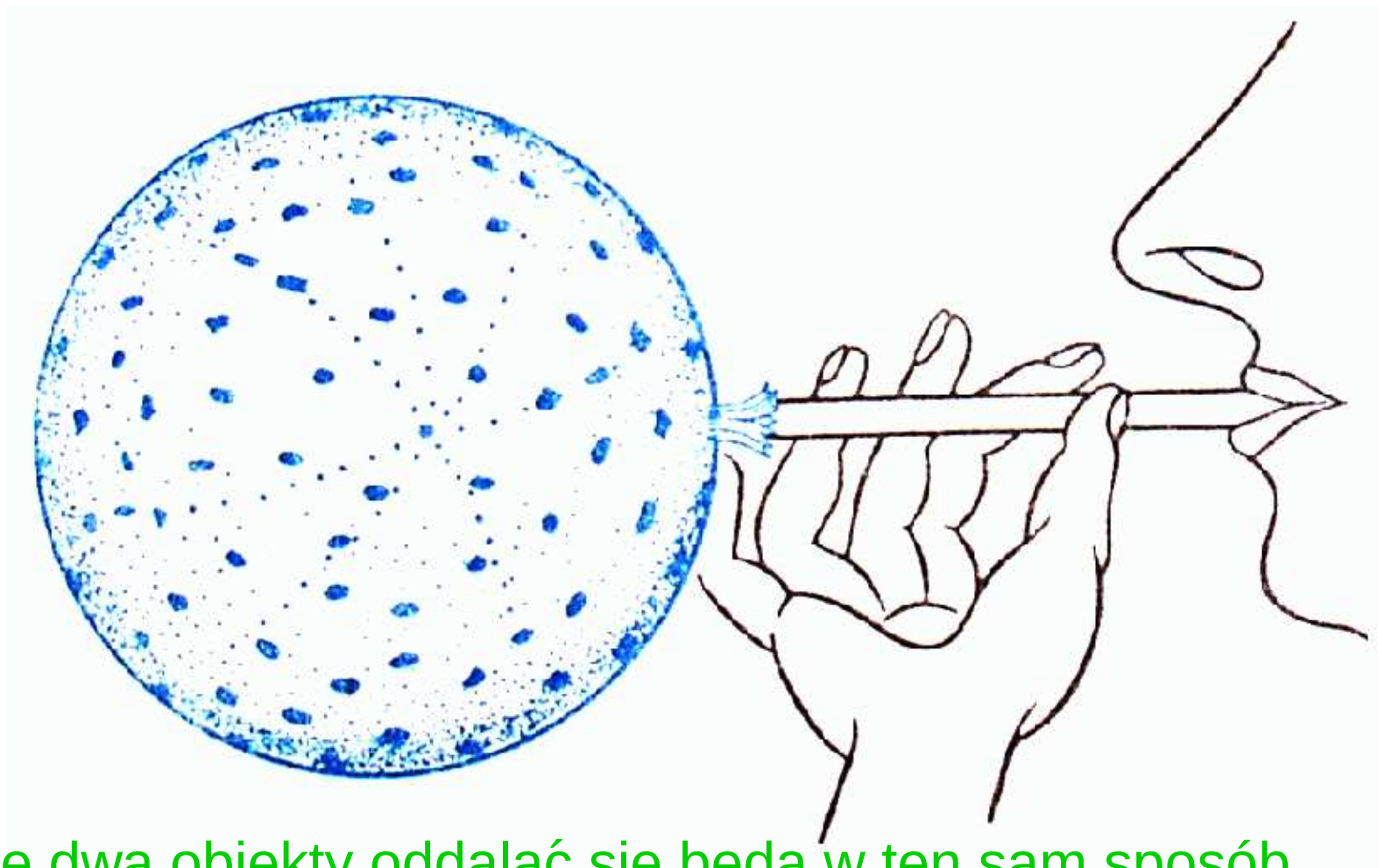
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

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 "zawieszone" są poszczególne obiekty.

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

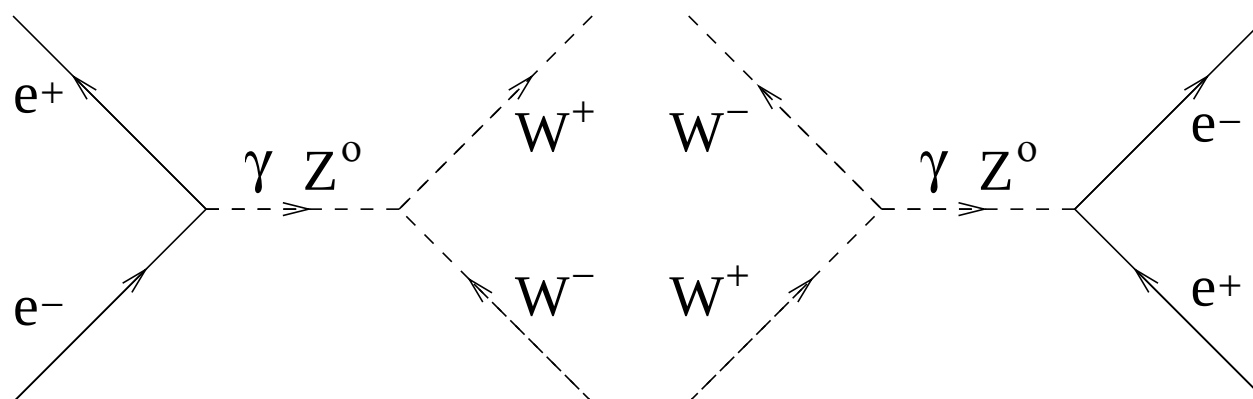
Ewolucja Wszechświata

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**.

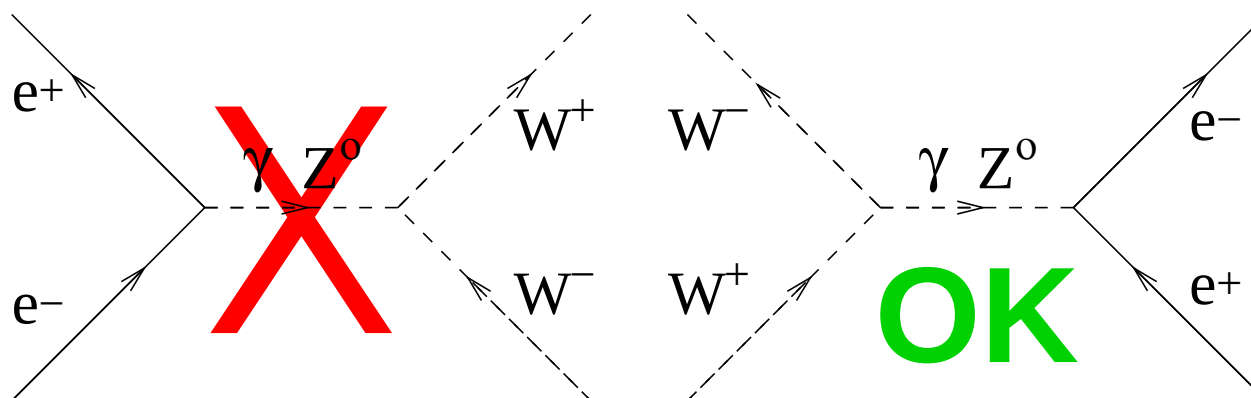


Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**



Ewolucja Wszechświata

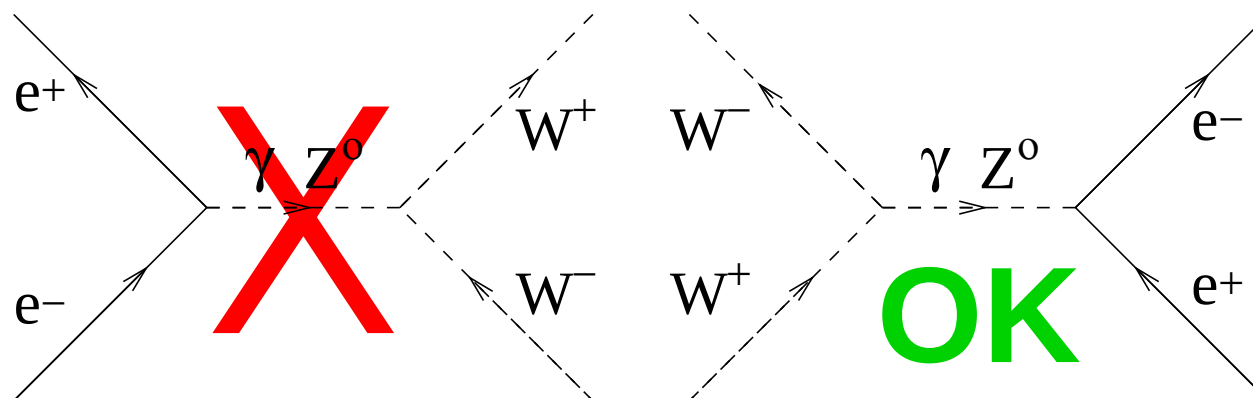
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- znikają swobodne bozony $W^{\pm}$ i Z^0 (10^{-10} sekundy)

Ewolucja Wszechświata

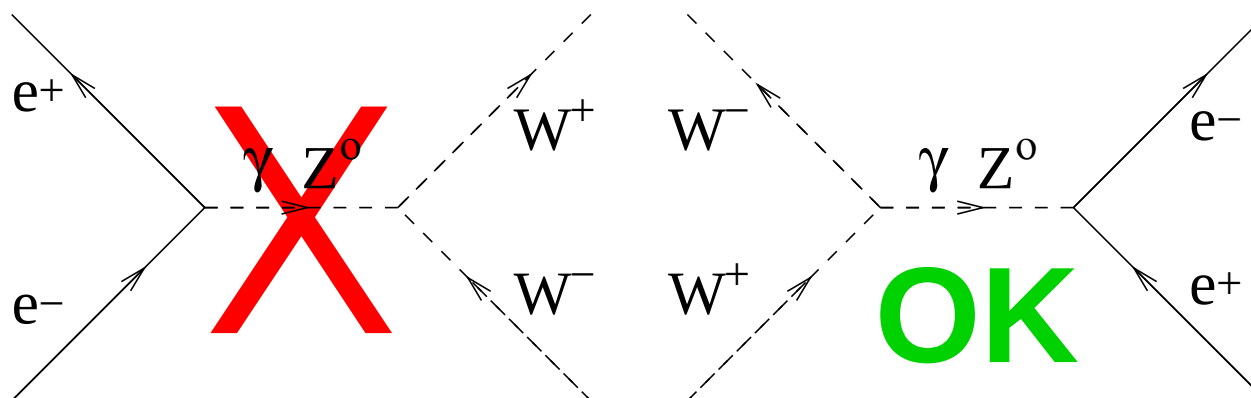
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- znikają swobodne bozony $W^{\pm}$ i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)

Ewolucja Wszechświata

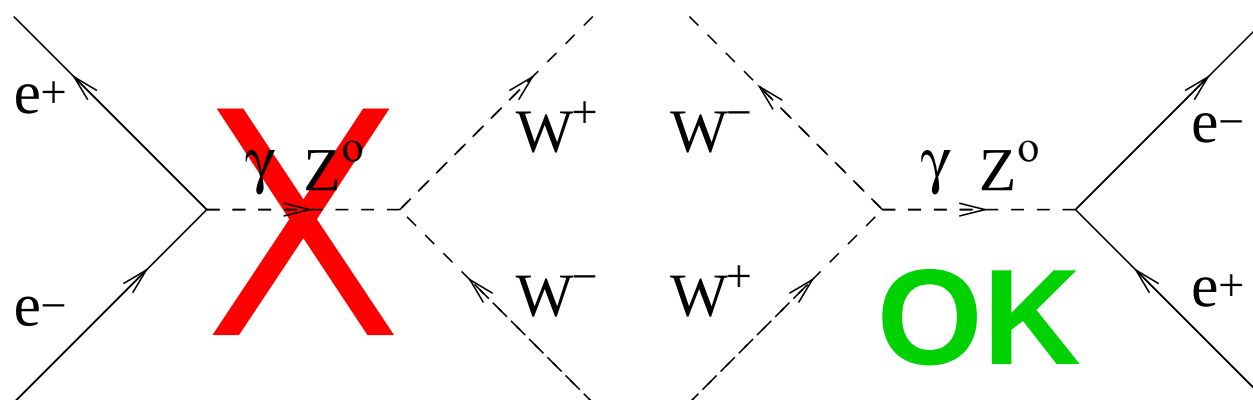
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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)

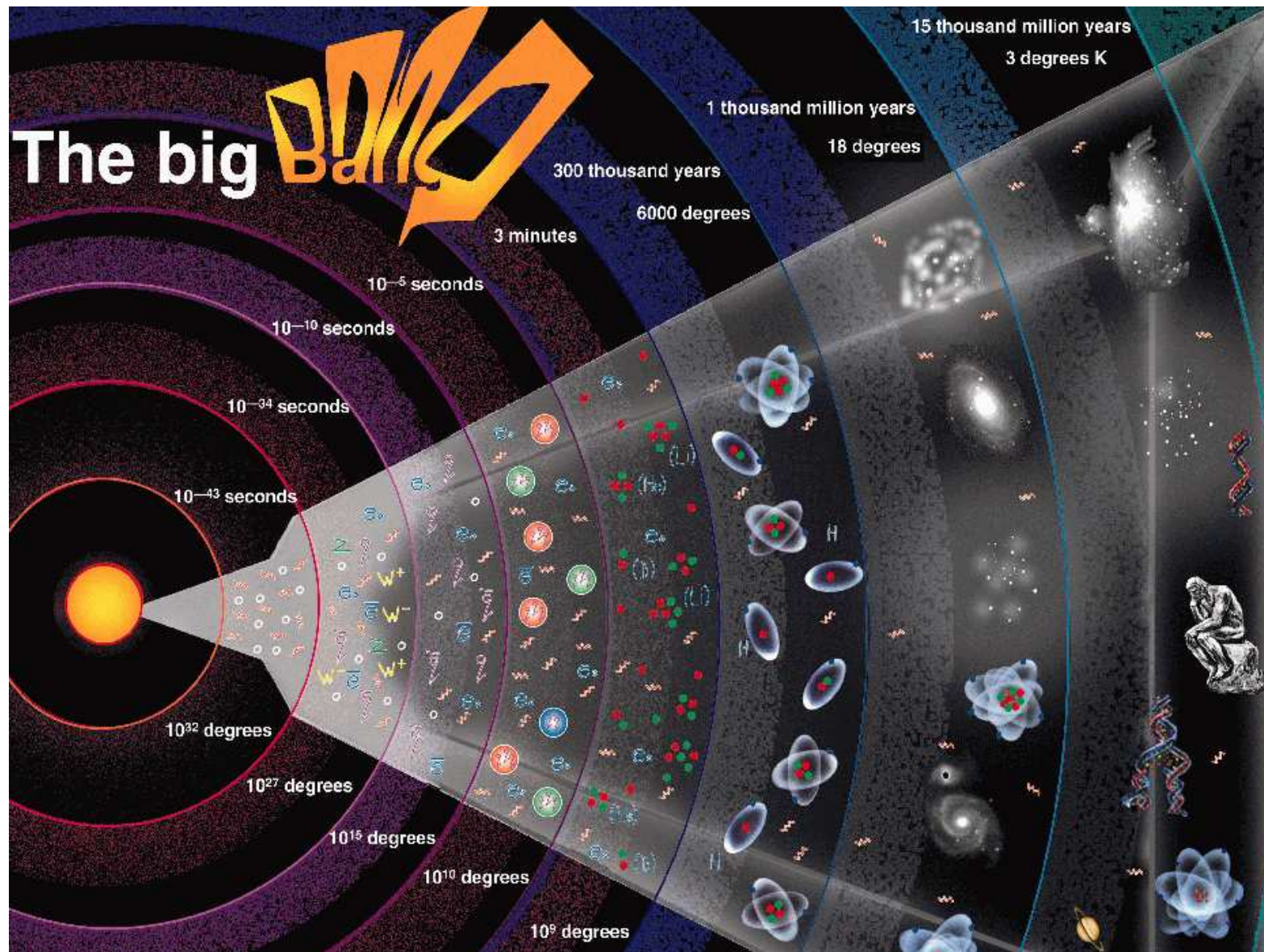
Ewolucja Wszechświata

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 ?

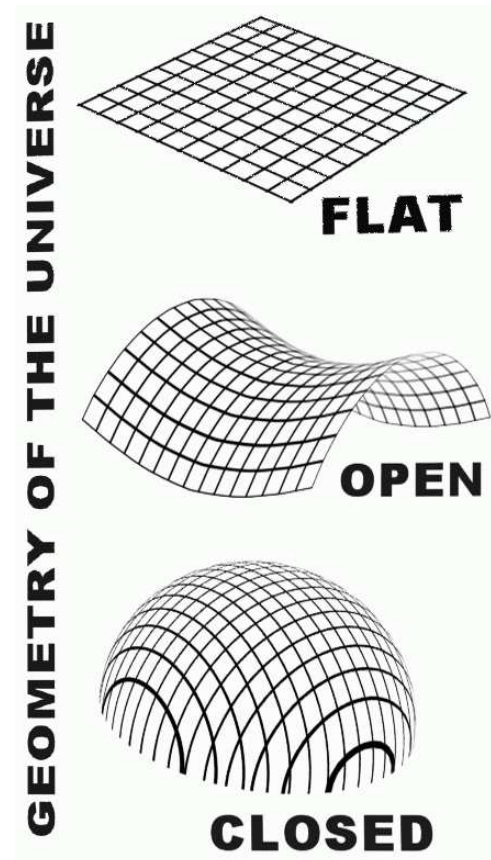
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** zależy od **gęstości** materii ρ .

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

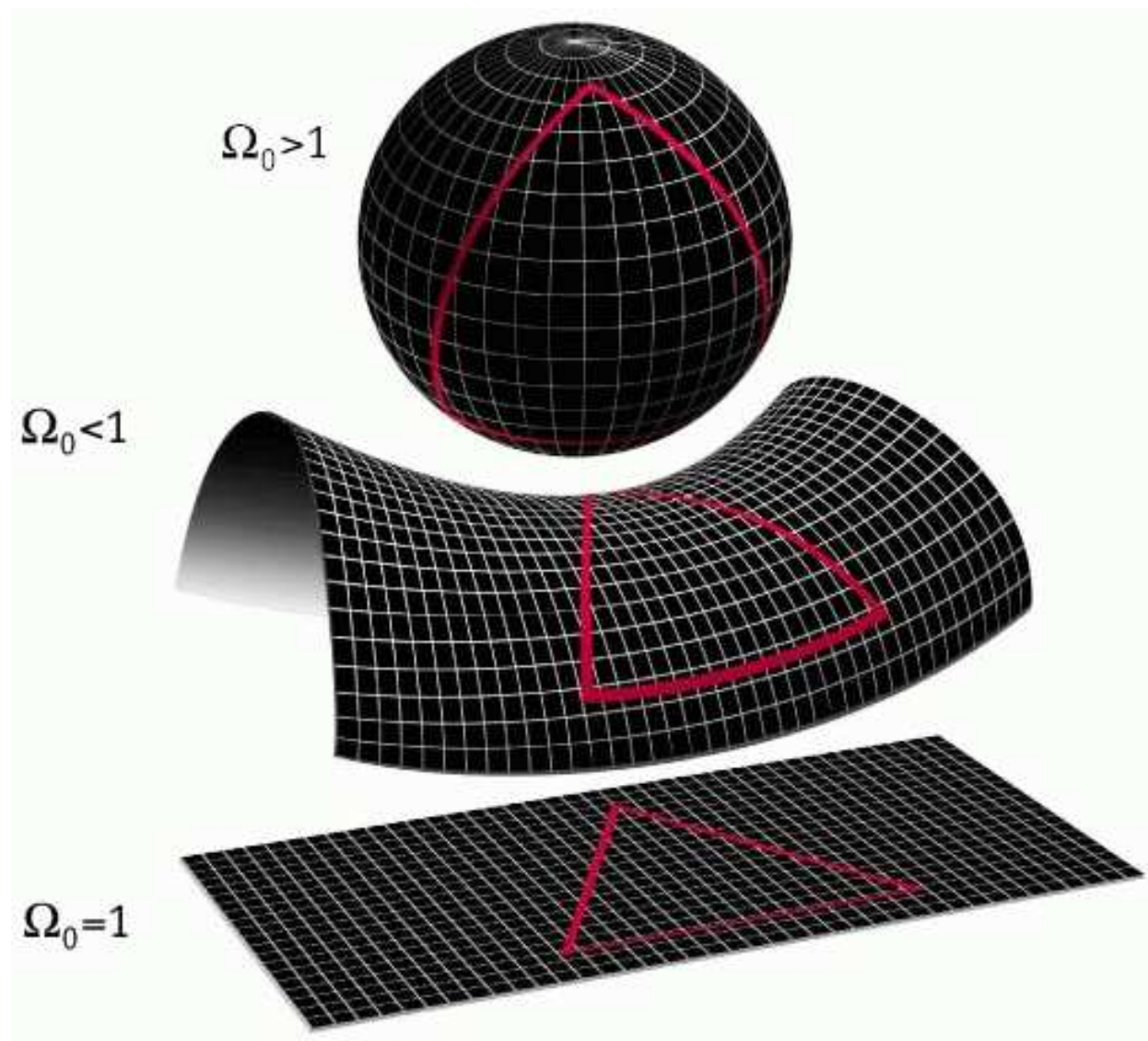


Krzywizna przestrzeni

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”

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

Gęstość materii we Wszechświecie

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyc 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”

$$\Omega_b \sim 0.04$$

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 ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

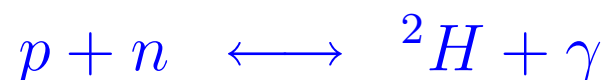
$$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow \text{ciemna materia !?}$$



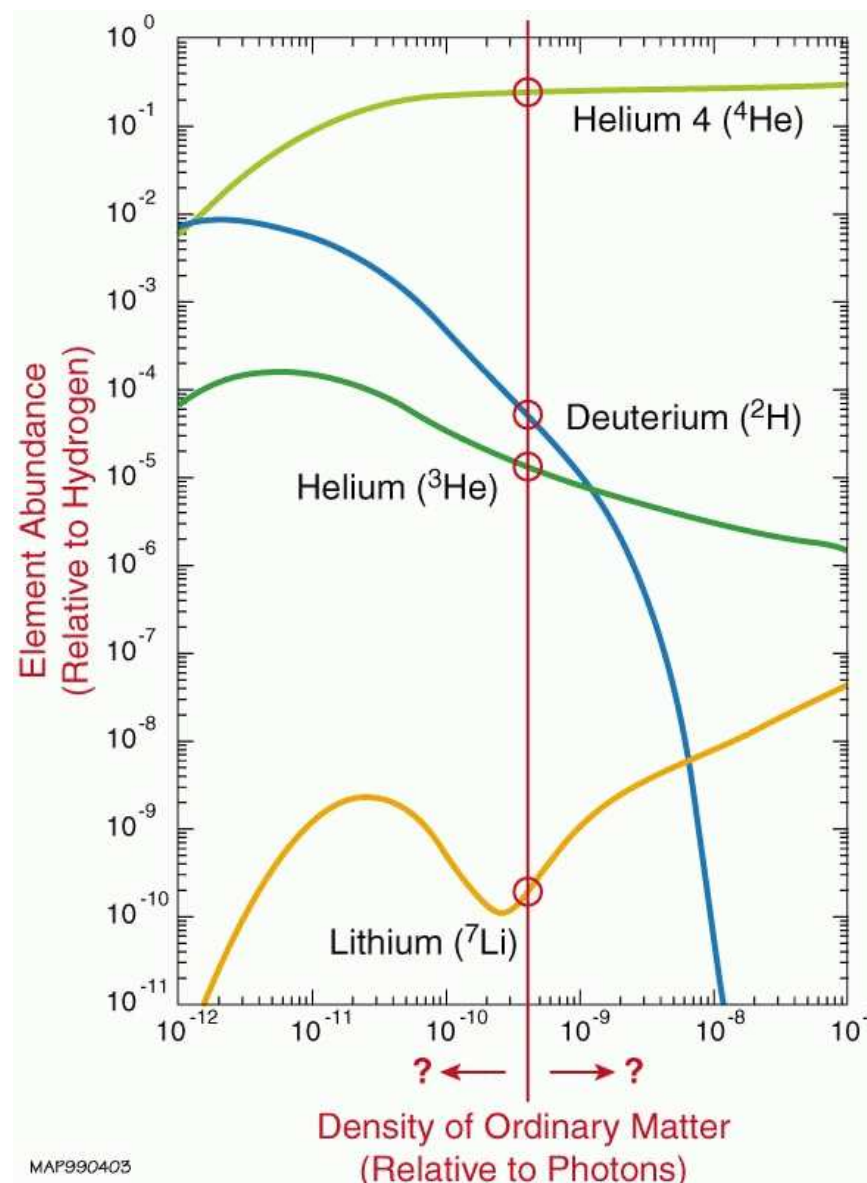
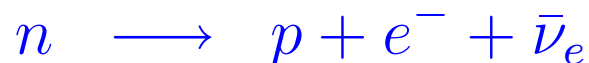
Pierwotna nukleosynteza

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

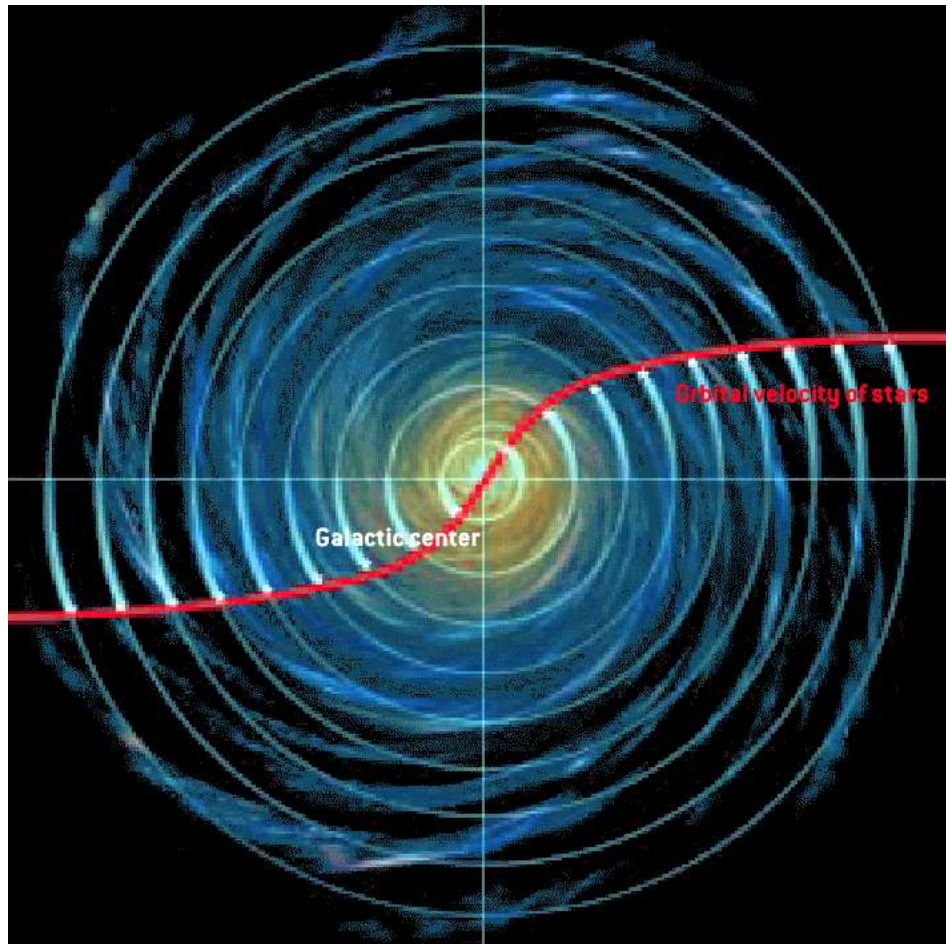
Produkcja deuteru:



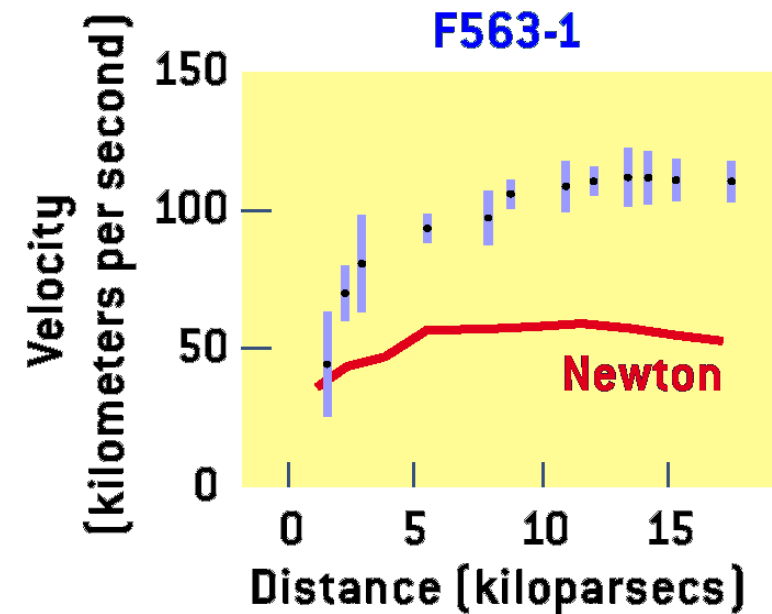
Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):



Ciemna materia?



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.

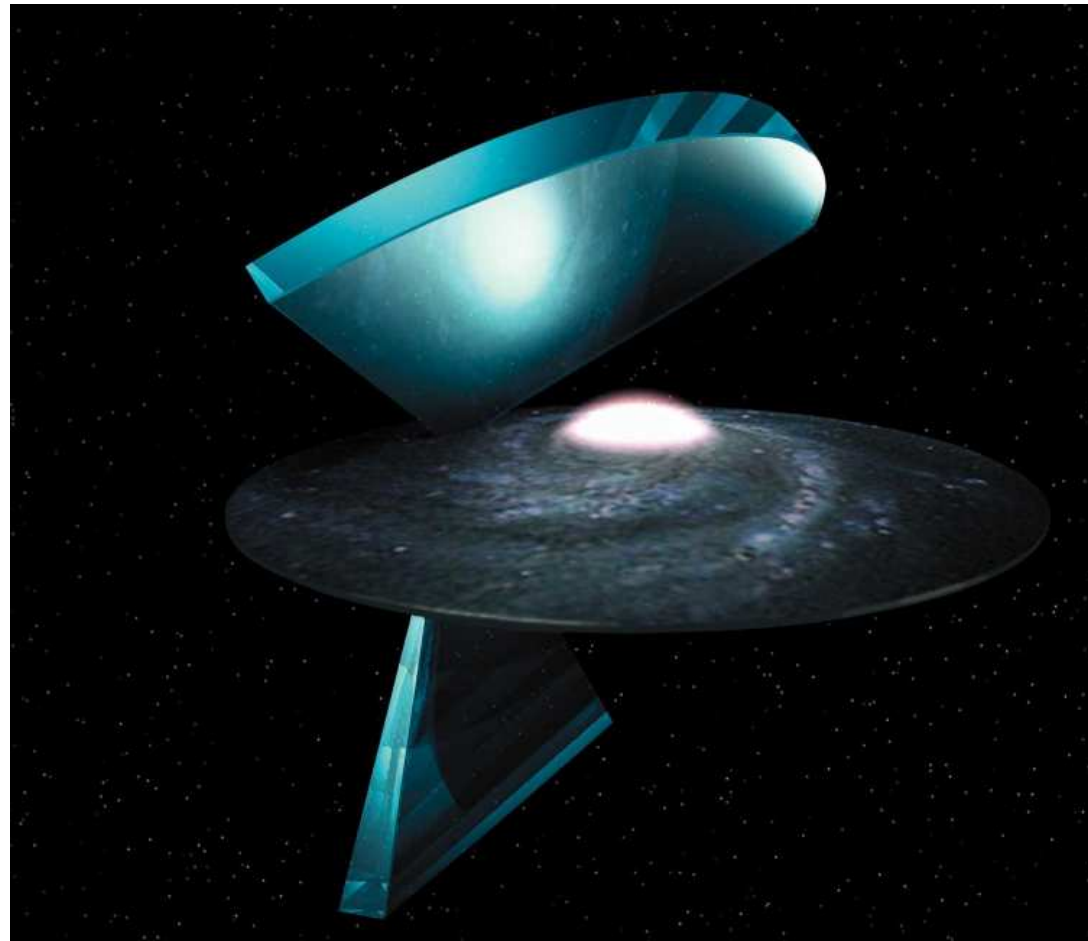


Ramiona wirują szybciej niż oczekiwaliśmy z praw grawitacji i dynamiki

Oddziaływania grawitacyjne

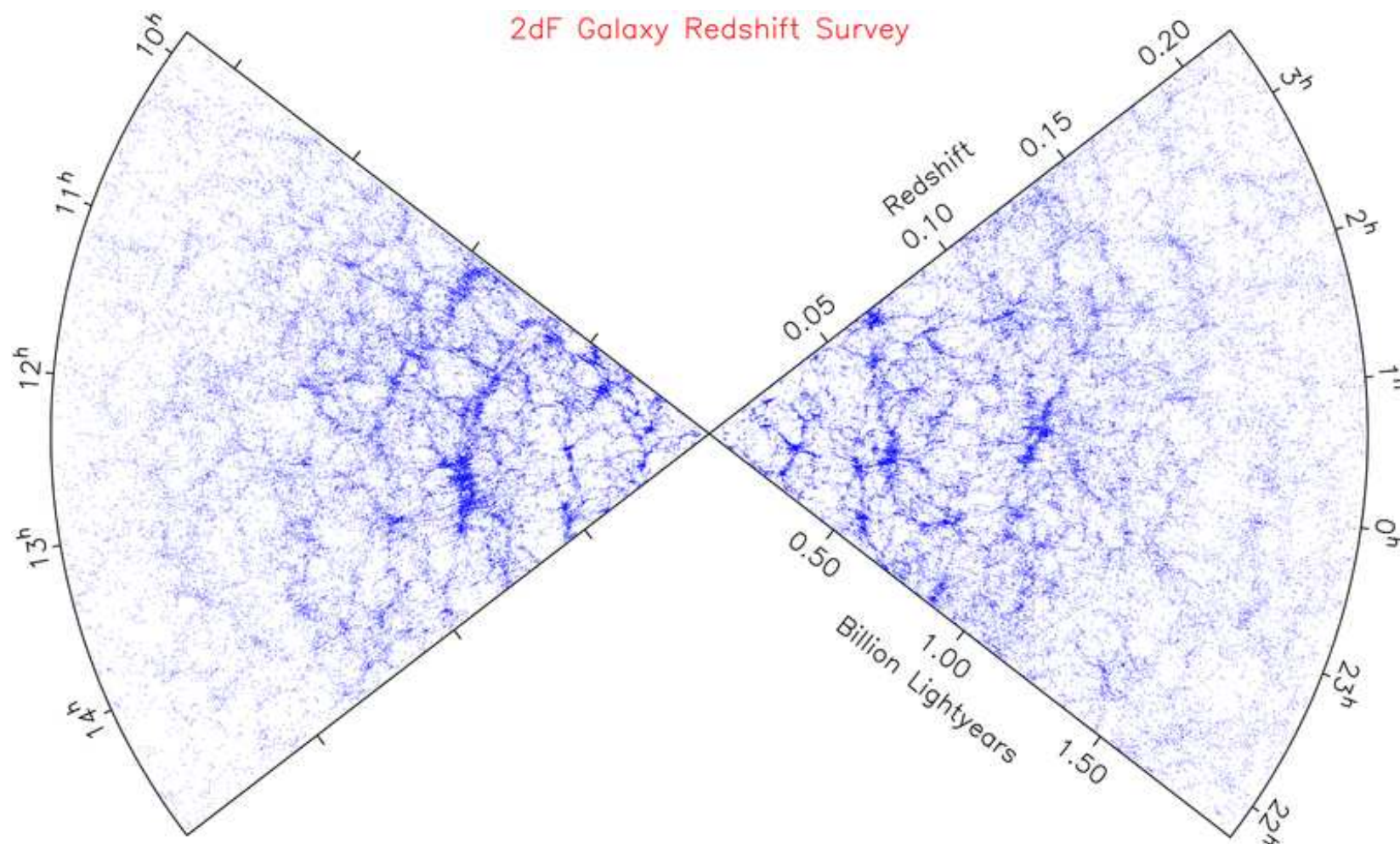
Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey

Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



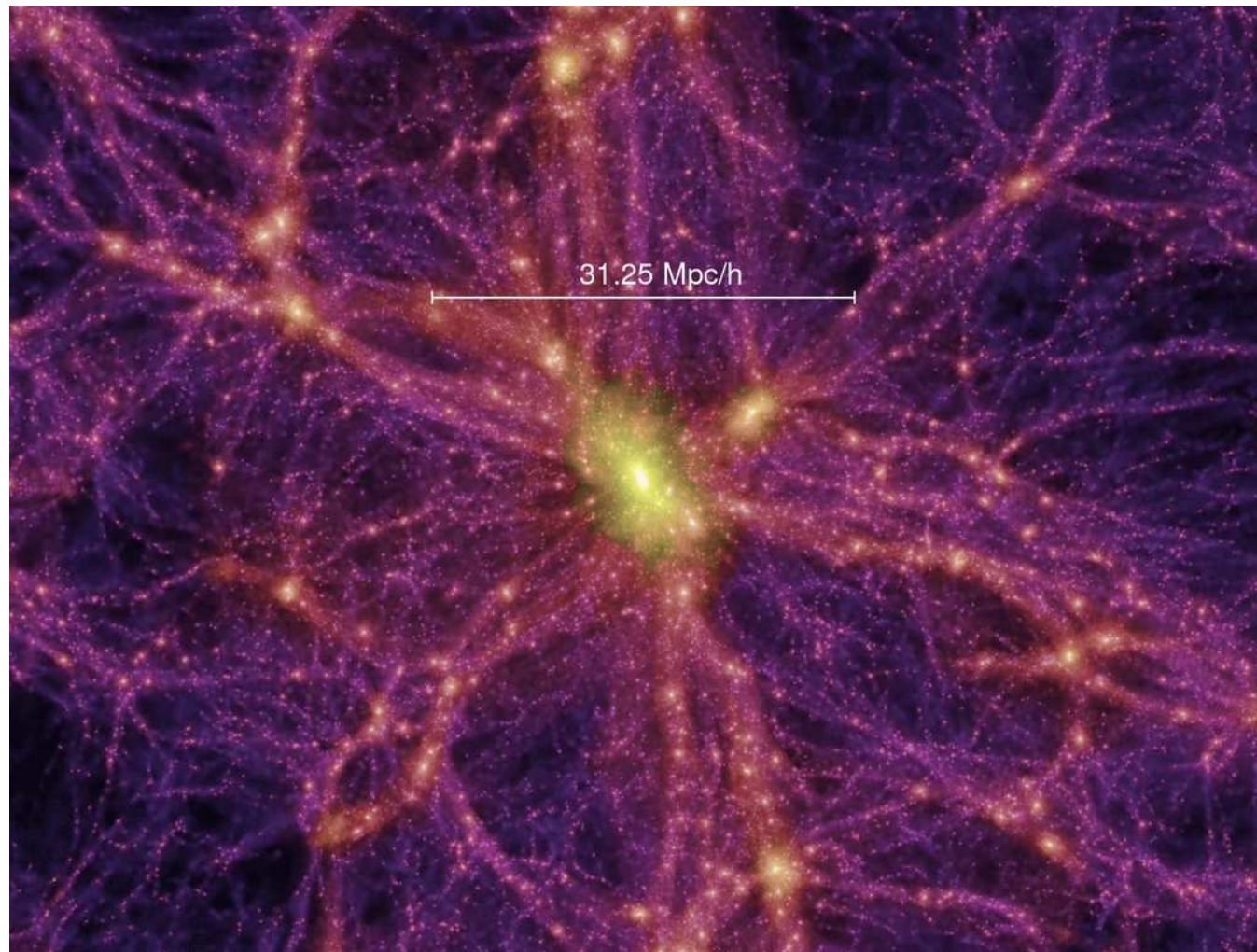
Oddziaływania grawitacyjne

Znana nam **materia barionowa** nie wystarcza do opisu **oddziaływań grawitacyjnych** na skalach międzygalaktycznych.



Oddziaływania grawitacyjne

Znana nam **materia barionowa** nie tłumaczy też **tworzenia się struktur** we Wszechświecie.



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)

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?

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 14: 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

Ciemna materia

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 ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow \text{Ciemna materia !}$$

Ciemna materia

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:

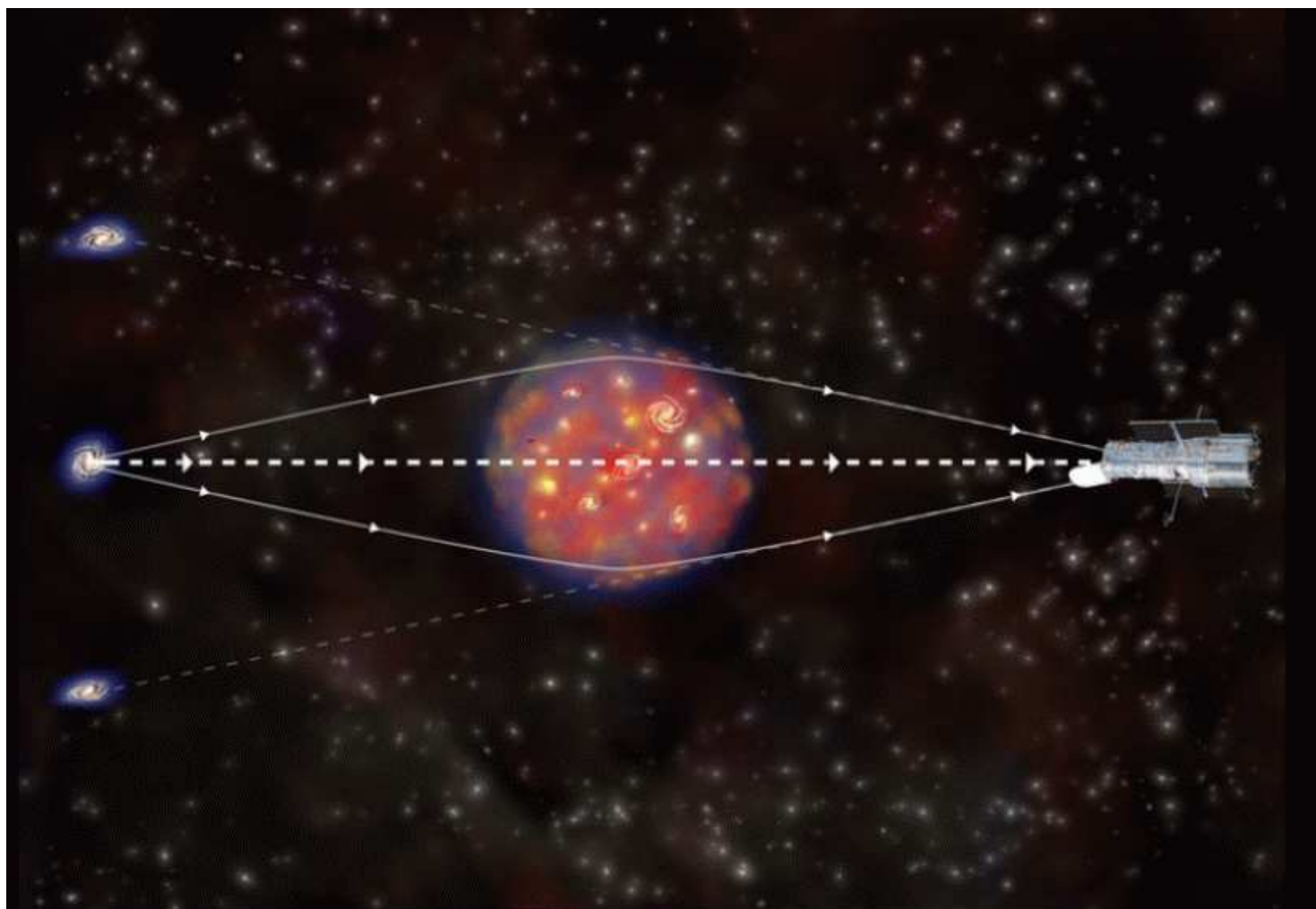
- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

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



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**.

Kosmiczny Teleskop
Hubble'a



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.



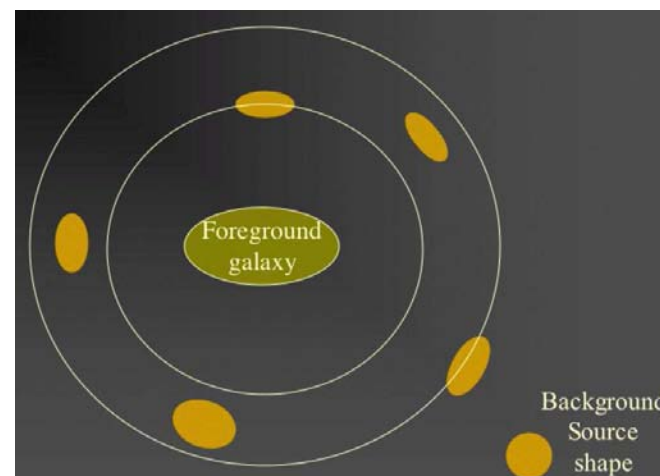
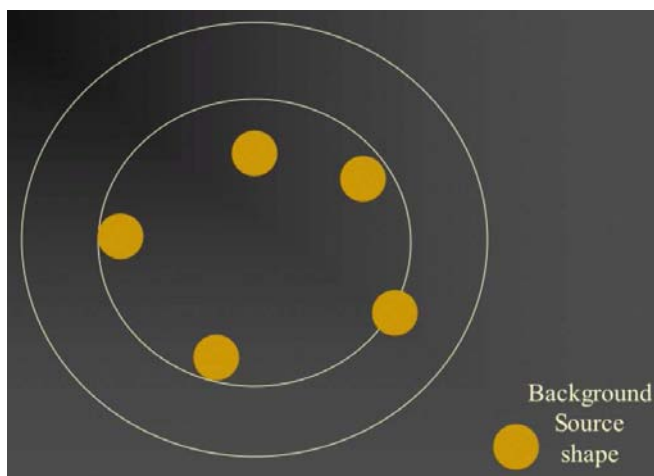
Soczewkowanie grawitacyjne

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**.



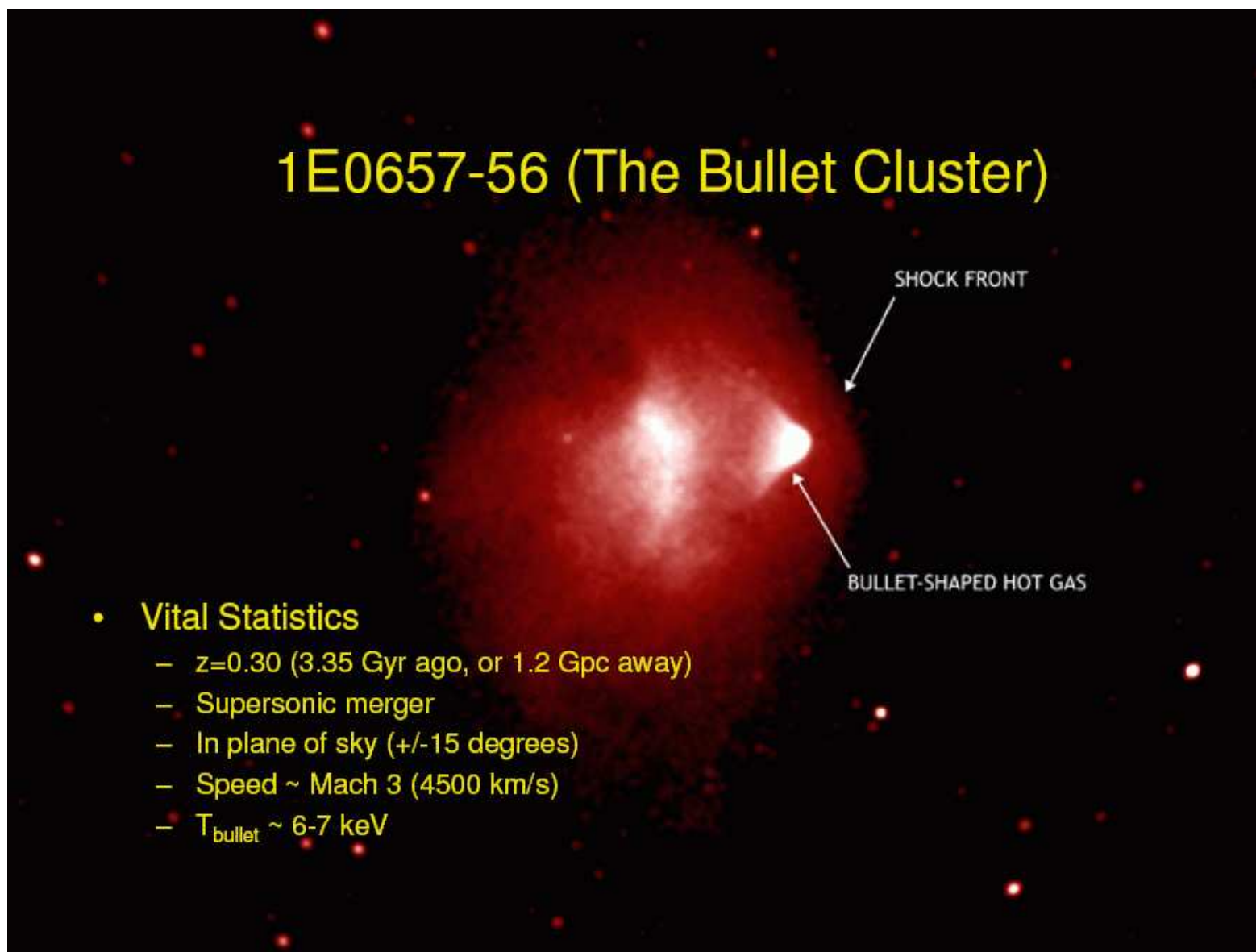
W obu przypadkach możemy wnioskować o **masie** obiektów znajdujących się na drodze promieni świetlnych.

Kosmiczna kolizja

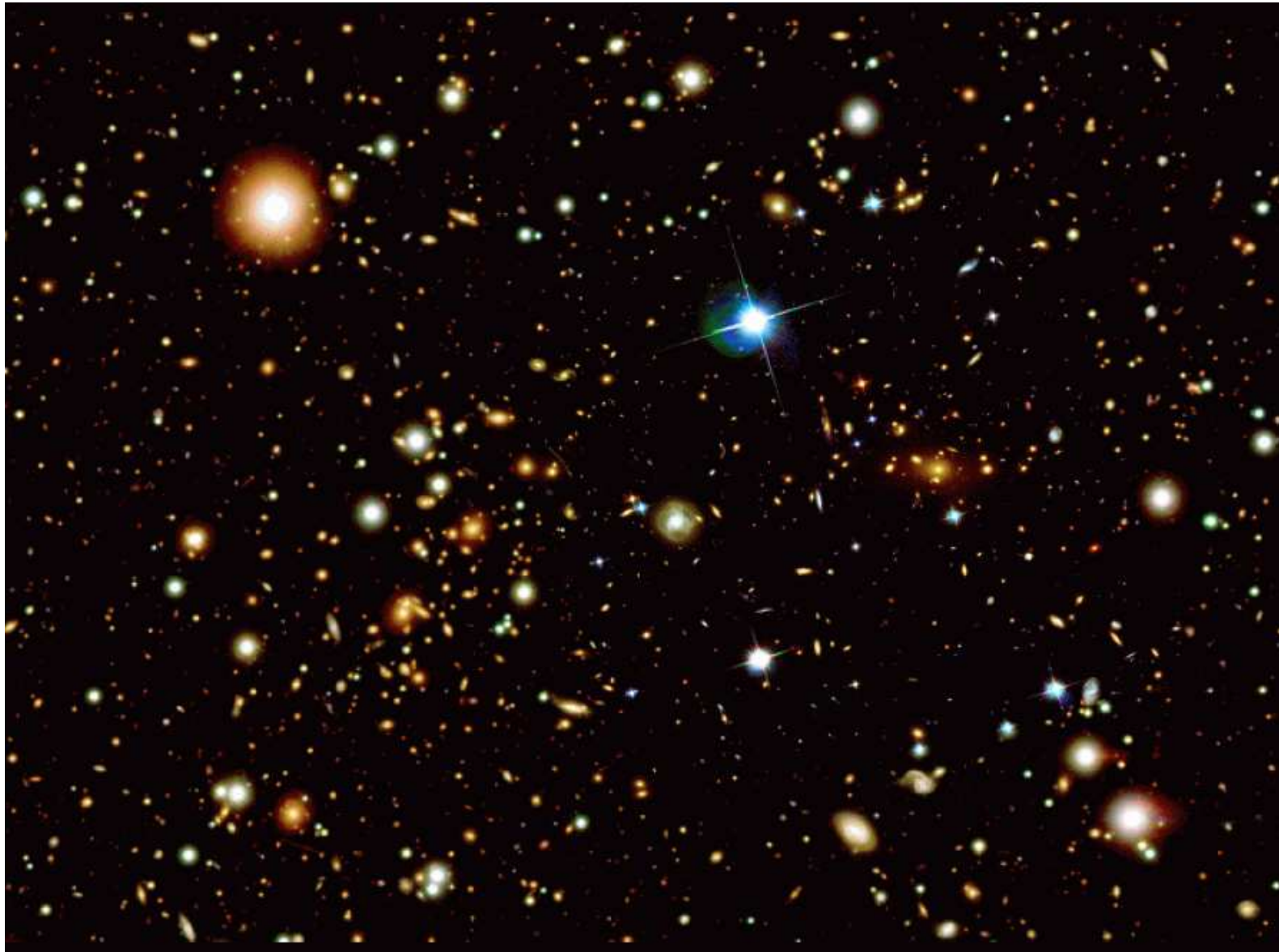
Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. W ostatnich latach bardzo dokładne pomiary tego promieniowania stały się możliwe dzięki wystrzeleniu teleskopu kosmicznego **Chandra**.



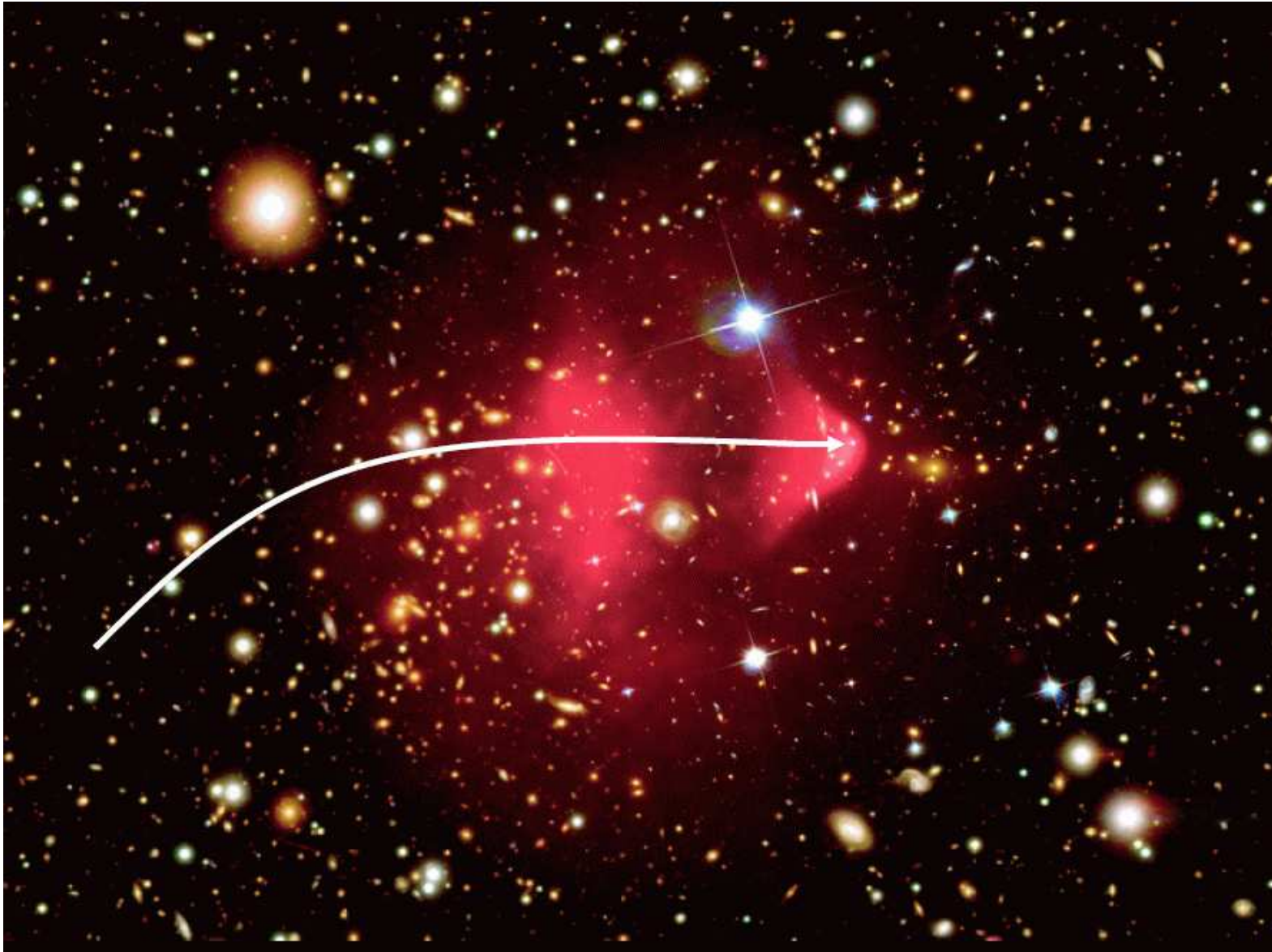
Kosmiczna kolizja



Kosmiczna kolizja

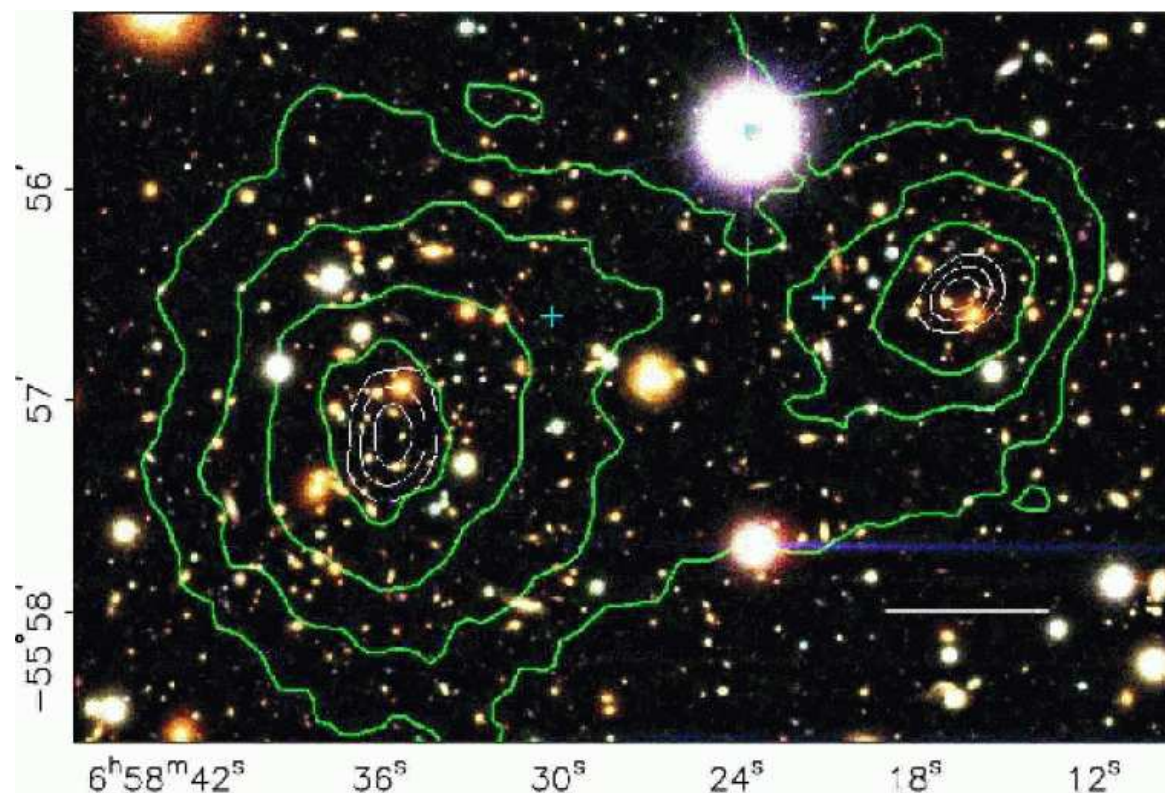


Kosmiczna kolizja



Kosmiczna kolizja

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

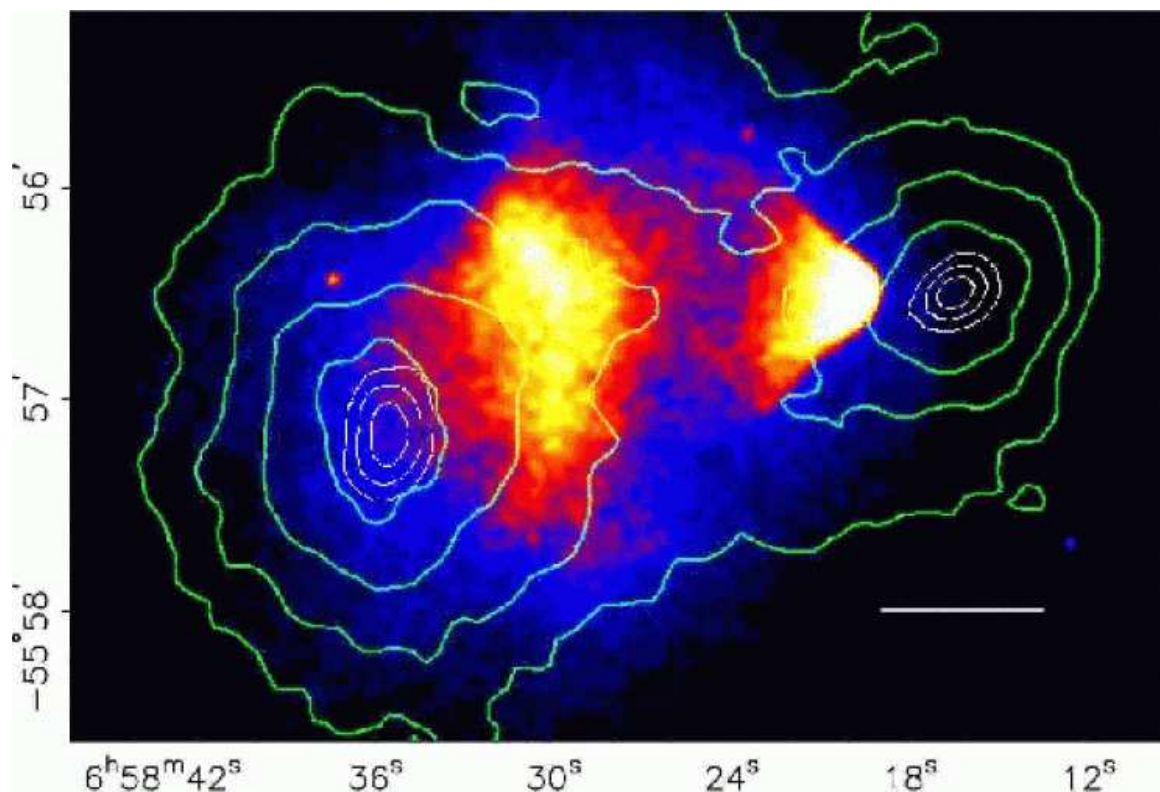


Kosmiczna kolizja

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

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

Nie zgadza się z rozkładem materii międzygwiazdnej.



Kosmiczna kolizja



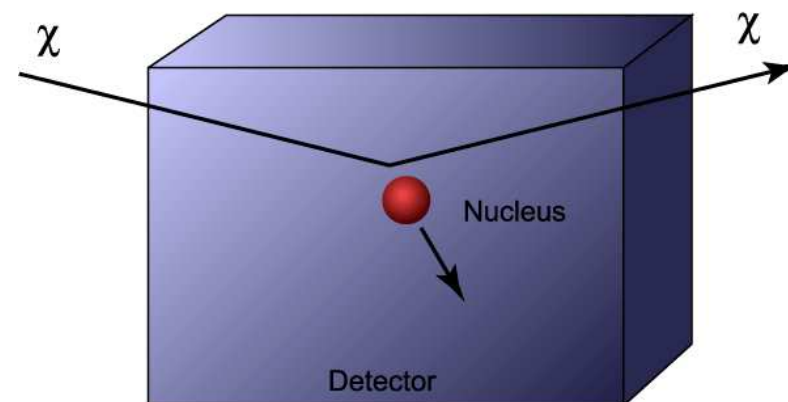
Pomiary bezpośrednie

Wiele eksperymentów na Ziemi próbuje “złapać” otaczające nas cząstki ciemnej materii.

Jest to jednak bardzo trudne bo oddziałują one niezwykle słabo...

Ruch Ziemi dookoła Słońca moduluje naszą prędkość względem ciemnej materii wypełniającej Galaktykę
 ⇒ powinien wpływać na częstość rejestrowanych przypadków

Eksperyment **DAMA** zarejestrował tego typu oscylacje. **Nie potwierdzone przez inne eksperymenty...**



Pomiary bezpośrednie

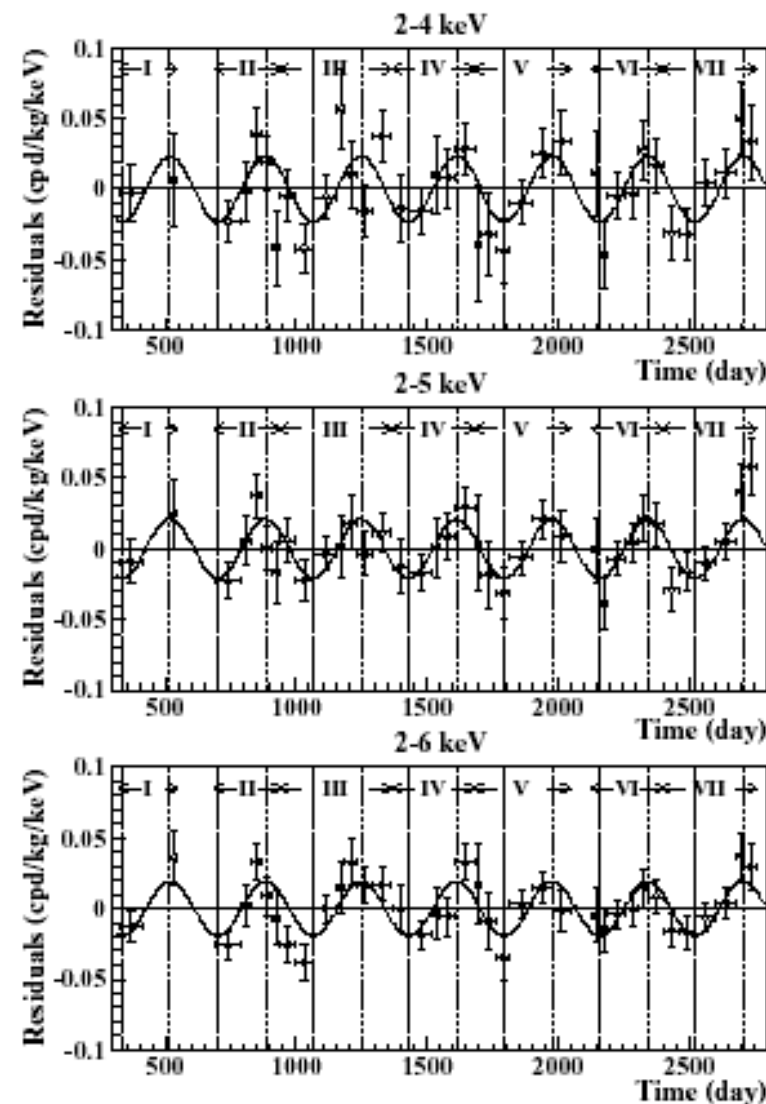
Wiele eksperymentów na Ziemi próbuje “złapać” otaczające nas cząstki ciemnej materii.

Jest to jednak bardzo trudne bo oddziałują one niezwykle słabo...

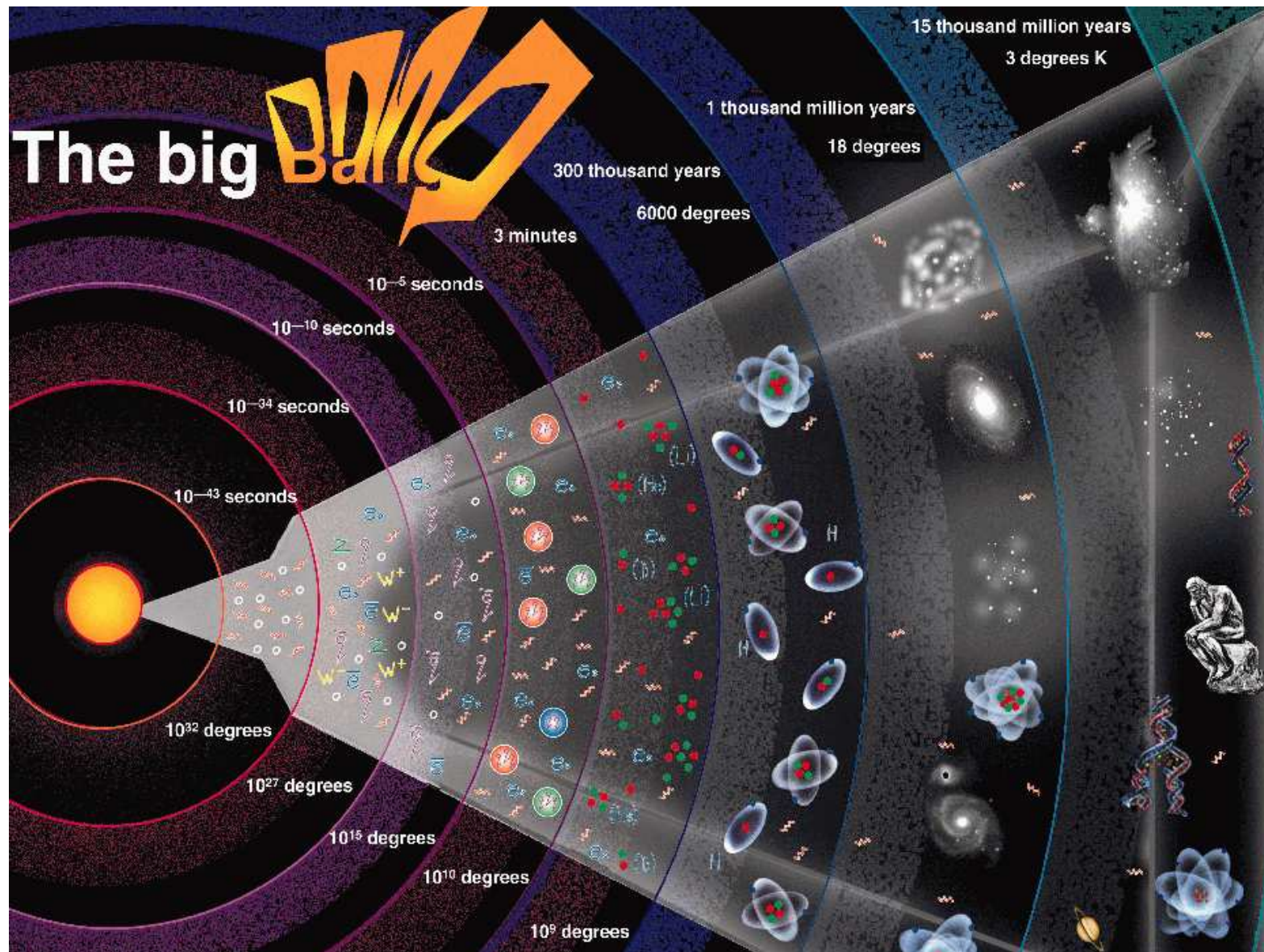
Ruch Ziemi dookoła Słońca moduluje naszą prędkość względem ciemnej materii wypełniającej Galaktykę

⇒ powinien wpływać na częstość rejestrowanych przypadków

Eksperyment **DAMA** zarejestrował tego typu oscylacje. **Nie potwierdzone przez inne eksperymenty...**



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.



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.



Około **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 jesteśmy 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**.

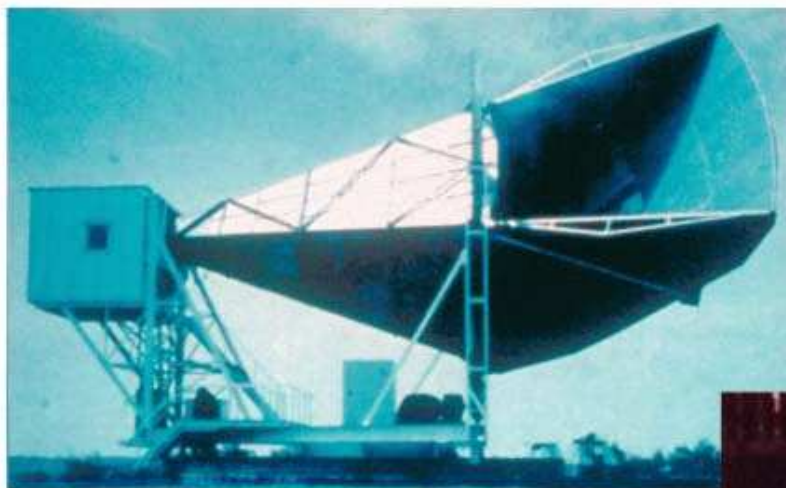
$$T \sim 5 K$$



Promieniowanie tła

zostało odkryte w 1965 roku przez [A.A.Penzisa](#) i [R.W.Wilsona](#).

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

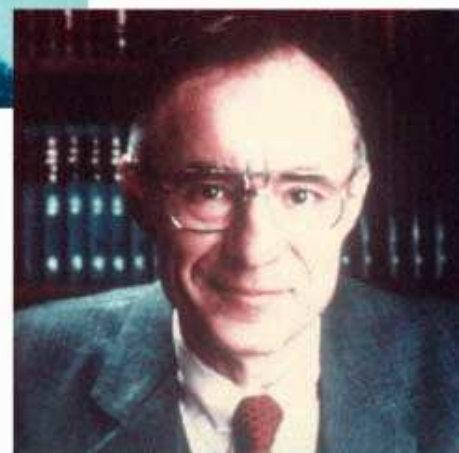


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

Promieniowanie tła

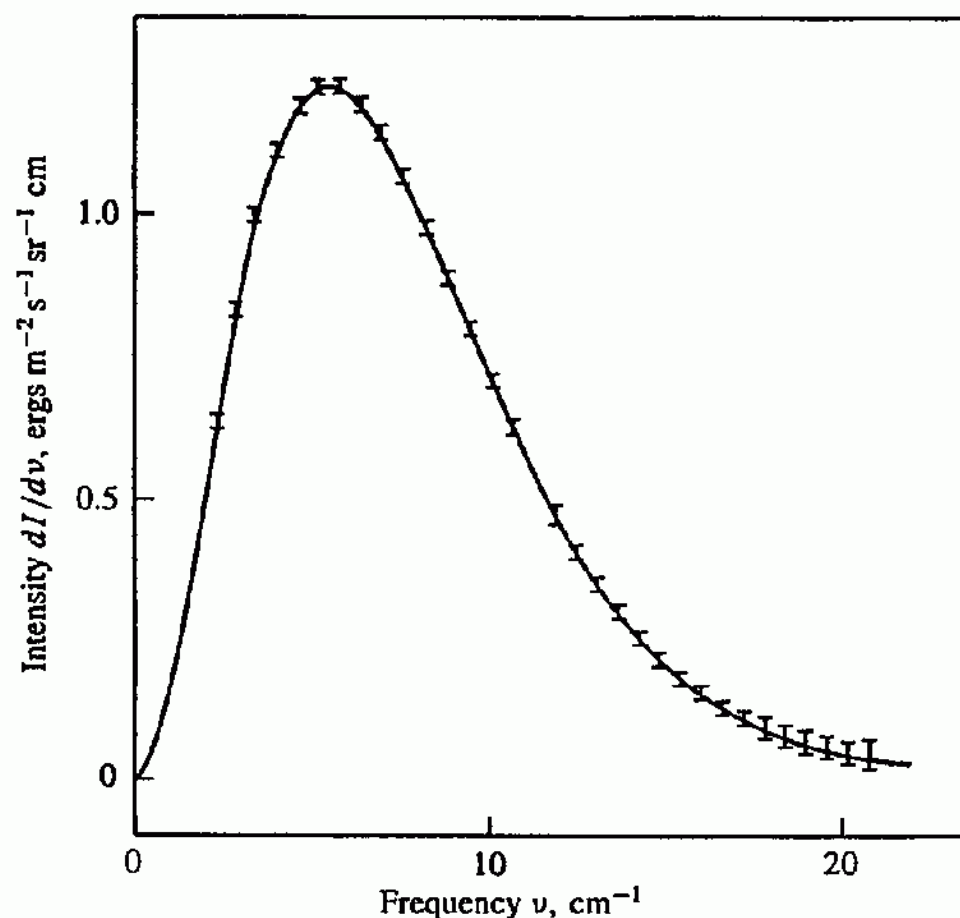
zostało odkryte w 1965 roku przez [A.A.Penazisa](#) i [R.W.Wilsona](#).

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

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

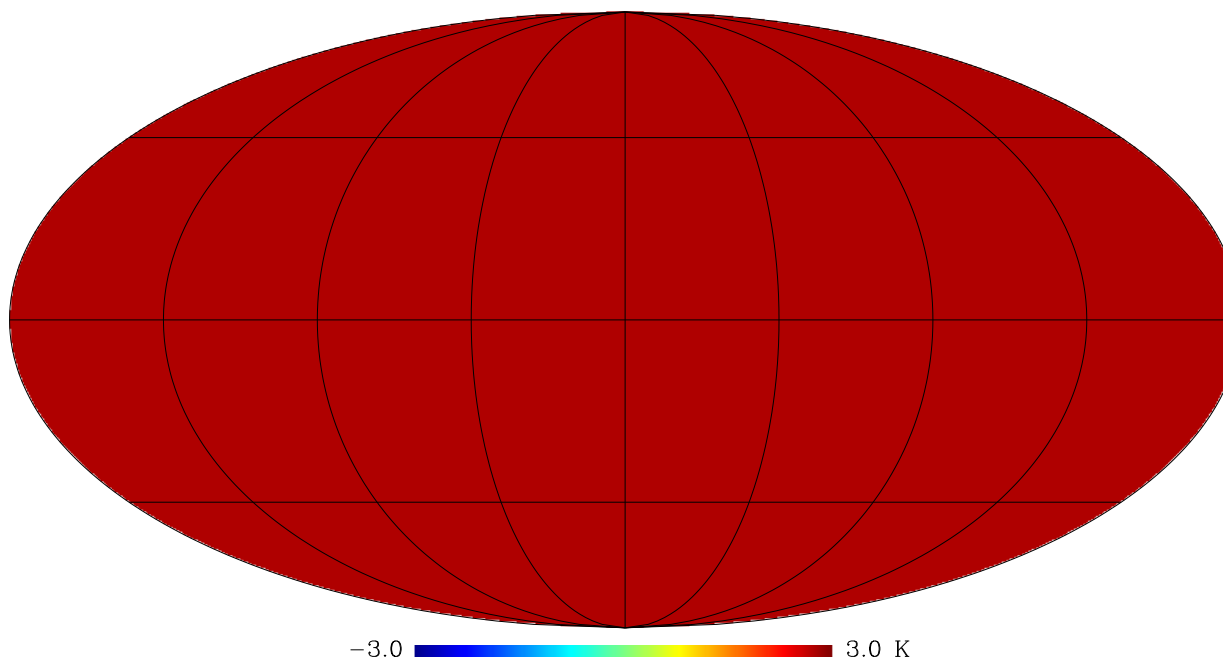
Obserwacja **CMB** była rozstrzygającym dowodem **Wielkiego Wybuchu** i "pogrzebała" model statycznego Wszechświata.

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



Promieniowanie tła

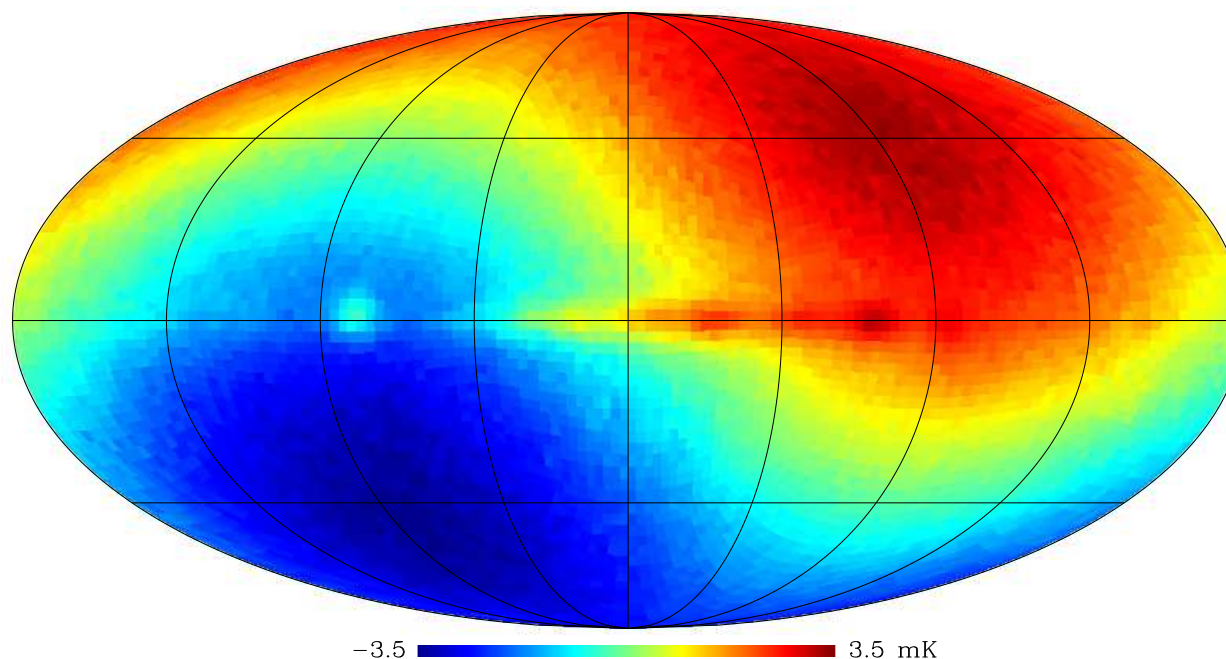
W pierwszym przybliżeniu $(\Delta T \sim 1K)$



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

Promieniowanie tła

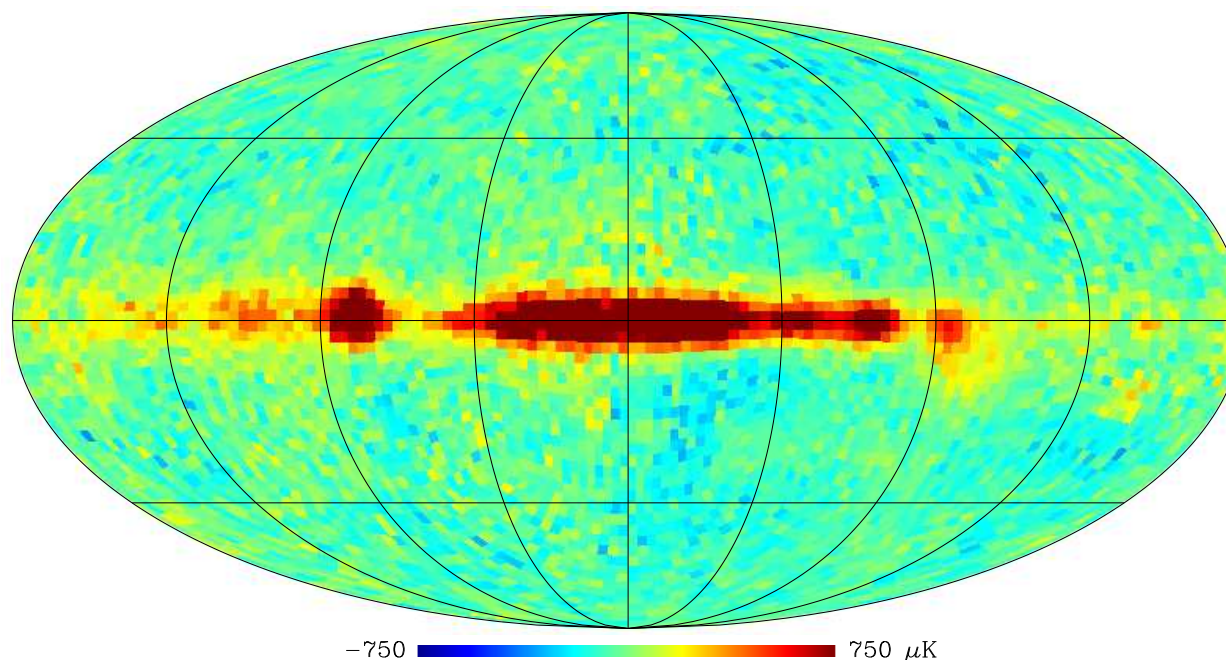
Jednak gdy przyjżymy się bliżej $(\Delta T \sim 1 \text{ mK})$



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

Promieniowanie tła

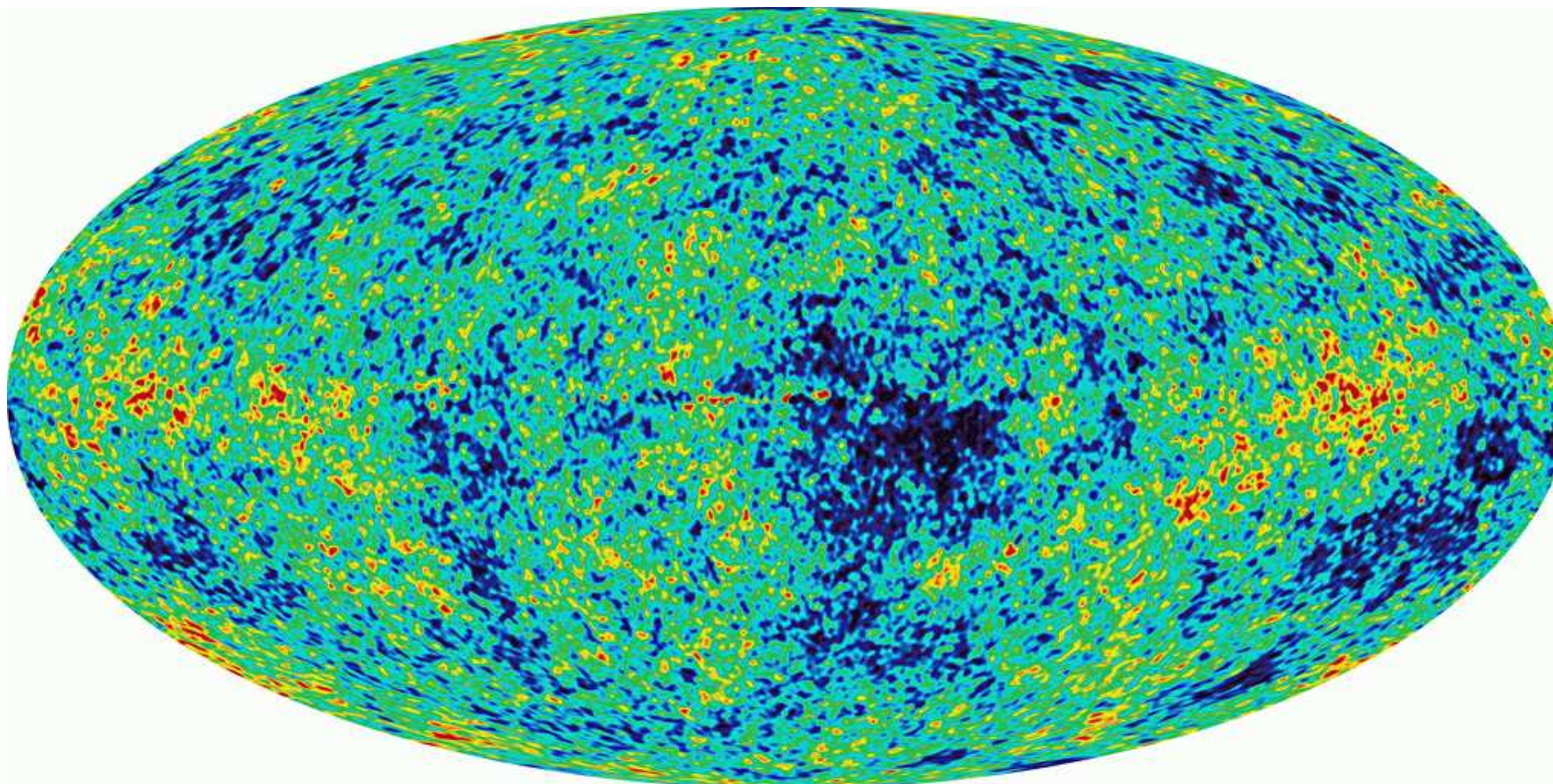
Odejmując wpływ efektu Dopplera ($\Delta T \sim 200 \mu K$)



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

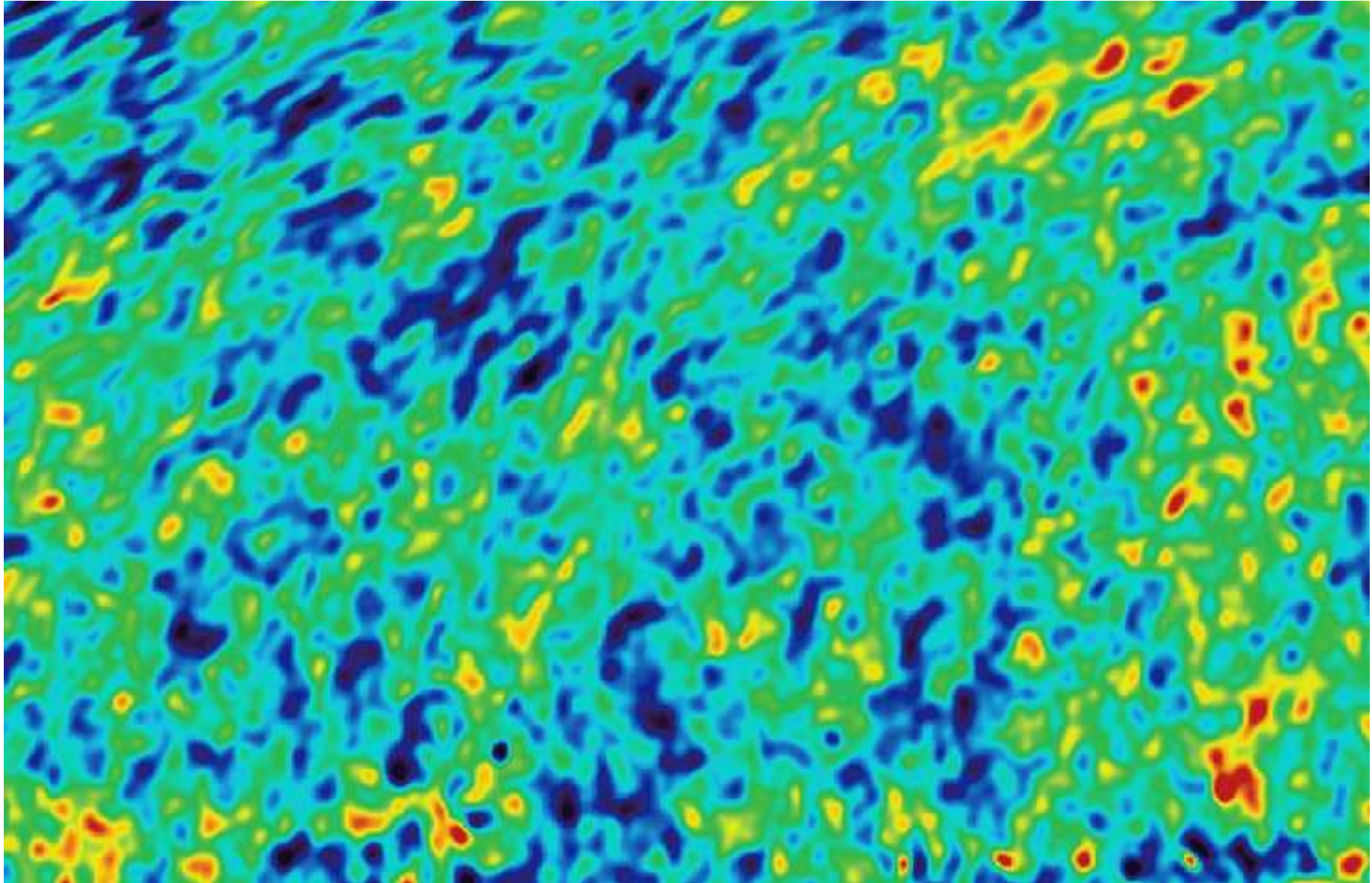
Promieniowanie tła

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



widzimy przypadkowe fluktuacje w rozkładzie energii promieniowania
 $\Rightarrow$ czy w tym chaosie tkwi jakaś informacja?

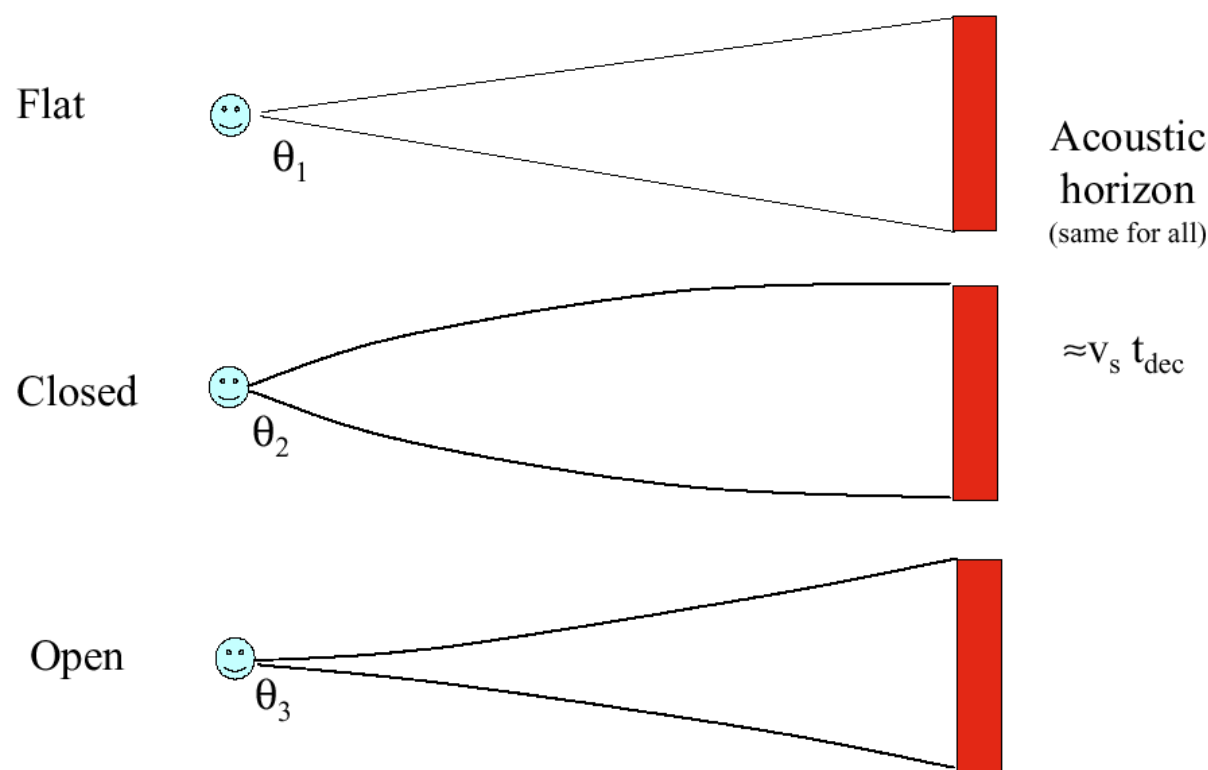
Promieniowanie tła



Promieniowanie tła

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

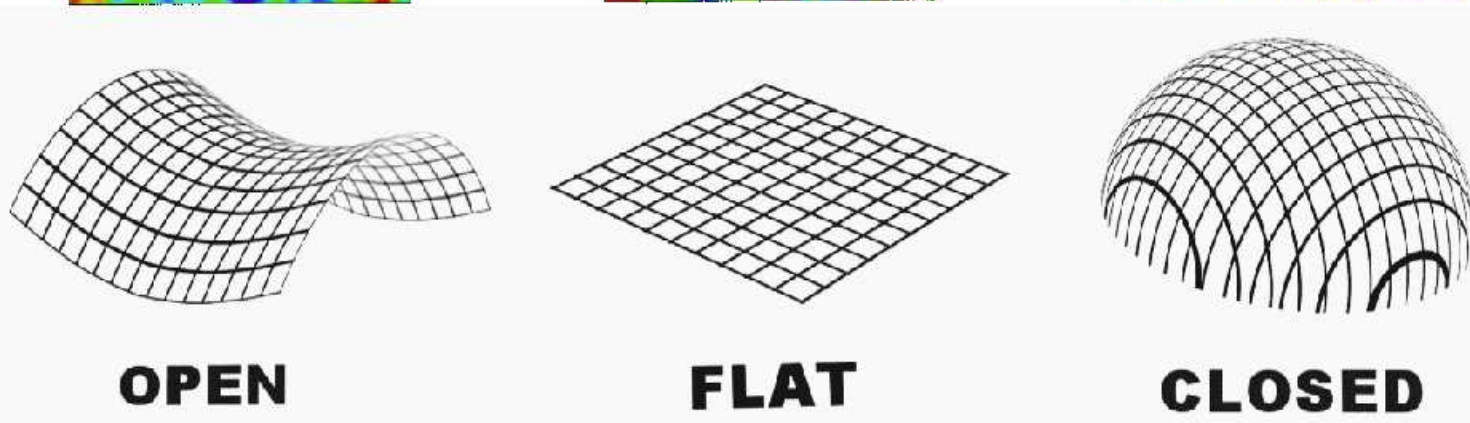
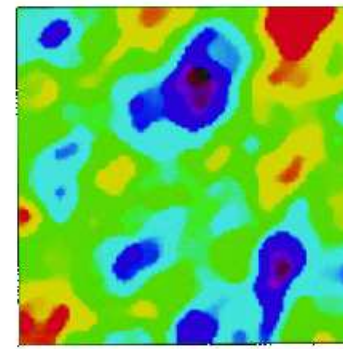
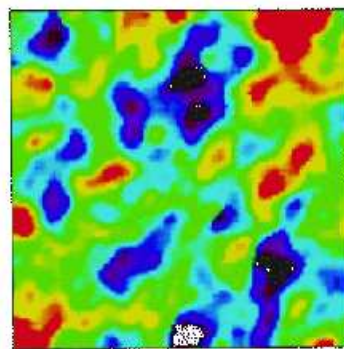
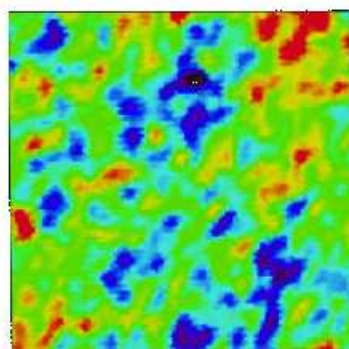
Rozmiary jakie obecnie **obserwujemy** zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



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!**



OPEN

FLAT

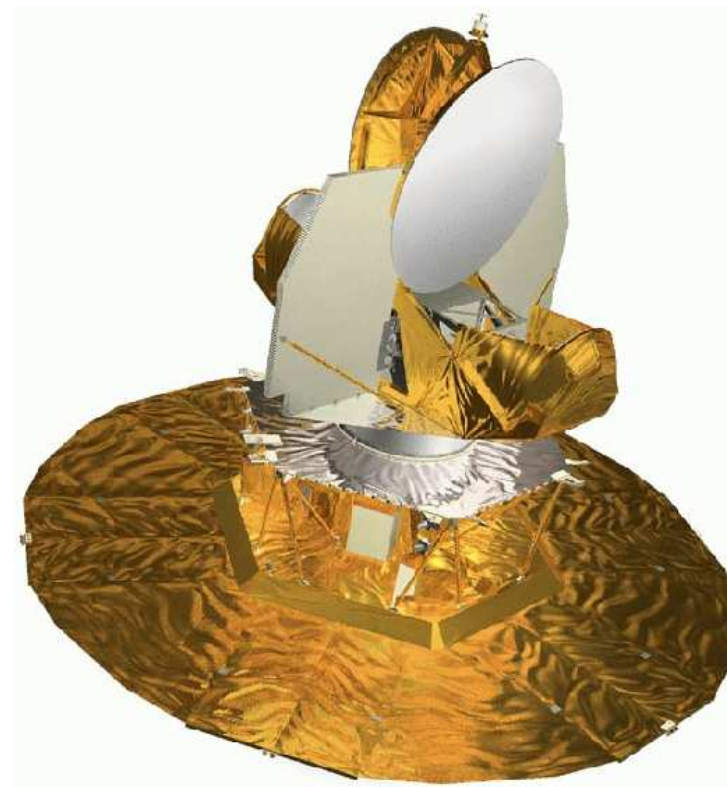
CLOSED

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.



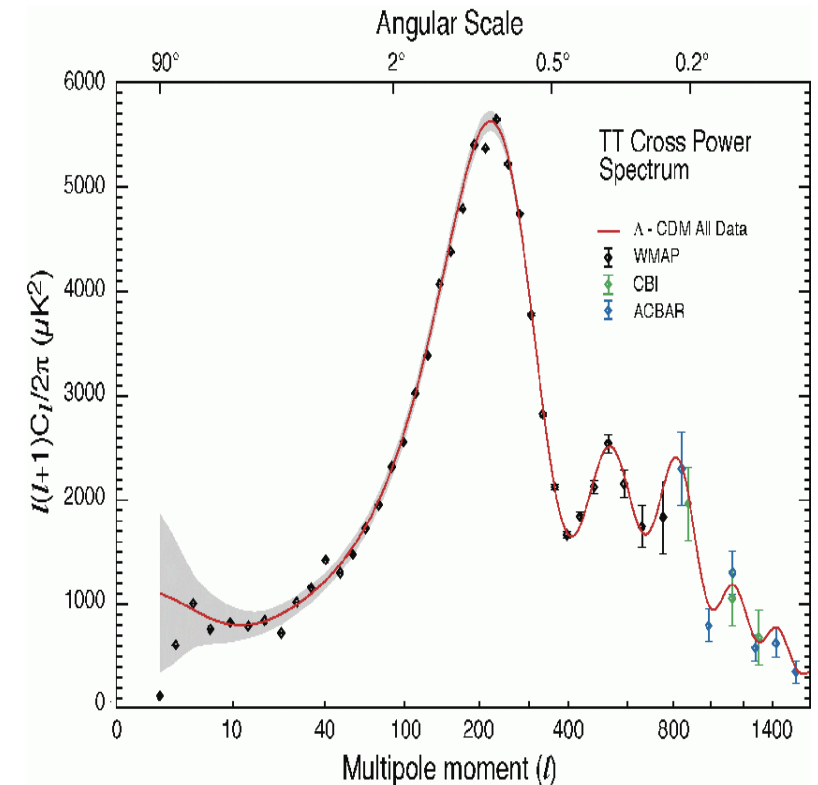
WMAP

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°



WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

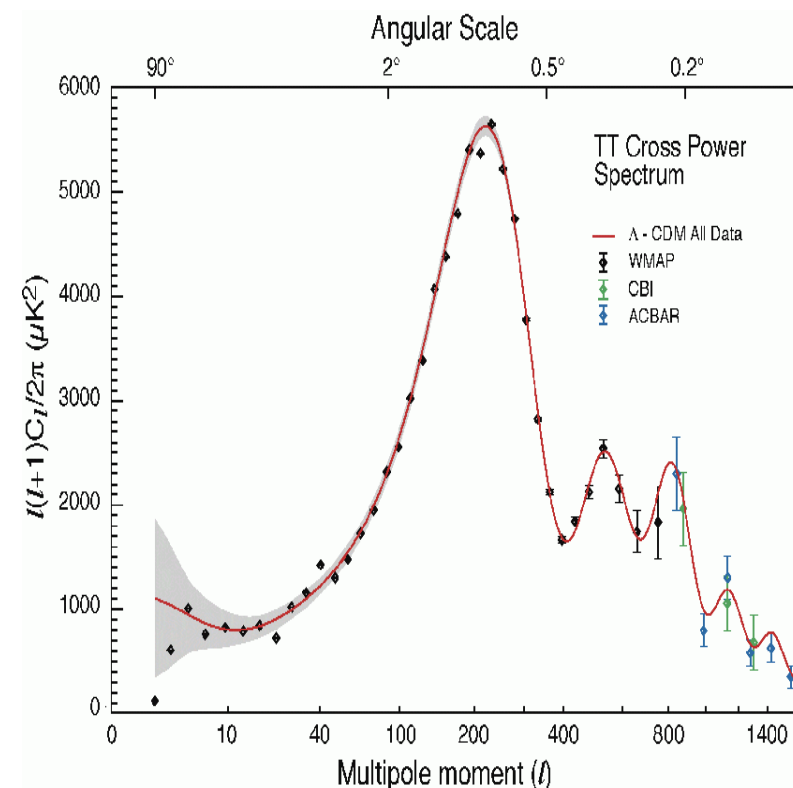
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.
Pomiar promieniowania mikrofalowego
w 5 przedziałach widma.

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

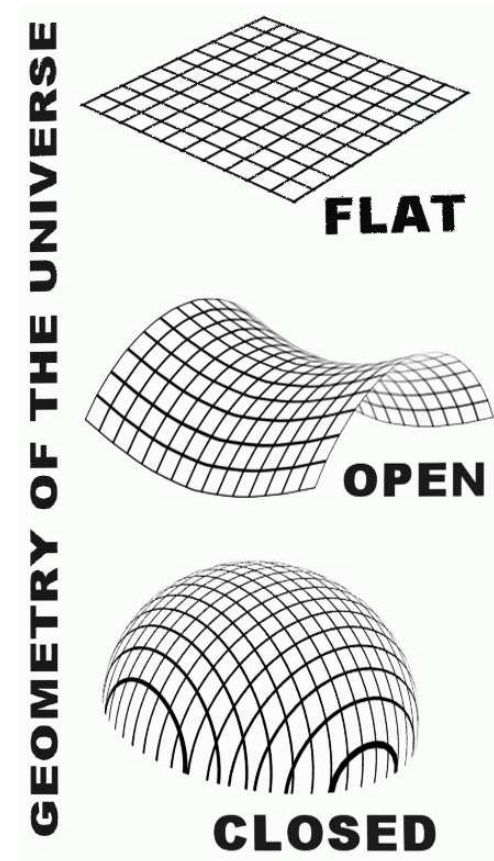
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** wiąże się ściśle z **krzywizną** przestrzeni i zależy od **gęstości** materii ρ .

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

Pomiar całkowitej gęstości materii we Wszechświecie, na podstawie oddziaływań grawitacyjnych:

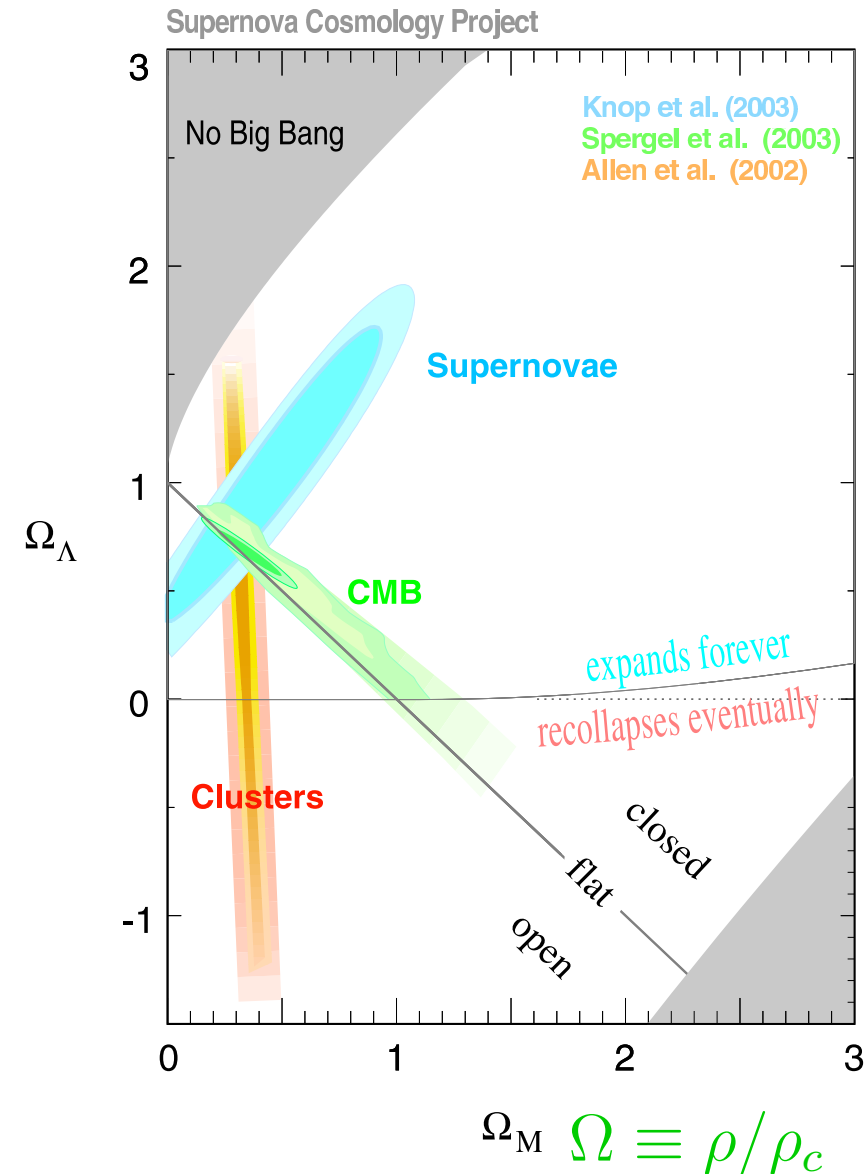
$$\rho_m \approx 0.25 \rho_c$$

Gęstość oczekiwana na podstawie wyznaczone krzywizny Wszechświata:

$$\rho \approx \rho_c$$

⇒ jedynym sposobem na pogodzenie tych wyników jest **stała kosmologiczna**

$$\rho = \rho_m + \rho_\Lambda$$



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

Asymetria brionowa

Model Wielkiego Wybuchu tłumaczy jak powstawał Wszechświat. Jednak nie tłumaczy dlaczego... zbudowany jest tylko z **materii**!

Jak złamana została początkowa symetria **materia-antymateria**?

Szukamy zjawisk, które łamią tę symetrię - tzw. łamanie **symetrii CP**

C - tzw. sprzężenie ładunkowe: zamiana cząstek na antycząstki

P - tzw. parzystość: "odbicie" w przestrzeni

Praktycznie wszystkie zjawiska w przyrodzie są niezmiennicze ze względu na **symetrię CP**

$$\pi^- \rightarrow \mu_L^- + \bar{\nu}_{\mu,R} \iff \pi^+ \rightarrow \mu_R^+ + \nu_{\mu,L}$$

Ale mierzymy już też zjawiska, w których CP jest naruszone...



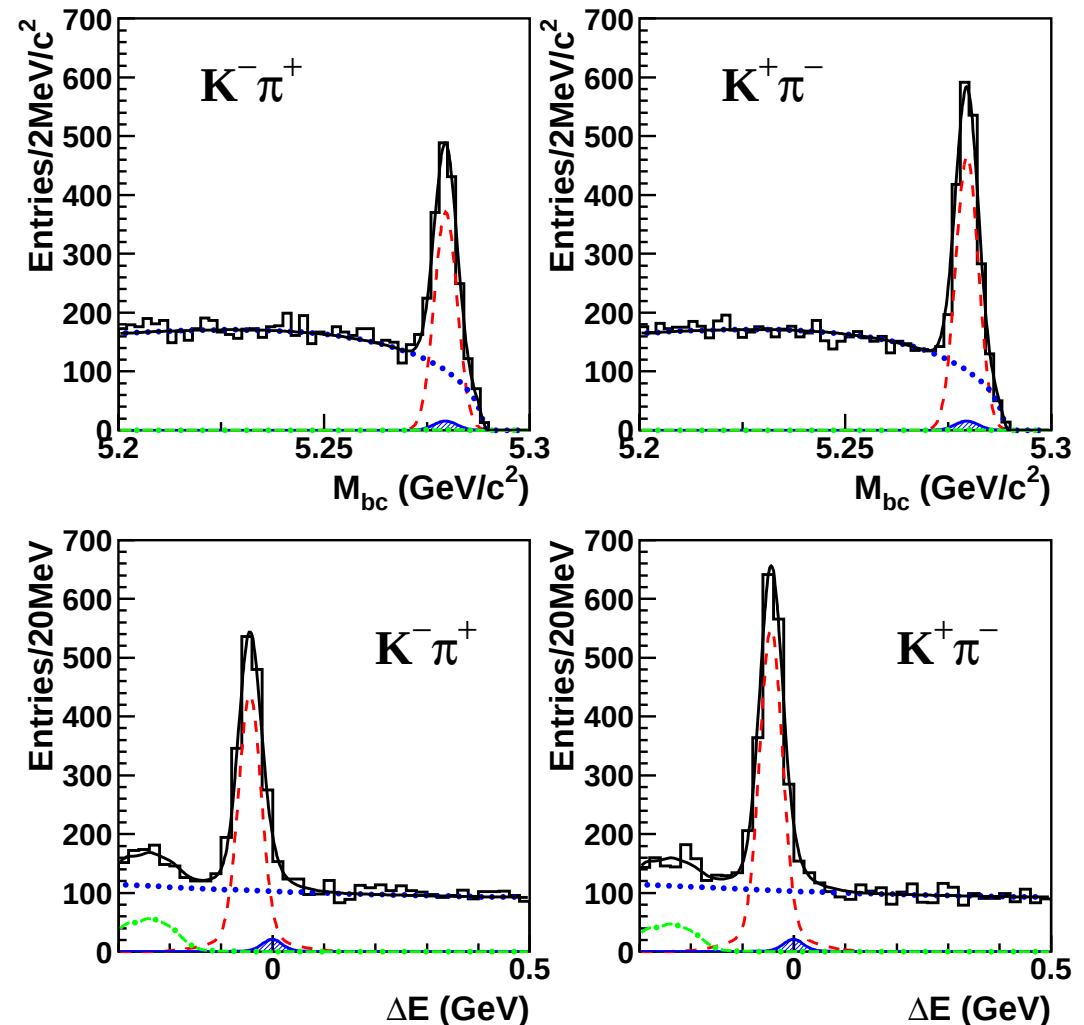
Asymetria barionowa

Łamanie CP w rozpadach B^0

Gdyby CP było ściśle zachowane, rozpady B^0 i $\bar{B}^0$ zachodziłyby tak samo...

W niektórych kanałach B^0 rozpada się szybciej niż $\bar{B}^0$.

Ale obserwowane różnice zbyt małe, żeby wytłumaczyć asymetrię barionową we Wszechświecie!



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 , ...