

Krystyna Wosińska

Wykład 3
Era Plancka
Cząstki elementarne

Era Plancka

10^{-44} s

Temperatura 10^{32} K

Dwie cząstki punktowe o masach równych masie Plancka i oddalone o długość Plancka:

grawitacyjna energia
potencjalna



$$\frac{GM_P^2}{l_P} = M_P c^2$$



energia relatywistyczna

Długość Plancka:

$$l_P = \frac{\hbar}{M_P c} = 1,66 \cdot 10^{-33} \text{ cm}$$

Masa Plancka:

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 1,22 \cdot 10^{19} \frac{\text{GeV}}{c^2}$$

zasada nieoznaczoności

Era Plancka

Aby opisać Wszechświat w erze Plancka, trzeba połączyć teorię grawitacji z mechaniką kwantową.

Mechanika kwantowa

Obiekty kwantowe (kwarki, atomy, ...) mogą istnieć w różnych stanach.

Przestrzenią tych stanów jest przestrzeń Hilberta

Przestrzeń Hilberta – liniowa przestrzeń wektorowa



Każdy wektor (stan układu) można przedstawić jako kombinację liniową innych wektorów.



Układ może znajdować się w superpozycji dwu lub więcej stanów

Świat mechaniki kwantowej jest światem probabilistycznym

Mechanika kwantowa

Obserwable – wielkości mierzalne (np. położenie, pęd)

Obserwabli odpowiada operator działający na przestrzeni Hilberta

$$A : \varphi \rightarrow \psi$$

Pomiar zaburza stan obiektu – ze stanu φ przeprowadza go w stan ψ

Działanie operatora A na wektor stanu φ opisuje równanie, którego rozwiązaniem są wartości własne (wyniki pomiaru)

Rozwiązania skwantowane – wyniki pomiarów mogą przybierać tylko wartości dyskretne

Teoria grawitacji

Równania pola grawitacyjnego **określające zakrzywienie czasoprzestrzeni są silnie nieliniowe**

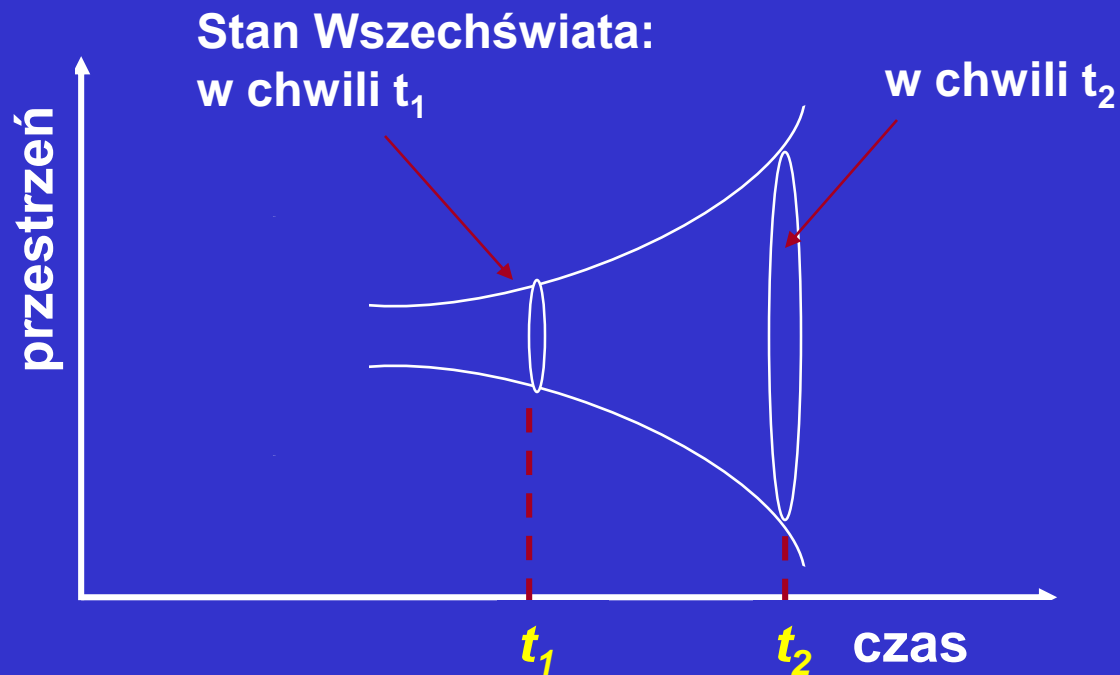


Pole dwu ciał nie jest sumą pól poszczególnych ciał

Próby skwantowania grawitacji

Geometrodynamika Wheeler

Stany Wszechświata
zakreślają krzywą w
przestrzeni wszystkich
możliwych stanów – w
superprzestrzeni.



DeWitt zaproponował, aby na superprzestrzeni
zdefiniować funkcje falowe

Wartość funkcji falowej w danym punkcie
superprzestrzeni, czyli w danym stanie Wszechświata
– prawdopodobieństwo urzeczywistnienia tego stanu.

Próby skwantowania grawitacji

Równanie Wheelera-DeWitta – równanie na funkcje falowe Wszechświata w superprzestrzeni.

Niespodzianka: funkcje falowe Wszechświata nie zależą w tym równaniu od czasu!

W kwantowo-grawitacyjnym reżimie czas nie może być zewnętrznym parametrem, który numeruje następujące po sobie stany.

Czas staje się elementem kwantowej gry – ma charakter probabilistyczny.

„Stany Wszechświata nie następują po sobie w sposób konieczny; istnieje jedynie określone prawdopodobieństwo układania się poszczególnych stanów w następujące po sobie ciągi. I dopiero przy przejściu przez próg Plancka prawdopodobieństwa dążą do jedności i wyłania się deterministyczna ewolucja z czasem jako zewnętrznym parametrem.”

Michał Heller, „Kosmologia kwantowa”

Próby skwantowania grawitacji

Michał Heller, „Początek jest wszędzie”

Podstawą opisu świata w erze Plancka – geometria nieprzemienne



**Nie dopuszcza pojęć lokalnych (miejsce
w przestrzeni, chwila w czasie)**

Era Plancka – czasowa i przestrzenna

Próby skwantowania grawitacji

Do poziomu fundamentalnego fizyk może dotrzeć dwiema drogami: albo cofając się w czasie ku początkowi Wszechświata – osiągnie on poziom fundamentalny, gdy mierzona przez niego gęstość materii przekroczy gęstość Plancka równą 10^{93} g/cm³; albo podążając w głąb materii do coraz mniejszych odległości przestrzennych – znajdzie się na poziomie fundamentalnym, gdy osiągnie odległość planckowską równą 10^{-33} cm. Jednak na poziomie fundamentalnym obowiązuje reżim nieprzemiennej – nie ma tam przestrzeni i czasu. Oba sposoby są zatem równoważne. W tym sensie można powiedzieć, że początek i koniec Wszechświata są zawsze i wszędzie. ■

Michał Heller, Świat Nauki, czerwiec 2002



Próby skwantowania grawitacji

Lee Smolin - Pętlowa grawitacja kwantowa

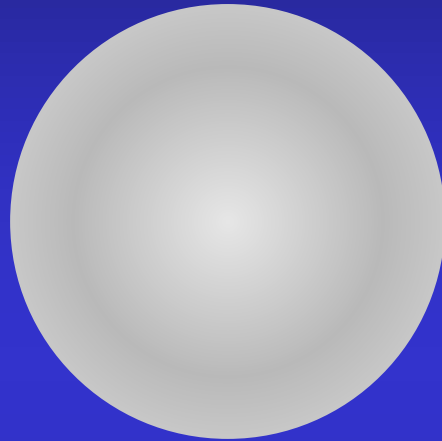


LUTY 2004 ŚWIAT NAUKI



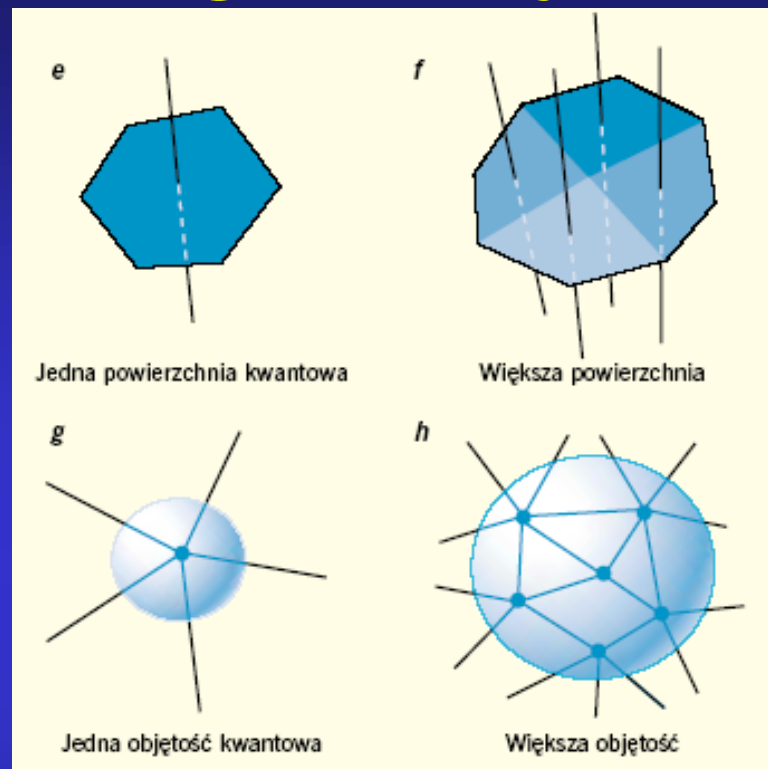
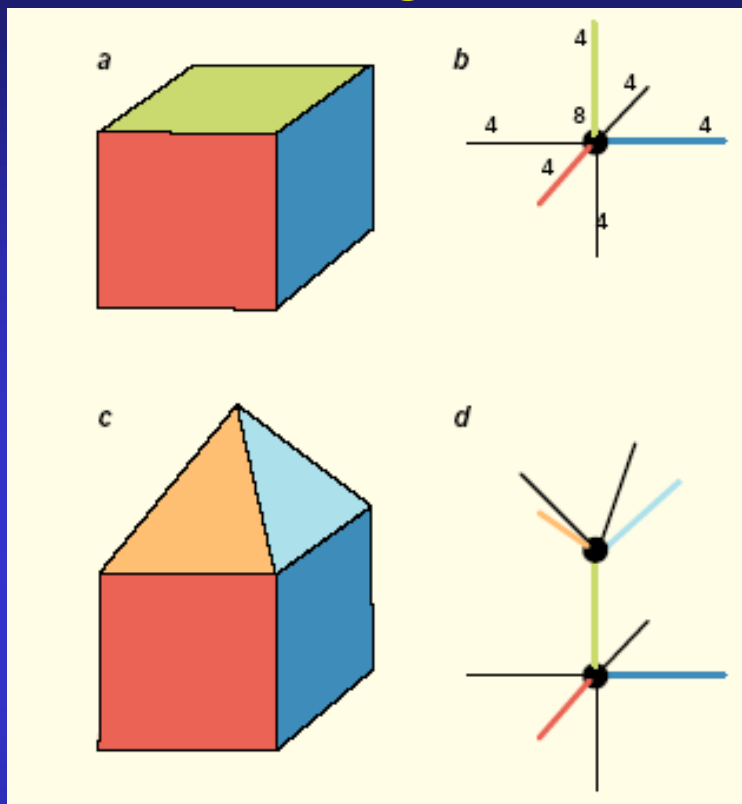
Próby skwantowania grawitacji

Kwantowe stany objętości i powierzchni



Fizyka klasyczna – objętość i powierzchnia dowolne
Pętlowa grawitacja kwantowa – istnieje najmniejsza objętość (10^{-99} cm – objętość Plancka) i najmniejsza powierzchnia (10^{-66} cm – powierzchnia Plancka) – objętość i powierzchnia skwantowane.

Próby skwantowania grawitacji



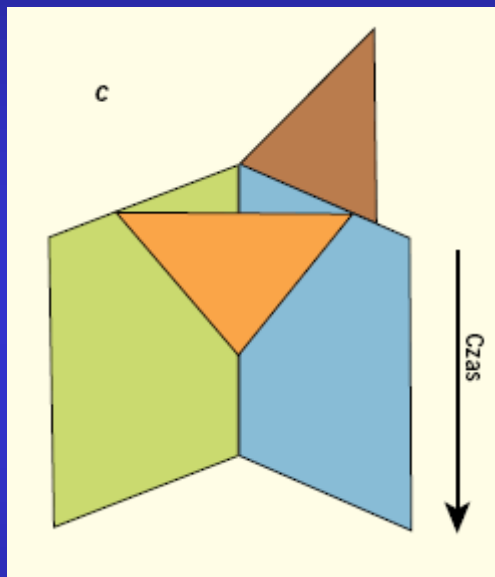
Węzeł - równoważny jednej objętości Plancka

Linia - równoważna jednostkowemu polu powierzchni Plancka

Cały Wszechświat to 10^{184} węzłów

Próby skwantowania grawitacji

Jeśli dodamy czwarty wymiar – **czas**, otrzymamy „pianę spinową”



Węzły przechodzą w linie, a linie w dwuwymiarowe powierzchnie.

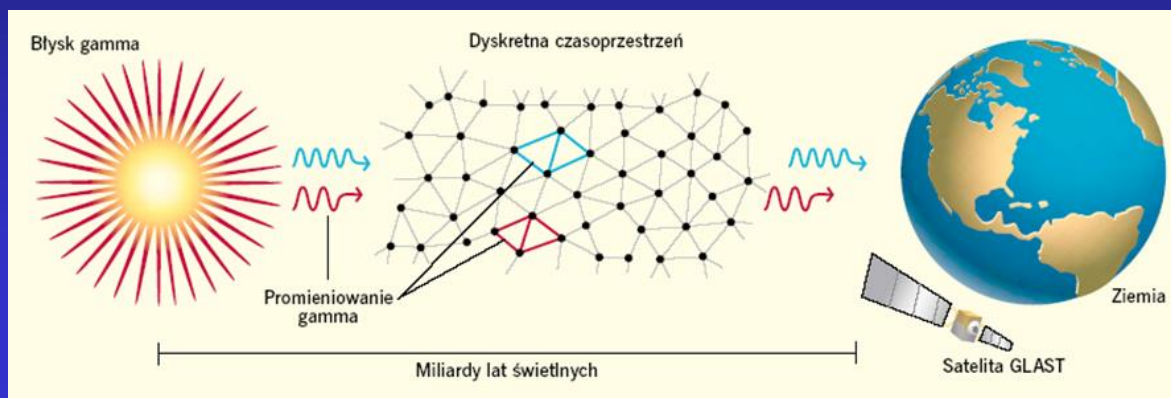
Czas wyznaczony przez ewolucje piany spinowej to seria skokowych zmian.

*Czas płynie jak tyknięcia
niezliczonych zegarów (co 10^{-43} s)*



Próby skwantowania grawitacji

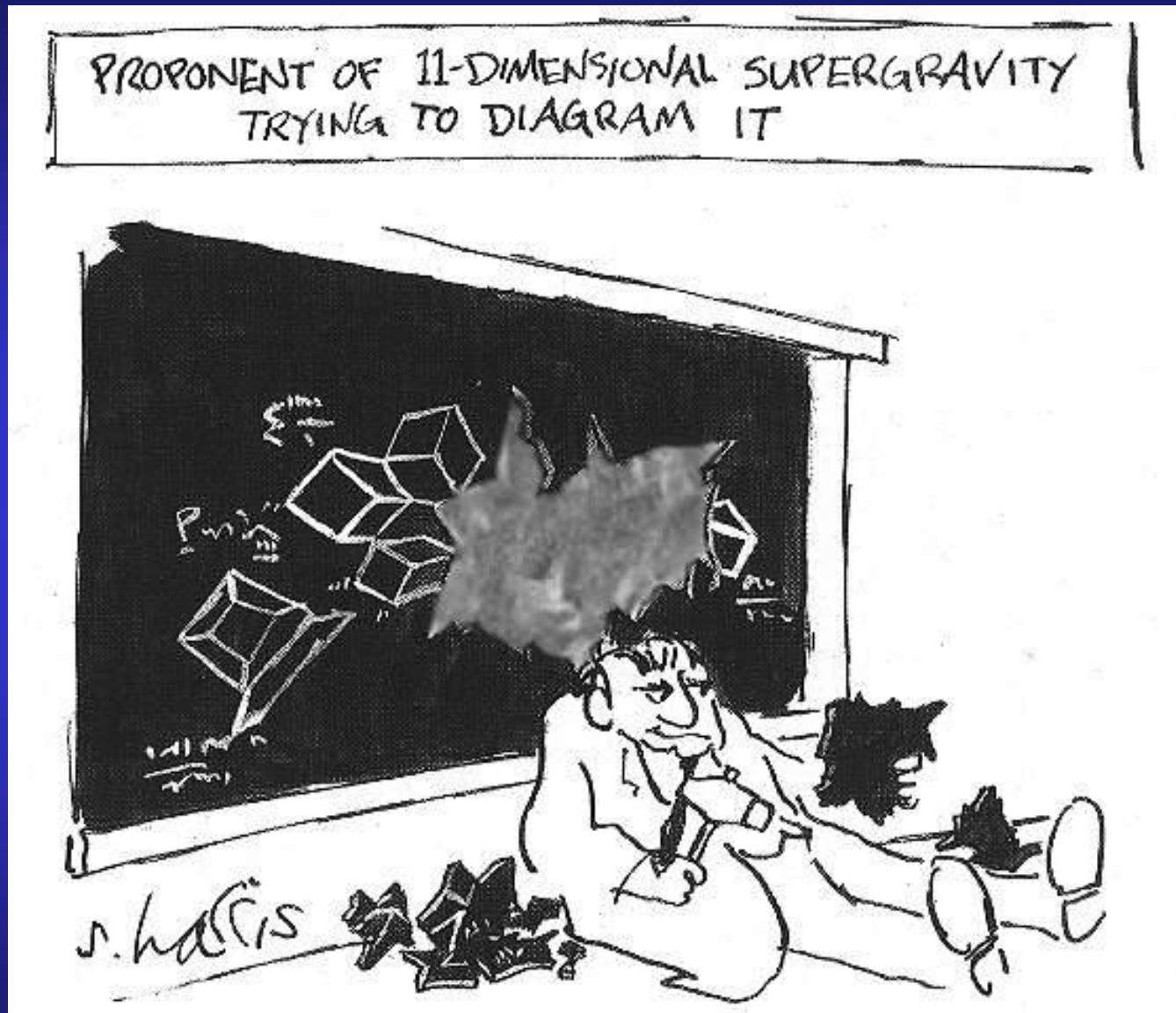
Weryfikacja empiryczna



Foton poruszający się w sieci spinowej w danej chwili obejmuje pewną liczbę linii. Dyskretna struktura czasoprzestrzeni sprawia, że kwanty o wyższej energii poruszają się szybciej.

Efekt zależności prędkości światła od długości fali proporcjonalny do stosunku długości Plancka do długości fali świetlnej (dla światła widzialnego $\sim 10^{-28}$)





Model Standardowy

Do chwili obecnej odkryto około dwieście cząstek (z których większość nie jest cząstkami elementarnymi).

Model Standardowy – teoria opisująca wszystkie cząstki i oddziaływania między nimi za pomocą:

- 6 kwarków
- 6 leptonów
- cząstek przenoszących oddziaływania

Każdej cząstce odpowiada antycząstka

Kwarki	u górnny up	c powabny charm	t prawdziwy top
	d dolny down	s dziwny strange	b piękny bottom
Leptony	ν_e neutrino elektronowe	ν_μ neutrino mionowe	ν_τ neutrino tau
	e elektron	μ mion	τ tau
			I II III
			Rodziny materii

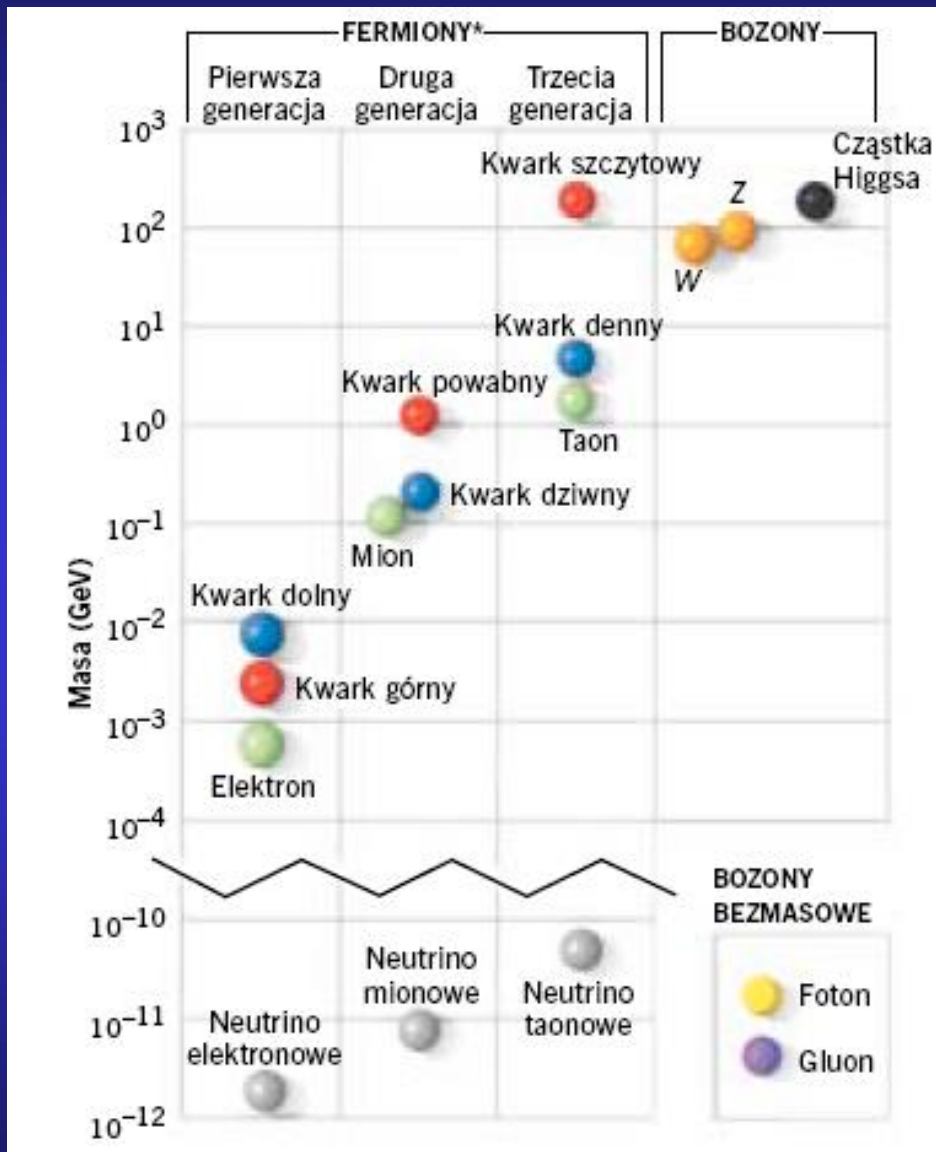
kwarki (spin = 1/2) i leptony (spin = 1/2)

aromat (<i>flavour</i>)	masa [MeV]	ładunek		lepton	masa [MeV]	ładunek
u – <i>up</i> górnny	1.5 ÷ 4.5	+2/3		e - elektron τ = ∞	0.511	-1
d – <i>down</i> dolny	5.0 ÷ 8.5	-1/3		ν - neutrino elektronowe	0 < 3.0·10⁻⁶	0
c – <i>charm</i> powabny	1.0 ÷ 1.4 · 10³	+2/3		μ - mion $\tau = 2.20 \cdot 10^{-6}$ s	105.7	-1
s – <i>strange</i> dziwny	80 ÷ 155	-1/3		ν_{μ} – neutrino mionowe	0 < 0.19	0
t – <i>top</i> wierzchni	174. · 10³	+2/3		τ - taon $\tau = 2.91 \cdot 10^{-13}$ s	1777.0	-1
b – <i>bottom</i> spodni	4.0 ÷ 4.5 · 10³	-1/3		ν_{τ} – neutrino taonowe	0 < 18.2	0

Cząstki z różnych rodzin
różnią się zapachem.

PPb 2002

Model Standardowy



Cząstka Higgsa

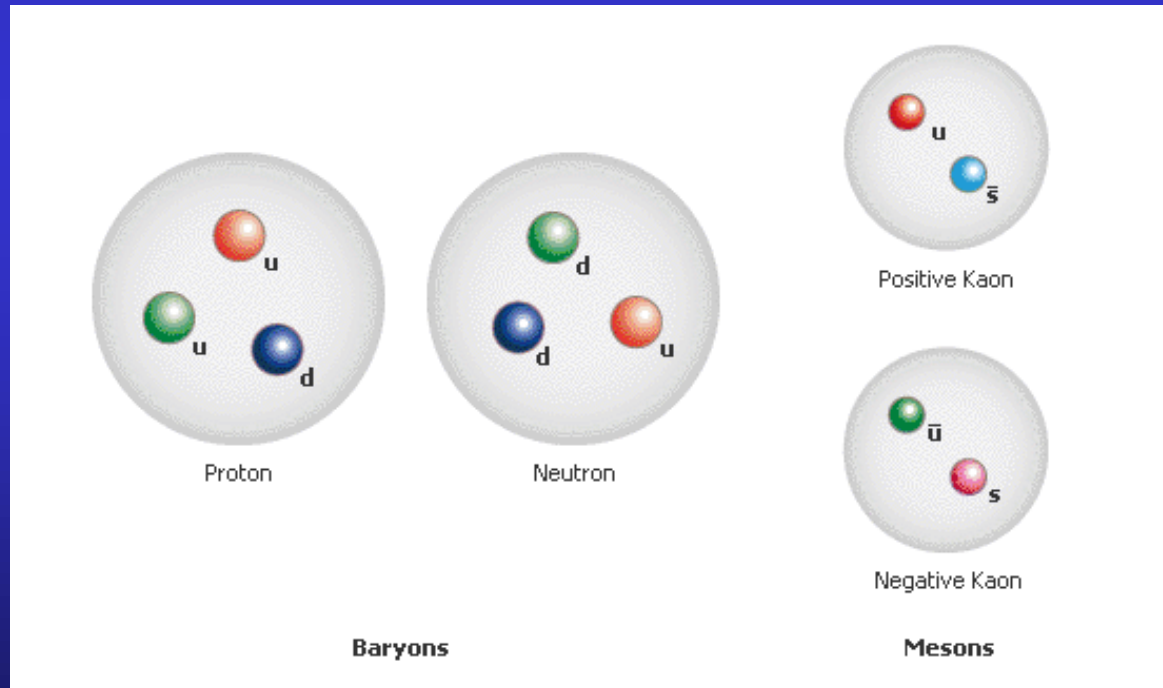
Aby wyjaśnić fenomen istnienia masy zakłada się istnienie pewnego kwantowego pola zwanego polem Higgsa, którego kwantem jest bozon Higgsa. Pole to powinno przenikać cały Wszechświat.

Oddziaływania z polem Higgsa nadają cząstkom masy.

Hadrony

Z kwarków zbudowane są hadrony:

- z trzech kwarków – bariony
- z kwarku i antykwarku - mezony



Bariony

Bariony qqq i antybariony $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Bariony są fermionowymi hadronami. Jest ich około 120 typów.					
Symbol	Nazwa	Skład kwarków	Ładunek elektr.	Masa GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0,938	1/2
\bar{p}	antyproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0,938	1/2
n	neutron	udd	0	0,940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1,116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1,672	3/2

Większość masy hadronu to energia wiązania kwarków.

$$u + u + d = \text{proton}$$

$$\text{masa: } 0,003 + 0,003 + 0,006 \neq 0,938$$

Masa hadronu



**Kupujemy 1 kg jabłek...
(masa protonu ≈ 1 GeV)**

**... a w domu z torby
wysypujemy 3 maleńkie
jabłuszka – tylko 12 g!
(masa kwarków $\approx 0,012$ GeV)**



Mezony

Mezony $q\bar{q}$					
Mezony są hadronami bozonowymi. Jest ich około 140 typów.					
Symbol	Nazwa	Skład kwarków	Ładunek elektr.	Masa GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0,140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0,494	0
ρ^+	ro	$u\bar{d}$	+1	0,770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5,279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2,980	0

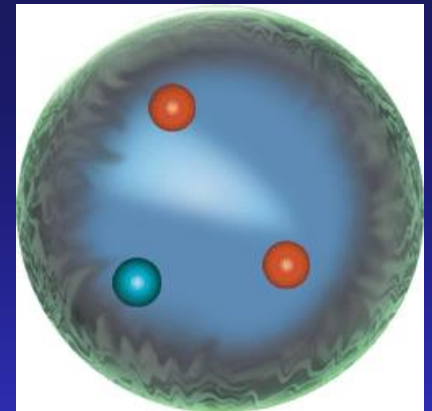
Leptony

Leptony = $(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$ + antycząstki
są fermionami oddziałującymi słabo,

Liczba leptonowa:

	L_e		L_μ		L_τ
e^-, ν_e	+1	μ^-, ν_μ	+1	τ^-, ν_τ	+1
$e^+, \bar{\nu}_e$	-1	$\mu^+, \bar{\nu}_\mu$	-1	$\tau^+, \bar{\nu}_\tau$	-1
inne	0	inne	0	inne	0

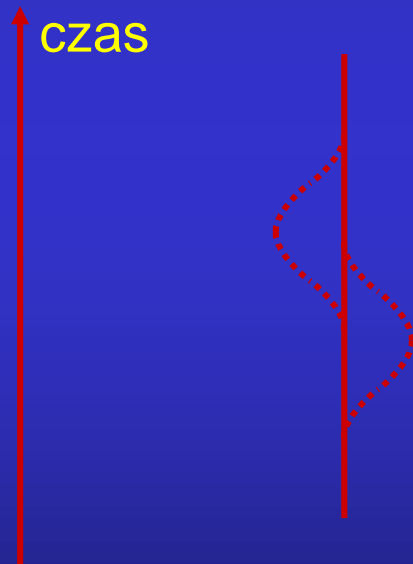
Oddziaływania



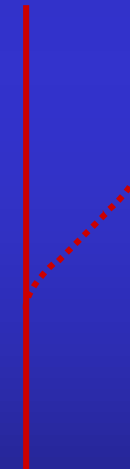
Wirtualne cząstki przenoszące oddziaływanie

Zasada nieoznaczoności:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$



1 cząstka wysyła i pochłania
cząstki wirtualne



1 cząstka wysyła, a 2 cząstka
pochłania cząstki wirtualne

Odziaływanie elektromagnetyczne

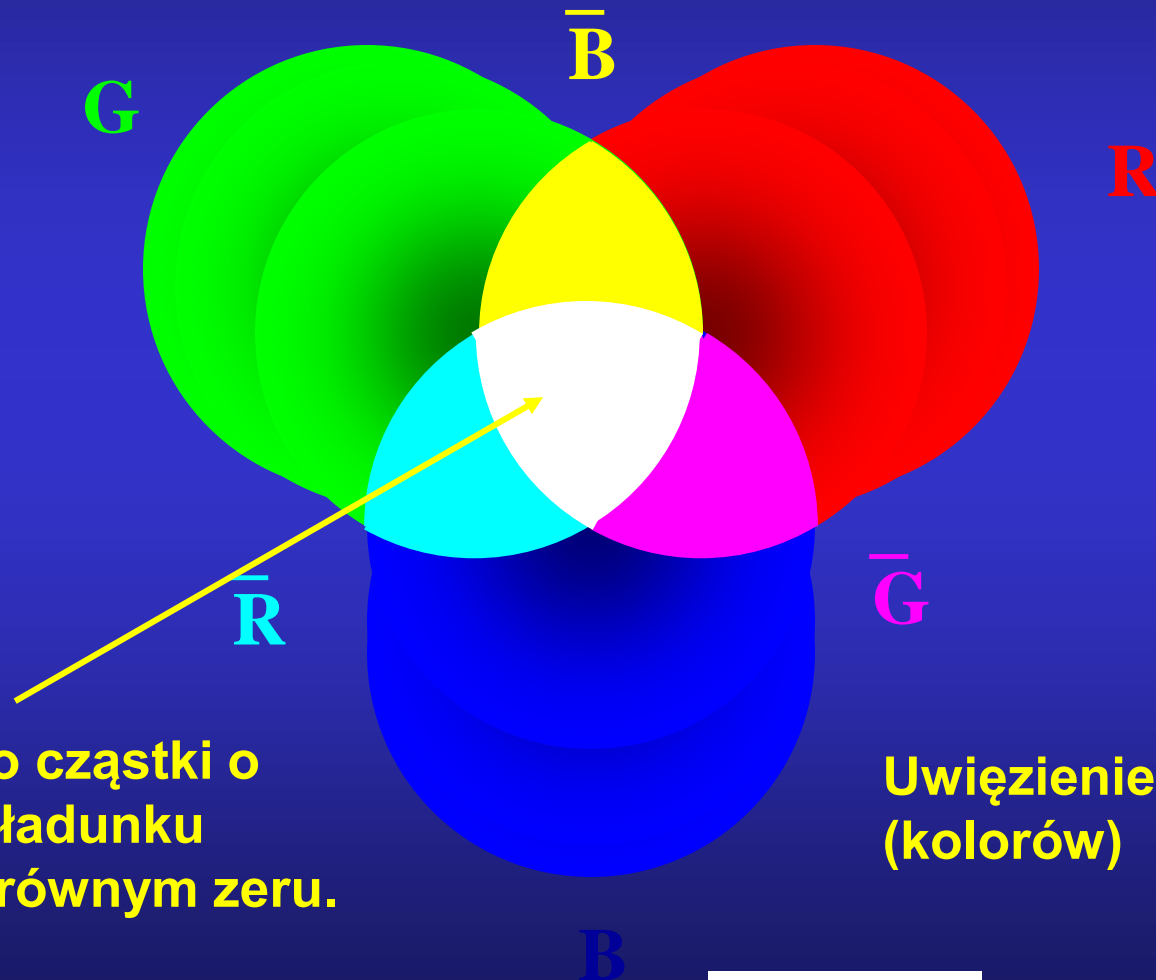
- Działa na ładunki elektryczne
- Odpowiedzialne za wiązania chemiczne
- Nośnik – foton (γ)
- Zasięg – nieskończony

Odziaływanie silne

- Działa na ładunki kolorowe
- Odpowiedzialne za wiązanie kwarków w barionach
- Nośniki – gluony
- Zasięg – 10^{-15} m (odległość typowa dla kwarków w nukleonie)

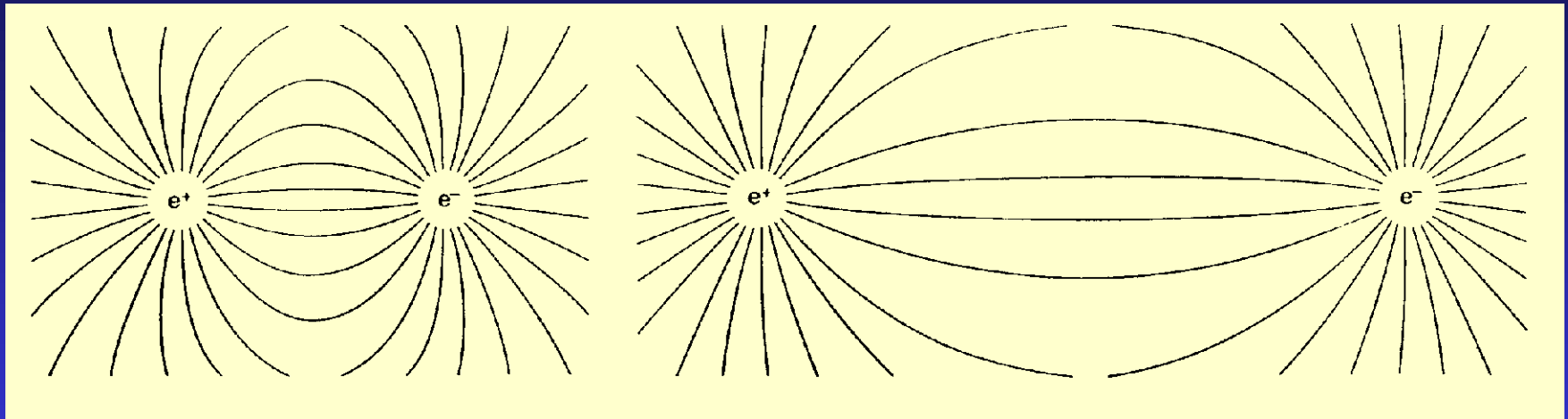
Odziaływanie silne

Kwarki mają ładunek kolorowy

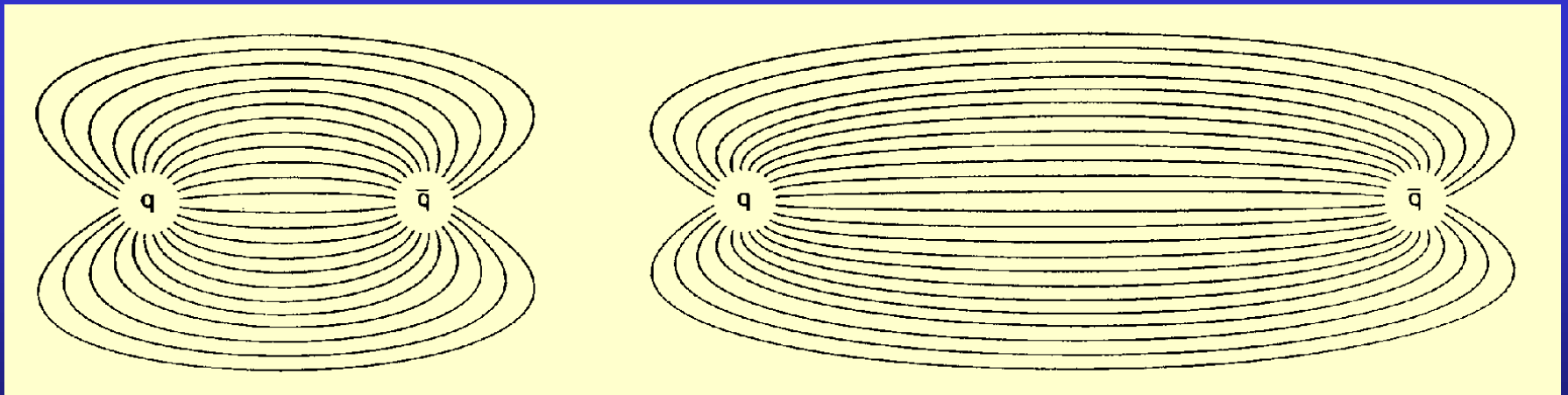


Istnieją tylko cząstki o całkowitym ładunku kolorowym równym zero.

Uwięzienie kwarków (kolorów)



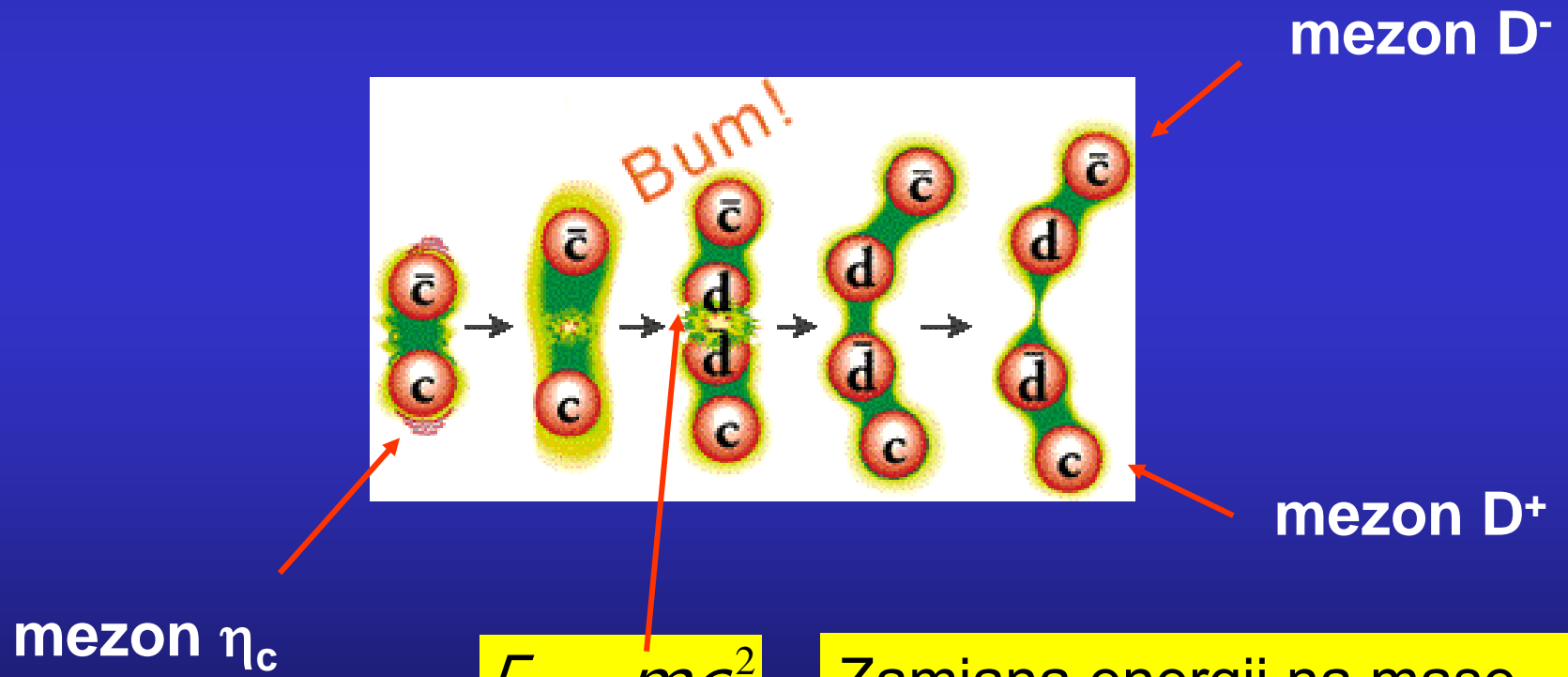
Oddziaływanie między elektronami maleje wraz z odległością



Oddziaływanie między kwarkami rośnie wraz z odległością

Uwięzienie kwarków

- Oddziaływanie między kwarkami rośnie wraz z odległością.
- Próba rozdzielenia kwarków prowadzi do wytworzenia nowej pary kwark-antykwar (jest to proces korzystniejszy energetycznie).



$$E = mc^2$$

Zamiana energii na masę

Oddziaływanie słabe

- Odpowiedzialne za rozpad ciężkich kwarków i leptonów na lżejsze kwarki i leptony (zmiana zapachu).
- Cząstki przenoszące oddziaływanie słabe to bozony: W^+ , W^- i Z^0 .

Masy W^+ , W^- i Z^0 duże (~ 80 GeV) \Leftrightarrow Zasięg mały

Oddziaływanie słabe i elektromagnetyczne opisuje
jednolita teoria oddziaływań elektroslabych.

Oddziaływania elektroslabe

Małe odległości (10^{-18} m) \Leftrightarrow wielkie energie



Oddziaływania słabe i elektromagnetyczne
porównywalne.

Większe odległości ($3 \cdot 10^{-17}$ m)



Oddziaływanie słabe jest 10^4 razy mniejsze niż
elektromagnetyczne

Oddziaływanie grawitacyjne

- Działa na każde ciało
- Odpowiedzialne za istnienie planet, gwiazd, galaktyk...
- Nośnik (hipotetyczny) – grawiton?
- Zasięg – nieskończony

Brak teorii, która wiąże oddziaływanie grawitacyjne z innymi rodzajami oddziaływań – jeden z głównych nierozwiązanych problemów kosmologii.

Oddziaływania

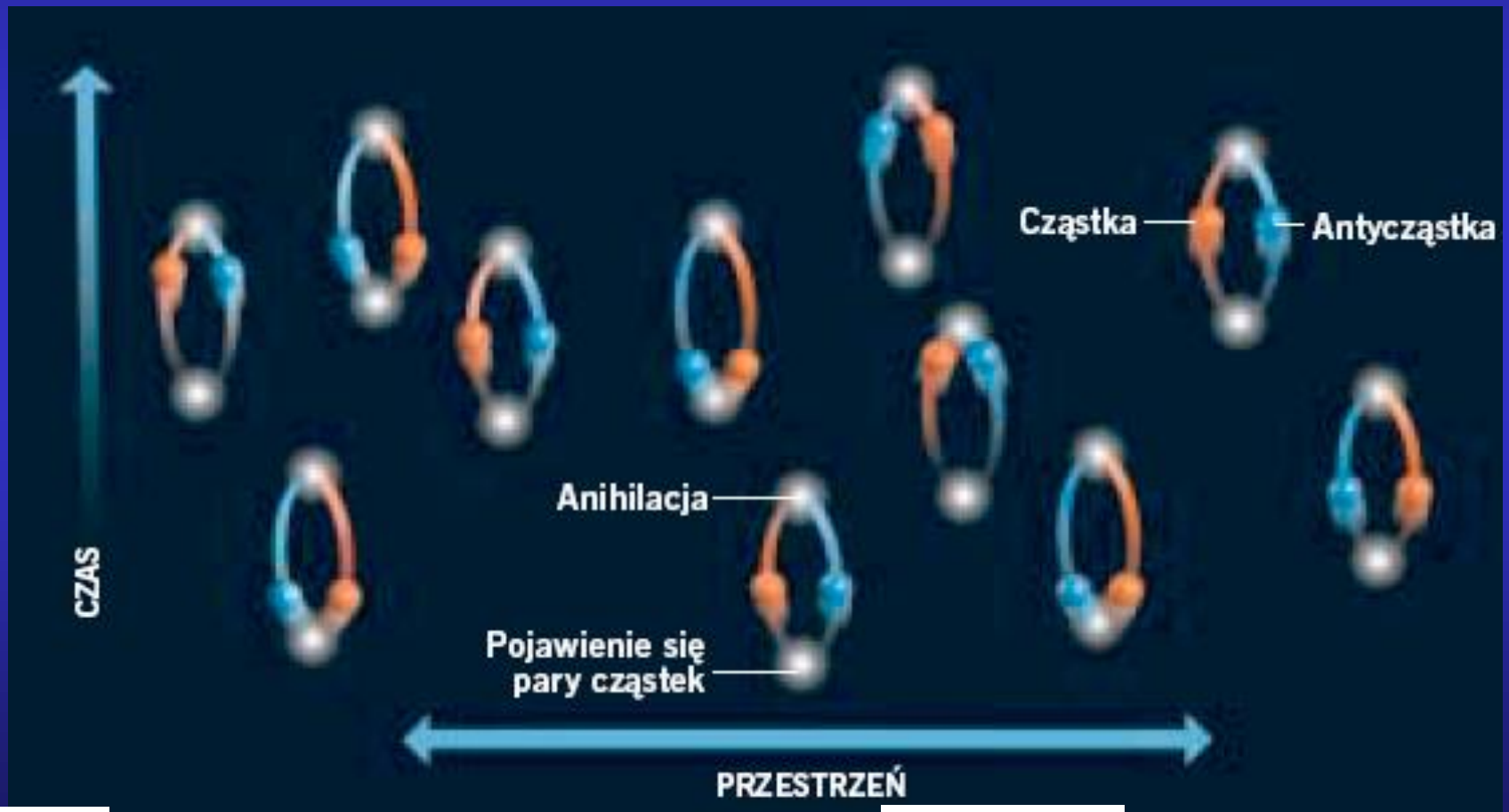
grawit.	elektrosłabe			silne (kolorowe)		
		masa [GeV]	ładunek		masa [GeV]	ładunek
grawiton (?)	γ	0	0	g - gluon	0	0
	W^+	80.4	+1			
	W^-	80.4	-1			
	Z^0	91.2	0			
	superoktet SU(3) 8 stanów koloru					

Literatura:

- <http://chall.ifj.edu.pl/przygodazczastkami/frameless/index.html>
- <http://www.wiw.pl/fizyka/boskaczastka/>
- L. Lederman „Boska cząstka”

Model Standardowy

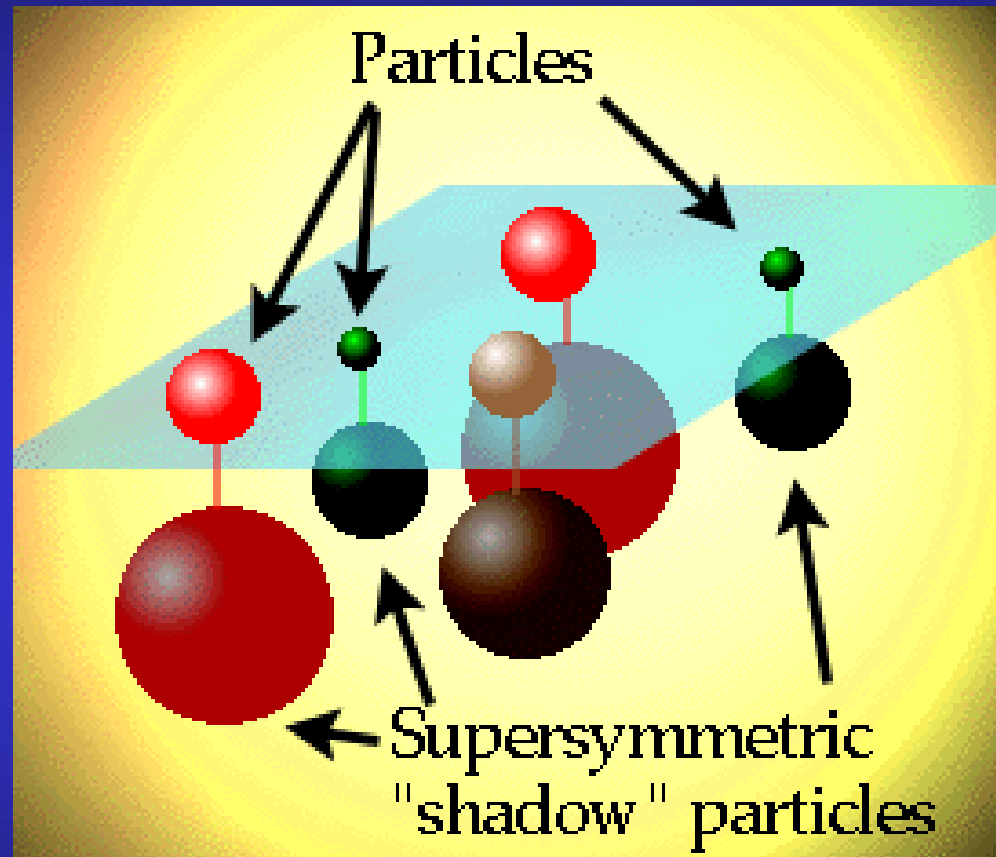
Model standardowy **doskonale wyjaśnia**
praktycznie wszystkie dane doświadczalne.



Supersymetria

Cząstki supersymetryczne :

- stabilne
- masywne
- ładunek równy 0



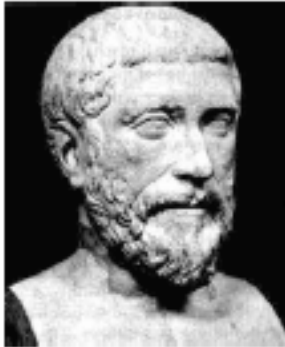
Weakly Interacting Massive Particle

Supersymetria

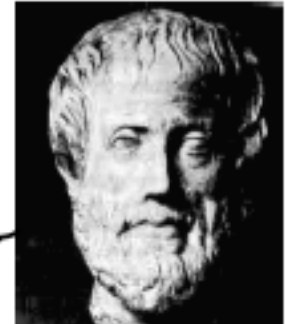
Cząstka	Spin	S-cząstka	Spin
kwark Q	1/2	skwark \tilde{Q}	0
lepton l	1/2	slepton \tilde{l}	0
foton γ	1	fotino $\tilde{\gamma}$	1/2
gluon G	1	gluino \tilde{G}	1/2
W^\pm	1	wino \tilde{W}^\pm	1/2
Z^0	1	zino \tilde{Z}^0	1/2



Philosophers on Supersymmetry

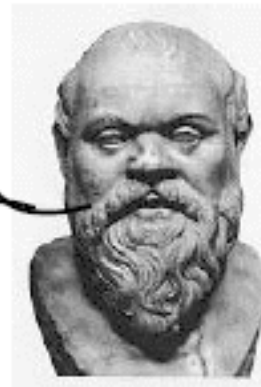


Each **fermion** has
corresponding **boson**
and vice versa.



Each **discovered** particle
has **undiscovered**
supersymmetric partner.

Each **existing** particle
has **nonexistent**
supersymmetric partner.



No supersymmetric
particle have been
discovered so far.

Half of all particles predicted
by supersymmetry have been
already discovered.



Grzegorz Wrochna

Supersymetria

Cząstki supersymetryczne mogą być składnikiem ciemnej materii.

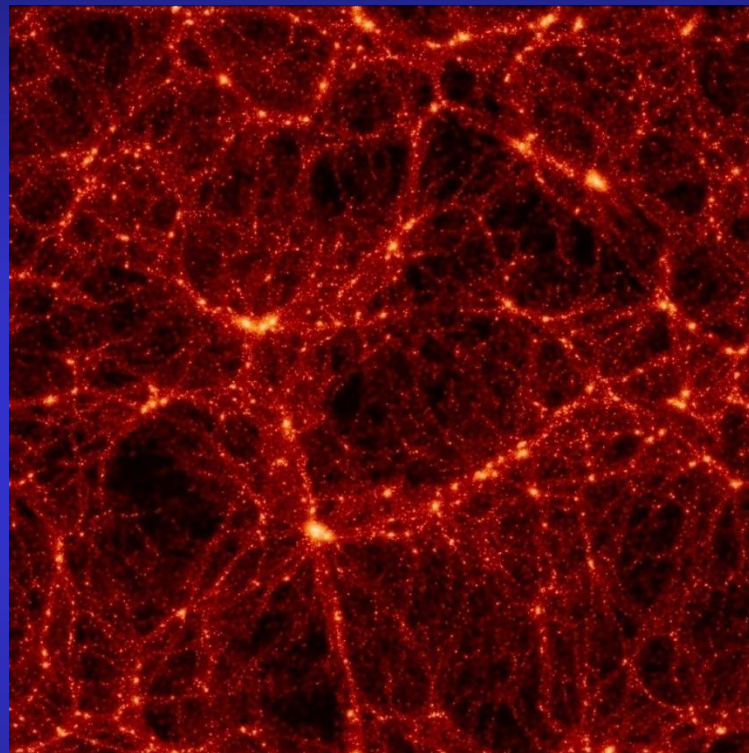
Duża masa



Nierelatywistyczne prędkości



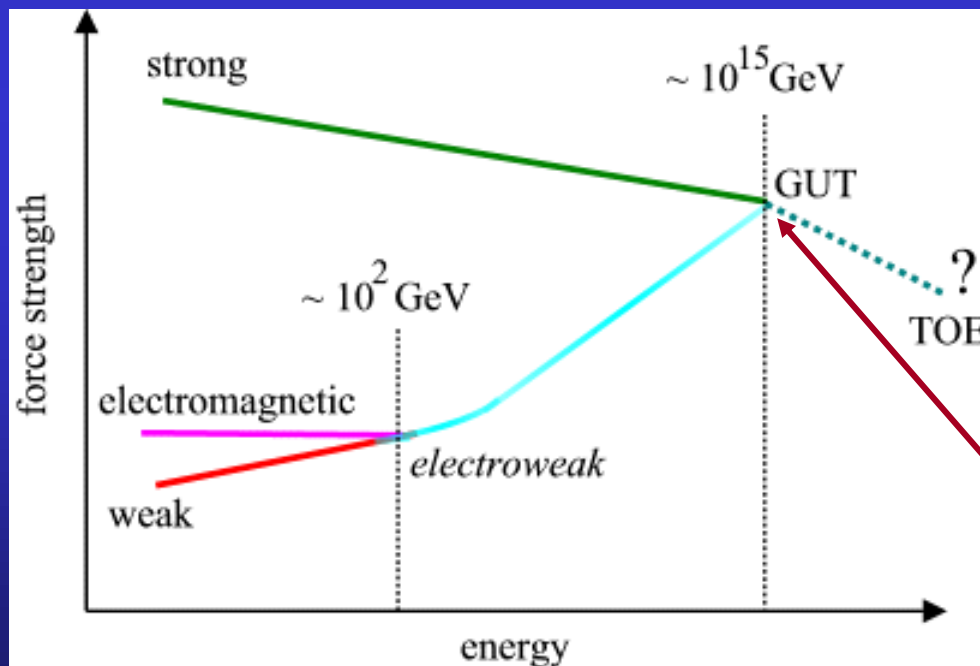
Oddziaływanie grawitacyjne



Symulacje wykorzystujące oczekiwane własności cząstek supersymetrycznych dają „wirtualne wszechświaty” podobne do realnego Wszechświata (przeгляд galaktyk, promieniowanie relikto we)

Unifikacja oddziaływań

Przy wielkich energiach oddziaływania słabe i elektromagnetyczne są porównywalne – oddziaływania elektroslabe.



Jeszcze większe energie → zrównanie oddziaływań elektroslabych i silnych

TOE – **Theory Of Everything** nie istnieje!

GUT – **Grand Unified Theory** nie potwierdzona doświadczalnie!

Teoria Wielkiej Unifikacji

GUT – Grand Unified Theory

Tuż po **erze Plancka** przy temperaturach powyżej 10^{28} K ($E_{\text{GUT}} = 10^{16}$ GeV) Wszechświat wypełniała mieszanina kwarków, leptonów oraz cząstek przenoszących oddziaływania — fotonów, bozonów W i Z oraz gluonów.

Nierozróżnialne oddziaływania (nośniki) są w równowadze z materią i antymaterią.

Przykład: $W^+W^- \leftrightarrow q\bar{q}$

Oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne są nierozróżnialne.

GUT wymaga istnienia dodatkowych nośników oddziaływań – 12 bozonów (i antybozonów) X (\bar{X})

Problemy do wyjaśnienia...

Cząstki i antycząstki pojawiają się i anihilują zawsze parami. Obowiązuje prawo zachowania liczby barionowej i leptonowej.

Dlaczego więc we Wszechświecie nie ma równej ilości materii i antymaterii?

Drugim ważnym faktem obserwacyjnym jest dramatyczna przewaga ilości fotonów (tła relikтового) nad ilością barionów $\eta = n_b/n_\gamma \leq 10^{-9}$

Jak to wytłumaczyć?

Bozony X

- Ładunek = $\pm 1/3$ i $\pm 4/3$
- Ładunek kolorowy R, G, B *Leptokwarki*
- Ładunek leptonowy
- Masa $\approx 10^{16}$ GeV

Bozony X w oddziaływaniach z kwarkami (q) i leptonami (l) mogą powodować przemiany kwarku w antykwark (i odwrotnie) oraz kwarku w lepton (i odwrotnie).

"Przy temperaturach GUT (10^{28} K) symetria i prostota osiągają poziom, na którym istnieje tylko jeden rodzaj materii (lepto-kwark?) i jedno oddziaływanie z całym wachlarzem cząstek-nośników oraz... no tak, dynda tam jeszcze z boku grawitacja." - Leon Lederman

Leptoquark Centauros

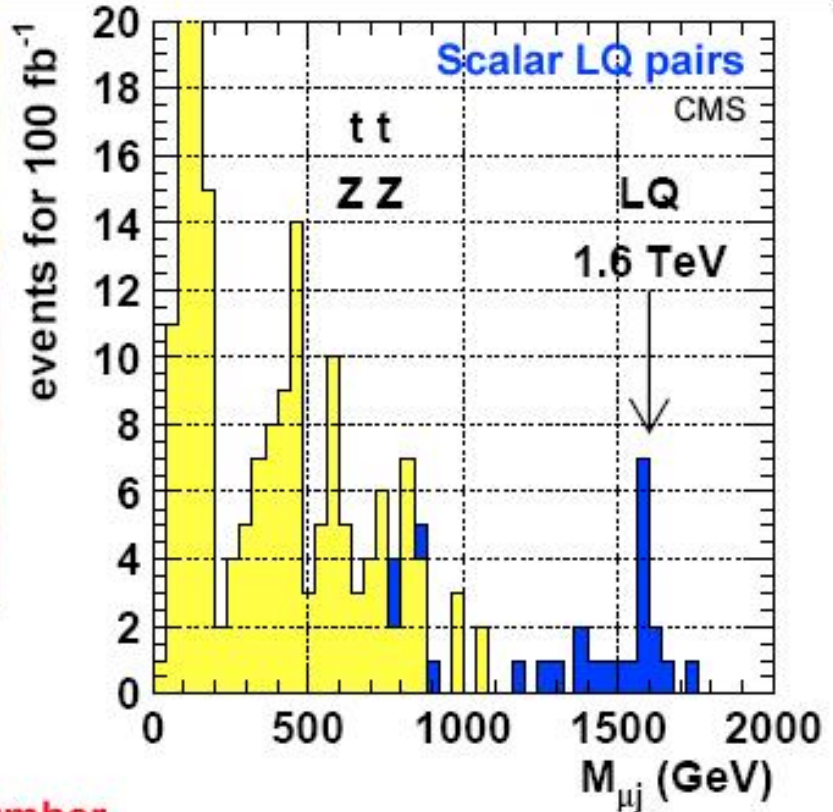


LQ are half lepton, half quark hybrids, appearing in models with symmetry of leptons & quarks.

They carry both leptonic & barionic number.

Production: $qq \rightarrow LQ LQ$, $qg \rightarrow LQ$ Decay: $LQ \rightarrow l q$

LQ can be discovered at LHC up to $M_{LQ} \sim 1.6$ GeV.



Bozony X

Rozpady bozonów X:

$$X \rightarrow \bar{q} + \bar{q}$$

$$\bar{X} \rightarrow q + q$$

$$X \rightarrow q + l$$

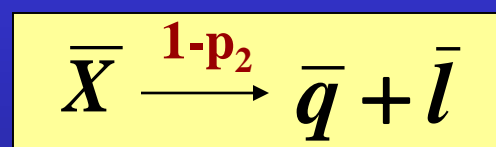
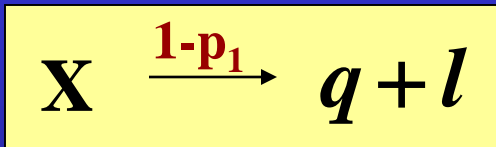
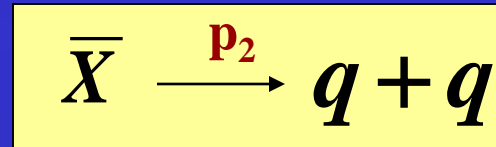
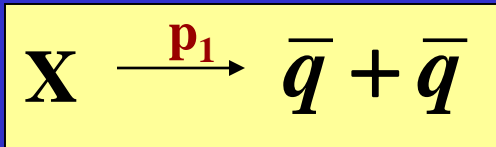
$$\bar{X} \rightarrow \bar{q} + \bar{l}$$

Bozony X

Przy temperaturach $T > 10^{28}$ K pary $X + \text{anty-X}$ powstają i anihilują zupełnie symetrycznie.

Gdy jednak temperatura spada poniżej 10^{27} K, kreacja i anihilacja par staje się coraz mniej prawdopodobna, wzrasta zaś szansa spontanicznego rozpadu.

Prawdopodobieństwa różnych kanałów rozpadów mogą być różne:

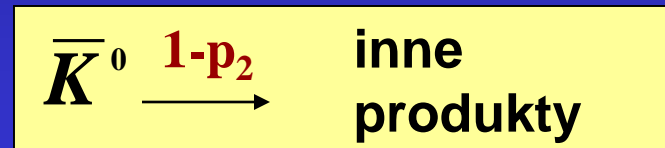
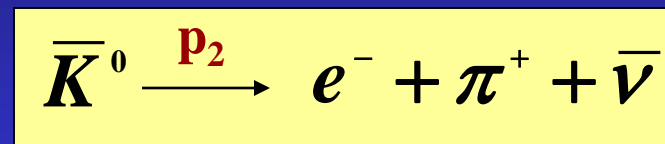
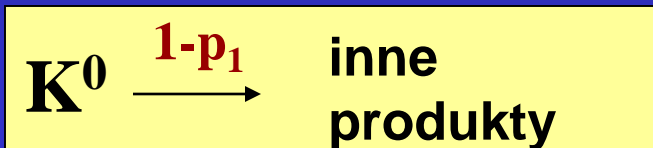
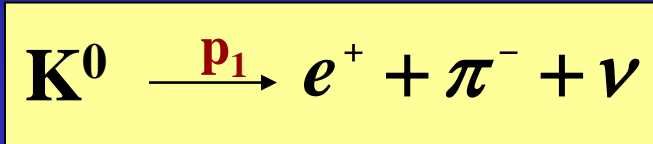


Jeśli $p_1 = p_2$, to po rozpadach pozostaną równe liczby kwarków i antykwarków oraz leptonów i antyleptonów.

Jeśli $p_1 \neq p_2$, to pozostanie pewna nadwyżka materii nad antymaterią.

Bozony X

Przykład: rozpad mezonu K^0



Z pomiarów wynika że, p_1 i p_2 różnią się o 0.007

Analogiczna różnica p_1 i p_2 dla bozonów X rzędu 10^{-9} wystarczy do wyjaśnienia obserwowanego obecnie stosunku liczby barionów do fotonów we Wszechświecie.

Jak wielka była nadwyżka materii nad antymaterią?



Na 30 mln antykwarków przypadało (30 mln + 1) kwarków

Czas życia protonu

Konsekwencją GUT jest
nietrwałość protonu.



Rozpad p na neutralny pion
i pozyton w czasie $\approx 10^{30}$ lat
Wiek Wszechświata $\approx 10^{10}$ lat

Prawdopodobieństwo rozpadu
jednego protonu w ciągu roku
wynosi 10^{-30} .

Zamiast tego możemy obserwować wiele protonów.

W 10 000 ton wody - około 10^{33} protonów

W ciągu roku około tysiąca protonów powinno ulec
rozpadowi.

Czas życia protonu

Eksperymenty, które mają wykryć rozpad protonu odbywają się w podziemnych laboratoriach (promieniowanie kosmiczne)

- **W kopalni soli położonej pod dnem jeziora Erie, w stanie Ohio,**
- **w tunelu pod Mt. Blanc**
- **w kopalni Kamioka: KAMIOKA Nukleon Decay Experiment (KAMIOKANDE)**

Ogromne, przezroczyste pojemniki z czystą wodą – około 10 000 ton wody.

Wodny sześcian o boku długości 23 metrów otoczony bardzo czułymi fotopowielaczami

Wynik: nie zaobserwowano rozpadu protonu!

Wniosek: czas życia protonu $> 10^{32}$ lat

Przy okazji zarejestrowano neutrino z wybuchu supernowej w 1987 r.