Łamanie parzystości CP i Supersymetria

XII

- Antymateria
- Asymetria barionowa
- Łamanie C oraz P.
- Łamanie parzystości CP
- Układ kaonów neutralnych.
- Mezony B.
- Poza Modelem Standardowym.
- Supersymetria.
- Ciemna energia.

Gdzie (i po co) szukać antymaterii?

- Otaczający świat zbudowany jest z dwóch kwarków i dwóch leptonów..
- Aż do lat 30-tych XX wieku jedynie CZĄSTKI stanowiły materię.
- ANTYCZĄSTKI nie były częścią żadnej teorii (oddz. elektrycznych i magnetycznych), nie zostały również zarejestrowane.

- Relatywistyczny związek pomiędzy energią, pędem i masą spoczynkową cząstki:

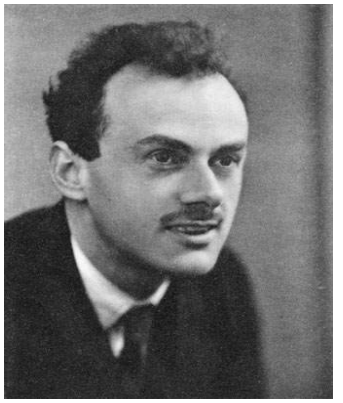
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

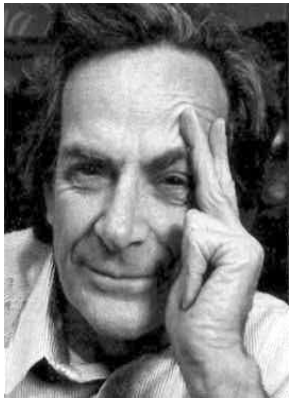
prowadzi do (klasycznie nonsensownych) rozwiązań z **UJEMNĄ** całkowitą energią:

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

Przepis na antycząstkę

- Interpretacja rozwiązań z ujemną energią wprowadzona została przez P. Diraca (1928) i uzupełniona przez R. Feynmana (diagramy).





- Według teorii kwantowej, cząstka (np. poruszająca się w dodatnim kierunku osi x, o pędzie p) opisywana jest jako fala:

$$\Psi = A\, e^{-i(Et-px)/\hbar}$$

ta sama zależność opisuje cząstkę o ujemnej energii -E, pędzie -p, poruszającą się do tyłu w czasie!

- Czyli ujemnie naładowane elektrony (antycząstki) cofające się w czasie, o ujemnej energii, są równoważne zwykłym elektronom.

ANTYCZĄSTKI

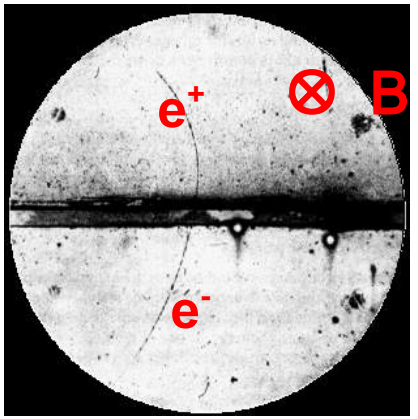
identyczna jak cząstka poza ładunkiem i momentem magnetycznym.

Pierwsza antycząstka (z prom.kosmicznego) – pozyton odkryta została w roku 1932 .

1955 – antyproton,

1965 – antyneutron,

1995 – w CERN wyprodukowano antyatom.



Jak TO się zaczęło?

W latach 30-tych powstawały również pierwsze teorie dotyczące powstania Wszechświata.

Nasz początek opisywany jest przez teorię Wielkiego Wybuchu:

- Wszechświat powstał prawie 14 mld temu z osobliwie gęstego i gorącego (10^{32} K) 10-wymiarowego obiektu, istniała pełna symetria i jedno oddziaływanie,
- Inflacja – gwałtowny wzrost objętości Wszechświata (10^{78} krotny) i stygnięcie.
- Faza gorącego Wszechświata – stan równowagi pomiędzy cząstkami, antycząstkami i fotonami, tyle samo cząstek znika, co jest produkowanych.
- Po 10^{-34} s zaczynają różnicować się oddziaływania. Większość par już tylko anihiluje (mała energia).
- Po 10^{-7} s pozostała niewielka nadwyżka protonów i neutronów. $\frac{\overline{B}}{B} < 10^{-15}$

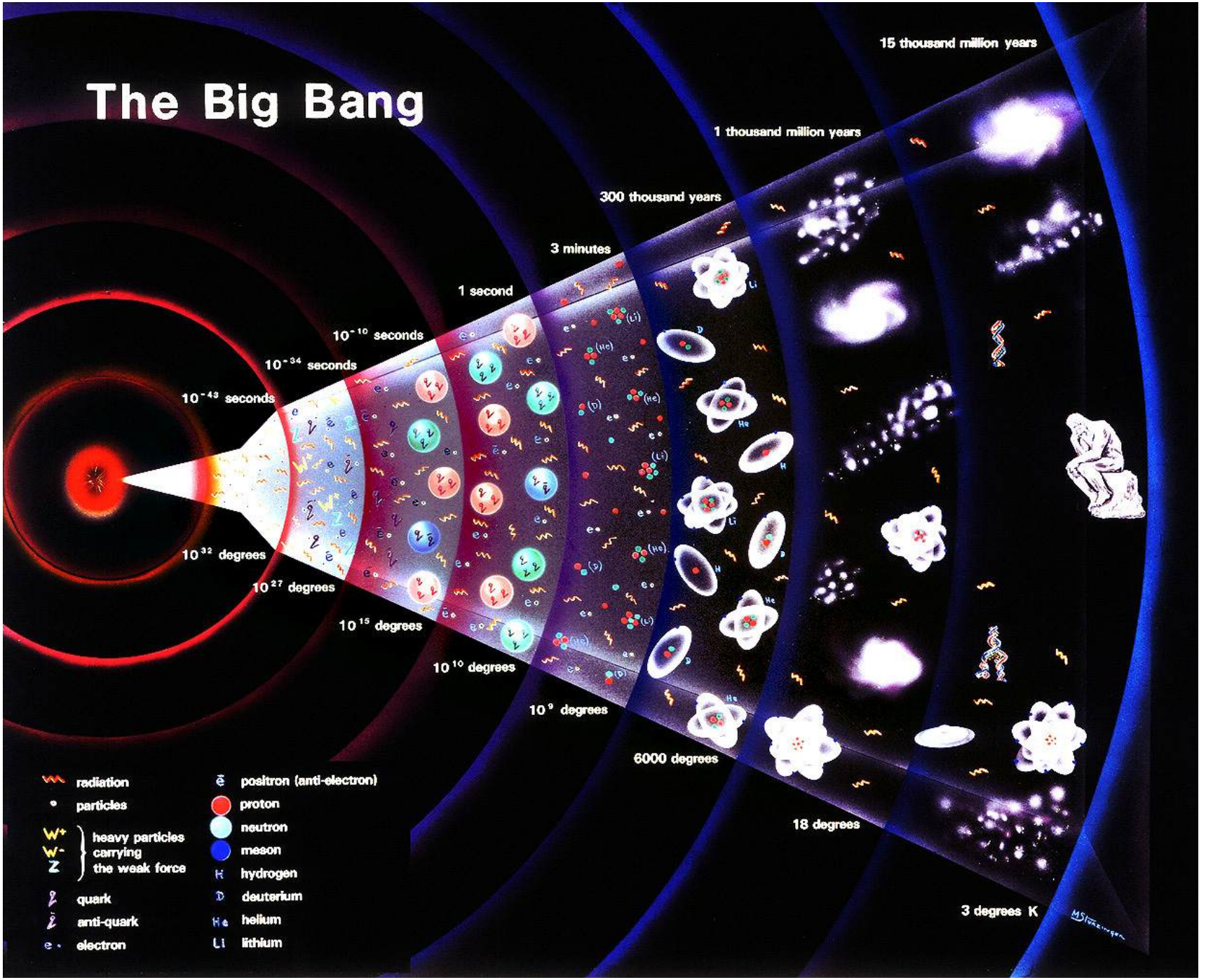
Bariogeneza – proces, w którym powstały nukleony.

Problem – jaki proces spowodował, że z początkowo idealnie symetrycznego stanu Wszechświata powstał układ złożony tylko z cząstek?

We wczesnym Wszechświecie istniała taka sama ilość barionów i antybarionów.

Teoria i doświadczenie wymagają, aby materia występowała jako cząstka-antycząstka.
W modelu wczesnego Wszechświata cząstki powstają i znikają parami.

Obecnie istnieje tylko materia, dominacja barionów. $B_W > 0$


The Big Bang
15 thousand million years
1 thousand million years
300 thousand years
3 minutes
1 second
10^{-10} seconds
10^{-34} seconds
10^{-43} seconds
10^{32} degrees
10^{27} degrees
10^{15} degrees
10^{10} degrees
10^{9} degrees
6000 degrees
18 degrees
3 degrees K
radiation
particles
W+ W- Z heavy particles carrying the weak force
quark
anti-quark
e- electron
positron (anti-electron)
proton
neutron
meson
H hydrogen
D deuterium
He helium
Li lithium

Bariogeneza

- Do wytłumaczenia, dlaczego obecnie we Wszechświecie dominuje materia, wystarczające jest, aby na miliard par cząstka-antycząstka pozostała jedna dodatkowa cząstka.
- Czy wynika to z samego procesu kreacji (nie znamy samego początku), czy jest być skutkiem fundamentalnych praw natury (które ciągle odkrywamy)?
- Nie stwierdzono obecności antymaterii, ani w przestrzeni kosmicznej, ani na Ziemi. Jedynie niewielkie ilości antycząstek rejestruje się z wtórnego oddziaływania promieniowania kosmicznego oraz w laboratoriach. $p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \ldots\ldots$ $\rightarrow \gamma + \gamma$

W 1967 roku A.Saharow określił trzy warunki konieczne do wyjaśnienia asymetrii materii:

- → liczba barionów zmienia się (rozpad protonu – nie obserwowany, $\tau > 10^{35}$ lat),
- → istnieje proces, który preferuje materię i działa destrukcyjnie na antymaterię (łamanie parzystości kombinowanej CP),
- → jesteśmy w stanie nierównowagi termodynamicznej

Warunki, jakie panowały we wczesnym Wszechświecie moga być odtworzone w laboratoriach HEP.

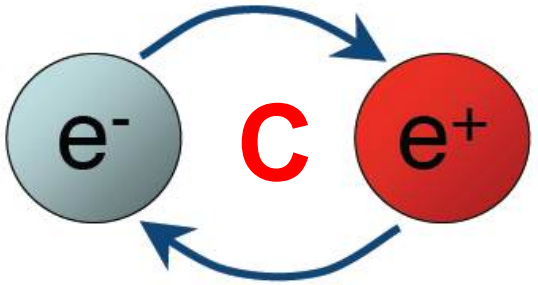
Parzystość C

- Zdefiniujmy najpierw własności cząstek i antycząstek:

  Cząstka: ładunek q, masa m, spin s, pęd p, moment pędu L.

  Antycząstka: ładunek -q, masa m, spin s, pęd p, moment pędu L.

- Określmy operator C sprzężenia ładunkowego (zamiana cząstka-antycząstka), jego działanie polega na zmianie znaku ładunku i momentu magnetycznego na przeciwny:



$$C \quad p \rightarrow \bar{p}$$

$$C \quad \gamma \rightarrow \gamma$$

- Neutralne cząstki π^0, γ, będące swoimi antycząstkami mają określoną parzystość C=±1, naładowane – nie są stanami własnymi operatora C.

Oddziaływania elektromagnetyczne i silne są niezmiennicze względem symetrii C, co oznacza, że procesy te zachodzą tak samo często dla cząstek, jak i antycząstek.

Parzystość P

- Transformacja dyskretna polegająca na inwersji układu współrzędnych. Wektory zmieniają znak, pseudowektory (s, L) - nie.

$$\vec{r} \xrightarrow{P} -\vec{r} \qquad \vec{L} \xrightarrow{P} \vec{L}$$

$$\vec{p} \xrightarrow{P} -\vec{p}$$

- Parzystość fermionu przypisywana jest w sposób umowny, ale parzystości fermionu i antyfermionu są przeciwne (Dirac).
- Parzystość mezonu jest równa parzystości poszczególnych kwarków i zależy od ich względnego momentu pędu.
- W badaniach nad łamaniem P określa się **SKRĘTNOŚĆ**:

$$\lambda = \frac{\vec{p}\cdot\vec{s}}{|\vec{p}||\vec{s}|} \qquad \lambda = \pm 1$$

gdy skrętność zmienia się podczas procesu –

symetria P jest łamana

NEUTRINA oddziałują tylko słabo i występują tylko jako cząstki o λ=-1

- W oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych parzystości P jest zachowana, oddz. słabe maksymalnie ją łamią.

Oddziaływania słabe i CP

- Doświadczenia pokazały, że z trzech typów omówionych oddziaływań, jedynie oddziaływania słabe nie zachowują symetrii C, ani P i dzięki nim możliwe jest rozróżnienie pomiędzy cząstkami a antycząstkami.
- Neutrina obserwowane są jedynie w stanach lewoskrętnych, antyneutrina – prawoskrętnych, czyli po transformacjach osobno C i P dostajemy stany, które nie są obserwowane:

$$C|\nu_L> \rightarrow |\bar{\nu}_R>$$

$$P|\nu_L> \rightarrow |\nu_R>$$

Dokonując natomiast kolejno transformacji C i P powstanie prawoskrętne antyneutrino - obserwowane:

$$CP|\nu_L> \rightarrow |\bar{\nu}_R>$$

- Zachowanie parzystości ładunkowo-przestrzennej CP oznacza, że dla każdego procesu elementarnego, po dokonaniu sprzężenia ładunkowego C i odbicia zwierciadlanego P, otrzymamy realny proces fizyczny, który zachodzi z identyczną częstością.

Symetria CP dla neutrin

Doświadczenia pokazały, że istnieją tylko:
lewoskrętne neutrina,
prawoskrętne antyneutrina.

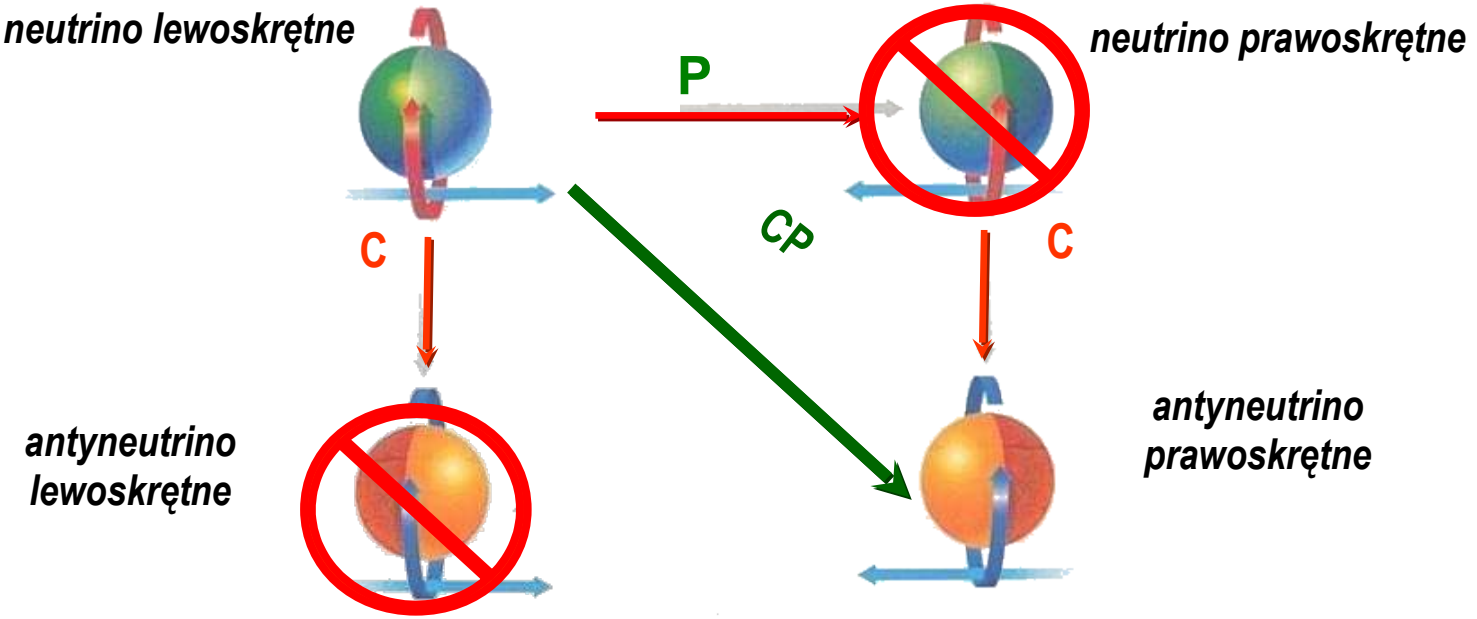
$$\lambda = \frac{\vec{p}\cdot\vec{s}}{|\vec{p}||\vec{s}|} \qquad \lambda = \pm 1$$

Działanie transformacji P i C na neutrina:

$$P|\nu_L> \rightarrow |\nu_R> \quad \times$$

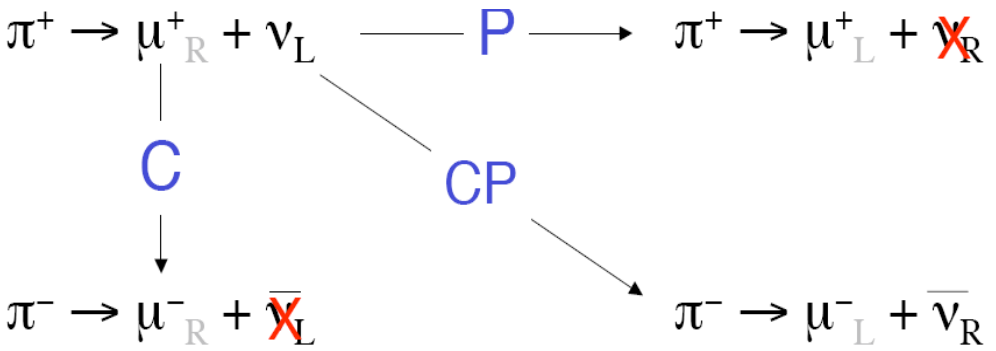
$$C|\nu_L> \rightarrow |\bar{\nu}_R> \quad \times$$

$$CP|\nu_L> \rightarrow |\bar{\nu}_R> \quad \surd$$



Zachowanie parzystości CP

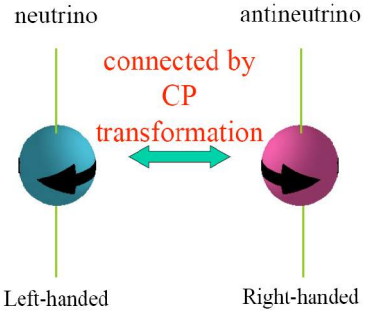
- Jeżeli sprawdzimy, jak transformuje się rozpad pionu w operacji CP:



to wydaje się, że symetria CP jest zachowana.

- Zachowanie parzystości ładunkowo-przestrzennej CP oznacza, że dla każdego procesu elementarnego, po dokonaniu sprzężenia ładunkowego C i odbicie zwierciadlanego P, otrzymamy realny proces fizyczny, który zachodzi z identyczną częstością.

Do roku 1964 uważano, że symetria CP jest zachowana również w procesach słabych.

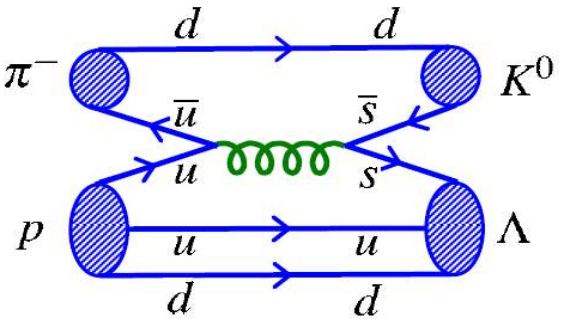


Kaony neutralne

- Należy znaleźć proces, w którym CP byłoby łamane - rozpady kaonów.

Mezony K^0 i anty-K^0 są produkowane w oddziaływaniach silnych jako dwa różne stany:

$$\bar{p}p \rightarrow K^- \pi^+ K^0$$
$$\bar{p}p \rightarrow K^+ \pi^- \bar{K}^0$$



- Stany te różnią się również silnymi procesami, którymi podlegają.
- Dla oddziaływań silnych K^0 i anty- K^0 to dwie zupełnie różne cząstki.

$$C|K^0> = -|\bar{K}^0> \qquad C|\bar{K}^0> = -|K^0>$$

$$P|K^0> = -|K^0> \qquad P|\bar{K}^0> = -|\bar{K}^0>$$

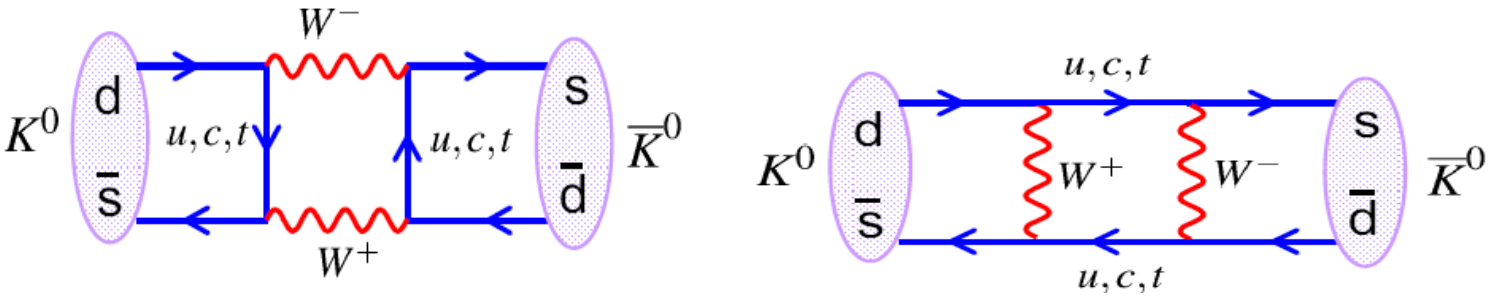
- Przy operacji CP mamy:

$$CP|K^0> = |\bar{K}^0>$$
$$CP|\bar{K}^0> = |K^0>$$

czyli ani K^0 ani antyK^0 nie są stanami własnymi CP

Kaony neutralne

a w dodatku możliwe są słabe procesy:



czyli dla oddz. słabych mezony K^0 istnieją zawsze jako kombinacja K^0 i antyK^0

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K}^0\rangle)$$
$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K}^0\rangle)$$

Łamanie parzystości CP

Stany te są stanami własnymi operatora CP:

$$\hat{C}\hat{P}|K_1\rangle = +|K_1\rangle$$
$$\hat{C}\hat{P}|K_2\rangle = -|K_2\rangle$$

i różnią się czasami życia (K-short i K-long)

$$\tau(K_S) = 0.9 \times 10^{-10}\,\mathrm{s} \qquad \tau(K_L) = 0.5 \times 10^{-7}\,\mathrm{s}$$

jeżeli parzystość CP jest zachowana, to rozpady do stanów końcowych o określonym CP rozróżniałyby te stany:

$$|K_S\rangle = |K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K}^0\rangle) \qquad K_S \to \pi\pi \qquad \text{CP= +1}$$
$$|K_L\rangle = |K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K}^0\rangle) \qquad K_L \to \pi\pi\pi \qquad \text{CP=-1}$$

Łamanie parzystości CP

A mamy:

K_S^0		K_L^0	
69%	$\pi^+\pi^-$	21%	$3\pi^0$
31%	$\pi^0\pi^0$	13%	$\pi^+\pi^-\pi^0$
		27%	$\pi\mu\nu$
		39%	$\pi e\nu$
		0.2%	$\pi^+\pi^-$
		0.1%	$\pi^0\pi^0$

K- long rozpada się również na dwa piony!
efekt jest bardzo słaby

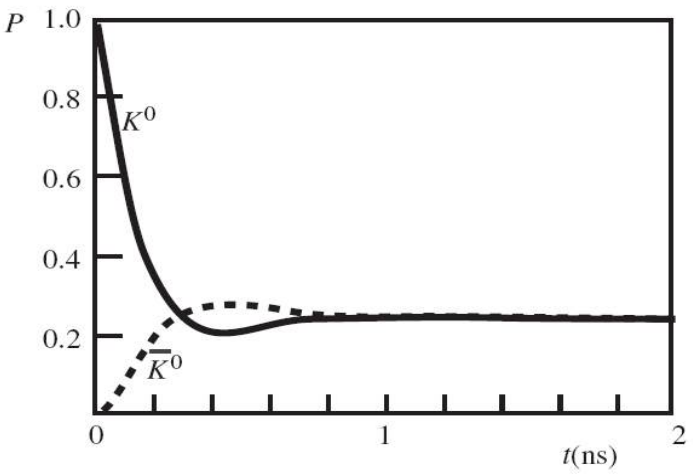
oraz: $$\frac{\Gamma(K_L^0\to l^+\nu\pi^-)-\Gamma(K_L^0\to l^-\bar{\nu}\pi^+)}{\Gamma(K_L^0\to l^+\nu\pi^-)+\Gamma(K_L^0\to l^-\bar{\nu}\pi^+)}\approx 0.003$$

Badania nad niezachowaniem CP oznaczają zatem poszukiwanie procesów, które nie zachowują tej liczby oraz procesów, które przebiegają „inaczej” dla cząstek i antycząstek.

bezwzględna różnica pomiędzy materią a antymaterią!
Ewolucja w czasie układu neutralnych kaonów
(**oscylacje dziwności**):

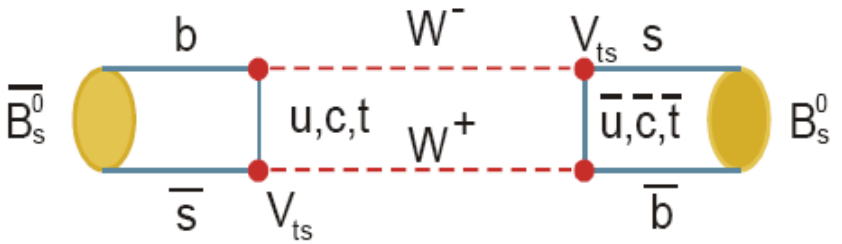
$$\Psi_0(t)=\frac{1}{2}\left[\left(K^0+\bar{K}^0\right)e^{-m_s t-\frac{\Gamma_s}{2}t}\left(K^0-\bar{K}^0\right)e^{-m_s t-\frac{\Gamma_s}{2}t}\right]$$

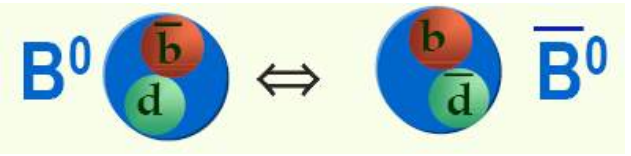
$$P(t)=|\langle K^0|\Psi_0(t)\rangle|^2=\frac{1}{4}\left[e^{-\Gamma_s t}+e^{-\Gamma_L t}+2\,e^{\frac{-\Gamma_S+\Gamma_L}{2}}\cos(\Delta m\,t)\right]$$



Mezony B

Podobne efekty zaobserwowano również w sektorze mezonów B (Belle, Babar, projekt LHCb).





Łamanie CP bada się **BEZPOŚREDNIO**:

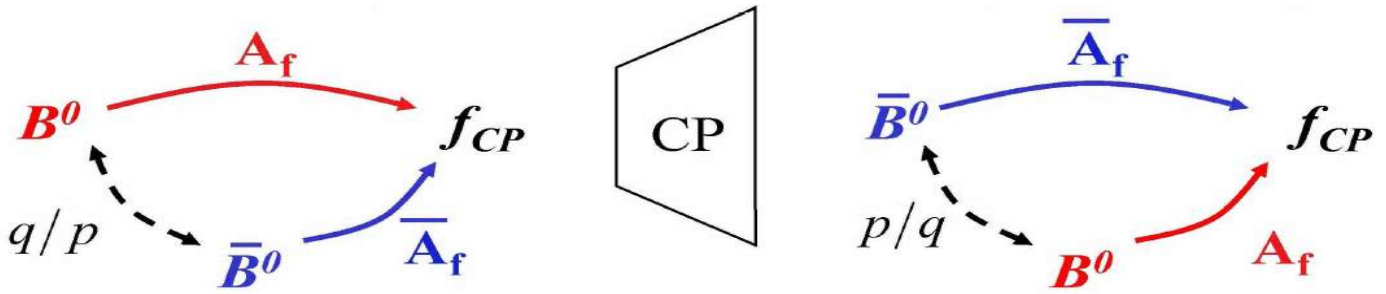
częstości rozpadów sprzężonych ładunkowo są różne:

$$\Gamma(\bar{B}^0 \to K^- \pi^+) \neq \Gamma(B^0 \to K^+ \pi^-)$$

lub **POŚREDNIO** – częstości rozpadów mezonów i antymezonów na ten sam stan końcowy mają inną zależność czasową:

$$\Gamma(t)(\bar{B}^0 \to \bar{f}) \neq \Gamma(t)(B^0 \to f)$$

poprzez interferencję procesów, w których mezon B^0 dał określony stan końcowy oraz dał ten sam stan końcowy, ale po zmianie (oscylacji) na antyB^0.



Poza Modelem Standardowym

Model standardowy to teoria w której leptony i kwarki oddziałują ze sobą poprzez wymianę bozonów pośredniczących.

Opis oddziaływań elektrosłabych i silnych bardzo dobrze zgadza się z doświadczeniem.

Po rozwiązaniu problemu mas cząstek, MS nie przewiduje Wielkiej Unifikacji (GUT), a w szczególności nie unifikuje oddz. grawitacyjnych.

W MS aż 19 parametrów wyznaczanych jest eksperymentalnie.

W MS nic nie wiadomo o masach neutrin.

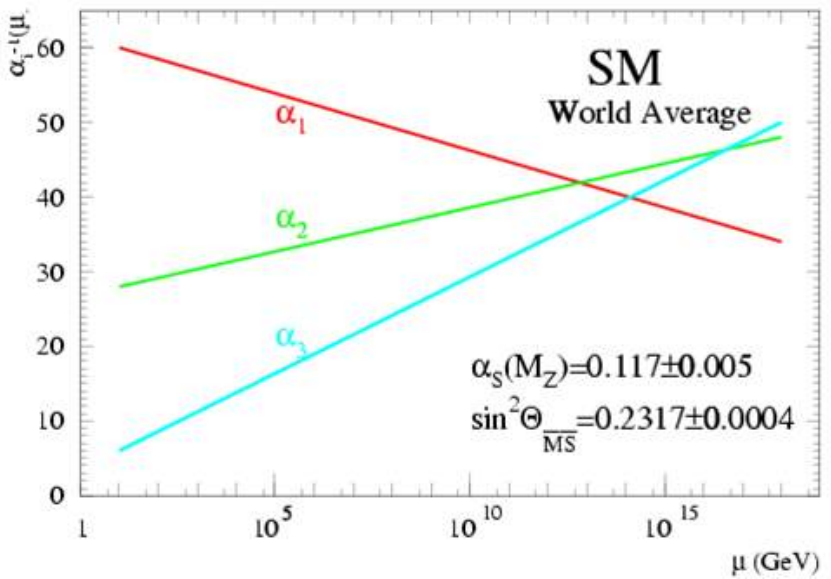
To, co wykracza poza MS nazywamy Nową Fizyką (lub Beyond Standard Model)

Unifikacja oddziaływań (GUT)– przy pewnej skali energii stałe oddziaływań przyjmują tę samą wartość, ale obliczenia pokazują, że w obszarze 10^{11} – 10^{16} GeV stałe te zbiegają się tylko parami.

Problem hierarchii – dlaczego jest tak duża „przerwa” w skali energii pomiędzy unifikacją elektrosłabą a GUT (10^2 GeV a 10^{16} GeV), a mało brakuje do SGUT (10^{19} GeV

Jest to przesłanka, że w tym obszarze jest miejsce na nowe zjawiska.

Problem ekspansji Wszechświata i składników Ciemnej Energii. Rozpad protonu?



Jednym z rozwiązań jest wprowadzenie nowego świata cząstek – cząstek supersymetrycznych.

Teoria – MSSM Minimal Supersymmetric Standard Model

MSSM

Główne założenie tej teorii wprowadza symetrię pomiędzy kwarkami i leptonami (kwarki mogą przechodzić w leptony i na odwrót – LEPTOKWARKI).

Przejście zachodzi poprzez wymianę bozonu X.

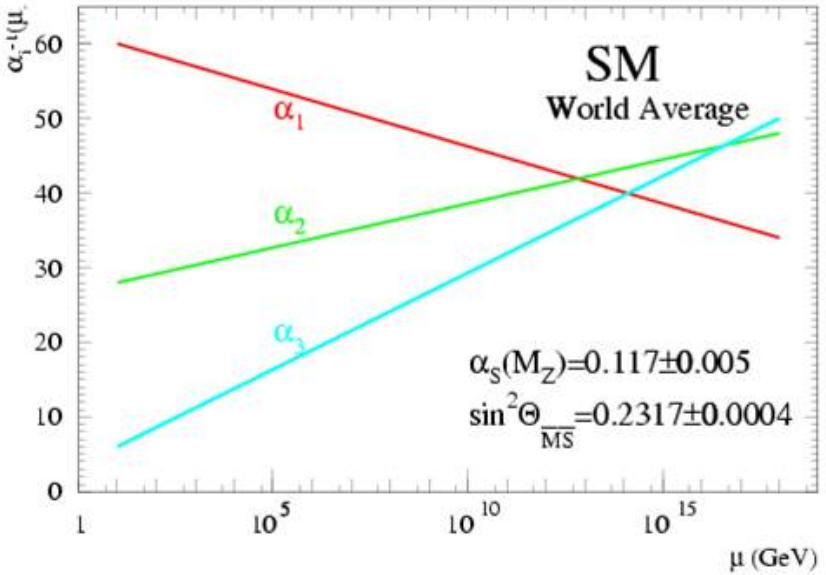
Mamy operator Q: $\hat{Q}|bozon>=|fermion>$

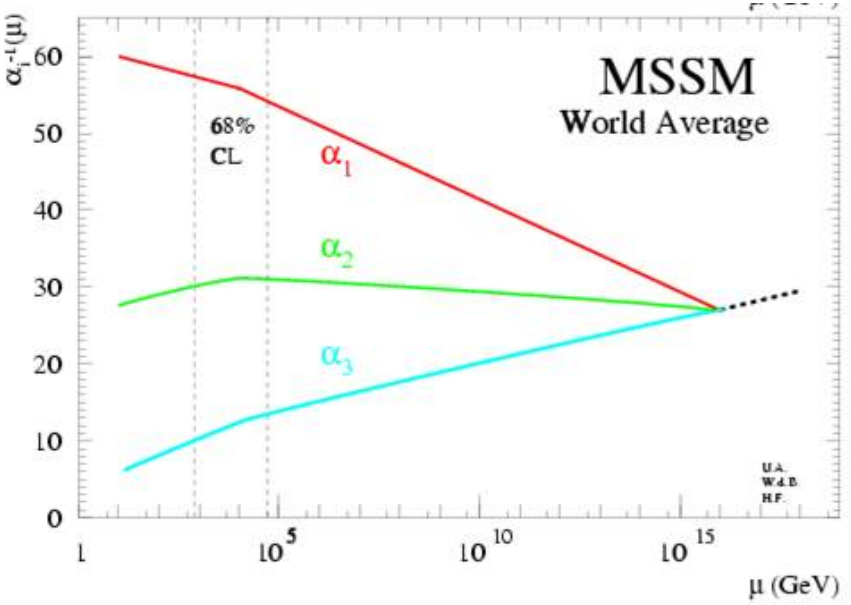
który zmienia spin cząstki.

Pojawiają się supersymetryczni partnerzy zwykłych cząstek (o ciekawych nazwach).

cząstki SM			R	partnerzy SUSY			R
Spin = 1/2	kwark	q	1	Spin = 0	skwark	$\tilde{q}$	-1
	lepton	l	1		slepton	$\tilde{l}$	-1
Spin = 1	W	W	1	Spin = 1/2	wino	$\tilde{W}$	-1
	Z	Z			zino	$\tilde{Z}$	
	foton	γ			fotino	$\tilde{\gamma}$	
	gluon	g			gluino	$\tilde{g}$	
Spin = 0	higgs	H^0	1	Spin = 1/2	higgsino	$\tilde{H}^0$	-1
		$H^{\pm}$				$\tilde{H}^{\pm}$	

SUSY – wielka unifikacja





Gdyby masa najlżejszej s-cząstki była rzędu M_W, skala GUT przesuwa się do 10^{16} GeV.

Zmierzone stałe sprzężenia zbiegają się przy skali GUT w SUSY a nie w MS.

Czas życia protonu byłby rzędu 10^{33} lat.

Gdyby supersymetria była symetrią dokładną, masy cząstek i ich s-cząstek byłyby takie same (no i byłyby już obserwowane).

Brak obserwacji cząstki Higsa daje się wytłumaczyć istnieniem ciężkich cząstek supersymetrycznych.

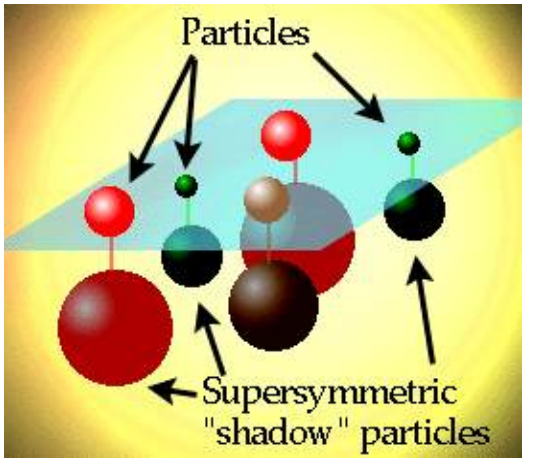
Przy teoriach SUSY jest bardzo dużo przewidywać łamania CP (np. elektryczny moment dipolowy neutronu)

Parzystość R

Każdy fermion ma swojego supersymetrycznego partnera bozonowego.
Każdy bozon ma swojego partnera fermionowego.
W teoriach supersymetrycznych jest więcej cząstek Higgsa.
Supersymetryczne bozony pośredniczące są mieszaniną s-bozonów:

$$gaugino = \tilde{\gamma}, \widetilde{W^{+-}}\tilde{Z}$$

$$chargino\,(\chi^{+-}_{1,2}), neutralino\,(\chi^{0})_{1,2,3,4} = higgsino, \quad gaugino$$



Symetria zakłada te same masy, ładunki i stałe sprzężenia dla partnerów.
A skoro nie udało się nam na razie znaleźć cząstek SUSY, to znaczy, że są one bardzo ciężkie.

$$M_{SUSY} > 100\,GeV$$

Liczba kwantowa zdefiniowana jako:

$$R = (-1)^{2J+3B+L}$$

+1 Cząstki MS

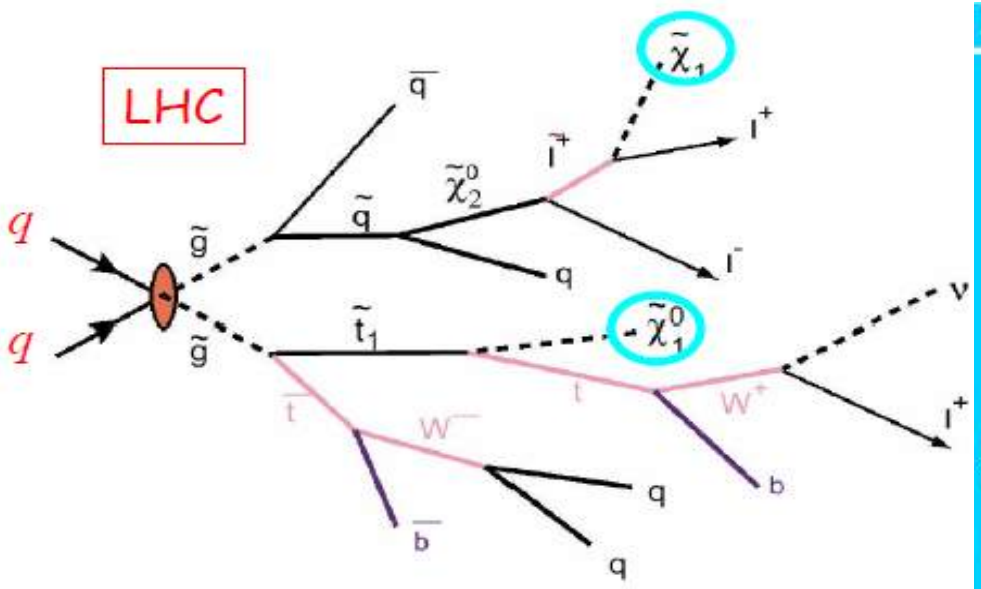
-1 Cząstki SUSY

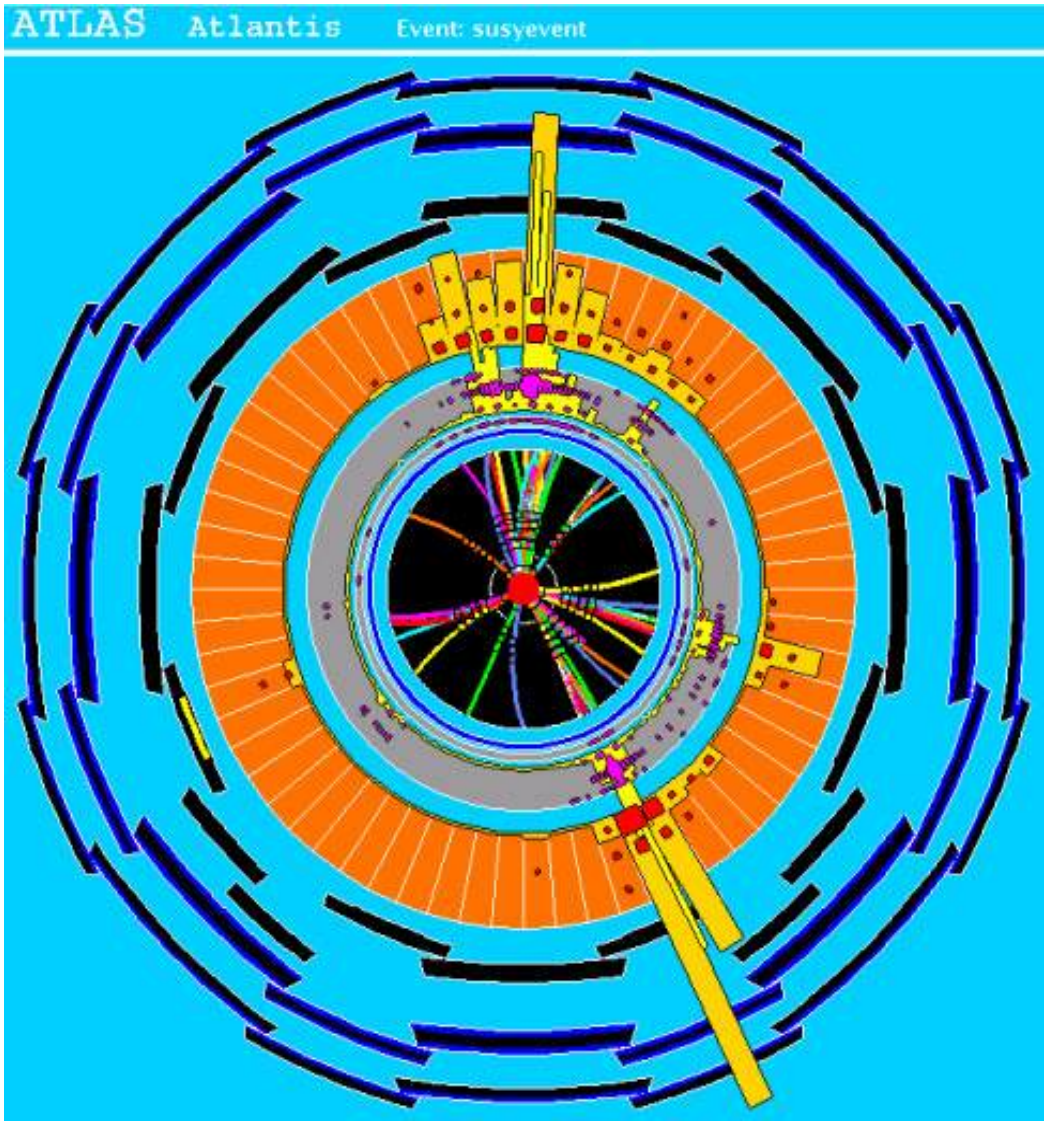
gdyby była zachowana w oddziaływaniach:

- cząstki SUSY produkowane w parach,
- najlżejsza cząstka (LSP) powinna być stabilna,
- LSP bardzo słabo oddziałuje (jak neutrino – nie widzimy go),
- LSP jest kandydatem na ciemną energię, oddziałują tylko grawitacyjnie

LSP $\equiv \chi^0_1$ (mieszanina fotina, zina i higsina)

SUSY w LHC





Jeśli SUSY istnieje, to łatwo (i szybko) może być znaleziona na LHC do 3 TeV.

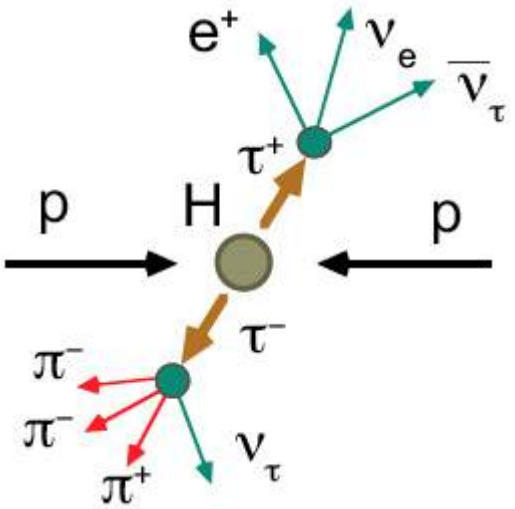
Dzięki dużemu przekrojowi czynnemu i spektakularnym sygnaturom tło do tych procesów jest małe.

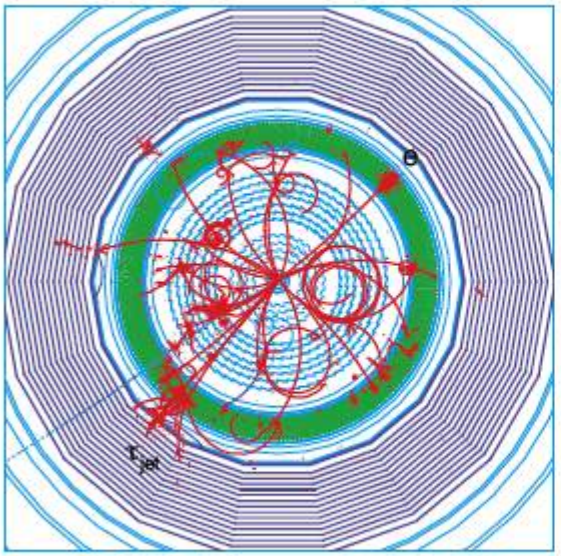
Jeśli nic nie znajdziemy na LHC: SUSY umrze

Jeśli ją znajdziemy: powinniśmy zmierzyć masy niektórych cząstek i zidentyfikować spin.

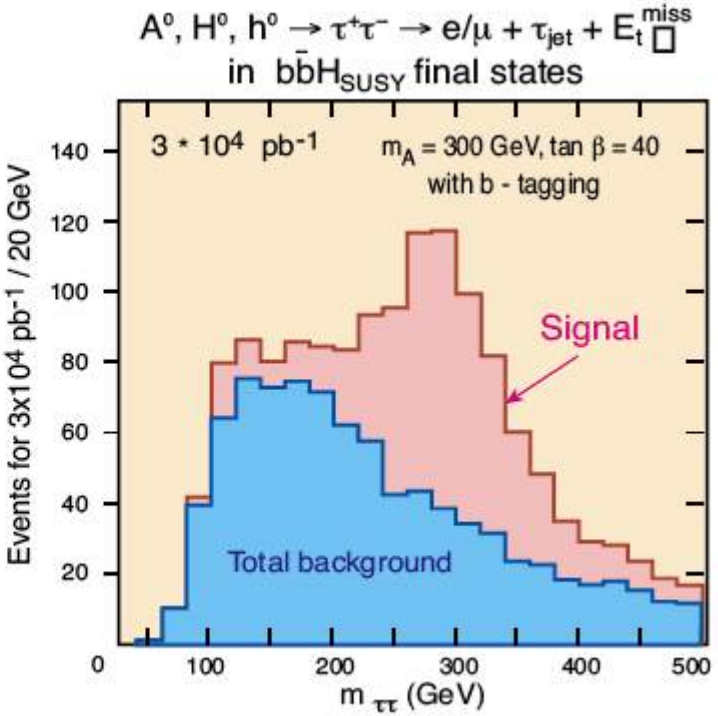
Higgs SUSY

Teoria supersymetryczne przewiduje istnienie pięciu bozonów Higgsa



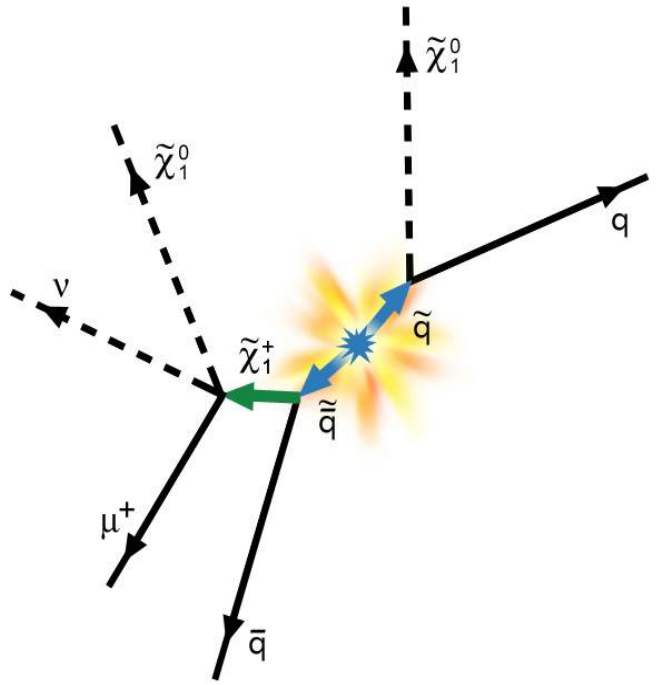


$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow e + \tau_{jet}$("3-prong")



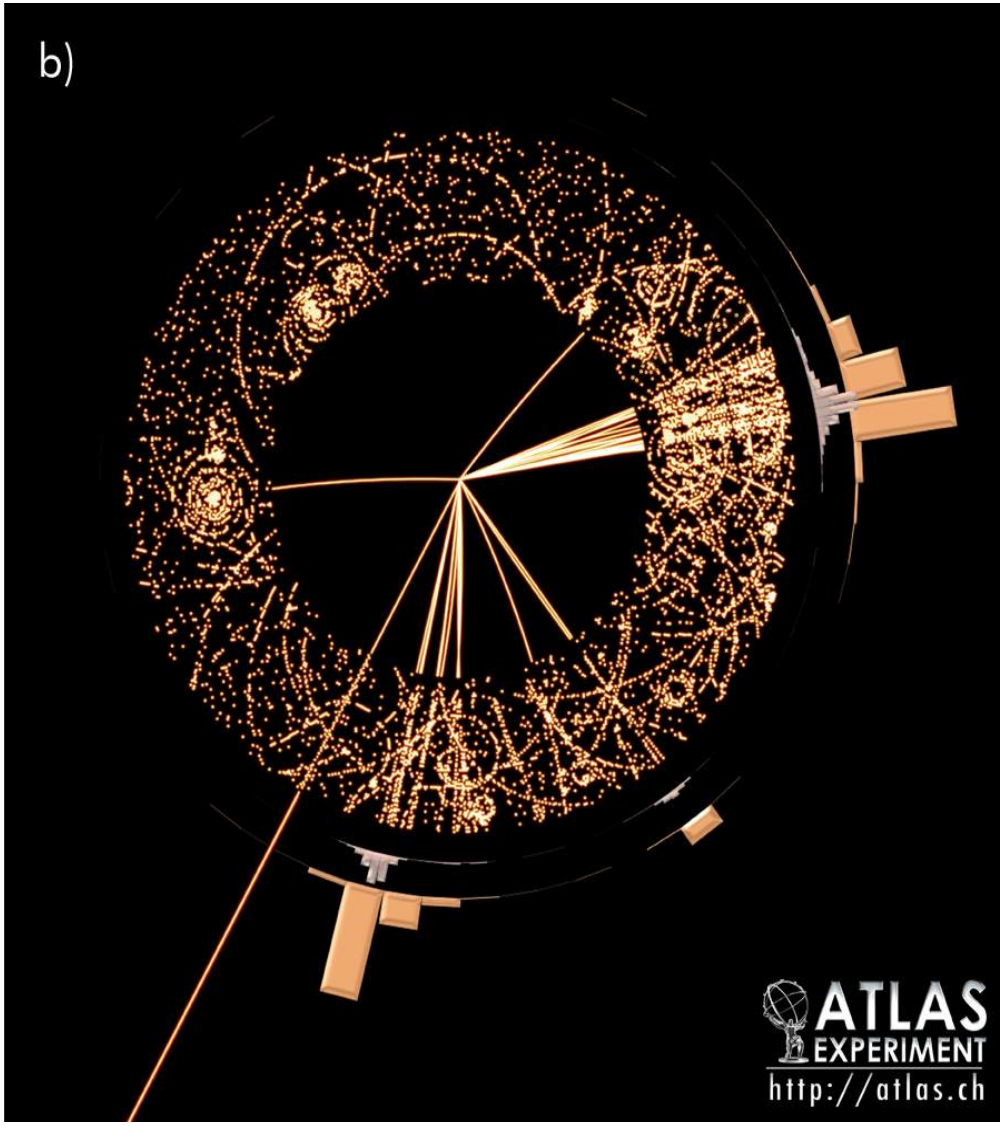
Sygnatury SUSY - przykłady

a)



q = quark
$\tilde{q}$ = squark
$\bar{q}$ = anti-quark
$\bar{\tilde{q}}$ = anti-squark
μ = muon
ν = neutrino
$\tilde{\chi}_1^+$ = chargino
$\tilde{\chi}_1^0$ = neutralino (lightest super-partner)

b)



SUSY a kosmologia

Współczesny opis Wszechświata opiera się na założeniu, że się on rozszerza (promienowanie reliktowe o 2,7K).
Gęstośc krytyczna:

$$\rho_c = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G} \sim 10^{-26}\, kg\, m^{-3}$$

oraz względna gestość:

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$$

na którą składają się:

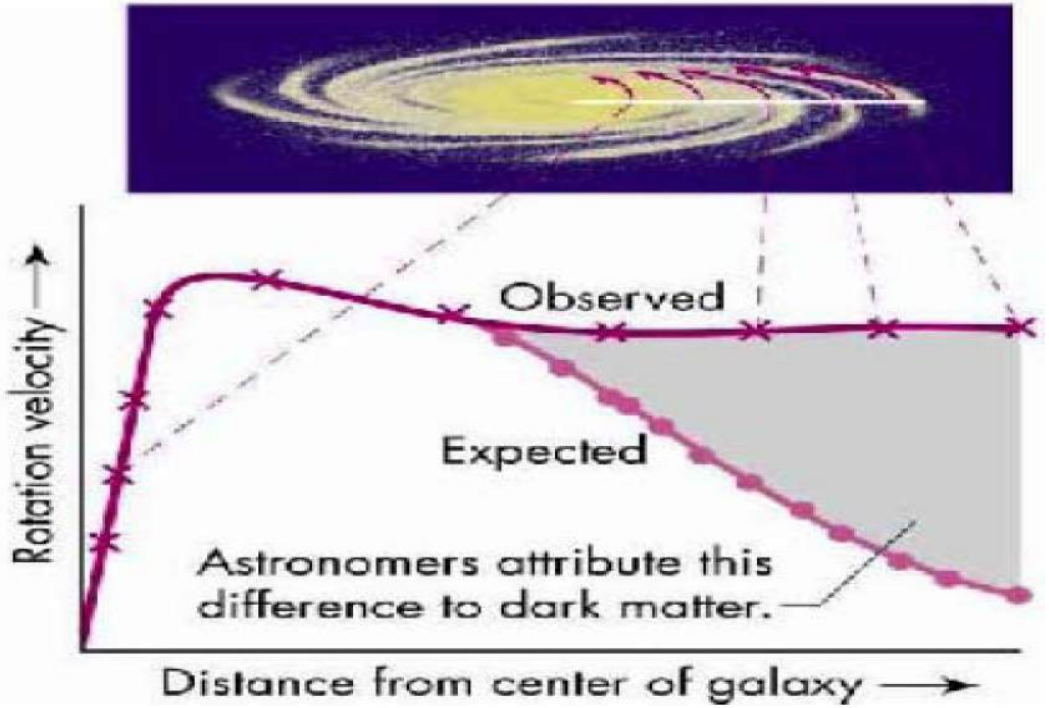
$$\Omega = \Omega_{prom} + \Omega_{materia} + \Omega_{DM}$$

Jeśli gęstość we Wszechświecie bedzie mniejsza od 1 – Wszechświat bedzie się ciagle rozszerzał.
Z pomiarów znamy:

$$\Omega_{prom} \approx 5 \times 10^{-5}$$
$$\Omega_{materia} \approx 0.7$$
$$\Omega_{DM} = ?$$

Ciemna energia

W 1933 roku Fritz Zwicky – gromaga COMA- prędkość obroyu galaktyk wokół wspólnego środka masy jest zbyt duża, aby mogły one tworzyć układ związany.



Materia oddziałująca tylko grawitacyjnie, niewidzialna.

Kosmos to NIE gwiazdy i planety!

Kandydaci na ciemną materię:

1. cząstki istniejące (<7% masy):

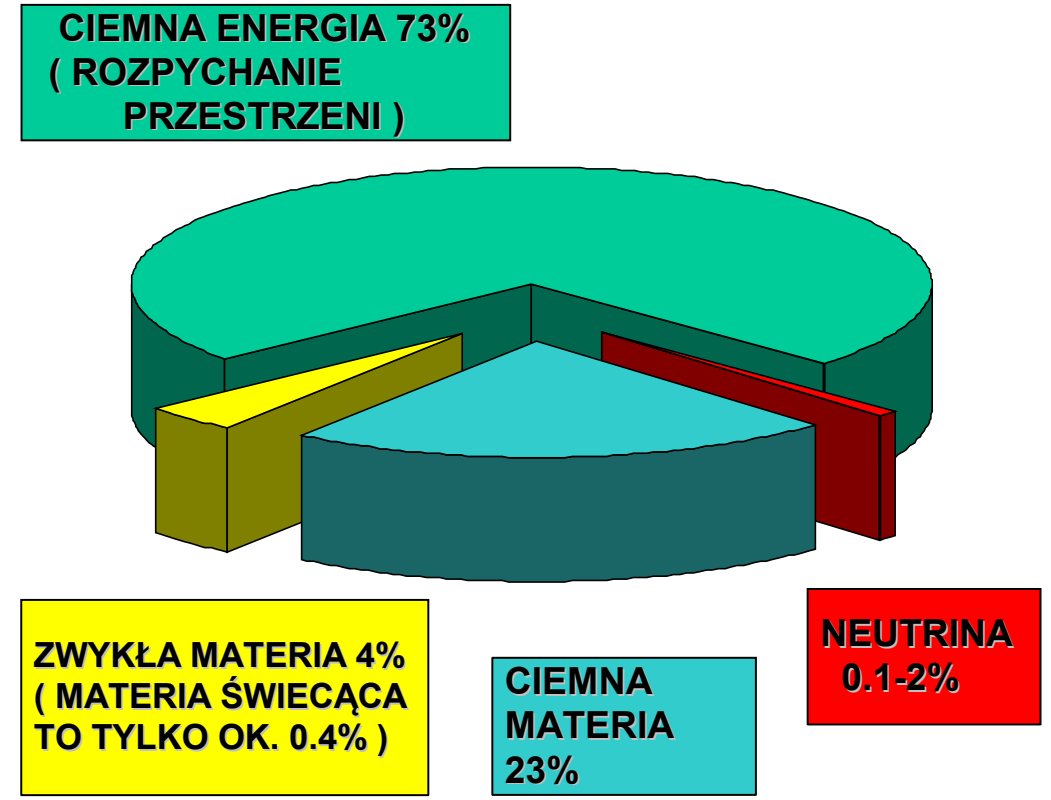
MACHO's – karły brązowe, gwiazdy neutronowe, czarne dziury,

neutrina

2. cząstki postulowane

aksjony

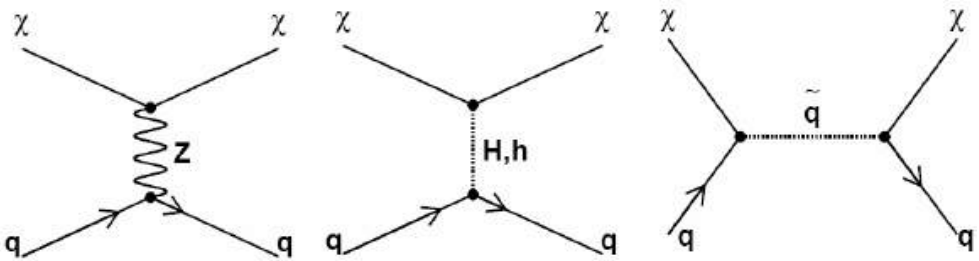
WIMPy (Weakly Interacting Massive Particles) – wolne, masywne, neutralne, słabo oddziałujące cząstki (Cold Dark Matter)



Bardzo dobrym kandydatem na WIMPa jest neutralino:

neutralino(χ) $18\ \text{GeV} < M_\chi < 7\ \text{TeV}$

LEP kosmologia



Podsumowanie

1. Opis i odkrycie antymaterii.
2. Bariogeneza i warunki Sacharowa.
3. Symetrie C, P i CP - łamanie.
4. Łamanie CP w słabych rozpadach kaonów i mezonów B.
5. Poza Modelem Standardowym (BSM) – supersymetria.
6. Ciemna materia