

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów Poza Modelem Standardowym

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



7 stycznia 2025

## Termin podstawowy

- 21 stycznia 2025 (wtorek), godz. 15:15-16:45 (termin ostatniego wykładu)

## Informacje szczegółowe

- na platformie Kampus, tak jak testy wykładowe (zdalnie, nie przychodzimy na uczelnię!)  
30 pytań wielokrotnego wyboru (jedna odpowiedź poprawna)  
przykładowe pytania są udostępnione na stronie wykładu
- Czas przeznaczony na pisanie 90 minut
- O zaliczeniu wykładu decyduje suma punktów z testu końcowego i połowy punktów z testów wykładowych

## Zaliczenie

Warunkiem zaliczenia jest

- Uzyskanie minimum 50% punktów z testów
- Systematyczny udział w wykładach (potwierdzony testami wykładowymi) więcej niż 3 nieusprawiedliwione nieobecności  $\Rightarrow$  możliwe obniżenie oceny

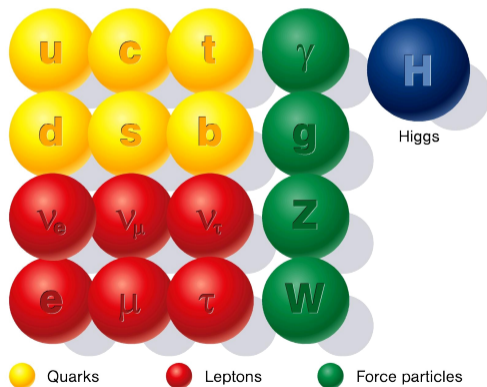
- 1 Model Standardowy - przypomnienie
- 2 Problemy Modelu Standardowego
- 3 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 4 Supersymetria
- 5 Dodatkowe wymiary

- 1 Model Standardowy - przypomnienie
- 2 Problemy Modelu Standardowego
- 3 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 4 Supersymetria
- 5 Dodatkowe wymiary

## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

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



## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej:  $U(1)$   
⇒ opis **oddziaływań elektromagnetycznych** (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek:  $SU(3)$   
⇒ opis **oddziaływań silnych** (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach:  $SU(2)$   
⇒ opis **oddziaływań słabych** (model Weinberg'a-Salam'a),  $W^\pm$ ,  $Z^0$

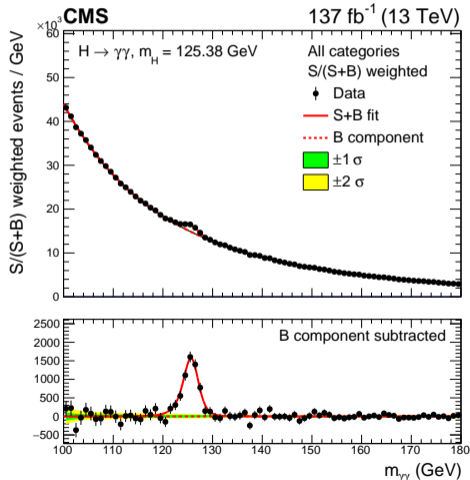
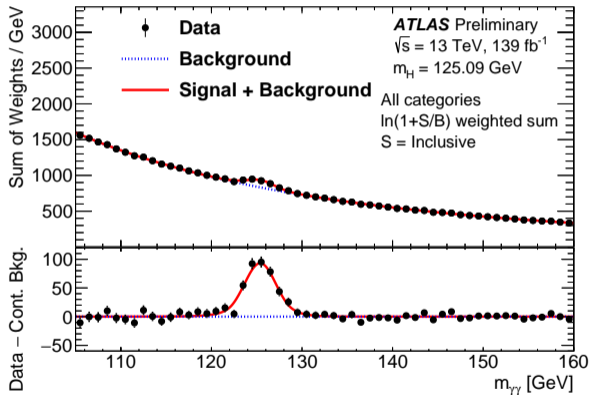
$$SM \equiv U(1) \times SU(2) \times SU(3)$$

+ spontaniczne łamanie symetrii konieczne do wytłumaczenia mas...

## Wyniki Run 2 LHC (2015-2018)

$H \rightarrow \gamma\gamma$

⇒ wykład 9

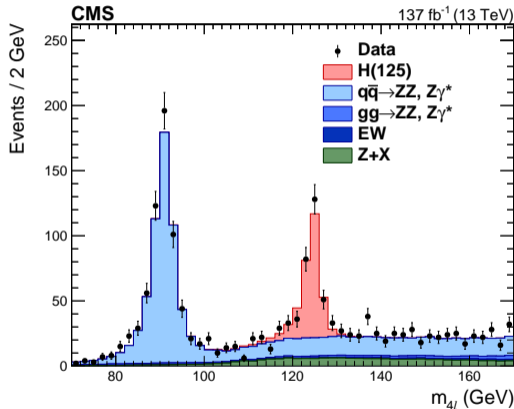
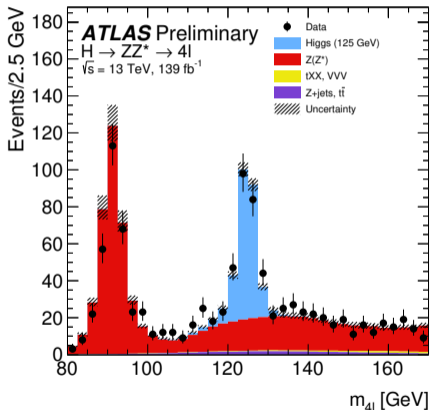


Pomiary zgodne z wynikami Run 1.

## Wyniki Run 2 LHC (2015-2018)

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

⇒ wykład 9



Pomiary zgodne z wynikami Run 1.



## Eksperymenty przy LHC

Bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów  $W^\pm$ ,  $Z^0$  i  $H$ , oraz kwarku  $t$ .

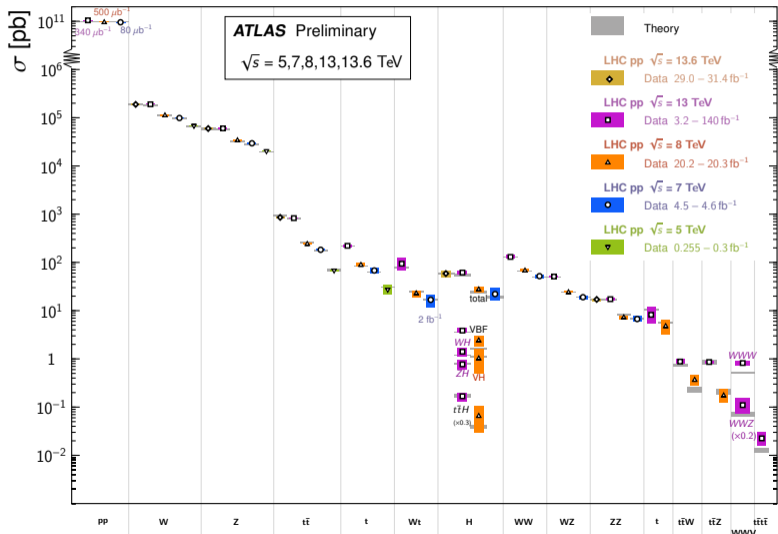
Ogromna większość pomiarów w znakomitej zgodności z SM.

czerwiec 2024

⇒ wykład 9

### Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: June 2024



- 1 Model Standardowy - przypomnienie
- 2 Problemy Modelu Standardowego**
- 3 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 4 Supersymetria
- 5 Dodatkowe wymiary

## Obserwacje

⇒ wykład 10

Wyniki doświadczalne wykazały ponad wszelką wątpliwość, że

- neutrina elektronowe ze słońca “znikają” w drodze do Ziemi
- atmosferyczne neutrina mionowe “znikają” przechodząc przez Ziemię choć nie oddziałują

## Wyjaśnienie

W oddziaływaniach słabych (CC) powstają neutrina o określonym zapachu (elektronowe/mionowe/taonowe).

Ale “fizyczne” (swobodne) neutrina są mieszankami stanów zapachowych.

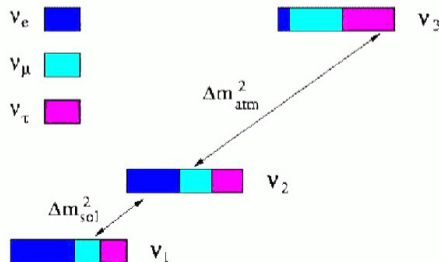
Lecące neutрино może zmienić zapach!

A detektory są czułe głównie na  $\nu_e$ .

Pełny opis wymaga mechaniki kwantowej.

Wymaga też, żeby neutrina miały masę!

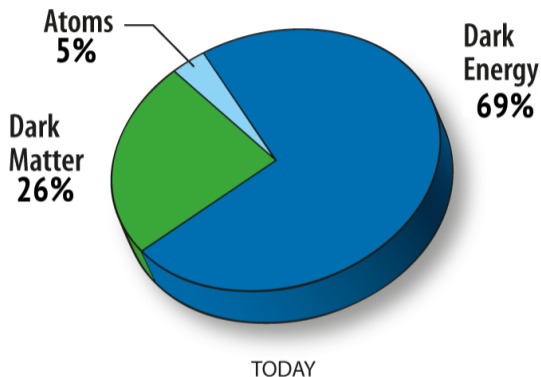
Widmo mas (przykład):



## Model $\Lambda$ CDM $\Rightarrow$ wykład 11

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia...** (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez tzw. **stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )**



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

Wiek Wszechświata:  $T = 13.787 \pm 0.020$  Gyr

Wszystkie wyniki **przewodzonych przez nas** doświadczeń zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami Modelu Standardowego.

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

## Problemy w zrozumieniu wyników pomiarów

- Gdzie się podziała **antymateria** we Wszechświecie?
- Jakie są źródła **łamania CP** ?
- Jaka jest natura **neutrin** ? Dlaczego **oscylują** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?

Wszystkie wyniki **przewodzonych przez nas** doświadczeń zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami Modelu Standardowego.

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

## Problemy w zrozumieniu wyników pomiarów

- Gdzie się podziała **antymateria** we Wszechświecie?
- Jakie są źródła **łamania CP** ?
- Jaka jest natura **neutrin** ? Dlaczego **oscylują** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?

## Obserwacje kosmologiczne:

- Co to jest "**ciemna materia**" ?
- Co to jest "**ciemna energia**" !?

Wszystkie wyniki prowadzonych przez nas doświadczeń zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami Modelu Standardowego.

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

## Problemy w konstrukcji samego modelu

- Dlaczego **materia**  $\equiv$  **fermiony**, **oddziaływania**  $\equiv$  **bozony** ?
- Dlaczego **3 pokolenia** kwarków i leptonów ?
- Dlaczego zachowane są **liczba leptonowa** i **barionowa**?
- Jaki jest powód **spontanicznego łamania symetrii** ?
- Rozbieżne poprawki - “**problem hierarchii**” ?  
Aby model “działał” trzeba dobrać jego parametry z niezwykłą precyzją...
- Jak uwzględnić opis **grawitacji**?

## Rozszerzenia Modelu Standardowego

Zarówno wyniki obserwacji (głównie kosmologicznych) jak i rozważania teoretyczne sugerują, że Model Standardowy nie może być “Ostateczną Teorią Wszystkiego”.



## Rozszerzenia Modelu Standardowego

Zarówno wyniki obserwacji (głównie kosmologicznych) jak i rozważania teoretyczne sugerują, że Model Standardowy nie może być “Ostateczną Teorią Wszystkiego”.

Musi istnieć **bardziej fundamentalna, ogólniejsza teoria**, która opisuje wszystkie znane procesy i odpowiada na wszystkie nasze pytania.

**Model Standardowy byłby tylko jej niskoenergetycznym przybliżeniem.**

**Tak jak Model Fermiego był przybliżeniem Modelu Weingerg’a-Salam’a oddziaływań słabych...**

## Rozszerzenia Modelu Standardowego

Zarówno wyniki obserwacji (głównie kosmologicznych) jak i rozważania teoretyczne sugerują, że Model Standardowy nie może być “Ostateczną Teorią Wszystkiego”.

Musi istnieć **bardziej fundamentalna, ogólniejsza teoria**, która opisuje wszystkie znane procesy i odpowiada na wszystkie nasze pytania.

**Model Standardowy byłby tylko jej niskoenergetycznym przybliżeniem.**

**Tak jak Model Fermiego był przybliżeniem Modelu Weingerg’a-Salam’a oddziaływań słabych...**

Fizycy teoretycy od ponad 50 lat prześcigają się w proponowaniu coraz to dziwniejszych modeli, które miałyby lepiej opisywać otaczający nas Wszechświat...

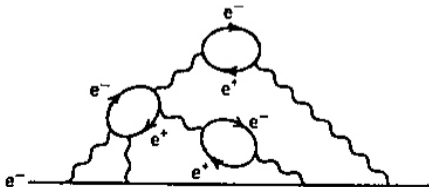
Fizycy doświadczalnicy budują coraz to wymyślniejsze urządzenia, w tym ogromne akceleratory **(ale nie tylko)**, żeby szukać śladów “nowej fizyki”...

- 1 Model Standardowy - przypomnienie
- 2 Problemy Modelu Standardowego
- 3 Teorie Wielkiej Unifikacji**
- 4 Supersymetria
- 5 Dodatkowe wymiary

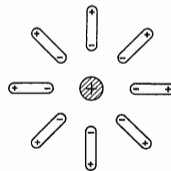
## Ładunek elementarny

Ładunek elementarny chcielibyśmy zdefiniować jako wartość ładunku pojedynczego, izolowanego i nieoddziałującego elektronu.

Ale w QED elektron nigdy **nie jest** "goły". Cały czas emituje **wirtualne fotony**, które z kolei mogą konwertować w **pary  $e^+e^-$**  (w dowolne dwie cząstki naładowane).



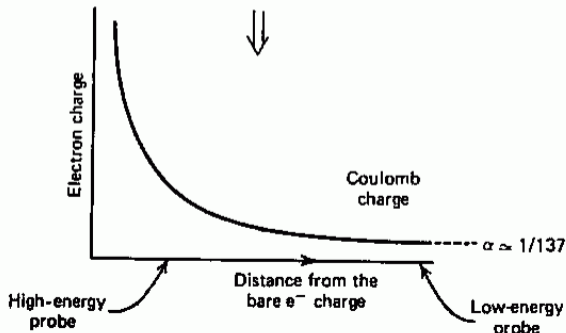
W obecności **zewnętrznego pola** wirtualne pary  $e^+e^-$  mogą ulec **polaryzacji**, podobnie jak ładunki w dielektryku:



"Polaryzacja próżni"  $\Rightarrow$  "efektywny" ładunek elektronu jest mniejszy niż "goły" ładunek.

## Biegająca stała sprzężenia QED

“Tablicowa” wartość stałej oddziaływań elektromagnetycznych (stałej struktury subtelnej)  $\alpha_{em}$  odpowiada oddziaływaniu na duże odległości, czyli z małym przekazem energii i pędu,  $Q^2$ .



Dla  $Q^2 \rightarrow 0$ : ( $\Rightarrow$  duże odległości)

$$\alpha_{em}(0) \approx \frac{1}{137}$$

Im wyższe  $Q^2$  ( $\Rightarrow$  mniejsze odległości) tym silniej oddziałuje elektron.

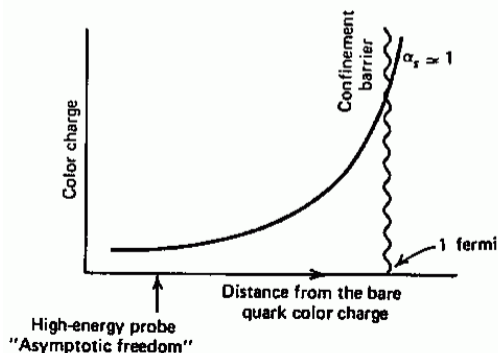
Zależność jest jednak bardzo słaba:

$$\alpha_{em}(M_Z^2) \approx \frac{1}{128}$$

## Biegająca stała sprzężenia QCD

W podobny sposób “siła” oddziaływania kolorowego zależy od energii zderzenia, czyli odległości na jaką mogą zbliżyć się kwarki (im większa energia tym mniejsza odległość).

Obecność pętli gluonowych (oddziaływania pomiędzy gluonami) zmienia jednak jej charakter:



Oddziaływania silne rosną dla  $Q^2 \rightarrow 0$  (duże odległości)  $\Rightarrow$  uwięzienie kwarków ( $\alpha_s \gg 1$ )

Dla dużych  $Q^2$  (małe odległości) coraz słabsze oddziaływania  $\Rightarrow$  asymptotyczna swoboda QCD

$$\alpha_s(M_Z^2) \approx 0.118$$

## Stałe sprzężenia

Przy skali  $M_W^2 \sim M_Z^2$  mamy:

$$\alpha_s \approx 0.118$$

$$\alpha_{em} \approx 0.0078$$

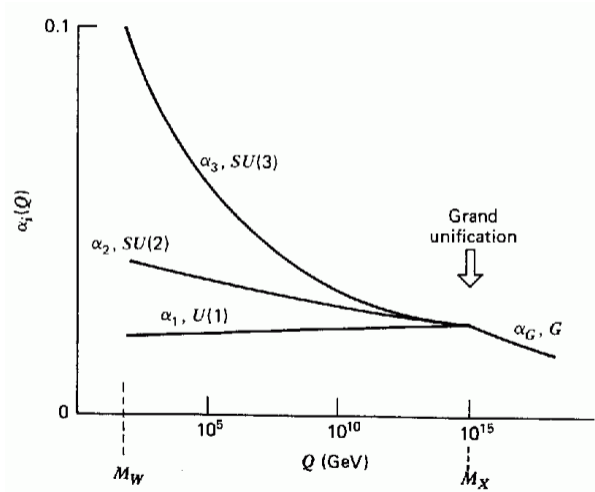
$$\frac{\alpha_s}{\alpha_{em}} \sim 15$$

Jednak ze wzrostem energii

$\alpha_{em}$  rośnie, natomiast  $\alpha_s$  maleje

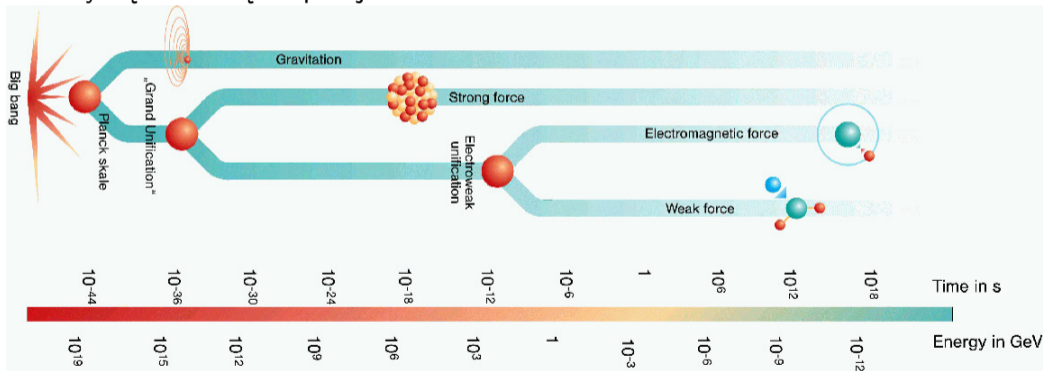
Dla skal energii  $\sim 10^{15}$  GeV:

⇒ **unifikacja** oddziaływań **elektromagnetycznych**, **słabych** i **silnych** !



## Ewolucja Wszechświata

Sądzymy, że w chwili **wielkiego wybuchu** wszystkie oddziaływania były **zunifikowane** i “rozdzieliły się” w miarę ekspansji Wszechświata



Badając zderzenia cząstek przy bardzo wysokich energiach “cofamy się w czasie”...



Sukces modelu Weinberga-Salama (unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych) oraz “zbieganie” stałych sprzężenia  
⇒ duże zainteresowanie hipotezą wielkiej unifikacji.

Model Standardowy – symetria  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

- QED: symetria względem obrotu fazy funkcji falowej  $U(1)$   
⇒ każda cząstka oddziałuje “samodzielnie”
- Oddziaływania słabe: symetria  $SU(2)$   
⇒ oddziaływanie sprzęga cząstki w dubletach, np.  $(e^- \nu_e)$ ,  $(u d)$
- Oddziaływania silne: symetria  $SU(3)$   
⇒ oddziaływanie sprzęga stany kolorowe  $(R G B)$  - triplety stanów

Sukces modelu **Weinberga-Salama** (unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych) oraz “**zbieganie**” stałych sprzężenia

⇒ duże zainteresowanie hipotezą **wielkiej unifikacji**.

**Model Standardowy** – symetria  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

- QED: symetria względem obrotu fazy funkcji falowej  $U(1)$   
⇒ każda cząstka oddziałuje “**samodzielnie**”
- Oddziaływania słabe: symetria  $SU(2)$   
⇒ oddziaływanie sprzęga cząstki w **dubletach**, np.  $(e^- \nu_e)$ ,  $(u d)$
- Oddziaływania silne: symetria  $SU(3)$   
⇒ oddziaływanie sprzęga stany kolorowe  $(R G B)$  - **triplety** stanów

Jeśli przy **wysokich energiach** wszystkie oddziaływania miałyby zostać zastąpione jednym “**uniwersalnym**” oddziaływaniem, to i grupy symetrii oddziaływań musiałyby zostać zastąpione jedną **ogólniejszą grupą** symetrii...

## Teoria SU(5)

Najprostszą grupą cechowania zawierającą jako podgrupy symetrie Modelu Standardowego U(1), SU(2) i SU(3) jest SU(5)

Model wielkiej unifikacji oparty na grupie symetrii SU(5) zaproponowali Georgi i Glashow już w 1974 roku. Przewidywana skala unifikacji:

$$M_X \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ GeV}$$

Teoria GUT - Grand Unified Theory

W modelu SU(5) kwarki i leptoni występują we wspólnych multipletach. Wszystkie oddziaływania działają w ramach tych multipletów (które zastępują oddzielne dublety i triplety oddziaływań słabych i silnych)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \\ \bar{d}_{\bar{R}} \\ \bar{d}_{\bar{G}} \\ \bar{d}_{\bar{B}} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{u}_{\bar{R}} \\ \bar{u}_{\bar{G}} \\ \bar{u}_{\bar{B}} \\ u_R \\ u_G \\ u_B \\ d_R \\ d_G \\ d_B \end{pmatrix}$$

## Teoria SU(5)

Bozony  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , fotony i gluony są odpowiedzialne tylko za część możliwych przejść przejść między stanami danego multipletu.

Aby opisać pozostałe przejścia musimy wprowadzić nowe bozony  $X$  i  $Y$

Masa bozonu  $X$  jest skalą unifikacji:

$$M_X \sim 10^{15} \text{ GeV}$$

Dlatego nie zauważyliśmy jeszcze tych dodatkowych oddziaływań...

## Kwintet SU(5)

	$d_R^{\text{red}}$	$d_R^{\text{green}}$	$d_R^{\text{blue}}$	$e_R^+$	$\bar{\nu}_e$
$d_R^{\text{red}}$	$g^0, \gamma, Z^0$	$g^{r \cdot g}$	$g^{r \cdot b}$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{red}}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{red}}$
$d_R^{\text{green}}$	$g^{g \cdot r}$	$g^0, \gamma, Z^0$	$g^{g \cdot b}$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{green}}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{green}}$
$d_R^{\text{blue}}$	$g^{b \cdot r}$	$g^{b \cdot g}$	$g, \gamma, Z^0$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{blue}}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{blue}}$
$e_R^+$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{red}}$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{green}}$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{blue}}$	$\gamma, Z^0$	$W^+$
$\bar{\nu}_e$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{red}}$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{green}}$	$X_{\frac{4}{3}}^{\text{blue}}$	$W^-$	$Z^0$

## Rozpad protonu

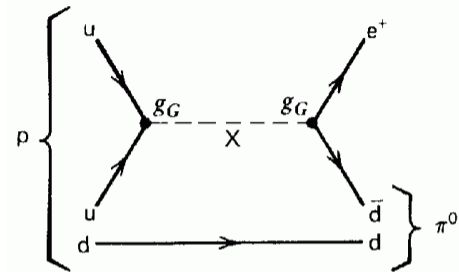
Model  $SU(5)$  przewiduje rozpad protonu

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

$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

W  $1t$  wody spodziewamy się ok.  $1$  rozpadu dziennie.

Są też możliwe inne kanały rozpadu...



## Rozpad protonu

Model  $SU(5)$  przewiduje **rozpad protonu**

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

$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

W **1t** wody spodziewamy się ok. **1 rozpadu dziennie**.

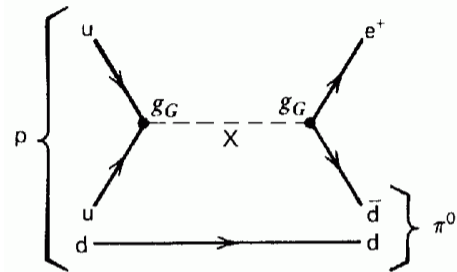
Są też możliwe inne kanały rozpadu...

Dla szukania rozpadu protonu zbudowano **szereg eksperymentów**, m.in. **Super Kamiokande (!)**

Niestety **wyniki** wszystkich dotychczasowych poszukiwań są **negatywne**. Obecne ograniczenie

( $p \rightarrow e^+ \pi^0$ ):

$$\tau_p > 2.4 \cdot 10^{34} \text{ lat}$$



## Rozpad protonu

Model  $SU(5)$  przewiduje rozpad protonu

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

$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

W  $1t$  wody spodziewamy się ok.  $1$  rozpadu dziennie.

Są też możliwe inne kanały rozpadu...

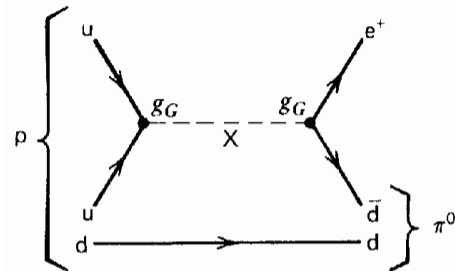
Dla szukania rozpadu protonu zbudowano szereg eksperymentów, m.in. Super Kamiokande (!)

Niestety wyniki wszystkich dotychczasowych poszukiwań są negatywne. Obecne ograniczenie

( $p \rightarrow e^+ \pi^0$ ):

$$\tau_p > 2.4 \cdot 10^{34} \text{ lat}$$

⇒ teoria GUT oparta na  $SU(5)$  jest już dziś wykluczona...



- 1 Model Standardowy - przypomnienie
- 2 Problemy Modelu Standardowego
- 3 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 4 Supersymetria**
- 5 Dodatkowe wymiary



## Skale masowe SM

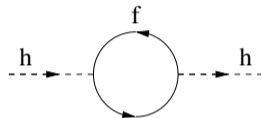
neutrino	$\sim 10^{-11}$ GeV
elektron	$\sim 10^{-3}$ GeV
$W^\pm, Z^0, h$ (?)	$\sim 10^{+2}$ GeV
top	$\sim 2 \cdot 10^{+2}$ GeV
	“pustynia” $\updownarrow$
GUT $M_X$	$\sim 10^{+15}$ GeV
$M_{Pl}$	$\sim 10^{+19}$ GeV

Masa Planka ( $M_{Pl}$ ):

skala **unifikacji** dla **grawitacji**,

skala przy której grawitacja staje się “silna”

Czy **Model Standardowy** może pozostać słuszny aż do skali  $M_X$ ? Problem z **masą Higgosa**:



Poprawki związane z **pętlami** fermionowymi rosną jak  $M_X^2$ ...

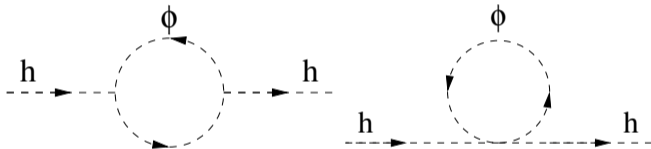
Aby uzyskać  $m_h = 125$  GeV musimy niesłychanie precyzyjnie dobrać parametry modelu ( $\delta \sim 10^{-15}$ )

$\Rightarrow$  “**problem hierarchii**”

Teoretycy nie lubią tzw. “**fine tuning**”...

## Problem hierarchii

Problem **rozbieżnych poprawek** do masy Higgsa **nie pojawia się** jeśli dla każdego fermionu w teorii dodamy dokładnie mu **odpowiadające bozony**. Poprawki od pętli bozonowych:



mają **przeciwny znak** i kasują rozbieżności fermionowe!

Pozostają jedynie **skończone wkłady**, proporcjonalne do **różnic mas** bozonów i fermionów.

⇒ możemy “uratować”  $m_h$  jeśli dodamy do teorii **nowe cząstki** (bozony) przy skalach  $\sim 1 \text{ TeV}$ ...

## Podstawy teorii

Zaproponowana  $\sim 1970$  na podstawie **czysto teoretycznych** spekulacji...

**Supersymetria**: symetria łącząca cząstki o **różnych spinach**.

### Podstawowe założenia:

- Zachowujemy grupę cechowania  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$
- Każdej znanej **cząstce** dodajemy jej **“super-partnera”** o spinie różnym o  $\frac{1}{2}$ :

fermion ( $s=\frac{1}{2}$ )  $\rightarrow$  sfermion ( $s=0$ )

kwark  $\rightarrow$  skwark

lepton  $\rightarrow$  slepton

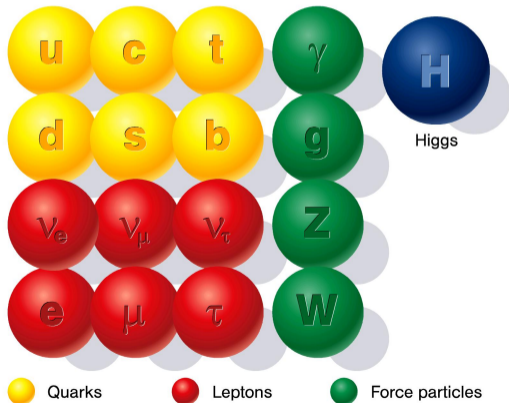
bozon  
cechowania ( $s=1$ )  $\rightarrow$  gaugino ( $s=\frac{1}{2}$ )

Higgs ( $s=0$ )  $\rightarrow$  higgsino ( $s=\frac{1}{2}$ )

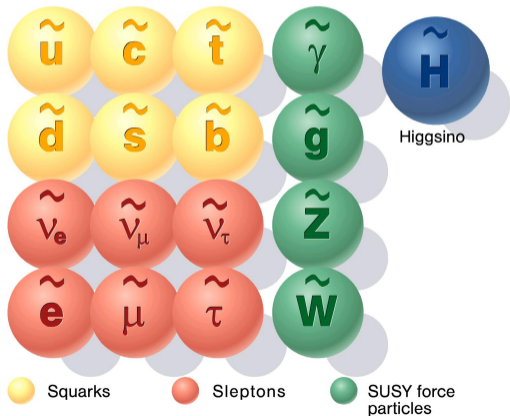
## Widmo cząstek

W pierwszym przybliżeniu podwajamy liczbę cząstek w modelu

### Standard particles



### SUSY particles



## Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów

## Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- Skwarki i leptoni mają zerowy spin więc musi ich być więcej!
- ⇒ Dla każdego kwarku i leptonu (o spinie  $1/2$ ) musimy więc mieć dwie nowe cząstki (przykładowo  $\tilde{e}_L$  i  $\tilde{e}_R$ ), które są partnerami dwóch stanów spinowych  $e_L$  i  $e_R$ 
  - ⇒ różne cząstki !!! (choć mogą mieć tę samą masę)

## Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- Skwarki i leptoni mają zerowy spin więc musi ich być więcej!
- ⇒ Dla każdego kwarku i leptonu (o spinie 1/2) musimy więc mieć dwie nowe cząstki (przykładowo  $\tilde{e}_L$  i  $\tilde{e}_R$ ), które są partnerami dwóch stanów spinowych  $e_L$  i  $e_R$   
⇒ różne cząstki !!! (choć mogą mieć tą samą masę)
- Aby nadać masy większej liczbie cząstek musimy “rozszerzyć” sektor Higgsa  
⇒ potrzebne dwa dublety pól Higgsa ⇒  $8 - 3 = 5$  cząstek:
  - $h^\circ$  lekki Higgs skalarny
  - $H^\circ$  ciężki Higgs skalarny
  - $A^\circ$  Higgs pseudoskalarny
  - $H^\pm$  2 naładowane Higgisy

## Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- Skwarki i leptoni mają zerowy spin więc musi ich być więcej!
- ⇒ Dla każdego kwarku i leptonu (o spinie 1/2) musimy więc mieć dwie nowe cząstki (przykładowo  $\tilde{e}_L$  i  $\tilde{e}_R$ ), które są partnerami dwóch stanów spinowych  $e_L$  i  $e_R$   
⇒ różne cząstki !!! (choć mogą mieć tę samą masę)
- Aby nadać masy większej liczbie cząstek musimy “rozszerzyć” sektor Higgsa  
⇒ potrzebne dwa dublety pól Higgsa ⇒  $8 - 3 = 5$  cząstek:

- $h^\circ$  lekki Higgs skalarny
- $H^\circ$  ciężki Higgs skalarny
- $A^\circ$  Higgs pseudoskalarny
- $H^\pm$  2 naładowane Higgisy

dotatkowo 4 higgsina:  $\tilde{H}_1^\circ, \tilde{H}_2^\circ, \tilde{H}^\pm$



## Przewidywania

Superymetria pozwala wytłumaczyć wiele zagadek:

- dlaczego kwark  $t$  jest taki ciężki
- dlaczego bozon Higgsa  $h$  jest taki lekki
- co to jest “ciemna materia” (cząstki supersymetryczne)
- dlaczego znikła antymateria (dodatkové mechanizmy łamania CP)

## Przewidywania

Superymetria pozwala wytłumaczyć wiele zagadek:

- dlaczego kwark  $t$  jest taki ciężki
- dlaczego bozon Higgsa  $h$  jest taki lekki
- co to jest “ciemna materia” (cząstki supersymetryczne)
- dlaczego znikła antymateria (dodatkowe mechanizmy łamania CP)

Jednocześnie powinniśmy obserwować w eksperymentach na skali  $\sim 1\text{TeV}$

- dziesiątki nowych cząstek (do odkrycia)
- setki kanałów produkcji (do wykorzystania)
- tysiące kanałów rozpadu (do sprawdzenia !!!)

## Przewidywania

Superymetria pozwala wytłumaczyć wiele zagadek:

- dlaczego kwark  $t$  jest taki ciężki
- dlaczego bozon Higgsa  $h$  jest taki lekki
- co to jest “ciemna materia” (cząstki supersymetryczne)
- dlaczego znikła antymateria (dodatkowe mechanizmy łamania CP)

Jednocześnie powinniśmy obserwować w eksperymentach na skali  $\sim 1\text{TeV}$

- dziesiątki nowych cząstek (do odkrycia)
- setki kanałów produkcji (do wykorzystania)
- tysiące kanałów rozpadu (do sprawdzenia !!!)

To bogactwo ma jednak swoją cenę:

nawet minimalne rozszerzenie Modelu Standardowego

**MSSM** - Minimal Supersymmetric Standard Model

ma **124** (!) wolne parametry...

“Supersymmetry...  
has generated so many thousands of papers it must be correct”  
Shelly Glashow



## Przewidywania

Supersymetria (SUSY) wydawała się być **idealną** teorią **rozszerzającą Model Standardowy** i rozwiązującą szereg problemów.

Rozwijana od **około 50 lat** została dopracowana w najdrobniejszych szczegółach (**praktycznie na równi z Modelem Standardowym**)

Od początku była jednym z **główny argumentów** (obok poszukiwania bozonu Higgsa) **za budowę LHC**. Obiecywano nam “kaskady” cząstek supersymetrycznych, które w wysokich energiach powinny się produkować równie chętnie co “zwykłe” cząstki...

## Przewidywania

Supersymetria (SUSY) wydawała się być **idealną** teorią **rozszerzającą Model Standardowy** i rozwiązującą szereg problemów.

Rozwijana od **około 50 lat** została dopracowana w najdrobniejszych szczegółach (**praktycznie na równi z Modelem Standardowym**)

Od początku była jednym z **główny argumentów** (obok poszukiwania bozonu Higgsa) **za budowę LHC**. Obiecywano nam “kaskady” cząstek supersymetrycznych, które w wysokich energiach powinny się produkować równie chętnie co “zwykłe” cząstki...

Niestety, **ponad dziesięć lat** po uruchomieniu LHC wciąż nie widać najmniejszego śladu supersymetrii, **żadnych odstępstw** od Modelu Standardowego...

Eksperymenty przy LHC “produkują” co roku setki publikacji, ale są to głównie tzw. ograniczenia/wykluczenia - piszemy czego nie widzimy...

## ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

July 2024

ATLAS Preliminary  
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$

	Model	Signature	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference			
Inclusive Searches	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$ mono-jet	2-6 jets 1-3 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140 $E_{\text{miss}}^{\text{max}}$ 140	$\tilde{q}$ [1x, 8x Degrad.] 1.0 $\tilde{q}$ [8x Degrad.] 1.85	$m(\tilde{\tau}_1^0) < 400 \text{ GeV}$ $m(\tilde{q}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5 \text{ GeV}$	2010.14293 2102.10874	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow g\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	2-6 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ 2.3 Forbidden 1.15-1.95	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 0 \text{ GeV}$ $m(\tilde{g}) = 1000 \text{ GeV}$	2010.14293 2010.14293	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow g\tilde{W}\tilde{\chi}_1^0$	1 $e, \mu$	2-6 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ 2.2	$m(\tilde{\tau}_1^0) < 600 \text{ GeV}$	2101.01629	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow g\tilde{W}(\ell\ell)\tilde{\chi}_1^0$	$ee, \mu\mu$	2 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ 2.2	$m(\tilde{\tau}_1^0) < 700 \text{ GeV}$	2204.13072	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow gqWZ\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	7-11 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ 1.97	$m(\tilde{\tau}_1^0) < 600 \text{ GeV}$	2008.06032	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qqWZ\tilde{\chi}_1^0$	SS $e, \mu$	6 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ 1.15	$m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 200 \text{ GeV}$	2307.01094	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\bar{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$ SS $e, \mu$	3 $b$ 6 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140 $E_{\text{miss}}^{\text{max}}$ 140	$\tilde{g}$ 2.45	$m(\tilde{\tau}_1^0) < 500 \text{ GeV}$ $m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 300 \text{ GeV}$	2211.08028 1908.08457	
	$\tilde{\gamma}, \text{gen. squarks}$ direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1$	0 $e, \mu$	2 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{b}_1$ 1.255 0.68	$m(\tilde{\tau}_1^0) < 400 \text{ GeV}$ $10 \text{ GeV} < \Delta m(\tilde{b}_1, \tilde{\chi}_1^0) < 20 \text{ GeV}$	2101.12527 2101.12527
		$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{W}\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow bb\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	6 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{b}_1$ 0.23-1.35 Forbidden	$\Delta m(\tilde{\tau}_1^0, \tilde{\chi}_1^0) = 130 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}_1^0) = 100 \text{ GeV}$ $\Delta m(\tilde{\tau}_1^0, \tilde{\chi}_1^0) = 130 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}_1^0) = 0 \text{ GeV}$	1908.03122 2103.08189
		$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	$\geq 1$ jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 1.25	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 1 \text{ GeV}$	2004.14066, 2012.03799
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$		1 $e, \mu$	3 jets/1 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 1.05	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 500 \text{ GeV}$	2012.03799, 2401.13430	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tau\tilde{b}\nu, \tau_1 \rightarrow \tau\tilde{G}$		1-2 $\tau$	2 jets/1 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 1.4	$m(\tilde{\tau}_1) = 800 \text{ GeV}$	2108.07665	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0 / \tilde{c}\tilde{c}, \tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$		0 $e, \mu$	2 $c$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 36.1 $E_{\text{miss}}^{\text{max}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.85	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 0 \text{ GeV}$	1805.01649	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0 / \tilde{c}\tilde{c}, \tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$		0 $e, \mu$	mono-jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.55	$m(\tilde{t}_1) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5 \text{ GeV}$	2102.10874	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \mu\tilde{Z}, \tilde{Z} \rightarrow Z/\tilde{H}\tilde{\chi}_1^0$		1-2 $e, \mu$	1-4 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.067-1.18	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 500 \text{ GeV}$	2006.05880	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \mu\tilde{Z}, \tilde{Z} \rightarrow Z/\tilde{H}\tilde{\chi}_1^0$		3 $e, \mu$	1 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ 0.86	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 360 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_1) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 40 \text{ GeV}$	2006.05880	
EW direct		$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via WZ	Multiple $\ell/\text{jets}$ $ee, \mu\mu$	$\geq 1$ jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140 $E_{\text{miss}}^{\text{max}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 0.96 $\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 0.205	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 0, \text{wino-bino}$ $m(\tilde{\tau}_1^0) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5 \text{ GeV}, \text{wino-bino}$	2106.01676, 2108.07586 1911.12606
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via WW	2 $e, \mu$	$\geq 1$ jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.42	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 0, \text{wino-bino}$	1908.08215	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via Wh	Multiple $\ell/\text{jets}$	$\geq 1$ jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 1.06	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 70 \text{ GeV}, \text{wino-bino}$	2004.10894, 2108.07586	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$	2 $e, \mu$	$\geq 1$ jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 1.0	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 0.5(m(\tilde{\tau}_1^0) + m(\tilde{\chi}_1^0))$	1908.08215	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$	2	$\geq 1$ jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 0.35, 0.5	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 0$	2402.00603	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$	2 $e, \mu$	0 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 0.7	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 0$	1908.08215	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$	2 $e, \mu$	$\geq 1$ jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 0.26	$m(\tilde{\tau}_1^0) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 10 \text{ GeV}$	1911.12606	
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow h\tilde{G}/Z\tilde{G}$	0 $e, \mu$ $ee, \mu\mu$	$\geq 3$ $b$ 0 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140 $E_{\text{miss}}^{\text{max}}$ 140	$\tilde{H}$ 0.94	$\text{BR}(\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow h\tilde{G}) = 1$	2401.14922	
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow h\tilde{G}/Z\tilde{G}$	0 $e, \mu$	$\geq 2$ large jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{H}$ 0.55, 0.45-0.93	$\text{BR}(\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\tilde{G}) = 1$	2103.11684	
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow h\tilde{G}/Z\tilde{G}$	2 $e, \mu$	$\geq 2$ jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{H}$ 0.77	$\text{BR}(\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\tilde{G}) - \text{BR}(\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow h\tilde{G}) = 0.5$	2204.13072	
Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	Disapp. trk	1 jet	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.66	Pure Wino Pure higgsino	2201.02472 2201.02472	
	Stable $\tilde{g}$ R-hadron	pixel dE/dx		$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ 2.05		2205.06013	
	Metastable $\tilde{g}$ R-hadron, $\tilde{g} \rightarrow gq\tilde{\chi}_1^0$	pixel dE/dx		$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ [r(t) = 10 ns] 2.2	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 100 \text{ GeV}$	2205.06013	
	$\tilde{\ell}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	Displ. lep		$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\ell}$ 0.74	$\tau(\tilde{\ell}) = 0.1 \text{ ns}$ $\tau(\tilde{\ell}) = 0.1 \text{ ns}$ $\tau(\tilde{\ell}) = 10 \text{ ns}$	ATLAS-CO NF-2024-011 ATLAS-CO NF-2024-011 2205.06013	
RPV	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via $Z\ell\ell$	3 $e, \mu$	0 jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 0.625	Pure Wino	2011.10543	
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ via $WW/Z\ell\ell\nu\nu$	4 $e, \mu$	$\geq 8$ jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0$ 0.95, 1.55	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 200 \text{ GeV}$	2103.11684	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow gq\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\tilde{q}$	Multiple	$\geq 8$ jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{g}$ [m( $\tilde{\chi}_1^0$ ) = 50 GeV, 1250 GeV] 1.6, 2.34	Large $A_{1,2}$	2401.16333	
	$\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow t\tilde{b}$	Multiple	$\geq 4b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 36.1	$\tilde{H}$ [A <sub>1,2</sub> = 2e-4, 1e-2] 0.55, 1.05	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 200 \text{ GeV}, \text{bino-like}$	ATLAS-CO NF-2018-003	
	$\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow b\tilde{b}$	Multiple	$\geq 4b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{H}$ 0.95	$m(\tilde{\tau}_1^0) = 500 \text{ GeV}$	2010.01015	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{b}$	2 $e, \mu$	2 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ [eq. 8v] 0.42, 0.61	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{q}) > 20\%$	1710.07171	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{q}$	2 $e, \mu$	2 $b$	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{t}_1$ [1e-10 < A <sub>1,2</sub> < 1e-8, 3e-10 < A <sub>1,2</sub> < 3e-9] 1.0, 1.6	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow q\tilde{q}) = 100\%, \text{csw} = 1$	2406.18367 2003.11956	
	$\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0/\tilde{A}_1/\tilde{A}_2, \tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow t\tilde{b}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow b\tilde{b}$	1-2 $e, \mu$	$\geq 6$ jets	$E_{\text{miss}}^{\text{min}}$ 140	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.2-0.32	Pure higgsino	2106.09609	

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models. For the full details, see the ATLAS SUSY searches.

- 1 Model Standardowy - przypomnienie
- 2 Problemy Modelu Standardowego
- 3 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 4 Supersymetria
- 5 Dodatkowe wymiary



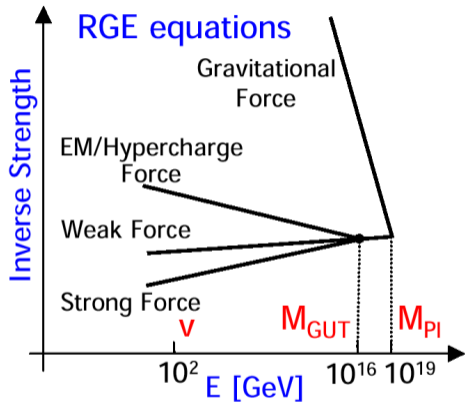
## Skala Plancka

Pełna unifikacja oddziaływań, z uwzględnieniem grawitacji, dopiero przy skali

$$M_{Pl} \sim \sqrt{\frac{hc}{G_N}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

co odpowiada skali odległości

$$R_{Pl} \sim 10^{-35} \text{ m}$$



Problem hierarchii w Modelu Standardowym: skale unifikacji znacznie większe od skal mas

$$M_{Pl} > M_{GUT} \gg M_h \sim M_W$$

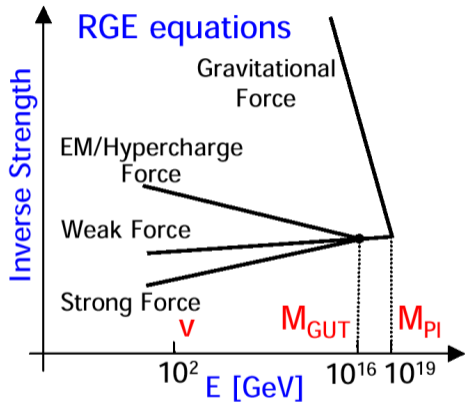
## Skala Plancka

Pełna unifikacja oddziaływań, z uwzględnieniem grawitacji, dopiero przy skali

$$M_{Pl} \sim \sqrt{\frac{hc}{G_N}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

co odpowiada skali odległości

$$R_{Pl} \sim 10^{-35} \text{ m}$$



Problem hierarchii w Modelu Standardowym: skale unifikacji znacznie większe od skal mas

$$M_{Pl} > M_{GUT} \gg M_h \sim M_W$$

Ale “biegnięcie” stałych sprzężenia jest takie “powolne” tylko przy 3 wymiarach przestrzennych...

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

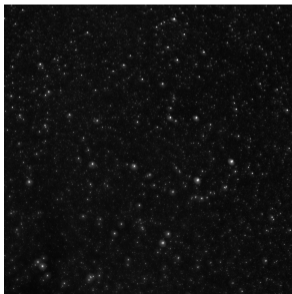
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

**NIE** - jeśli tylko nieskończone,

**TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo gwiazdy wydają nam się być punktowe (bezwymiarowe)



Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

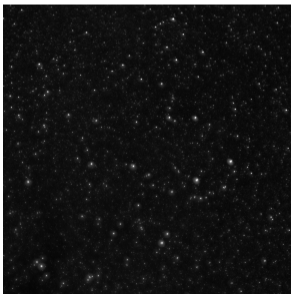
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

**NIE** - jeśli tylko nieskończone,

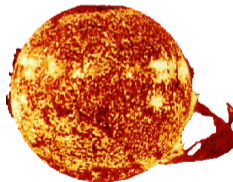
**TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo gwiazdy wydają nam się być punktowe (bezwymiarowe)



Ale wiemy, że w istocie są to ogromne obiekty, jak nasze Słońce:



Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

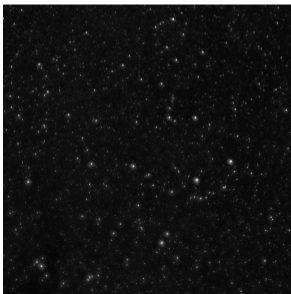
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

**NIE** - jeśli tylko nieskończone,

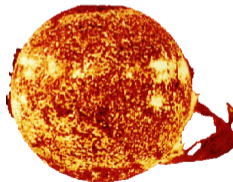
**TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo gwiazdy wydają nam się być punktowe (bezwymiarowe)



Ale wiemy, że w istocie są to ogromne obiekty, jak nasze Słońce:



Rozmiar gwiazdy zauważamy dopiero gdy przyglądamy się z rozdzielczością  $\Delta < R$

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

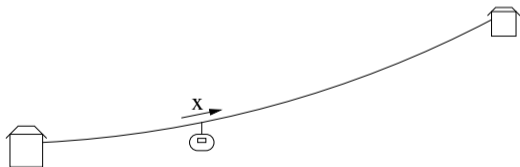
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

**NIE** - jeśli tylko nieskończone,

**TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## Przykład II

Gdy rozpatrujemy ruch wagonika kolejki linowej przyjmujemy, że lina ma tylko jeden wymiar  $x$ :



Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

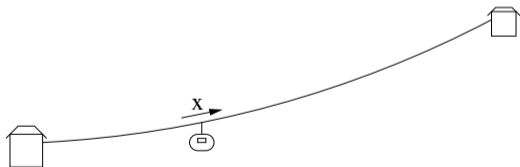
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

**NIE** - jeśli tylko nieskończone,

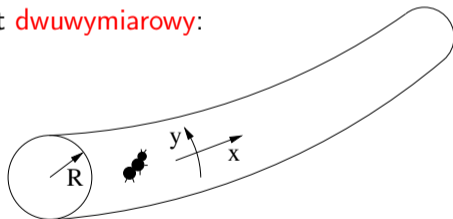
**TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## Przykład II

Gdy rozpatrujemy ruch wagonika kolejki linowej przyjmujemy, że lina ma tylko jeden wymiar  $x$ :



Ale dla mrówki, która idzie po tej linii jest to świat dwuwymiarowy:



$y$  jest współrzędną cykliczną.

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

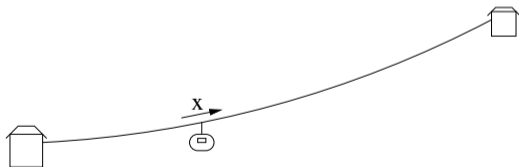
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

**NIE** - jeśli tylko nieskończone,

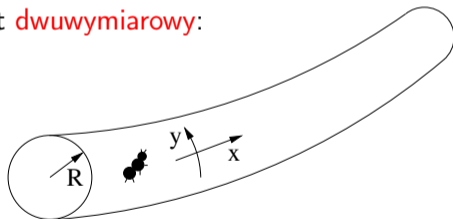
**TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## Przykład II

Gdy rozpatrujemy ruch wagonika kolejki linowej przyjmujemy, że lina ma tylko jeden wymiar  $x$ :



Ale dla mrówki, która idzie po tej linii jest to świat dwuwymiarowy:



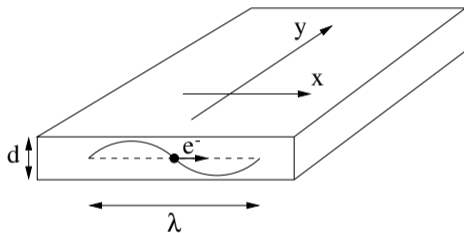
$y$  jest współrzędną cykliczną.

Drugą współrzędną zauważamy dopiero gdy przyglądamy się z rozdzielczością  $\Delta < R$



### Przykład III

Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



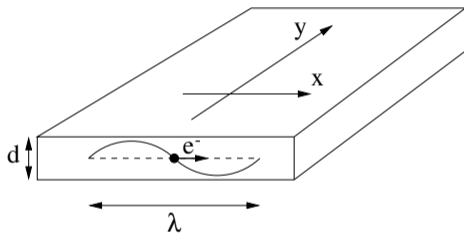
Jeśli długość fali elektronu  $\lambda \gg d$

$\Rightarrow$  ruch dwuwymiarowy.

Ruch w kierunku prostopadłym **nie dostępny** energetycznie. (kwantowy efekt Halla).

### Przykład III

Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:

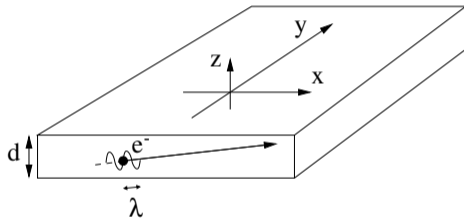


Jeśli długość fali elektronu  $\lambda \gg d$

⇒ ruch **dwuwymiarowy**.

Ruch w kierunku prostopadłym **nie dostępny** energetycznie. (**kwantowy efekt Halla**).

Ale jeśli w tej samej warstwie metalu znajdzie się wysoko-energetyczny elektron ( $\lambda < d$ )



jego ruch musimy opisywać w **trzech wymiarach**...

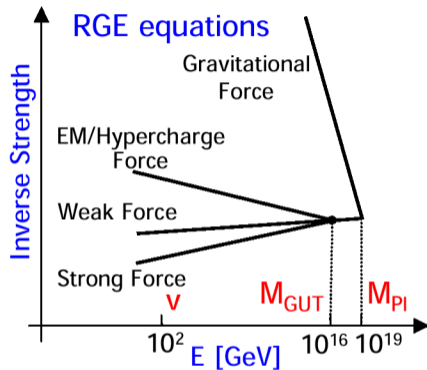
⇒ “odczuwalna” liczba wymiarów zależy od energii...

## Skala unifikacji

Przyjmijmy, że nasz świat jest  $1 + 3 + n$  wymiarowy (dodajemy  $n$  skończonych wymiarów przestrzennych o rozmiarze  $R$ ).

Gdy badamy oddziaływania na “dużych” odległościach  $r \gg R$ , siła grawitacyjna będzie zależeć jak:

$$F_G \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



## Skala unifikacji

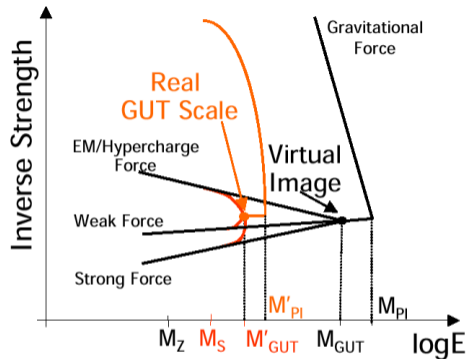
Przyjmijmy, że nasz świat jest  $1 + 3 + n$  wymiarowy (dodajemy  $n$  skończonych wymiarów przestrzennych o rozmiarze  $R$ ).

Gdy badamy oddziaływania na “dużych” odległościach  $r \gg R$ , siła grawitacyjna będzie zależeć jak:

$$F_G \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ale gdy badamy na małych odległościach (wysokie energie)

$$F_G \sim \frac{m_1 m_2}{r^{2+n}}$$



W wysokich energiach stałe sprzężenia biegną dużo szybciej

⇒ prawdziwa skala unifikacji może być dużo niższa niż nam się wydaje...

Precyzyjne pomiary fizyki cząstek **wykluczyły** praktycznie istnienie “zwykłych” dodatkowych wymiarów (**otwartych dla wszystkich cząstek**).

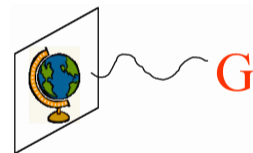
Musimy wprowadzić pewne modyfikacje. Dwa “popularne” scenariusze:

**Model ADD** Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

Cząstki **Modelu Standardowego** “żyją” w **1+3** wymiarach

**Dodatkowe** wymiary dostępne są tylko dla **grawitonów**

⇒ grawitacja **słaba** bo “ucieka” w dodatkowe wymiary...

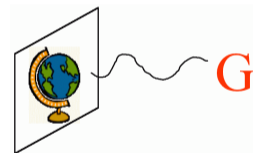


Precyzyjne pomiary fizyki cząstek **wykluczyły** praktycznie istnienie “zwykłych” dodatkowych wymiarów (**otwartych dla wszystkich cząstek**).

Musimy wprowadzić pewne modyfikacje. Dwa “popularne” scenariusze:

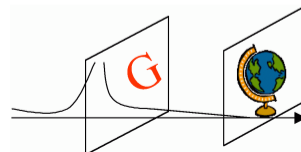
## **Model ADD** Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

Cząstki **Modelu Standardowego** “żyją” w **1+3** wymiarach  
**Dodatkowe** wymiary dostępne są tylko dla **grawitonów**  
⇒ grawitacja **słaba** bo “ucieka” w dodatkowe wymiary...

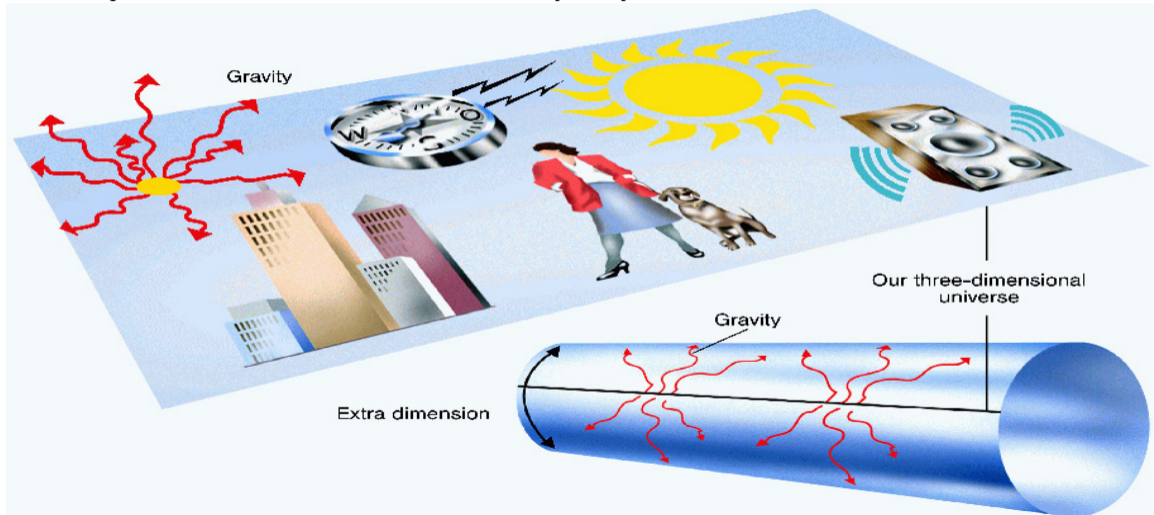


## **Model R-S** Randal, Sundrum (1999)

Tylko **jeden** dodatkowy **wymiar**, ale bardziej skomplikowany.  
**Grawitacja** silna na równoległej “ścianie”, jest **tłumiona** w “naszym” świecie.



Grawitacja słaba, bo “ucieka” w dodatkowe wymiary...



## Przewidywania

Modele z dodatkowymi wymiarami **rozwiązują problem hierarchii** przez drastyczne **obniżenie skali unifikacji**. Dodatkowo pojawiają się nowe cząstki:

- stany wzbudzone cząstek Modelu Standardowego  
(**ruch w dodatkowych wymiarach**)
- grawiton i jego stany wzbudzone
- możemy też wyprodukować... mikroskopijne **czarne dziury**



## Przewidywania

Modele z dodatkowymi wymiarami **rozwiązują problem hierarchii** przez drastyczne **obniżenie skali unifikacji**. Dodatkowo pojawiają się nowe cząstki:

- stany wzbudzone cząstek Modelu Standardowego (ruch w dodatkowych wymiarach)
- grawiton i jego stany wzbudzone
- możemy też wyprodukować... mikroskopijne **czarne dziury**

Czarne dziury produkowane w zderzeniach cząstek byłyby bardzo małe i niestabilne, rozpadałyby się (“parowały”) natychmiast po powstaniu.

⇒ ich produkcja nie niesłaby żadnych zagrożeń...

Byłyby też licznie produkowane przez promieniowanie kosmiczne zderzające się z jądrami tlenu i azotu w atmosferze Ziemi od miliardów lat...

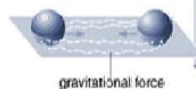
W USA protestowano przeciwko uruchomieniu akceleratora RHIC, bo przeciwnicy obawiali się produkcji **czarnej dziury**, która **pochłonie Ziemię**...

## Black Holes on Demand

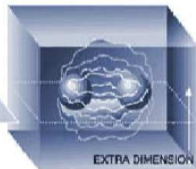
NYT, September 11, 2001 The New York Times

Scientists are exploring the possibility of producing miniature black holes on demand by smashing particles together. Their plans hinge on the theory that the universe contains more than the three dimensions of everyday life. Here's the idea:

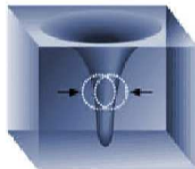
*Particles collide in three dimensional space, shown below as a flat plane.*



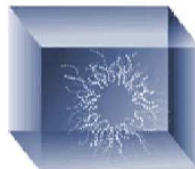
As the particles approach in a particle accelerator, their gravitational attraction increases steadily.



When the particles are extremely close, they may enter space with more dimensions, shown above as a cube.



The extra dimensions would allow gravity to increase more rapidly so a black hole can form.



Such a black hole would immediately evaporate, sending out a unique pattern of radiation.

Podobne protesty miały miejsce w Europie przed uruchomieniem LHC...

## Podsumowanie

Wiele obserwacji wskazuje na to, że Model Standardowy nie jest jeszcze “Ostateczną Teorią Wszystkiego”. Nie potrafimy odpowiedzieć na wszystkie pytania...

Szukamy **bardziej fundamentalnej, ogólniejszej teorii**, która opíše wszystkie znane procesy i rozwiąże wszystkie problemy teoretyczne...

## Podsumowanie

Wiele obserwacji wskazuje na to, że Model Standardowy nie jest jeszcze “Ostateczną Teorią Wszystkiego”. Nie potrafimy odpowiedzieć na wszystkie pytania...

Szukamy **bardziej fundamentalnej, ogólniejszej teorii**, która opíše wszystkie znane procesy i rozwiąże wszystkie problemy teoretyczne...

Istnieją dziesiątki modeli teoretycznych, które **rozszerzają lub zastępują Model Standardowy** fizyki cząstek, proponują nowy opis Wszechświata...

Niestety, mimo wielu wysiłków **nie ma do tej pory** żadnych **obserwacji** bezpośrednio potwierdzających ich przewidywania ...

**Nie licząc pośrednich obserwacji ciemnej materii we Wszechświecie, itp.**