

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów Poza Modelem Standardowym

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



27 lipca 2021

## Termin

- 30 lipca 2021 (piątek), godz. 10:15-11:45 (godziny wykładu)

## Informacje szczegółowe

- na platformie Kampus, tak jak testy wykładowe  
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
- Obecność na wykładzie  
więcej niż 3 nieusprawiedliwione nieobecności  $\Rightarrow$  obniżona ocena

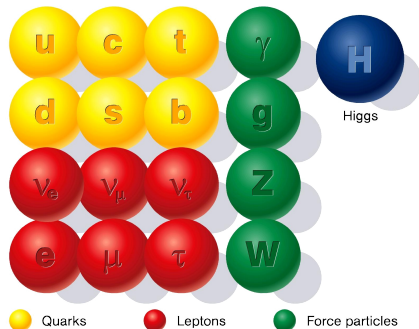
- 1 Problemy Modelu Standardowego
- 2 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 3 Supersymetria
- 4 Dodatkowe wymiary

## 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 Higgsa  
konieczny dla  
spójności modelu

“Nadaje masy”  
wszystkim cząstkom



## Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie tzw. 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...

- 1 Problemy Modelu Standardowego
- 2 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 3 Supersymetria
- 4 Dodatkowe wymiary

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

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

## Problemy wynikające z obserwacji

- Gdzie się podziała **antymateria** ?
- Jakie są źródła **łamania CP** ?
- Jaka jest natura **neutrin** ?
- 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 wynikające z obserwacji

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

## Obserwacje kosmologiczne: poprzedni wykład

- 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.**

Podobnie 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.**

**Podobnie jak Model Fermiego był przybliżeniem Modelu Weingerg'a-Salam'a oddziaływań słabych...**

Fizycy teoretycy od prawie 50 lat prześcigają się w proponowaniu coraz to dziwniejszych modeli, które miałyby lepiej opisywać rzeczywistość...

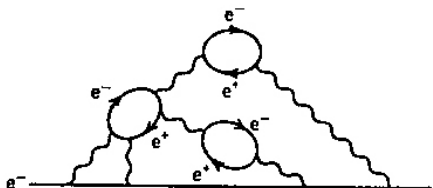
Fizycy doświadczalnicy budują coraz to wymyślniejsze urządzenia, żeby szukać śladów “nowej fizyki”...

- 1 Problemy Modelu Standardowego
- 2 Teorie Wielkiej Unifikacji**
- 3 Supersymetria
- 4 Dodatkowe wymiary

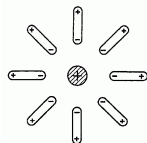
## Ładunek elementarny

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

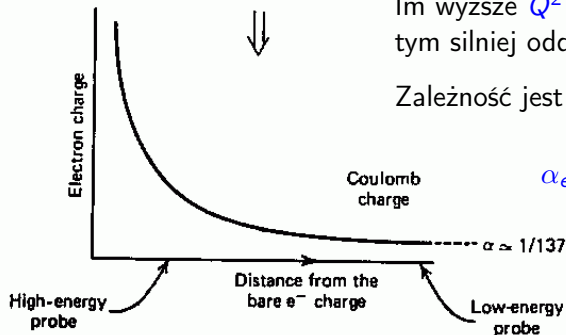
“Tablicowa” wartość stałej struktury subtelnej  $\alpha_{em}$  odpowiada oddziaływaniu na duże odległości, czyli z przekazem energii  $Q^2 \rightarrow 0$ :



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

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

Zależność jest jednak bardzo słaba:

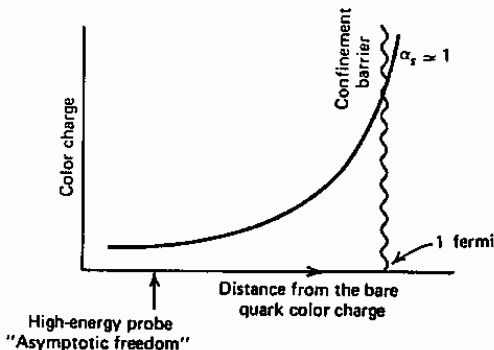


$$\alpha_{em}(M_Z^2) \approx \frac{1}{128}$$

## Biegąca stała sprzężenia QCD

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

Obecność pętli gluonowych zmienia jednak charakter zależności:



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:

$$\alpha_s \approx 0.118$$

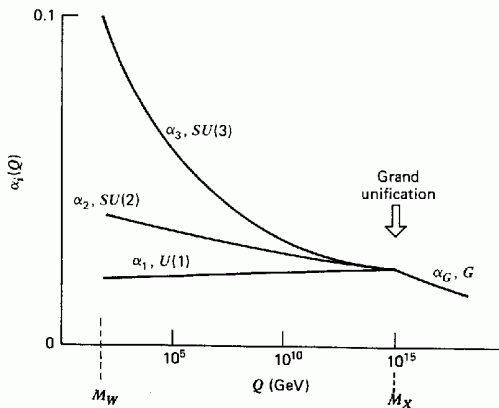
$$\alpha_{em} \approx 0.0078$$

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

Jednak ze wzrostem energii

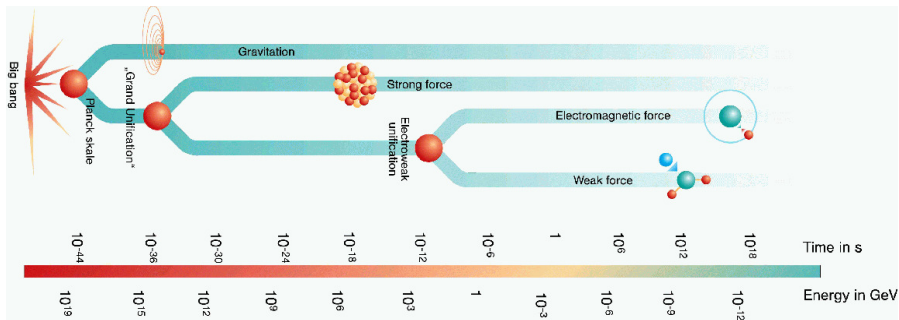
$\alpha_{em}$  rośnie, natomiast  $\alpha_s$  maleje

Dla skal energii  $\sim 10^{15}$  GeV spodziewamy się **unifikacji** 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**...

## 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 między stanami danego multipletu.

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

Masa bozonu  $X$  jest skalą unifikacji:

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

## Kwintet SU(5)

	$d_R^{\text{red}}$	$d_R^{\text{green}}$	$d_R^{\text{blue}}$	$e_R^+$	$\bar{\nu}_e$
$d_R^{\text{red}}$	$g^0, \gamma, Z^0$	$g^{r \rightarrow g}$	$g^{r \rightarrow b}$	$\chi_{-\frac{2}{3}}^{\text{red}}$	$\chi_{-\frac{1}{3}}^{\text{red}}$
$d_R^{\text{green}}$	$g^{g \rightarrow r}$	$g^0, \gamma, Z^0$	$g^{g \rightarrow b}$	$\chi_{-\frac{2}{3}}^{\text{green}}$	$\chi_{-\frac{1}{3}}^{\text{green}}$
$d_R^{\text{blue}}$	$g^{b \rightarrow r}$	$g^{b \rightarrow g}$	$g, \gamma, Z^0$	$\chi_{-\frac{2}{3}}^{\text{blue}}$	$\chi_{-\frac{1}{3}}^{\text{blue}}$
$e_R^+$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{red}}$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{green}}$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{blue}}$	$\gamma, Z^0$	$W^+$
$\bar{\nu}_e$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{red}}$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{green}}$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{blue}}$	$W^-$	$Z^0$

Dlatego nie zauważyliśmy jeszcze tych dodatkowych oddziaływań...

## Rozpad protonu

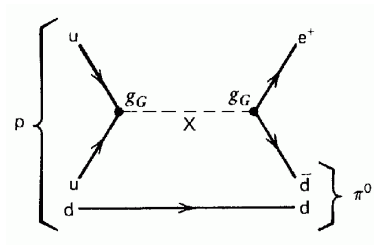
Model  $SU(5)$  przewiduje rozpad protonu

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

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

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

Są też możliwe inne kanały rozpadu...



## Rozpad protonu

Model  $SU(5)$  przewiduje rozpad protonu

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

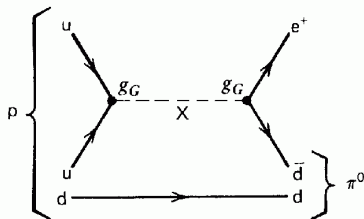
$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

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

Są też możliwe inne kanały rozpadu...

Dla poszukiwania rozpadu protonu zbudowano szereg eksperymentów, m.in. Super Kamiokande (!). Niestety wyniki wszystkich dotychczasowych poszukiwań są negatywne. Obecne ograniczenie ( $p \rightarrow e^+ \pi^0$ ):

$$\tau_p > 1.6 \cdot 10^{34} \text{ lat}$$



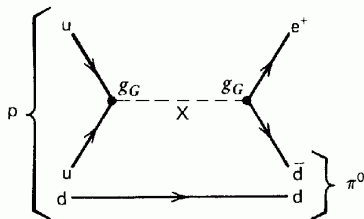


## Rozpad protonu

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 poszukiwania rozpadu protonu zbudowano szereg eksperymentów, m.in. Super Kamiokande (!). Niestety wyniki wszystkich dotychczasowych poszukiwań są negatywne. Obecne ograniczenie ( $p \rightarrow e^+ \pi^0$ ):

$$\tau_p > 1.6 \cdot 10^{34} \text{ lat}$$

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

- 1 Problemy Modelu Standardowego
- 2 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 3 Supersymetria**
- 4 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

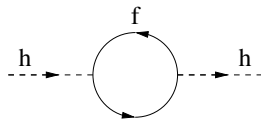
Masa Planka ( $M_{Pl}$ ):

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 Higgsa:



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

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

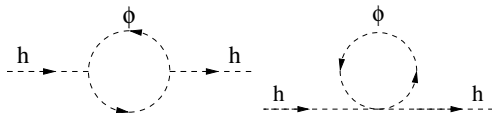
$\Rightarrow$  “problem hierarchii”

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 wprowadzimy 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

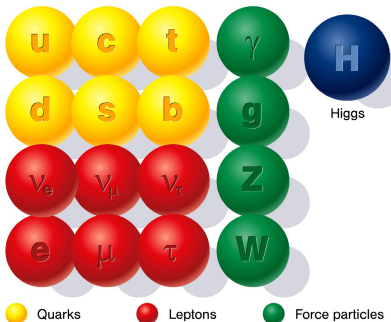
bozon  
cechowania ( $s = 1$ )  $\rightarrow$  gaugino ( $s = \frac{1}{2}$ )

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

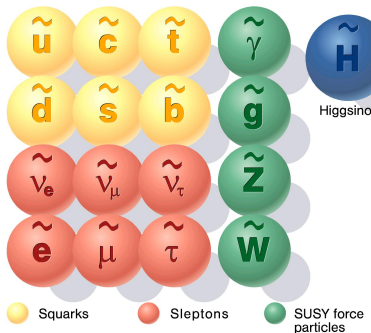
## Widmo cząstek

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 leptony 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)



## Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- Skwarki i leptony 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 leptony 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

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 (dodatkowe 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 zanikła 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

June 2021

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 13$  TeV

Model	Signature	$\int \mathcal{L} dt$ (fb $^{-1}$ )	Mass limit	Reference							
Inclusive Searches	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{q}^0$	0 $\epsilon, \mu$ mono-jet	2.6 jets 1-3 jets	$E_T^{min}$ $E_T^{min}$	139 139	$\tilde{q}$ [1% flux Degen] $\tilde{q}$ [5% Degen]	1.0 0.9	1.85	$m(\tilde{q}) < 400$ GeV $m(\tilde{g}) \cdot m(\tilde{t}) > 5$ GeV	2010.14293 2102.10874	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{t}_1^0$	0 $\epsilon, \mu$ 2.6 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{g}$	Forbidden	1.15-1.95	2.3	$m(\tilde{t}) > 0$ GeV $m(\tilde{t}) = 1000$ GeV	2010.14293 2010.14293	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}W\tilde{t}_1^0$	1 $\epsilon, \mu$ 2.6 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{g}$			2.2	$m(\tilde{t}) < 600$ GeV	2101.01629	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}(t\bar{t})\tilde{t}_1^0$	$\epsilon, \mu, \tau$ 2 jets	$E_T^{min}$	36.1	$\tilde{g}$			1.2	$m(\tilde{g}) \cdot m(\tilde{t}) > 50$ GeV	1805.11381	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}WZ\tilde{t}_1^0$	0 $\epsilon, \mu$ 7-11 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{g}$			1.97	$m(\tilde{t}) < 800$ GeV	2006.06032	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}WZ\tilde{t}_1^0$	SS $\epsilon, \mu$ 6 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{g}$			1.15	$m(\tilde{g}) \cdot m(\tilde{t}) > 200$ GeV	1909.08457	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\bar{t}\tilde{t}_1^0$	0-1 $\epsilon, \mu$ 3 $\beta$	$E_T^{min}$	70.8	$\tilde{g}$			2.25	$m(\tilde{t}) < 200$ GeV	ATLAS-CONF-2018-041	
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\bar{t}\tilde{t}_1^0$	SS $\epsilon, \mu$ 6 jets	$E_T^{min}$ $E_T^{min}$	139 139	$\tilde{g}$			1.25	$m(\tilde{g}) \cdot m(\tilde{t}) > 300$ GeV	1909.08457	
	$\gamma\gamma$ ann. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1$	0 $\epsilon, \mu$ 2 $b$	$E_T^{min}$	139	$\tilde{b}_1$ $\tilde{b}_1$	0.68	1.255	$m(\tilde{t}) < 400$ GeV 10 GeV $\cdot$ $\Delta m(\tilde{b}_1, \tilde{t}_1) > 20$ GeV	2101.12527 2101.12527	
		$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{t}_1^0 \rightarrow bW\tilde{t}_1^0$	0 $\epsilon, \mu$ 6 $\beta$	$E_T^{min}$	139	$\tilde{b}_1$	Forbidden	0.23-1.35	$\Delta m(\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0) > 130$ GeV, $m(\tilde{t}_1^0) > 150$ GeV $\Delta m(\tilde{t}_1^0, \tilde{t}_1^0) > 130$ GeV, $m(\tilde{t}_1^0) > 150$ GeV	1908.03122 ATLAS-CONF-2020-031	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{q}^0$		0-1 $\epsilon, \mu$ $\geq 1$ jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1$			1.25	$m(\tilde{t}_1^0) > 1$ GeV	2004.14060, 2012.03799	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow W\tilde{q}^0$		1 $\epsilon, \mu$ 3 jets/1 $b$	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1$	Forbidden	0.65		$m(\tilde{t}_1^0) < 500$ GeV	2012.03799	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{b}, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{c}$		1-2 $\tau$ 2 jets/1 $b$	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1$	Forbidden		1.4	$m(\tilde{t}_1^0) < 800$ GeV	ATLAS-CONF-2021-008	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{c}, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{b}$		0 $\epsilon, \mu$ 2 $c$	$E_T^{min}$	36.1	$\tilde{t}_1$		0.85		$m(\tilde{t}_1^0) < 0$ GeV	1805.01849	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{c}, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{b}$		0 $\epsilon, \mu$ mono-jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1$		0.55		$m(\tilde{t}_1, \tilde{t}_2) \cdot m(\tilde{t}_1) > 5$ GeV	2102.10874	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{c}, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{b}$		1-2 $\epsilon, \mu$ 1-4 $b$	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1$		0.067-1.18		$m(\tilde{t}_1^0) < 500$ GeV	2006.05880	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{c}, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{b}$		2 $\epsilon, \mu$ 1 $b$	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1$	Forbidden	0.86		$m(\tilde{t}_1^0) < 360$ GeV, $m(\tilde{t}_1) \cdot m(\tilde{t}_2) < 40$ GeV	2006.05880	
EW direct		$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via WZ	Multiple $\ell$ / jets $\epsilon, \mu, \tau$	$\geq 1$ jet	$E_T^{min}$ $E_T^{min}$	139 139	$\tilde{t}_1^+ \tilde{t}_1^0$ $\tilde{t}_1^+ \tilde{t}_1^0$	0.205	0.96	$m(\tilde{t}_1^0) < 0$ , wino-bino $m(\tilde{t}_1^+) \cdot m(\tilde{t}_1^0) > 5$ GeV, wino-bino	2106.01676, ATLAS-CONF-2021-022 1911.12606
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via WW	2 $\epsilon, \mu$	1 jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$	0.42		$m(\tilde{t}_1^0) < 0$ , wino-bino	1908.08215	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via Wb	Multiple $\ell$ / jets	1 jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$	Forbidden	1.06	$m(\tilde{t}_1^0) > 70$ GeV, wino-bino $m(\tilde{t}_1^+) \cdot m(\tilde{t}_1^0) > 5$ GeV	2004.10894, ATLAS-CONF-2021-022	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	2 $\epsilon, \mu$	1 jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$	Forbidden	1.0	$m(\tilde{t}_1^+) \cdot m(\tilde{t}_1^0) > 5$ GeV	1908.08215	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	2 $\tau$	1 jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$	$\Phi$ [ $\tilde{t}_1^+, \tilde{t}_1^0$ ]	0.16-0.3	0.12-0.39	$m(\tilde{t}_1^0) < 0$	1911.06860
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	2 $\epsilon, \mu$ 0 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$		0.256	0.7	$m(\tilde{t}_1^0) < 0$	1908.08215	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	2 $\epsilon, \mu$ $\geq 1$ jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$				$m(\tilde{t}_1^0) \cdot m(\tilde{t}_1^+) > 10$ GeV	1911.12606	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	0 $\epsilon, \mu$ 0 jets	$E_T^{min}$	36.1	$\tilde{t}_1^+$		0.13-0.23	0.29-0.88	$BR(\tilde{t}_1^+ \rightarrow u\tilde{t}_1^0) < 1$	1806.04030	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	4 $\epsilon, \mu$ 0 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$		0.55	0.45-0.93	$BR(\tilde{t}_1^+ \rightarrow Z\tilde{t}_1^0) < 1$ $BR(\tilde{t}_1^+ \rightarrow 2\tilde{t}_1^0) < 1$	2103.11684	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	0 $\epsilon, \mu$ $\geq 2$ large jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$					ATLAS-CONF-2021-022	
Long-lived particles	Direct $\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ prod., long-lived $\tilde{t}_1^0$	Disapp. tripp	1 jet	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$ $\tilde{t}_1^0$	0.21	0.66	Pure Wino Pure Higgsino	ATLAS-CONF-2021-015 ATLAS-CONF-2021-015	
	Stable $\tilde{g}$ R-hadron	Multiple			36.1	$\tilde{g}$		2.0		1932.01636, 1808.04095	
	Metastable $\tilde{g}$ R-hadron, $\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{t}_1^0$	Multiple			36.1	$\tilde{g}$	[ $\tilde{g}$ ] ( $\tilde{g}$ ) $\geq 10$ ns, 0.2 RH	2.05, 2.4	$m(\tilde{t}_1^0) > 100$ GeV	1710.04901, 1808.04095	
RPV	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	Displ. lep		$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$ $\tilde{t}_1^0$	0.34	0.7	$m(\tilde{t}_1^0) < 0.1$ ns $m(\tilde{t}_1^+) < 0.1$ ns	2011.07812 2011.07812	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	3 $\epsilon, \mu$	0 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$	0.625	1.05	Pure Wino	2011.18543	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	4 $\epsilon, \mu$	0 jets	$E_T^{min}$	139	$\tilde{t}_1^+$	[ $\tilde{t}_1^+$ ] ( $\tilde{t}_1^+$ ) $\geq 10$ ns, $BR(\tilde{t}_1^+ \rightarrow \tilde{t}_1^0) < 1$	0.99	1.55	$m(\tilde{t}_1^0) < 200$ GeV	2103.11684
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	4-5 large jets			36.1	$\tilde{t}_1^+$	[ $\tilde{t}_1^+$ ] ( $\tilde{t}_1^+$ ) $\geq 200$ GeV, $\tau < 1100$ GeV	1.3	1.9	Large $\tilde{t}_1^+$	1804.03568
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	Multiple			36.1	$\tilde{t}_1^+$	[ $\tilde{t}_1^+$ ] ( $\tilde{t}_1^+$ ) $\geq 4 \cdot 16 \cdot 2$	0.95	1.05	$m(\tilde{t}_1^0) < 200$ GeV, $\tilde{t}_1^+ \rightarrow b\tilde{t}_1^0$	ATLAS-CONF-2018-003
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	$\geq 4b$			139	$\tilde{t}_1^+$	Forbidden	0.95	$m(\tilde{t}_1^0) < 500$ GeV	2010.01015	
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	2 jets + 2 $b$			36.7	$\tilde{t}_1^+$	[ $\tilde{t}_1^+$ ] ( $\tilde{t}_1^+$ )	0.42	0.61	$m(\tilde{t}_1^0) < 100$ GeV	1710.07171
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	2 $\epsilon, \mu$ 2 $b$			36.1	$\tilde{t}_1^+$	[ $\tilde{t}_1^+$ ] ( $\tilde{t}_1^+$ )	0.4	0.4-1.45	$BR(\tilde{t}_1^+ \rightarrow b\tilde{t}_1^0) < 20\%$	1710.05544
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	1 $\mu$ DV			136	$\tilde{t}_1^+$	[ $\tilde{t}_1^+$ ] ( $\tilde{t}_1^+$ ) $\geq 10 \cdot 10 \cdot c < 16 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 10 \cdot c < 36 \cdot 9$	1.0	1.6	$BR(\tilde{t}_1^+ \rightarrow q\tilde{t}_1^0) > 100\%$ , $\cos\theta < 1$	2003.11956
	$\tilde{t}_1^+\tilde{t}_1^0$ via $\tilde{t}_1\tilde{t}_1^0$	1-2 $\epsilon, \mu$ $\geq 6$ jets			139	$\tilde{t}_1^+$		0.2-0.32		Pure Higgsino	ATLAS-CONF-2021-007

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

10<sup>-1</sup>

1

Mass scale [TeV]

- 1 Problemy Modelu Standardowego
- 2 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 3 Supersymetria
- 4 Dodatkowe wymiary

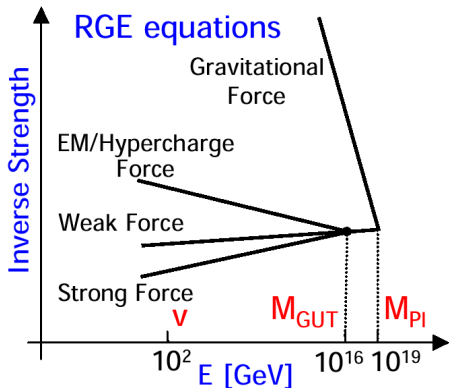
## Skala Plancka

Pełna unifikacja oddziaływań, z uwzględnieniem grawitacji, dopiero przy skali

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

co odpowiada skali odległości

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



Problem hierarchii w Modelu Standardowym: skale unifikacji znacznie większe od skal mas  $M_{Pl} > M_{GUT} \gg M_h \sim M_W$

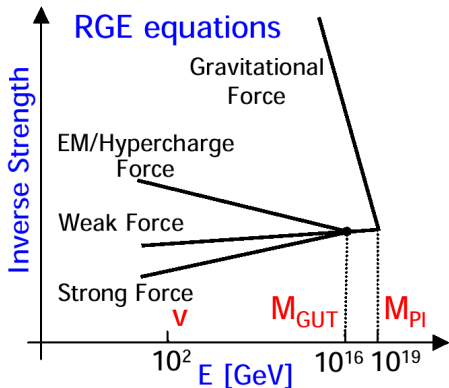
## Skala Plancka

Pełna unifikacja oddziaływań, z uwzględnieniem grawitacji, dopiero przy skali

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

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 ?!

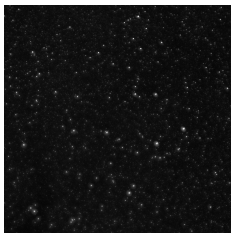
**NIE** - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo

gwiazdy wydają nam się być

punktowe (bezwymiarowe)



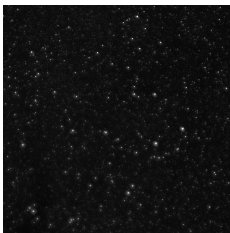
Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

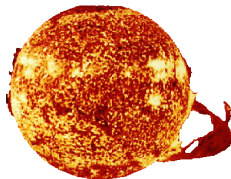
**NIE** - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## 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:



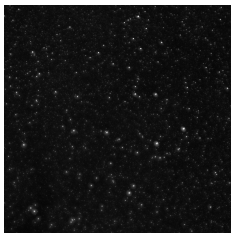
Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

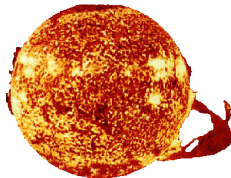
**NIE** - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## 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 ?!

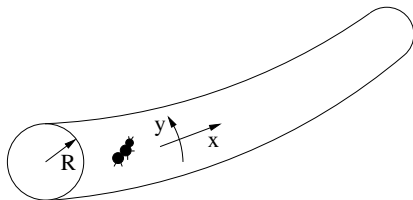
**NIE** - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## 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 ?!

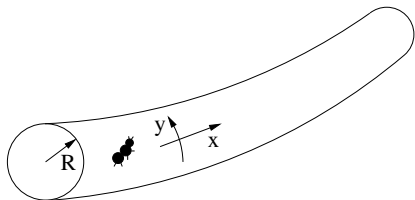
**NIE** - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

## 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**:

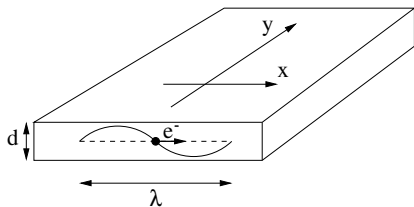


$y$  jest współrzędną **cykliczną**.

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  $\lambda \gg d$

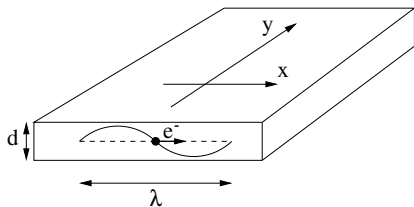
$\Rightarrow$  ruch **dwuwymiarowy**.

Ruch w kierunku prostopadłym **nie jest dostępny** energetycznie.

(kwantowy efekt Halla).

### Przykład III

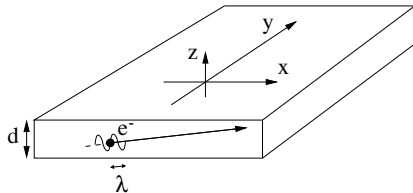
Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



Jeśli długość fali elektronu  $\lambda \gg d$   
 $\Rightarrow$  ruch **dwuwymiarowy**.

Ruch w kierunku prostopadłym **nie jest 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**...

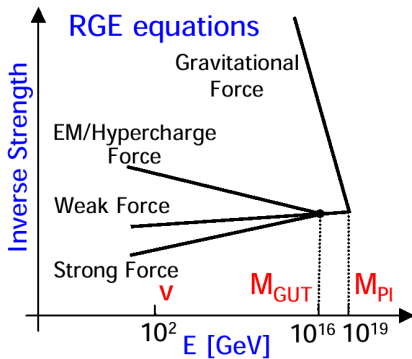
$\Rightarrow$  "odczuwalna" liczba wymiarów zależy od energii...

## 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 zależec jak:

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



## Skala unifikacji

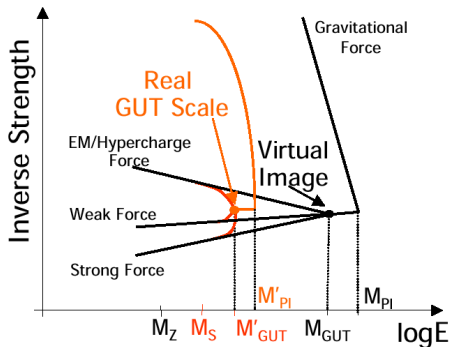
Przyjmijmy, że nasz świat jest  $1 + 3 + n$  wymiarowy (dodajemy  $n$  skończonych wymiarów przestrzennych o rozmiarze  $R$ ).

Gdy badamy oddziaływania na "dużych" odległościach  $r \gg R$ , siła grawitacyjna będzie zależec 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

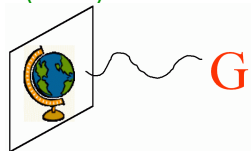
⇒ prawdziwa skala unifikacji może być dużo niższa niż nam się wydaje...

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

Musimy wprowadzić pewne modyfikacje:

**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...

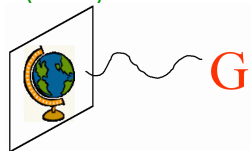


Precyzyjne pomiary fizyki cząstek **wykluczyły** praktycznie istnienie “zwykłych” dodatkowych wymiarów (**otwartych dla wszystkich cząstek**).

Musimy wprowadzić pewne modyfikacje:

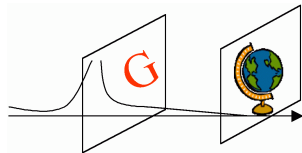
**Model ADD** Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

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



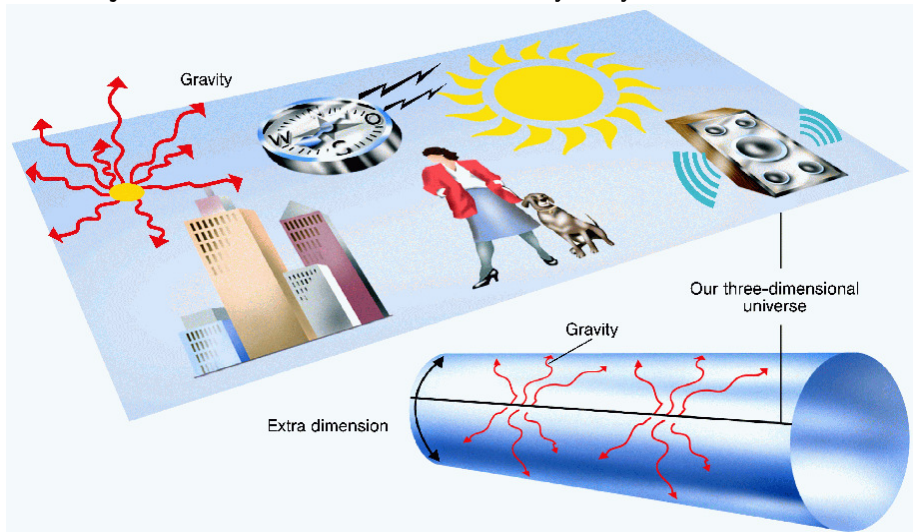
**Model R-S** Randal, Sundrum (1999)

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...

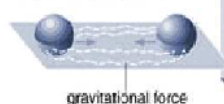
W USA protestowano przeciwko uruchomieniu akceleratora RHIC, bo przeciwnicy obawiali się produkcji **czarnej dziury**, która **pochłonie Ziemię...**

## Black Holes on Demand

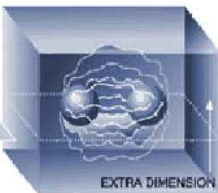
NYT, September 11, 2001 The New York Times

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:

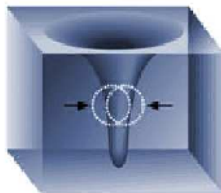
*Particles collide in three dimensional space, shown below as a flat plane.*



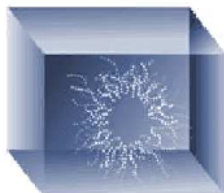
As the particles approach in a particle accelerator, their gravitational attraction increases steadily.



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 "Ostateczną Teorią Wszystkiego".

Szukamy **bardziej fundamentalnej, ogólniejszej teorii**, która opíše wszystkie znane procesy i odpowie na wszystkie nasze pytania.

## Podsumowanie

Wiele obserwacji wskazuje na to, że Model Standardowy nie jest “Ostateczną Teorią Wszystkiego”.

Szukamy **bardziej fundamentalnej, ogólniejszej teorii**, która opíše wszystkie znane procesy i odpowie na wszystkie nasze pytania.

Istnieją dziesiątki modeli teoretycznych, które **rozszerzają, zastępują Model Standardowy** fizyki cząstek.

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

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