

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów Poza Modelem Standardowym

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

19 grudnia 2017

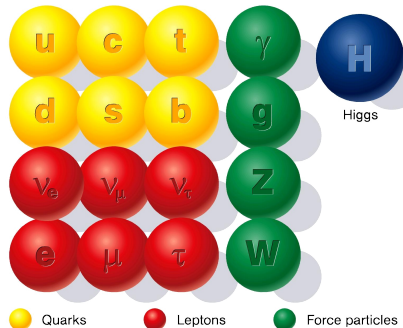
- 1 Problemy Modelu Standardowego
- 2 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 3 Supersymetria
- 4 Dodatkowe wymiary

Cząstki fundamentalne

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

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , 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 prowadzonych 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 ?
- Co to jest "**ciemna materia**" ?
- Co to jest "**ciemna energia**" !?

O części z tych problemów będziemy jeszcze mówić w przyszłym roku...

Problemy Modelu Standardowego

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**” ?
- 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...

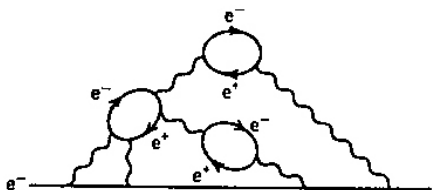
Fizycy doświadczalnicy budują coraz to wymyślniejsze urządzenia, żeby szukać śladów “nowej fizyki”...

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

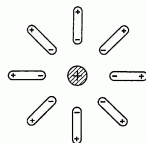
Ładunek elementarny

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”
⇒ “efektywny” ładunek elektronu jest mniejszy niż “goły” ładunek.

Biegająca stała sprzężenia QED

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

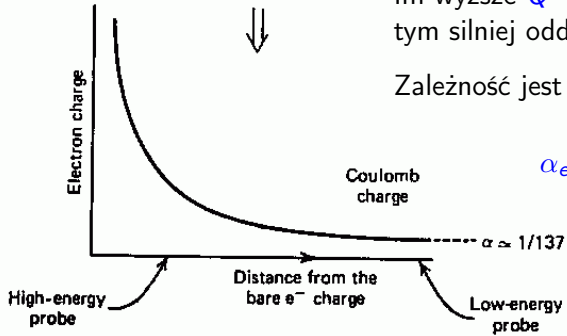


$$\alpha_{em}(0) \approx \frac{1}{137}$$

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

Zależność jest jednak bardzo słaba:

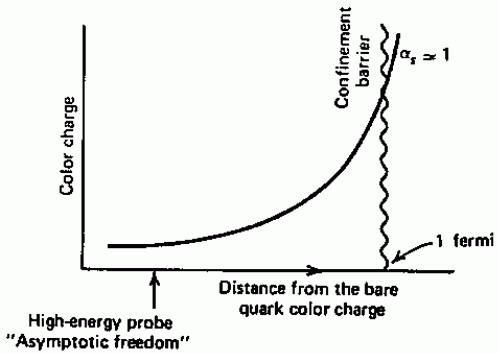
$$\alpha_{em}(M_Z^2) \approx \frac{1}{128}$$



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:

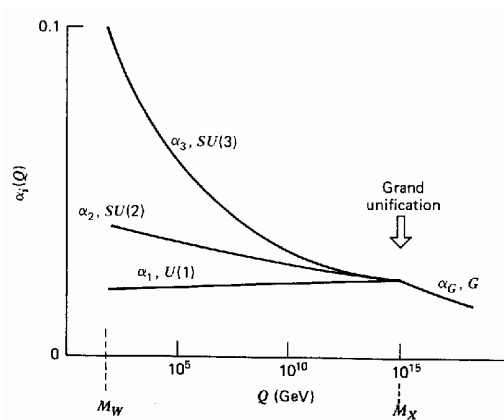
$$\alpha_s \approx 0.118$$

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

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

Jednak ze wzrostem energii

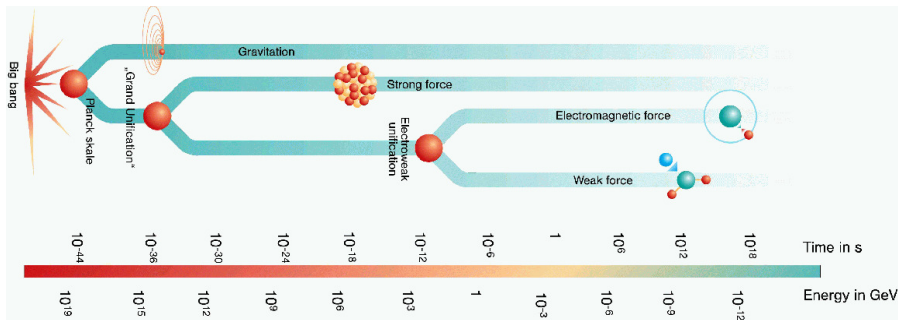
α_{em} rośnie, natomiast α_s maleje



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 \Rightarrow duże zainteresowanie hipotezą **wielkiej unifikacji**.

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

- QED: symetria względem obrotu fazy funkcji falowej $U(1)$
 \Rightarrow każda cząstka oddziałuje “samodzielnie”
- Oddziaływania słabe: symetria $SU(2)$
 \Rightarrow oddziaływanie sprzęga cząstki w **dubletach**, np. $(e^- \nu_e)$, $(u \ d)$
- Oddziaływania silne: symetria $SU(3)$
 \Rightarrow 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 oraz 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^{red}	d_R^{green}	d_R^{blue}	e_R^+	$\bar{\nu}_e$
d_R^{red}	g^0, γ, Z^0	$g^{r \rightarrow g}$	$g^{r \rightarrow b}$	$\chi_{-\frac{2}{3}}^{\text{red}}$	$\chi_{-\frac{1}{3}}^{\text{red}}$
d_R^{green}	$g^{g \rightarrow r}$	g^0, γ, Z^0	$g^{g \rightarrow b}$	$\chi_{-\frac{2}{3}}^{\text{green}}$	$\chi_{-\frac{1}{3}}^{\text{green}}$
d_R^{blue}	$g^{b \rightarrow r}$	$g^{b \rightarrow g}$	g, γ, Z^0	$\chi_{-\frac{2}{3}}^{\text{blue}}$	$\chi_{-\frac{1}{3}}^{\text{blue}}$
e_R^+	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{red}}$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{green}}$	$\chi_{\frac{1}{3}}^{\text{blue}}$	γ, 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

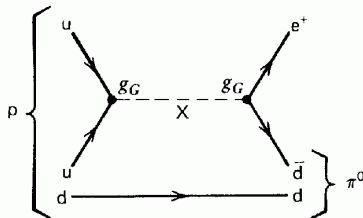
Model $SU(5)$ przewiduje rozpad protonu

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

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

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

Są też możliwe inne kanały rozpadu...



Rozpad protonu

Model $SU(5)$ przewiduje rozpad protonu

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

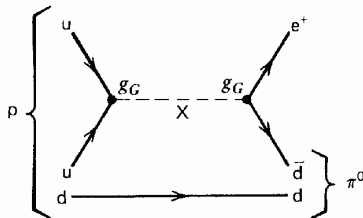
$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

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

$$\tau_p > 8.2 \cdot 10^{33} \text{ lat}$$

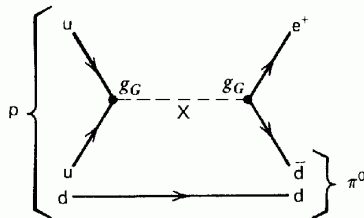


Rozpad protonu

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

$$\tau_p > 8.2 \cdot 10^{33} \text{ lat}$$

⇒ 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

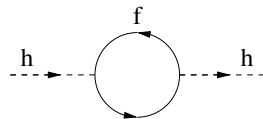
Masa Planka (M_{Pl}):

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 ($\delta \sim 10^{-15}$)

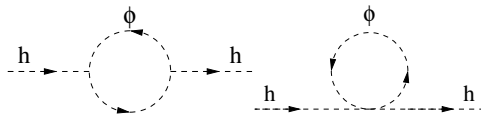
\Rightarrow “problem hierarchii”

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 ~ 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

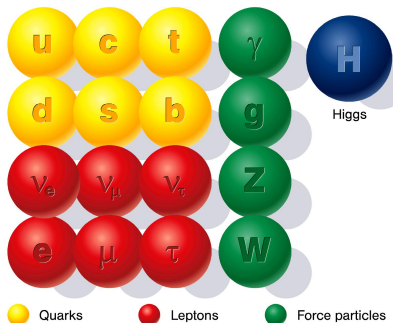
bozon
cechowania ($s=1$) \rightarrow gaugino ($s=\frac{1}{2}$)

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

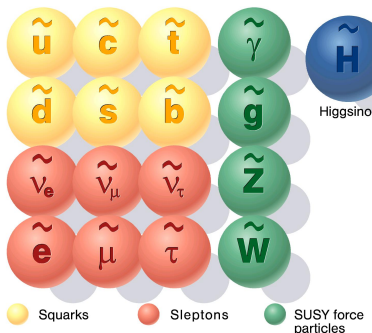
Widmo cząstek

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 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° lekki Higgs skalarny
 - H° ciężki Higgs skalarny
 - A° 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 tą samą masę)
- Aby nadać masy większej liczbie cząstek musimy “rozszerzyć” sektor Higgsa ⇒ potrzebne dwa dublety pól Higgsa
- ⇒ $8 - 3 = 5$ cząstek:
 - h° lekki Higgs skalarny
 - H° ciężki Higgs skalarny
 - A° Higgs pseudoskalarny
 - H^\pm 2 naładowane Higgisy
- dodatkowo 4 higgisina: $\tilde{H}_1^\circ, \tilde{H}_2^\circ, \tilde{H}^\pm$

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 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 przez **ponad 40 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 przez **ponad 40 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, **osiem lat** po uruchomieniu LHC wciąż nie widzimy 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

May 2017

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8, 13 \text{ TeV}$

Model	e, μ, τ, γ	Jets	E_{T}^{miss}	$[L, d] [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$	Reference
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	$0.3 e, \mu/1.2 \tau$	2-10 jets/3 b	Yes	20.3	1.85 TeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{t}_1)$	1507.05525
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet}$	0	2-6 jets	Yes	36.1	1.57 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 200 \text{ GeV}, m(\tilde{1}^{\text{st gen. q}}) = m(\tilde{2}^{\text{nd gen. q}})$	ATLAS-CONF-2017-022 1604.07773
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet}$ (compressed)	mono-jet	1-3 jets	Yes	3.2	608 GeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{1}^{\text{st}})=5 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-022
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet}$	0	2-6 jets	Yes	36.1	2.92 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 200 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-022
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet} + \tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	36.1	2.61 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 200 \text{ GeV}, m(\tilde{1}^{\text{st}}) \geq 0.5 m(\tilde{t}_1) = m(\tilde{g})$	ATLAS-CONF-2017-022
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet} + \tilde{\chi}_1^0$	$3 e, \mu$	4 jets	-	36.1	1.825 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 400 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-030
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet} + \tilde{\chi}_1^0$	0	7-11 jets	Yes	36.1	1.8 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 400 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-033
	GMSB (bino NLSP)	$1.2 e, \mu + 0.1 \tau$	0-2 jets	Yes	3.2	2.0 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 400 \text{ GeV}$	1607.05979
	GGIM (bino NLSP)	2γ	-	Yes	3.2	1.65 TeV	$\tau \rightarrow \text{NLSP} + 0.1 \text{ mm}$	1606.09150
	GGIM (higgsino-bino NLSP)	γ	2 jets	Yes	20.3	1.37 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 350 \text{ GeV}, \tau \rightarrow \text{NLSP} + 0.1 \text{ mm}, \mu = 0$	1507.05493
	GGIM (higgsino-bino NLSP)	γ	2 jets	Yes	13.3	1.3 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 350 \text{ GeV}, \tau \rightarrow \text{NLSP} + 0.1 \text{ mm}, \mu = 0$	ATLAS-CONF-2016-066
	GGIM (higgsino NLSP)	$2 e, \mu, \tau$	2 jets	Yes	20.3	900 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 430 \text{ GeV}$	1500.05090
Gravitino NLSP	0	mono-jet	Yes	20.3	865 GeV	$m(\tilde{G}) \sim 1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g}) = m(\tilde{g}) = 1.5 \text{ TeV}$	1502.01518	
$\tilde{\gamma}$ gen. \tilde{g} (med)	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet}$	0	3 b	Yes	36.1	1.92 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 600 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-021
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet}$	$0.1 e, \mu$	3 b	Yes	36.1	1.97 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 200 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-021
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet}$	$0.1 e, \mu$	3 b	Yes	20.1	1.37 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 300 \text{ GeV}$	1407.06000
$\tilde{\gamma}$ gen. squarks direct production	$\tilde{d}_L \tilde{d}_L, \tilde{d}_L \rightarrow \text{jet}$	0	2 b	Yes	36.1	950 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 420 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-058
	$\tilde{d}_L \tilde{d}_L, \tilde{d}_L \rightarrow \text{jet}$	$2 e, \mu$ (SS)	1 b	Yes	36.1	275-700 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 200 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_2) = m(\tilde{t}_1) + 100 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-030
	$\tilde{d}_L \tilde{d}_L, \tilde{d}_L \rightarrow \text{jet}$	$0.2 e, \mu$	1-2 b	Yes	47.1/13.3	200-720 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 2m(\tilde{t}_2), m(\tilde{t}_2) = 55 \text{ GeV}$	1209.2102, ATLAS-CONF-2016-077
	$\tilde{d}_L \tilde{d}_L, \tilde{d}_L \rightarrow \text{jet}$	$0.2 e, \mu$	0-2 jets/1-2 b	Yes	20.3/36.1	90-198 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 100 \text{ GeV}$	1506.08616, ATLAS-CONF-2017-020
	$\tilde{d}_L \tilde{d}_L, \tilde{d}_L \rightarrow \text{jet}$	0	mono-jet	Yes	3.2	90-323 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 100 \text{ GeV}$	1604.07773
	$\tilde{d}_L \tilde{d}_L$ (natural GMSB)	$2 e, \mu$ (Z)	1 b	Yes	20.3	150-600 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 150 \text{ GeV}$	1400.52922
EW direct	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$2 e, \mu$	0	Yes	36.1	90-440 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 0$	ATLAS-CONF-2017-059
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$2 e, \mu$	0	Yes	36.1	710 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 0, m(\tilde{b}_1) = 0.5 m(\tilde{t}_1) + m(\tilde{t}_1^*)$	ATLAS-CONF-2017-059
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$2 e, \mu$	0	Yes	36.1	760 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 0, m(\tilde{b}_1) = 0.5 m(\tilde{t}_1) + m(\tilde{t}_1^*)$	ATLAS-CONF-2017-055
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$3 e, \mu$	0	Yes	36.1	1.15 TeV	$m(\tilde{t}_1) = 0, m(\tilde{b}_1) = 0, m(\tilde{b}_2) = 0.5 m(\tilde{t}_1) + m(\tilde{t}_1^*)$	ATLAS-CONF-2017-059
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$2.3 e, \mu$	0-2 jets	Yes	36.1	580 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 0, f$ decoupled	ATLAS-CONF-2017-039
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	e, μ, τ	0-2 b	Yes	20.3	270 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 0, f$ decoupled	1501.07110
GGIM (wino NLSP) weak prod., $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma \tilde{G}$	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet}$	$4 e, \mu$	0	Yes	20.3	635 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 0, m(\tilde{b}_1) = 0, m(\tilde{b}_2) = 0.5 m(\tilde{t}_1) + m(\tilde{t}_1^*)$	1405.50886
	GGIM (bino NLSP) weak prod., $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma \tilde{G}$	$1 e, \mu + \gamma$	-	Yes	20.3	115-370 GeV	$\tau < 1 \text{ mm}$	1507.05493
	GGIM (bino NLSP) weak prod., $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma \tilde{G}$	2γ	-	Yes	20.3	590 GeV	$\tau < 1 \text{ mm}$	1507.05493
	Direct $\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	Disapp. trk	1 jet	Yes	36.1	430 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 0, m(\tilde{b}_1) = 160 \text{ MeV}, m(\tilde{t}_2) = 0.2 \text{ nm}$	ATLAS-CONF-2017-017
	Direct $\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	dEdx trk	-	Yes	18.4	495 GeV	$m(\tilde{t}_1) = m(\tilde{t}_2) = 160 \text{ MeV}, m(\tilde{t}_2) < 15 \text{ nm}$	1506.05332
	Stable, stopped \tilde{t}_1 R-hadron	0	1-5 jets	Yes	27.9	850 GeV	$m(\tilde{t}_1) = 100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau < 1000 \text{ s}$	1310.8584
Long-lived particles	Stable \tilde{t}_1 R-hadron	trk	-	-	3.2	1.58 TeV	$m(\tilde{t}_1) = 100 \text{ GeV}, \tau > 10 \text{ ns}$	1606.05129
	Metastable \tilde{t}_1 R-hadron	dEdx trk	-	-	3.2	1.57 TeV	10-100ps-50	1604.04500
	GMSB, stable $\tilde{t}_1, \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma \tilde{G}$	1.2μ	-	-	19.1	537 GeV	$1 - c \tau(\tilde{t}_1) < 3 \text{ nm}, \text{SPB8 model}$	1400.5542
	GMSB, $\tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}, \text{long-lived } \tilde{t}_1$	2γ	-	-	20.3	440 GeV	$7 - c \tau(\tilde{t}_1) < 740 \text{ mm}, m(\tilde{g}) = 1.3 \text{ TeV}$	1504.05162
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet} + \text{jet} + \mu \nu$	displ. $e \nu / \mu \nu$	-	-	20.3	1.0 TeV	$6 - c \tau(\tilde{t}_1) < 480 \text{ mm}, m(\tilde{g}) = 1.1 \text{ TeV}$	1504.05162
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \text{jet} + \text{jet} + \mu \nu$	displ. vtx + jets	-	-	20.3	1.0 TeV		
RPV	LFV $\tilde{p} \tilde{p} \rightarrow \tilde{\nu}_e + X, X \rightarrow \text{jet} + e \nu / \mu \nu$	$e \mu, \mu \tau, \tau \mu$	-	-	3.2	1.8 TeV	$A_{111} = 0.11, A_{123} = 0.001 + 0.07$	1607.08079
	Bilinear RPV CMSSM	$2 e, \mu$ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	1.45 TeV	$m(\tilde{g}) = m(\tilde{t}_1), \tau_{\tilde{t}_1} < 1 \text{ mm}$	1404.2500
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$4 e, \mu$	-	Yes	13.3	1.14 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 400 \text{ GeV}, A_{133} = 0 (\mu = 1, 2)$	ATLAS-CONF-2016-075
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$3 e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	950 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 400 \text{ GeV}, A_{133} = 0$	1405.50886
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$4 e, \mu$	-	Yes	14.8	1.08 TeV	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow \text{BR}) = \text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow \text{BR})$	ATLAS-CONF-2016-057
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	0	4-5 large-R jets	-	14.8	1.55 TeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 800 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-057
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$1 e, \mu$	8-10 jets/0-4 b	-	36.1	2.1 TeV	$m(\tilde{t}_1) = 1 \text{ TeV}, A_{133} = 0$	ATLAS-CONF-2017-013
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$1 e, \mu$	8-10 jets/0-4 b	-	36.1	1.65 TeV	$m(\tilde{t}_1) = 1 \text{ TeV}, A_{133} = 0$	ATLAS-CONF-2017-013
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	0	2 jets + 2 b	-	15.4	410 GeV		ATLAS-CONF-2016-022, ATLAS-COINF-2016-084
	$\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^* \rightarrow \text{jet}$	$2 e, \mu$	2 b	-	36.1	450-510 GeV	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow \text{jet}) = 20\%$	ATLAS-COINF-2017-036
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow \tilde{c}^0$	0	$2 e$	Yes	20.3	510 GeV	$m(\tilde{t}_1) \sim 200 \text{ GeV}$	1501.01325

*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^{-1}

1

Mass scale [TeV]

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

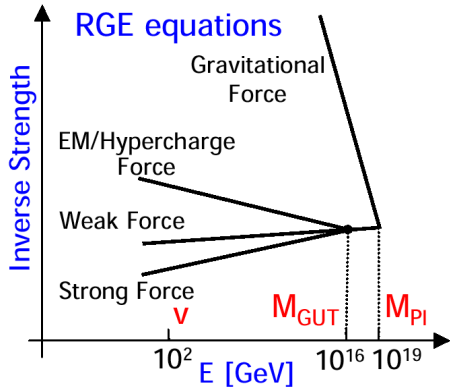
Skala Plancka

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

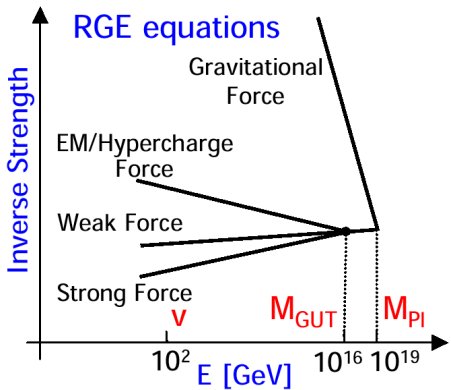
Skala Plancka

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!

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



Dodatkowe wymiary

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż **3 wymiary** przestrzenne ?!

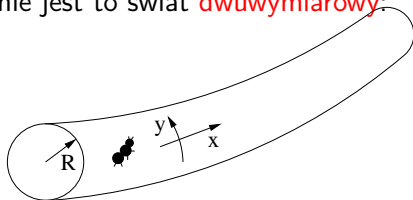
NIE - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład I

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



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

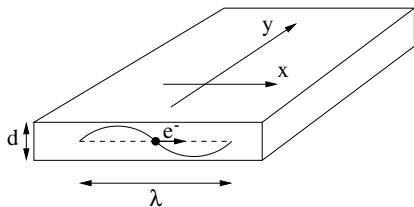


y jest współrzędną **cykliczną**.

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

Przykład II

Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d$

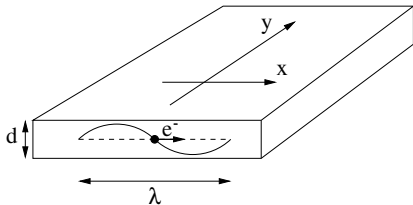
\Rightarrow ruch **dwuwymiarowy**.

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

(kwantowy efekt Halla).

Przykład II

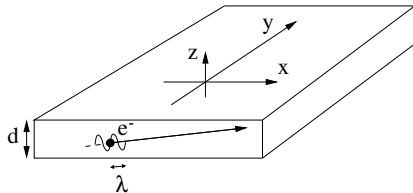
Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



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**...

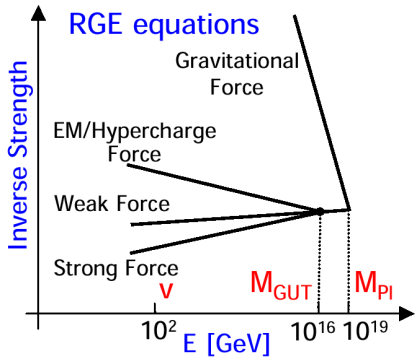
\Rightarrow "odczuwalna" liczba wymiarów zależy od energii...

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 zależeć jak:

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



Skala unifikacji

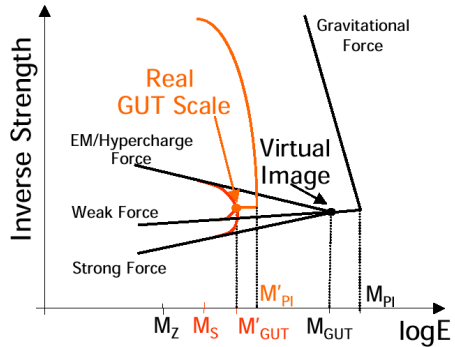
Przyjmijmy, że nasz świat jest $1 + 3 + n$ wymiarowy (dodajemy n skończonych wymiarów przestrzennych o rozmiarze R).

Gdy badamy oddziaływania na "dużych" odległościach $r \gg R$, siła grawitacyjna będzie zależęć 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 biegają dużo szybciej

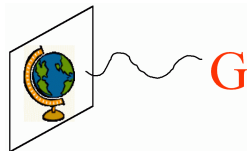
⇒ prawdziwa skala unifikacji może być dużo niższa niż nam się wydaje...

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...



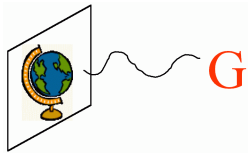
Dodatkowe wymiary

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

Musimy wprowadzić pewne modyfikacje:

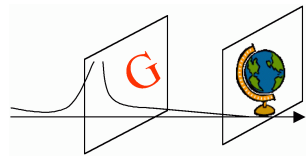
Model ADD Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

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

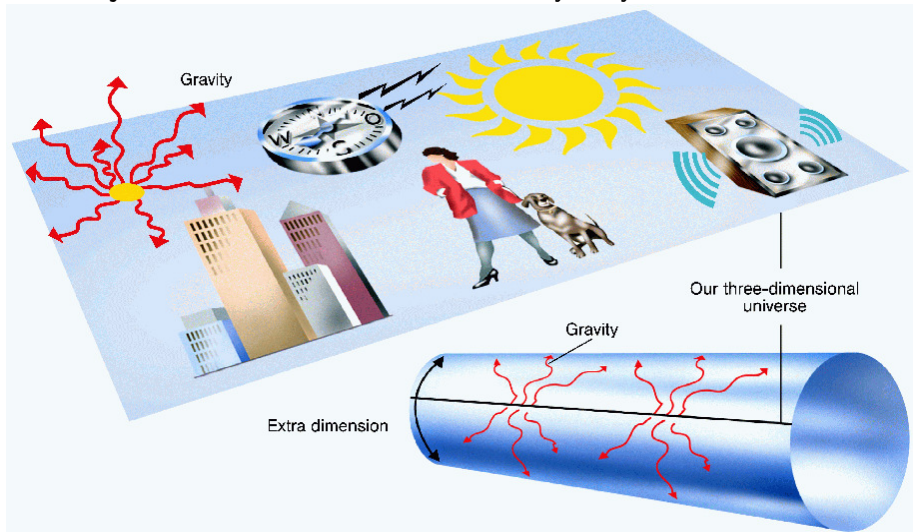


Model R-S Randall, Sundrum (1999)

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 na 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...

Dodatkowe wymiary

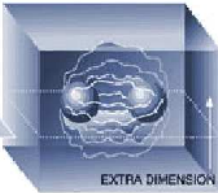
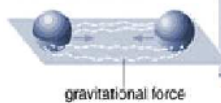
W USA protestowano przeciwko uruchomieniu akceleratora RHIC, bo przeciwnicy obawiali się produkcji **czarnej dziury**, która **pochłonie Ziemię...**

Black Holes on Demand

NYT, September 11, 2001 The New York Times

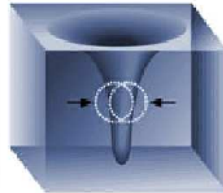
Scientists are exploring the possibility of producing miniature black holes on demand by smashing particles together. Their plans hinge on the theory that the universe contains more than the three dimensions of everyday life. Here's the idea:

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

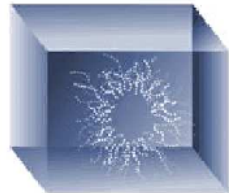


As the particles approach in a particle accelerator, their gravitational attraction increases steadily.

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 - o tych obserwacjach będziemy w szczególności mówić w Nowym Roku...