

Wszystkie Cząstki Elementarne dla Humanistów Poza Modelem Standardowym

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



18 grudnia 2018

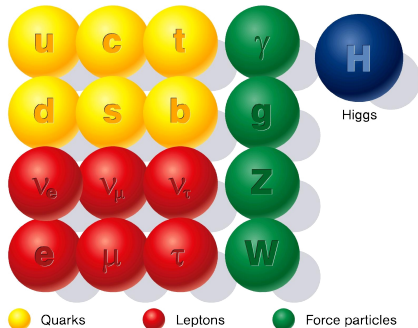
- 1 Problemy Modelu Standardowego
- 2 Teorie Wielkiej Unifikacji
- 3 Supersymetria
- 4 Dodatkowe wymiary

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** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?

- Co to jest "**ciemna materia**" ?
- Co to jest "**ciemna energia**" !?
- Jaka jest natura **neutrin** ?

O drugiej grupie problemów będziemy mówić na ostatnich wykładach...

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...

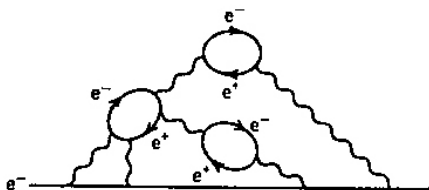
Fizycy doświadczalnicy budują coraz to wymyślniejsze urządzenia, żeby szukać śladów “nowej fizyki”...

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

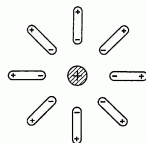
Ładunek elementarny

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”
 \Rightarrow “efektywny” ładunek elektronu jest mniejszy niż “goły” ładunek.

Biegająca stała sprzężenia QED

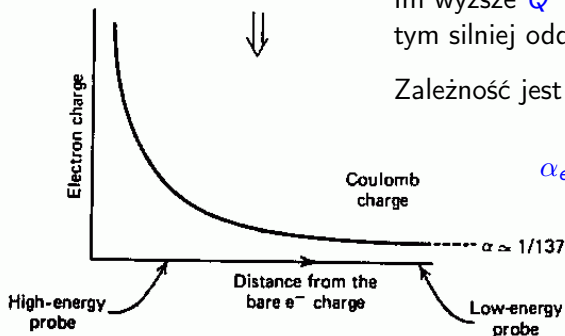
“Tablicowa” wartość stałej struktury subtelnej α_{em} odpowiada oddziaływaniu na duże odległości, czyli z przekazem energii $Q^2 \rightarrow 0$:



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

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

Zależność jest jednak bardzo słaba:

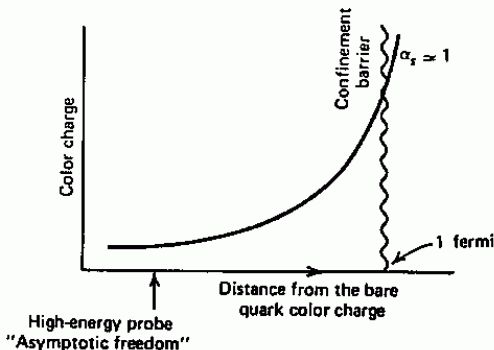


$$\alpha_{em}(M_Z^2) \approx \frac{1}{128}$$

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:

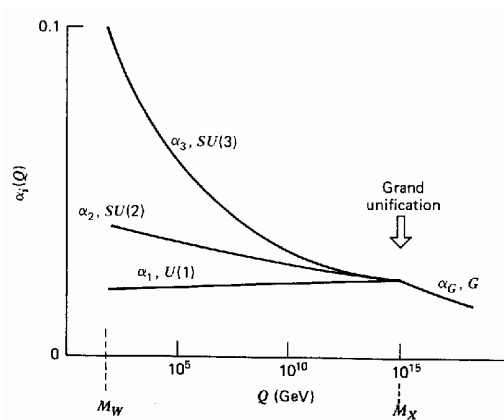
$$\alpha_s \approx 0.118$$

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

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

Jednak ze wzrostem energii

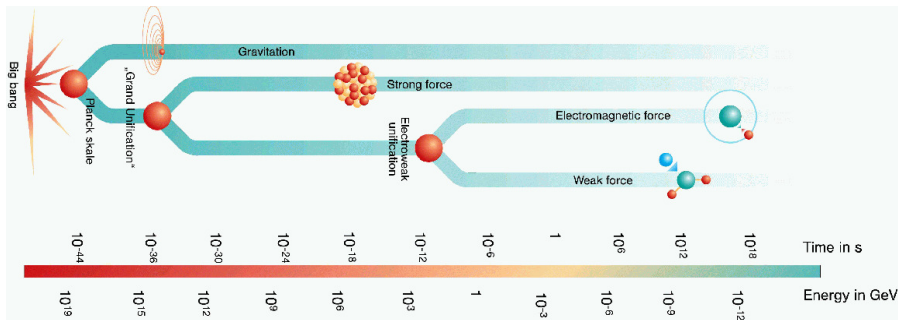
α_{em} rośnie, natomiast α_s maleje



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

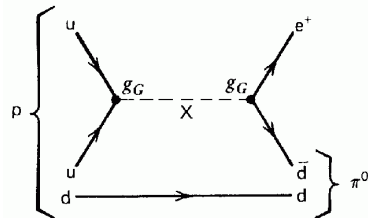
Model $SU(5)$ przewiduje rozpad protonu

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

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

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

Są też możliwe inne kanały rozpadu...



Rozpad protonu

Model $SU(5)$ przewiduje rozpad protonu

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

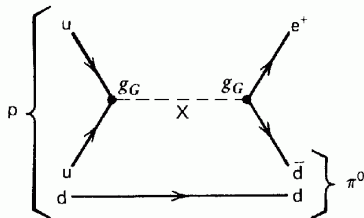
$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

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

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

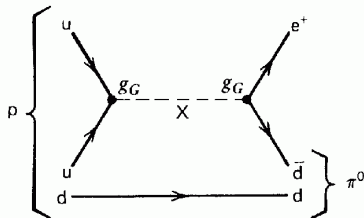


Rozpad protonu

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

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

\Rightarrow 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

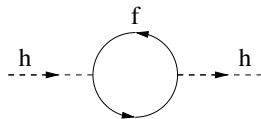
neutrino $\sim 10^{-11}$ GeVelektron $\sim 10^{-3}$ GeV W^\pm, Z^0, h (?) $\sim 10^{+2}$ GeVtop $\sim 2 \cdot 10^{+2}$ GeV"pustynia" \updownarrow GUT M_X $\sim 10^{+15}$ GeV M_{Pl} $\sim 10^{+19}$ GeVMasa Planka (M_{Pl}):

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:

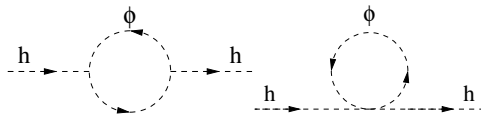
Poprawki związane z pętlami fermionowymi rosną jak M_X^2 ...Aby uzyskać $m_h = 125$ GeV musimy niesłychanie precyzyjnie dobrać parametry ($\delta \sim 10^{-15}$) \Rightarrow "problem hierarchii"

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

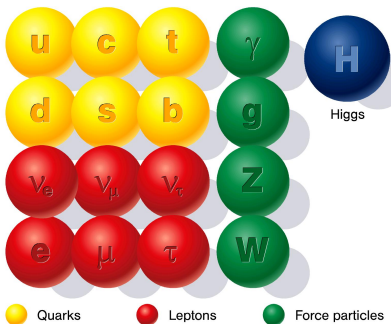
bozon
cechowania ($s=1$) \rightarrow gaugino ($s=\frac{1}{2}$)

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

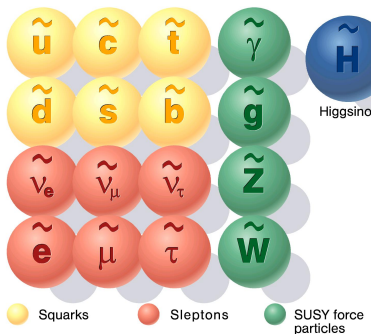
Widmo cząstek

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 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° 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 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° 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 zanikła 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 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, **dziwięć lat** po uruchomieniu LHC wciąż nie widzimy najmniejszego śladu supersymetrii, **żadnych odstępstw** od Modelu Standardowego...

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

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

July 2018

ATLAS Preliminary

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

Model	$\epsilon, \mu, \tau, \gamma$	Jets	L_{T}^{miss}	$[\mathcal{L} d(\text{fb}^{-1})]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$	Reference			
Inclusive Searches	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*$	0 mono-jet	2-6 jets	Yes	36.1	$\tilde{g} \rightarrow [2\mu, 6\mu \text{ Diags}]$	0.8	1.55	$m(\tilde{t}_1) < 100 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = m(\tilde{t}_2) = 5 \text{ GeV}$	1712.02332 1711.03301	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*$	0	1-3 jets	Yes	36.1	$\tilde{g} \rightarrow [1\mu, 6\mu \text{ Diags}]$	0.43	0.71	$m(\tilde{t}_1) < 200 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 300 \text{ GeV}$	1712.02332 1712.02332	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*$	0	2-6 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	Forbidden	2.0	$m(\tilde{t}_1) < 800 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 300 \text{ GeV}$	1706.03731 1805.11381	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* (\ell\ell)^*$	3 ϵ, μ	4 jets	-	36.1	\tilde{g}	Forbidden	1.85	$m(\tilde{t}_1) < 400 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 50 \text{ GeV}$	1706.03731 1805.11381	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* WZ$	0	7-11 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	0.98	1.8	$m(\tilde{t}_1) < 400 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 200 \text{ GeV}$	1706.03731 1706.03731	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*$	0-1 ϵ, μ	3 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	1.25	2.0	$m(\tilde{t}_1) < 200 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 300 \text{ GeV}$	1711.03301 1706.03731	
1 st gen. squarks direct production	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{d}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{d}^* (\ell\ell)^*$		Multiple		36.1	\tilde{d}_1	Forbidden	0.9	$m(\tilde{t}_1) < 300 \text{ GeV}, BR(\tilde{t}_1) = 1$	1708.05086, 1711.03301	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{d}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{d}^*$		Multiple		36.1	\tilde{d}_1	Forbidden	0.59-0.82	$m(\tilde{t}_1) < 300 \text{ GeV}, BR(\tilde{t}_1) = BR(\tilde{b}_1) = 0.5$	1708.05086	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{d}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{d}^*$		Multiple		36.1	\tilde{d}_1	Forbidden	0.7	$m(\tilde{t}_1) < 300 \text{ GeV}, BR(\tilde{t}_1) = 1$	1706.03731	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{t}_1, M_2 = 2 \times M_1$		Multiple		36.1	\tilde{d}_1	Forbidden	0.9	$m(\tilde{t}_1) < 80 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 200 \text{ GeV}$	1709.04183, 1711.11520, 1708.03247	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow W\tilde{d}\tilde{t}_1^*$ or $\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{t}_1^*$	0-2 ϵ, μ	0/2 jets	1-2 b	Yes	36.1	\tilde{d}_1	1.0	$m(\tilde{t}_1) < 1 \text{ GeV}$	1508.08616, 1709.04183, 1711.11520	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow W\tilde{d}\tilde{t}_1^*$ or $\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{t}_1^*$	Multiple	Multiple	Multiple	36.1	\tilde{d}_1	0.4-0.9	0.6-0.8	$m(\tilde{t}_1) < 150 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_1) = 50 \text{ GeV}, \tilde{t}_1 = \tilde{t}_2$ $m(\tilde{t}_1) < 300 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_1) = 50 \text{ GeV}, \tilde{t}_1 = \tilde{t}_2$	1709.04183, 1711.11520 1709.04183, 1711.11520	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1$, Well-Tempered LSP	Multiple	Multiple	Multiple	36.1	\tilde{d}_1	0.48-0.84	0.85	$m(\tilde{t}_1) < 150 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_1) = 5 \text{ GeV}, \tilde{t}_1 = \tilde{t}_2$	1709.04183, 1711.11520	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{t}_1^* / \ell\ell, \tilde{t}_1 \rightarrow \ell\ell\tilde{t}_1^*$	0	2b	Yes	36.1	\tilde{d}_1	0.46	0.85	$m(\tilde{t}_1) < 0 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 50 \text{ GeV}$	1805.01849 1805.01849	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{t}_1^*$	0	mono-jet	Yes	36.1	\tilde{d}_1	0.43	0.85	$m(\tilde{t}_1) = 0 \text{ GeV}$ $m(\tilde{t}_1) = 50 \text{ GeV}$	1711.03301	
	$\tilde{d}_1\tilde{d}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{d}\tilde{t}_1^* + h$	1-2 ϵ, μ	4 b	Yes	36.1	\tilde{d}_1	0.32-0.88		$m(\tilde{t}_1) = 0 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_1) = 180 \text{ GeV}$	1706.03986	
	EW direct	$\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow WZ$	2-3 ϵ, μ	-	Yes	36.1	\tilde{t}_1^*	0.17	0.6	$m(\tilde{t}_1) = 0$ $m(\tilde{t}_1) = 10 \text{ GeV}$	1403.5294, 1806.02293
$\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow WZ$		≥ 1	Yes	36.1	\tilde{t}_1^*	0.17	0.6	$m(\tilde{t}_1) = 0$ $m(\tilde{t}_1) = 10 \text{ GeV}$	1712.08119		
$\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow W\tilde{h}$		2 b	-	Yes	20.3	\tilde{t}_1^*	0.26		$m(\tilde{t}_1) = 0$	1501.07110	
$\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* / \tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^* + \tilde{t}^*\tilde{t} + \tilde{t}\tilde{t}^* + \tilde{t}^*\tilde{t}$		2 ϵ, μ	0	Yes	36.1	\tilde{t}_1^*	0.22	0.76	$m(\tilde{t}_1) = 0, m(\tilde{t}_1) = 0.5(m(\tilde{t}_1) + m(\tilde{t}_1^*))$ $m(\tilde{t}_1) = 100 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_1) = 0.5(m(\tilde{t}_1) + m(\tilde{t}_1^*))$	1708.07875 1708.07875	
$\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^* + \tilde{t}^*\tilde{t}$		2 ϵ, μ	0	Yes	36.1	\tilde{t}_1^*	0.18	0.5	$m(\tilde{t}_1) = 0$	1803.02762	
$\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^* + \tilde{t}^*\tilde{t}$		2 ϵ, μ	≥ 1	Yes	36.1	\tilde{t}_1^*	0.18	0.5	$m(\tilde{t}_1) = 0$ $m(\tilde{t}_1) = 5 \text{ GeV}$	1712.08119	
$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow \tilde{G}Z\tilde{G}$		4 ϵ, μ	$\geq 3b$	Yes	36.1	\tilde{H}	0.13-0.23	0.29-0.88	$BR(\tilde{H}^0) \rightarrow h(\tilde{H}^0) = 1$ $BR(\tilde{H}^0) \rightarrow Z(\tilde{H}^0) = 1$	1806.04030 1804.03802	
Long-lived particles	Direct $\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^*$ prod., long-lived \tilde{t}_1^*	Disapp. stk	1 jet	Yes	36.1	\tilde{t}_1^*	0.15	0.46	Pure Wino Pure Higgsino	1712.02118 ATL-PHYS-PUB-2017-019	
	Stable \tilde{t}_1 R-hadron	SMP	-	-	3.2	\tilde{t}_1		1.6	$m(\tilde{t}_1) < 100 \text{ GeV}$	1606.05129	
	Metastable \tilde{t}_1 R-hadron, $\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*$	Multiple	Multiple	32.8	\tilde{t}_1 ($\tau(\tilde{t}_1) = 100 \text{ ns}, 0.2 \text{ ns}$)		1.6	2.4	$m(\tilde{t}_1) < 100 \text{ GeV}$	1710.04901, 1604.04520	
	GMSB, $\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$, long-lived \tilde{t}_1^*	2 γ	-	Yes	20.3	\tilde{t}_1^*	0.44		$1-\epsilon(\tau(\tilde{t}_1^*)) < 3 \text{ ns}$, SP88 model $6-\epsilon(\tau(\tilde{t}_1^*)) < 1000 \text{ ms}, m(\tilde{t}_1^*) = 1 \text{ TeV}$	1409.5542 1504.05182	
RPV	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* \nu \ell / \mu \nu$	disapp. stk	1 jet	-	3.2	\tilde{g}		1.9	$A_{111} = 0.11, A_{123} = 0.01$	1607.08079	
	$\tilde{t}_1^*\tilde{t}_1^* \rightarrow WZ$	4 ϵ, μ	0	Yes	36.1	\tilde{t}_1^*	0.82	1.33	$m(\tilde{t}_1) < 100 \text{ GeV}$	1804.03802	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* (\ell\ell)^*$	0	4-5 large-R jets	-	36.1	\tilde{g}	1.05	1.3	1.9	$m(\tilde{t}_1) < 200 \text{ GeV}, \text{bino-like}$ Large \tilde{t}_1	1804.03588
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* (\ell\ell)^*$	0	4-5 large-R jets	-	36.1	\tilde{g}	1.05	1.3	2.0	$m(\tilde{t}_1) < 200 \text{ GeV}, \text{bino-like}$	ATLAS-CO NF-2018-003
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* (\ell\ell)^*$	0	4-5 large-R jets	-	36.1	\tilde{g}	0.95	1.05	2.1	$m(\tilde{t}_1) < 200 \text{ GeV}, \text{bino-like}$	ATLAS-CO NF-2018-003
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* (\ell\ell)^*$	0	2 jets + 2 b	-	36.7	\tilde{g}	0.42	0.61		1710.07171	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^* (\ell\ell)^*$	2 ϵ, μ	2 b	-	36.1	\tilde{g}		0.4-1.45		1710.05544	

*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.

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

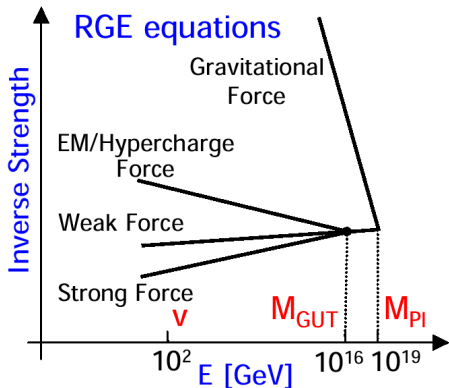
Skala Plancka

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

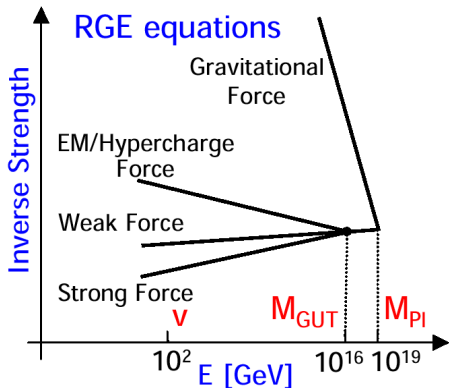
Skala Plancka

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 ?!

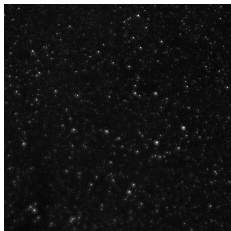
NIE - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo

gwiazdy wydają nam się być

punktowe (bezwymiarowe)



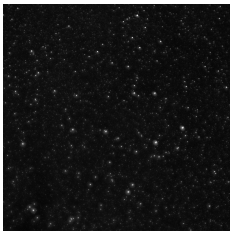
Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

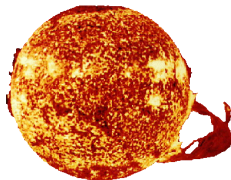
NIE - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

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:



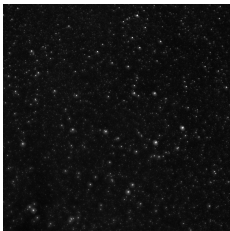
Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

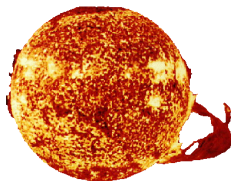
NIE - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

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 ?!

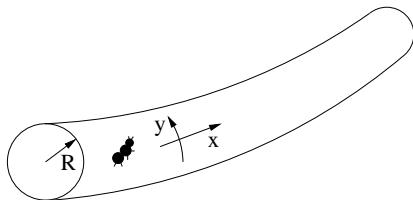
NIE - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład II

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



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



y jest współrzędną cykliczną.

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

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

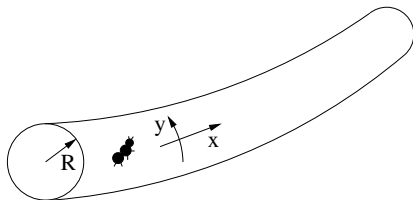
NIE - jeśli tylko nieskończone, **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład II

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



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

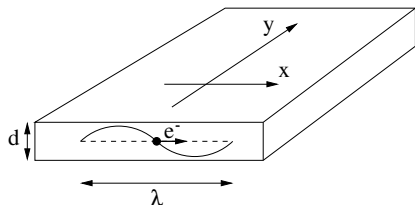


y jest współrzędną **cykliczną**.

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 $\lambda \gg d$

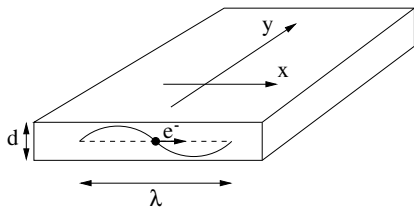
\Rightarrow ruch dwuwymiarowy.

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

(kwantowy efekt Halla).

Przykład III

Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:

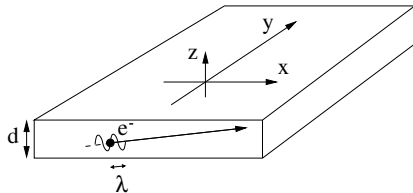


Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d$

\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**...

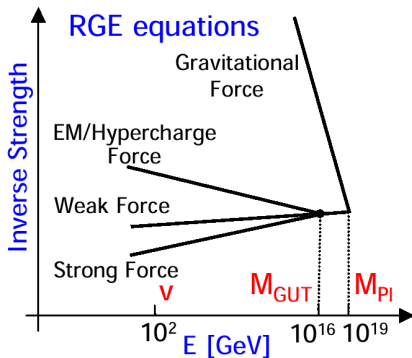
\Rightarrow "odczuwalna" liczba wymiarów zależy od energii...

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 zależeć jak:

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



Skala unifikacji

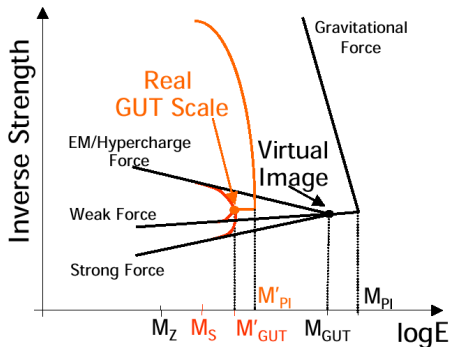
Przyjmijmy, że nasz świat jest $1 + 3 + n$ wymiarowy (dodajemy n skończonych wymiarów przestrzennych o rozmiarze R).

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

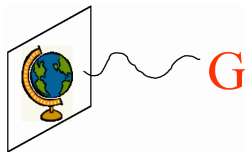
⇒ **prawdziwa skala unifikacji** może być dużo niższa niż nam się wydaje...

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...

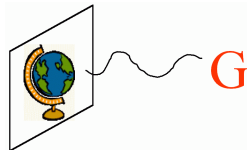


Precyzyjne pomiary fizyki cząstek **wykluczyły** praktycznie istnienie “zwykłych” dodatkowych wymiarów (**otwartych dla wszystkich cząstek**).

Musimy wprowadzić pewne modyfikacje:

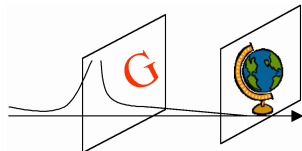
Model ADD Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

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

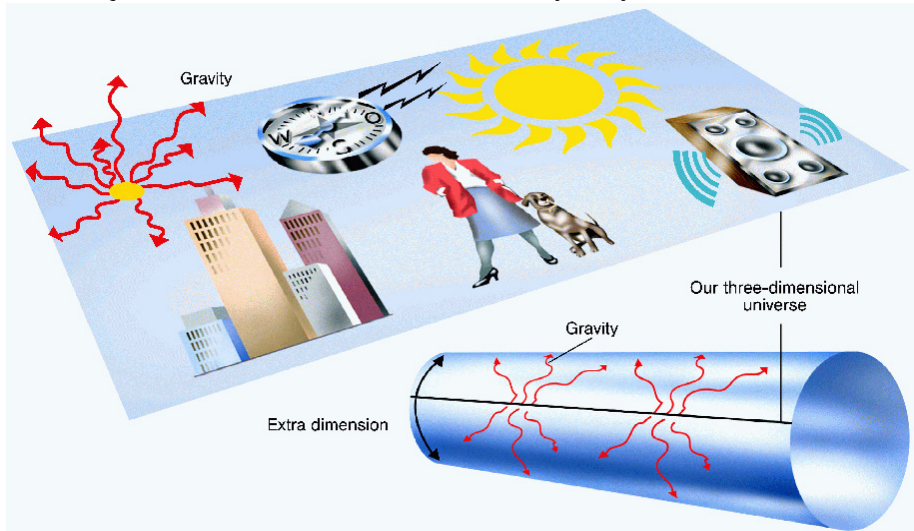


Model R-S Randal, Sundrum (1999)

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...

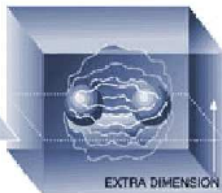
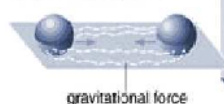
W USA protestowano przeciwko uruchomieniu akceleratora RHIC, bo przeciwnicy obawiali się produkcji **czarnej dziury**, która **pochłonie Ziemię...**

Black Holes on Demand

NYT, September 11, 2001 The New York Times

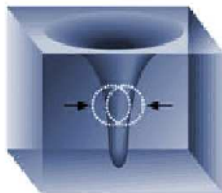
Scientists are exploring the possibility of producing miniature black holes on demand by smashing particles together. Their plans hinge on the theory that the universe contains more than the three dimensions of everyday life. Here's the idea:

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

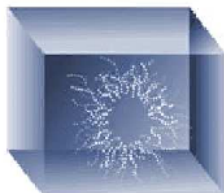


As the particles approach in a particle accelerator, their gravitational attraction increases steadily.

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