

# Путешествие в микромир с физиком-теоретиком

Нерешённые проблемы и новая физика  
за пределами Стандартной Модели



# Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СИЛЫ

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III		
mass→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon	<b>H</b> Higgs
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	<b>G</b> Graviton
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b><math>Z^0</math></b> weak force	
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b><math>W^\pm</math></b> weak force	

Bosons (Forces)

СИЛЫ

Электромагнитные

Сильные

Слабые

Юкавские

Гравитация

Задача № 1:

Почему в природе  
понадобились три поколения  
элементарных частиц?

Загадка № 2:

Как объяснить отсутствие антиматерии во Вселенной?

Загадка № 3:

Что такое тёмная  
материя и из чего она  
состоит?

Задача № 4:

Квантовая гравитация:  
как она устроена?

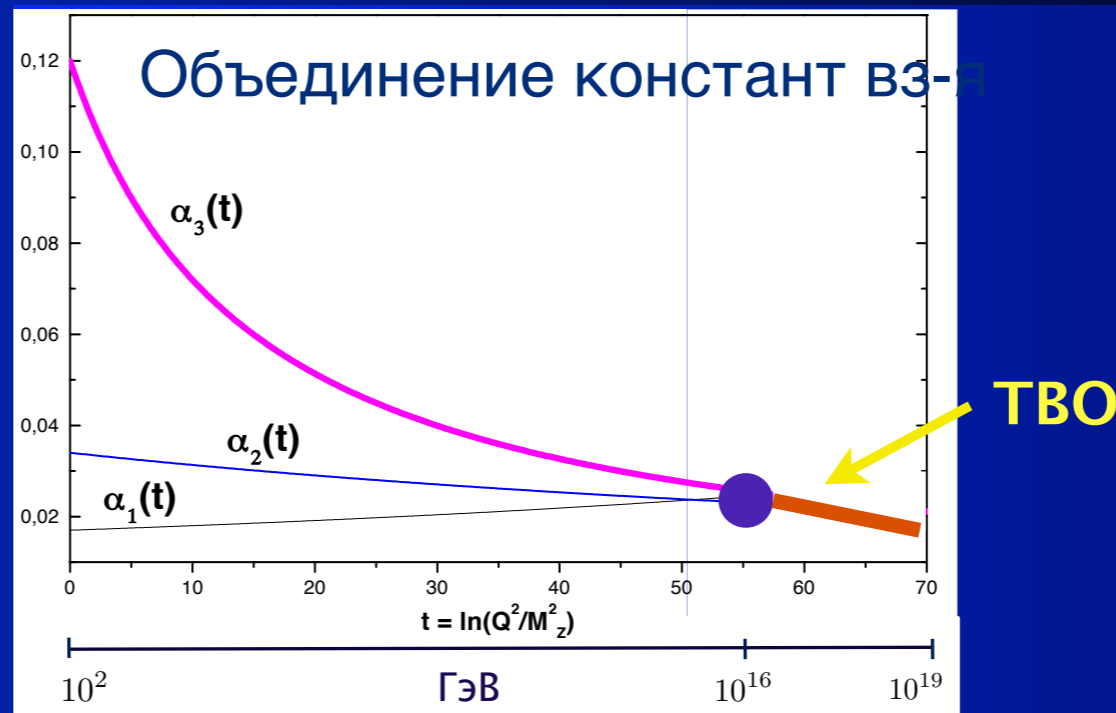
# Теории Великого объединения

- Группа симметрии ТВО включает группу симметрии СМ  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  как подгруппу
- Частицы одного поколения СМ принадлежат представлению группы ТВО (кварки становятся неразличимы от лептонов)
- Три различные силы: сильные, слабые и электромагнитные являются «ветвями» единой силы

Объединённые теории  
Электричество и магнетизм  
есть различные проявления  
одной электромагнитной силы.

Электромагнетизм,  
слабые и сильные  
взаимодействия могут  
быть проявлениями  
одной единой силы.

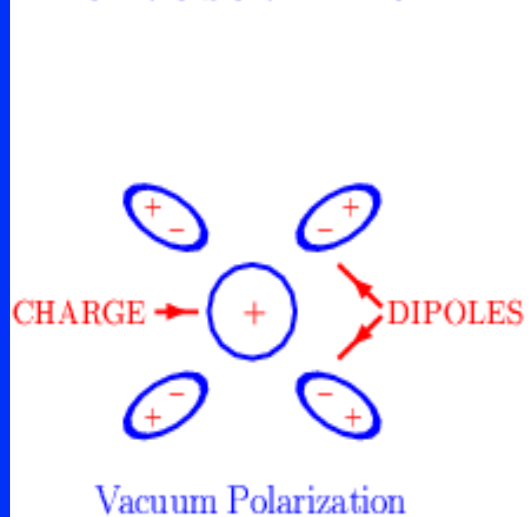
Единая теория  
может включать и  
гравитацию.



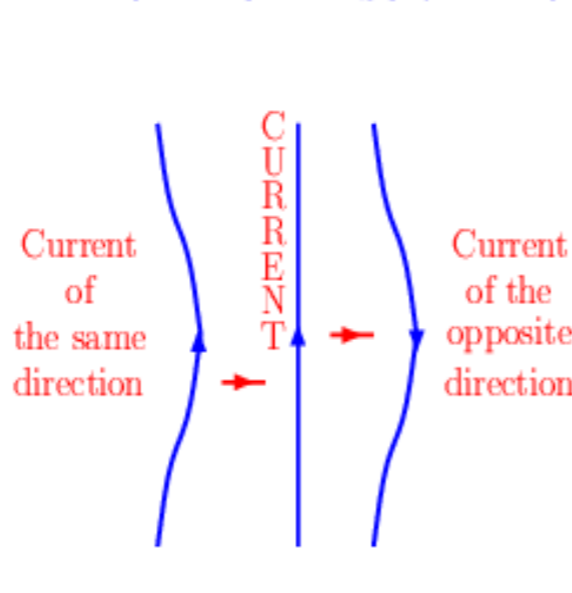
«объединение»  
констант вз-я -  
есть следствие их  
общего  
происхождения

# «Бегущие» константы взаимодействия

ELECTRIC SCREENING

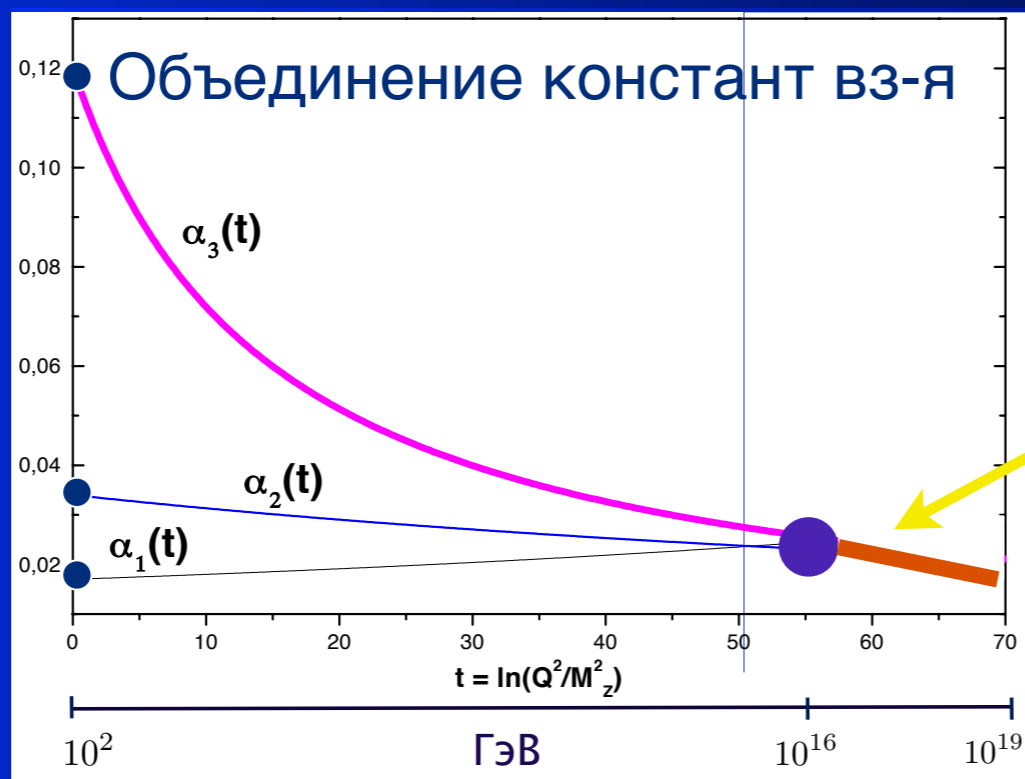
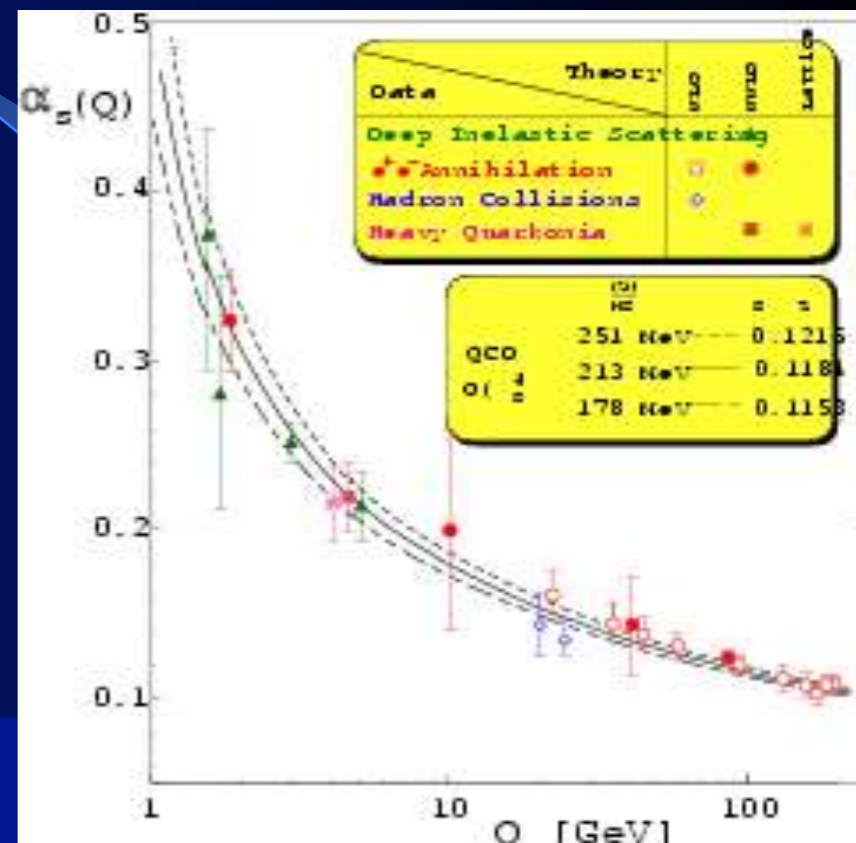


MAGNETIC ANTISCREENING



константа вз-я - есть функция расстояния

$$\alpha = \alpha(\text{distance})$$



$\alpha_3(M_Z) \approx 0.0118$   
 $\alpha_2(M_Z) \approx 0.0034$   
 $\alpha_1(M_Z) \approx 0.0017$

«бег» константы сильного вз-я

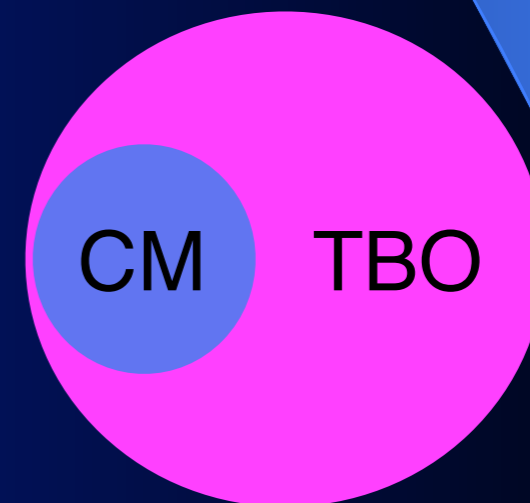
«объединение» констант вз-я - есть следствие их общего происхождения



# Теория Великого объединения - расширение группы симметрии СМ

Low energy			⇒	High energy
$SU_c(3) \otimes$	$SU_L(2) \otimes$	$U_Y(1)$	⇒	$G_{GUT}$ (or $G^n$ + discrete symmetry)
gluons	$W, Z$	photon	⇒	gauge bosons
quarks	leptons		⇒	fermions
$g_3$	$g_2$	$g_1$	⇒	$g_{GUT}$

*Ex* :  $SU(5), SO(10), E(6), SU(5) \times U(1),$   
 $SU(4) \times SU(2) \times SU(2), SO(10) \times U(1)$



$$SU(3) \times SU(2) \times U(1) \subset G_{GUT}$$

# Модели ТВО

## SU(5) - Minimal GUT

### Gauge fields

$$\underline{24} = (\underline{8}, \underline{1}) + (\underline{1}, \underline{3}) + (\underline{3}, \underline{2}) + (\underline{3}, \underline{2})$$

*gluons      W and Z      leptoquarks*

$$SU(5) : \bar{5} + 10 + 1$$

$$\underline{5}^* = (d_1^c, d_2^c, d_3^c, e^-, \nu_e)_{Left} \quad \underline{10} = \begin{pmatrix} 0 & u_3^c & -u_2^c & u_1 & d_1 \\ & 0 & u_1^c & u_2 & d_2 \\ & & 0 & u_3 & d_3 \\ & & & 0 & e^+ \\ & & & & 0 \end{pmatrix}_{Left} \quad 1 = \nu_L^c$$

## SO(10) - Optimal GUT

### Matter fields - just one representation

$$\underline{16} = (u_1 \ u_2 \ u_3 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \ \nu_e \ e^- \ u_1^c \ u_2^c \ u_3^c \ d_1^c \ d_2^c \ d_3^c \ \nu_e^c \ e^+)_{Left}$$

### SU(5) decomposition

$$\underline{16} = \underline{5}^* + \underline{10} + \underline{1} \quad \textit{fermions,}$$

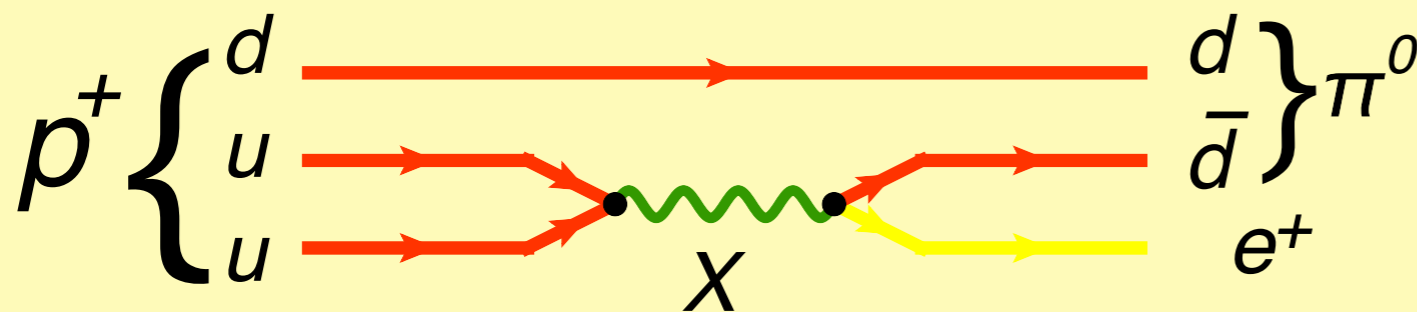
$$\underline{45} = \underline{24} + \underline{10} + \underline{10}^* + \underline{1} \quad \textit{gauge bosons}$$

# Нестабильность протона

В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

$$\tau_{proton} \sim 10^{32} \text{ years}$$

$$\tau_{Universe} \approx 14 \cdot 10^9 \text{ years}$$

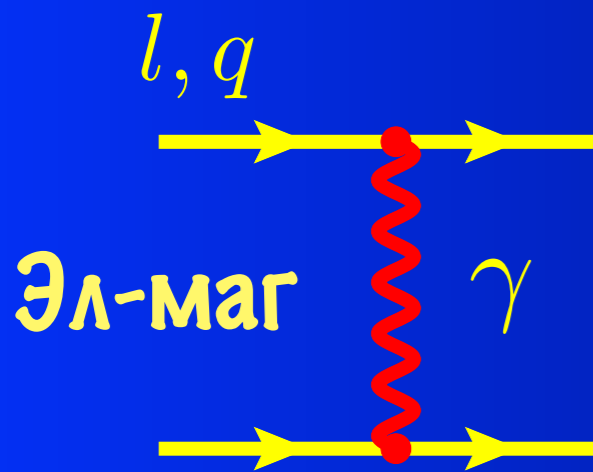


Камиока (Япония)

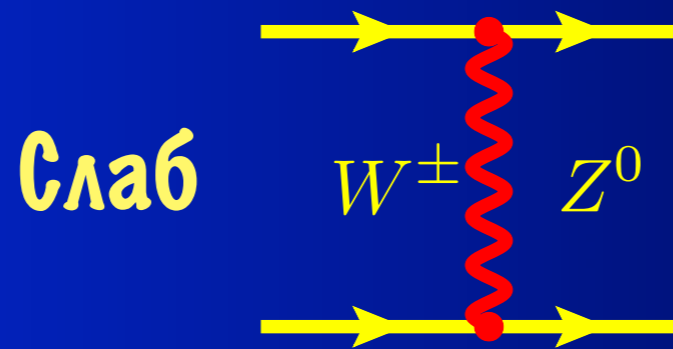


Эксперимент в Камиока не нашёл распада протона, но обнаружил переход нейтрино одного сорта в другое - нейтринные осцилляции

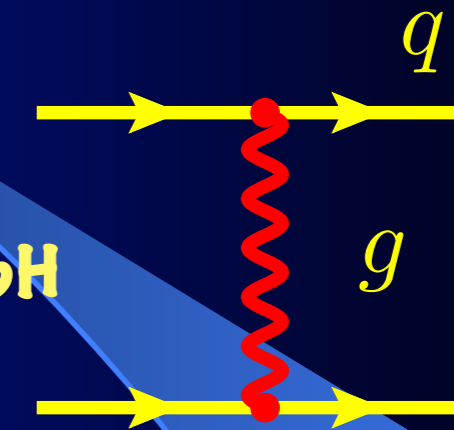
# Пять фундаментальных сил Природы



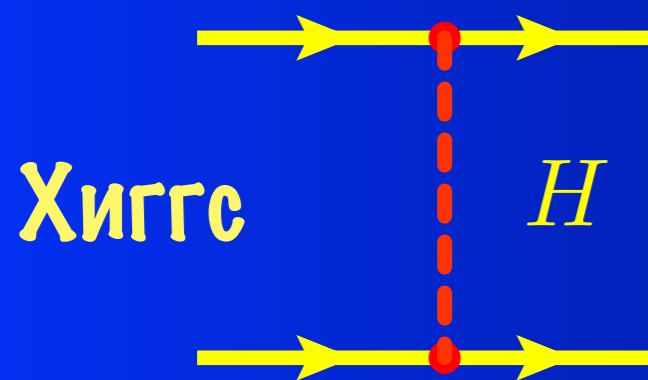
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



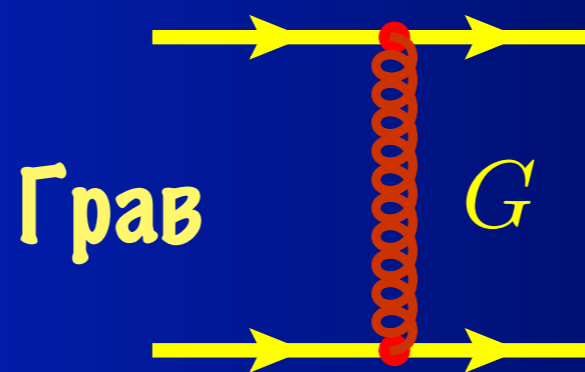
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$



$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{v_H^2 r} e^{-M_H r}$$

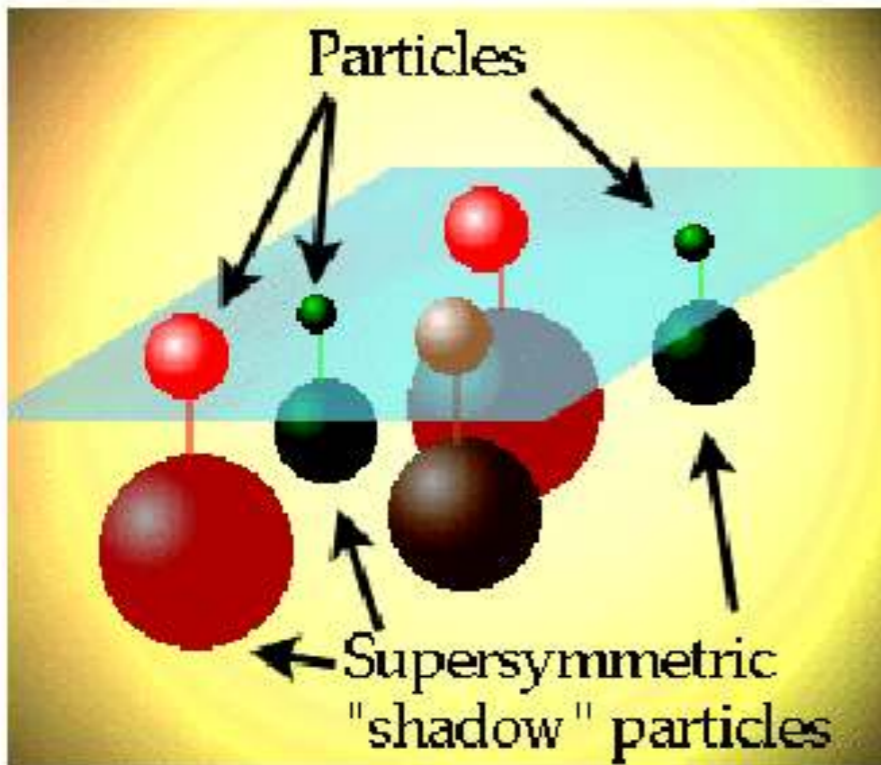


$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

$\gamma$	$W^\pm Z^0$	$g$	=1
$H$			=0
$G$			=2

# Суперсимметрия



- Новый вид симметрии между частицами с целым спином – **бозонами** и частицами с полуцелым спином – **фермионами**
  - Суперсимметрия - это есть расширение группы **пространственной** симметрии СМ спинорными генераторами, причем единственно возможное
  - Локальная суперсимметрия - есть теория гравитации - супергравитация
- 
- Теория супергравитации включает в себя все известные частицы и взаимодействия, а также предсказывает существование новой частицы - **гравитино**, суперпартнёра гравитона

# Суперпартнёры

кварк  
лептон  
W-бозон  
Z-бозон  
глюон  
фотон  
Хиггс  
гравитон

$$q \rightarrow \tilde{q}$$

$$l \rightarrow \tilde{l}$$

$$W \rightarrow \tilde{W}$$

$$Z \rightarrow \tilde{Z}$$

$$g \rightarrow \tilde{g}$$

$$\gamma \rightarrow \tilde{\gamma}$$

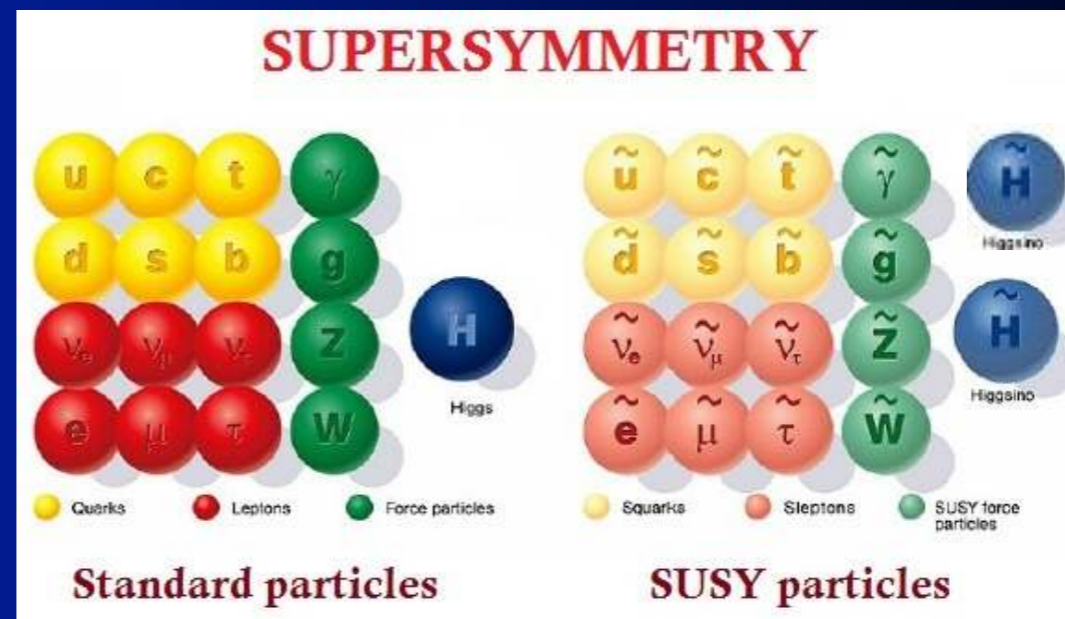
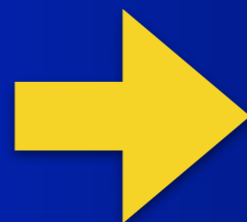
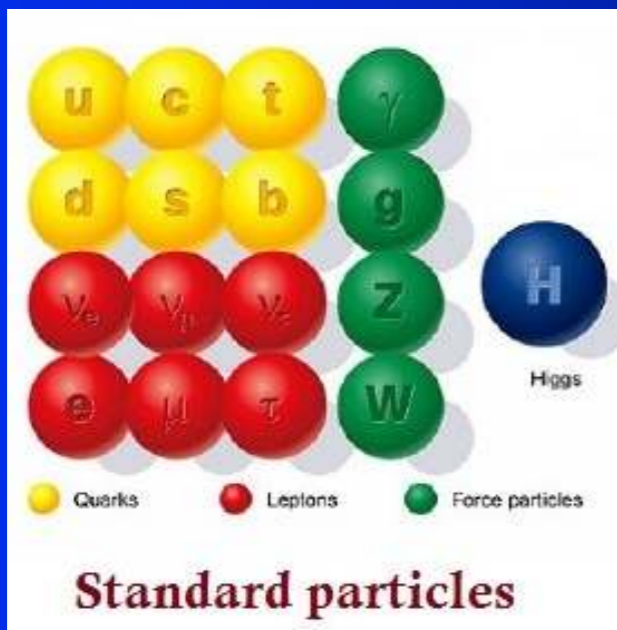
$$H \rightarrow \tilde{H}$$

$$G \rightarrow \tilde{G}$$

скварк  
слептон  
ВИНО  
ЗИНО  
глюино  
фотино  
Хиггсино  
гравитино

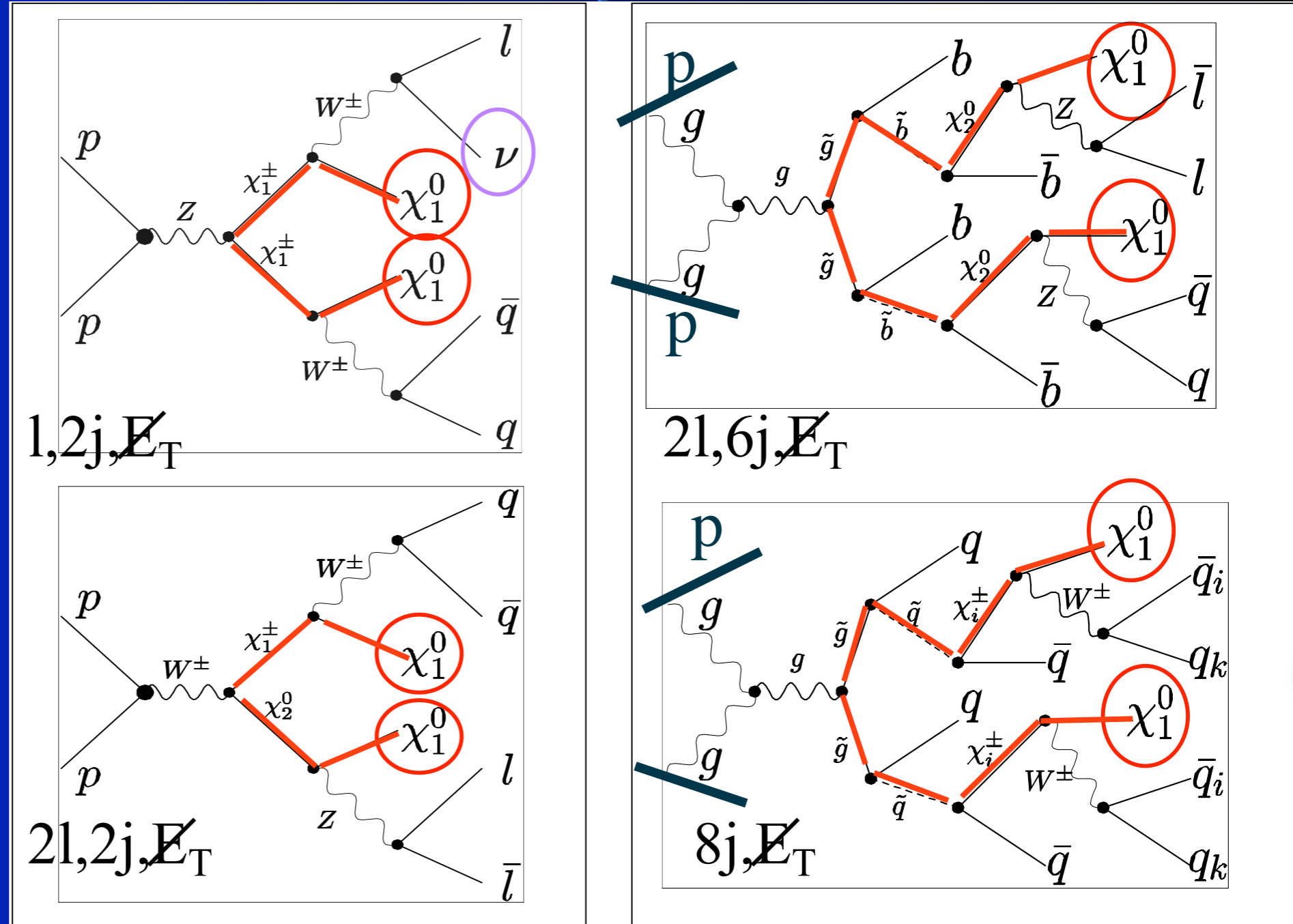
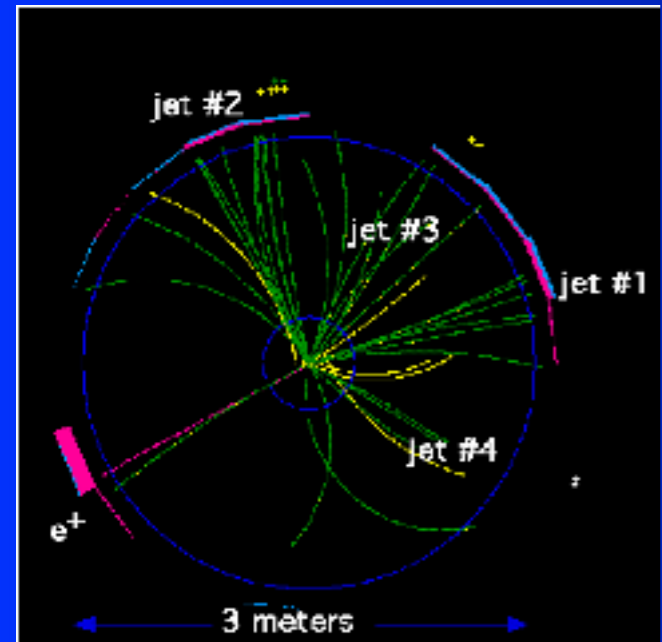
- Каждая частица имеет тяжёлого партнёра отличающегося лишь значением спина на 1/2
- «суперпартнёры» тяжелее обычных частиц и потому пока не рождаются на ускорителях

SM



MSSM

# Рождение суперчастиц на коллайдерах



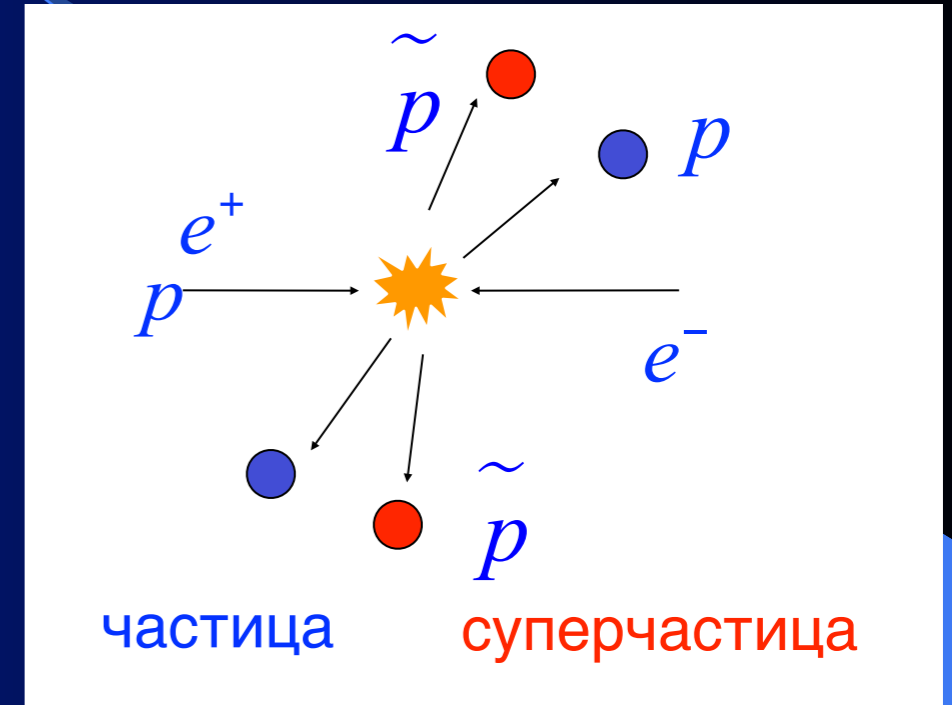
Красным цветом показаны суперпартнёры

# Суперсимметричная тёмная материя

- Суперчастицы рождаются парами
- Легчайшая суперчастица - стабильна

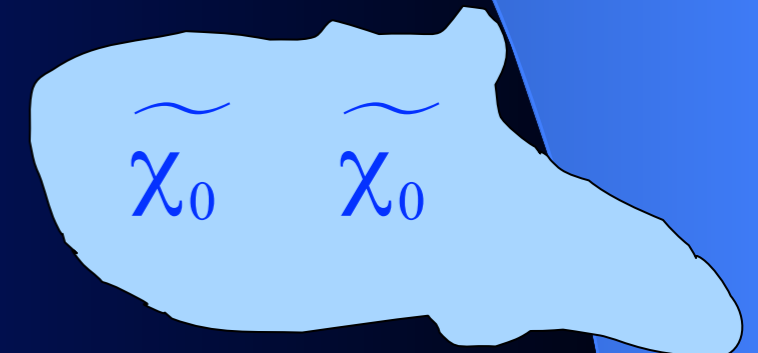


- Легчайшая суперчастица должна быть нейтральна - наилучший кандидат есть нейтралино (фотино или хиггсино)
- Она могла бы выжить со времени Большого взрыва и образовать Тёмную материю во Вселенной



$$\tilde{\chi}_0 = N_{11}\tilde{\gamma} + N_{12}\tilde{Z} + N_{13}\tilde{H}_1^0 + N_{14}\tilde{H}_2^0$$

↑ фотино    
 ↑ зино    
 ↑ хиггсино    
 ↑ хиггсино



нейтралино - тяжёлая (~ 100 масс протона), нейтральная, стабильная слабо взаимодействующая частица

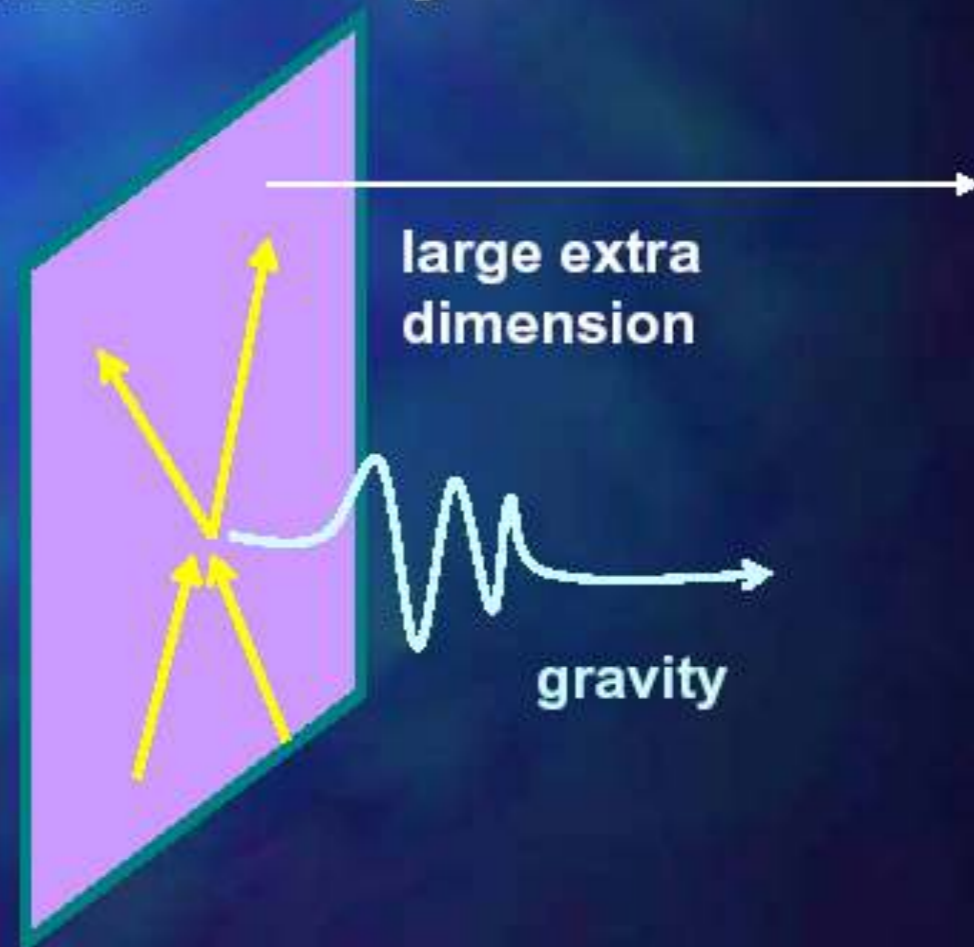


# Многомерный мир

- **conventional Kaluza-Klein idea:**  
internal extra dimension too small to be seen



- **discovery of D-brane**
  - **matter fields** restricted to lower dimensional brane
  - external bulk felt only through **gravity**
  - extra dimension bigger



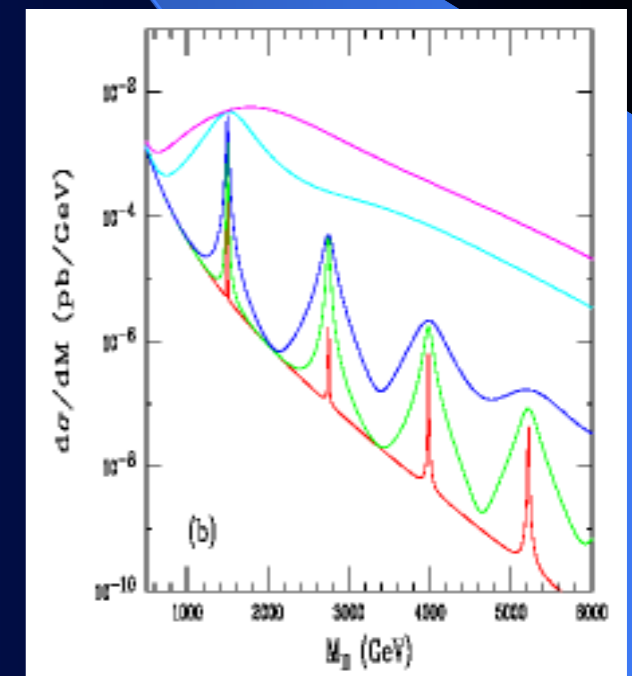
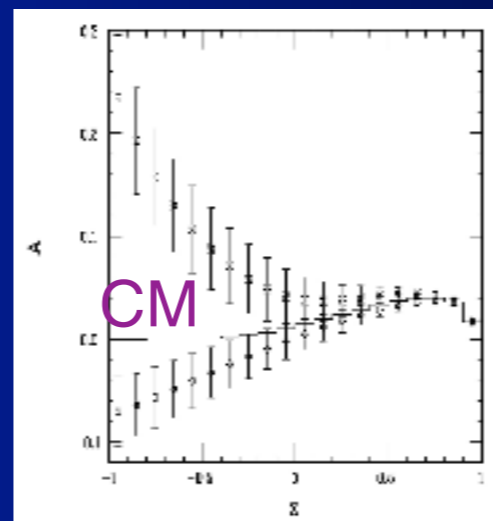
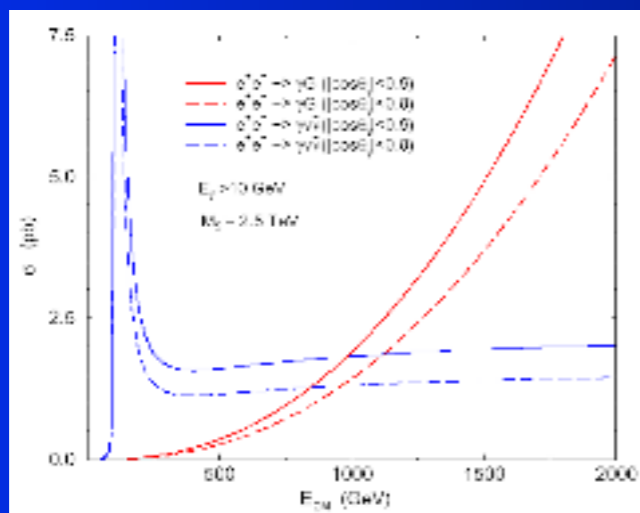
# Наблюдаемые следствия наличия дополнительных измерений

- Модификация закона Ньютона  
d - число доп измерений

$$V(r) \sim \frac{1}{r}, \quad r \gg R$$

$$V(r) \sim \frac{1}{r^{d+1}}, \quad r \leq R$$

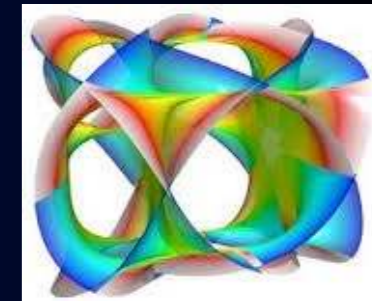
- Наличие новых тяжёлых частиц (мод Калуца-Кляйна)  $\Rightarrow$  резонансы в сечения рассеяния
- Рост множественности и сечений рассеяния
- Изменения в угловых распределениях



Экспериментального подтверждения пока не получено

# Теория Стрелы

# Струна - протяжённый объект



Моды колебаний струны - элементарные частицы

Открытая струна - спин 0, спин 1

спин 1/2

Калибровочные теории

Замкнутая струна - спин 2

спин 3/2

Гравитация

Бозоны

Фермионы

Все известные нам частицы - нулевые моды колебаний струны!

# Квантовая теория струн

Квантовая теория струн возможна в критической размерности пространства-времени

Бозонная струна:  $D = 26$       Фермионная струна:  $D = 10$

Чтобы избавиться от тахионов струна должна быть суперсимметричной!

Требуется компактифицировать шесть измерений чтобы получить 4-мерную теорию



Форма и топология пространства  $X$  определяют структуру и значение констант связи 4-мерной теории

Число поколений СМ равно половине эйлеровой характеристики компактного многообразия



# Теория струн - теория всего

in D=10/11:

gravity...

... and a p-brane

$$S_D = \frac{1}{l_S^{D-2}} \int d^D x \sqrt{-g} R + \dots + \frac{1}{l_S^{p-3}} \int d^{p+1} x \sqrt{-\gamma} \text{tr}(F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta}) + \dots$$

in D=4:

$$S_4 = \frac{V}{l_S^{D-2}} \int d^D x \sqrt{-g_4} R_4 + \dots + \frac{v}{l_S^{p-3}} \int d^{p+1} x \sqrt{-g_4} \text{tr}(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}) + \dots$$

$\frac{1}{16\pi G_N}$        $\frac{1}{16\pi g_{YM}^2}$

Квантовая теория струн включает в себя квантовую гравитацию!

Проблема: не удаётся построить самосогласованную теорию струн из-за наличия огромного числа всевозможных вакуумов

Проблема: не удаётся построить последовательного низкоэнергетического предела теории струн и извлечь наблюдаемые следствия

Какие новые загадки или  
разгадки ждут нас за  
пределами Стандартной  
теории?

СТ