

***КВАРКИ, ЛЕПТОНЫ,
БОЗОН ХИГГСА
и ВАКУУМ***

***Парфенов К.В.
физический факультет МГУ***

А если так, то что есть красота?

И почему ее обожествляют

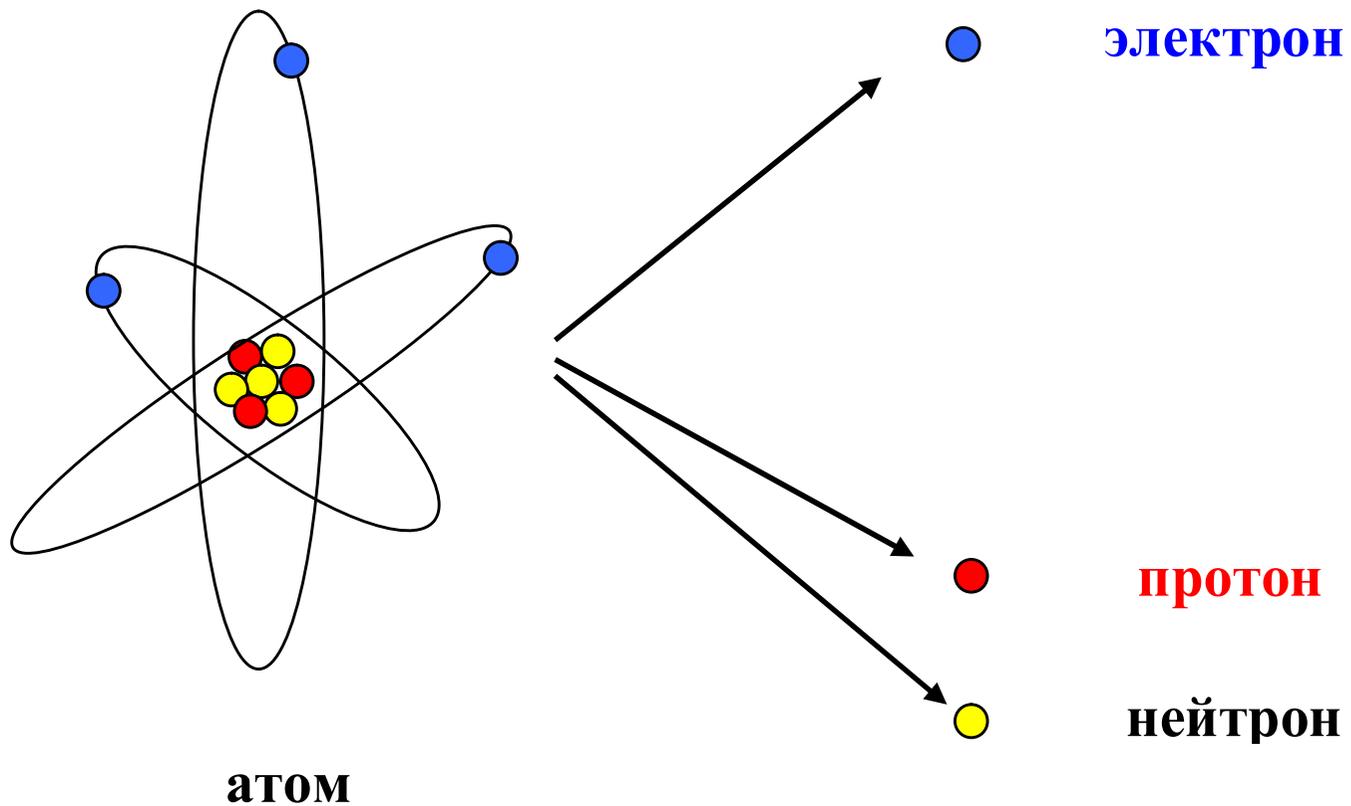
люди?

Сосуд она, в котором пустота,

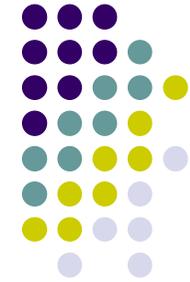
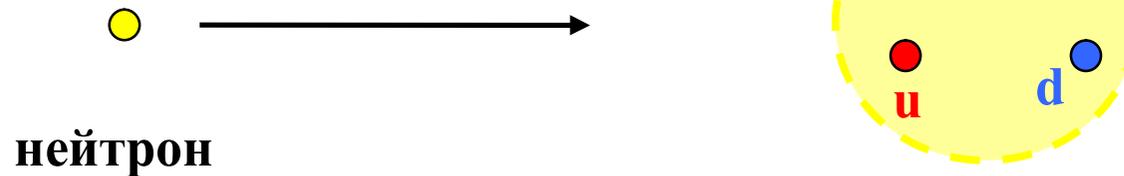
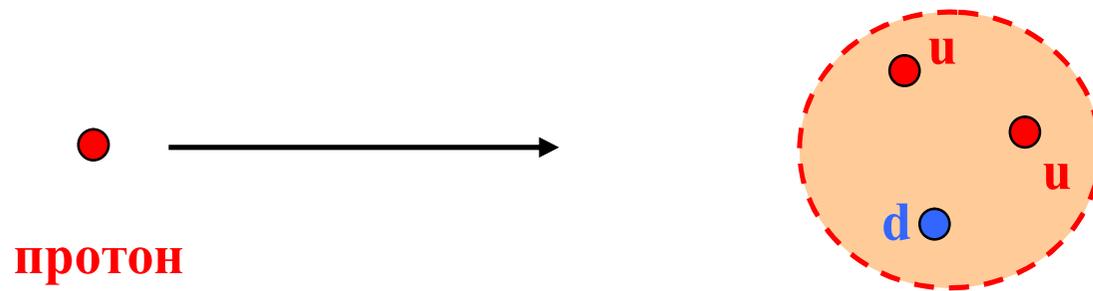
Или огонь, мерцающий в сосуде?

Н. Заболоцкий

Путь внутрь атомов:



«обычное» вещество состоит из протонов, нейтронов и электронов



протоны и нейтроны состоят из кварков **u** (“up”) и **d** (“down”);

кварки и электрон похожи на «точечные» частицы (радиус более чем в 100000 раз меньше, чем у протона и нейтрона)

В космических лучах и с помощью ускорителей были найдены другие частицы.



В основе классификации элементарных частиц лежит их разбиение на группы по:

- взаимодействиям, в которых они участвуют
- по значению спина (собственного момента количества движения)
- по массе покоя
- по размерам области распределения заряда

Лептоны: участвуют в слабом и электромагнитном взаимодействиях, спин $\frac{1}{2}$, массы покоя от 0 до 2 ГэВ, зарядовые радиусы меньше 10^{-18} см. Открыто: 6 видов («ароматов») лептонов.

Адроны: участвуют в сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях, спины целые (у мезонов) и полуцелые (у барионов), массы покоя от 140 Мэв и выше, зарядовые радиусы порядка 10^{-13} см. Открыто: более 6 тысяч адронов.

Отдельно вводится ряд частиц («переносчики взаимодействий»), ответственных за существование каждого типа взаимодействий.

ЧАСТИЦЫ МАТЕРИИ

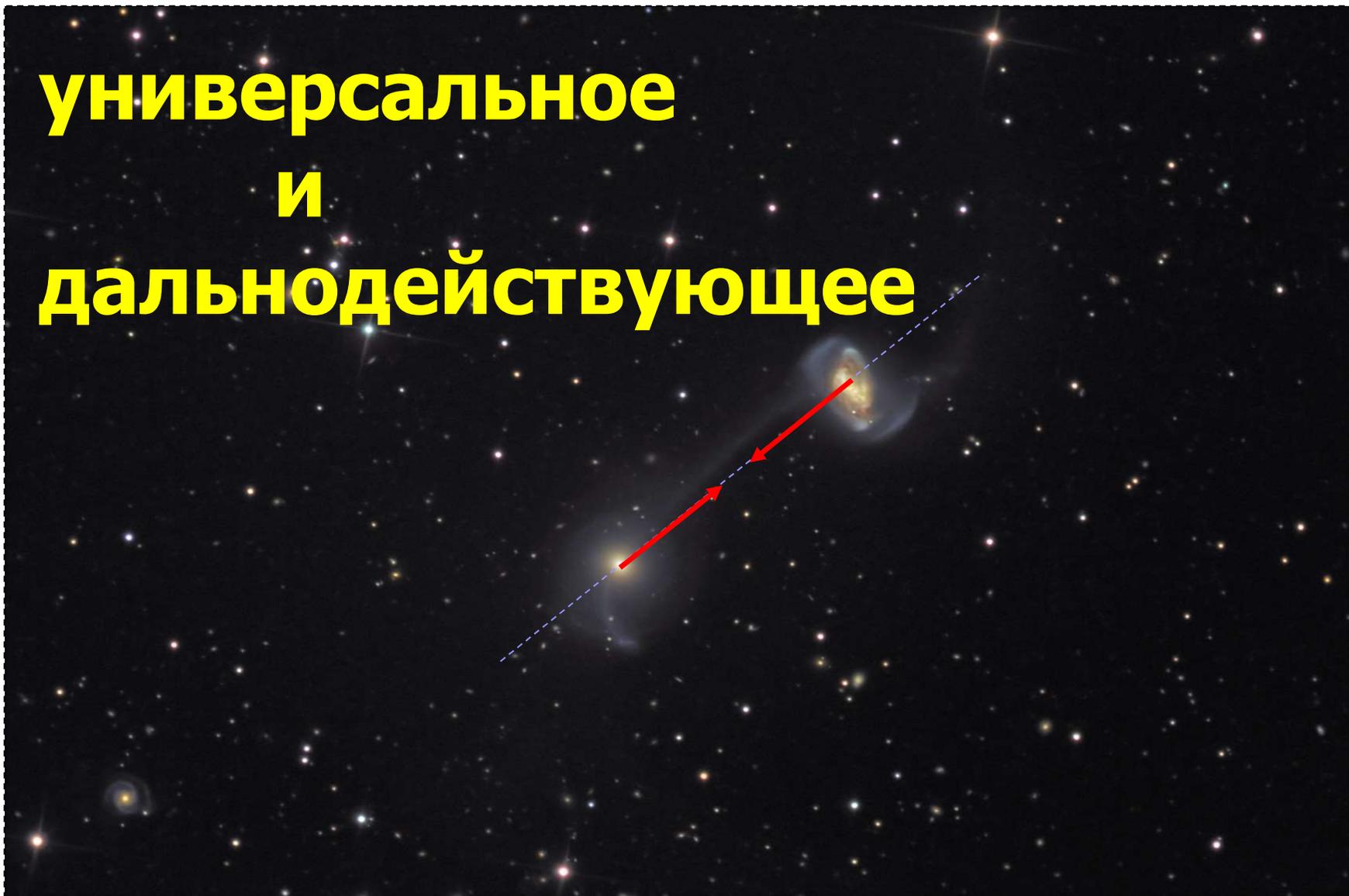


КВАРКИ			
	название	масса (ГэВ)	заряд (e)
u	<i>up</i>	0,004	+2/3
d	<i>down</i>	0,007	-1/3
c	<i>charm</i>	1,5	+2/3
s	<i>strange</i>	0,3	-1/3
t	<i>top</i>	173	+2/3
b	<i>bottom</i>	4,7	-1/3

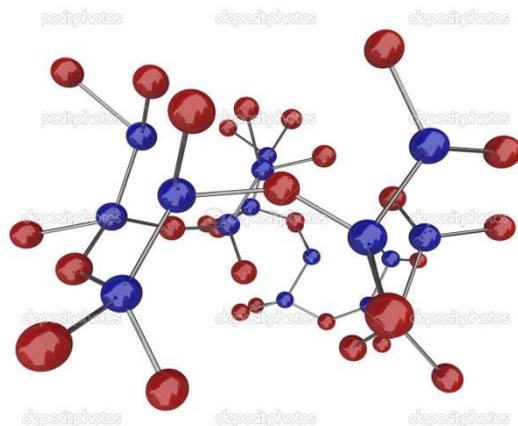
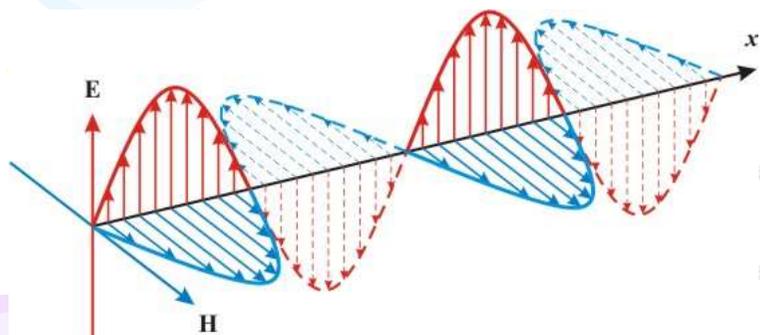
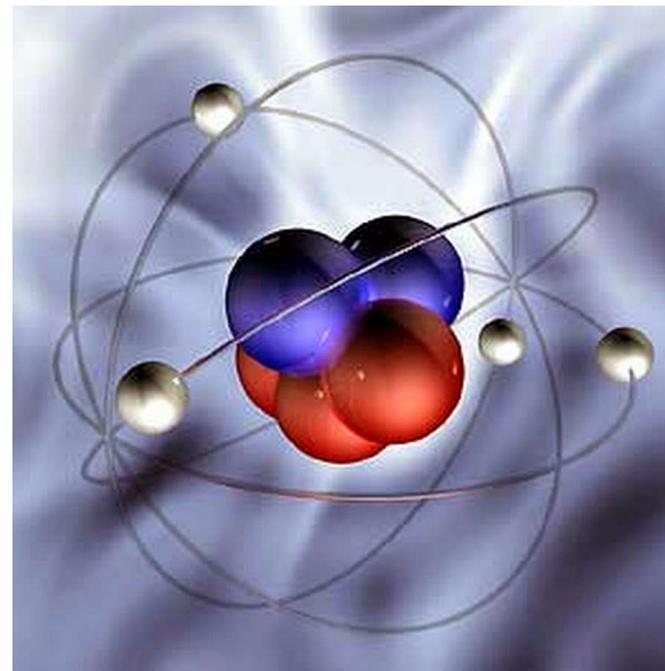
ЛЕПТОНЫ			
	название	Масса (ГэВ)	Заряд (e)
e	<i>электрон</i>	0,00051	-1
ν_e	<i>e-нейтрино</i>	около 0	0
μ	<i>мюон</i>	0,106	-1
ν_μ	<i>μ-нейтрино</i>	около 0	0
τ	<i>тау-лептон</i>	1,78	-1
ν_τ	<i>τ-нейтрино</i>	около 0	0

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

**универсальное
и
дальнодействующее**

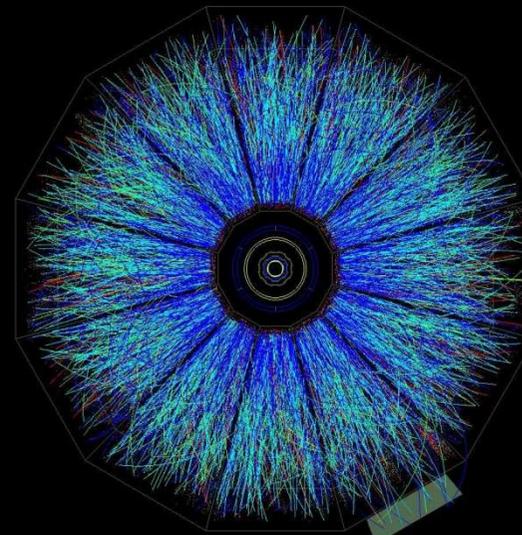
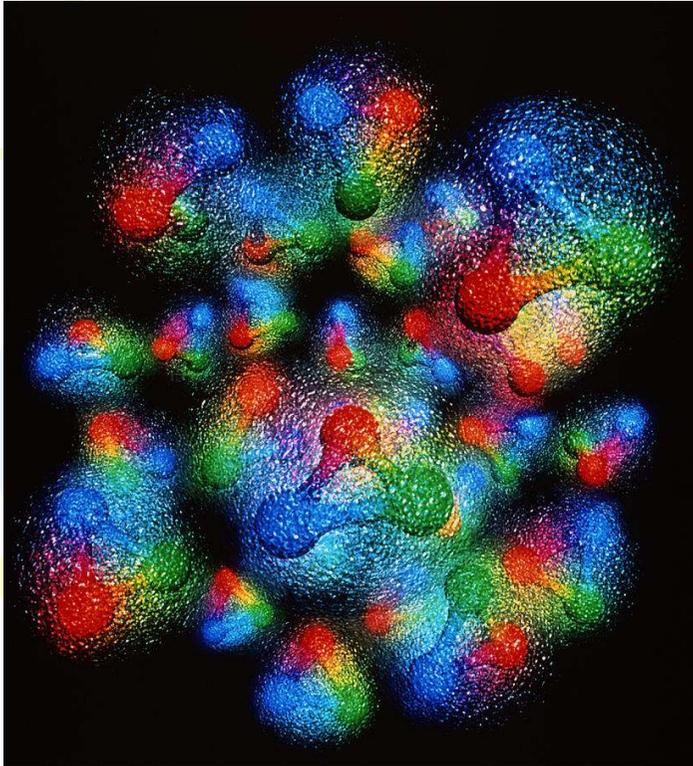


ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

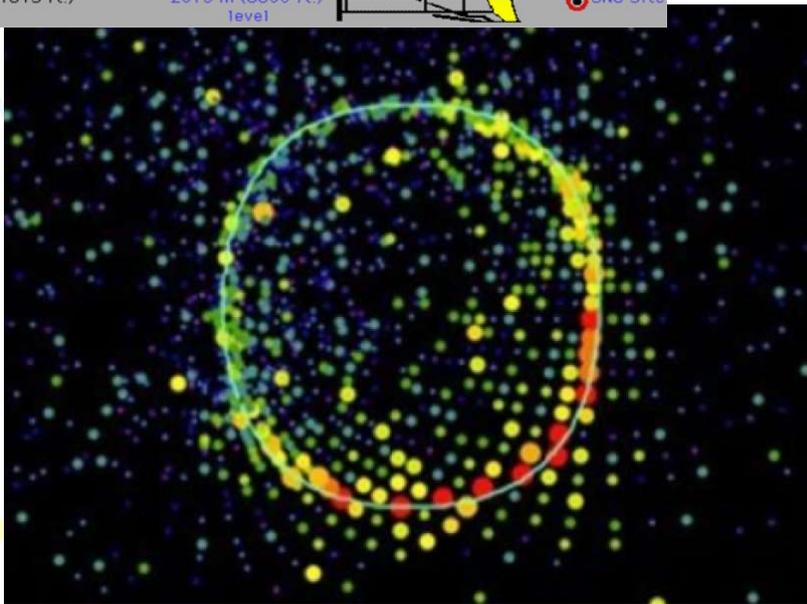
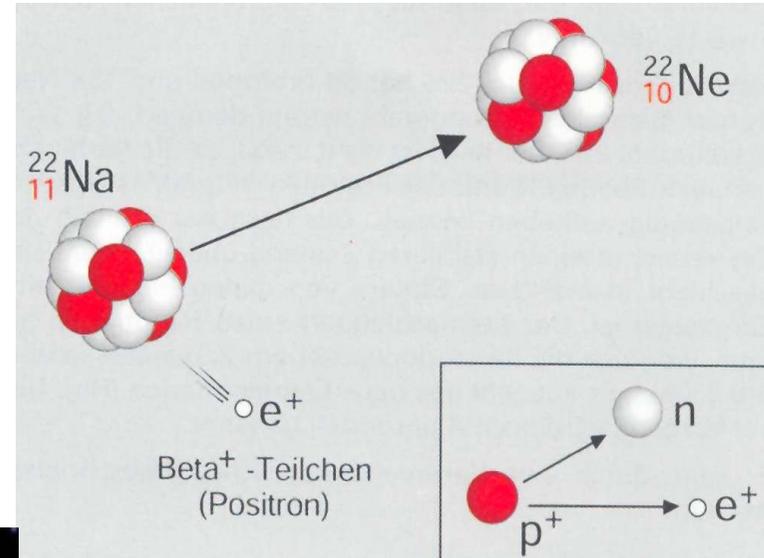
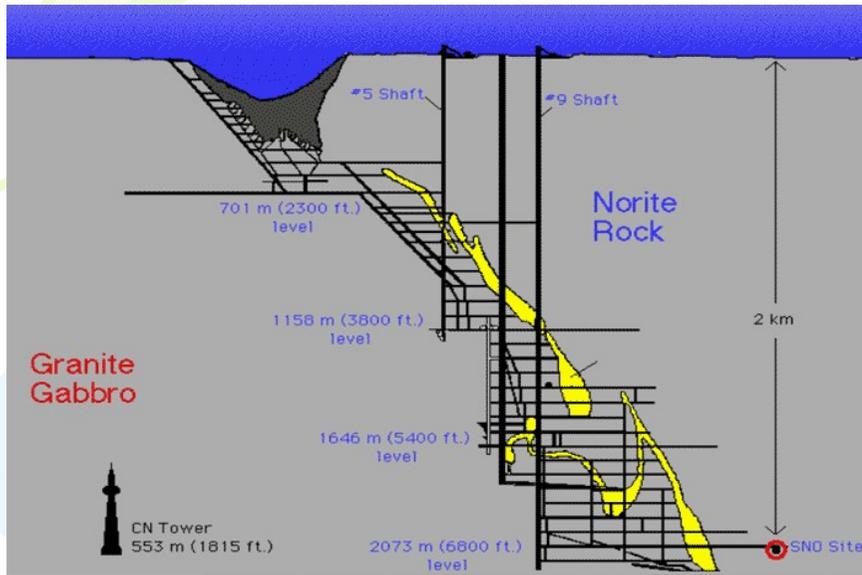


СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

радиус $R_s \approx 10^{-15}$ м
 $U \gg mc^2$

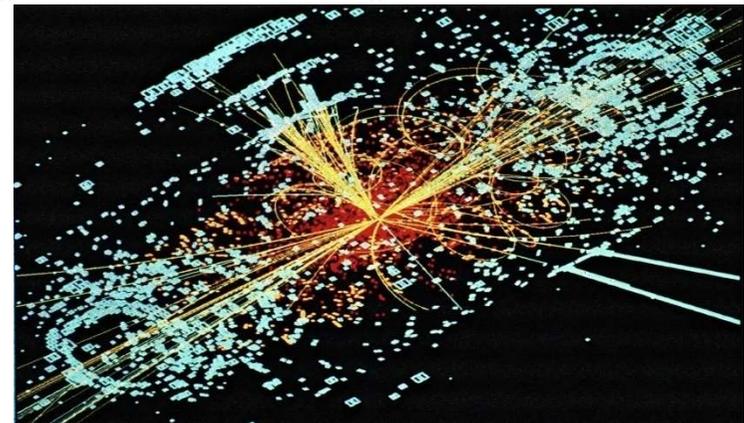


СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

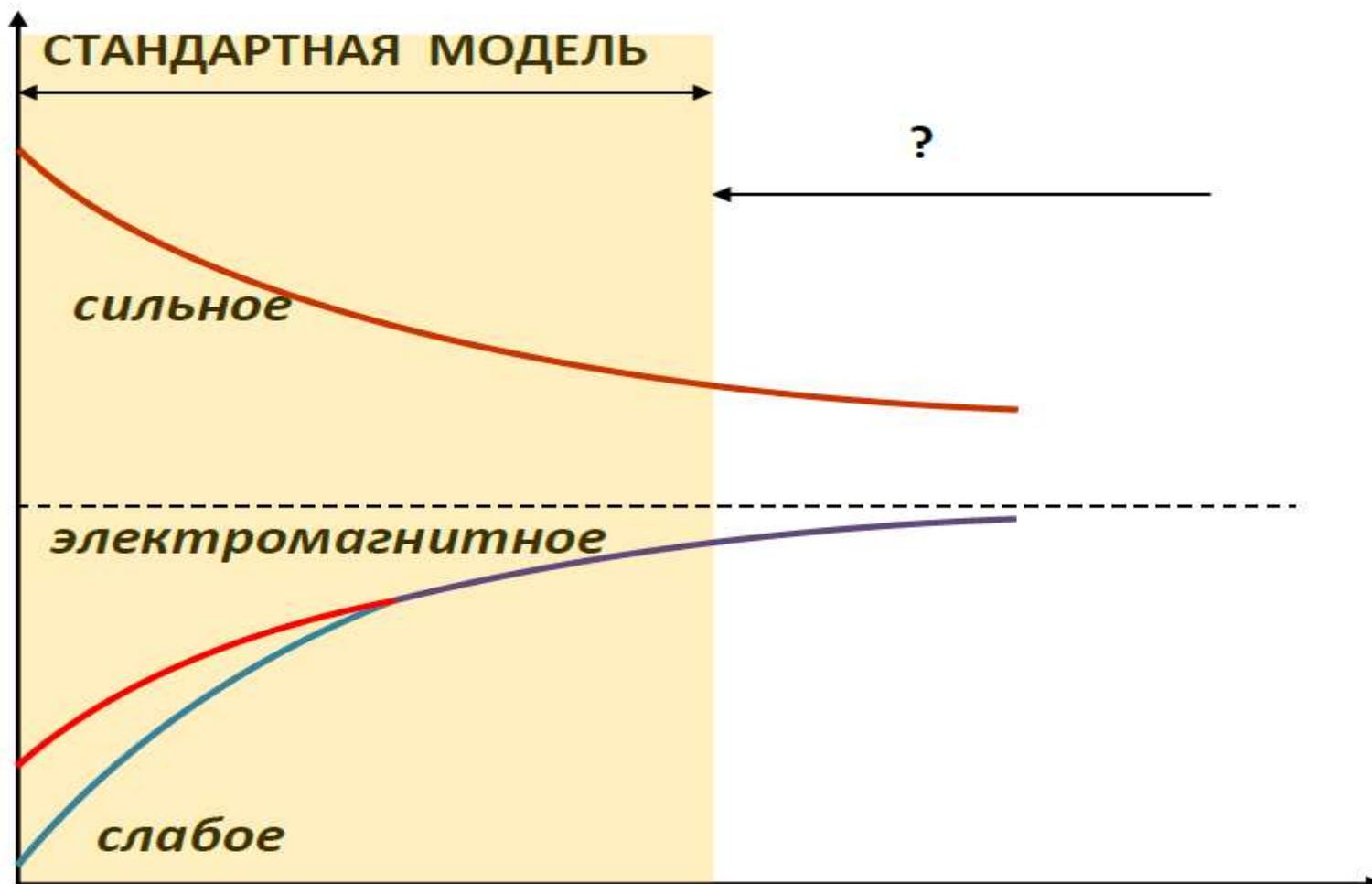


ПЕРЕНОСЧИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

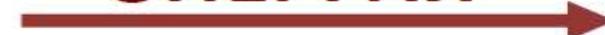
взаимодействие			масса (ГэВ)	заряд (e)
электромагнитное	γ	фотон	0	0
сильное	G	глюоны	0	0
слабое	W^{\pm}	W-бозон	82	± 1
	Z^0	Z-бозон	90	0
гравитационное	g_g	гравитон	0	0
	\tilde{g}_g	гравитино	?	0



ИНТЕНСИВНОСТЬ



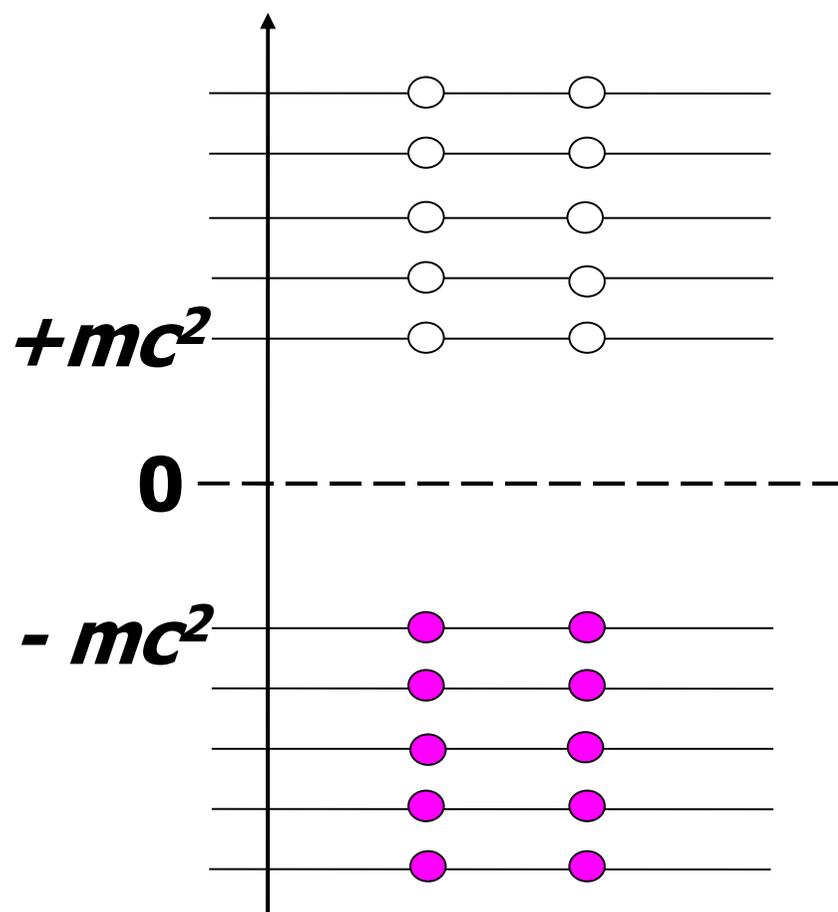
ЭНЕРГИЯ



РАССТОЯНИЕ



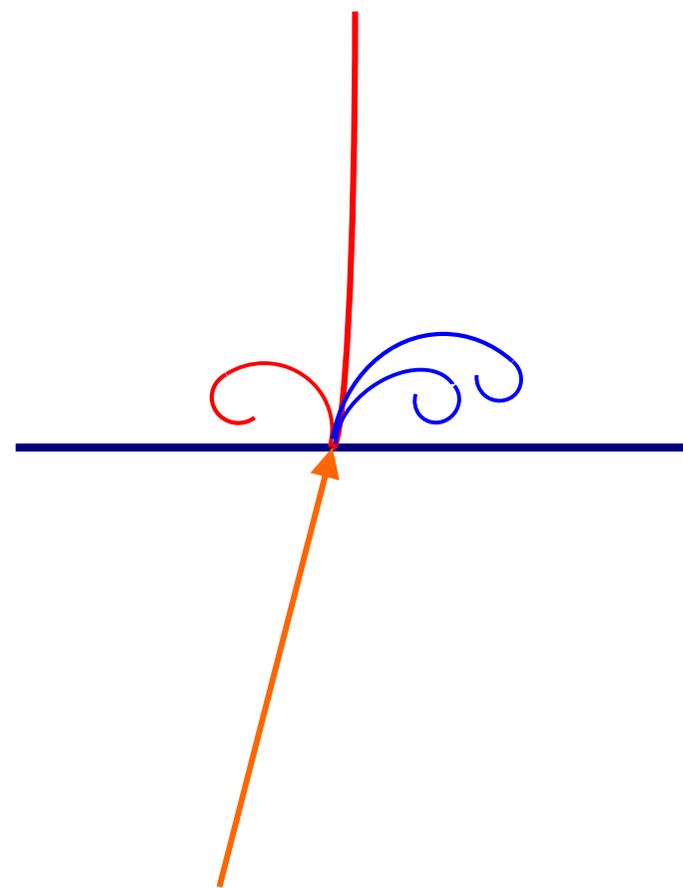
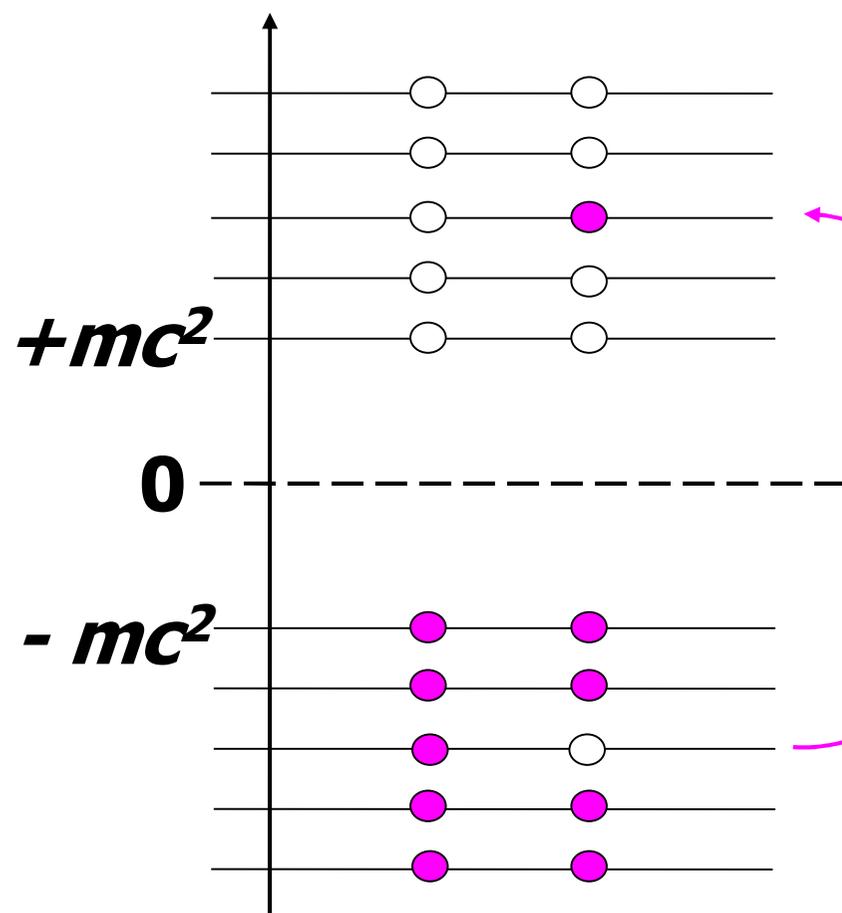
МИР ДИРАКА



Теория квантовых частиц, движущихся с околосветовыми скоростями в «пустоте» приводила к «странному» выводу: энергия частиц может быть не только положительной, но и отрицательной!

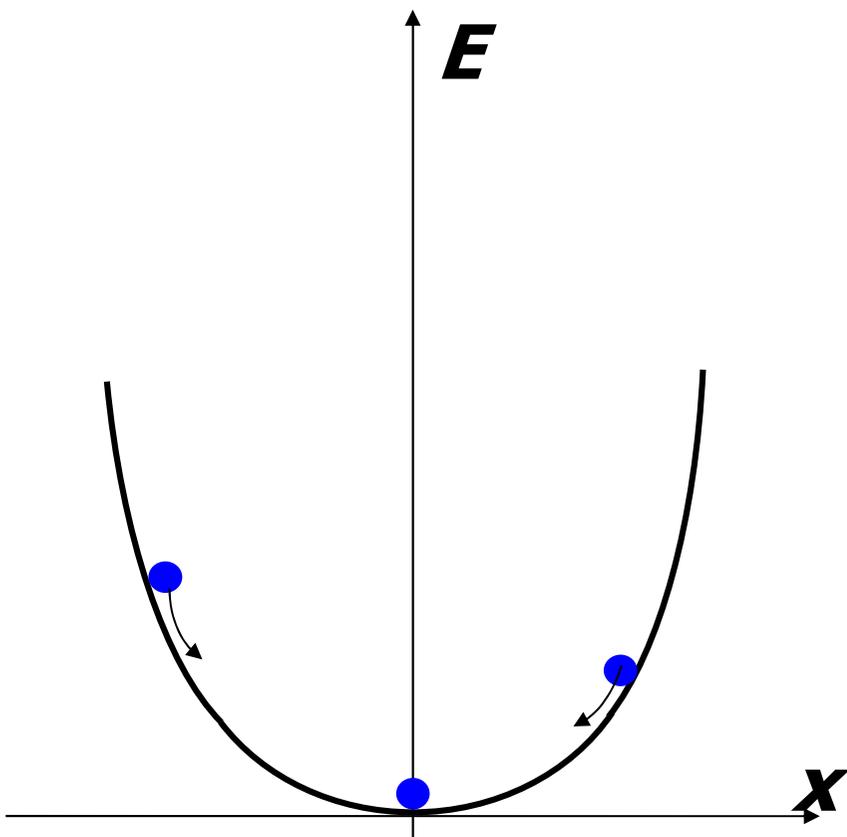
Дирак предположил, что «пустоты» не бывает, а есть **вакуум** – очень сложная по устройству среда.

МИР ДИРАКА



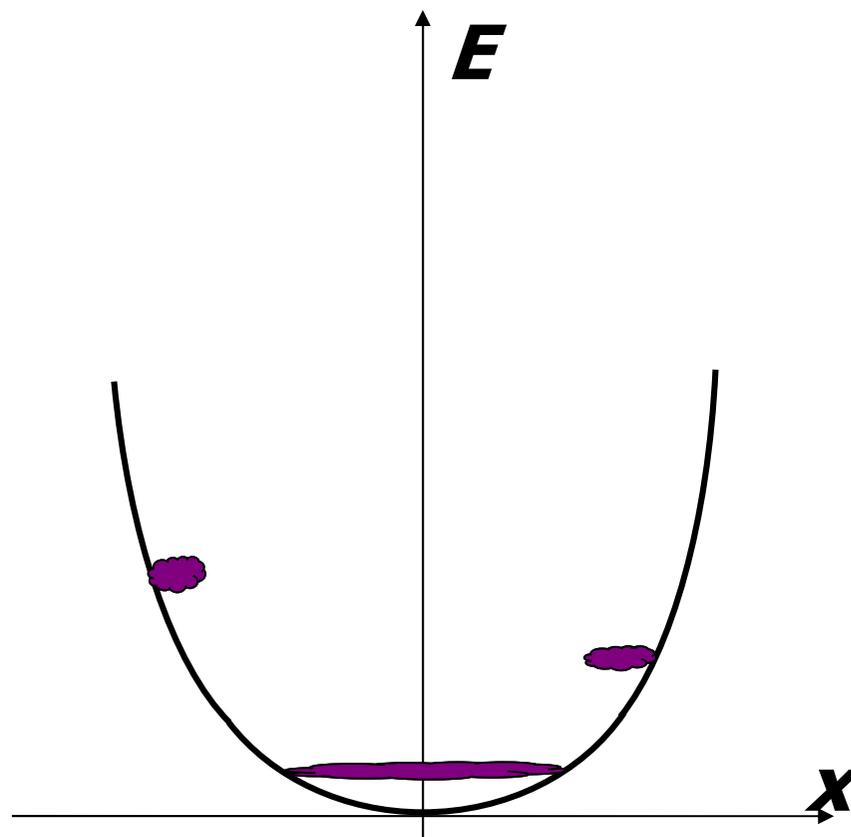
**МИР
КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

$$E_{min} = 0$$



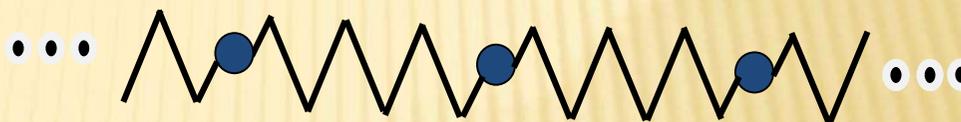
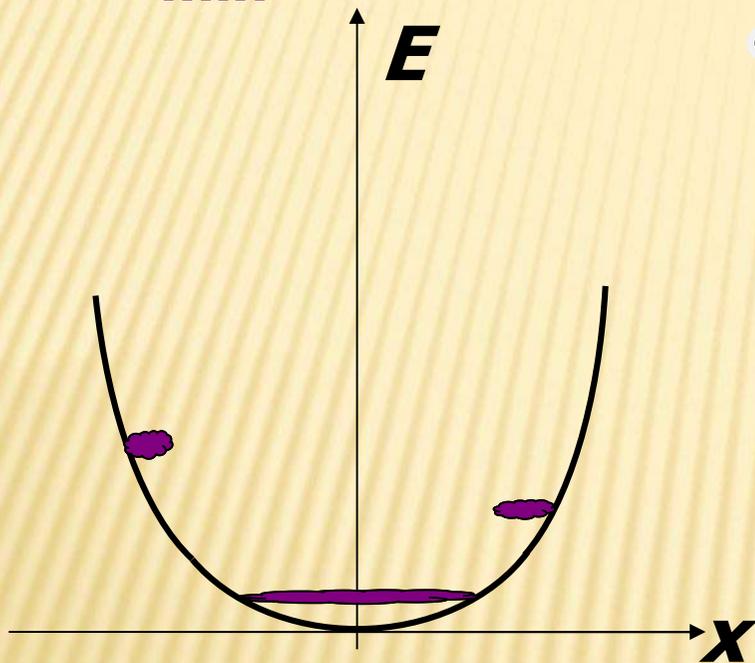
**МИР
КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

$$E_{min} = h\nu/2 > 0$$



РАСХОДИМОСТЬ: ЭНЕРГИЯ БОЗОННОГО ВАКУУМА

$$E_{min} = h\nu/2 > 0$$



$$\frac{h\nu}{2} + \frac{h\nu}{2} + \frac{h\nu}{2} + \dots = +\infty!$$

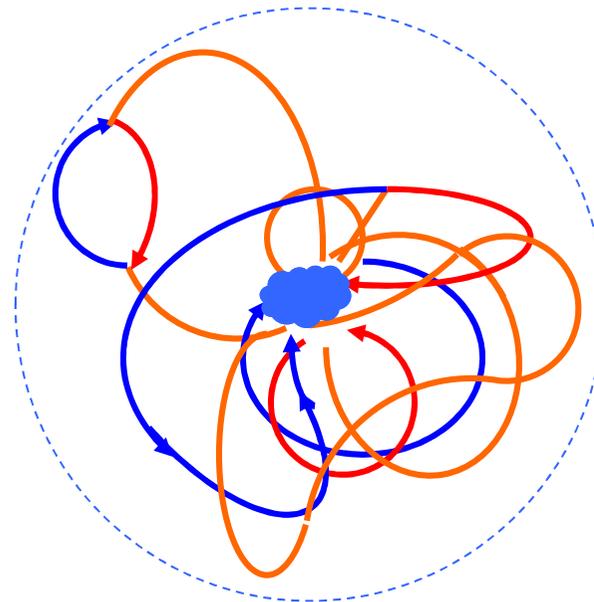
$$E_{VAC} = +\infty$$

«ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА»:
*локализованное возбуждение на фоне
вакуума с определенными значениями
массы, спина и зарядов*

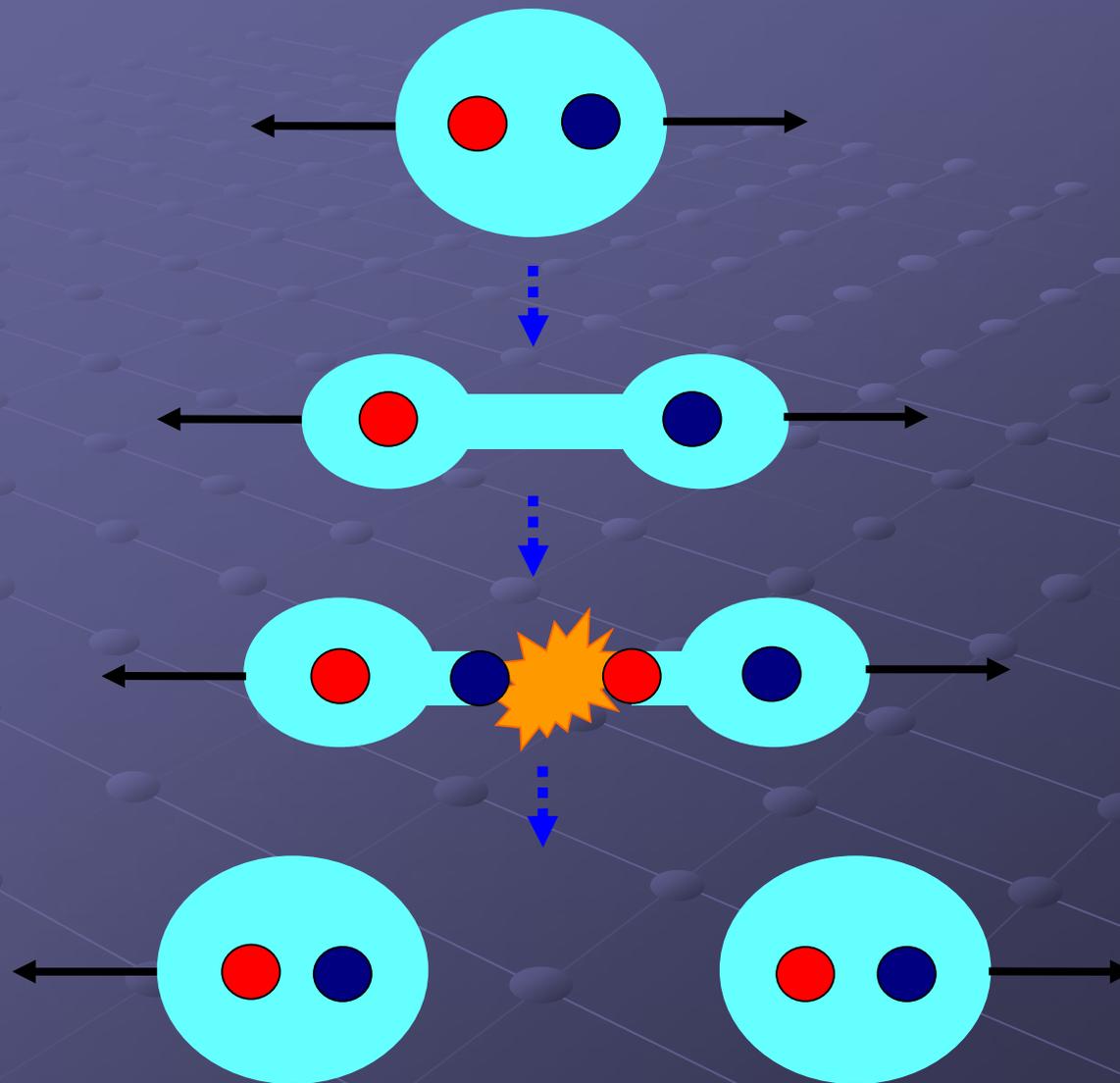
Например:

«электрон»

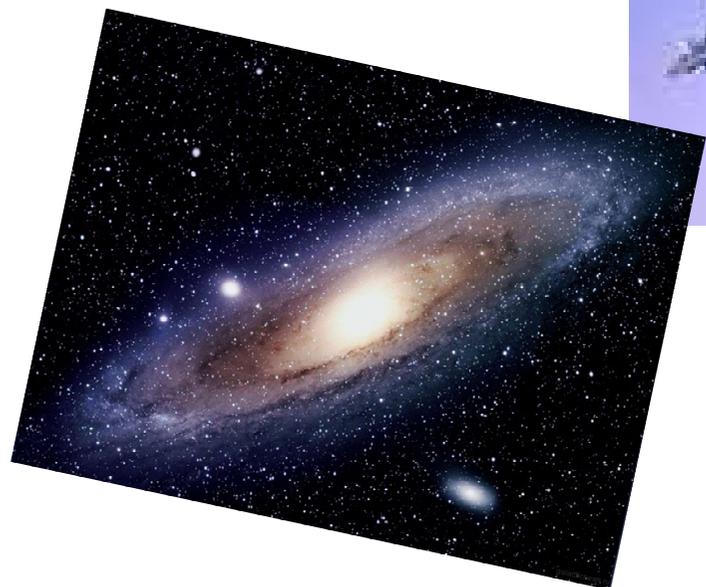
- $m \approx 0,511 \text{ МэВ},$
- $s = \frac{1}{2},$
- $Q = -e$



ВАКУУМ И «КОНФАЙНМЕНТ»



СИММЕТРИЯ – - ключ к разгадке



Симметрии законов ФИЗИКИ: принцип Галилея



$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0 \Rightarrow \vec{a}' = \vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$\vec{a}' = \frac{\vec{F}}{m}$$

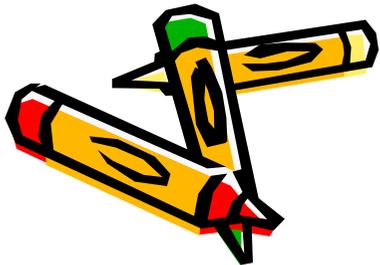
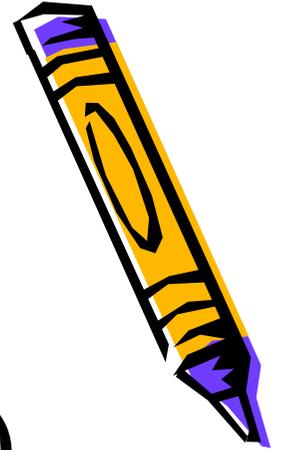
ТЕОРЕМА НЕТЕР:

СИММЕТРИИ СВЯЗАНЫ С ЗАКОНАМИ СОХРАНЕНИЯ:

$$\begin{cases} m_1 a_1 = F_{21}(x_1 - x_2) + F_{\text{внеш}}(x_1) \\ m_2 a_2 = F_{12}(x_1 - x_2) + F_{\text{внеш}}(x_2) \end{cases}$$

если эта система неизменна при сдвиге начала отсчета по x , то

$$F_{\text{внеш}} \equiv 0 \Rightarrow P = p_1 + p_2 = \text{const}$$



Калибровочная симметрия

Пример: калибровка потенциала
в электростатике

УРАВНЕНИЕ	СИММЕТРИЯ
$m \frac{\Delta V}{\Delta t} = 0$	$V \rightarrow V + V_0, \quad V_0 = const$
$m \frac{\Delta V}{\Delta t} = -q \frac{\Delta \phi}{\Delta x}$	$\left\{ \begin{array}{l} V \rightarrow V + V_0(t, x) \\ \phi \rightarrow \phi + \phi_0(t, x) \end{array} \right., \quad \frac{\Delta \phi_0}{\Delta x} \equiv -\frac{m \Delta V_0}{q \Delta t}$

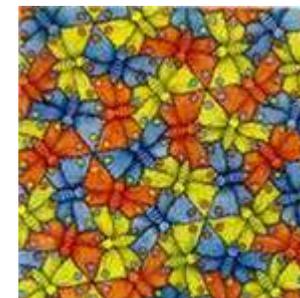
«Перенормировка», или «заметание мусора под ковер»

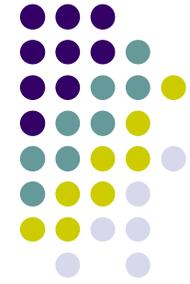


$$F(n) = \frac{9}{n^2 - 5n + 4}; \quad F(4) = \infty$$

$$F(n) = \frac{9}{(n-1)(n-4)}; \quad F_{\text{расх}} = \frac{3}{n-4}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{перенорм}} &= F(n) - F_{\text{расх}} = \frac{9}{n^2 - 5n + 4} - \frac{3}{n-4} = \\ &= -\frac{3}{n-1}; \quad F_{\text{перенорм}}(4) = -1 \end{aligned}$$





ТОЛЬКО

ТЕОРИИ

С СИММЕТРИЕЙ

ПОЗВОЛЯЮТ

«УБРАТЬ»

РАСХОДИМОСТИ!



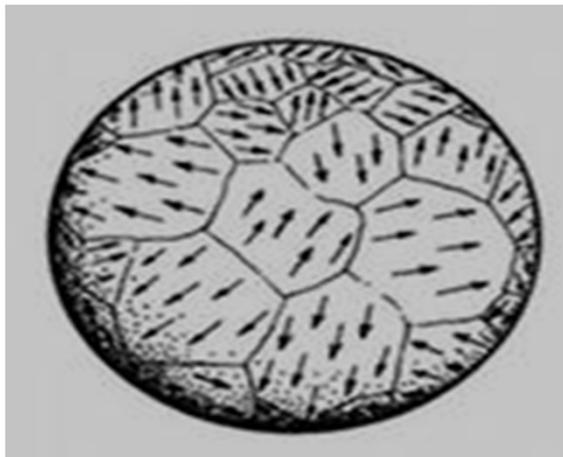
**ТЕОРИИ НУЖНЫ
СИММЕТРИИ**

**РЕАЛЬНЫЙ МИР НЕ
ВСЕГДА
СИММЕТРИЧЕН**

Спонтанное нарушение – механизм «сокрытия» симметрии

*Скрытая гармония сильнее явной...
Подобен беспорядочно разбросанному
сору самый прекрасный Космос.*

Гераклит



Spiral Galaxy Messier 100
(VLT MELIPAL + VIMOS)
ESO PR Photo 09b/02 (15 March 2002) © European Southern Observatory

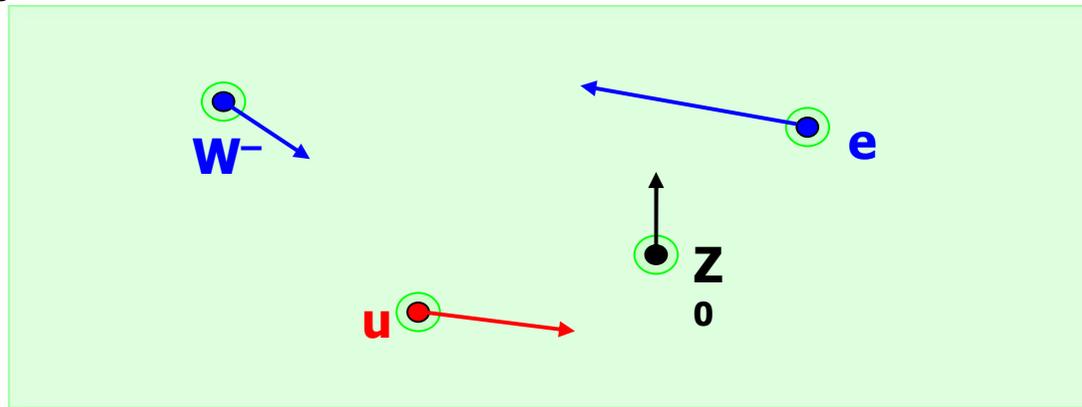
СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

Стандартная модель (СМ) – наиболее разработанная теория микромира, которая замечательно описывает практически все наблюдаемые процессы. Согласно **СМ**, весь мир состоит из кварков и лептонов. **СМ** корректно описывает эффекты, связанные с электромагнитным, сильным и слабым взаимодействиями.

Главная загадка **СМ**:

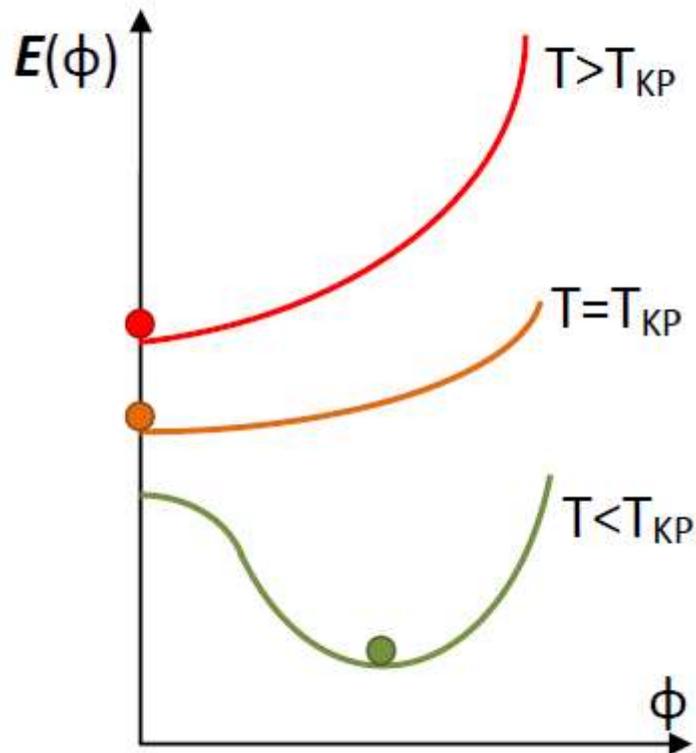
Каким образом у частиц появилась масса?

Согласно **СМ**, масса появляется у частиц благодаря их взаимодействию со специальным полем – **полем Хиггса**. Это поле является составной частью **вакуума**. Кварки, лептоны, **W-бозоны** и **Z-бозоны**, двигаясь в **вакууме**, взаимодействуют с частицами **поля Хиггса** и становятся массивными.



С помощью представлений о **поле Хиггса** СМ смогла даже правильно предсказать массы многих частиц. Однако если эта идея верна, то мы должны наблюдать и частицы самого поля Хиггса – **ХИГГСОВСКИЕ БОЗОНЫ!** Они были обнаружены в экспериментах на БАКе в июне 2012 года. Масса **ХИГГСОВСКОГО БОЗОНА** оказалась около **125 ГэВ**.

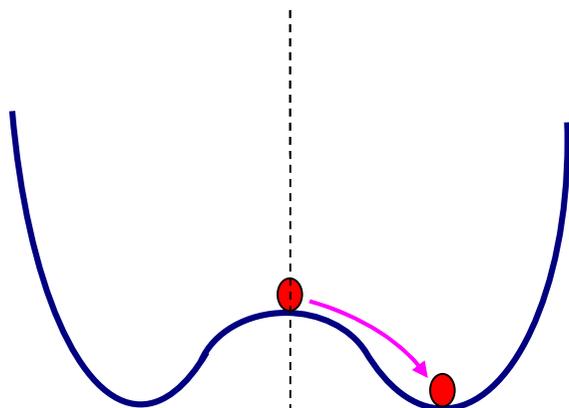
Фазовые переходы, связанные с нарушением симметрии вакуума



ВАКУУМ – состояние, отвечающее минимуму энергии. При остывании вакуума возможны фазовые переходы, сопровождающиеся его «перестройкой» с выделением энергии. Образуется состояние мира, большая часть энергии которого существует в виде вакуумной формы материи. Затем происходит рождение **ЧАСТИЦ** – мир заполняется веществом.

Необходимость поля Хиггса для СМ:

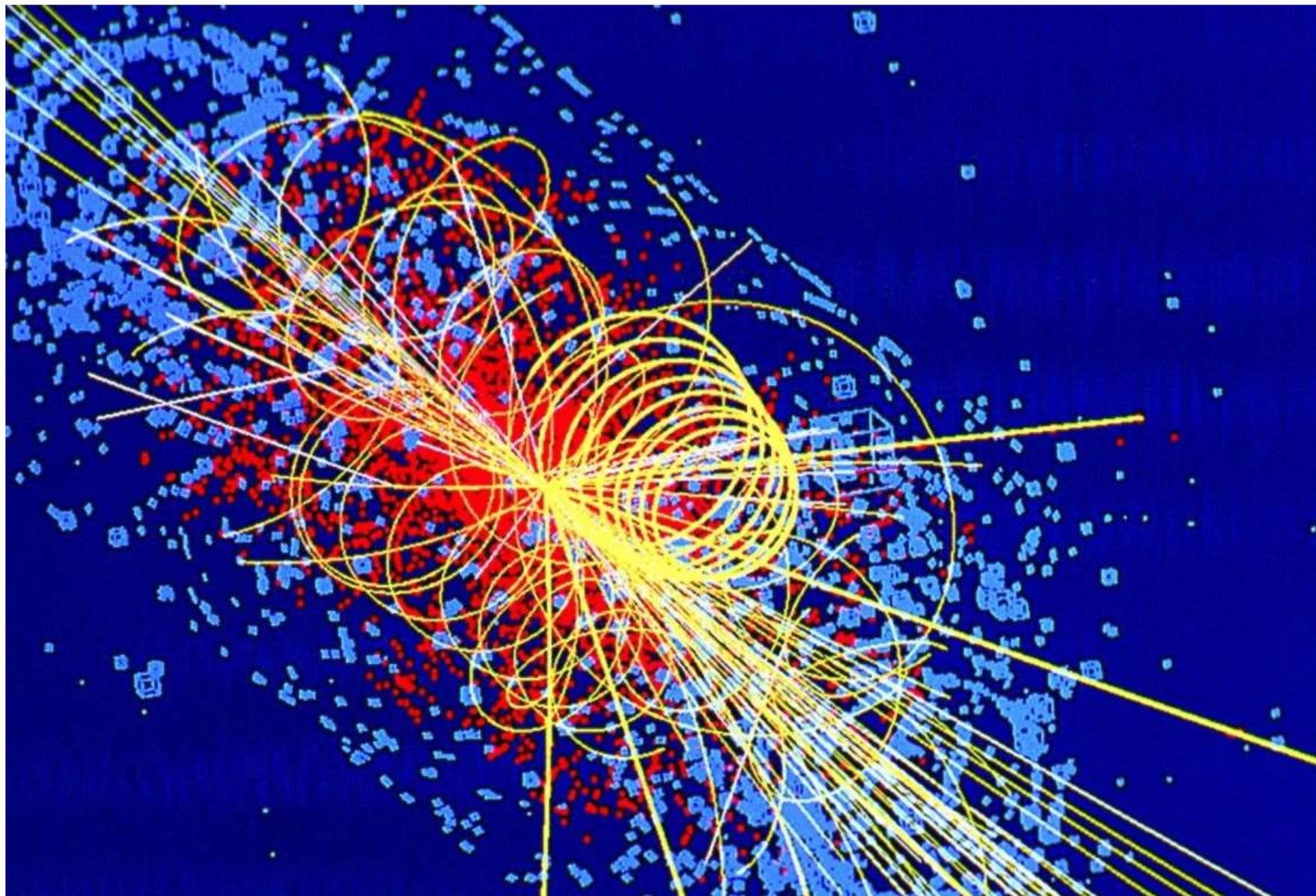
СМ использует СИММЕТРИИ для устранения расходимостей - для ПЕРЕНОРМИРОВКИ. Эти симметрии реализуются ТОЛЬКО для безмассовых частиц.



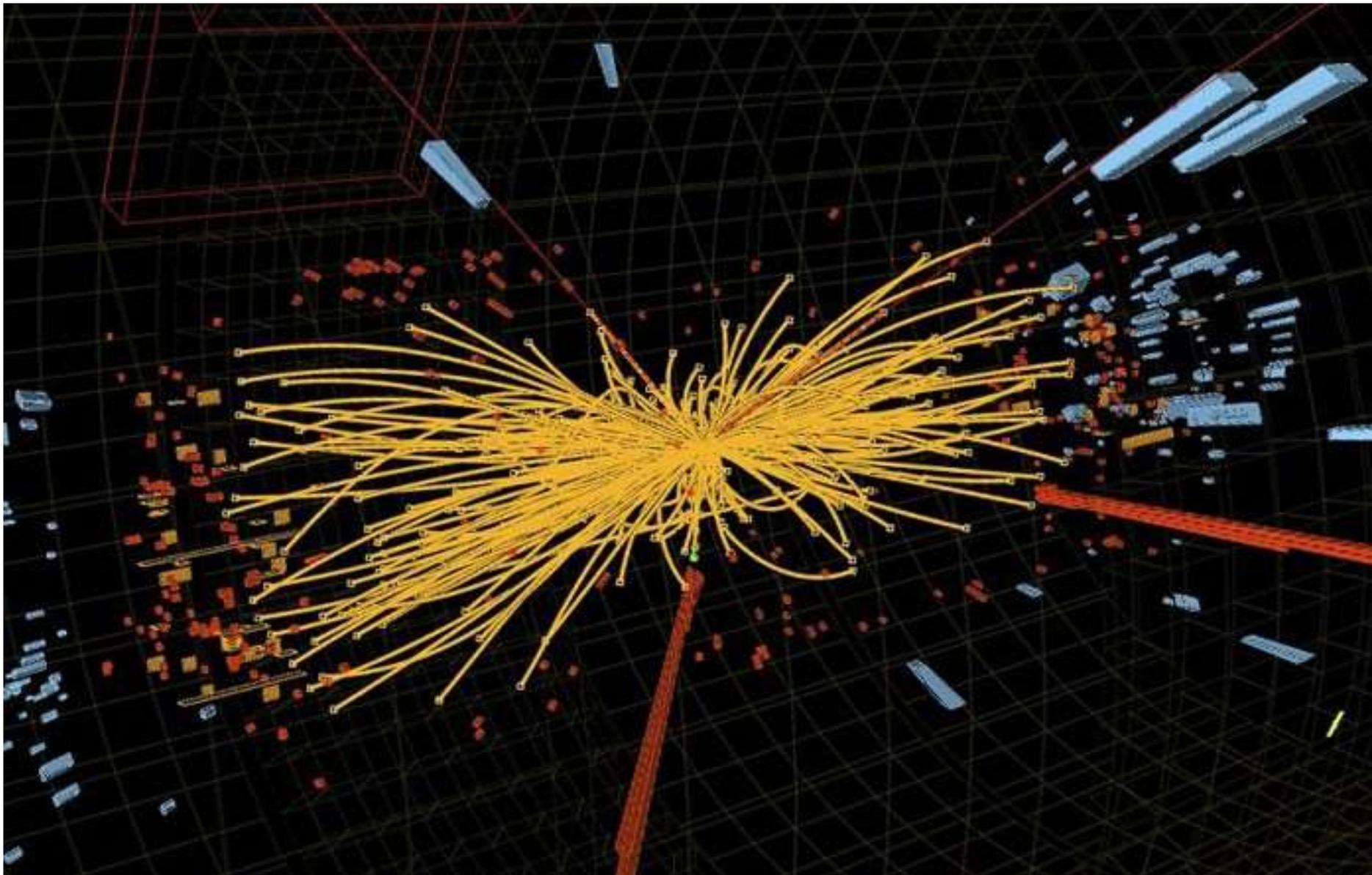
Поле Хиггса «спонтанно» нарушает симметрию электромагнитного и слабого взаимодействий без потери перенормируемости.

Любое другое введение массы частиц в СМ не сохраняет это свойство.

Фотография события с рождением и распадом бозона Хиггса в детекторе ATLAS

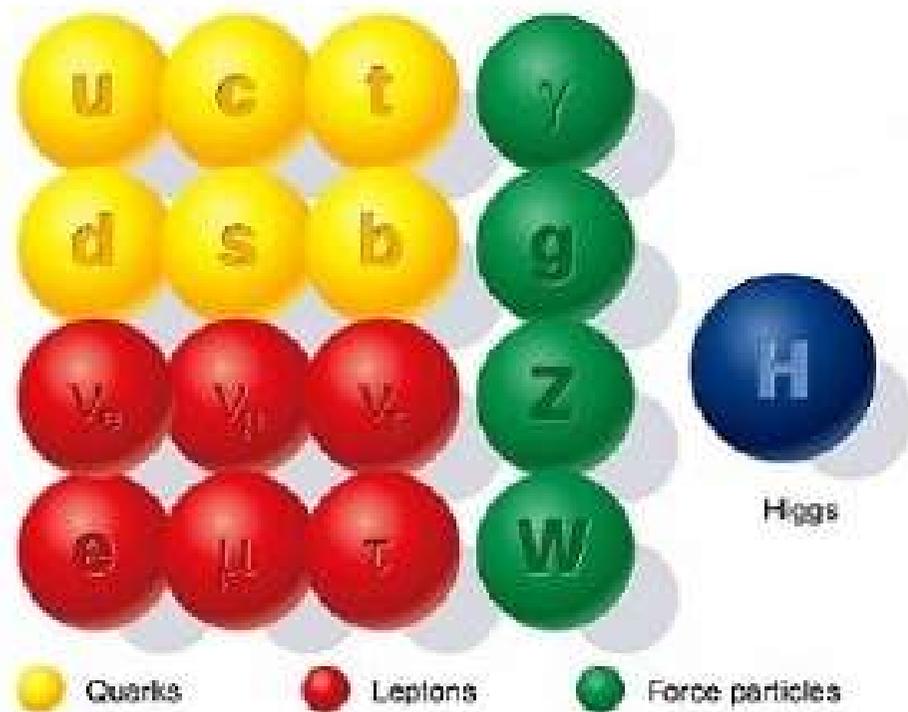


Трёхмерная реконструкция события

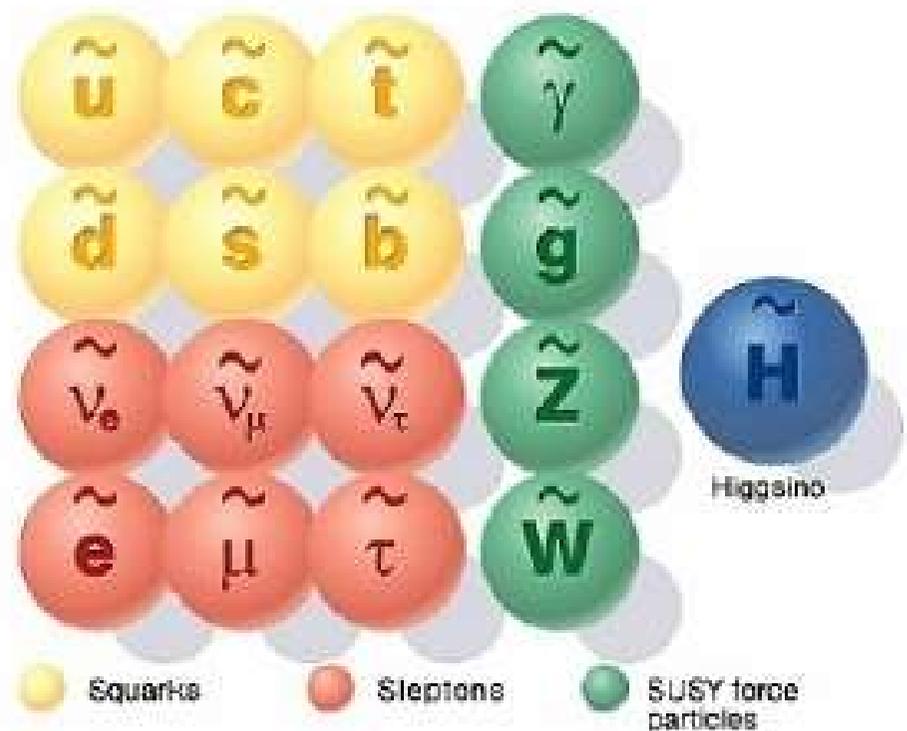


СУПЕРСИММЕТРИЯ

SUPERSYMMETRY



Standard particles



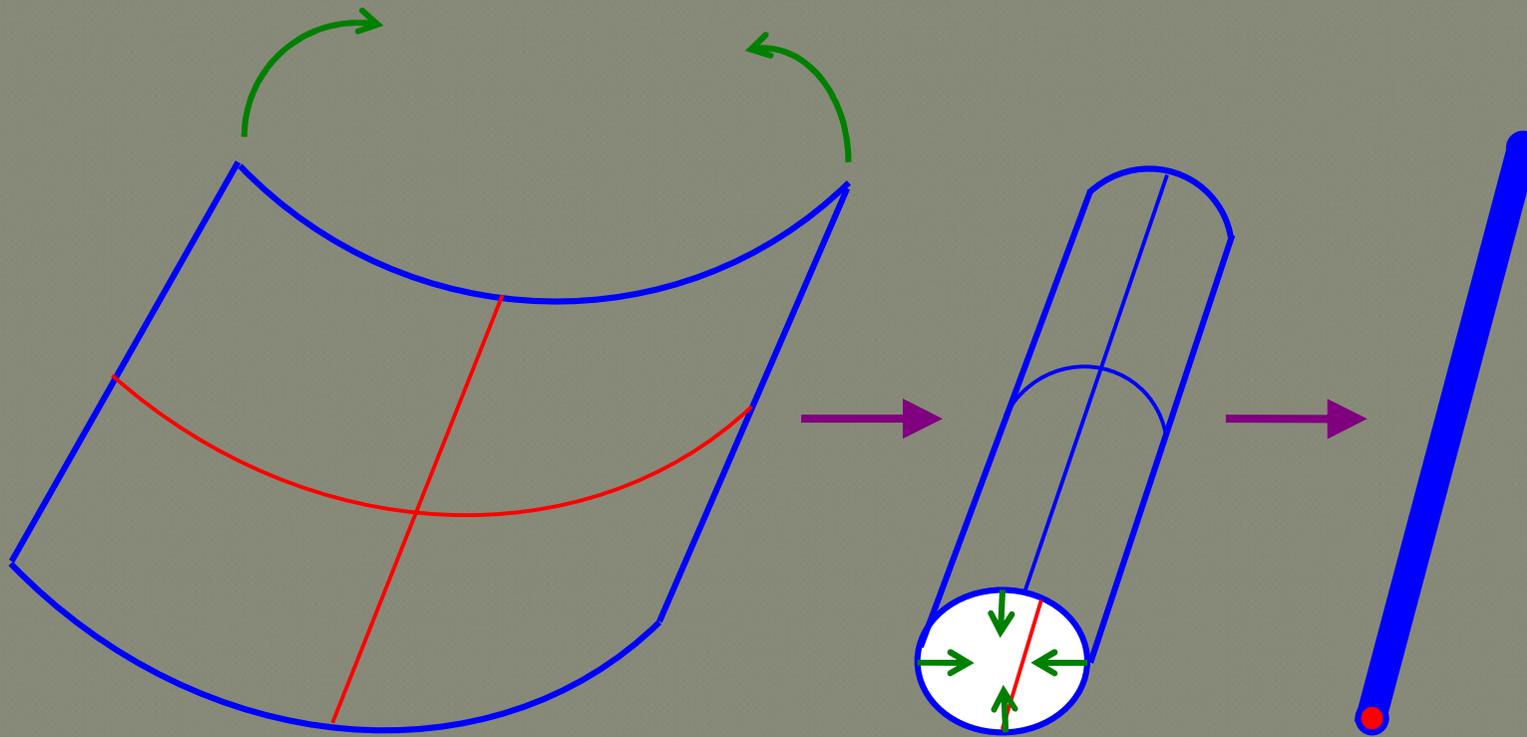
SUSY particles

Суперсимметрия (SuSy)

Пример: вакуумная энергия системы фермионного и бозонного поля

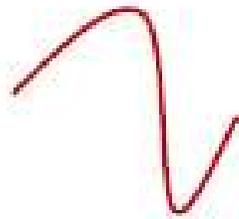
фермионное поле	$E_{VAC} = -\infty$
бозонное поле	$E_{VAC} = +\infty$
СУММА	$E_{VAC} = 0$

геометрия Калуцы-Клейна (с одним «компактным» измерением)

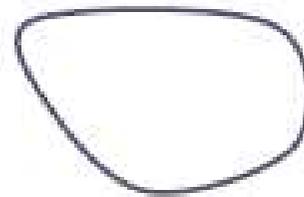


СТРУНЫ – «одномерные»

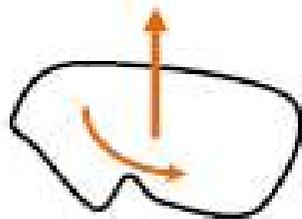
нелокальные объекты



открытые



замкнутые



«левые»

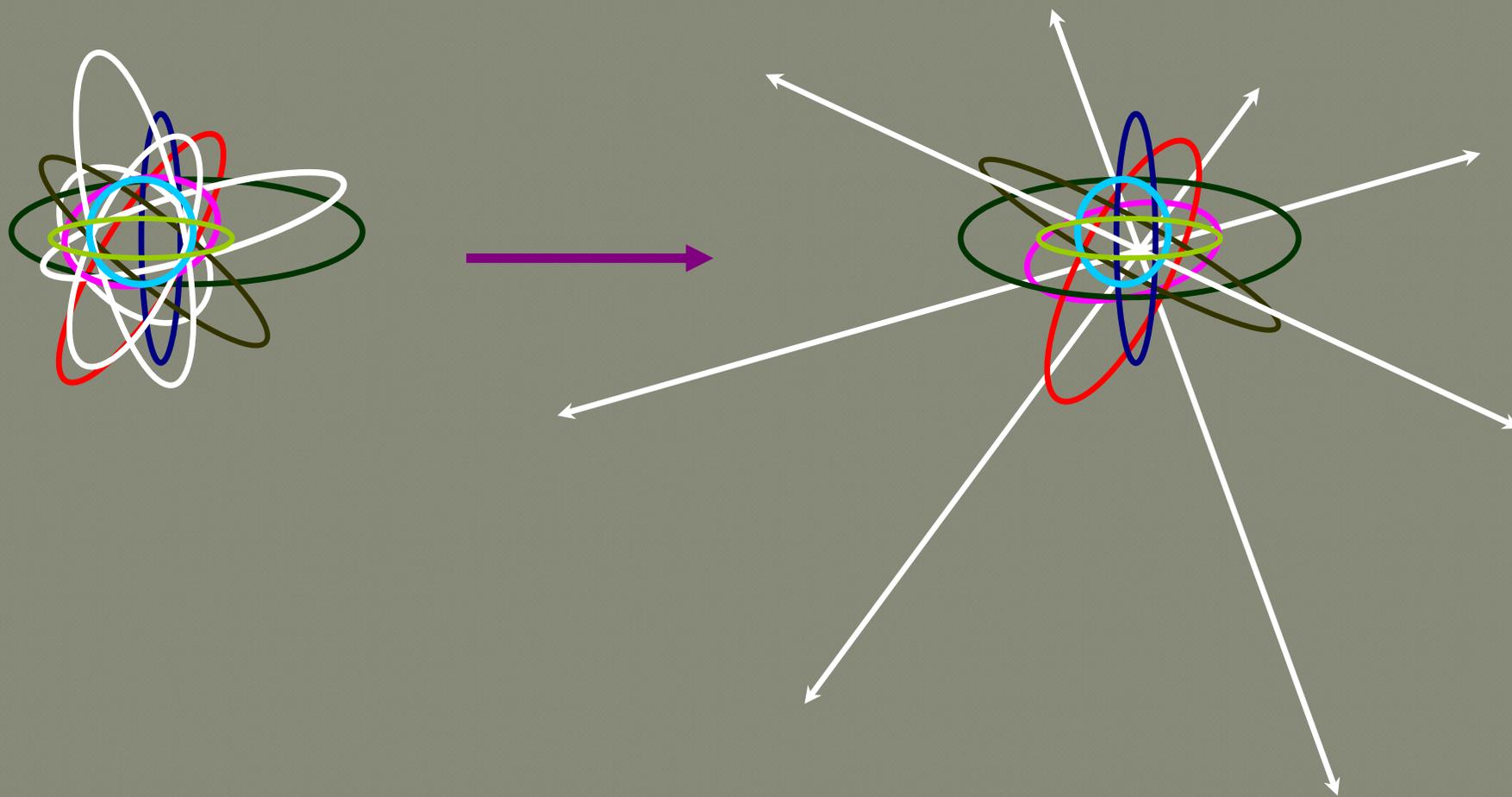


«правые»

ориентируемые и неориентируемые,
бозонные и фермионные, суперструны



Разворачивание свернутых
измерений: $d=11 \rightarrow 4+7$





**СУПЕРСТРУННЫЕ ТЕОРИИ
в $4+7$ измерениях дают очень
много возможных решений!**

**Каждое решение описывает миры
с разными свойствами, с разными
законами «низкоэнергетической»
физики.**

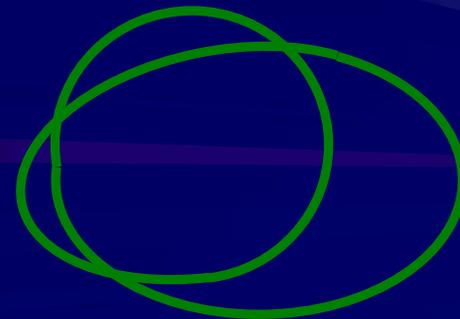
СИММЕТРИИ – «ОРУЖИЕ» В БОРЬБЕ С РАСХОДИМОСТЯМИ

- ✘ *Калибровочная симметрия* – обеспечивает **перенормируемость** (т.е. возможность устранения расходимостей)
- ✘ *Суперсимметрия* – обеспечивает **суперперенормируемость** («автоматическое» сокращение расходимостей)
- ✘ *Суперсимметрии пространств с дополнительными размерностями* – обеспечивают **конечность** (отсутствие расходимостей)

«ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ» ЦЕЛЬ:

Построение **КОНЕЧНОЙ** теории,
описывающей **ВСЕ** взаимодействия и
ВСЕ поля материи как проявление
объектов единой природы:

СТРУНЫ или **БРАНЫ** в 11-мерном
суперпространстве: **«M – теория»**



*Наш мир – не завершение:
Там, дальше – новый круг,
Невидимый – как музыка,
Вещественный – как звук.
Он манит и морочит,
И должен – под конец –
Через кольцо Загадки
Пройти любой мудрец.*

Эмили Дикинсон

