

«ОГОНЬ, МЕРЦАЮЩИЙ В СОСУДЕ ...»

**(строение материи и
симметрии мироздания)**

Парфенов К.В.

физический факультет МГУ

Ибо таковы бесстыдные утверждения Демокрита, а еще раньше Левкиппа, будто существуют некоторые малые тельца – одни шероховатые, другие круглые, третьи угловатые и крючковатые, четвертые закривленные и как бы внутрь загнутые, и из этих-то телец составились Небо и Земля.

Марк Тулий Цицерон

Этапы изучения микромира:

- Физика атомов и молекул
- Физика атомных ядер
- Физика элементарных частиц и их взаимодействий

масштабы:

длина: $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$

энергия: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

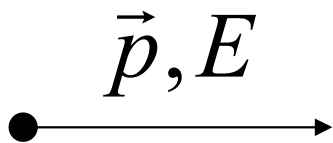
постоянная Планка:

$h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

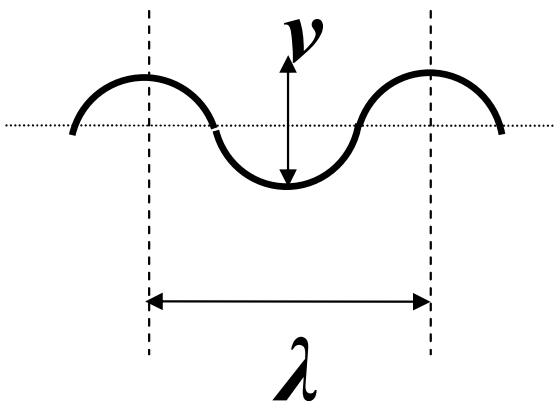
МИР
КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

МИР
КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

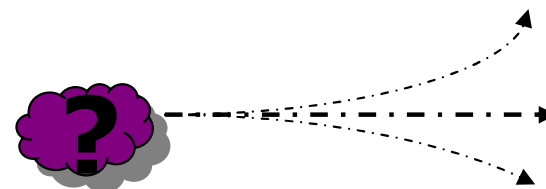
частицы



ВОЛНЫ

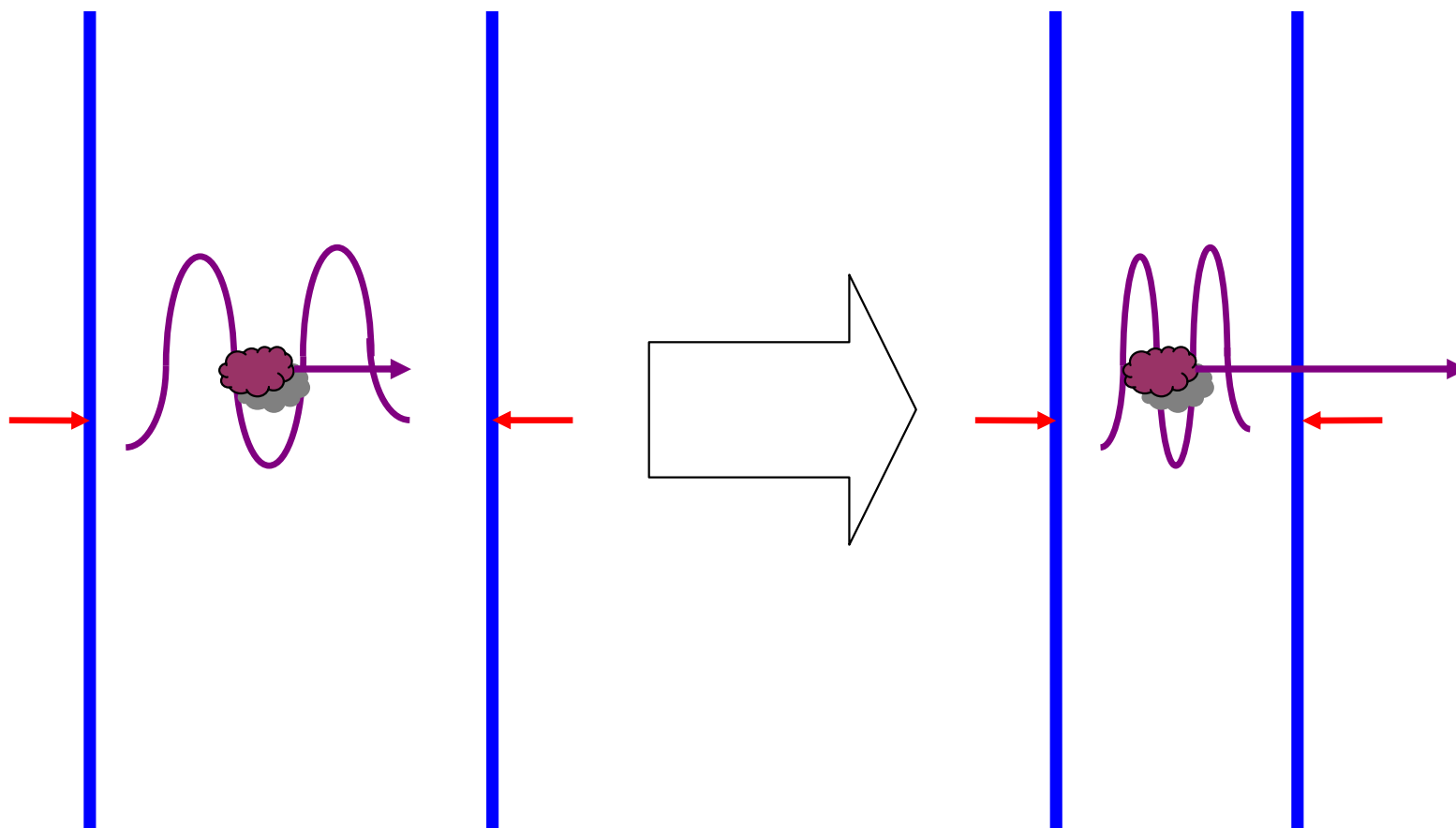


«микрообъекты»



$$|\vec{p}| = \frac{h}{\lambda}, E = h\nu$$

ПОПЫТКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТЫ МИКРООБЪЕКТА: «СЖАТИЕ ВОЛНЫ»



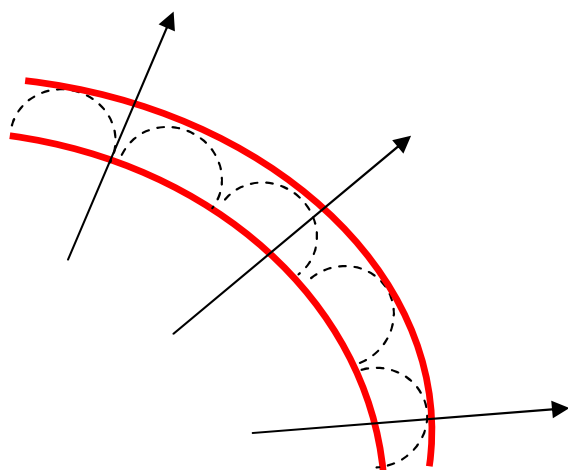
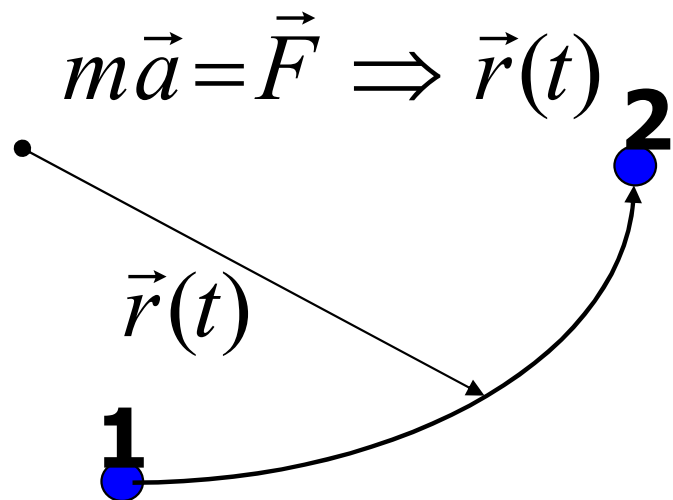
неопределенности

значений

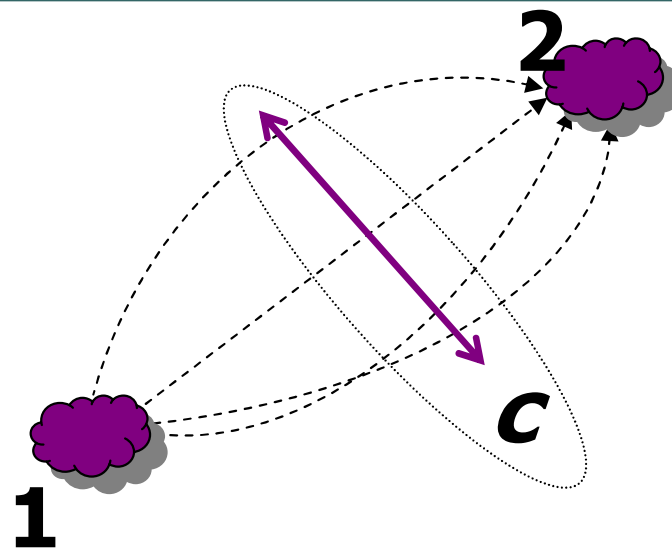
координаты и импульса

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar / 4\pi$$

МИР КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ



МИР КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ



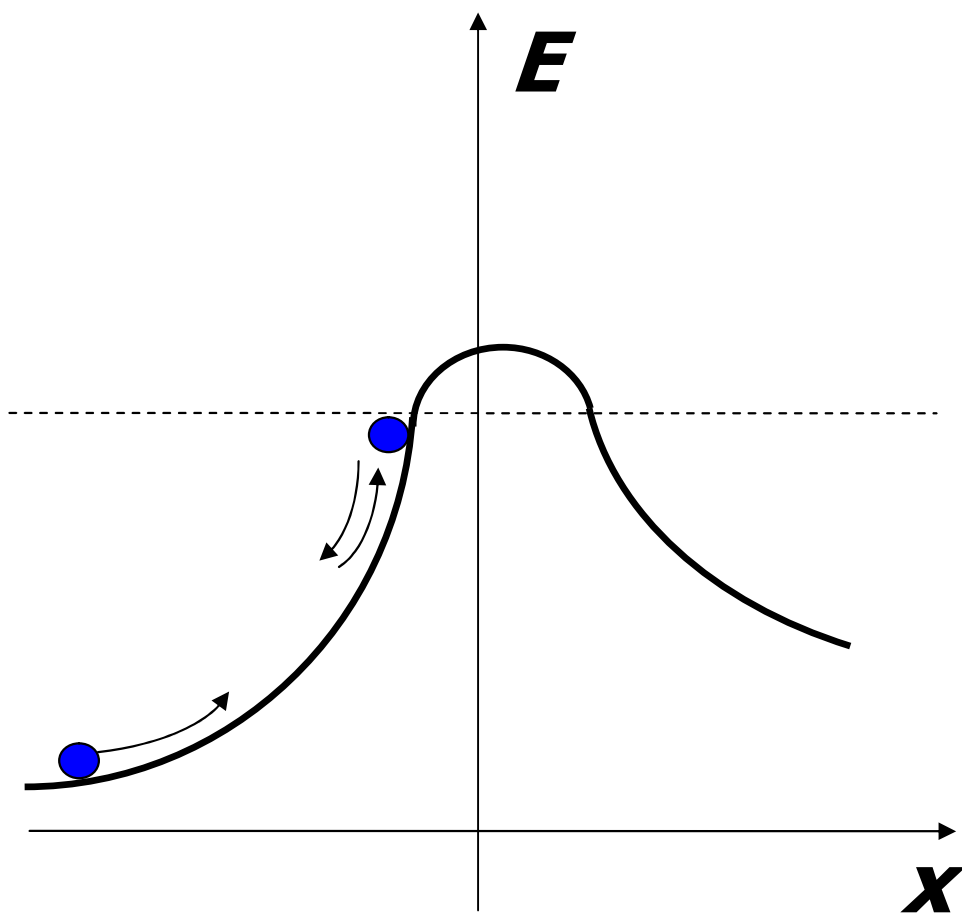
$$W(1 \rightarrow 2) = \sum_c W(1 \rightarrow c \rightarrow 2)$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

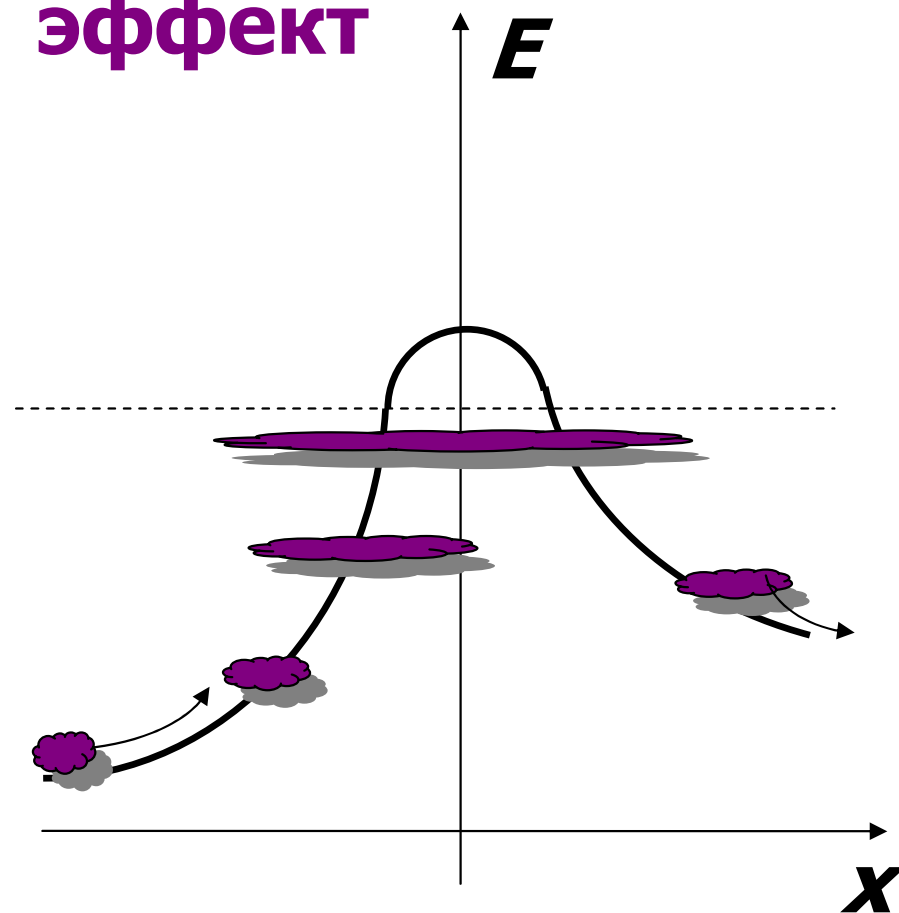
**МИР
КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

**МИР
КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

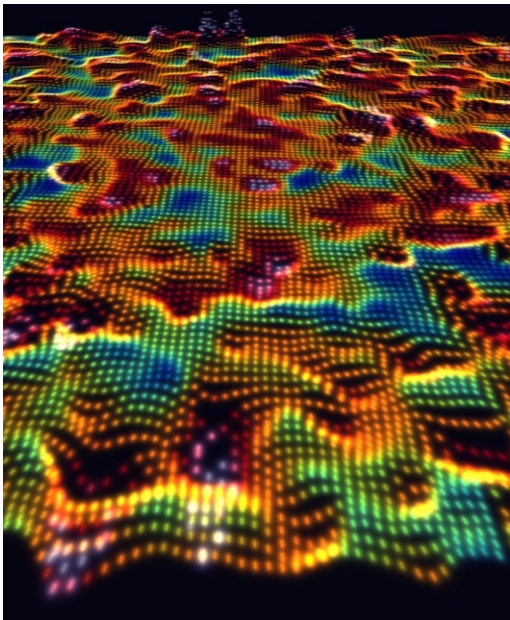
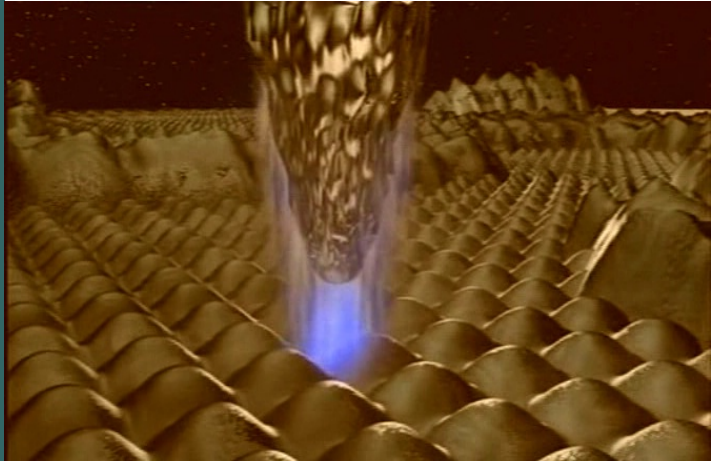
отражение



**туннельный
эффект**



Туннельный микроскоп

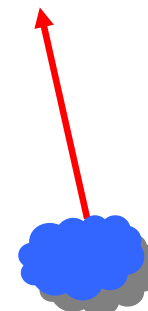
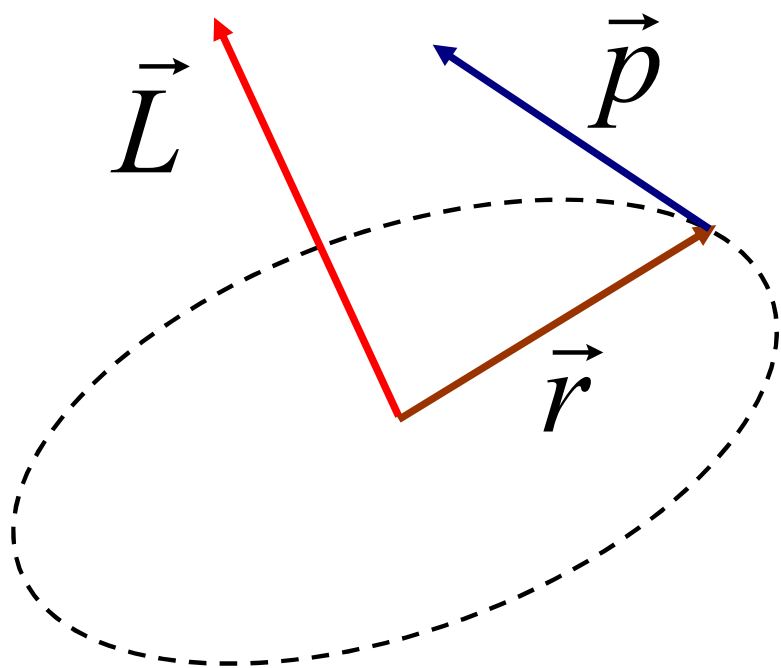


«СПИН» ≡

«собственный» момент количества движения квантовой частицы

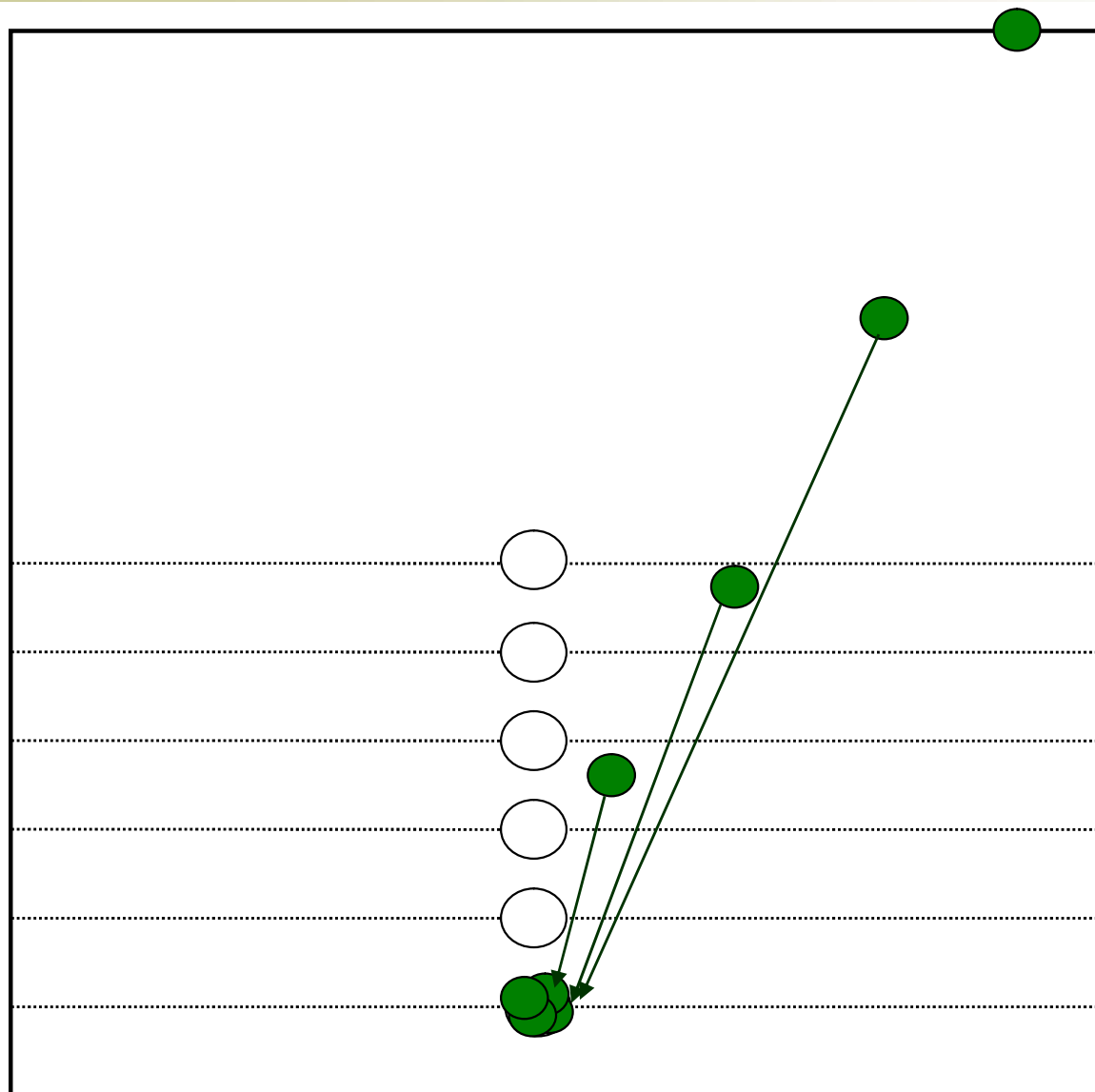
$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}]$$

$$\vec{S}$$

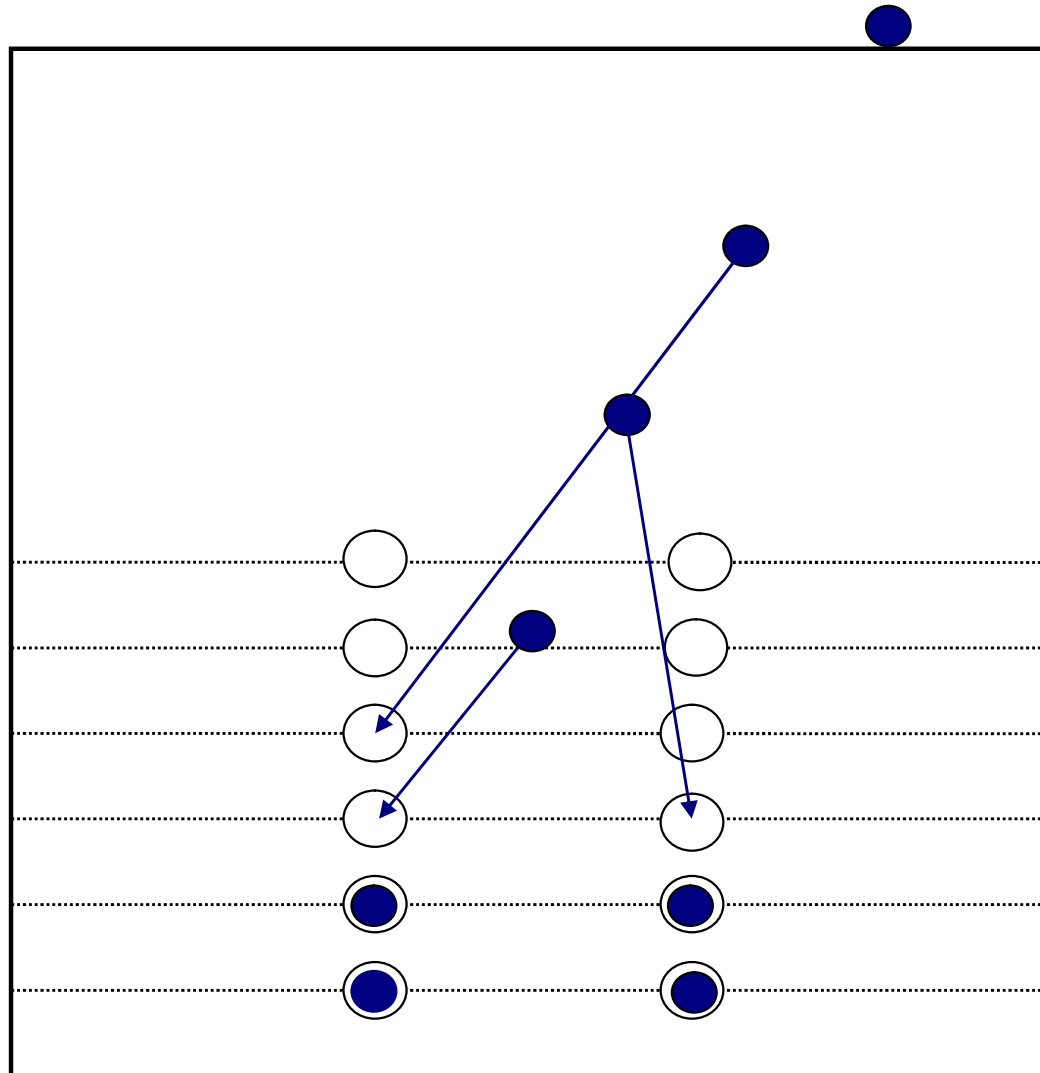


$$|\vec{S}| = 0, \frac{h}{4\pi}, \frac{h}{2\pi}, \frac{3h}{4\pi}, \dots$$

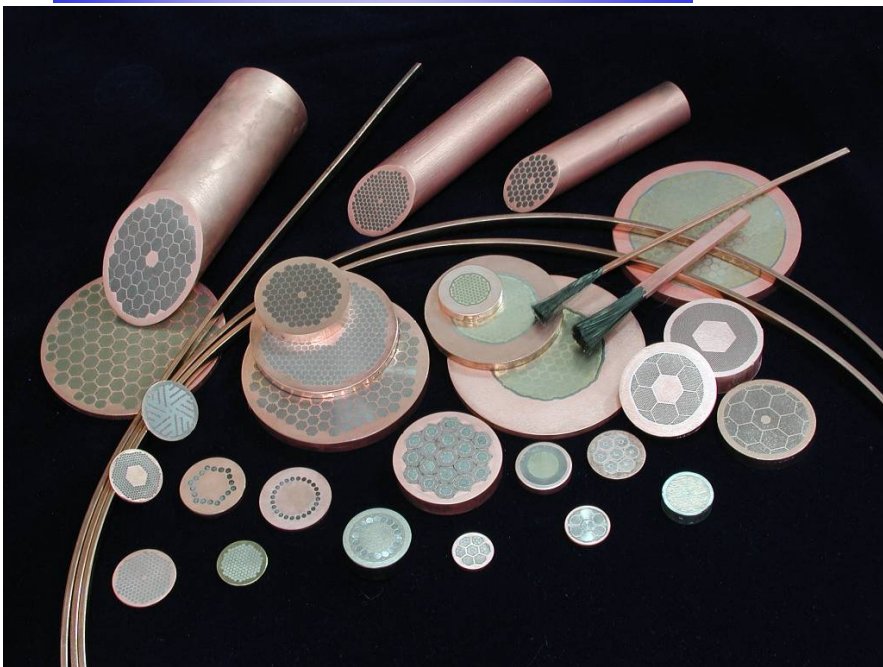
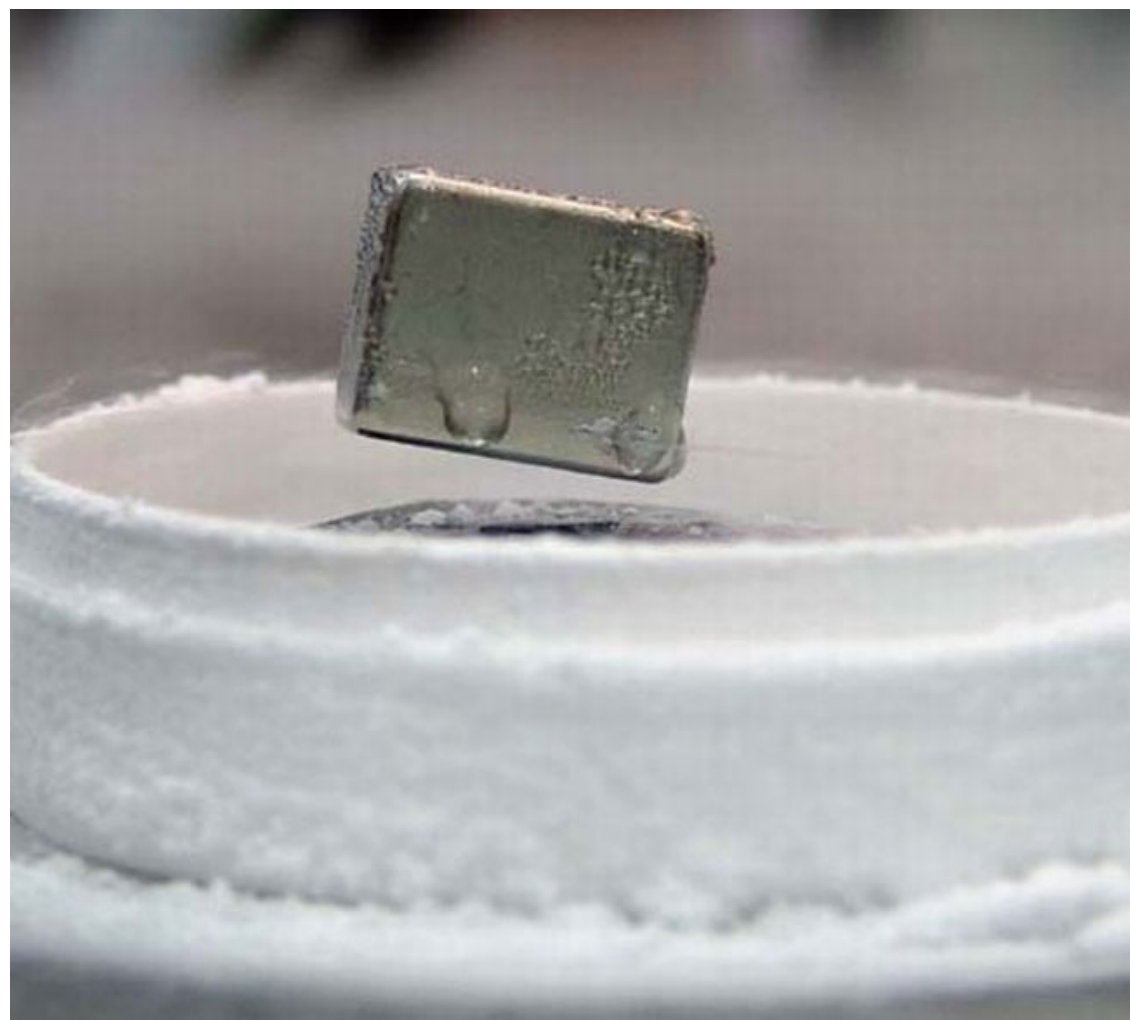
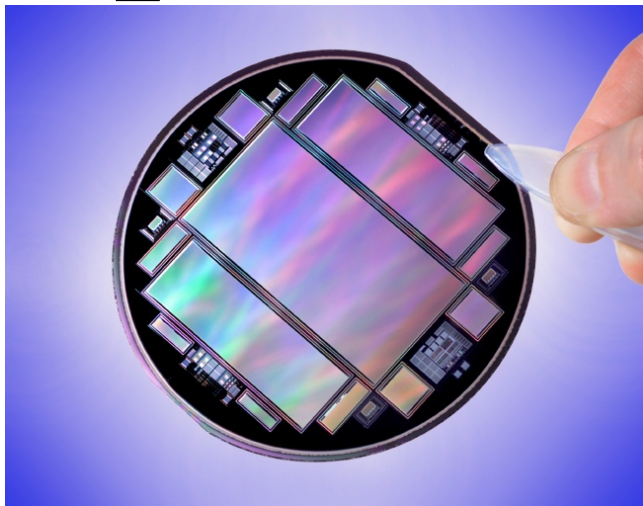
$S=0,1,2 \dots$ - бозоны:
«любят компанию»



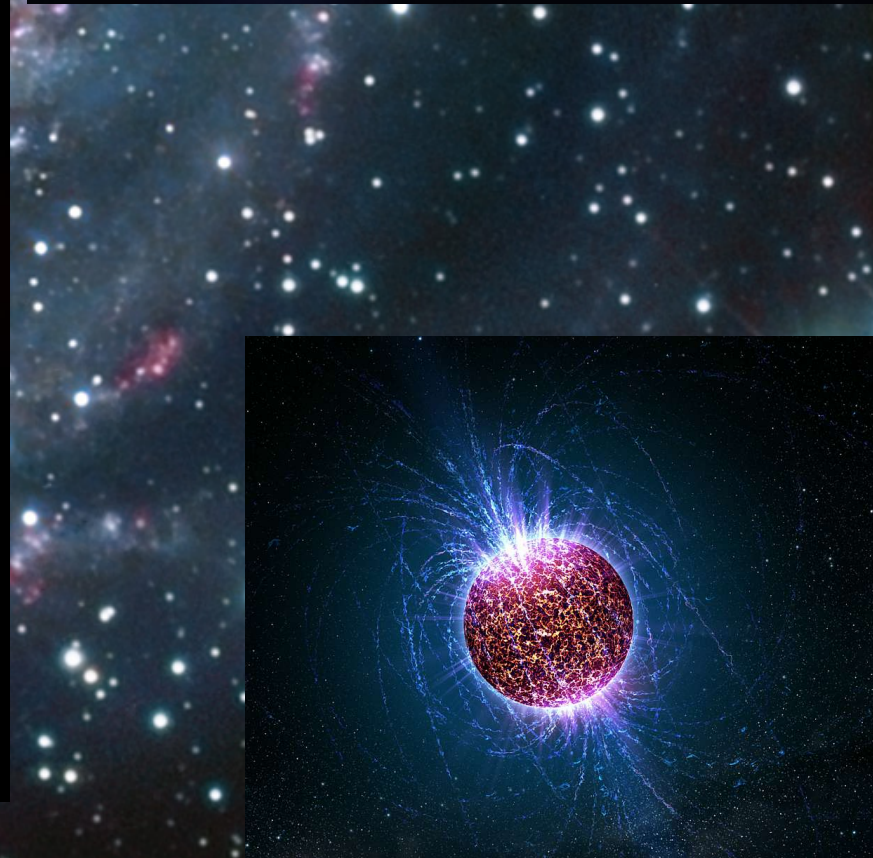
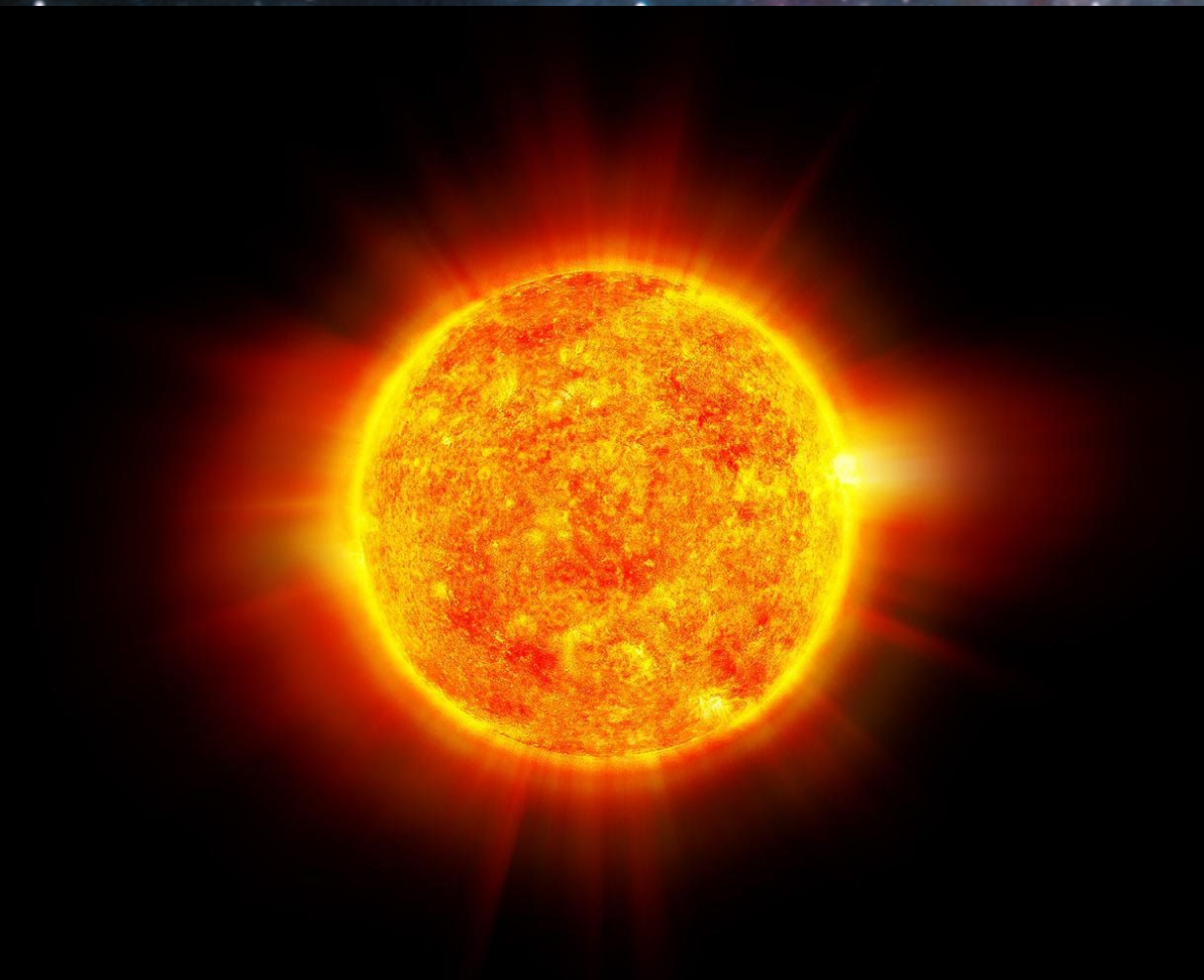
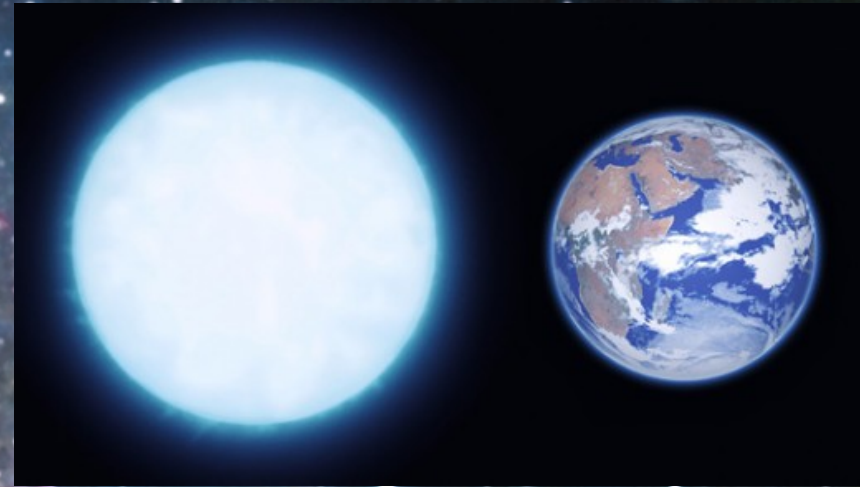
$S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ - **фермионы:**
«ИНДИВИДУАЛИСТЫ»



Сверхпроводимость



Солнце, белые карлики и нейтронные звезды

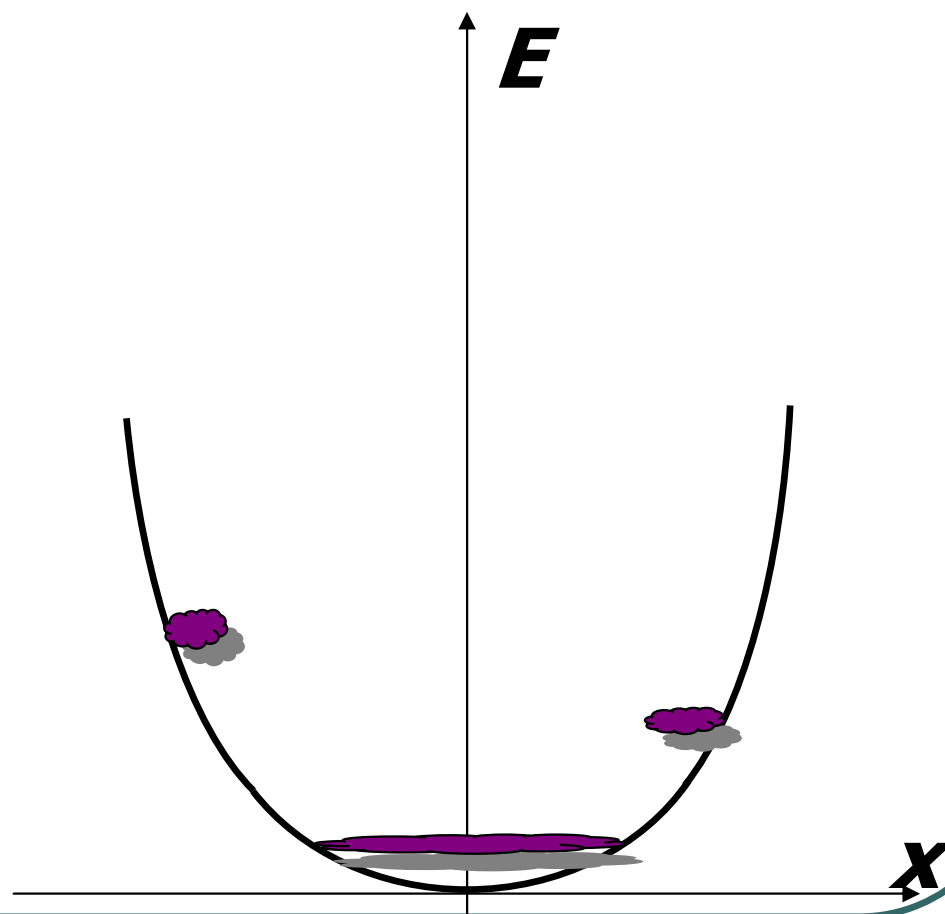
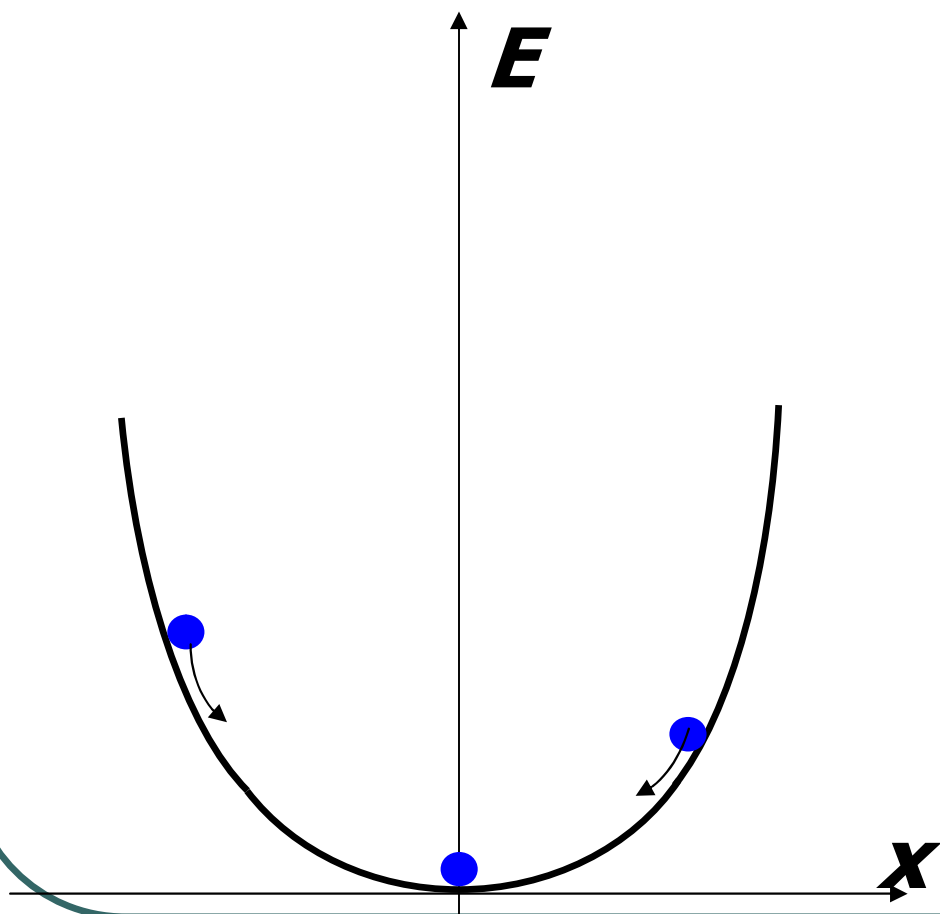


**МИР
КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

**МИР
КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

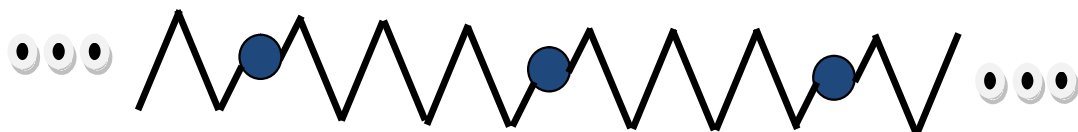
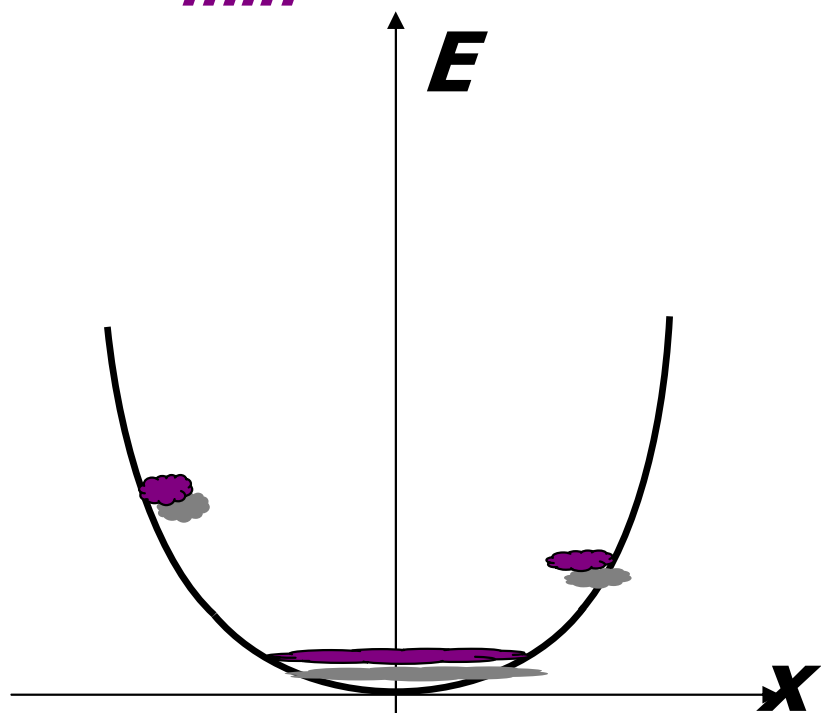
$$E_{min} = 0$$

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



Расходимость: энергия бозонного вакуума

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



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

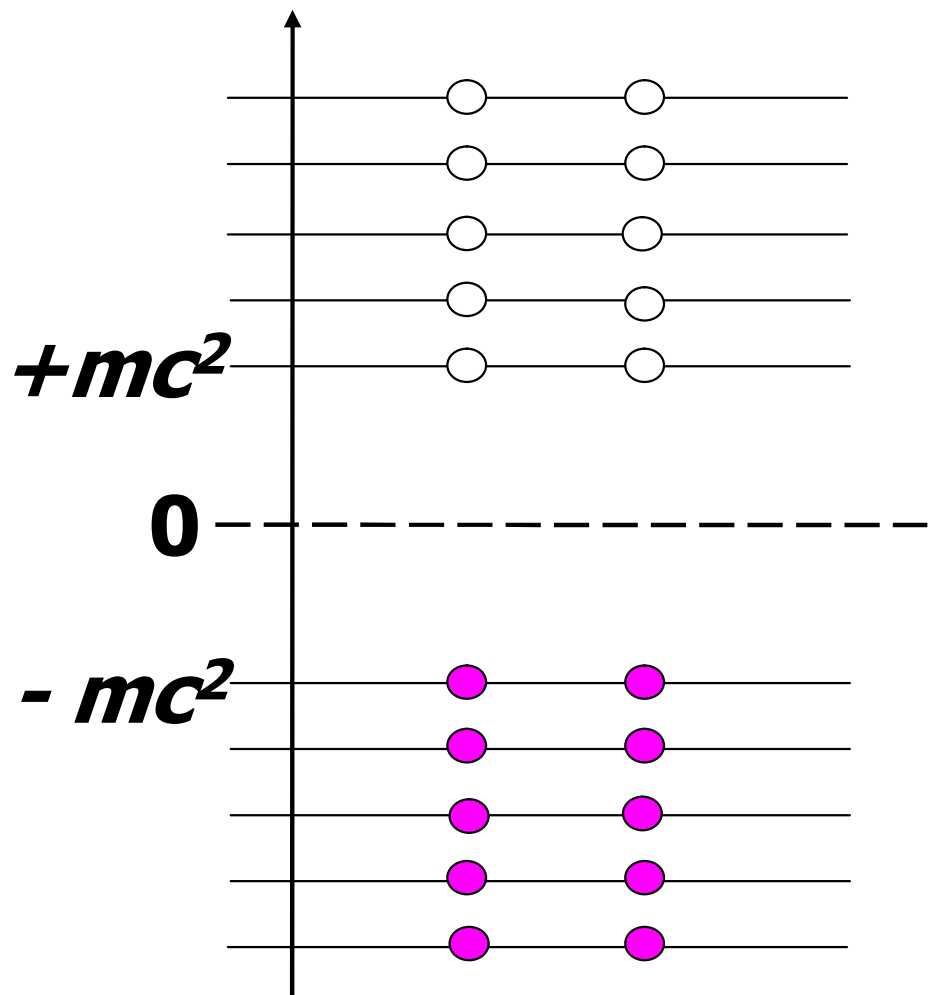
$$E_{vac} = +\infty$$

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

$$E^2 = m^2 c^4 + c^2 p^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = \pm \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2}$$

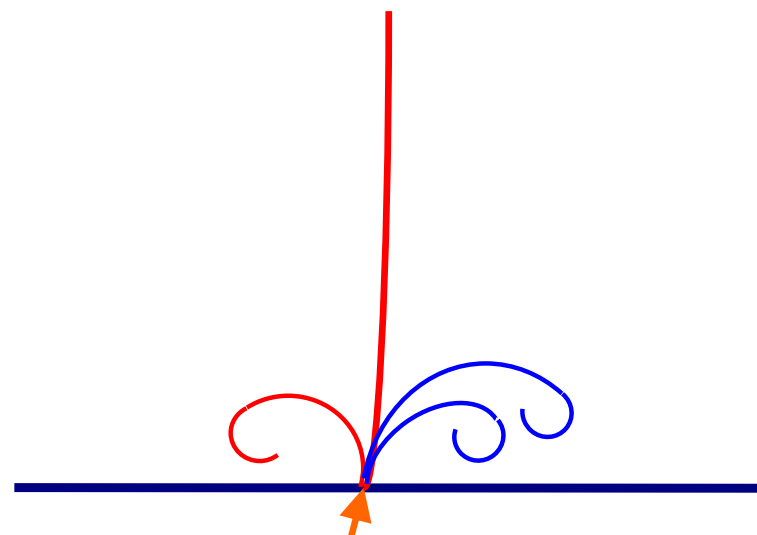
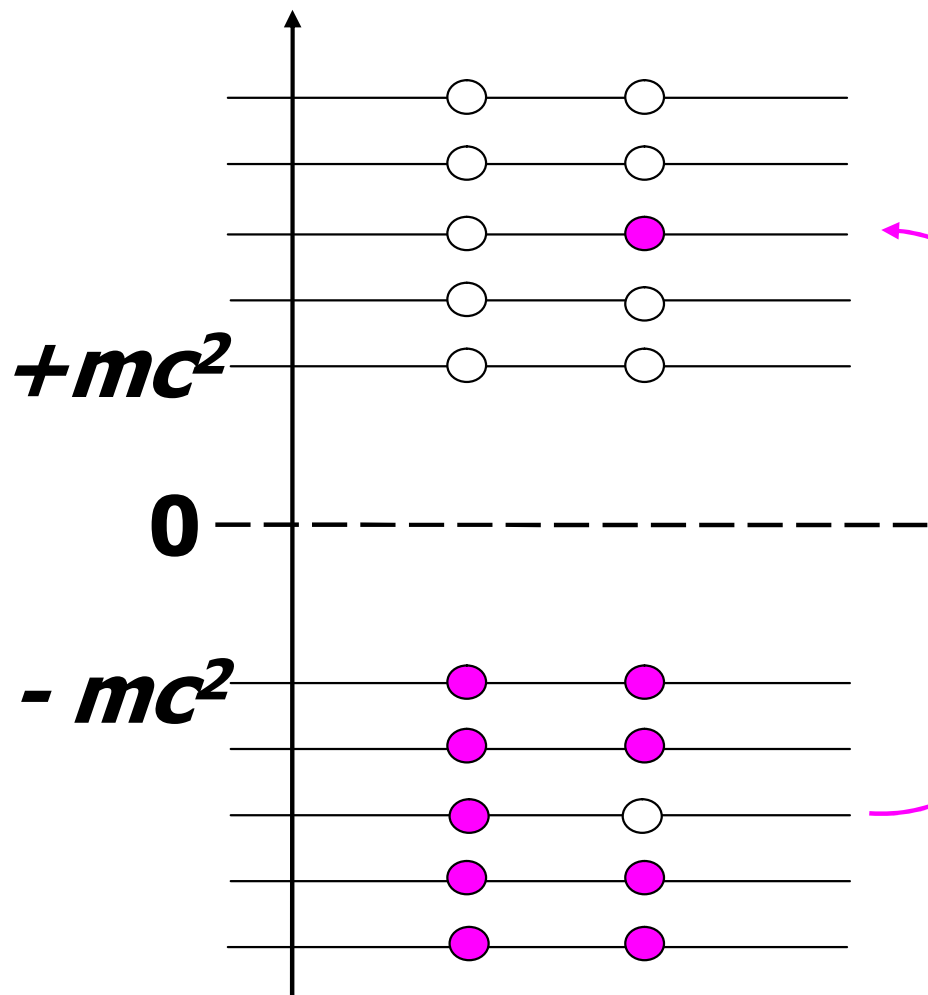
МИР ДИРАКА



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



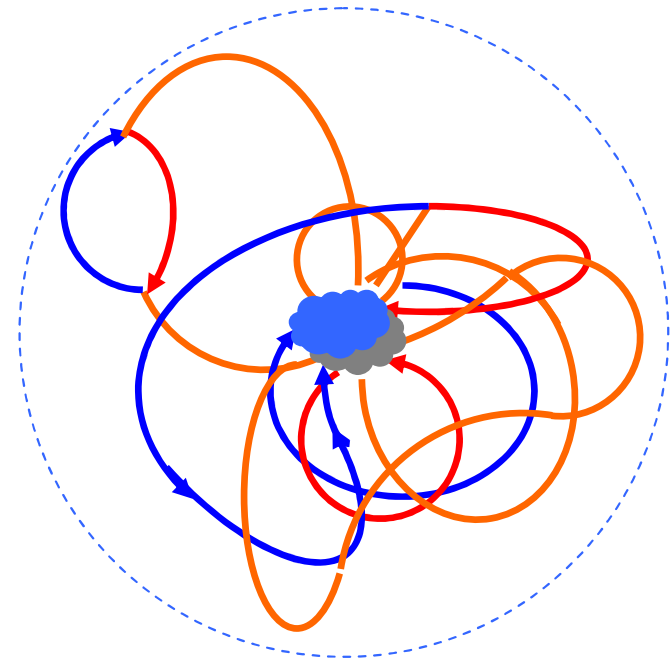
$$E_{vac} = -\infty$$

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

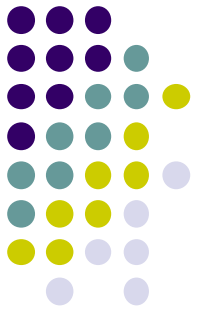
Например:

«электрон»

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



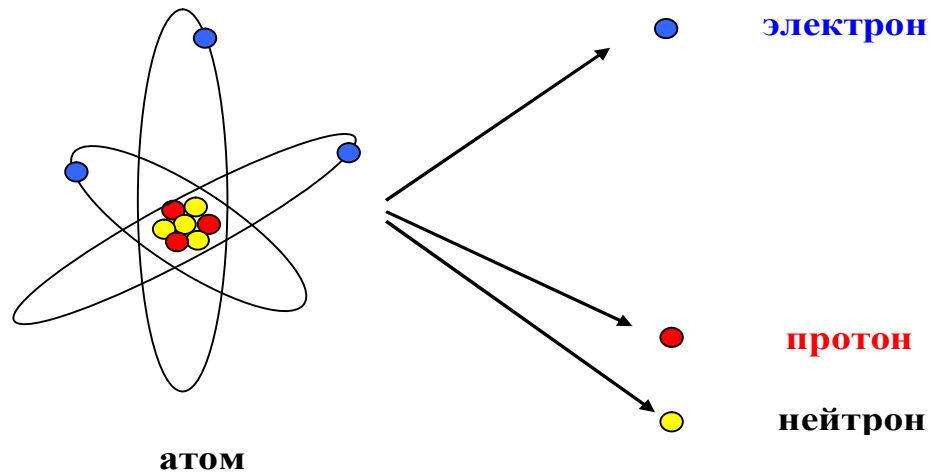
Основная проблема физики микромира:



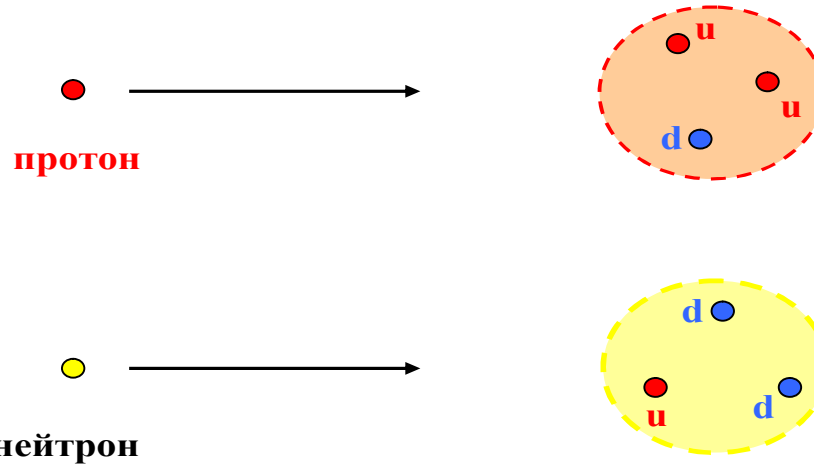
Изучение **ВАКУУМА** и его роли в наблюдаемых процессах.

Учет вакуумных вкладов в наблюдаемые характеристики систем приводит к появлению **расходимостей** – бесконечно больших вкладов. Устранение этих расходимостей (ПЕРЕНОРМИРОВКА теории) возможна только при учете **симметрий** мироздания.

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 $1/2$, 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

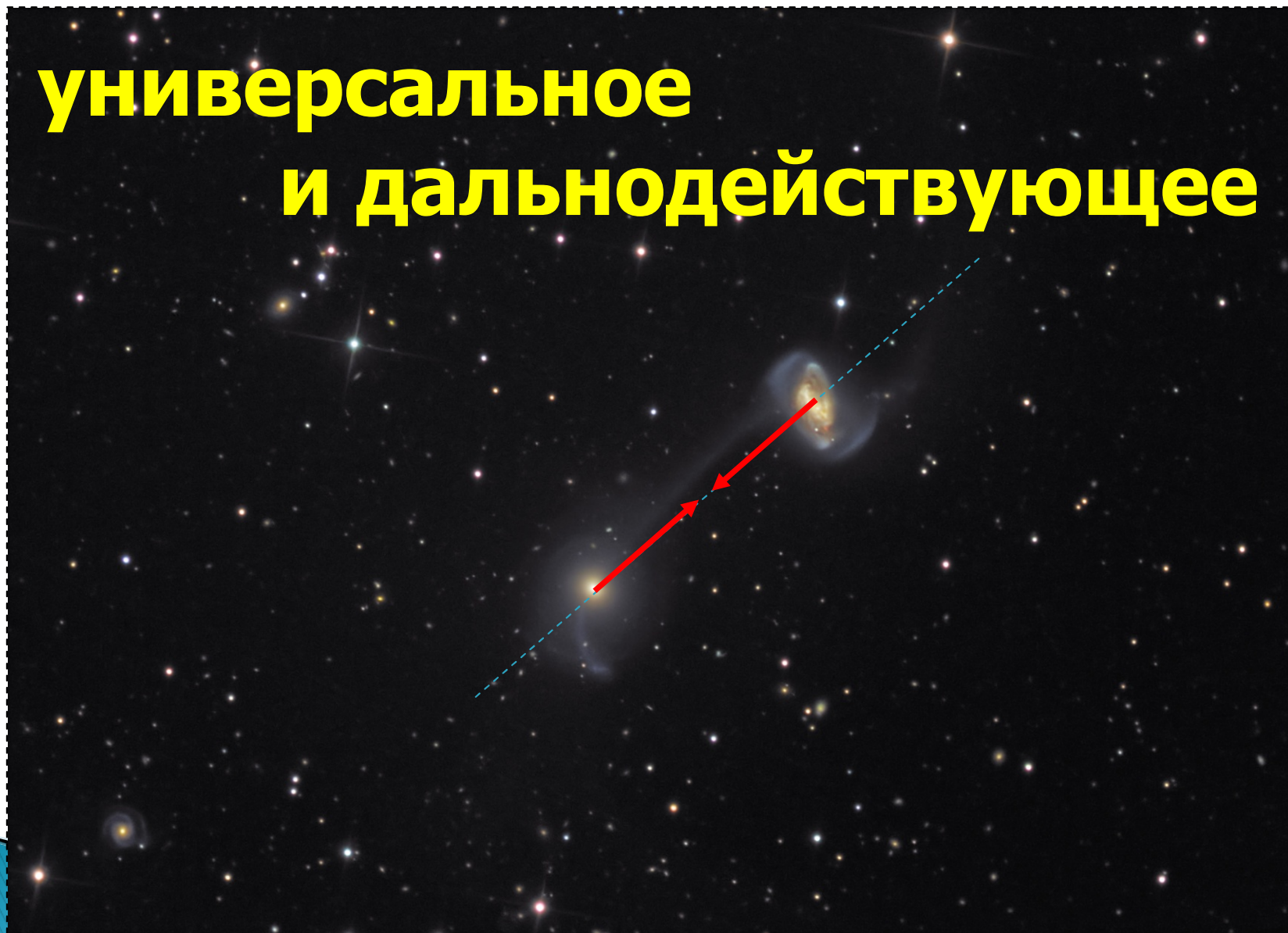
	название	масса (ГэВ)	заряд (e)
u	<i>up</i>	0,004	+2/3
d	<i>down</i>	0,007	-1/3
c	<i>charm</i>	1,5	+2/3
s	<i>strange</i>	0,3	-1/3
t	<i>top</i>	173	+2/3
b	<i>bottom</i>	4,7	-1/3

ЛЕПТОНЫ

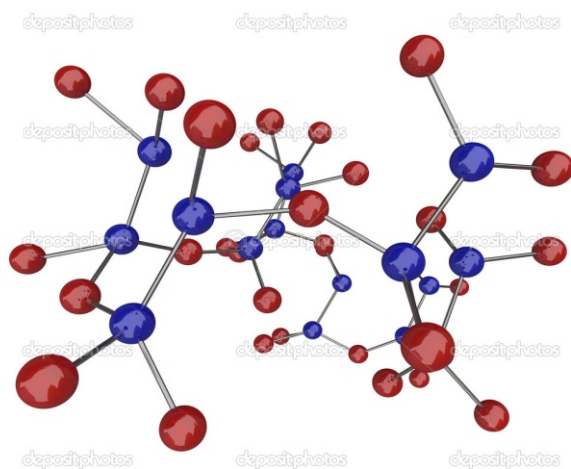
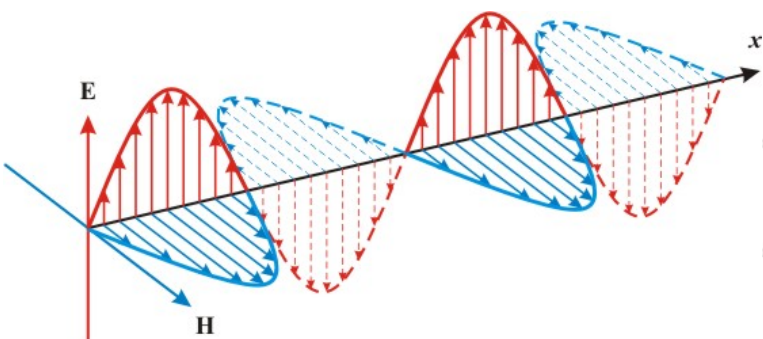
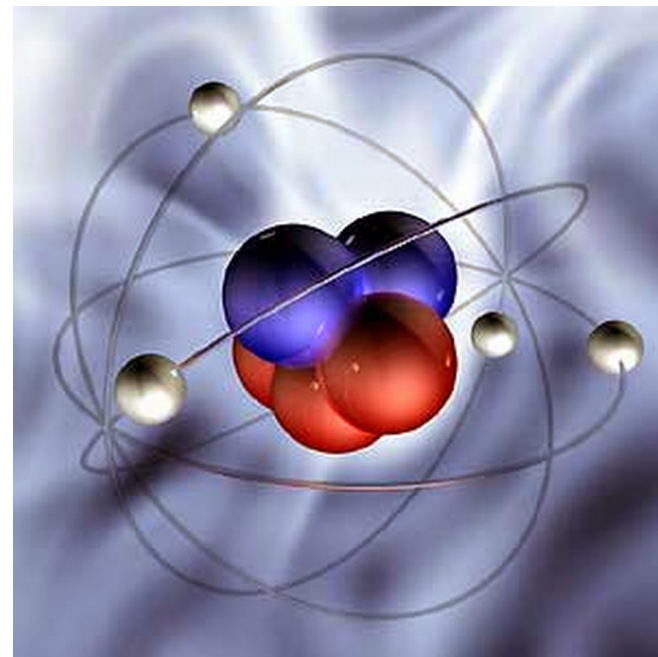
	название	Масса (ГэВ)	Заряд (e)
e	<i>электрон</i>	0,00051	-1
ν_e	<i>e-нейтрино</i>	около 0	0
μ	<i>мюон</i>	0,106	-1
ν_μ	<i>μ-нейтрино</i>	около 0	0
τ	<i>тау-лептон</i>	1,78	-1
ν_τ	<i>τ-нейтрино</i>	около 0	0

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

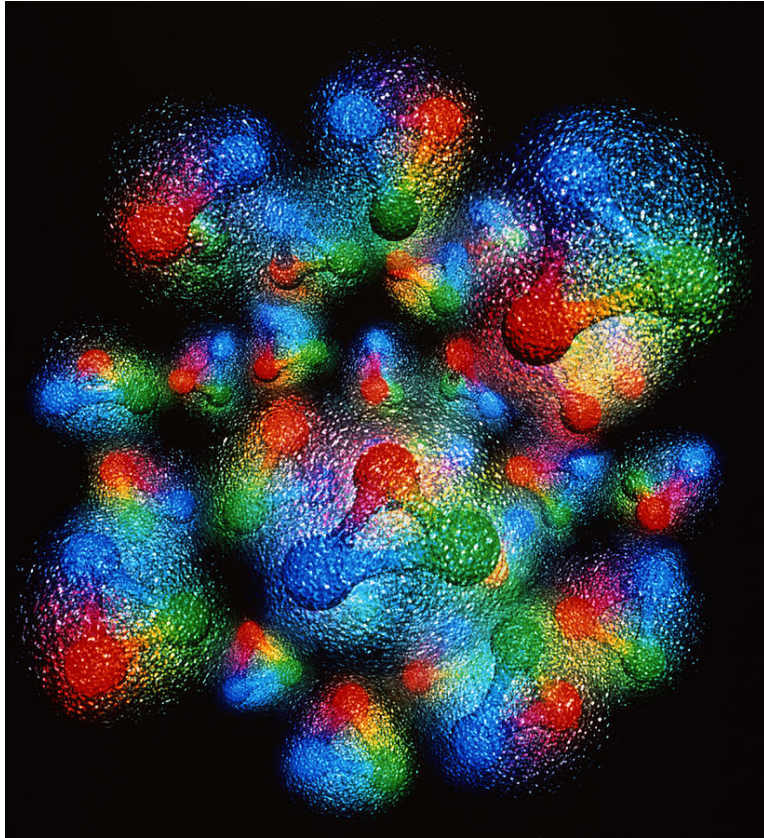
**универсальное
и дальнодействующее**



ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

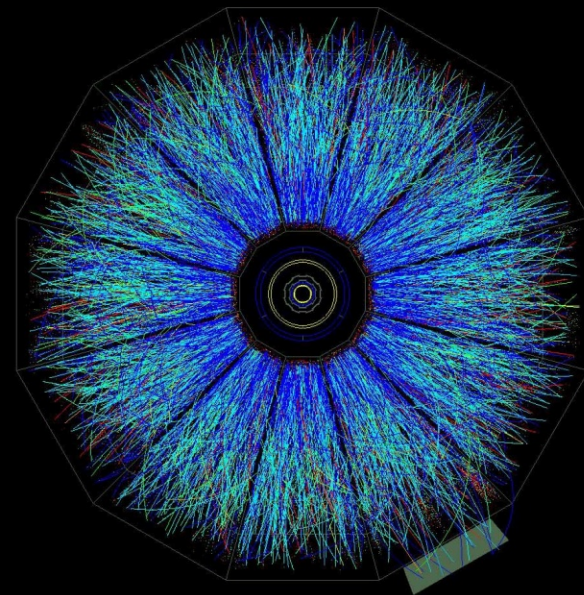


СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

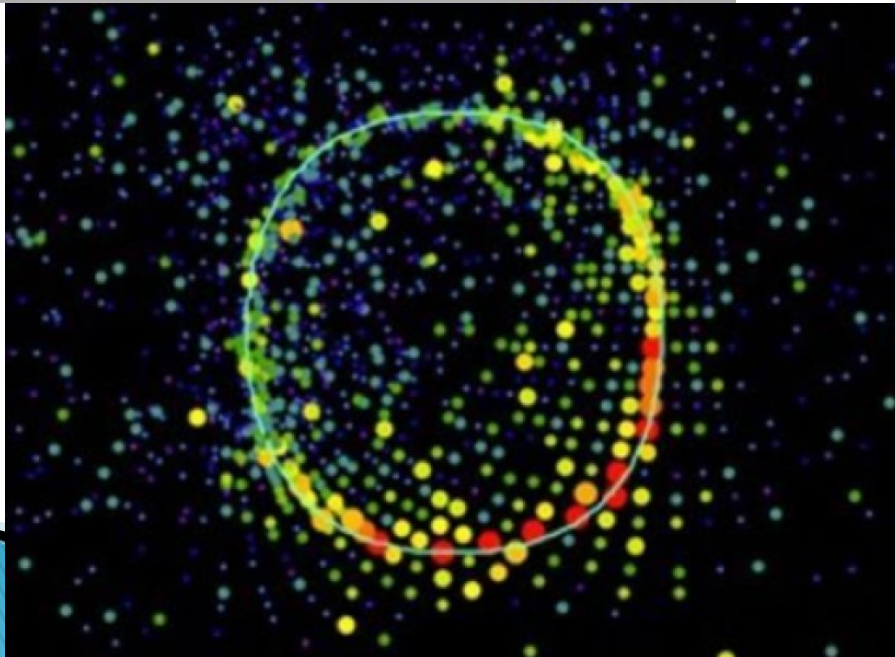
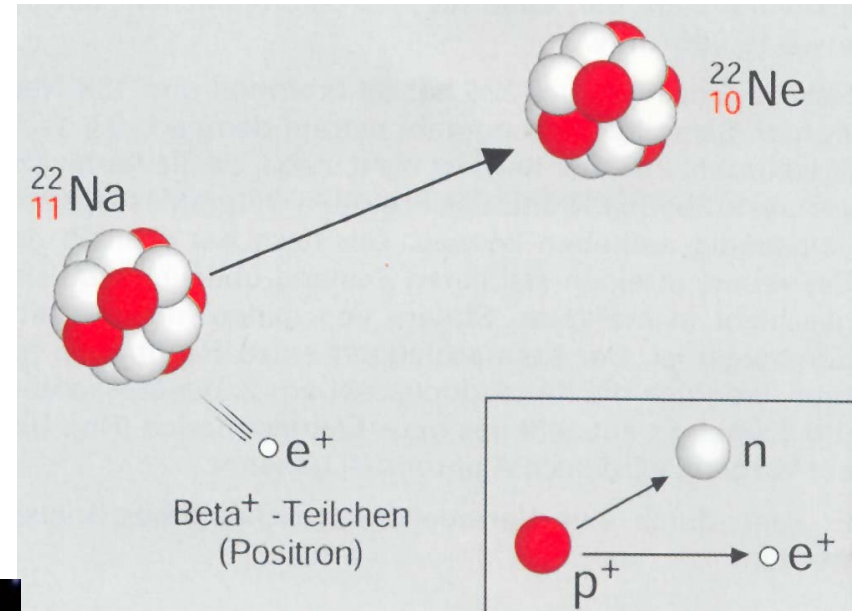
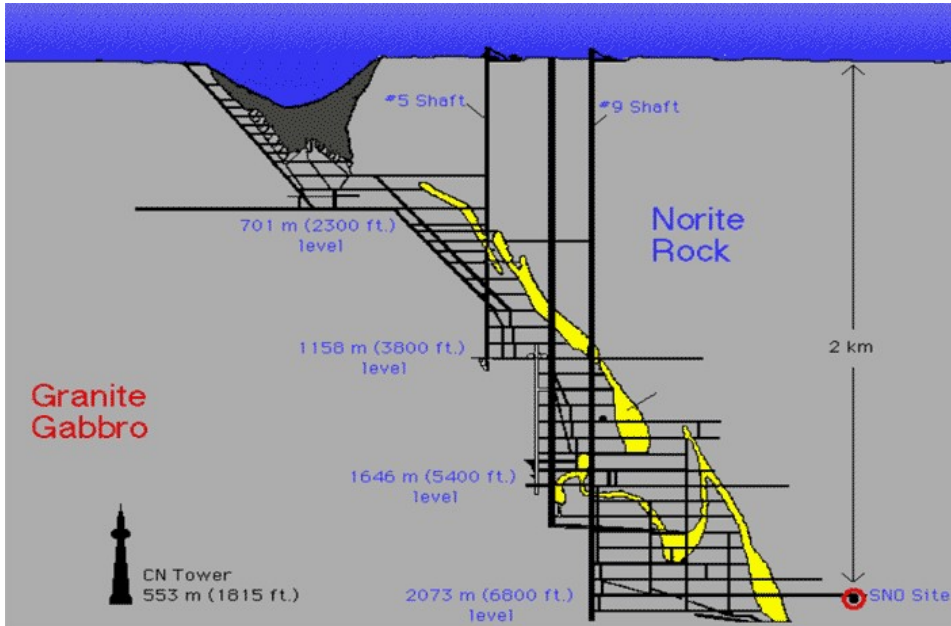


радиус $R_s \approx 10^{-15}$ м

$$U \gg mc^2$$



СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

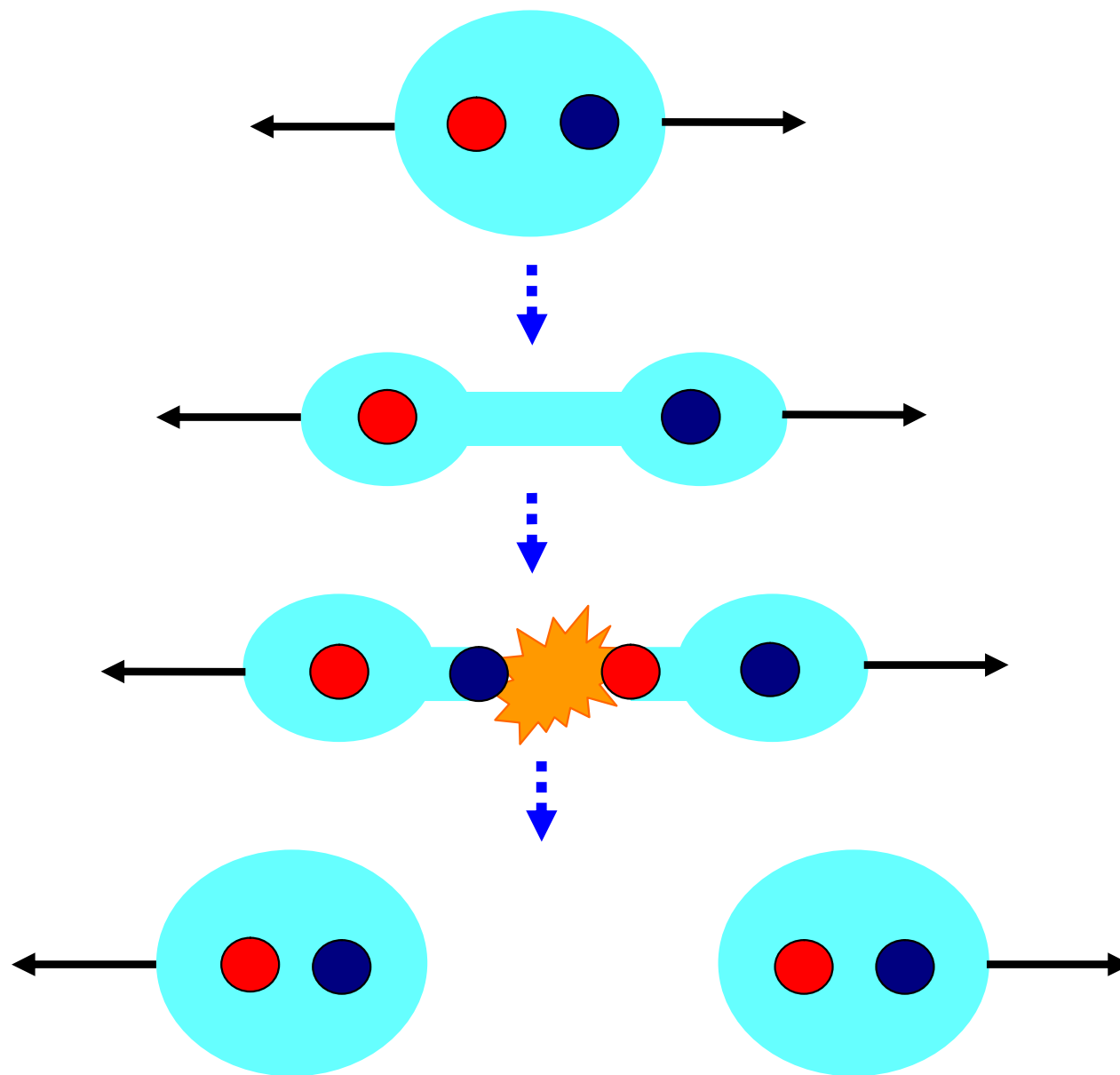


ПЕРЕНОСЧИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

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	гравитон	0	0
	\hat{g}	гравитино	?	0



ВАКУУМ И «КОНФАЙНМЕНТ»

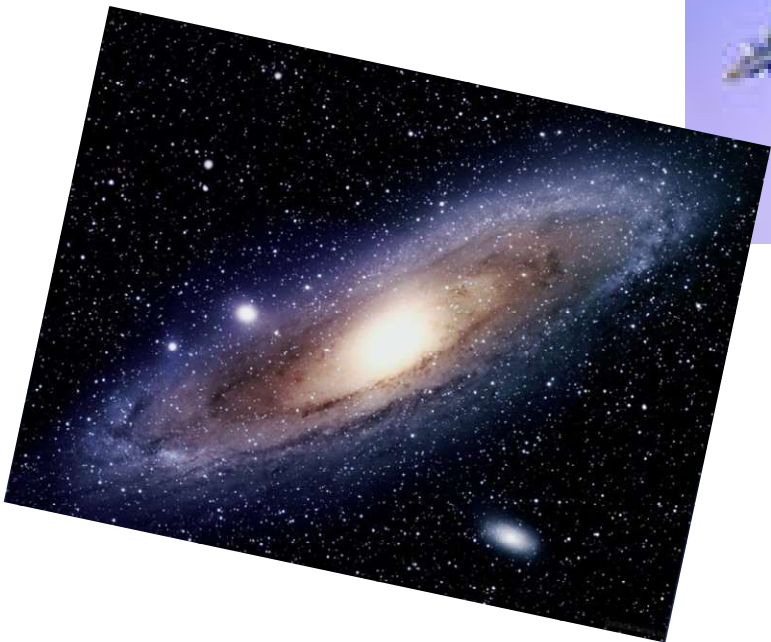


Основная проблема физики микромира:

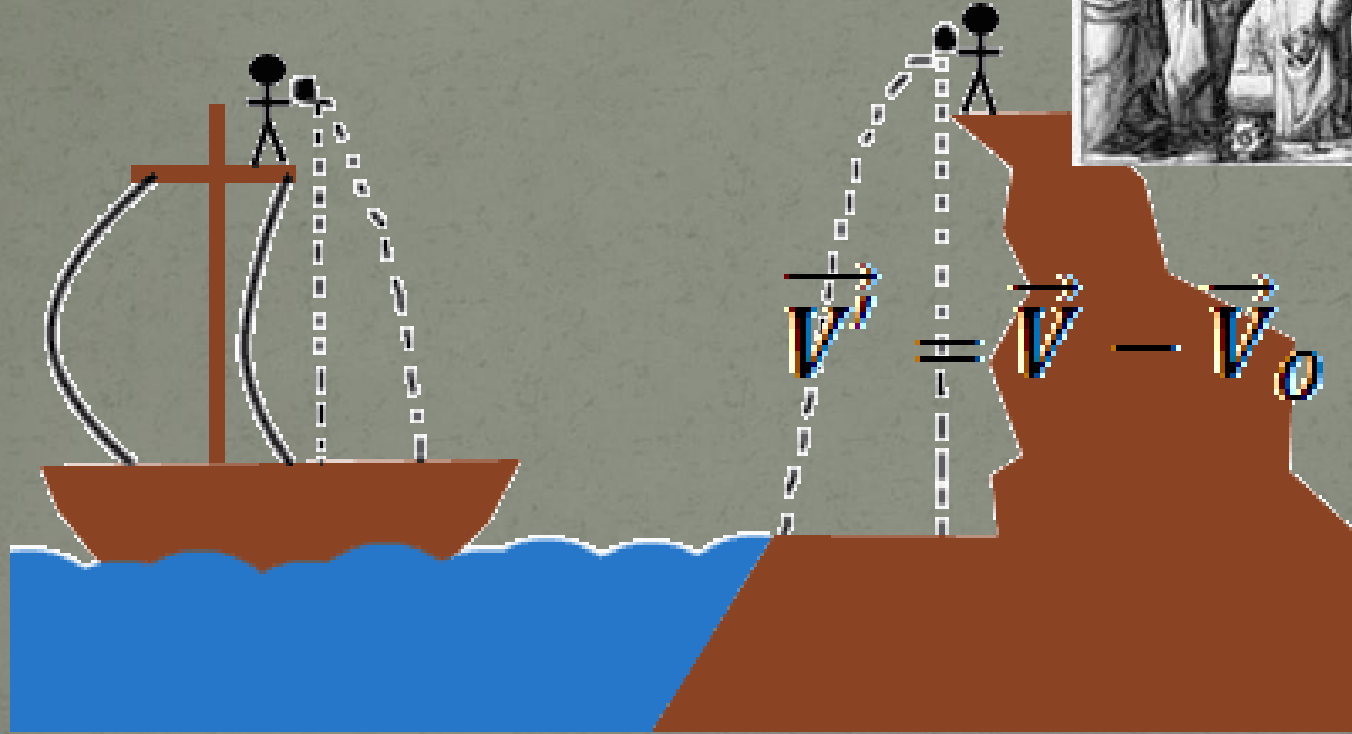
Изучение **ВАКУУМА** и его роли в наблюдаемых процессах.

Учет вакуумных вкладов в наблюдаемые характеристики систем приводит к появлению **расходимостей** – бесконечно больших вкладов. Устранение этих расходимостей (**ПЕРЕНОРМИРОВКА** теории) возможна только при учете **симметрий** мироздания.

СИММЕТРИЯ – - ключ к разгадке



Симметрии законов ФИЗИКИ: принцип Галилея



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

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

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

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

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

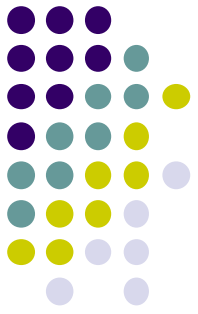
!

Калибровочная симметрия

Пример: калибровка потенциала в электростатике

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

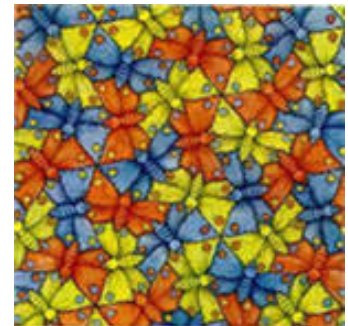
«Перенормировка», или «заметание мусора под ковер»



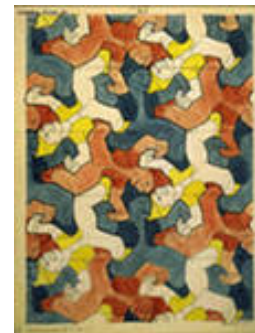
$$F(n) = \frac{9}{n^2 - 5n + 4}: F(4) = \infty$$

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

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



ТОЛЬКО



ТЕОРИИ

С СИММЕТРИЕЙ

ПОЗВОЛЯЮТ

«УБРАТЬ»

РАСХОДИМОСТИ!

ИЗОТОПИЧЕСКАЯ СИММЕТРИЯ:

Существуют наборы адронов, имеющих очень близкую массу ($\Delta m/m \sim 10^{-2}$) и одинаково участвующих в сильном взаимодействии, но различающиеся по участию в электромагнитном и слабом взаимодействиях:

$$(p, n) \rightarrow I=1/2, I_3=+1/2, -1/2$$

$$(\pi^+, \pi^0, \pi^-) \rightarrow I=1, I_3=+1, 0, -1$$

$$\text{для этих частиц: } Q = I_3 + B/2$$

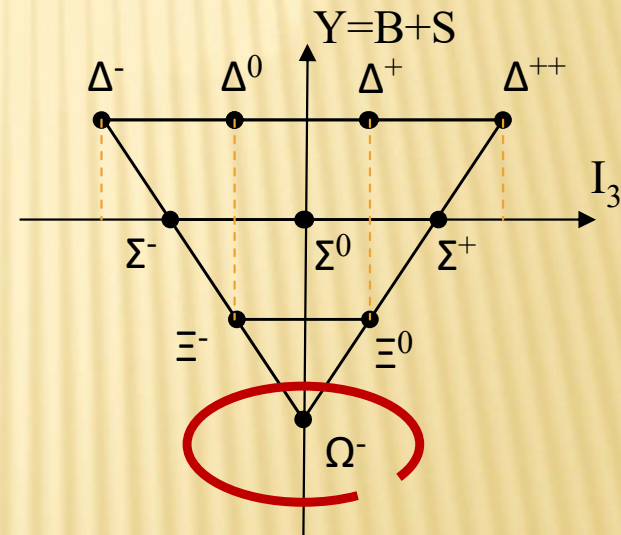
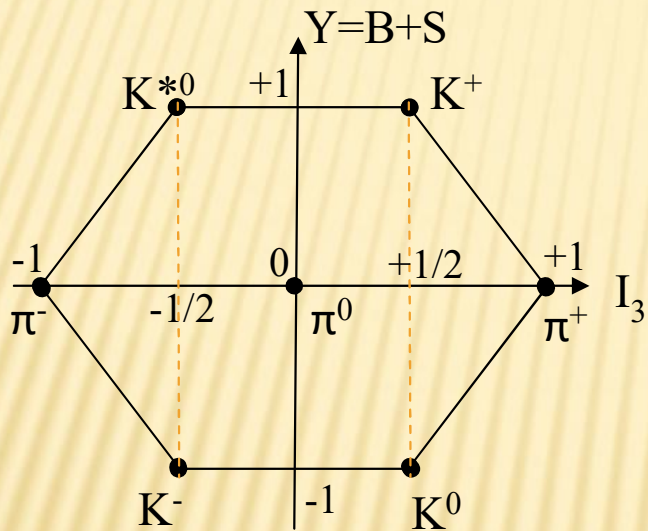
$$(\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-) \rightarrow I=3/2, I_3=+3/2, +1/2, -1/2, -3/2$$

(Q – электрический заряд, B – барионное число)

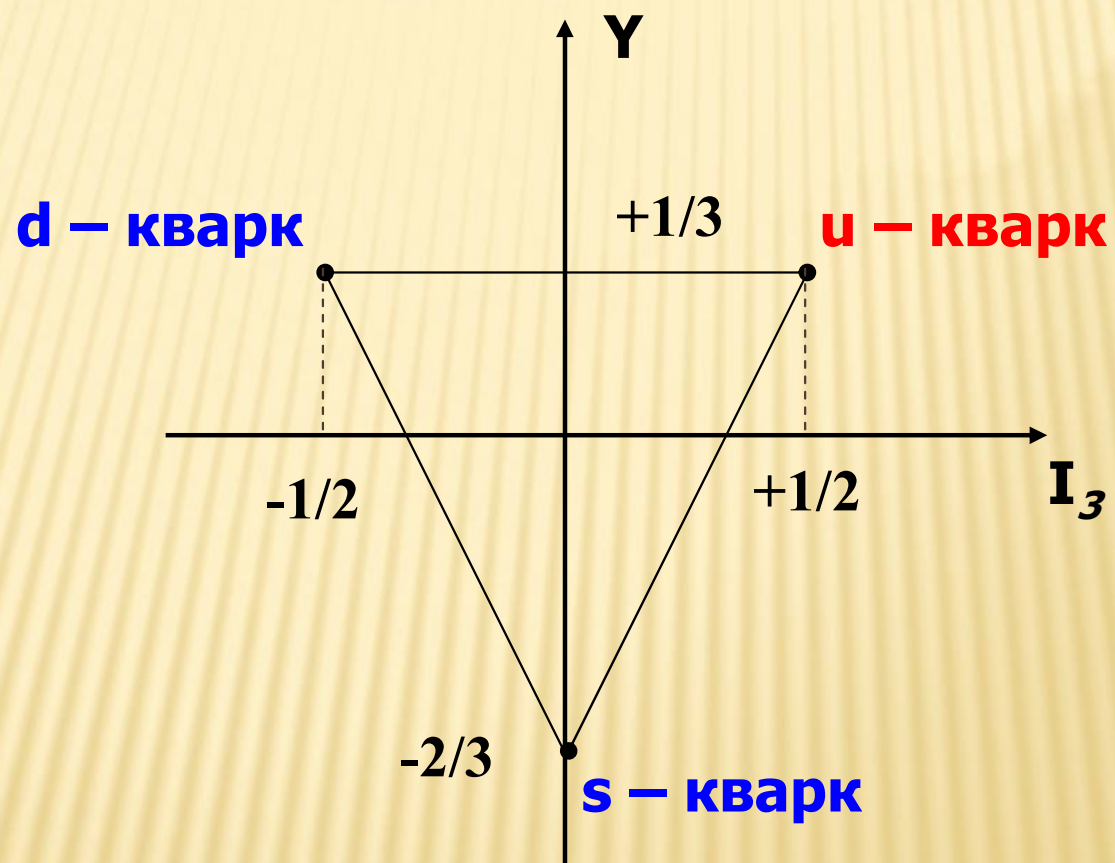
Позднее нашли «странные» адроны (новая характеристика – странность S), для которых $Q = I_3 + (B+S)/2$,
затем – «очарованные», для которых $Q = I_3 + (B+S+C)/2$ и т.д. Но и среди них такие наборы («изотопические мультиплеты») существуют.

УНИТАРНАЯ СИММЕТРИЯ

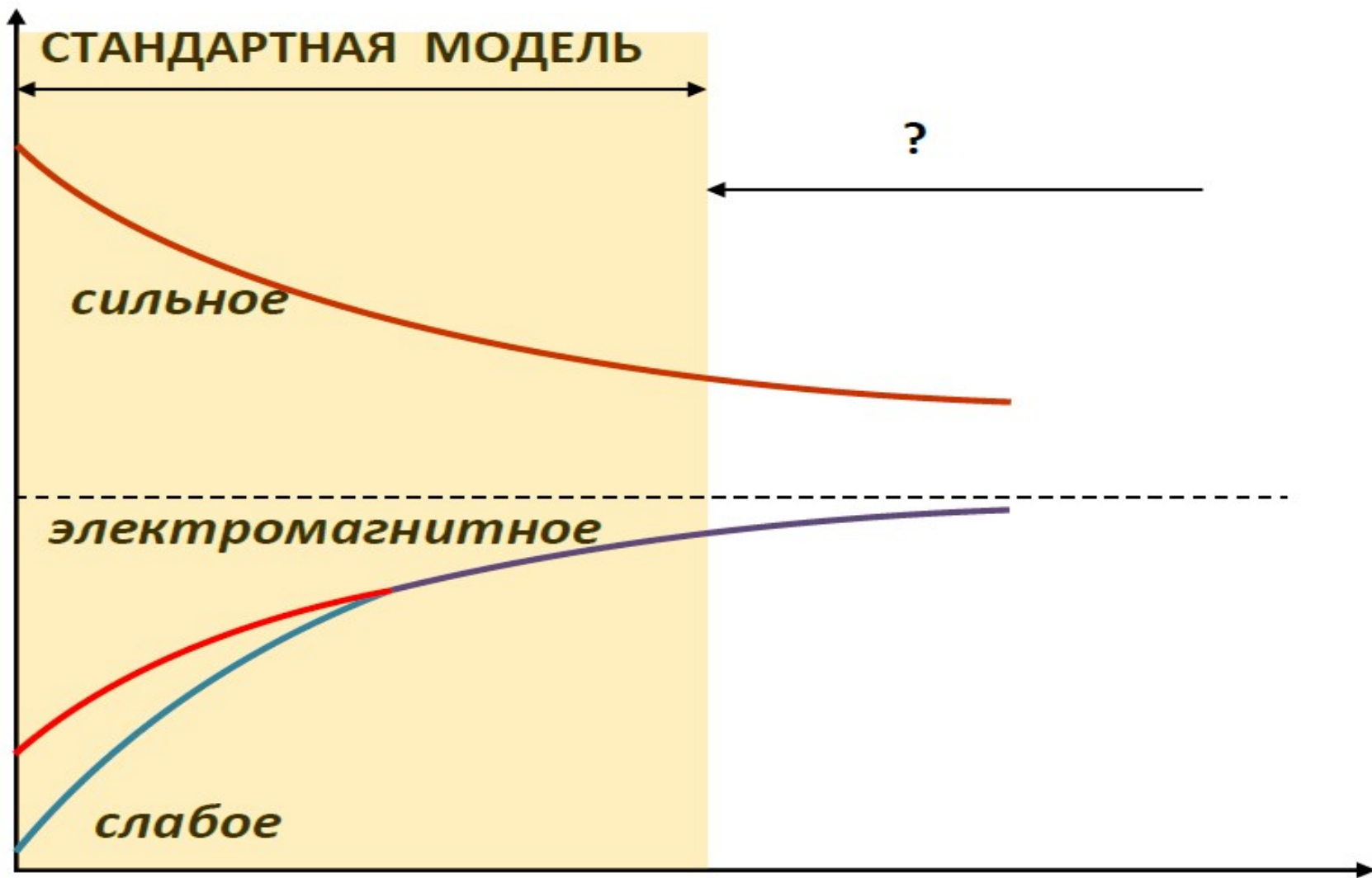
Наборы «обычных» и «странных» адронов объединяются в более широкие («унитарные») мультиплеты:



Все эти фигуры «состоятся» из
«фундаментальной» фигуры:



ИНТЕНСИВНОСТЬ



ЭНЕРГИЯ →
← **РАССТОЯНИЕ**



**ТЕОРИИ НУЖНЫ
СИММЕТРИИ**

**РЕАЛЬНЫЙ МИР НЕ
ВСЕГДА
СИММЕТРИЧЕН**

Спонтанное нарушение – механизм «сокрытия» симметрии

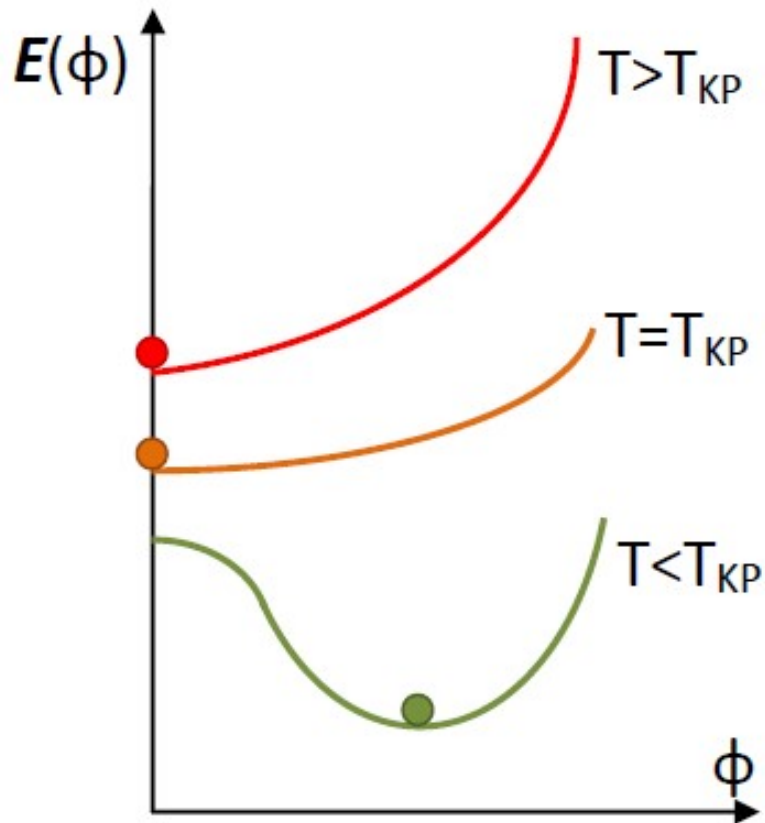
*Скрытая гармония сильнее явной... Подобен
беспорядочно разбросанному сору самый
прекрасный Космос.*

Гераклит



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

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.

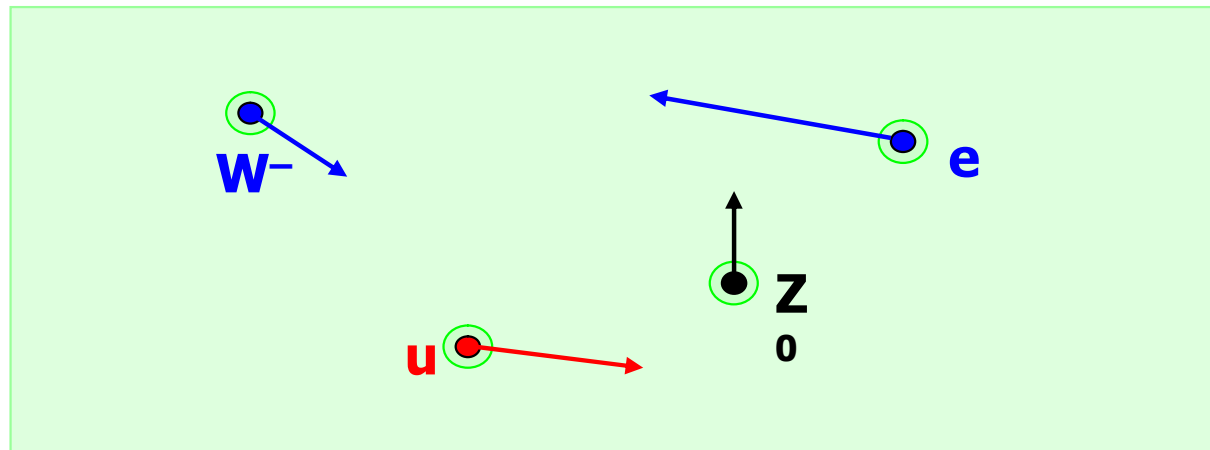
СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

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?

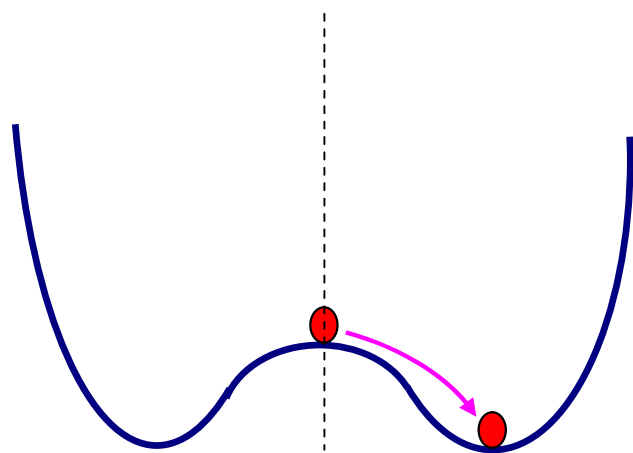
Согласно **СМ**, масса появляется у частиц благодаря их взаимодействию со специальным полем – **полем Хиггса**. Это поле является составной частью **вакуума**. Кварки, лептоны, W -бозоны и Z -бозоны, двигаясь в **вакууме**, взаимодействуют с частицами **поля Хиггса** и становятся массивными.



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**.

Необходимость поля Хиггса для СМ:

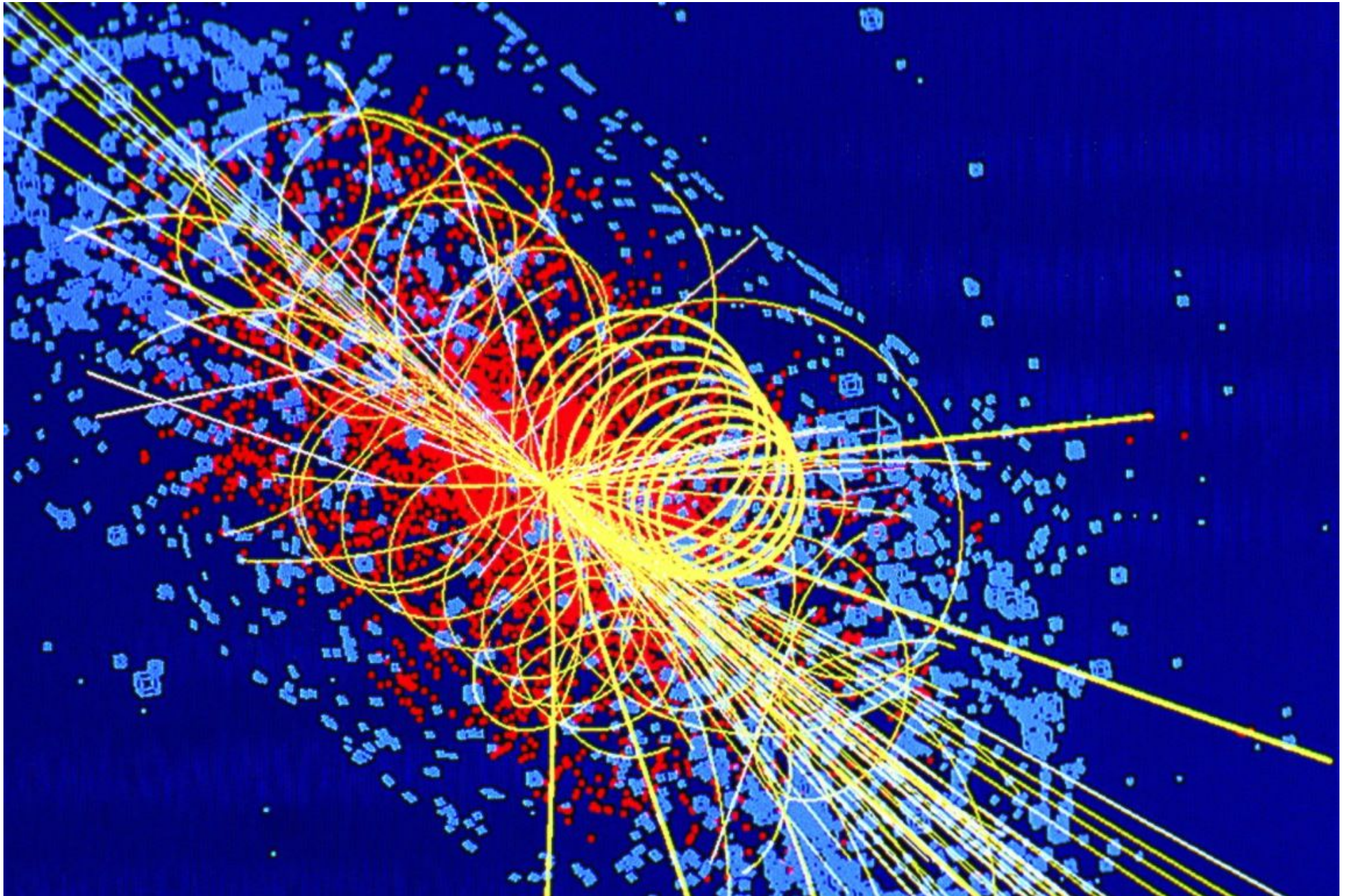
СМ использует СИММЕТРИИ для устранения расходимостей - для ПЕРЕНОРМИРОВКИ. Эти симметрии реализуются ТОЛЬКО для безмассовых частиц.



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

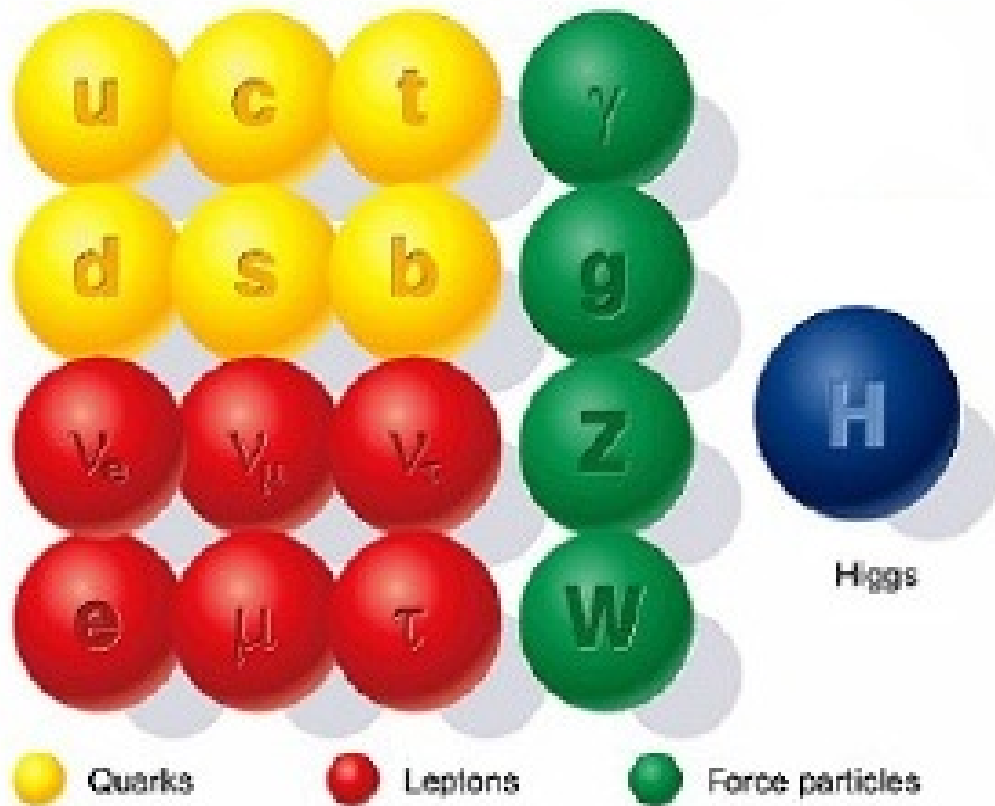
Любое другое введение массы частиц в СМ не сохраняет это свойство.

Фотография события с рождением и распадом бозона Хиггса в детекторе ATLAS

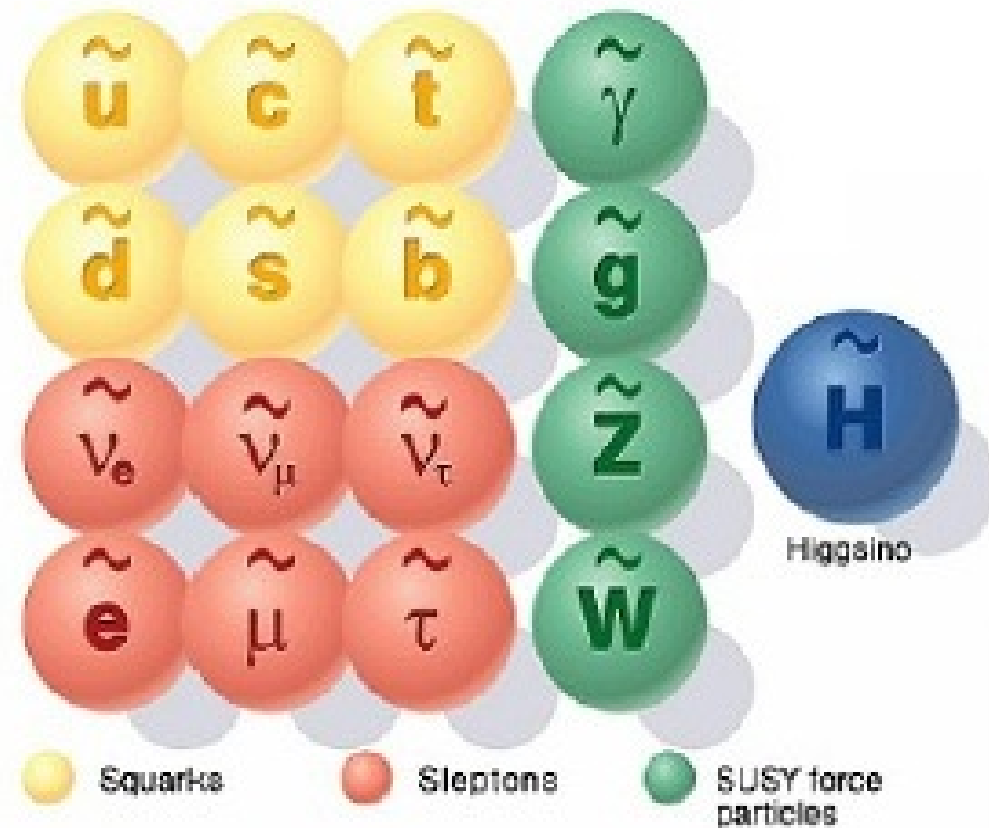


СУПЕРСИММЕТРИЯ

SUPERSYMMETRY



Standard particles



SUSY particles

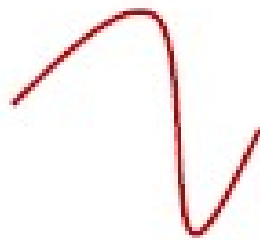
Суперсимметрия (SuSy)

Пример: вакуумная энергия системы фермионного и бозонного поля

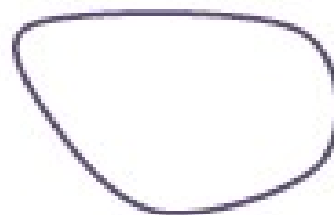
фермионное поле	$E_{VAC} = -\infty$
бозонное поле	$E_{VAC} = +\infty$
СУММА	$E_{VAC} = 0$

СТРУНЫ – «одномерные»

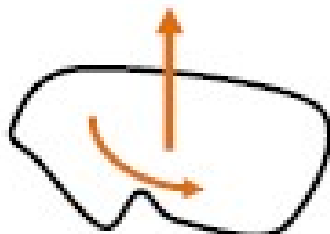
нелокальные объекты



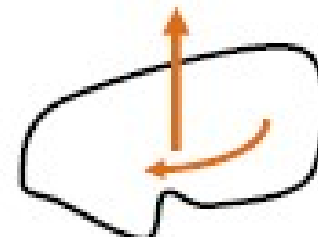
открытые



замкнутые



«левые»



«правые»

ориентируемые и неориентируемые,
бозонные и фермионные, суперструны



СИММЕТРИИ – «оружие» в борьбе с расходимостями

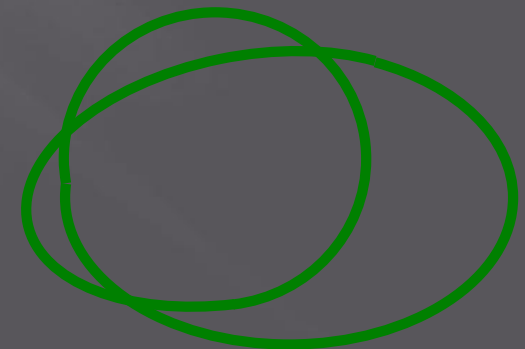
- × *Калибровочная симметрия* – обеспечивает **перенормируемость** (т.е. возможность устранения расходимостей)
- × *Суперсимметрия* – обеспечивает **суперперенормируемость** («автоматическое» сокращение расходимостей)
- × *Суперсимметрии пространств с дополнительными размерностями* – обеспечивают **конечность**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

«ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ»

ЦЕЛЬ:

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

СТРУН или **БРАН** в 11-мерном
суперпространстве: «**М** – теория»



«Произведем все это систематически, не отступая, но и не увлекаясь; соблюдем необходимую для общего плана симметрию и не предадимся при сем никаким мечтаниям, кроме тех, кои всякому усердному и ревностному исполнителю свойственны.»

М.Е. Салтыков-Щедрин

