

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

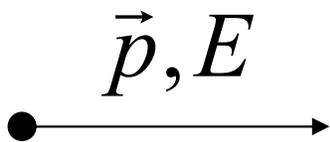
*постоянная Планка:*

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

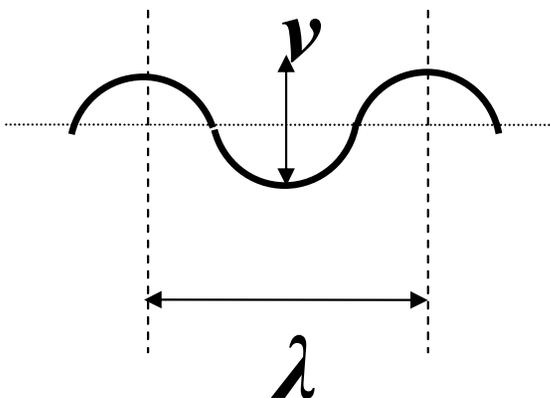
**МИР**  
**КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

**МИР**  
**КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

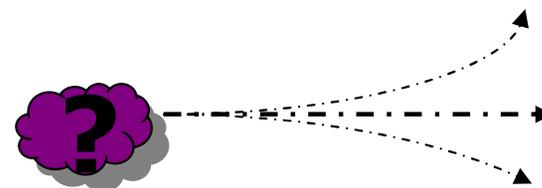
**частицы**



**ВОЛНЫ**

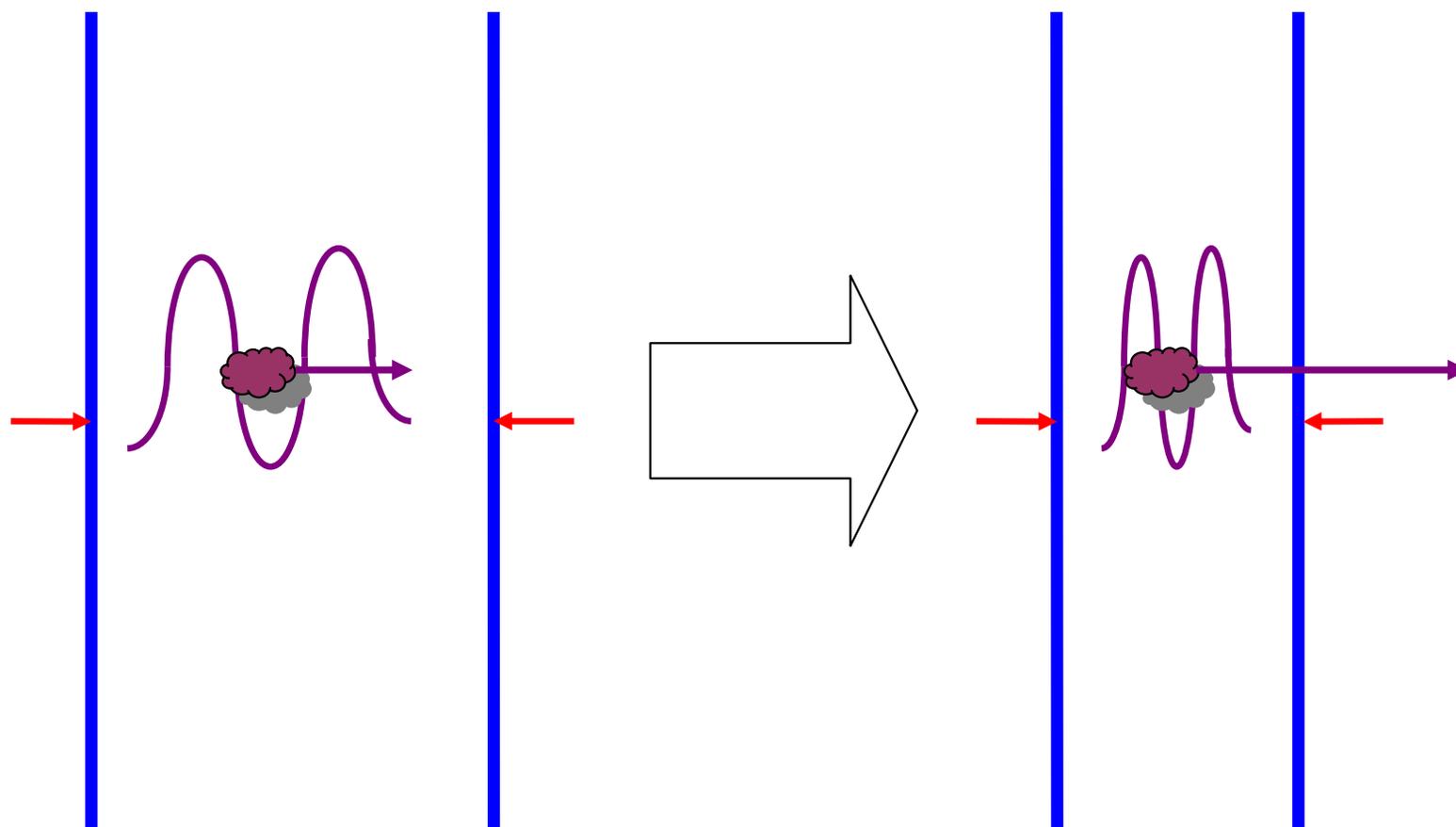


**«микрообъекты»**



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

# ПОПЫТКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТЫ МИКРООБЪЕКТА: «СЖАТИЕ ВОЛНЫ»



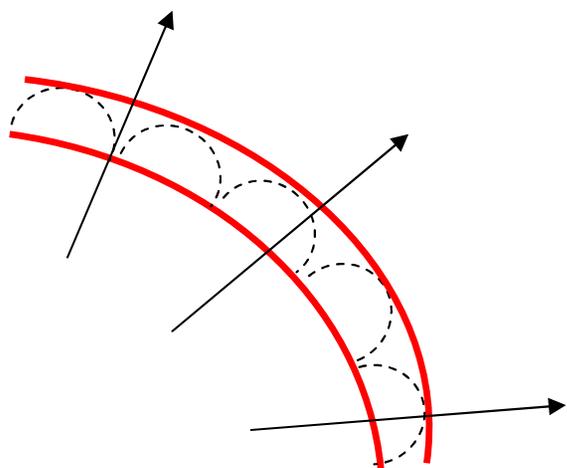
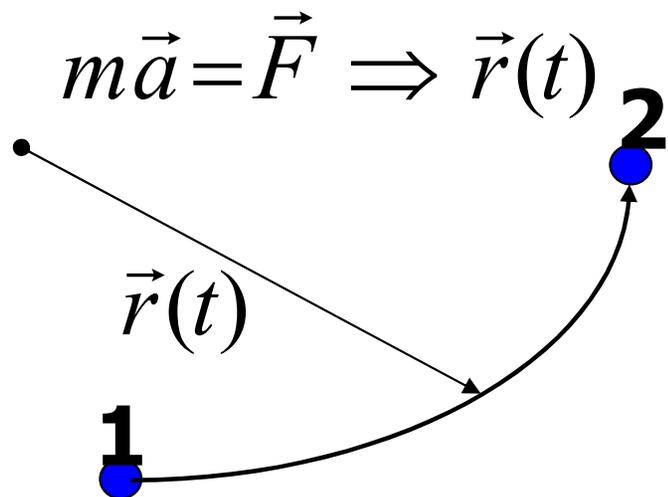
***неопределенности***

**значений**

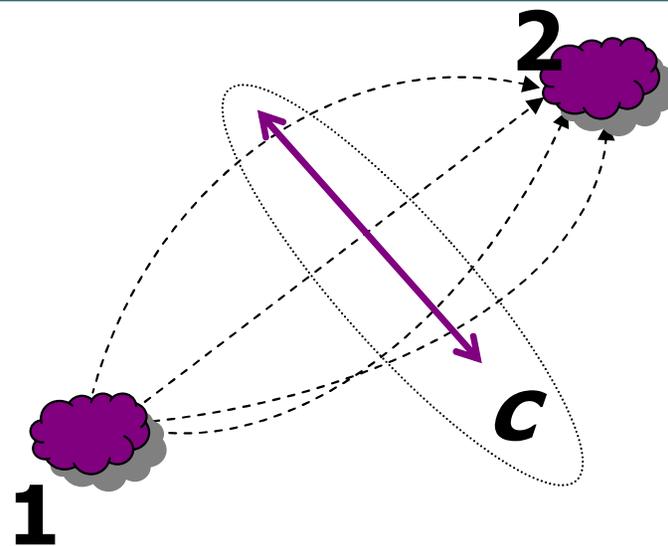
**координаты и импульса**

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

# МИР КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ



# МИР КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ



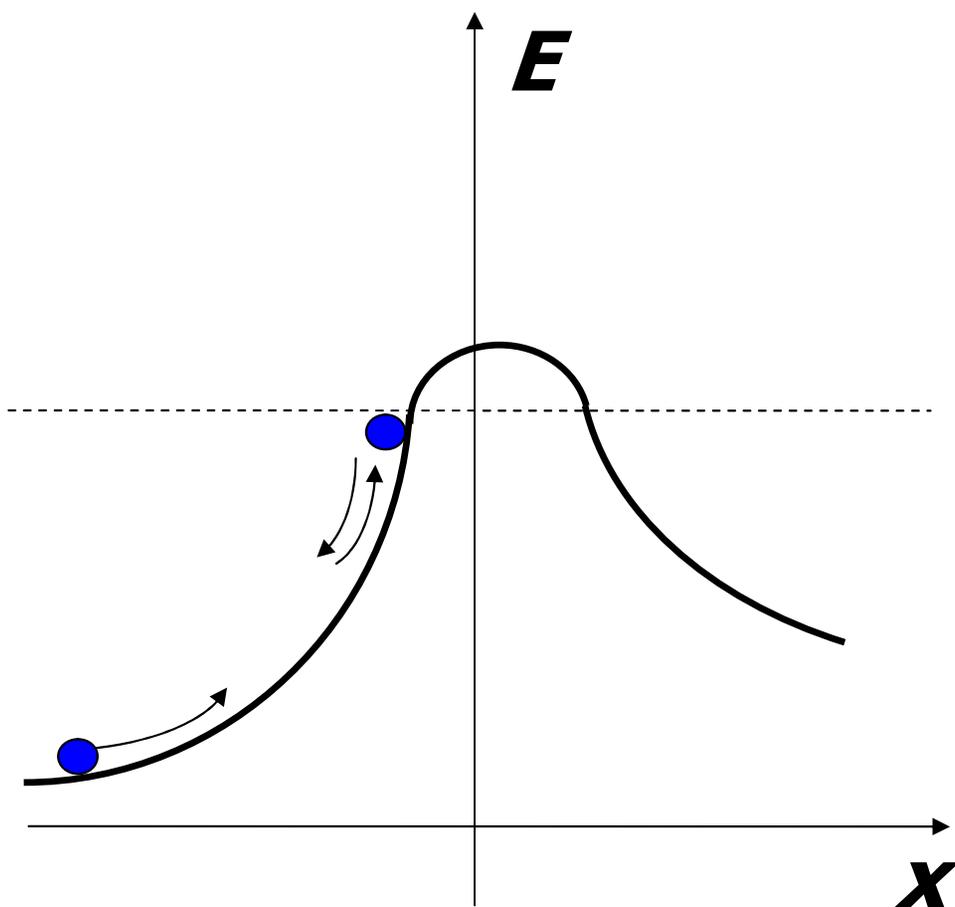
$$W(1 \rightarrow 2) = \sum_c W(1 \rightarrow c \rightarrow 2)$$

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

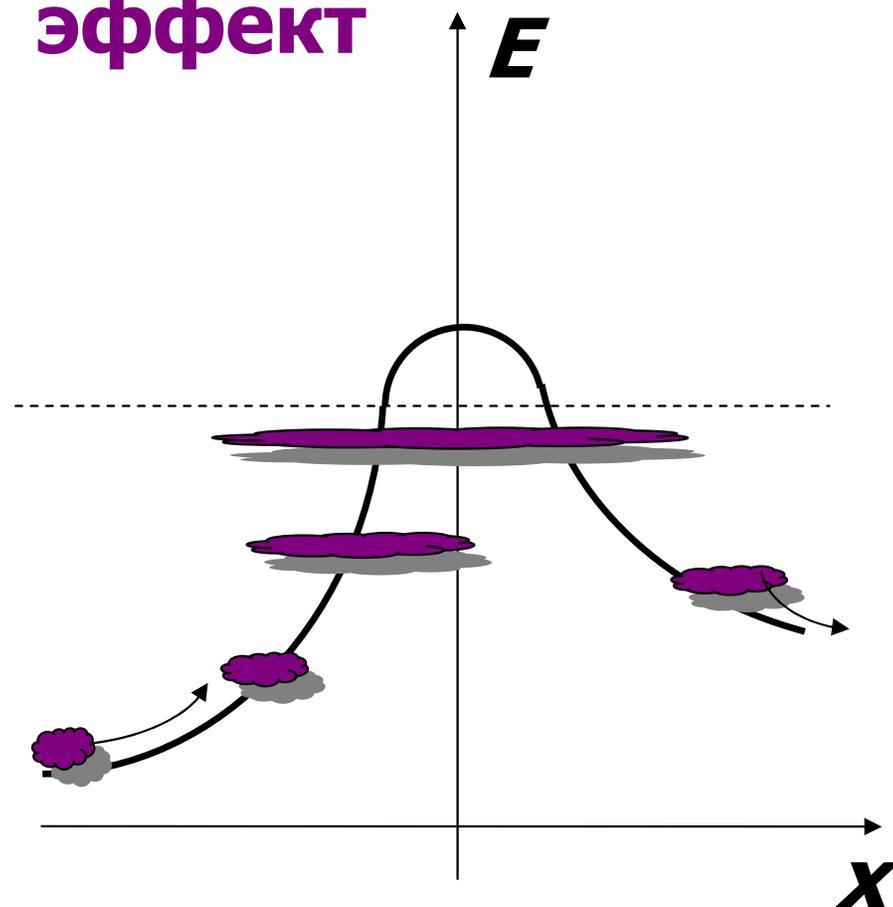
**МИР  
КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

**МИР  
КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

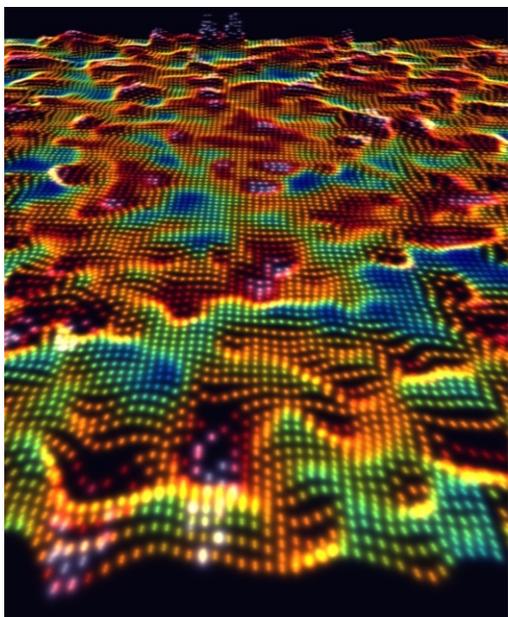
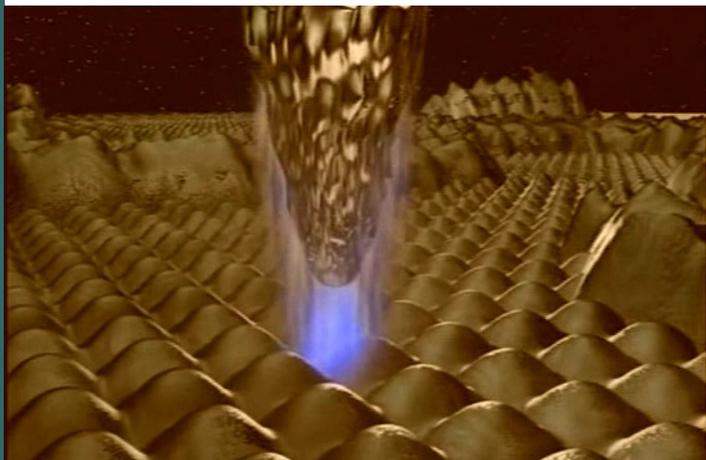
**отражение**



**туннельный  
эффект**



# Туннельный микроскоп

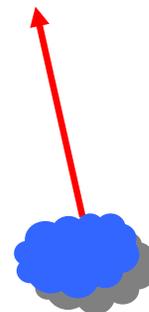
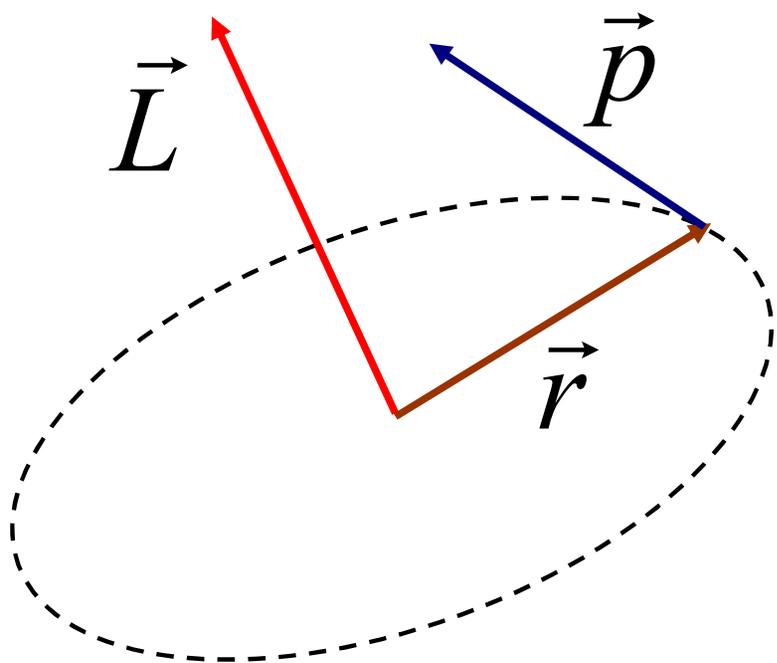


# «СПИН» ≡

«собственный» момент количества движения квантовой частицы

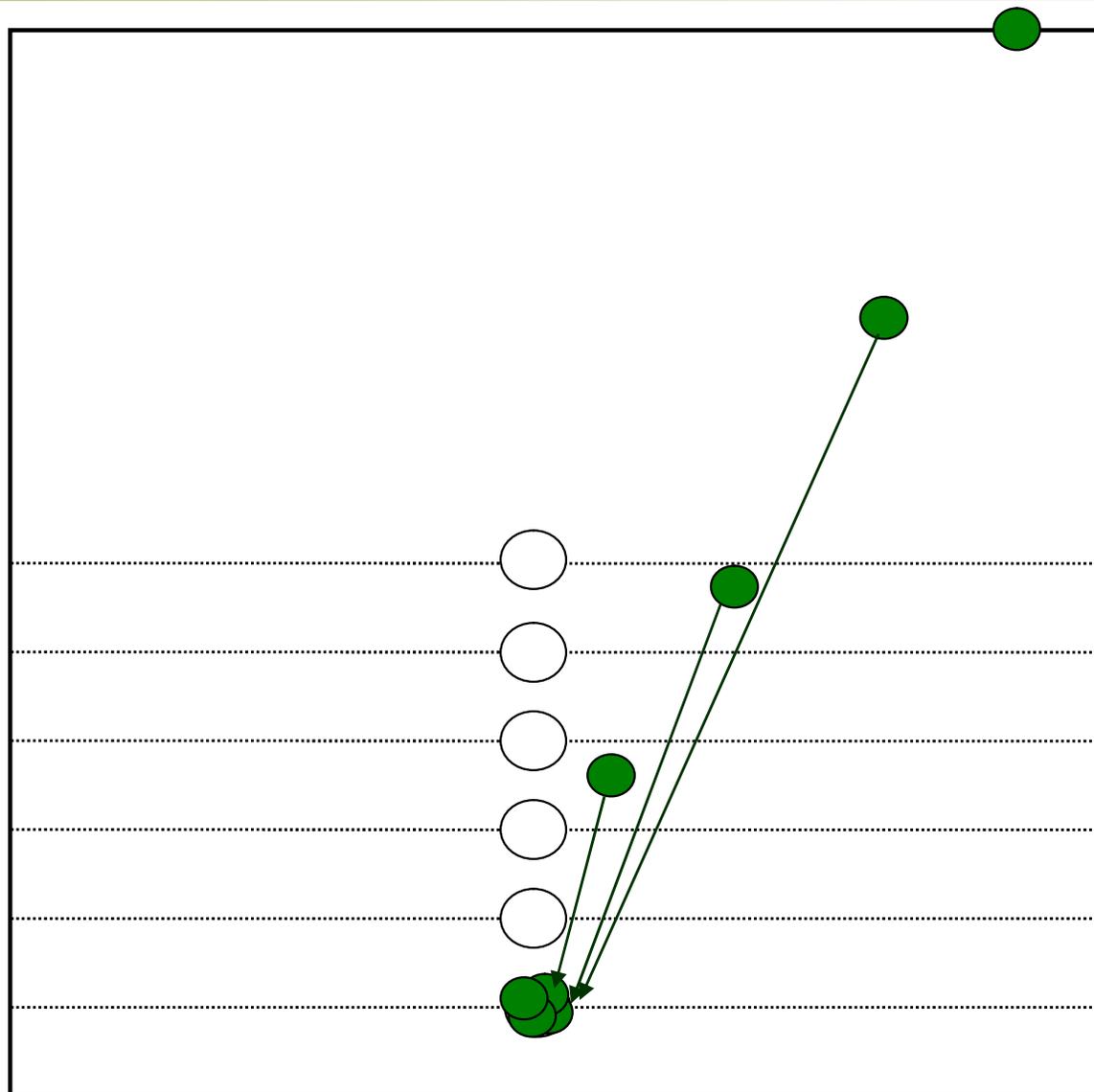
$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}]$$

$$\vec{S}$$

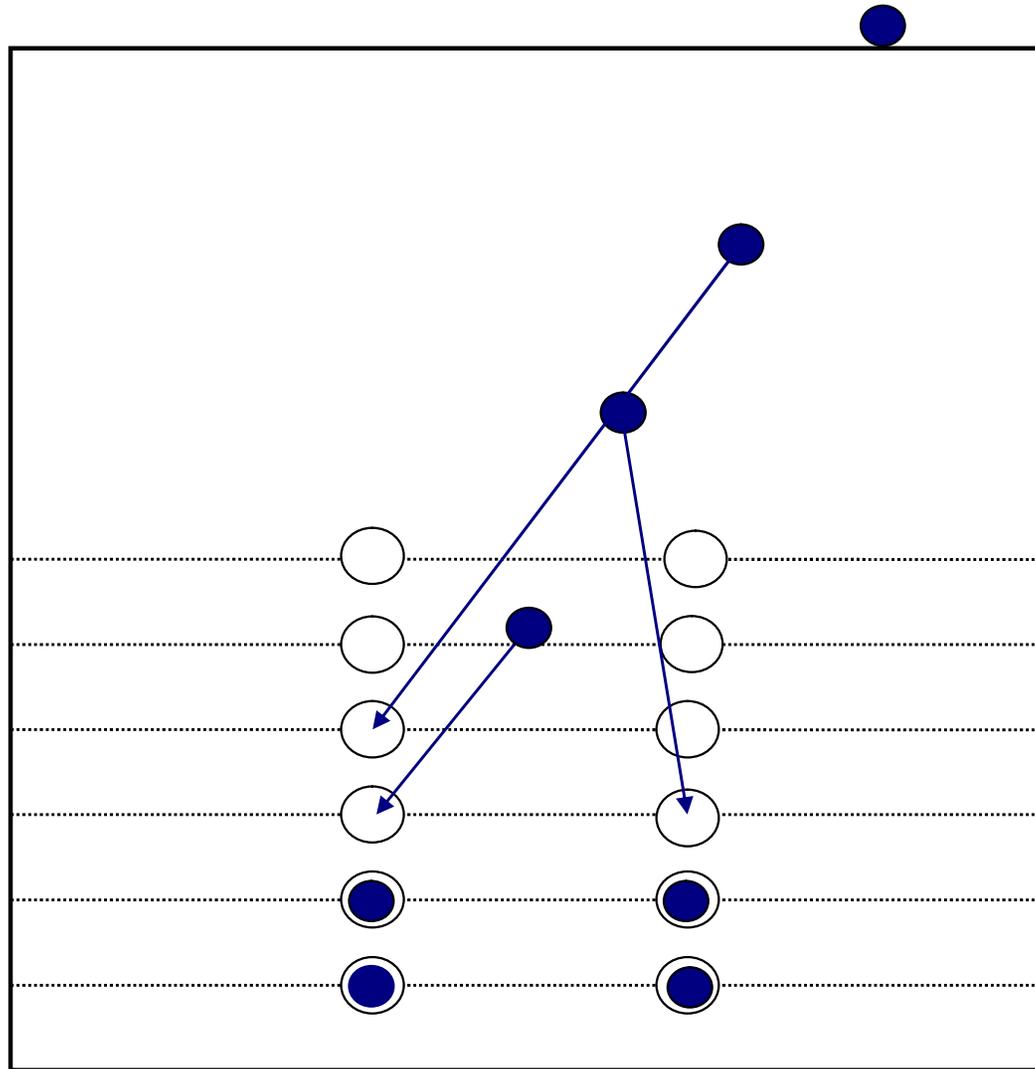


$$|\vec{S}| = 0, \frac{h}{4\pi}, \frac{h}{2\pi}, \frac{3h}{4\pi}, \dots$$

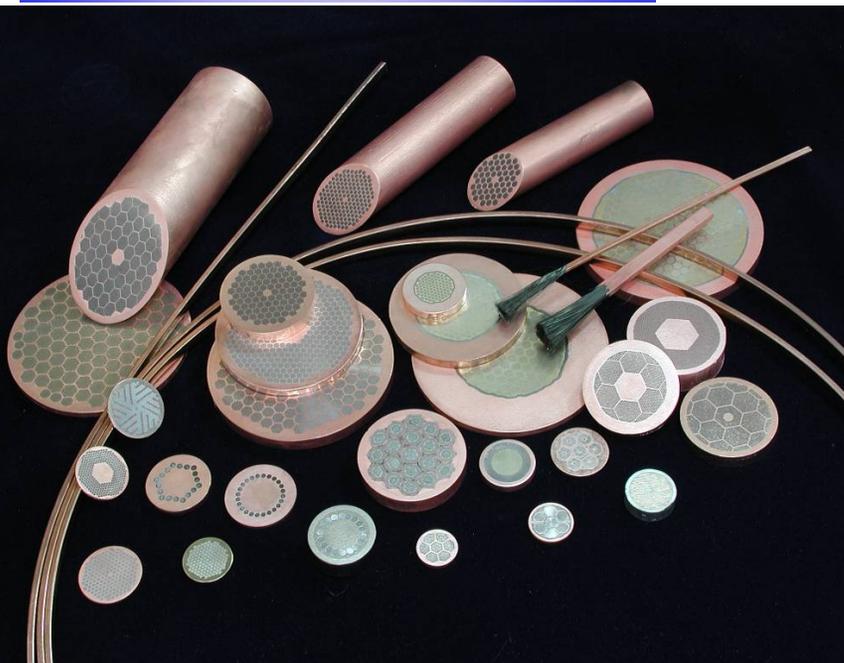
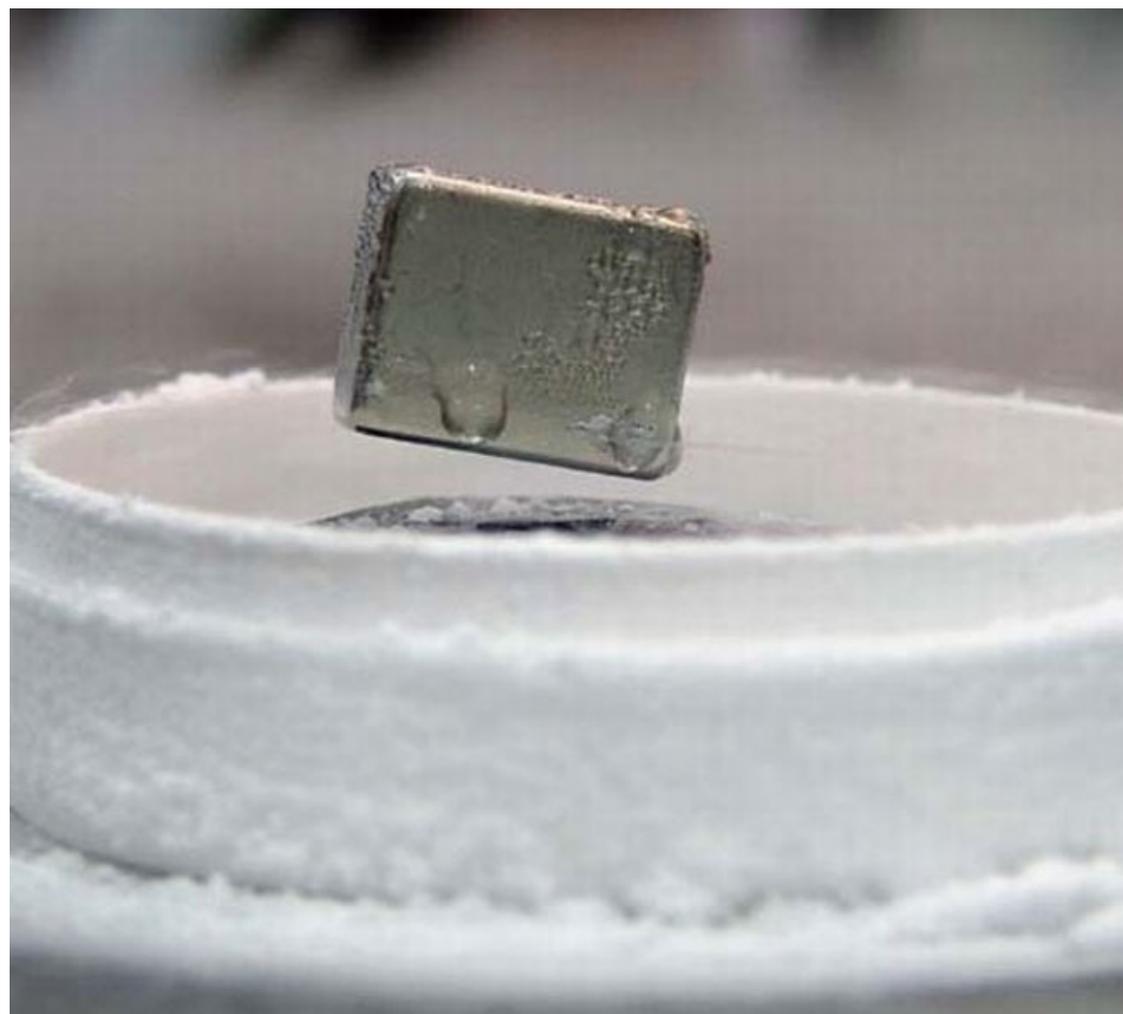
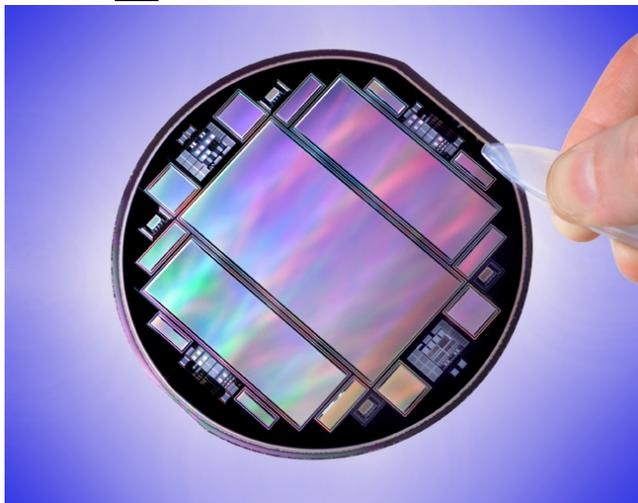
**$S=0,1,2 \dots$  - бозоны:**  
«любят компанию»



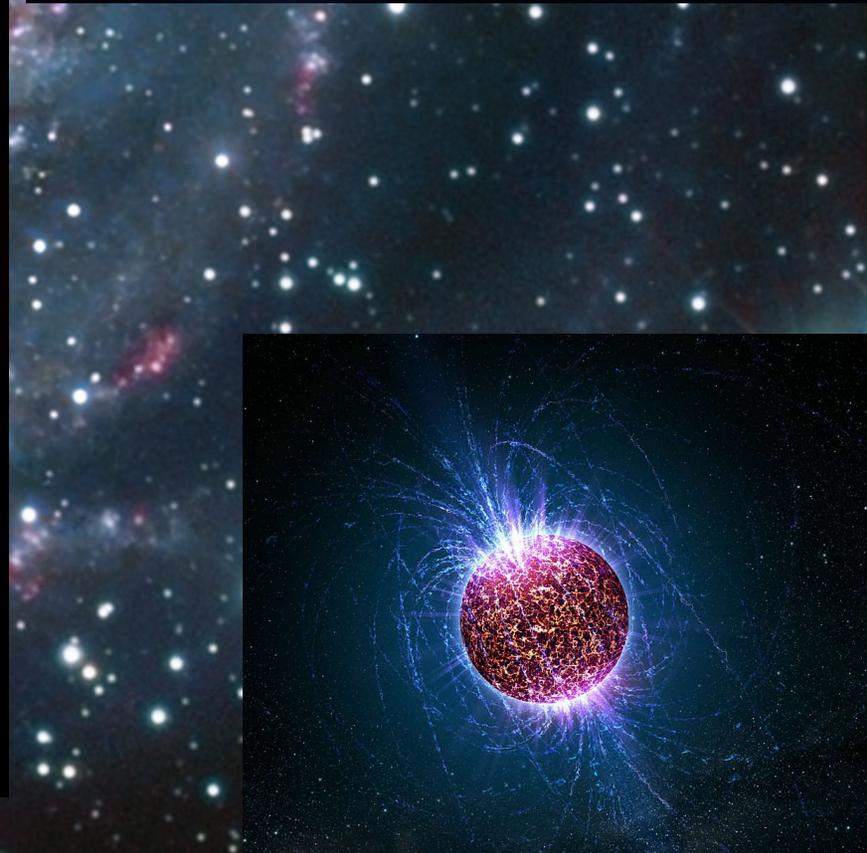
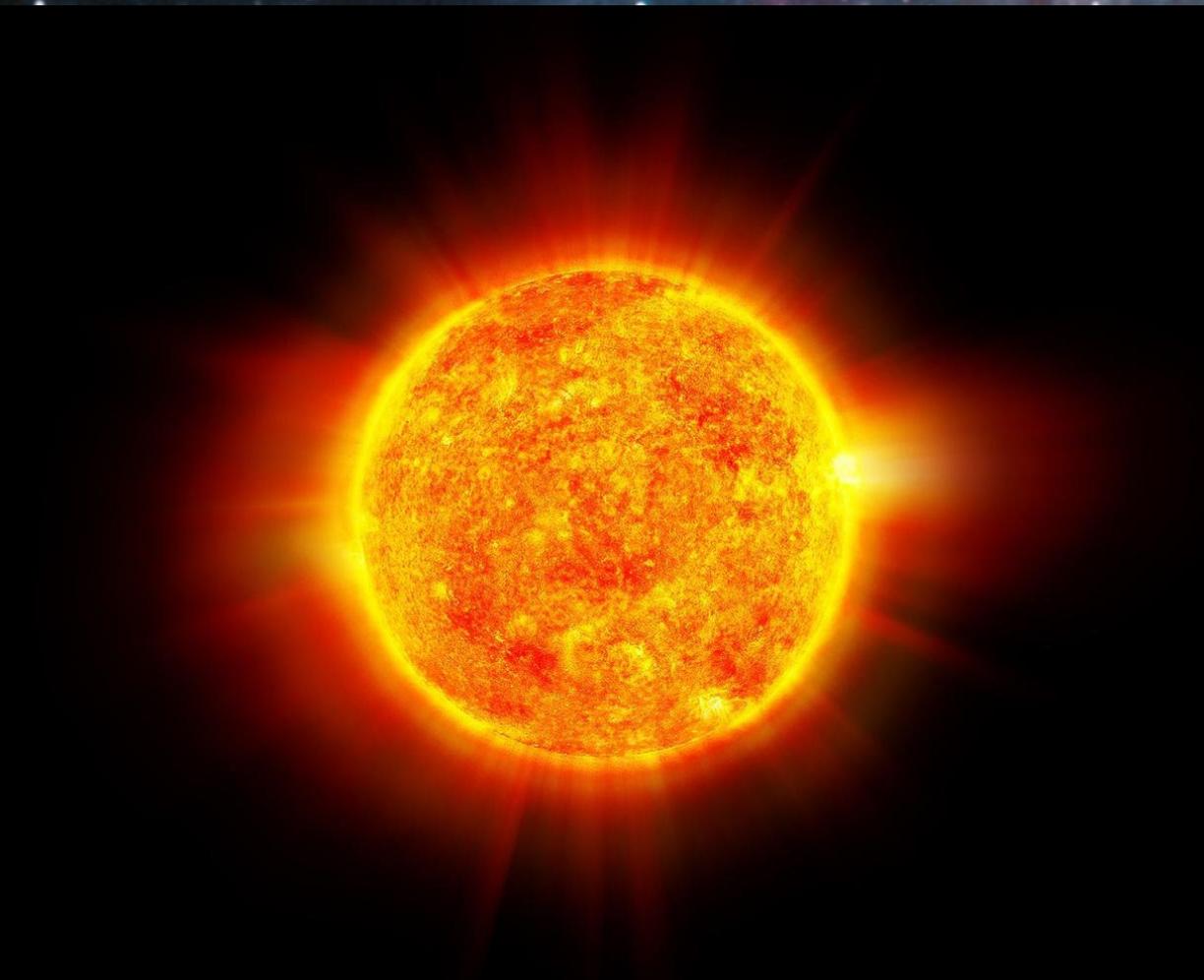
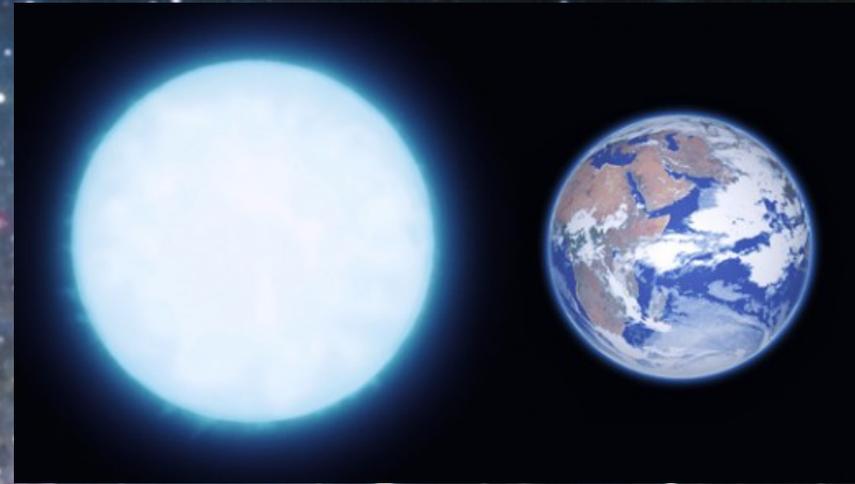
$S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$  - **фермионы:**  
«ИНДИВИДУАЛИСТЫ»



# Сверхпроводимость



# Солнце, белые карлики и нейтронные звезды

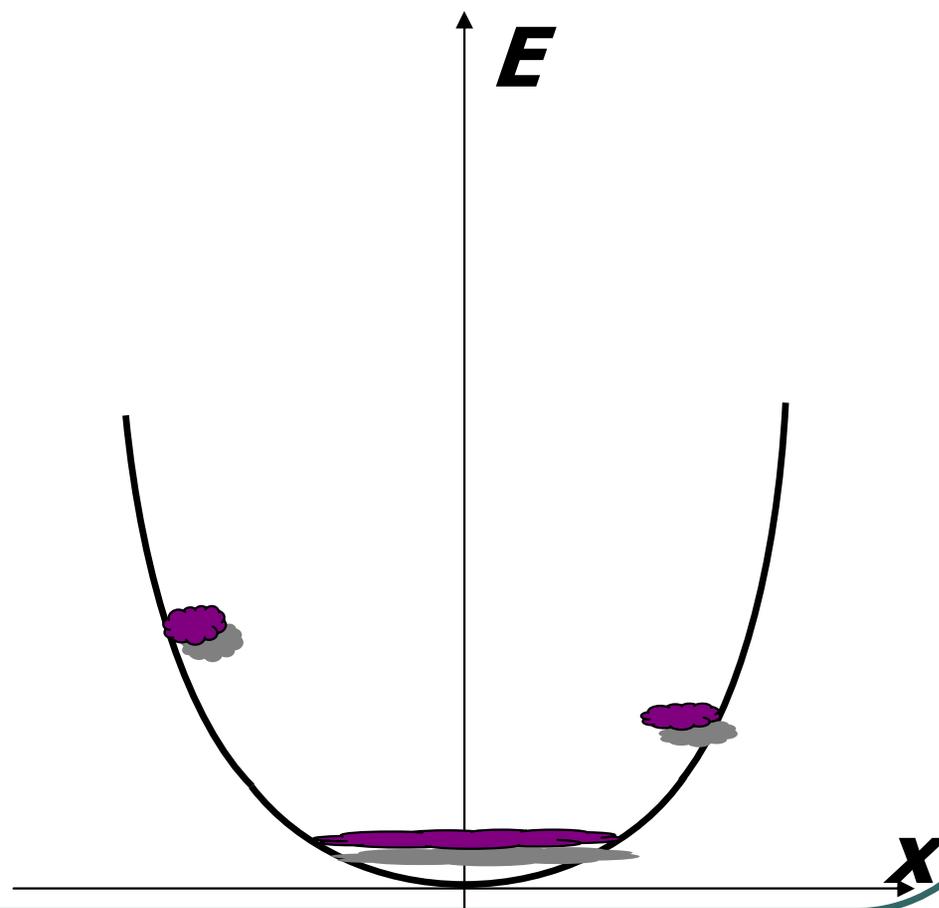
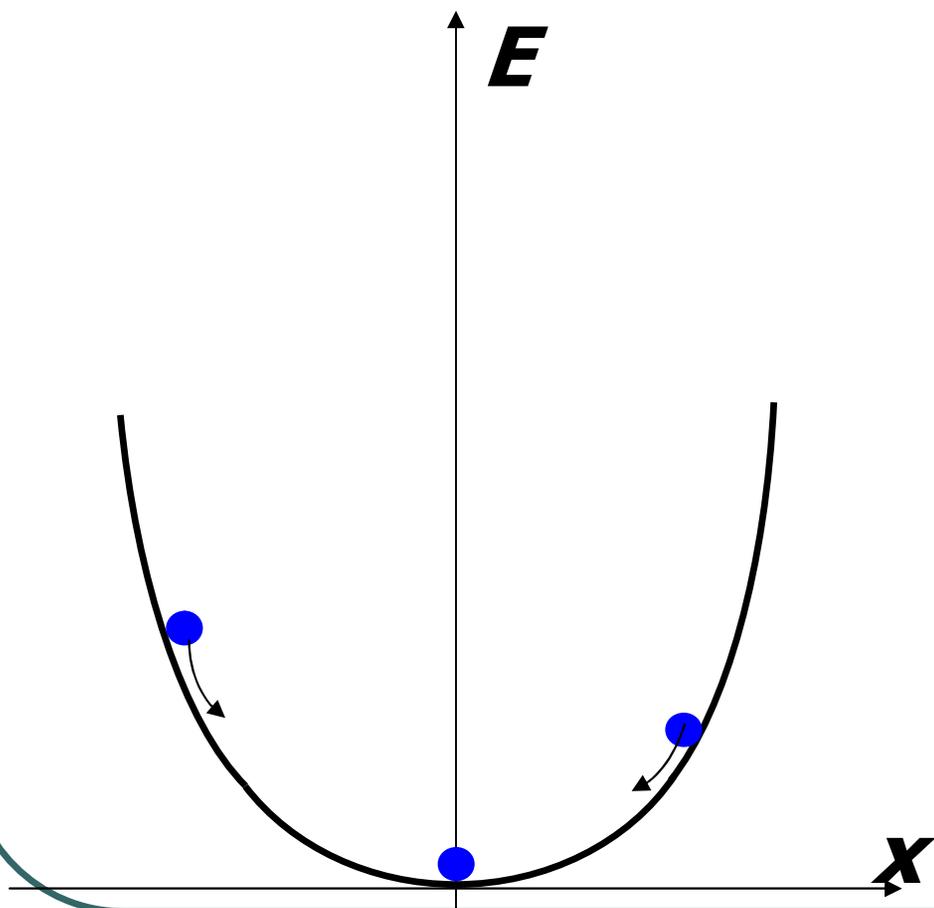


**МИР  
КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

**МИР  
КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

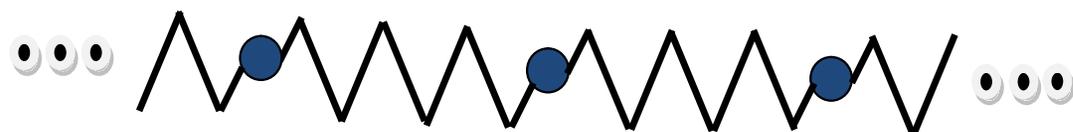
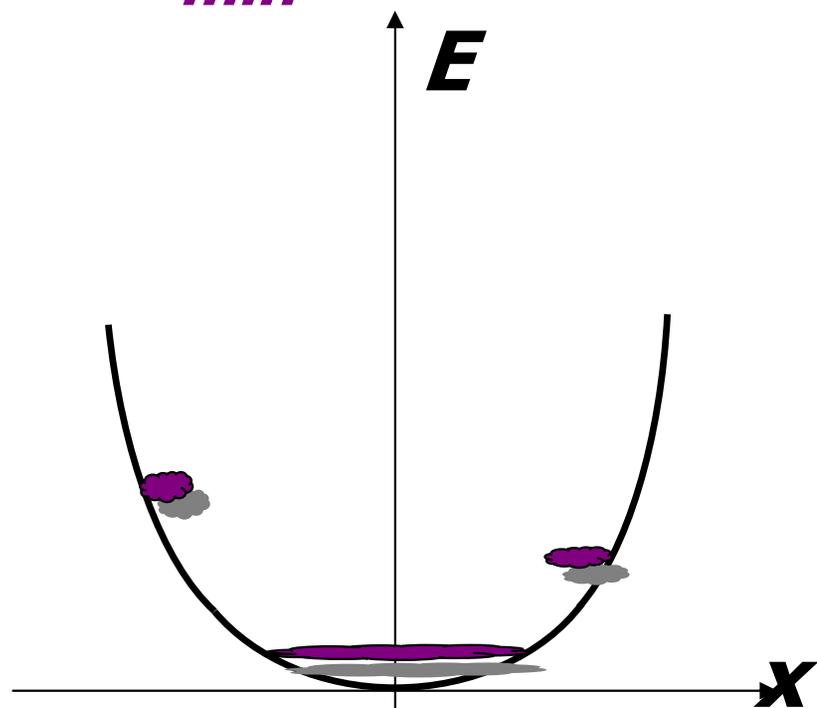
$$E_{min} = 0$$

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



# Расходимость: энергия бозонного вакуума

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



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

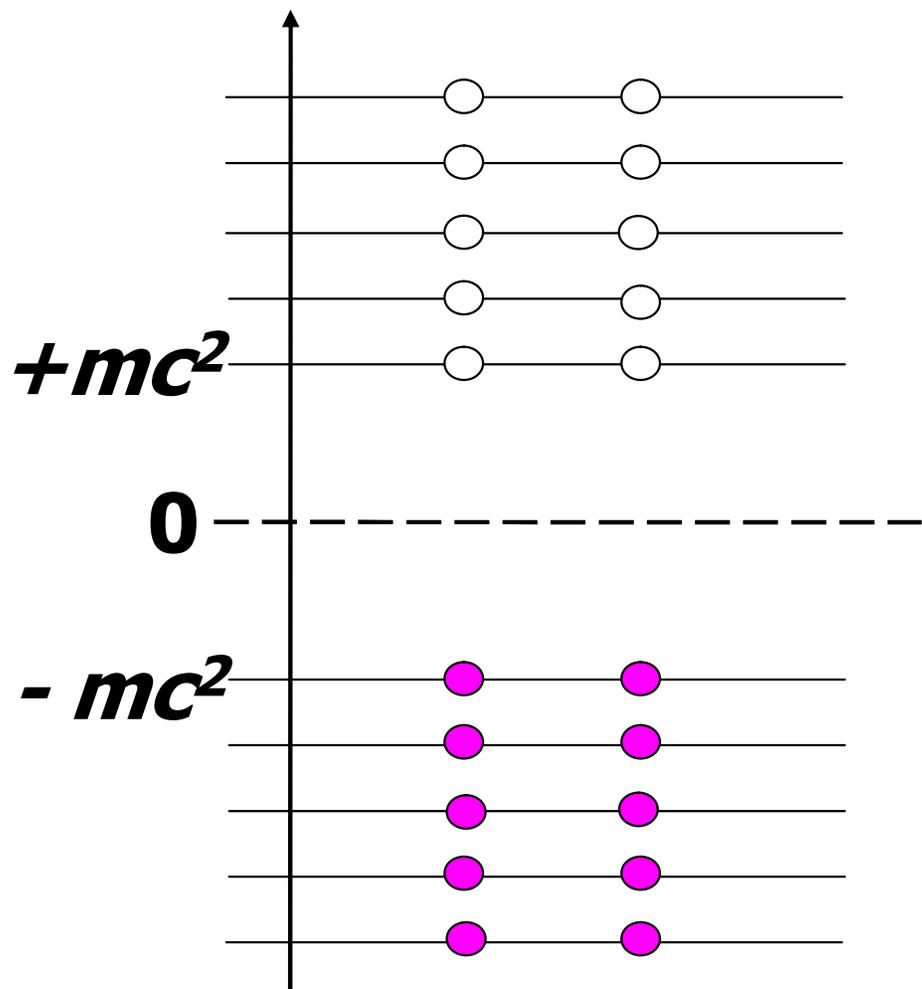
$$E_{vac} = +\infty$$

# РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

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

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

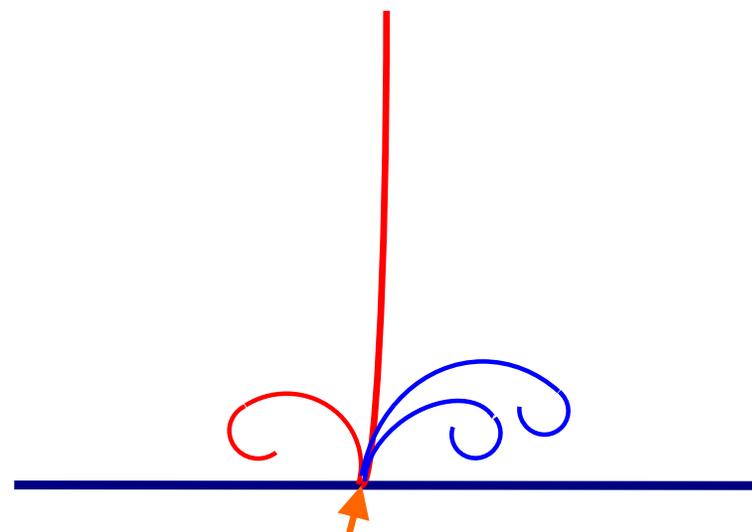
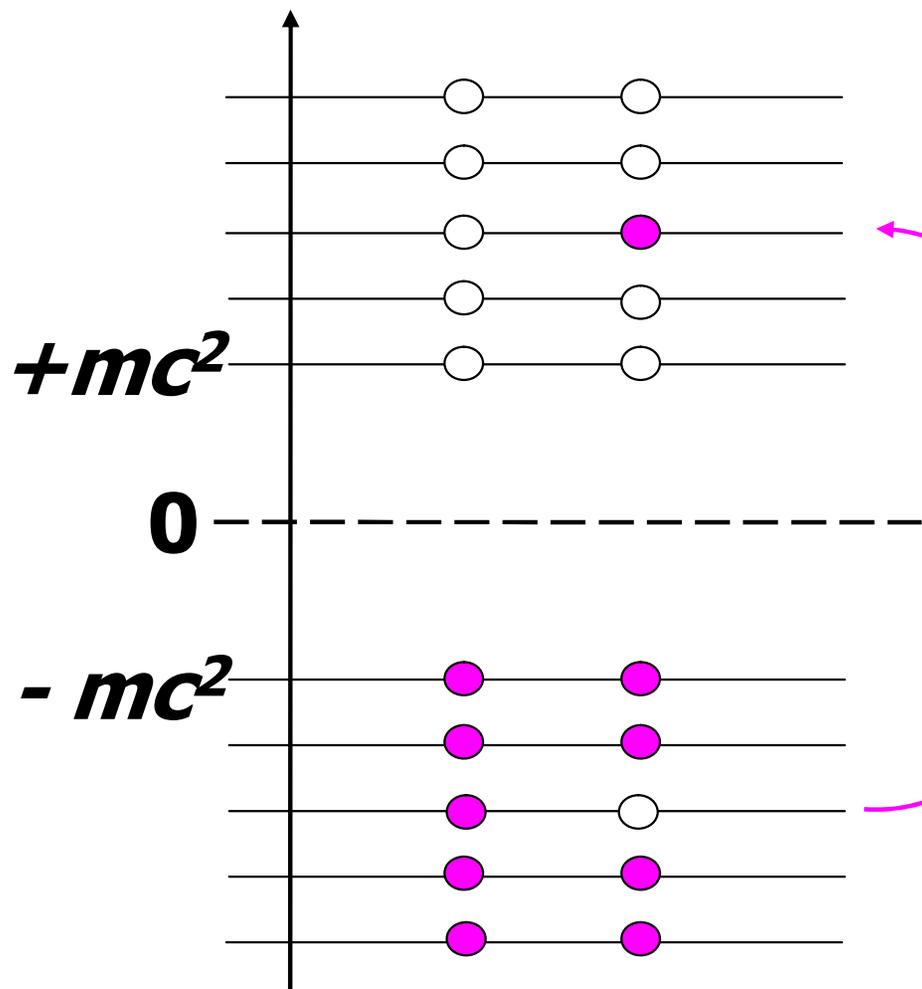
# МИР ДИРАКА



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



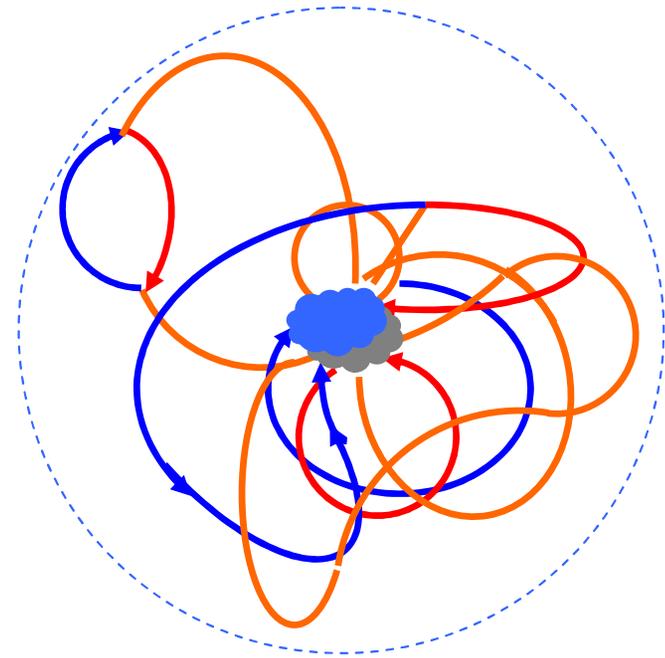
$$E_{vac} = -\infty$$

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

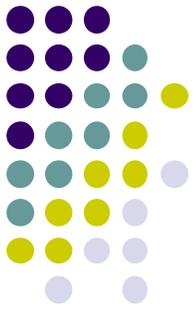
**Например:**

**«электрон»**

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



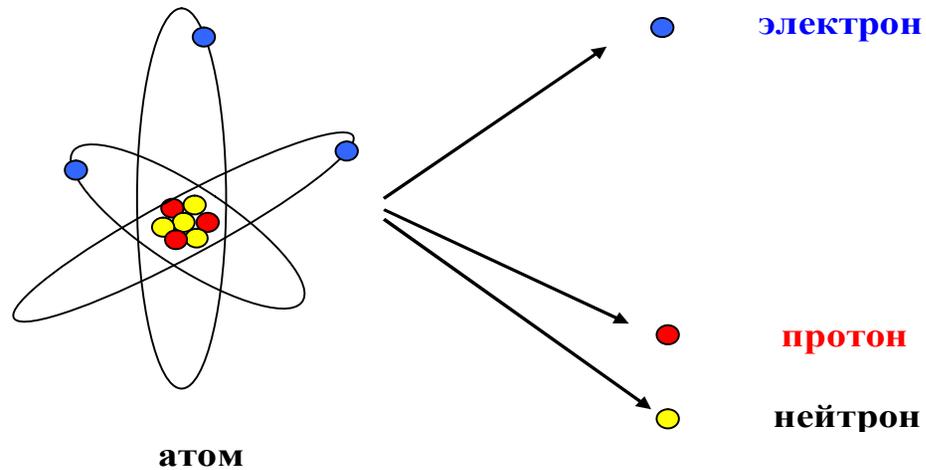
# Основная проблема физики микромира:



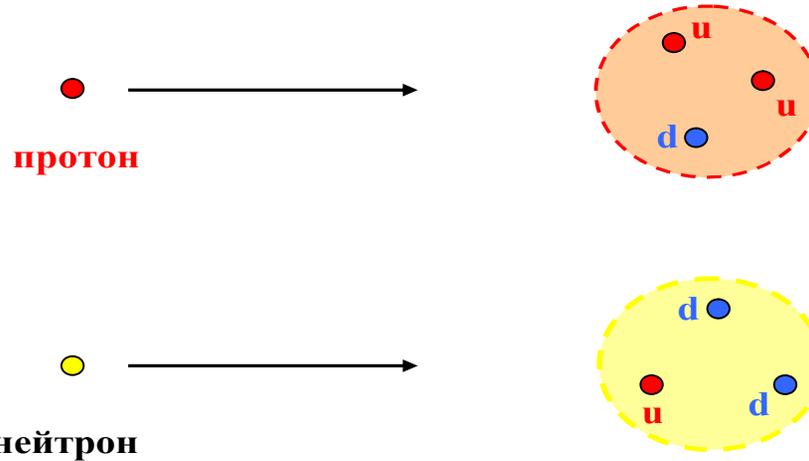
Изучение **ВАКУУМА** и его роли в наблюдаемых процессах.

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

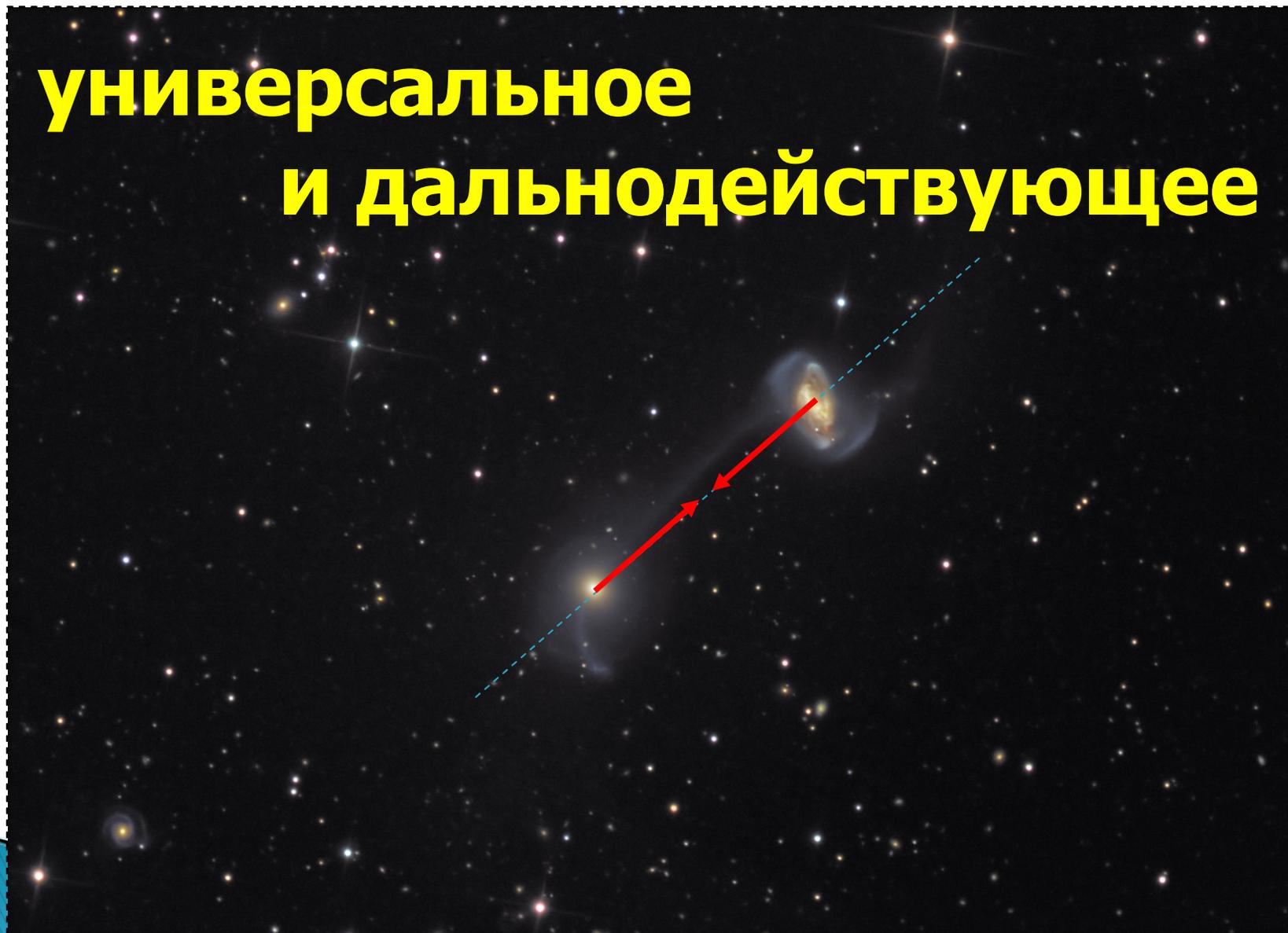
	название	масса (ГэВ)	заряд (e)
u	<i>up</i>	0,004	+2/3
d	<i>down</i>	0,007	-1/3
c	<i>charm</i>	1,5	+2/3
s	<i>strange</i>	0,3	-1/3
t	<i>top</i>	173	+2/3
b	<i>bottom</i>	4,7	-1/3

## ЛЕПТОНЫ

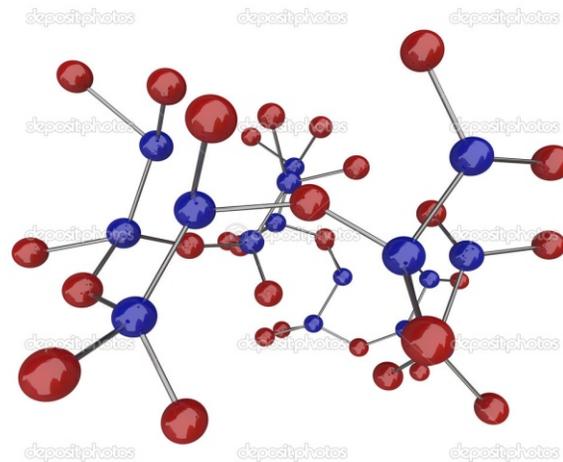
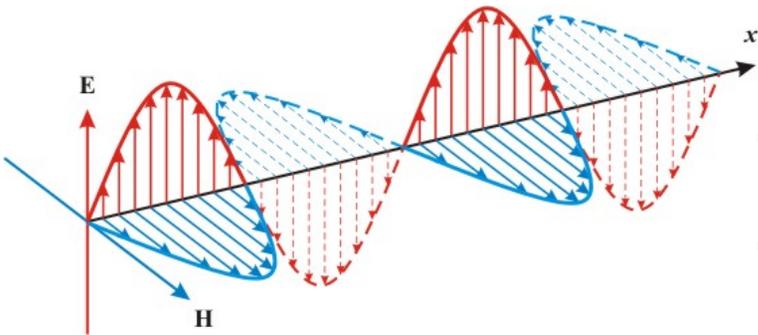
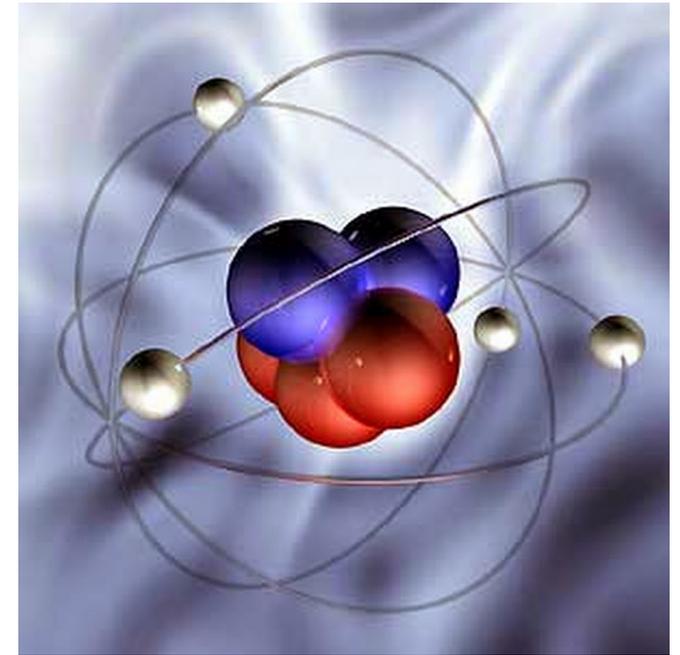
	название	Масса (ГэВ)	Заряд (e)
e	<i>электрон</i>	0,00051	-1
$\nu_e$	<i>e-нейтрино</i>	около 0	0
$\mu$	<i>мюон</i>	0,106	-1
$\nu_\mu$	<i><math>\mu</math>-нейтрино</i>	около 0	0
$\tau$	<i>тау-лептон</i>	1,78	-1
$\nu_\tau$	<i><math>\tau</math>-нейтрино</i>	около 0	0

# ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

**универсальное  
и дальнодействующее**



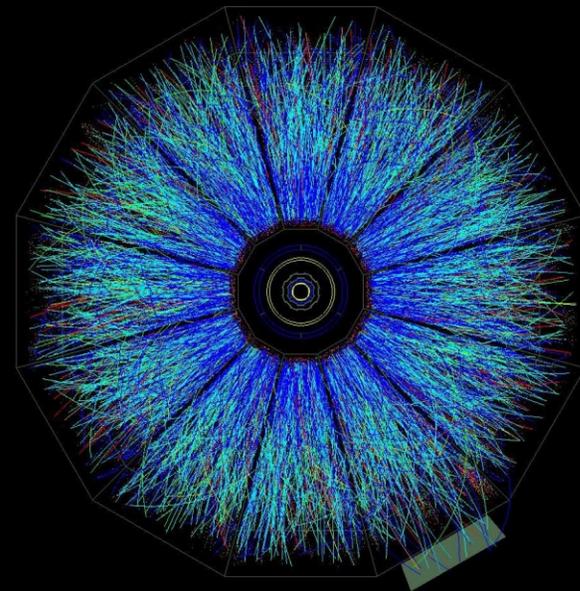
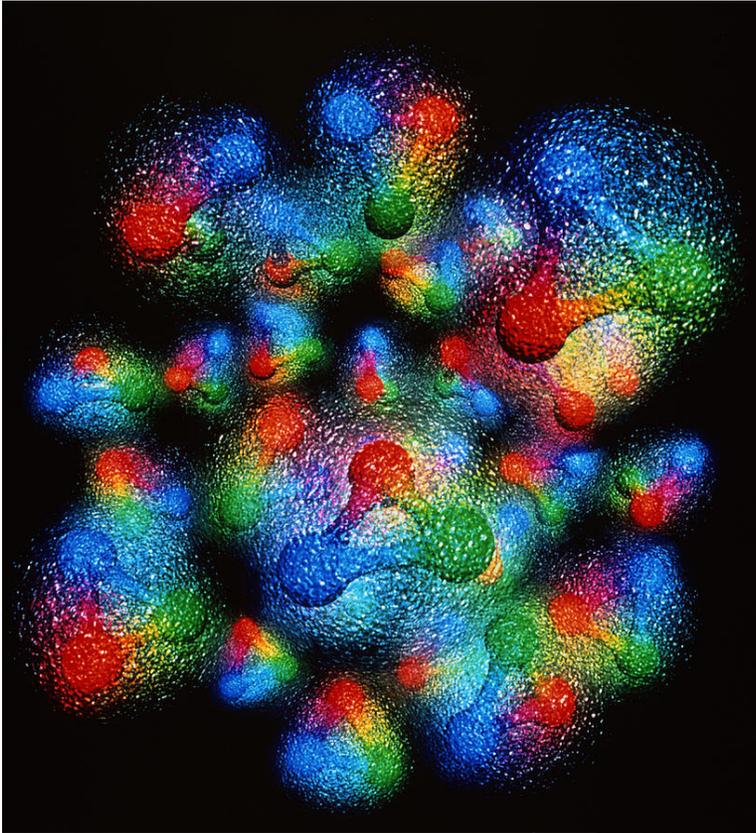
# ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



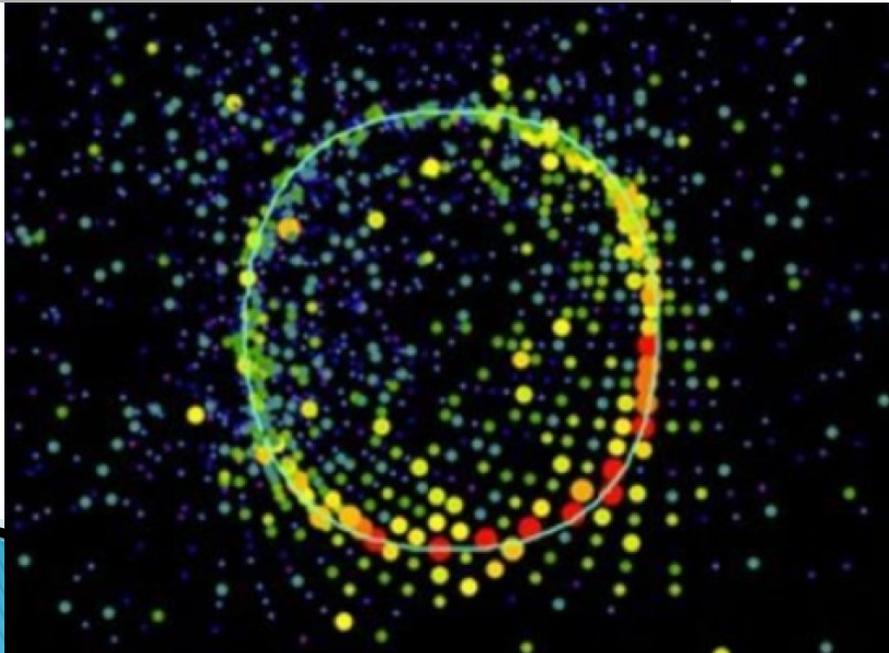
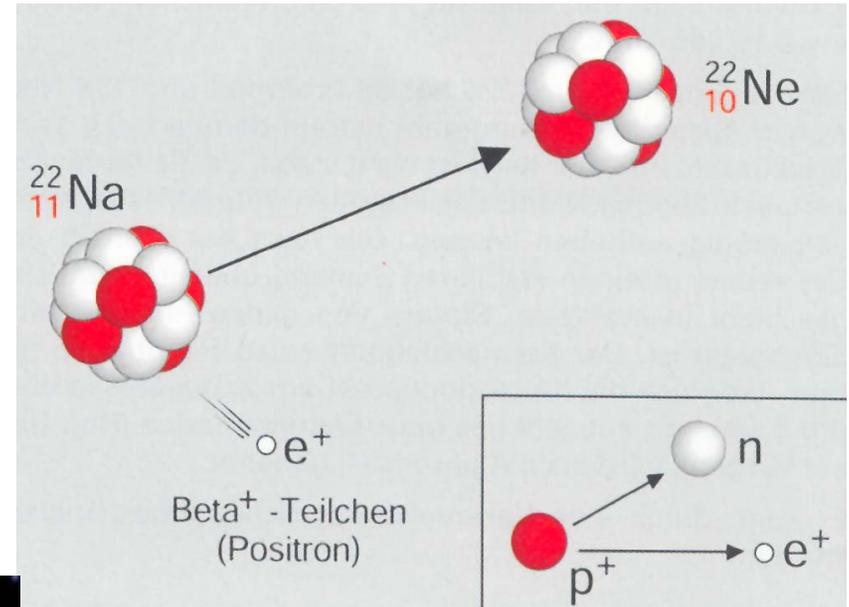
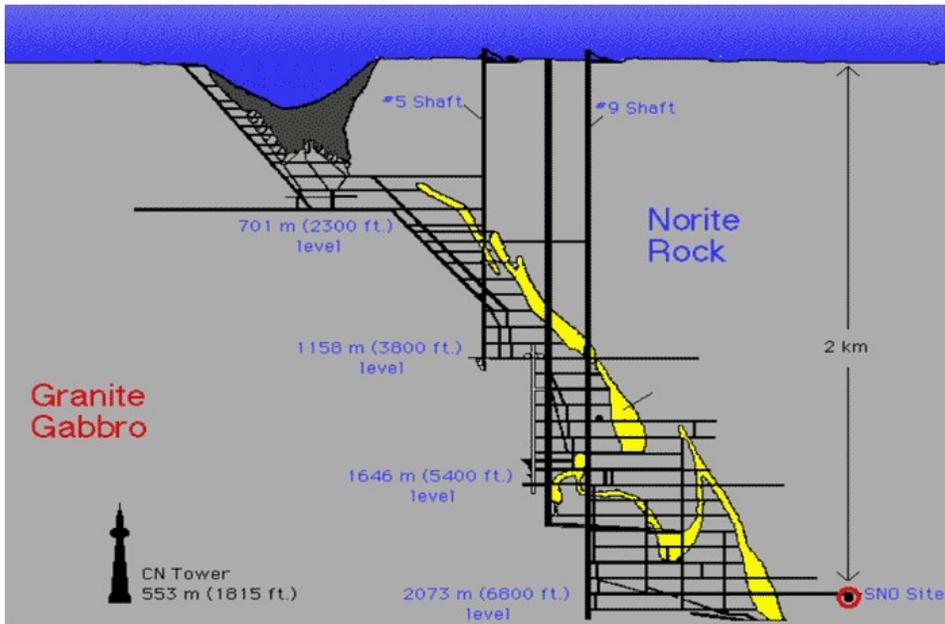
# СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

радиус  $R_s \approx 10^{-15}$  м

$$U \gg mc^2$$

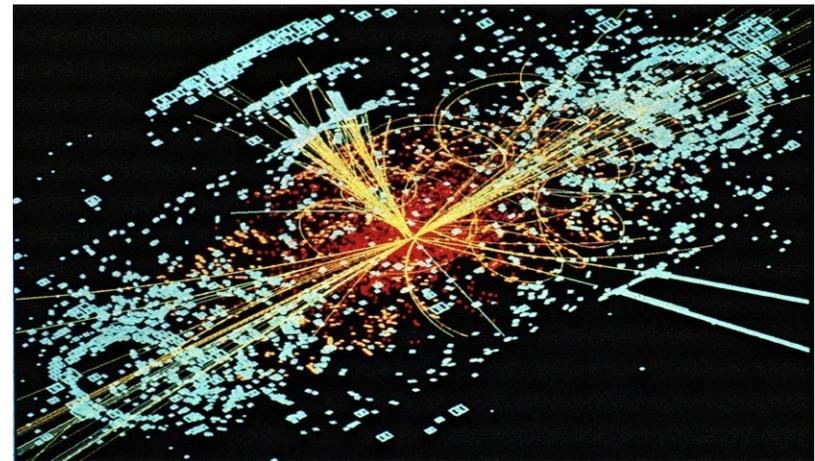


# СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

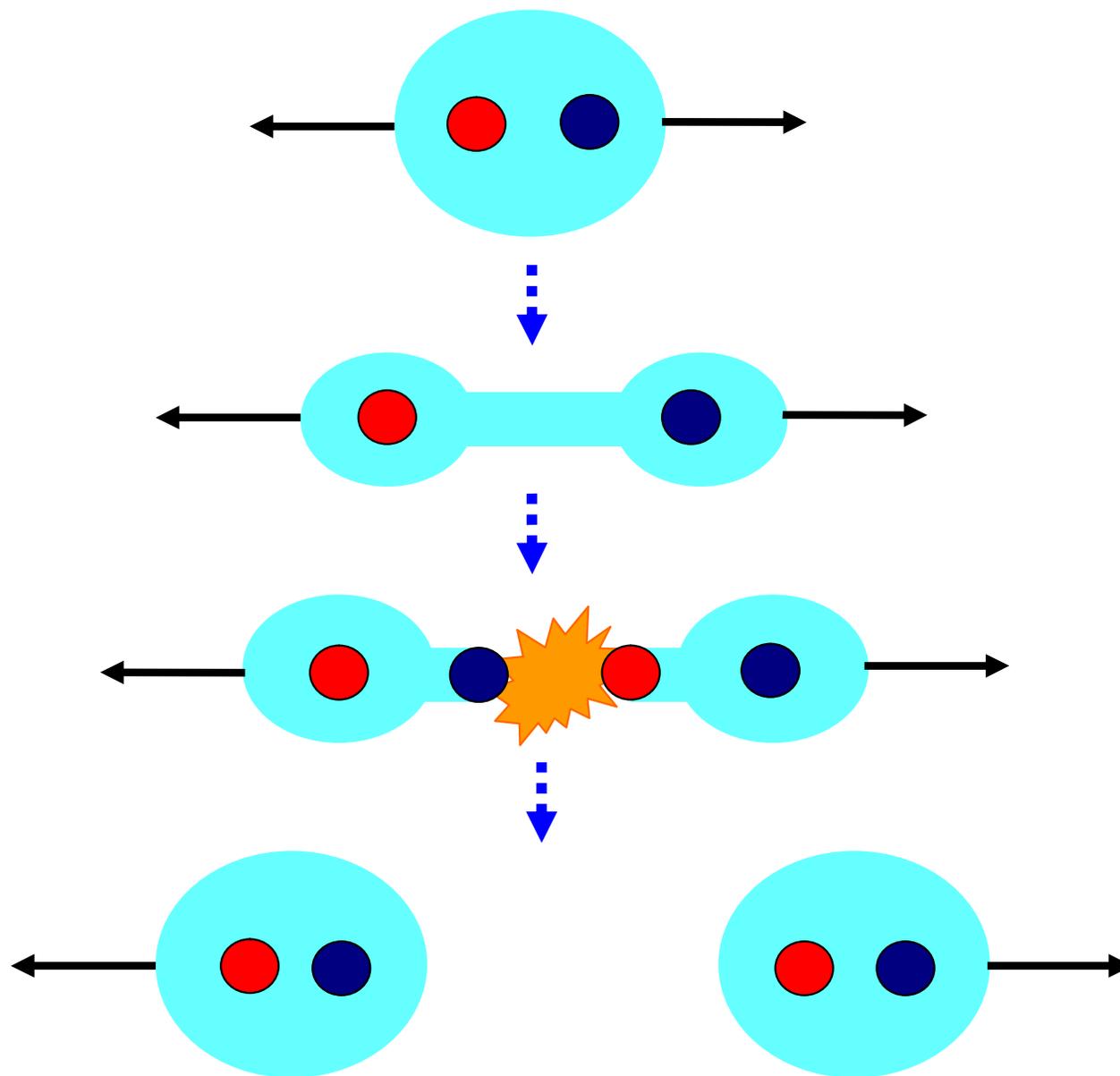


# ПЕРЕНОСЧИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

взаимодействие			масса (ГэВ)	заряд (e)
электромагнитное	$\gamma$	фотон	0	0
сильное	G	глюоны	0	0
слабое	$W^{\pm}$	W-бозон	82	$\pm 1$
	$Z^0$	Z-бозон	90	0
гравитационное	g	гравитон	0	0
	$\hat{g}$	гравитино	?	0



# ВАКУУМ И «КОНФАЙНМЕНТ»



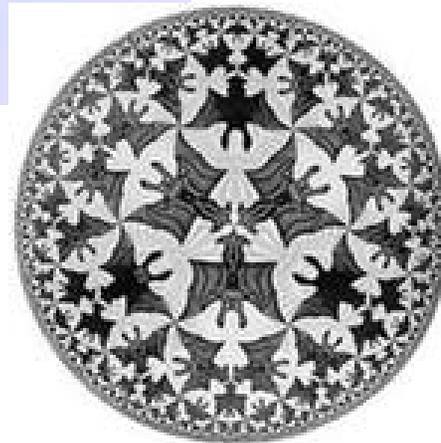
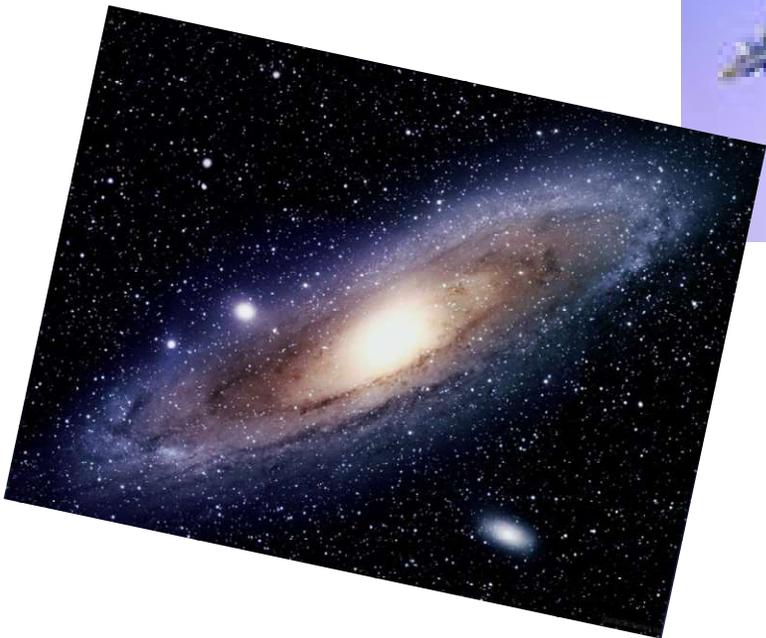
# Основная проблема физики микромира:

---

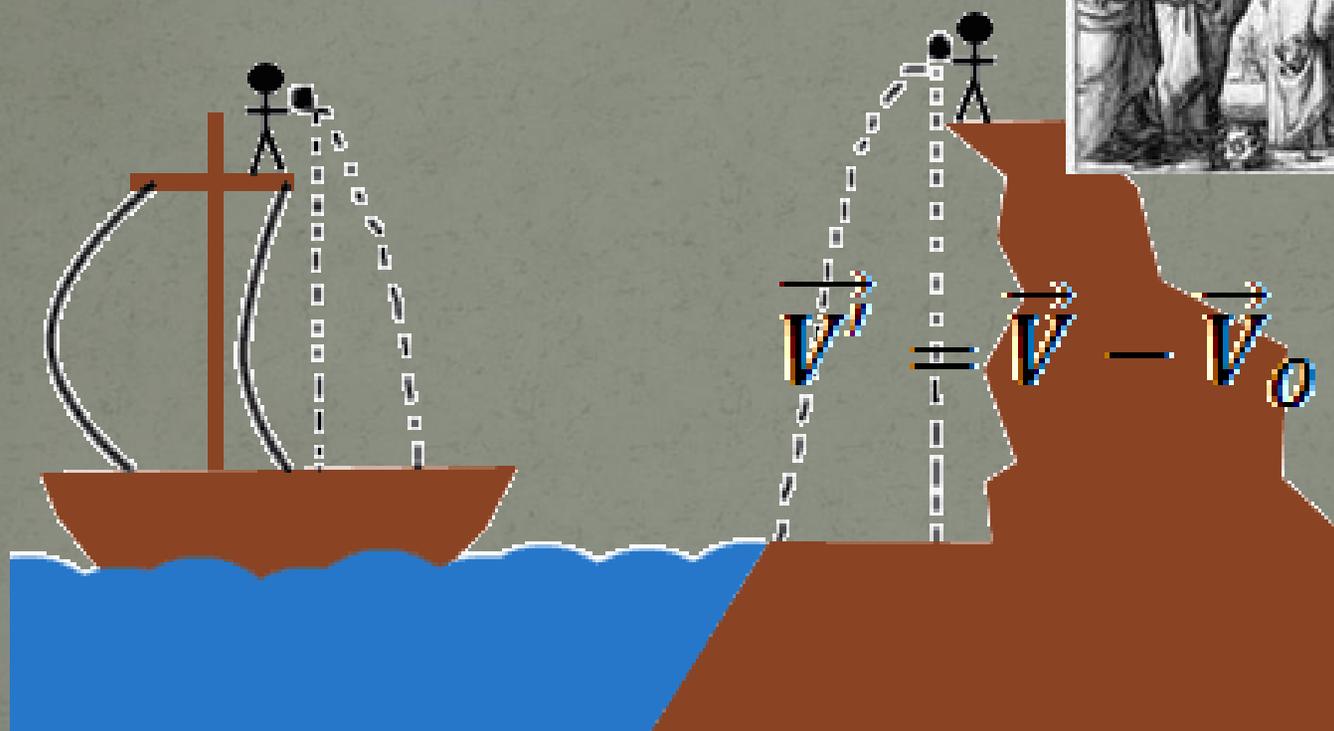
Изучение **ВАКУУМА** и его роли в наблюдаемых процессах.

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

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

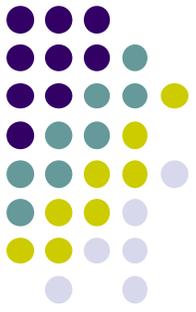
!

# Калибровочная симметрия

Пример: калибровка потенциала в электростатике

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

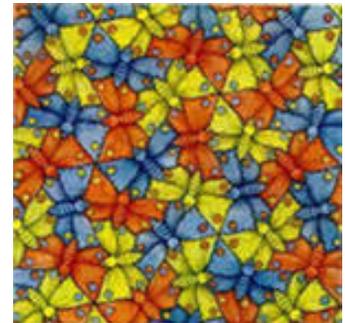
# «Перенормировка», или «заметание мусора под ковер»



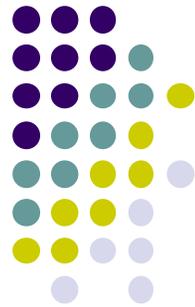
$$F(n) = \frac{9}{n^2 - 5n + 4}: F(4) = \infty$$

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

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



**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:

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

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

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

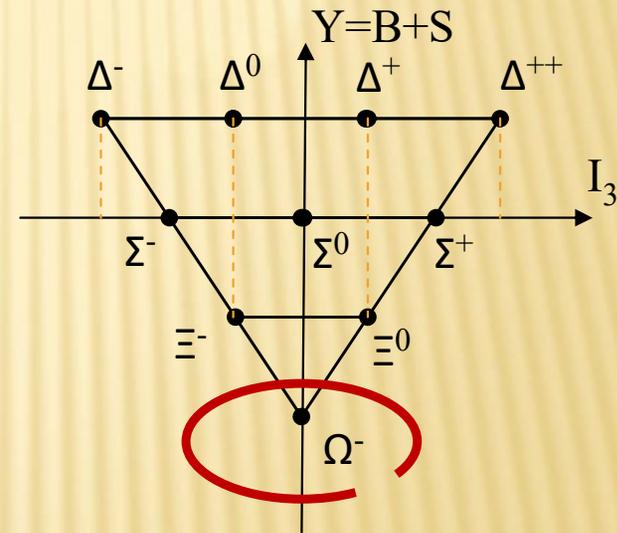
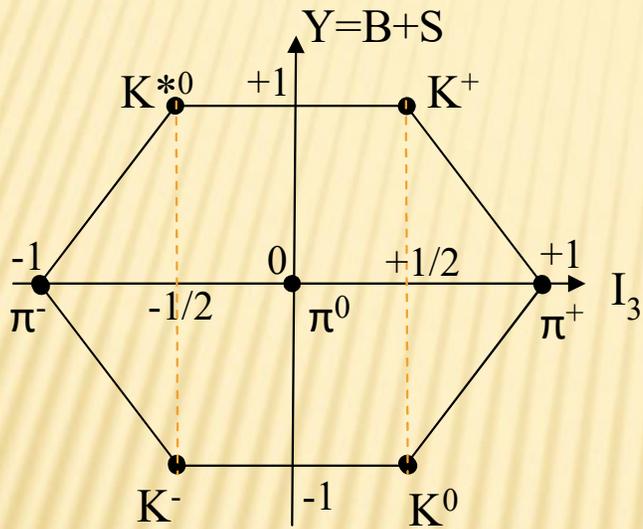
$$(\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-) \rightarrow I=3/2, I_3=+3/2, +1/2, -1/2, -3/2$$

(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

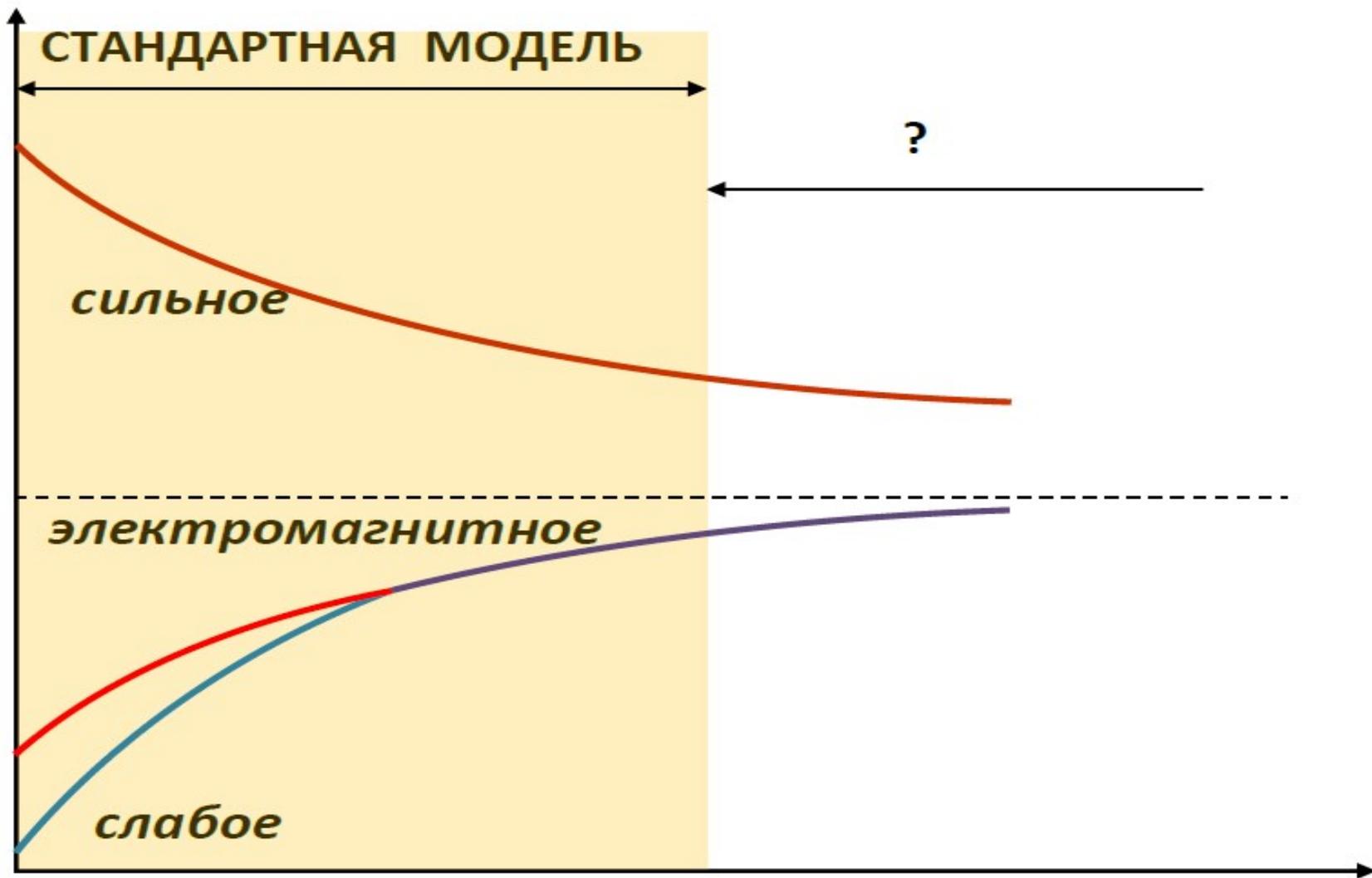
Наборы «обычных» и «странных» адронов объединяются в более широкие («унитарные») мультиплеты:



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



# ИНТЕНСИВНОСТЬ



**ЭНЕРГИЯ** →  
**РАССТОЯНИЕ** ←



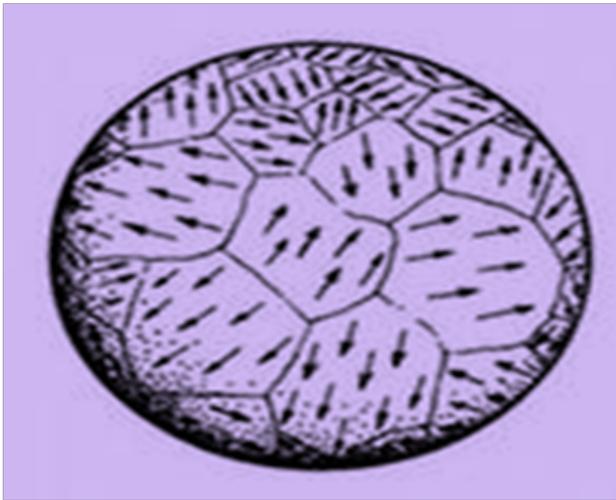
**ТЕОРИИ НУЖНЫ  
СИММЕТРИИ**

**РЕАЛЬНЫЙ МИР НЕ  
ВСЕГДА  
СИММЕТРИЧЕН**

# Спонтанное нарушение – механизм «сокрытия» симметрии

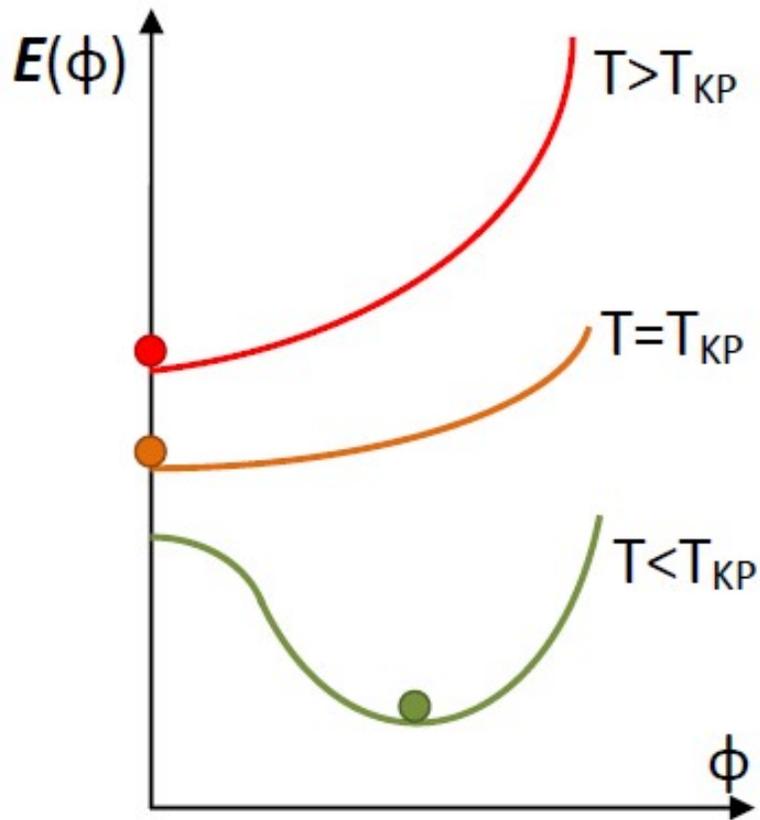
*Скрытая гармония сильнее явной... Подобен  
беспорядочно разбросанному сору самый  
прекрасный Космос.*

*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.

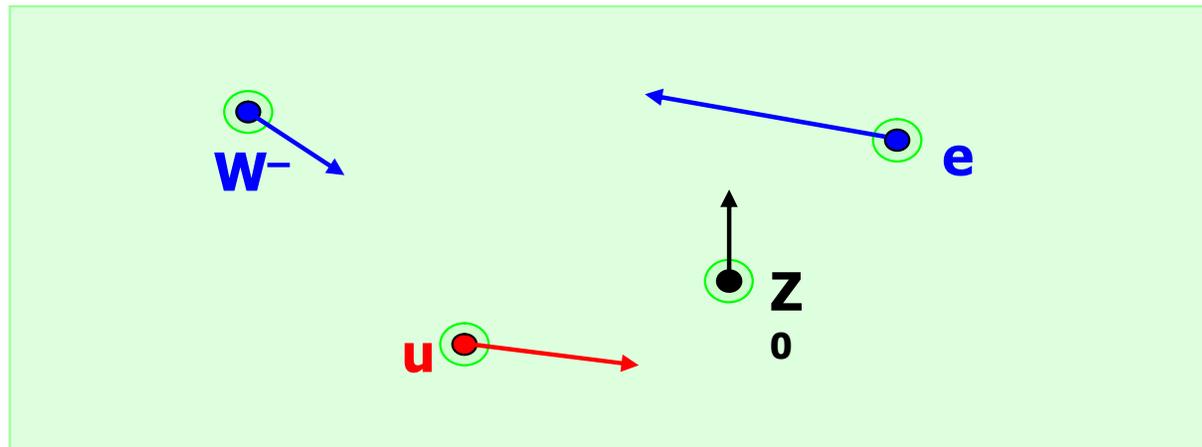
## СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

**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?**

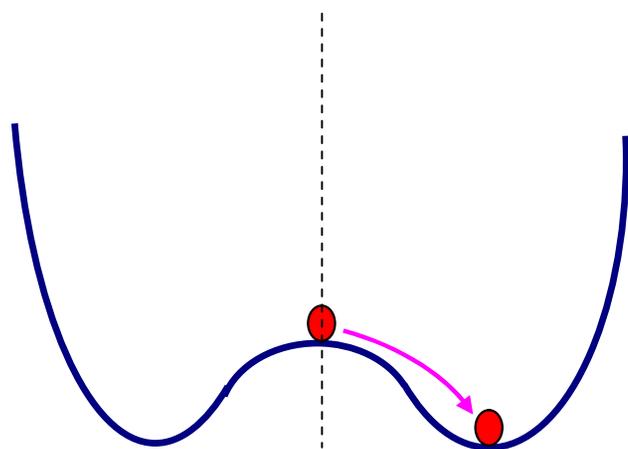
Согласно **СМ**, масса появляется у частиц благодаря их взаимодействию со специальным полем – **полем Хиггса**. Это поле является составной частью **вакуума**. Кварки, лептоны, **W-бозоны** и **Z-бозоны**, двигаясь в **вакууме**, взаимодействуют с частицами **поля Хиггса** и становятся массивными.



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:

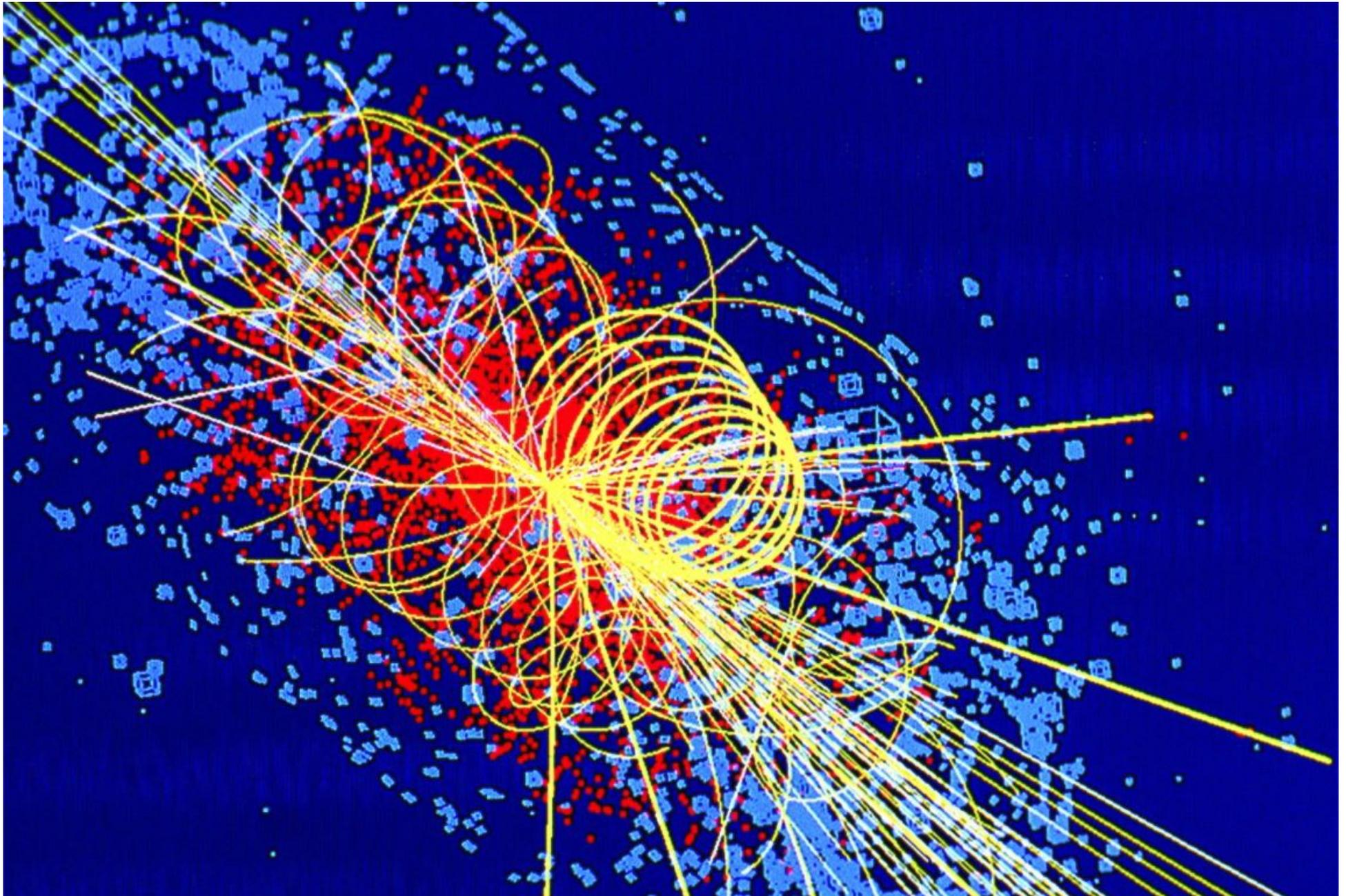
СМ использует СИММЕТРИИ для устранения расходимостей - для ПЕРЕНОРМИРОВКИ. Эти симметрии реализуются ТОЛЬКО для безмассовых частиц.



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

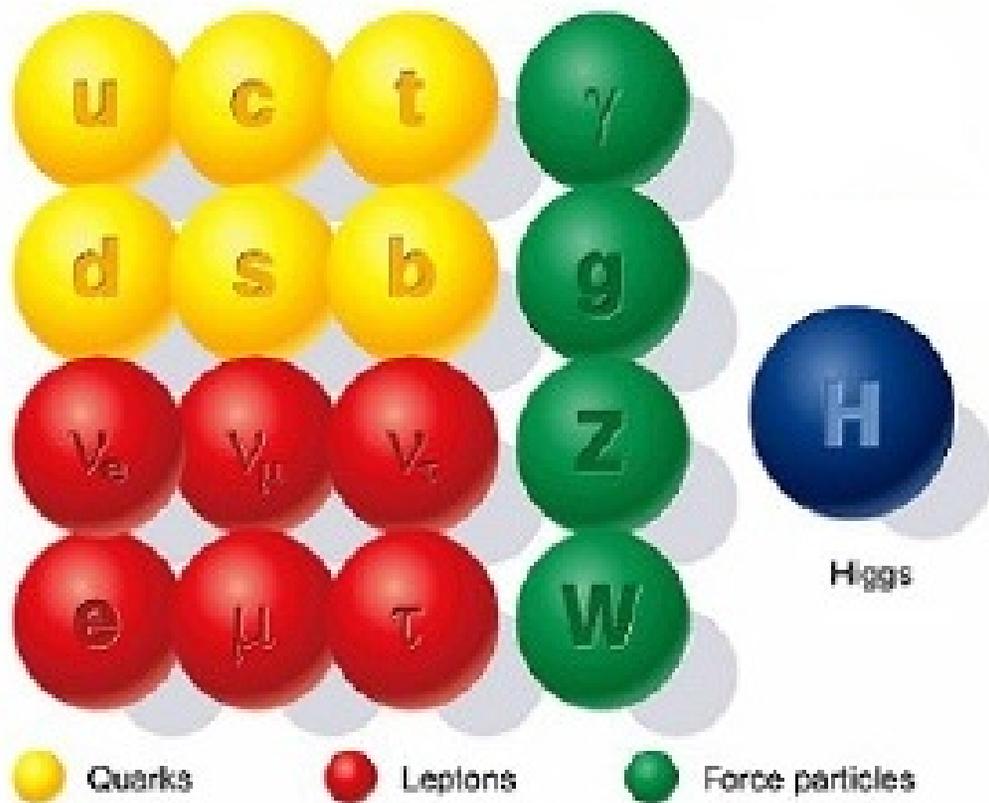
Любое другое введение массы частиц в СМ не сохраняет это свойство.

# Фотография события с рождением и распадом бозона Хиггса в детекторе ATLAS

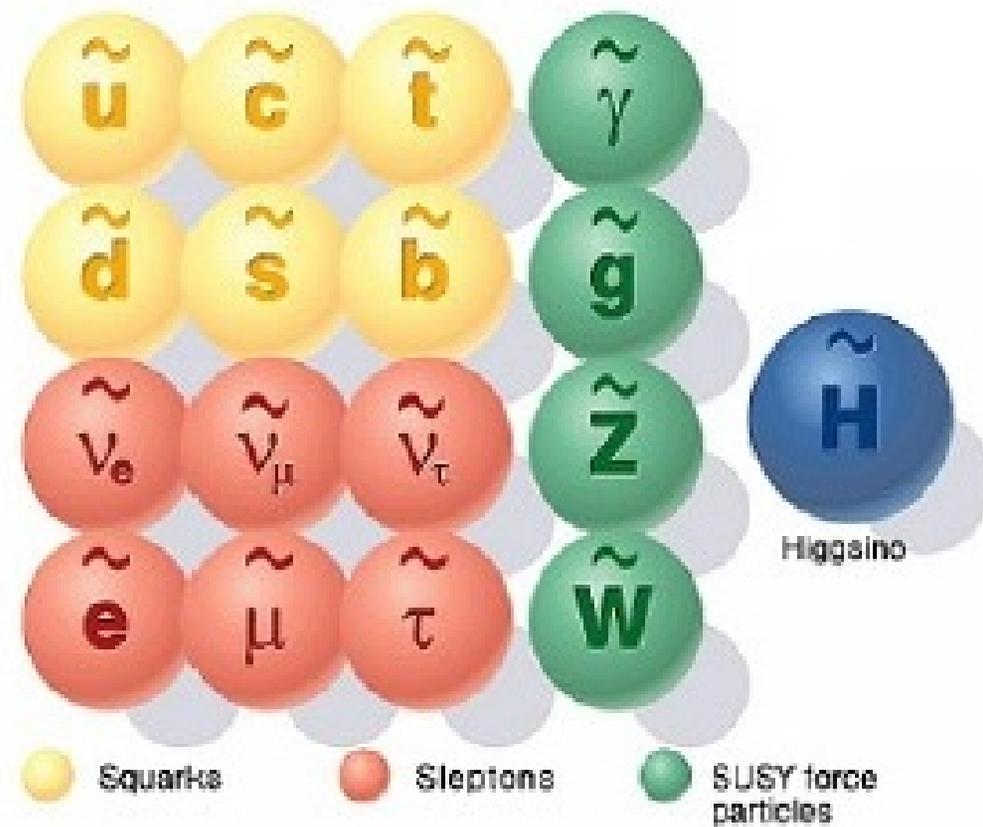


# СУПЕРСИММЕТРИЯ

## SUPERSYMMETRY



Standard particles



SUSY particles

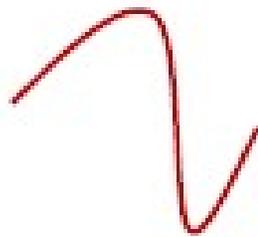
# Суперсимметрия (SuSy)

Пример: вакуумная энергия системы фермионного и бозонного поля

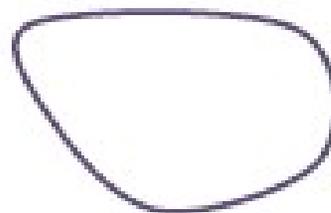
фермионное поле	$E_{VAC} = -\infty$
бозонное поле	$E_{VAC} = +\infty$
<b>СУММА</b>	$E_{VAC} = 0$

# СТРУНЫ – «одномерные»

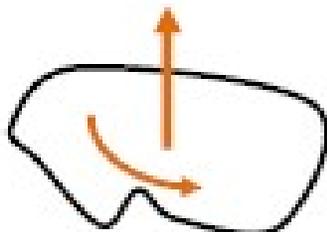
## нелокальные объекты



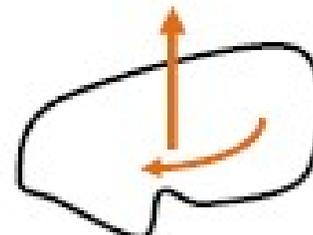
открытые



замкнутые



«левые»



«правые»

ориентируемые и неориентируемые,  
бозонные и фермионные, суперструны ....



# СИММЕТРИИ – «оружие» в борьбе с расходимостями

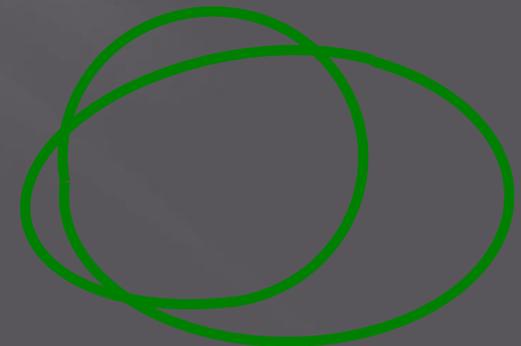
- ✦ *Калибровочная симметрия* – обеспечивает **перенормируемость** (т.е. возможность устранения расходимостей)
- ✦ *Суперсимметрия* – обеспечивает **суперперенормируемость** («автоматическое» сокращение расходимостей)
- ✦ *Суперсимметрии пространств с дополнительными размерностями* – обеспечивают **конечность**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

