

# Элементарно, Хиггс!

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики  
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт



# Программа курса лекций

- Лекция I Физика элементарных частиц в предверии смены парадигм
- Лекция II Симметрии в физике элементарных частиц
- Лекция III Стандартная модель: сильные взаимодействия
- Лекция IV Стандартная модель: электрослабые взаимодействия
- Лекция V Физика за пределами Стандартной модели

# Лекция V

## Физика за пределами Стандартной модели

- Возможные новые симметрии
- Расширенный хиггсовский сектор
- Нейтрино: нужно ли расширять СМ?
- Тёмная материя
- Большое объединение взаимодействий
- Проблемы квантования гравитации

# Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФЕРМИОНЫ

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>γ</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>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force	
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force	

Bosons (Forces)

СИЛЫ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ

СИЛЬНЫЕ

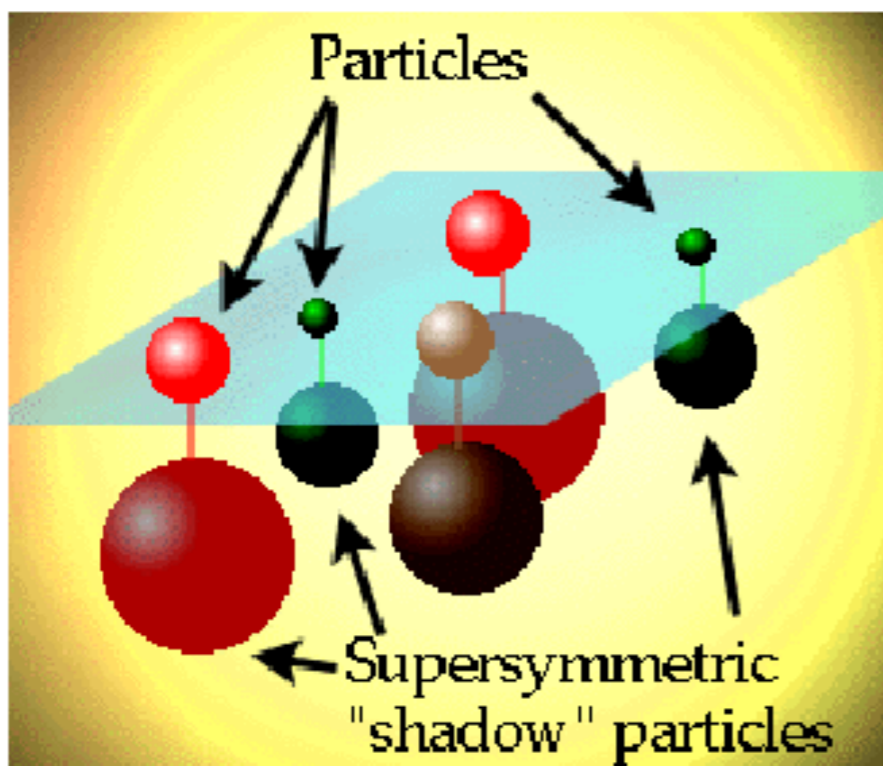
СЛАБЫЕ

ЮКАВСКИЕ

ГРАВИТАЦИЯ

# Суперсимметрия

Суперсимметрия - это расширение группы Пуанкаре СМ спинорными генераторами



- Новый вид симметрии между частицами с целым спином — бозонами и частицами с полуцелым спином — фермионами

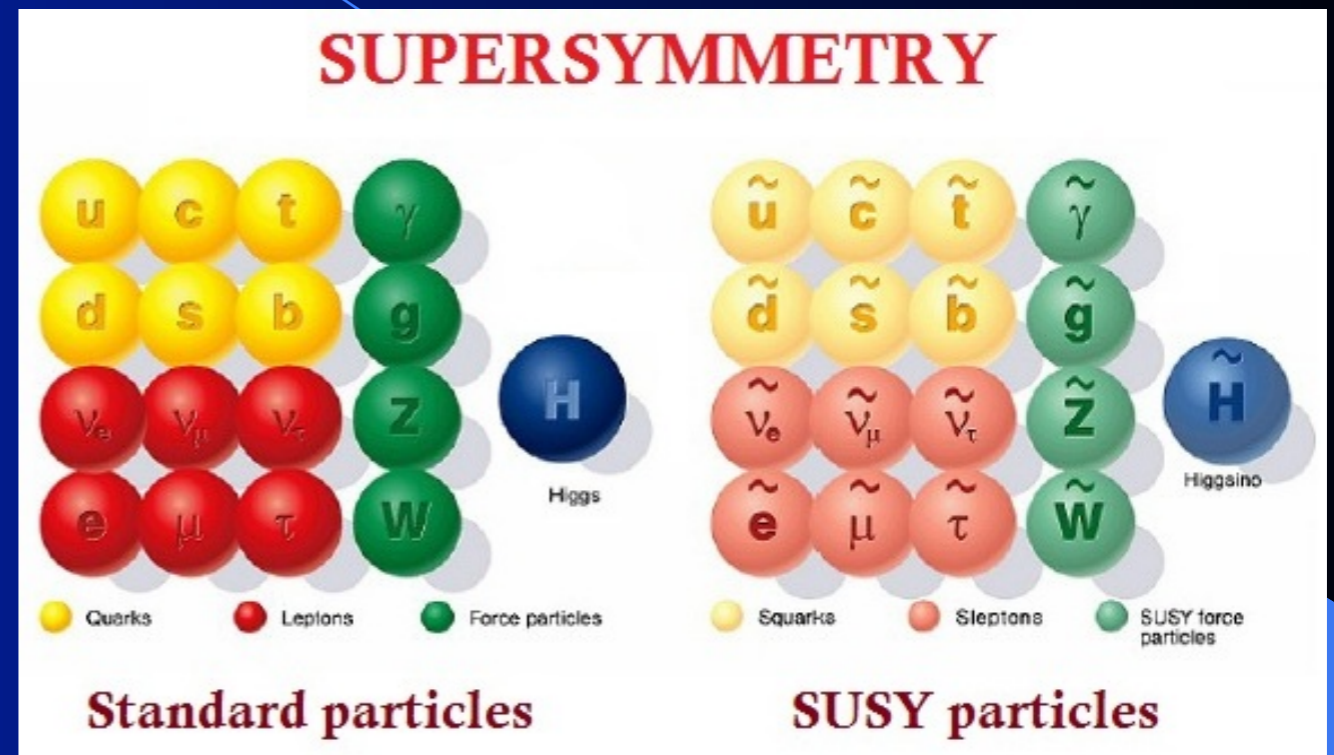
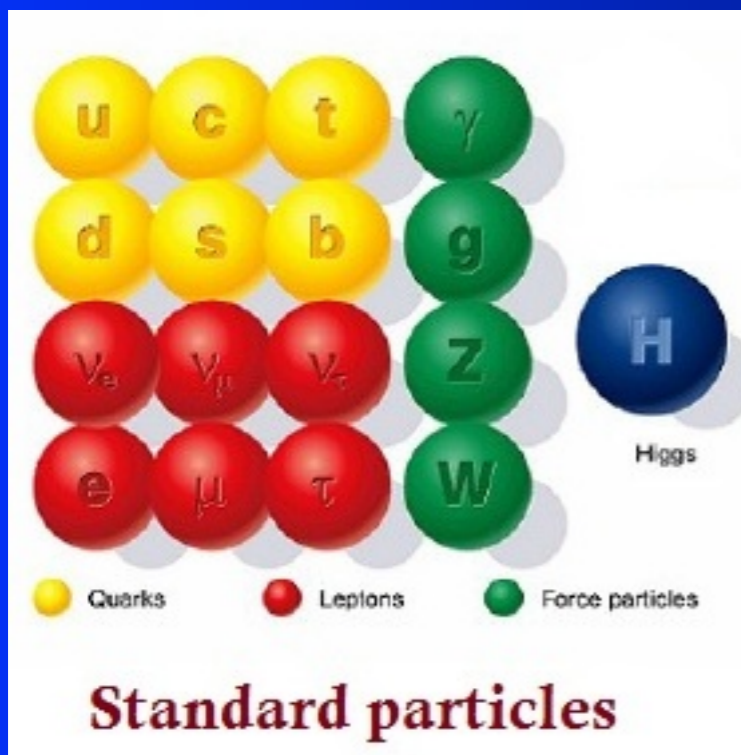
- Каждая частица имеет тяжёлого партнёра отличающегося лишь значением спина на 1/2

кварк	$q \rightarrow \tilde{q}$	скварк
лептон	$l \rightarrow \tilde{l}$	слептон
W-бозон	$W \rightarrow \tilde{W}$	вино
Z-бозон	$Z \rightarrow \tilde{Z}$	зино
глюон	$g \rightarrow \tilde{g}$	глюино
фотон	$\gamma \rightarrow \tilde{\gamma}$	фотино
Хиггс	$H \rightarrow \tilde{H}$	Хиггсино
гравитон	$G \rightarrow \tilde{G}$	гравитино

Суперсимметрия - это уникальная возможность объединить частицы разного спина

# Суперсимметричная СМ

Суперсимметрия - это мечта о единой теории всех частиц и взаимодействий



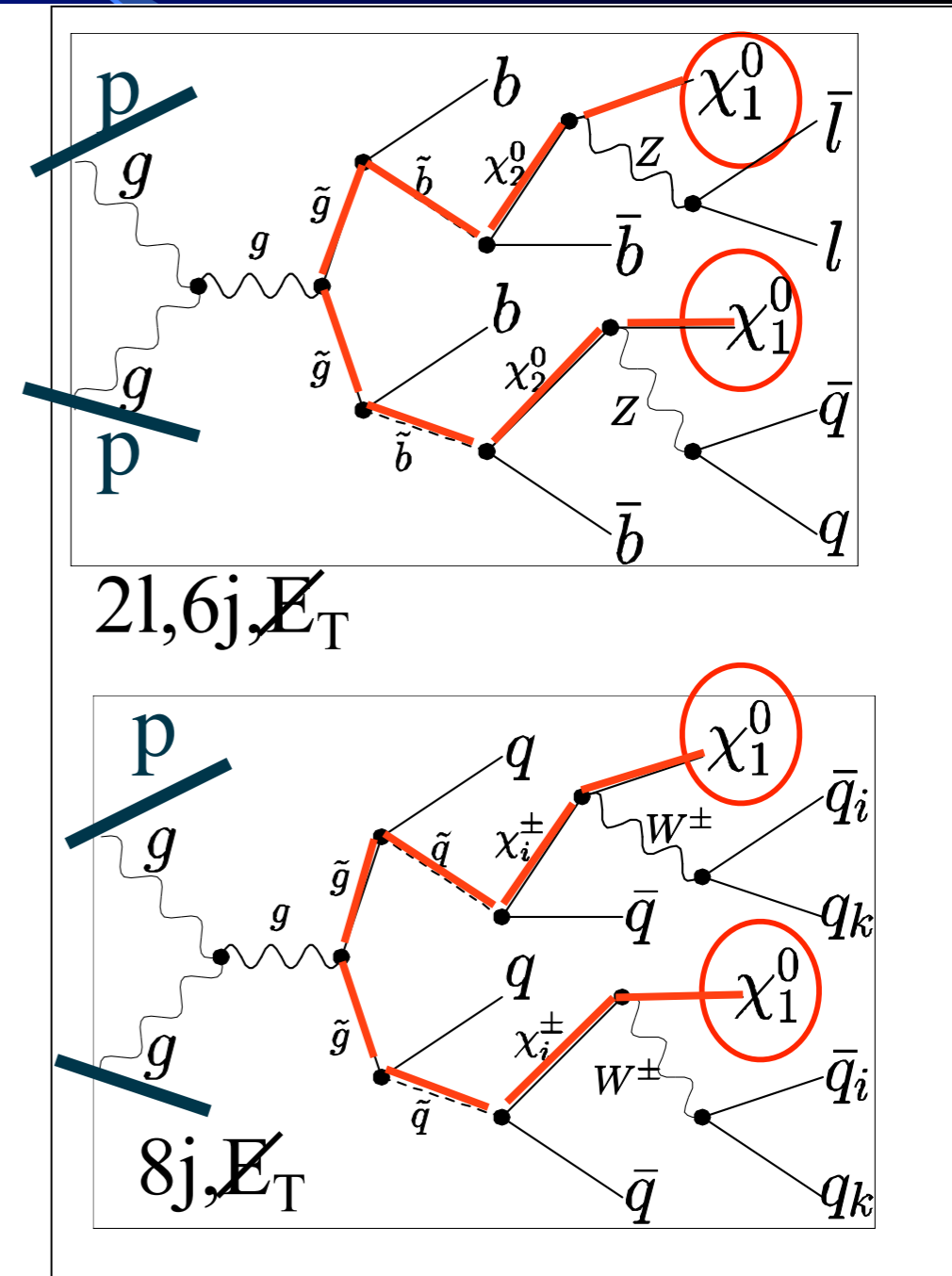
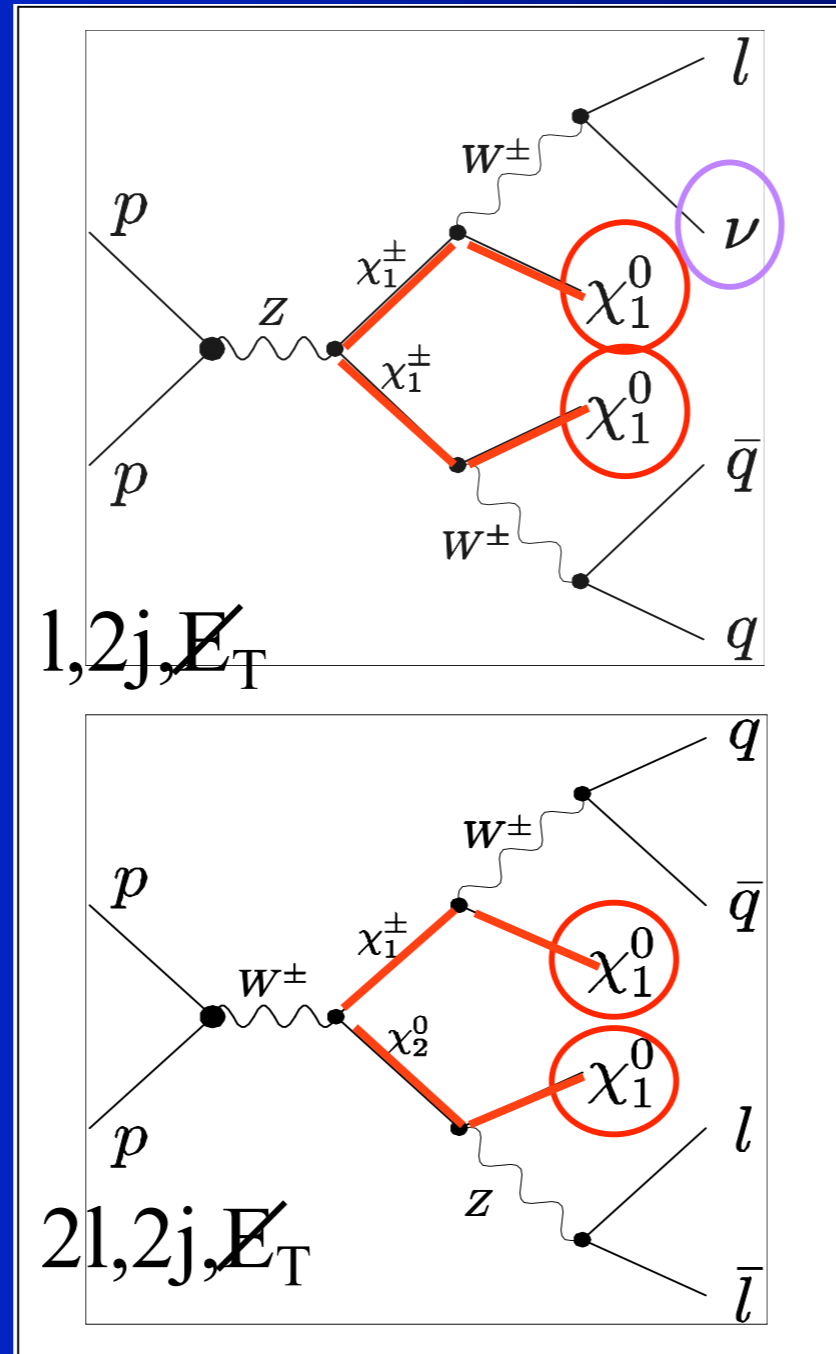
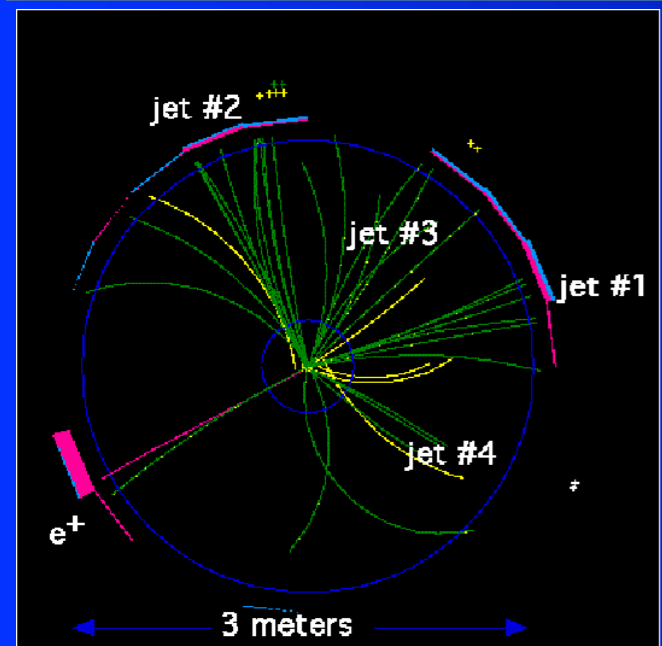
- «суперпартнёры» тяжелее обычных частиц и потому пока не рождаются на ускорителях

- Суперсимметрия остаётся наиболее мотивированным и проработанным расширением СМ в физике частиц

📌 Локальная суперсимметрия - это теория (супер) гравитации!

- Теория супергравитации включает в себя все известные частицы и взаимодействия

# Рождение суперчастиц на коллайдере

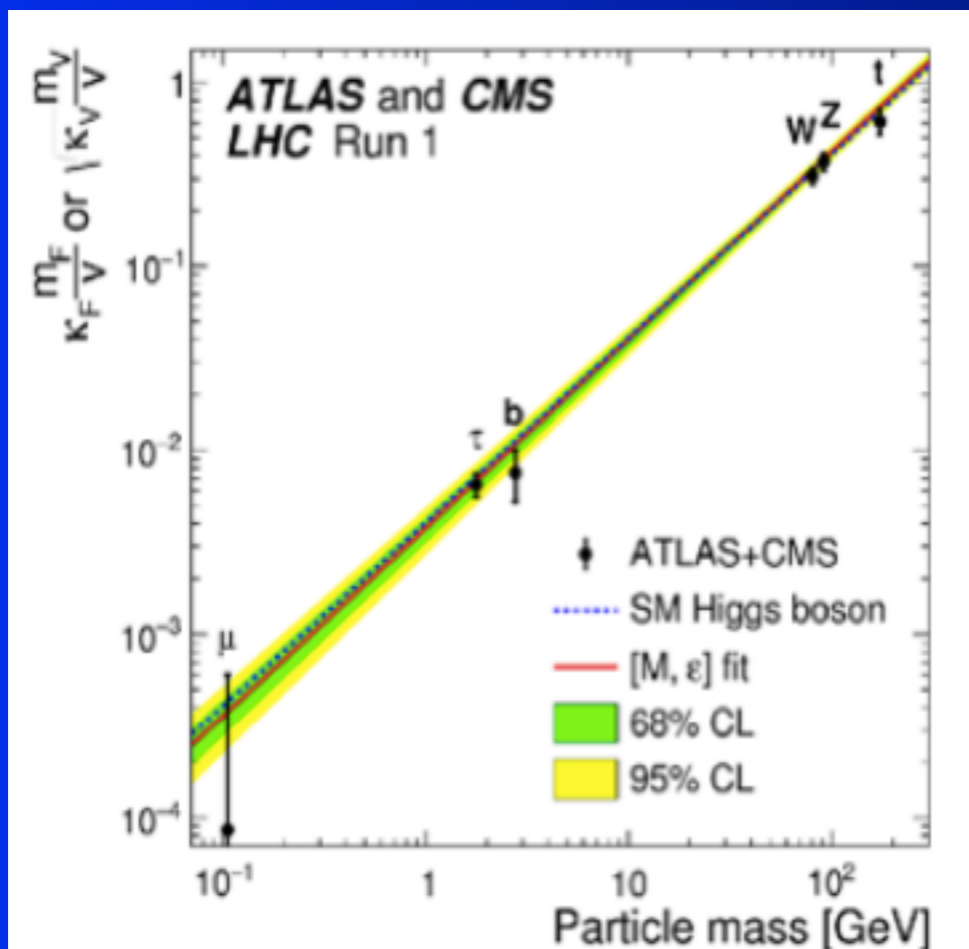


Красным цветом показаны суперпартнёры

# Расширенный хиггсовский сектор

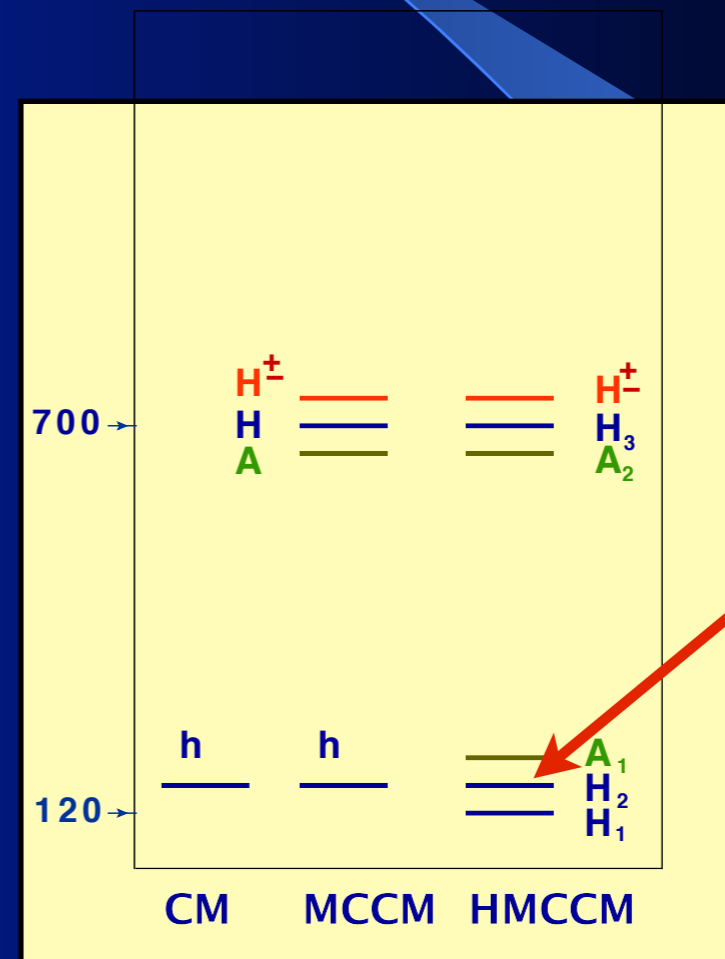
## Новые частицы

- Является ли открытый хиггсовский бозон частицей СМ?
- Какова альтернатива?



- Высокоточные измерения вероятностей распада

- Синглетные, дублетные и трепетные расширения

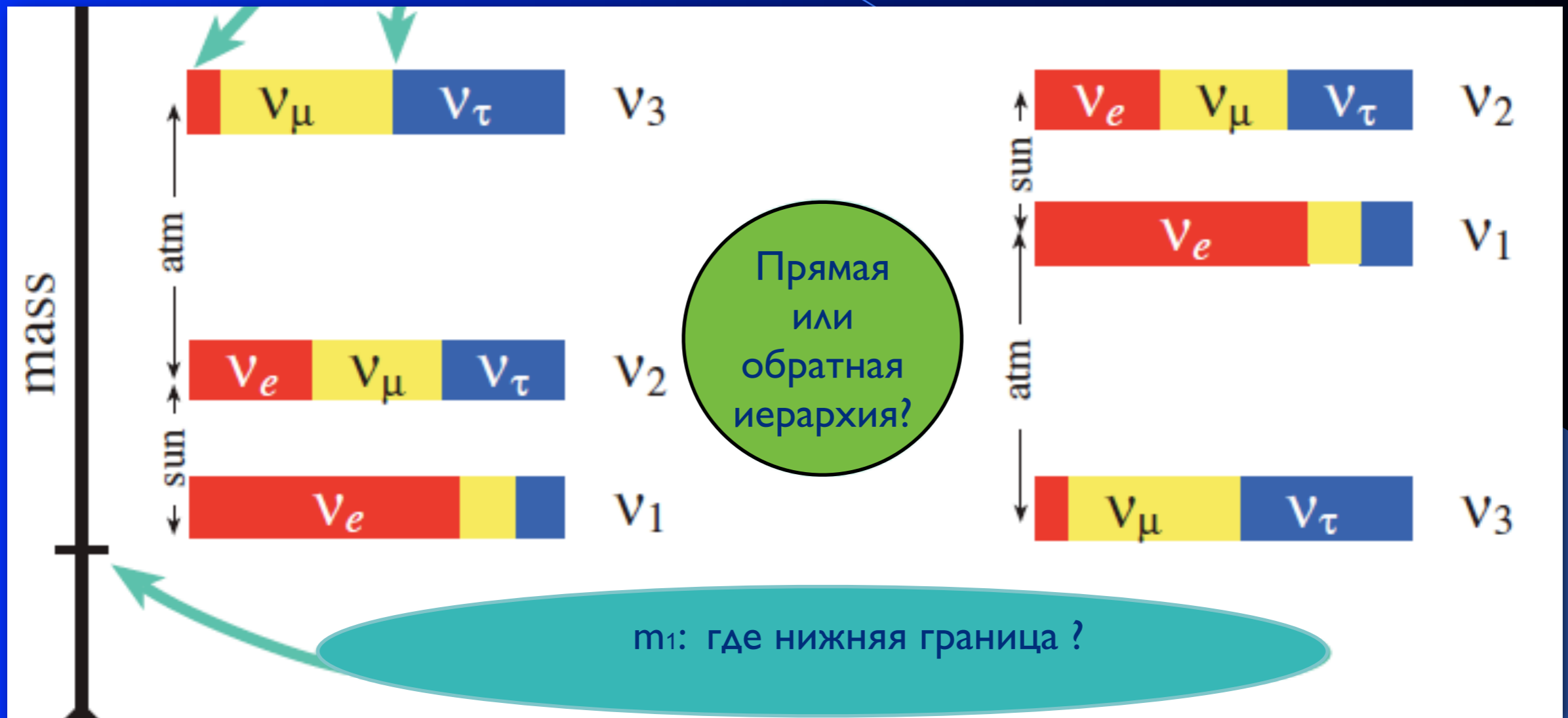


- Может быть мы нашли эту частицу?

- Поиски новых хиггсовских бозонов



# Нейтрино- загадочная частица

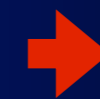


$$\sum m_\nu < 0.23 \text{ eV}$$

Космология: спектр реликтового излучения **Planck**

$$m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}$$

бета-распад  
Troitsk-Mainz



$$m_{\nu_e} < 0.2 \text{ eV}$$

**KATRIN**

# Античастица ли нейтрино самой себе?

$$\nu_D = \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix} \quad \nu_{M_1} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_1^* \end{pmatrix}, \quad \nu_{M_2} = \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \xi_2^* \end{pmatrix}$$

$$\nu_D \neq \nu_D^*$$

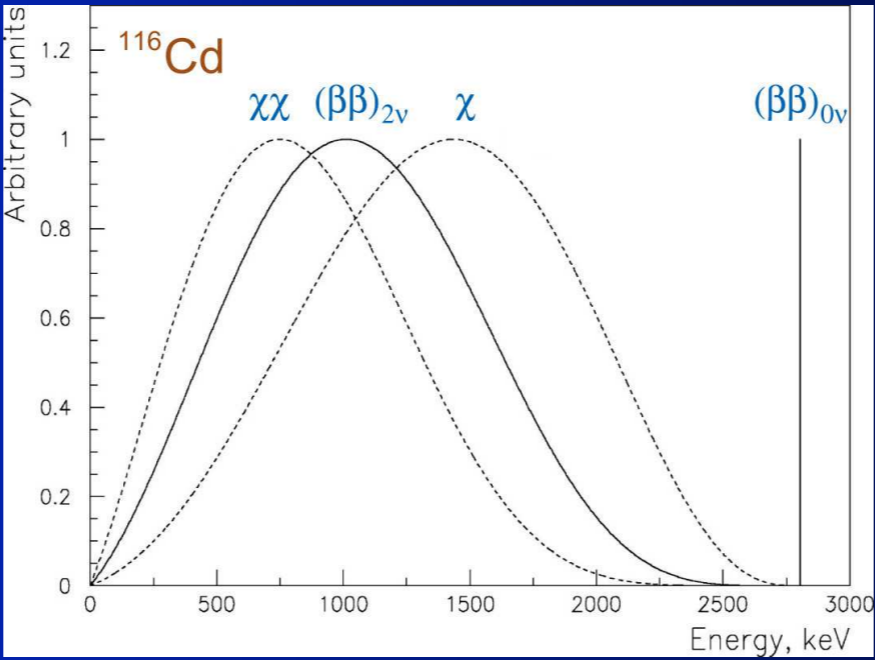
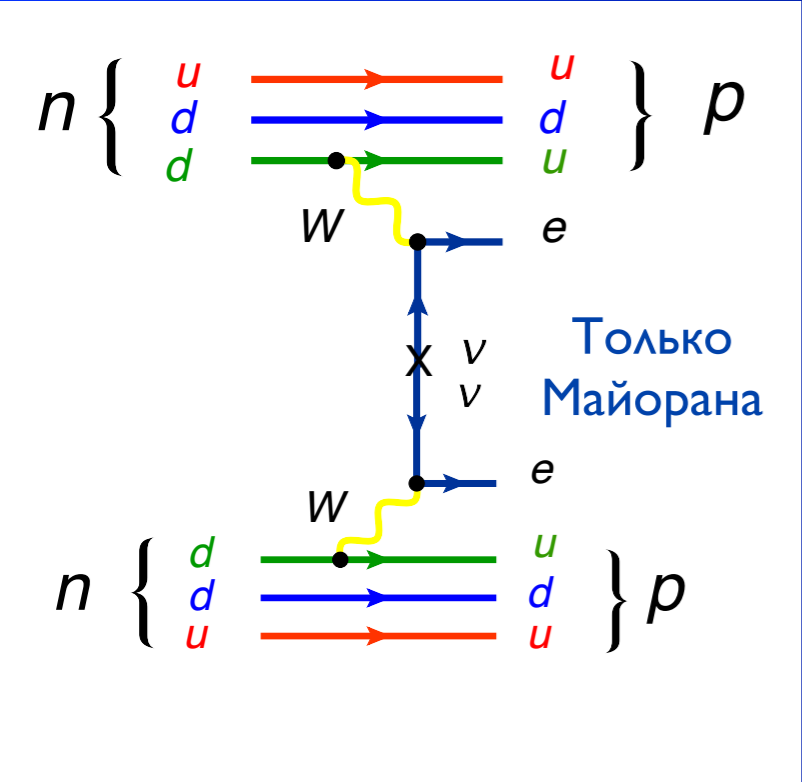
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

$$m_{\nu_{M_1}} \neq m_{\nu_{M_2}}$$

## $0\nu\beta\beta$ decay



# Античастица ли нейтрино самой себе?

$$\nu_D = \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix} \quad \nu_{M_1} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_1^* \end{pmatrix}, \quad \nu_{M_2} = \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \xi_2^* \end{pmatrix}$$

$$\nu_D \neq \nu_D^*$$

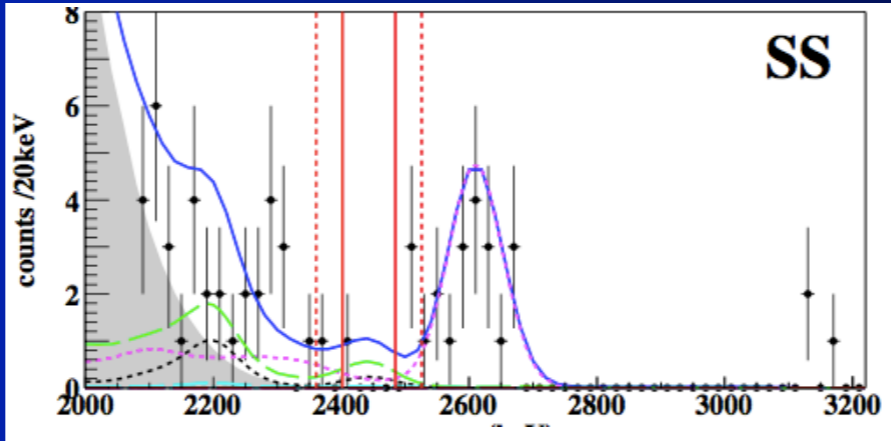
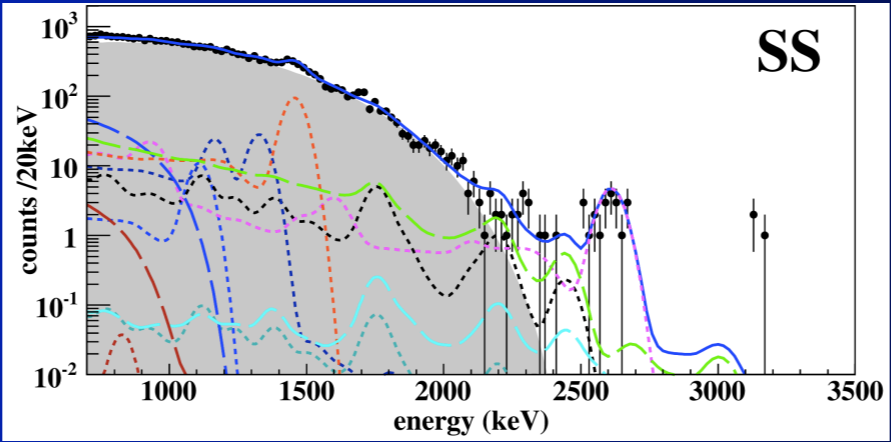
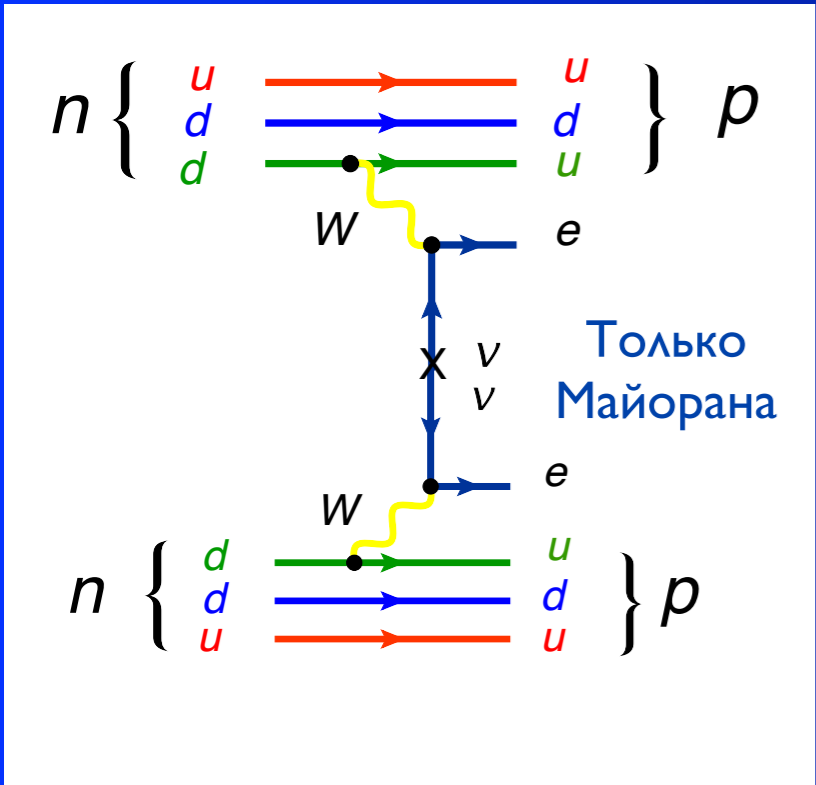
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

$$m_{\nu_{M_1}} \neq m_{\nu_{M_2}}$$

## $0\nu\beta\beta$ decay



# Античастица ли нейтрино самой себе?

$$\nu_D = \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix} \quad \nu_{M_1} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_1^* \end{pmatrix}, \quad \nu_{M_2} = \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \xi_2^* \end{pmatrix}$$

$$\nu_D \neq \nu_D^*$$

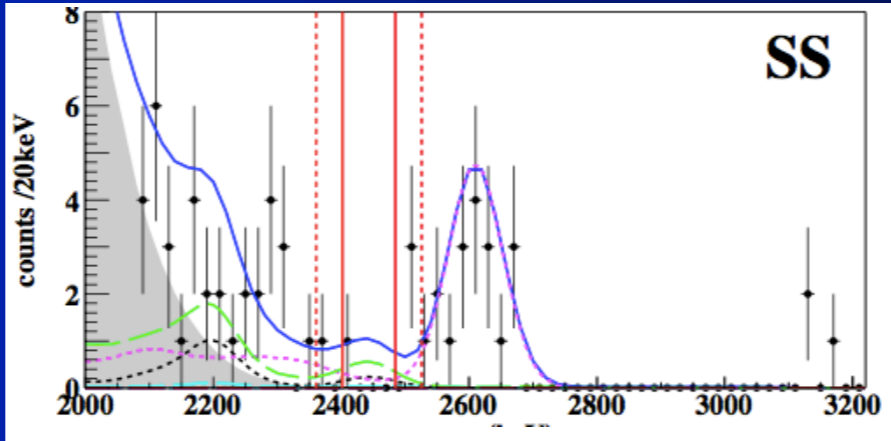
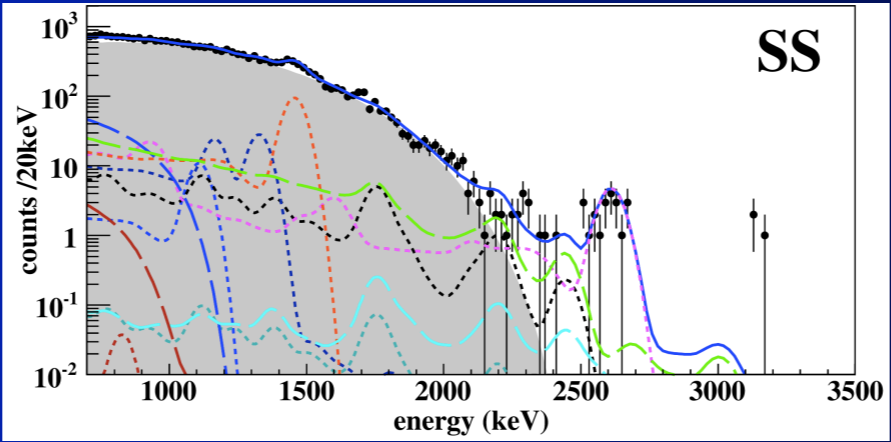
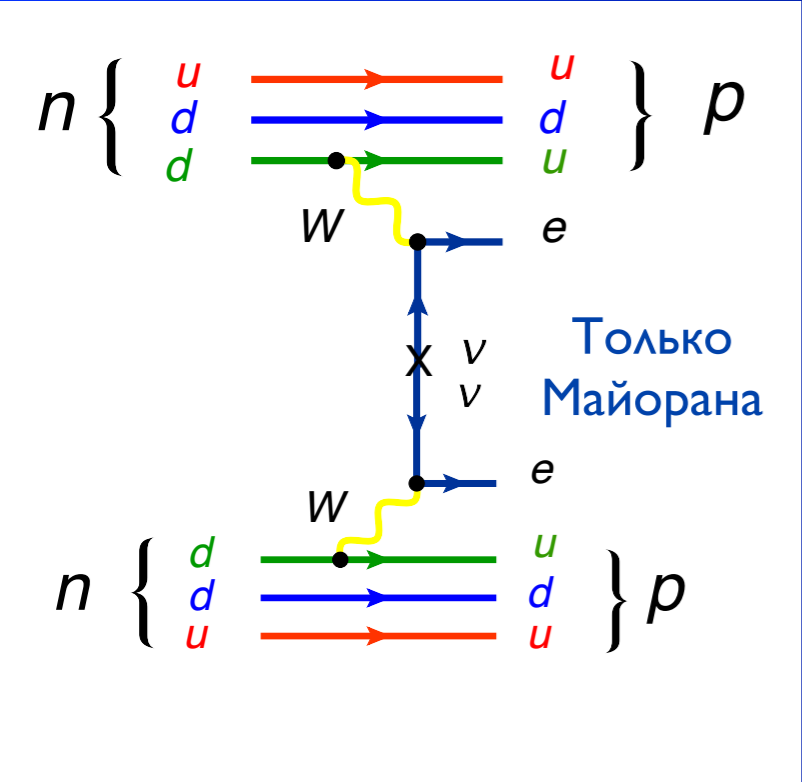
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

$$m_{\nu_{M_1}} \neq m_{\nu_{M_2}}$$

## $0\nu\beta\beta$ decay



$$T_{1/2} 2\nu\beta\beta (^{136}\text{Xe}) \times 10^{21} \text{ yr} = 2.23 \pm 0.017 \text{ stat} \pm 0.22 \text{ sys}$$

$$T_{1/2} 0\nu\beta\beta (^{136}\text{Xe}) \times 10^{25} \text{ yr} > 1.6 \text{ (90\% CL)}$$

# Античастица ли нейтрино самой себе?

$$\nu_D = \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix} \quad \nu_{M_1} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_1^* \end{pmatrix}, \quad \nu_{M_2} = \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \xi_2^* \end{pmatrix}$$

$$\nu_D \neq \nu_D^*$$

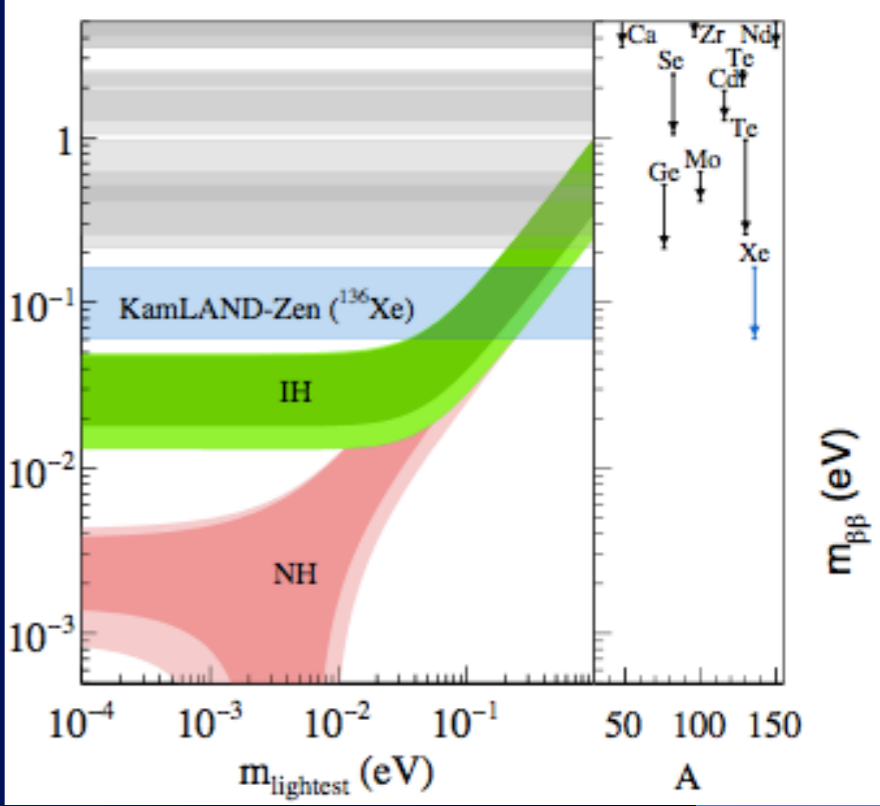
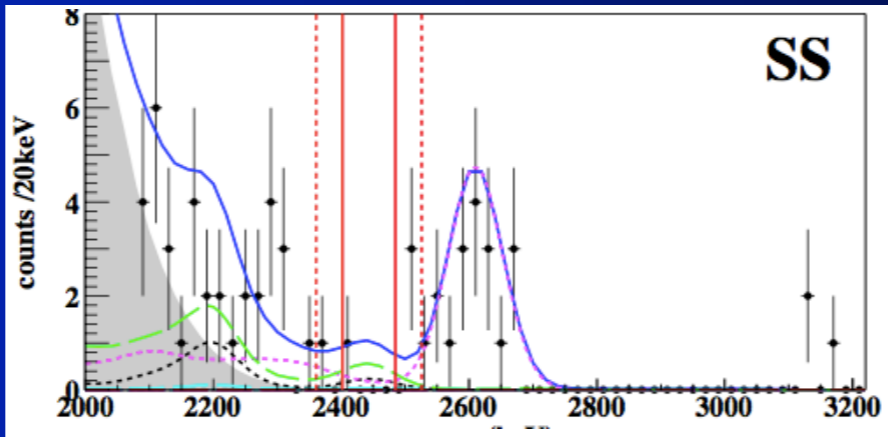
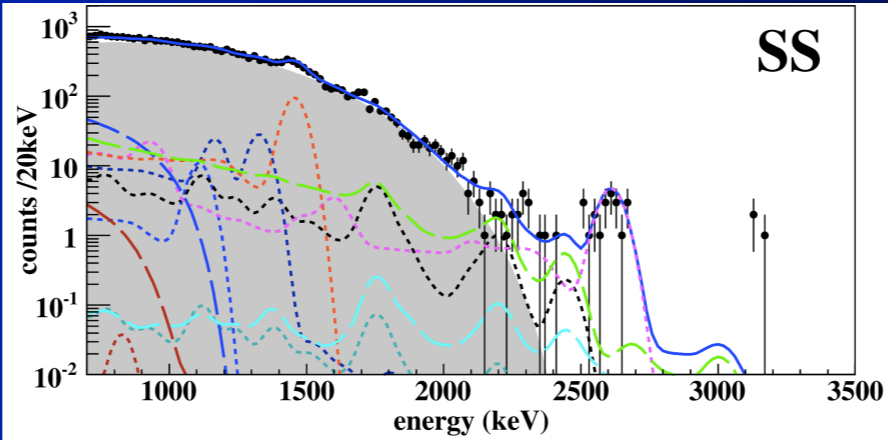
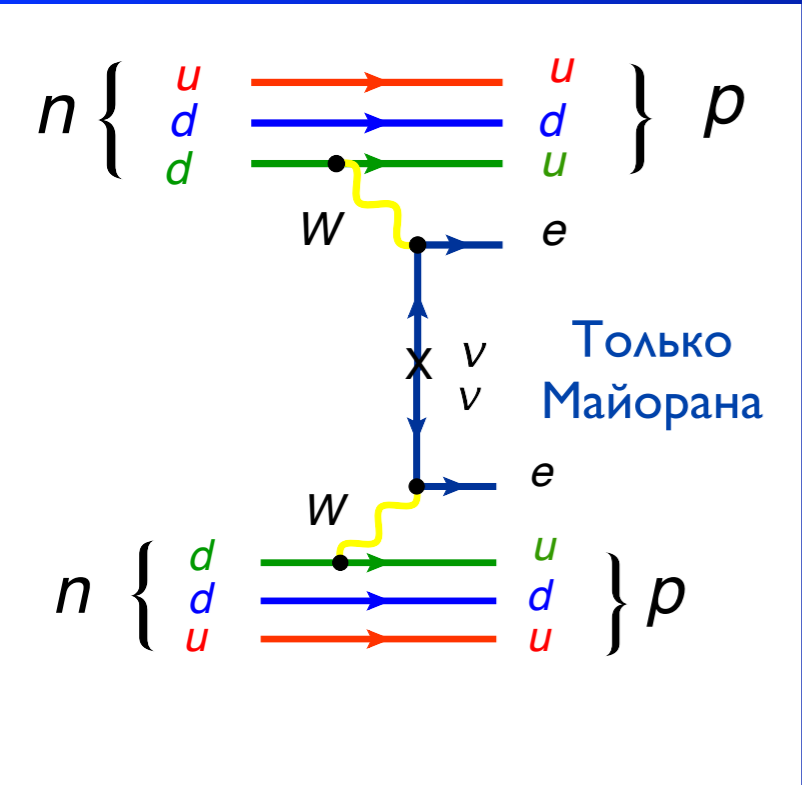
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

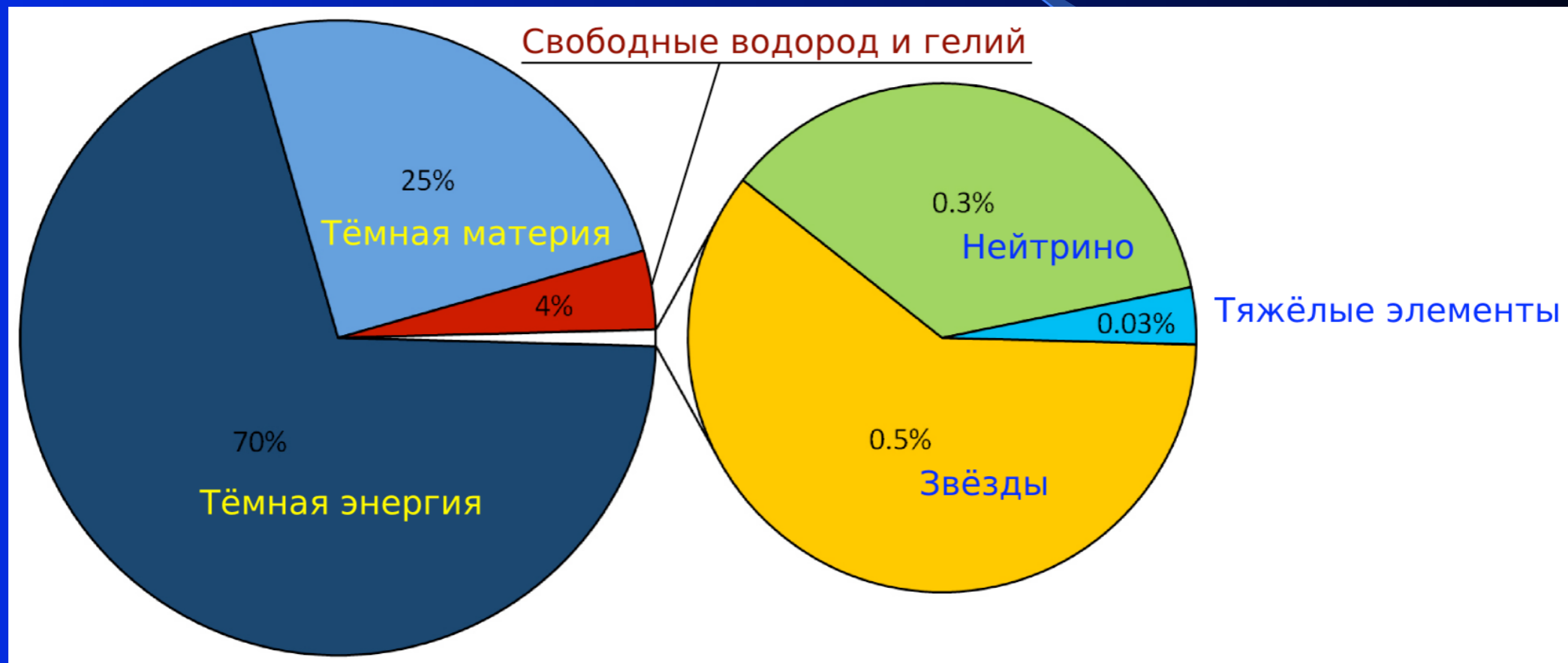
$$m_{\nu_{M_1}} \neq m_{\nu_{M_2}}$$

## $0\nu\beta\beta$ decay



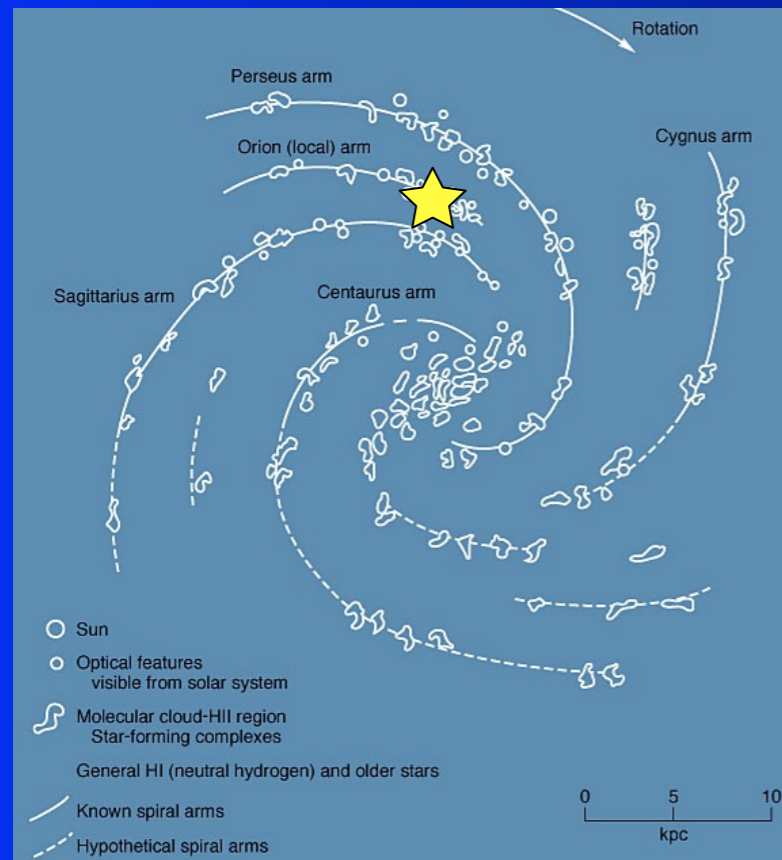
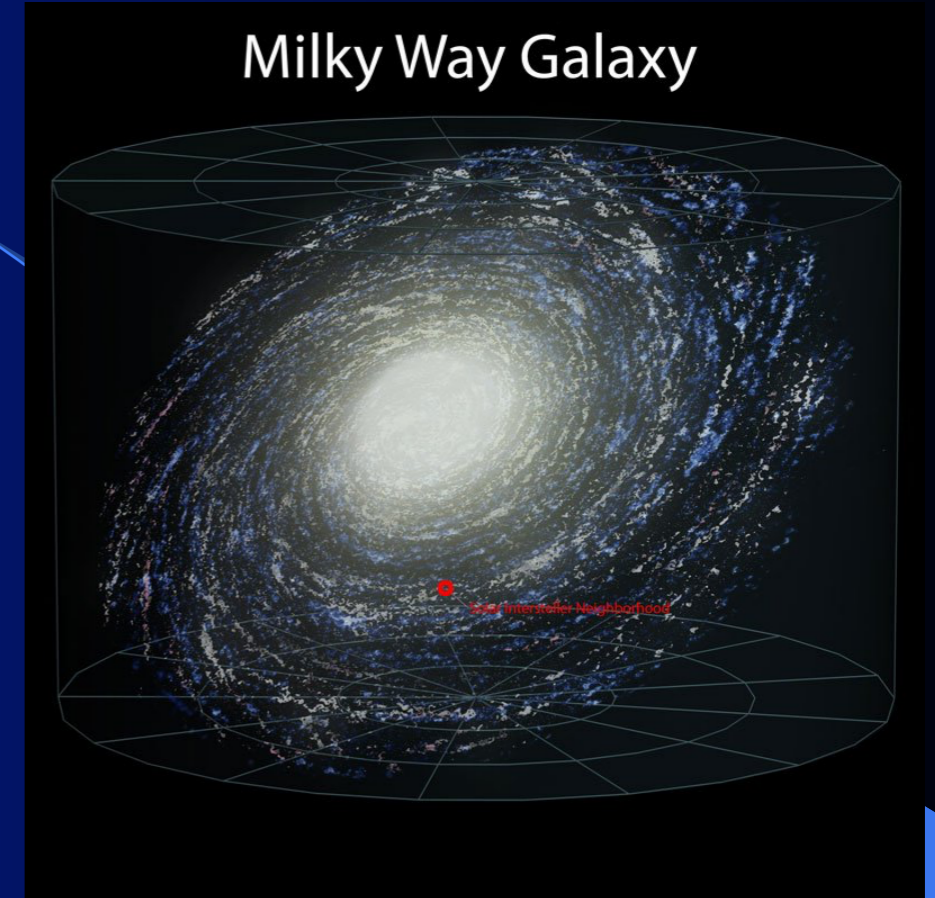
# Тёмная материя

## Энергетический баланс Вселенной



Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 90% (50%) элементарных частиц

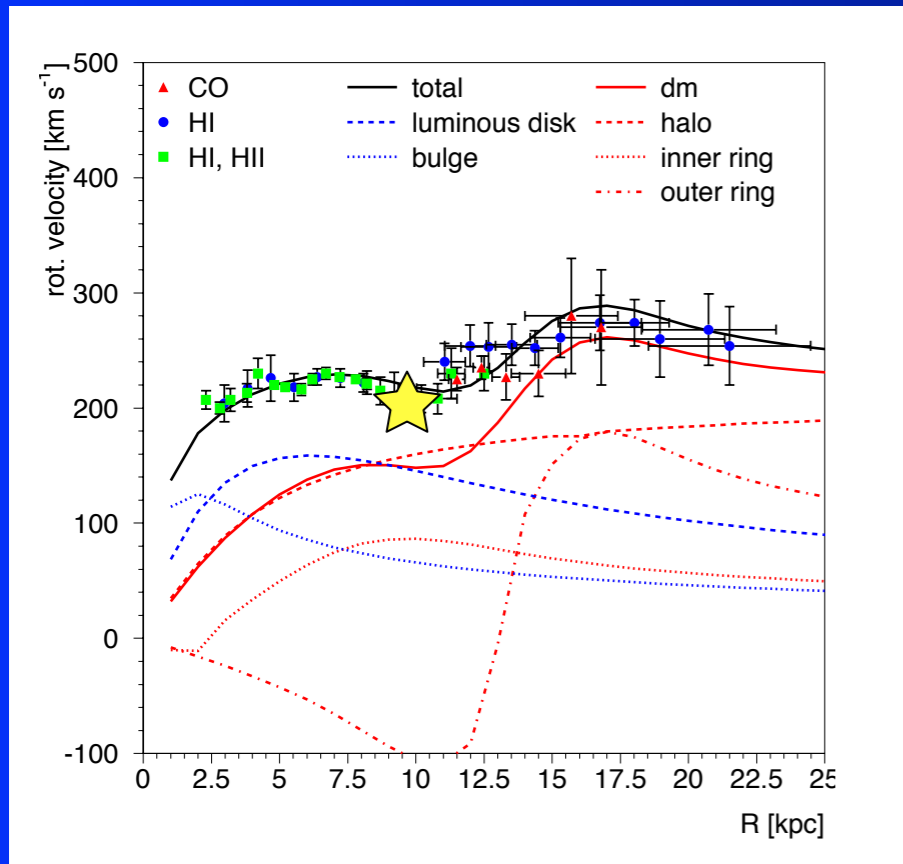
# Млечный путь



## Спиральные рукава

Млечный путь - типичная спиральная галактика, представляет собой диск размером около 20 кПс, с центральным сферическим ядром размером около 2 кПс. Солнце расположено в спиральном рукаве Орион на расстоянии  $\sim 8$  кПс от центра

# Млечный путь



Кривая вращения звёзд

- Скорость вращения Земли вокруг Солнца - 30 км/сек
- Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики - 220 км/сек
- Скорость за счёт притяжения видимой материи - 175 км/сек
- Плотность ТМ в районе Солнца -  $0.3 \text{ ГэВ/см}^3$

Сталкивающиеся спиральные галактики Арп 271



Плотность гало тёмной материи

Вид сбоку

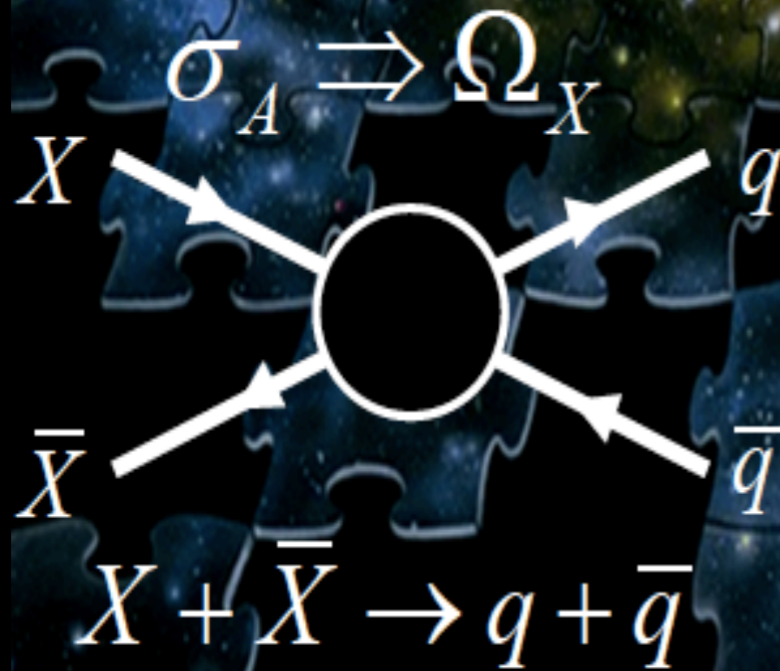
Вид сверху



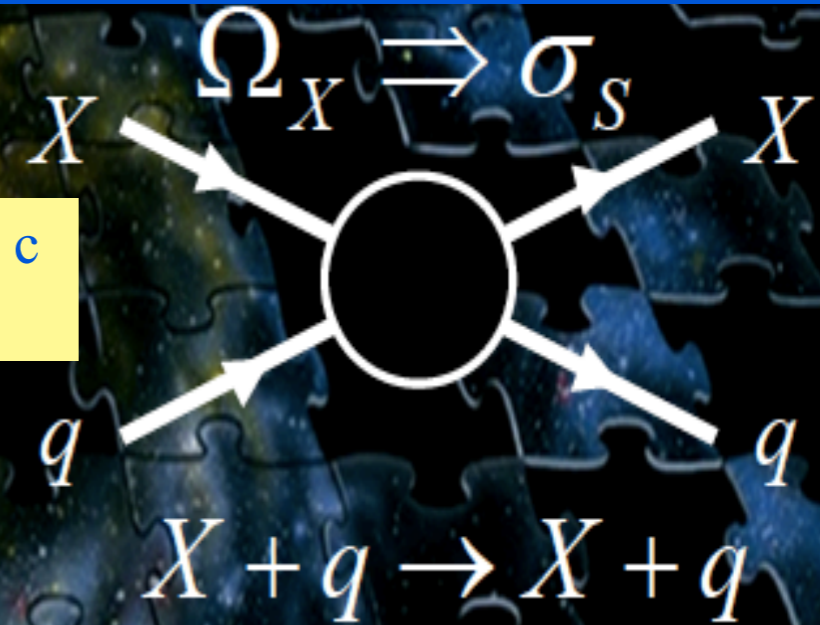


# Поиск частиц тёмной материи

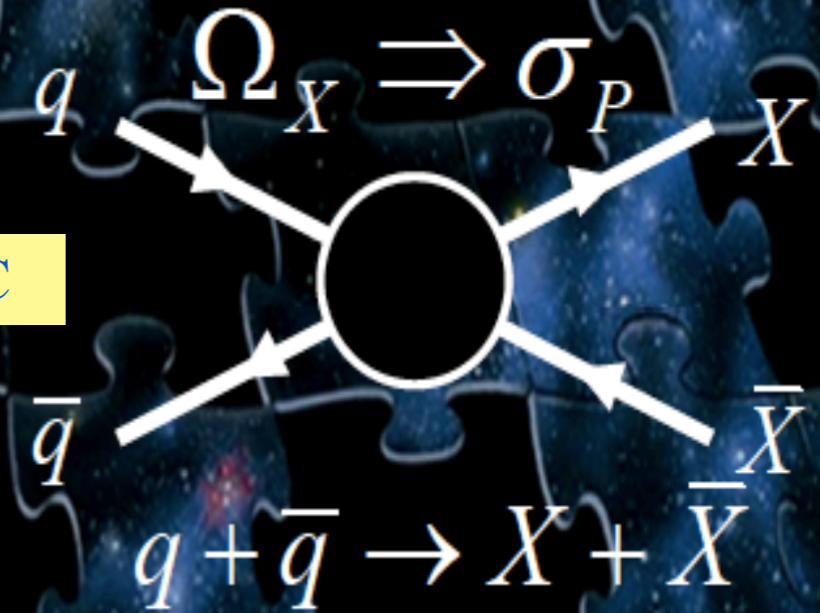
Аннигиляция -> новая  
компонента в космических  
лучах



Прямое вз-е с  
веществом



Рождение на LHC



R. Kolb

Сигнал пока отсутствует

# Теория Великого объединения

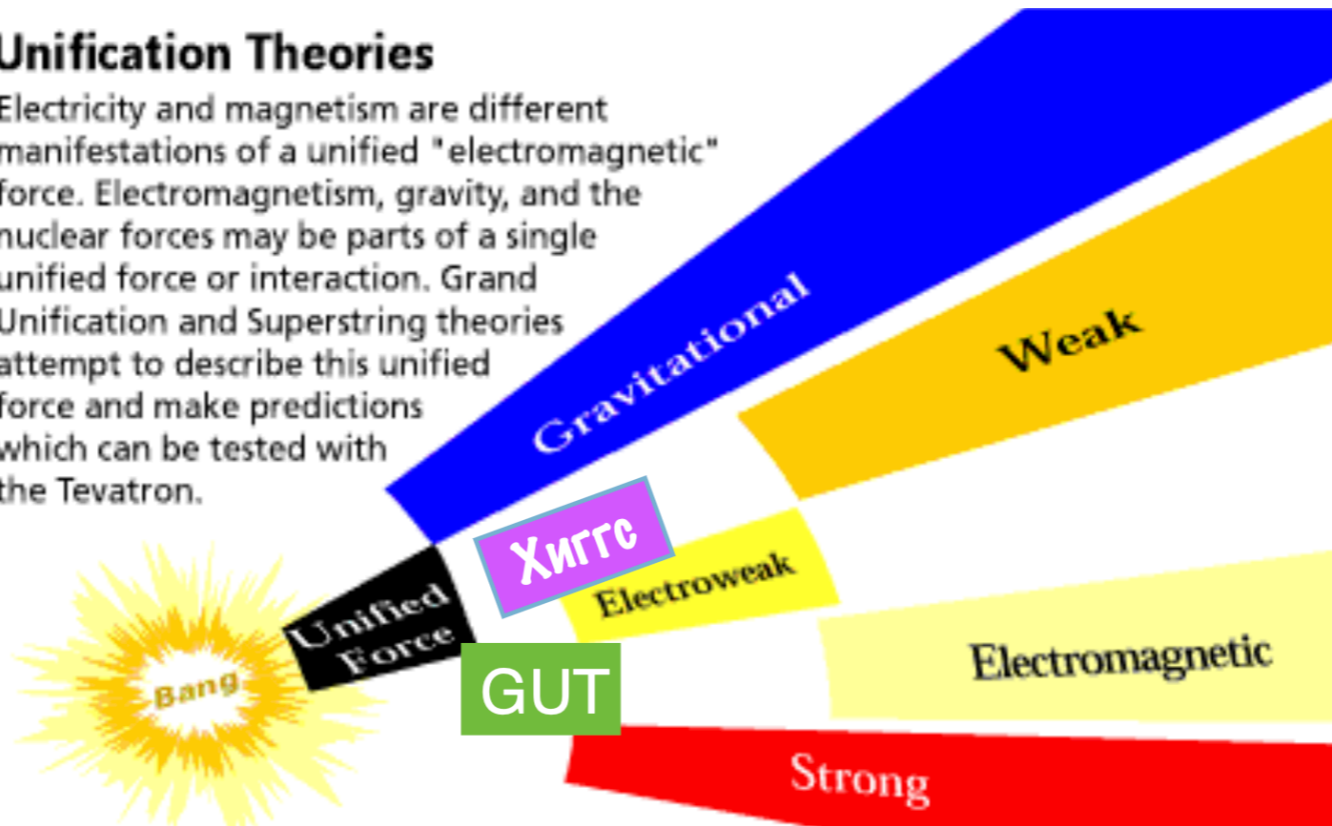
Великое объединение есть расширения группы симметрии СМ

$SU_c(3) \otimes$   
gluons  
quarks  
 $g_3$

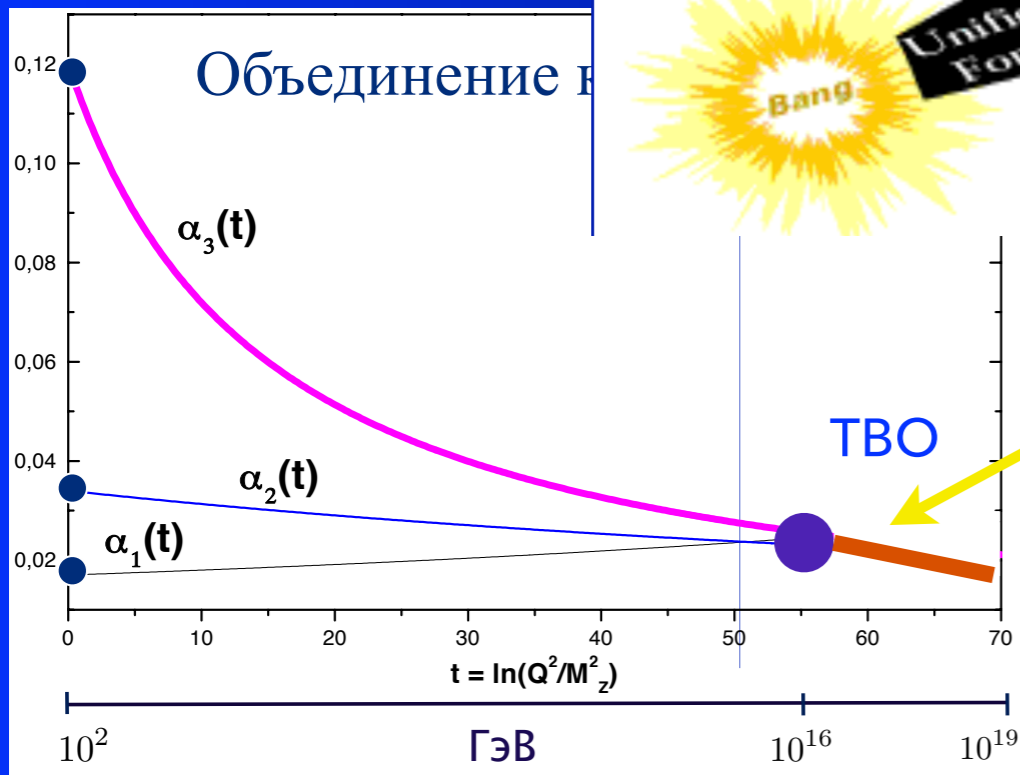
Low  
 $SU$   
W  
lep

## Unification Theories

Electricity and magnetism are different manifestations of a unified "electromagnetic" force. Electromagnetism, gravity, and the nuclear forces may be parts of a single unified force or interaction. Grand Unification and Superstring theories attempt to describe this unified force and make predictions which can be tested with the Tevatron.



crete symmetry)



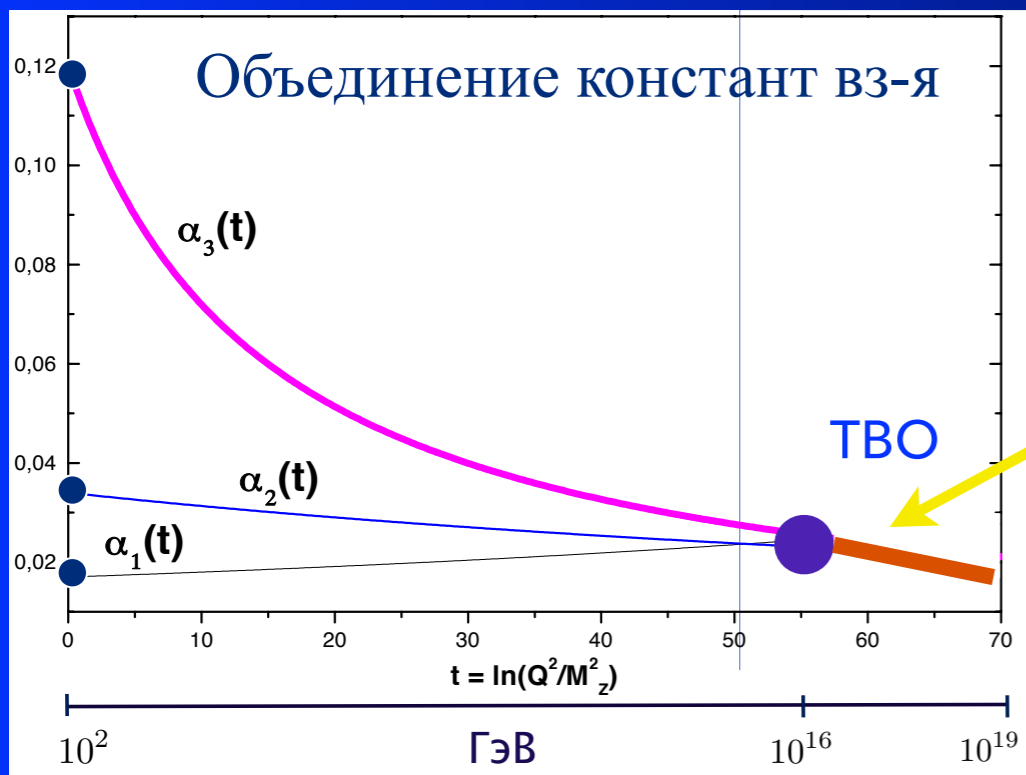
$(1) \subset G_{GUT}$

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

# Теория Великого объединения

Великое объединение есть расширения группы симметрии СМ

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



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

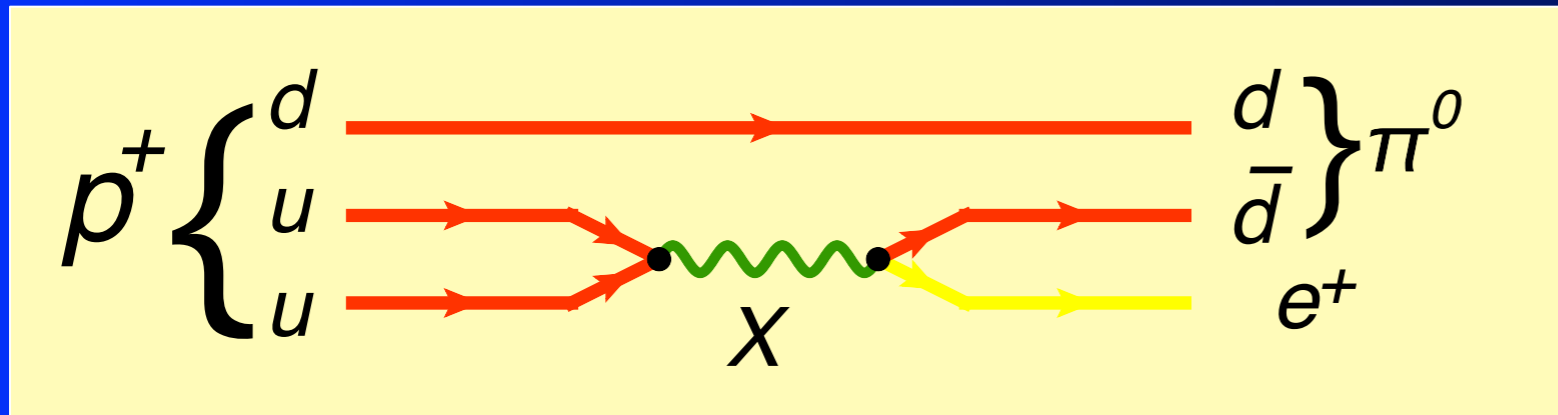
Ex :  $SU(5)$ ,  $SO(10)$ ,  $E(6)$ ,  $SU(5) \times U(1)$ ,  
 $SU(4) \times SU(2) \times SU(2)$ ,  $SO(10) \times U(1)$

# Нестабильность протона

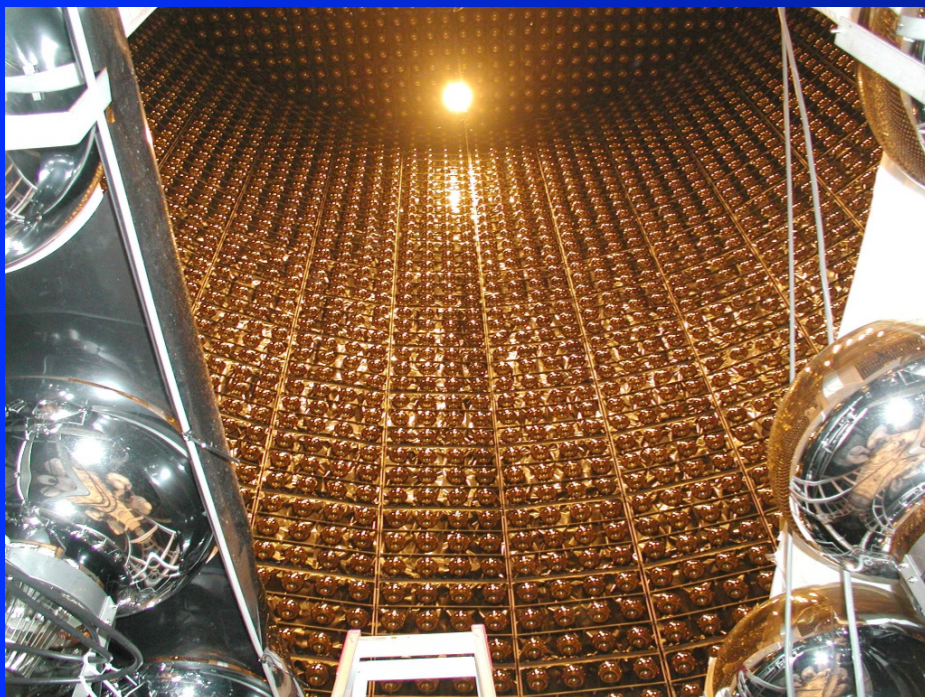
В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

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

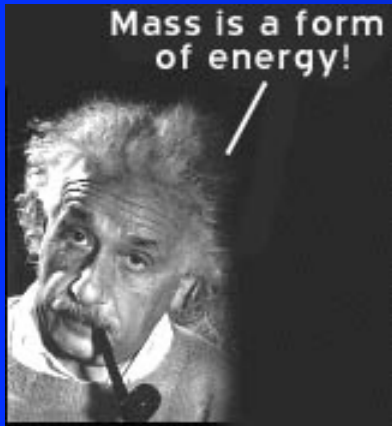
$$\tau_{\text{Universe}} \approx 14 \cdot 10^9 \text{ years}$$



Камиока (Япония)



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



# Общая теория Относительности

$$Action = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) + \mathcal{L}_M \right]$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu} \quad \Rightarrow \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

↑  
тензор Риччи  
↑  
скалярная кривизна

↑  
тензор энергии-импульса материи

↑  
Космологическая постоянная

Космологическая постоянная есть  
вакуумная энергия =  $\Lambda^4$

Приводит к антигравитации, что  
порождает ускоренное расширение  
Вселенной

Чтобы получить ~ 70 % вклада в энергетический баланс  
Вселенной  $\Lambda$  должна быть порядка  $10^{-3}$  эв.

?!

# Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией:  $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

# Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

## Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией:  $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

## Пути решения:

- Модификация сектора материи (суперсимметрия)
- Модификация гравитации (высшие члены по кривизне)
- Нелокальная теория (струна)
- Обуздание неперенормируемости

# Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

## Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией:  $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

## Пути решения:

- Модификация сектора материи (суперсимметрия)
- Модификация гравитации (высшие члены по кривизне)
- Нелокальная теория (струна)
- Обуздание неперенормируемости

?!



# Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

## Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией:  $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

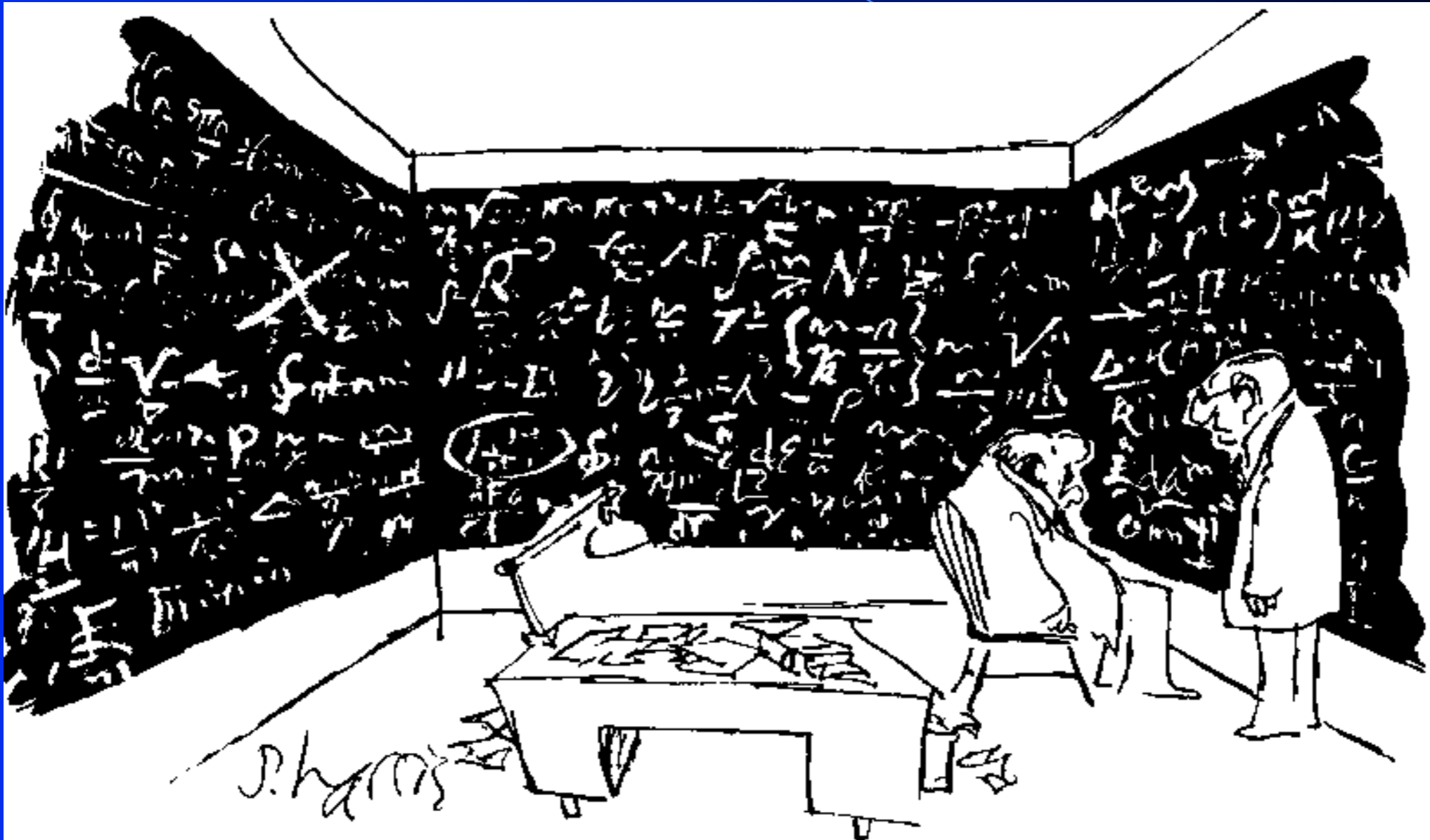
## Пути решения:

- Модификация сектора материи (суперсимметрия)
- Модификация гравитации (высшие члены по кривизне)
- Нелокальная теория (струна)
- Обуздание неперенормируемости

?!

Решение пока отсутствует

# Простые истины



"Whatever happened to *elegant* solutions?"