

# Введение в физику частиц — 2

Игорь Иванов

CFTP, Instituto Superior Técnico, Lisbon  
ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Школа ОИЯИ-ЦЕРН для учителей физики

4-11 ноября 2018 г.



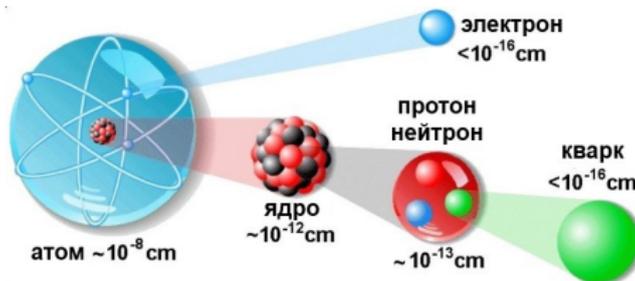
INVESTIGADOR  
FCT



- 1 Стандартная модель
- 2 Хиггсовский механизм
- 3 Проблемы Стандартной модели
- 4 Примеры Новой физики

# Стандартная модель

# Устройство материи



Фундаментальные взаимодействия:

- **Электромагнитное:** частицы переносчики — фотоны  $\gamma$ ;
- **Сильное:** частицы переносчики — глюоны  $g$ ;
- **Слабое:** частицы переносчики — тяжелые  $W$  и  $Z$ -бозоны;
- Гравитация: для микромира она слишком слаба, **вычеркиваем**.

Это была **описательная часть**.

Теперь поговорим про фундаментальную теорию, **Стандартную модель**.

# Фундаментальные частицы

кварки	u u-кварк	c c-кварк	t t-кварк	$\gamma$ фотон
	d d-кварк	s s-кварк	b b-кварк	g глюон
лептоны	$\nu_e$ электрон-нейтрино	$\nu_\mu$ мюон-нейтрино	$\nu_\tau$ тау-нейтрино	Z z-бозон
	e электрон	$\mu$ мюон	$\tau$ тау	W w-бозон

Но откуда берутся взаимодействия?

# Калибровочные взаимодействия

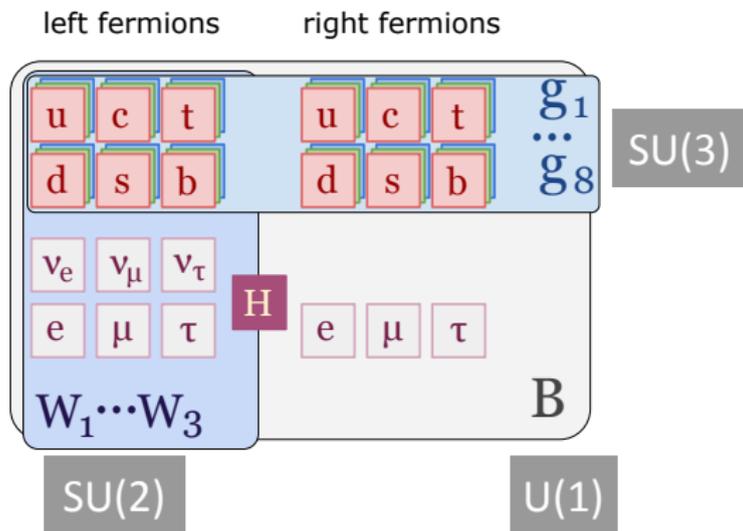
## Калибровочный принцип

Взаимодействия не берутся с потолка,  
а вытекают из **принципа симметрии!**

- В КМ электрон — не точка, он описывается **волновой функцией**  $\psi(x)$ .
- Эта функция **комплексная**:  $\psi(x) = |\psi(x)|e^{i\phi(x)}$ . Но ее фаза сама по себе — **не физическая**. Ничего не изменится от глобальной замены  $\psi(x)$  на  $\psi(x)e^{i\alpha}$  сразу во всем пространстве → **глобальная симметрия**.
- **Локальная симметрия**: ничего не должно измениться от замены  $\psi(x)$  на  $\psi(x)e^{i\alpha(x)}$  — надо только чуть-чуть «подкрутить» (откалибровать) уравнения, добавив в них новое поле.
- Это поле ведет себя точь-в-точь как ЭМ поле!

Так удалось описать все фундаментальные взаимодействия.

# Фундаментальные взаимодействия в СМ



Впрочем, есть проблема: настолько симметричная теория **ВОЗМОЖНА ТОЛЬКО** для **БЕЗМАССОВЫХ** частиц. Но в нашем мире это не так. Что делать??

# Хиггсовский механизм

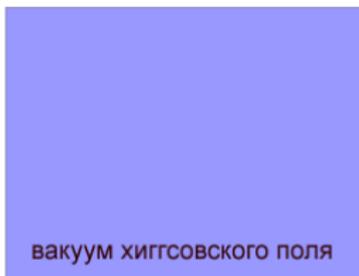
Хиггсовский механизм элегантно решает эту проблему!

- Новая субстанция — хиггсовское поле.
- Уравнения-то симметричны. Но хиггсовское поле само организуется так, чтоб частично их нарушить.
- Спонтанное нарушение симметрии аукается во всех частях теории, и частицы становятся массивными.



Браут, Энглер, Хиггс, Гуральник, Хэген, Киббл, 1964

# Хиггсовский механизм в картинках



Частица «цепляется» за хиггсовское поле и приобретает массу.

# Хиггсовский потенциал

Откуда берется такое странное состояние поля?

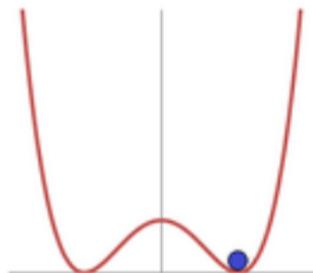
Хиггсовское поле чувствует само себя! Если  $\phi(x)$  — «напряженность» хиггсовского поля, то плотность его потенциальной энергии

$$V(x) = -m^2|\phi(x)|^2 + \lambda|\phi(x)|^4.$$

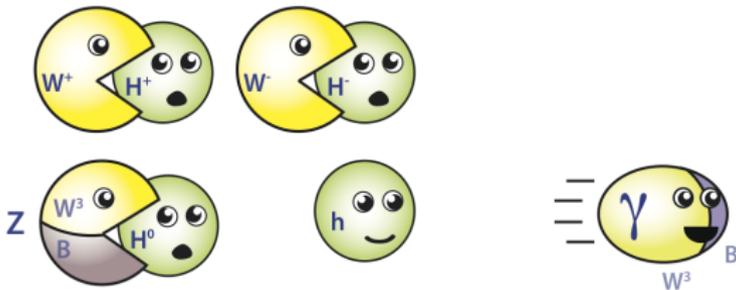
Самое энергетически выгодное состояние:

одинаковое ненулевое значение  $\phi(x) = v \neq 0$  во всей вселенной.

Это и есть хиггсовский вакуум, в котором мы живем.



# Хиггсовский механизм в картинках



Последствия спонтанного нарушения:

- Электрослабое взаимодействие **расщепляется** на слабое (тяжелые  $W$  и  $Z$ ) и электромагнитное (безмассовый фотон).
- Остается частица-отголосок механизма — **бозон Хиггса**.
- Частицы материи приобретают разные массы.
- Наш мир становится таким, как мы его знаем!

# Стандартная модель

- Стандартная модель — завершена.  
 Глэшоу, Салам, Вайнберг (1979)
- Ничего нельзя подправлять, все параметры зафиксированы.
- Можно делать предсказания и проверять их в эксперименте.
- СМ выдержала **тысячи проверок** за последние 50 лет!

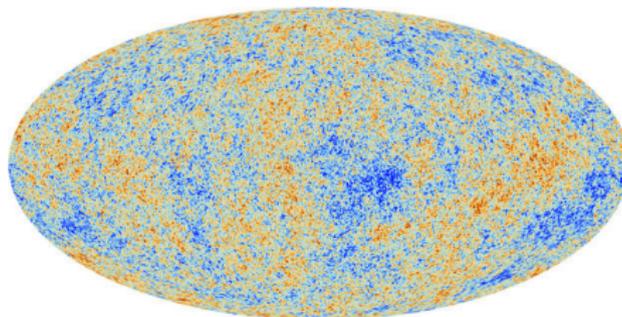
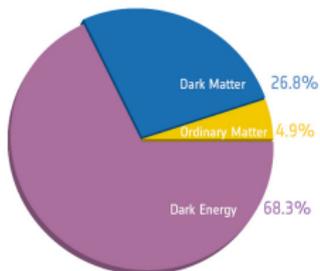


кварки	u	c	t	$\gamma$	бозоны
	u-кварк	c-кварк	t-кварк	фотон	
d	s	b	g		
d-кварк	s-кварк	b-кварк	глюон		
лептоны	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z	
	электрон-нейтрино	мюон-нейтрино	тау-нейтрино	z-бозон	
	e	$\mu$	$\tau$	W	
	электрон	мюон	тау	w-бозон	



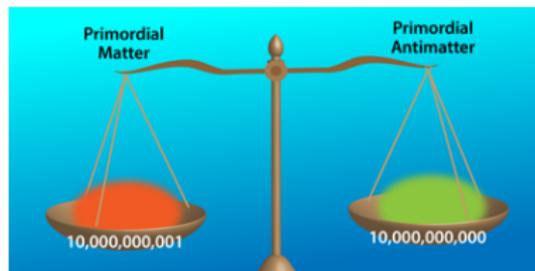
# Проблемы СМ: космология

Как объяснить **темную материю**?



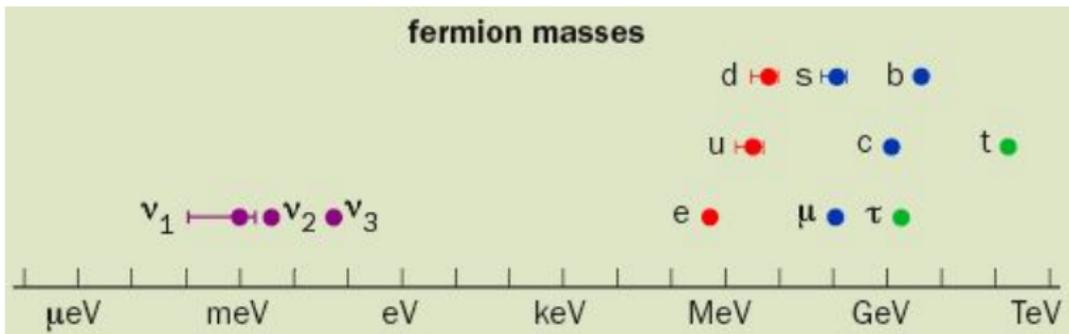
Куда пропало антивещество?

Как возник дисбаланс между частицами и античастицами в ранней вселенной?



# Проблемы СМ: фермионы

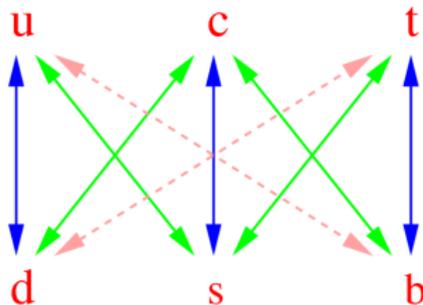
- Откуда взялись **такие массы** у кварков и лептонов?



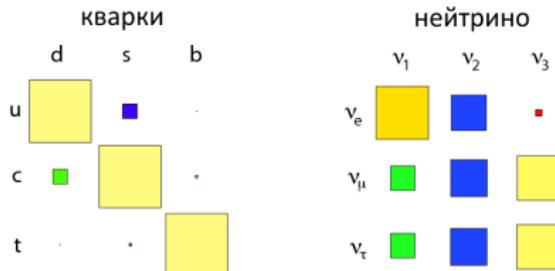
- Почему **нейтрино** такие безумно легкие?

# Проблемы СМ: фермионы

- почему слабое взаимодействие **смешивает** разные фермионы?



- почему смешивание **такое разное** для кварков и нейтрино?



# Вопросы без ответов

Множество вопросов «почему», на которые СМ неспособна ответить:

- Почему три поколения фермионов?
- Почему три типа взаимодействий? Почему именно таких взаимодействий?
- Почему левые и правые фермионы ведут себя так по-разному?
- Откуда возникло нарушение  $CP$ -симметрии? ( $\approx$  почему частицы и античастицы ведут себя слегка по-разному?)
- Почему все массы такие маленькие по сравнению с  $M_{Pl} \sim 10^{19}$  ГэВ?
- Почему гравитация такая слабая?

# Проблемы СМ

Обязана существовать **Новая Физика** — теория устройства микромира, более глубокая чем Стандартная модель!

Теоретики придумали уже  $\approx 1000$  вариантов Новой физики!  
Но какая из них реализуется в нашем мире — мы не знаем!



Главная задача современной ФЭЧ — **найти Новую физику**.



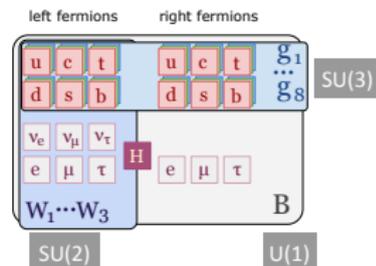
# Новая физика



Стандартная  
модель

# Варианты Новой физики

Новая Физика = **что угодно**, что отличается от



Может проявляться как

- **новые частицы** и **новые взаимодействия**,
- **внутренняя структура** фундаментальной частиц,
- **аномально сильная гравитация**, доступная для изучения на коллайдерах,
- **любые отклонения** в сечении рассеяния, вероятностях распадов, угловых распределениях и т.д.

# Сложный хиггсовский сектор

В Стандартной модели есть **только один бозон Хиггса**.

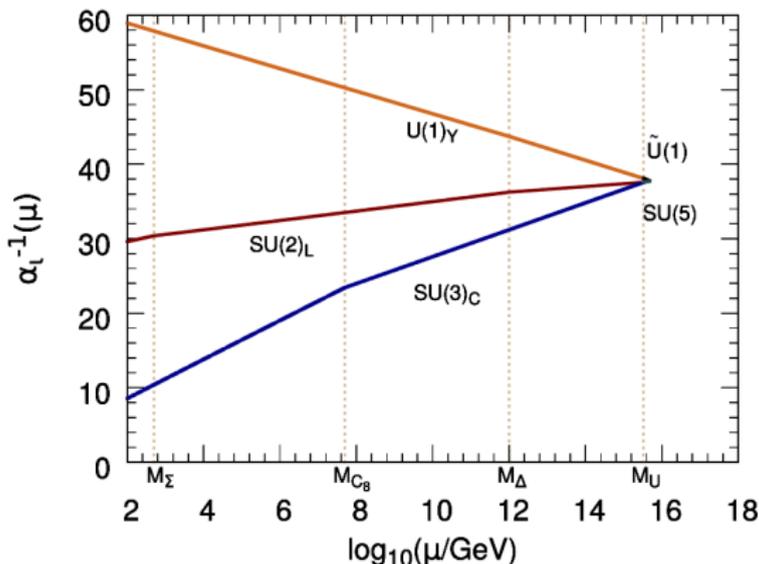
Но хиггсовский сектор нашей мира может быть устроен **куда сложнее!**



Популярный класс теорий — не 1, а **сразу 5 бозонов Хиггса!**

Возможны даже **электрически заряженные бозоны Хиггса**  $H^+$  и  $H^-$ .

# Новые взаимодействия

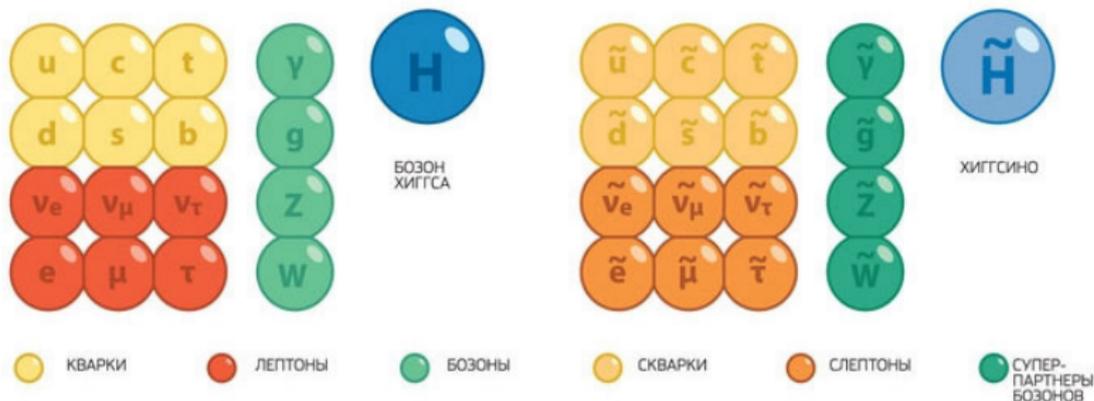


Может быть, сильное и электрослабое взаимодействие — **всего лишь осколки** какого-то единого универсального взаимодействия?!

Может быть, кварки и лептоны — **две стороны «одной медали»?**

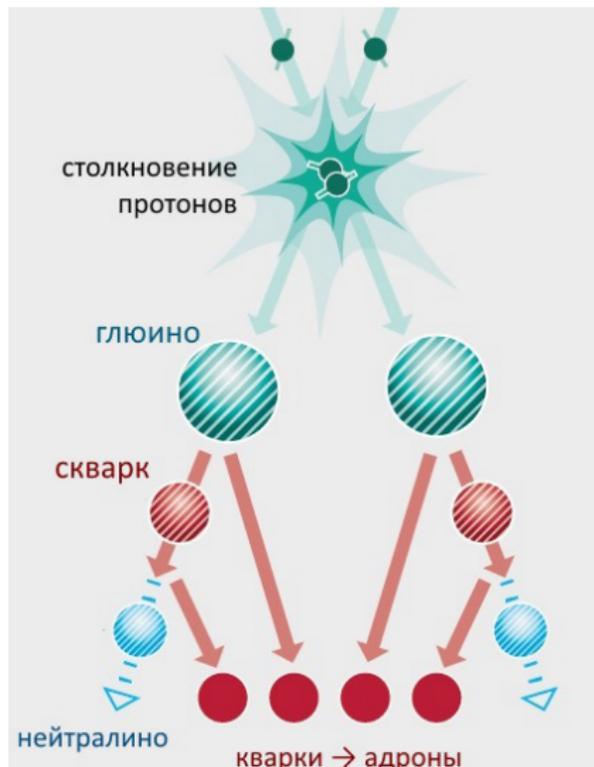
# Суперсимметрия

## МИНИМАЛЬНАЯ СУПЕРСИММЕТРИЧНАЯ СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ



Суперсимметрия — поразительная, но пока еще гипотетическая возможность устройства нашего мира.

# Поиски суперсимметрии



Легчайшая суперчастица обычно **стабильна**.

Если суперчастицы существуют и не слишком тяжелые, детектор увидит необычную картину:

**много адронов + сильный дисбаланс поперечного импульса**

Словно родилась и улетела «невидимая» частица.

# Проблемы СМ

Так какая же идея Новой физики верна?



Коллайдер, помоги!