

Введение в физику частиц — 2

Игорь Иванов

CFTP, Instituto Superior Técnico, Lisbon
ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Школа ОИЯИ-ЦЕРН для учителей физики

3-10 ноября 2019 г.



INVESTIGADOR
FCT



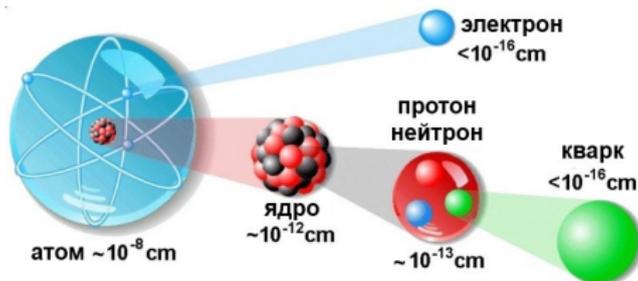
1 Стандартная модель

2 Проблемы Стандартной модели

3 Примеры Новой физики

Стандартная модель

Устройство материи



Фундаментальные взаимодействия:

- **Электромагнитное:** частицы переносчики — фотоны γ ;
- **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 с-кварк	t t-кварк	γ фотон
	d d-кварк	s s-кварк	b b-кварк	g глюон
	ν_e электрон-нейтрино	ν_μ мюон-нейтрино	ν_τ тау-нейтрино	Z z-бозон
лептоны	e электрон	μ мюон	τ тау	W w-бозон
				бозоны

Но откуда берутся взаимодействия?

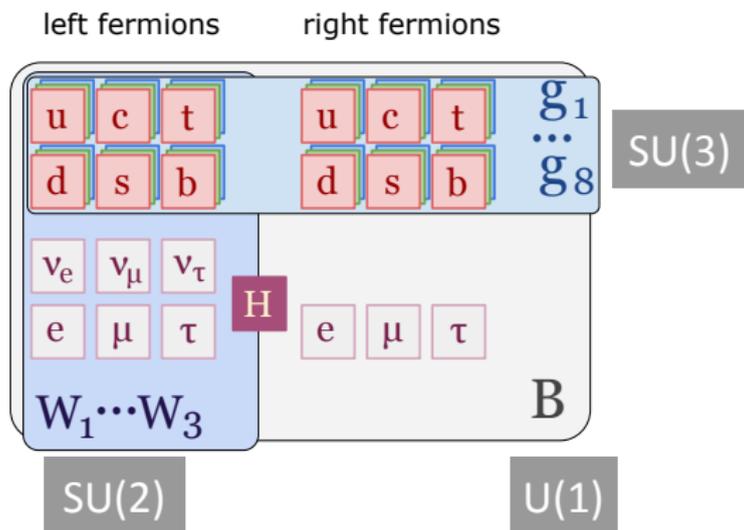
Калибровочный принцип

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 \rightarrow **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

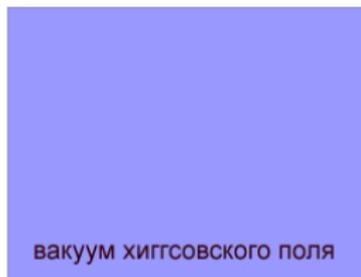
Хиггсовский механизм элегантно решает эту проблему!

- Новая субстанция — хиггсовское поле.
- Уравнения-то симметричны. Но хиггсовское поле само организуется так, чтоб частично их нарушить.
- Спонтанное нарушение симметрии адекватно 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?

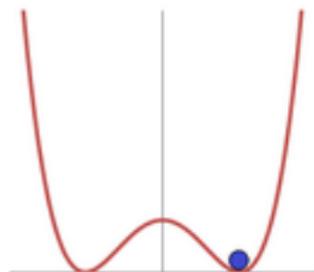
Хиггсовское поле чувствует само себя! Если $\phi(x)$ — «напряженность» хиггсовского поля, то плотность его потенциальной энергии

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

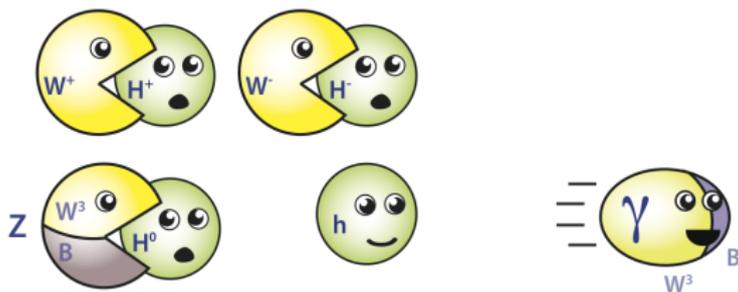
Самое энергетически выгодное состояние:

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!

Проблемы Стандартной модели

Стандартная модель

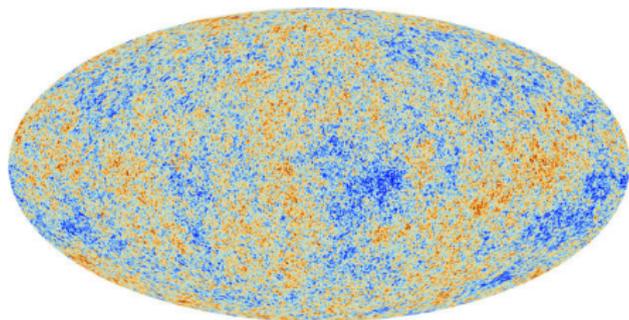
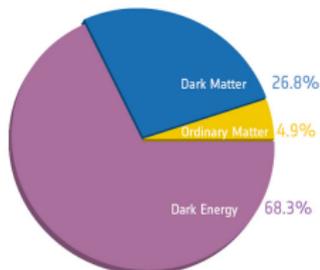
- Стандартная модель — завершена.
 Глэшоу, Салам, Вайнберг (1979)
- Ничего нельзя подправлять, все параметры зафиксированы.
- Можно делать предсказания и проверять их в эксперименте.
- СМ выдержала **тысячи проверок** за последние 50 лет!



кварки	u u-кварк	c с-кварк	t t-кварк	γ фотон
	d d-кварк	s s-кварк	b b-кварк	g глюон
лептоны	ν_e электрон-нейтрино	ν_μ мюон-нейтрино	ν_τ тау-нейтрино	Z z-бозон
	e электрон	μ мюон	τ тау	W w-бозон
				бозоны

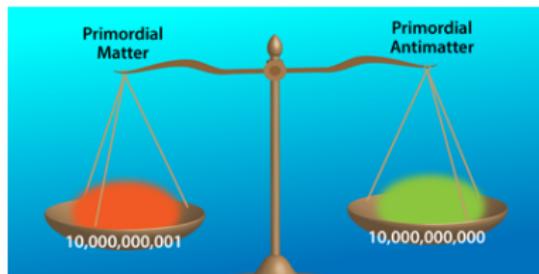


Как объяснить **темную материю**?



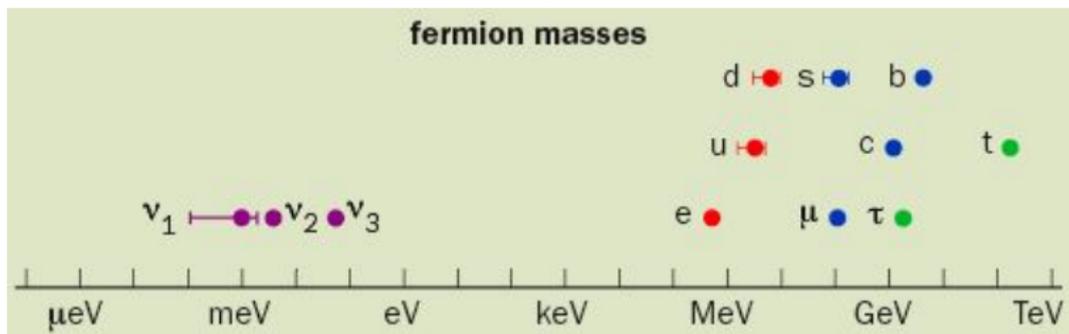
Куда пропало антивещество?

Как возник дисбаланс между частицами и античастицами в ранней вселенной?



Проблемы СМ: фермионы

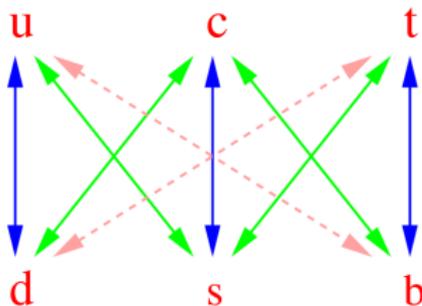
- Откуда взялись **такие массы** у кварков и лептонов?



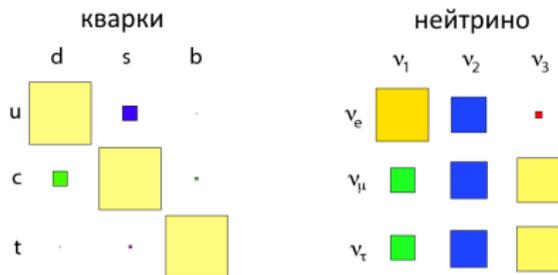
- Почему **нейтрино** такие безумно легкие?

Проблемы СМ: фермионы

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



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



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?

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

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



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

Эпоха открытий

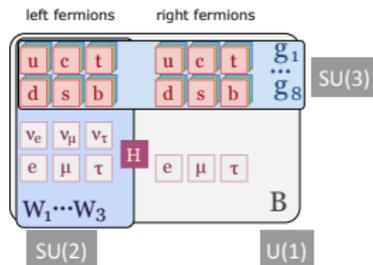


Новая физика



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**.

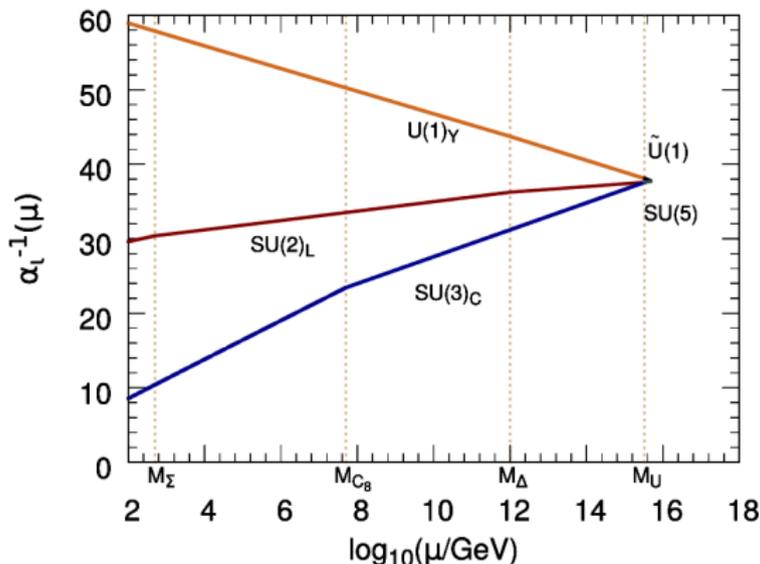
Но хиггсовский сектор нашей мира может быть устроен **куда сложнее!**



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

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

Новые взаимодействия

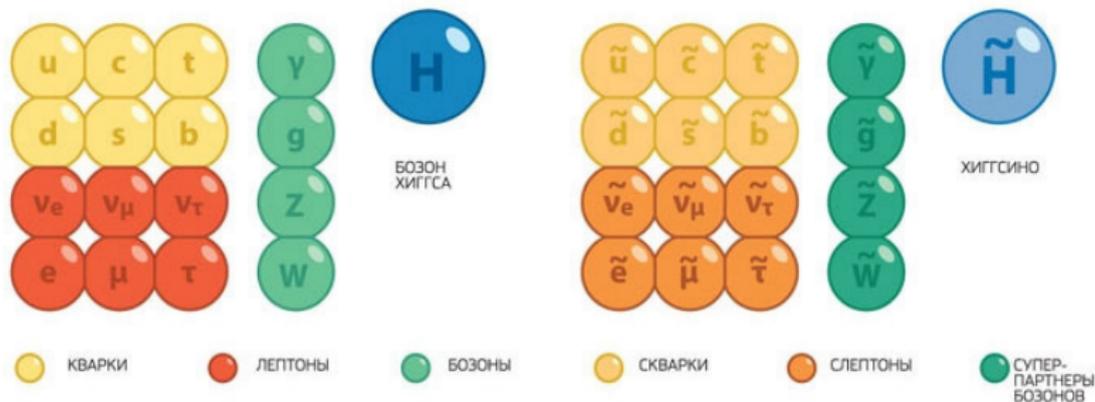


Может быть, сильное и электрослабое взаимодействие — **всего лишь осколки** какого-то единого универсального взаимодействия?!

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

Суперсимметрия

МИНИМАЛЬНАЯ СУПЕРСИММЕТРИЧНАЯ СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ



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

Так какая же идея Новой физики верна?



Коллайдер, помоги!