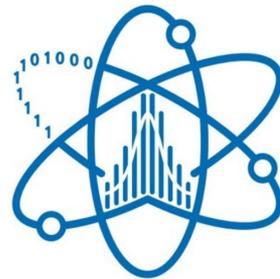


Введение в физику частиц и анализ экспериментальных данных

1 лекция



Введение

Что такое физика частиц и физика высоких энергий?

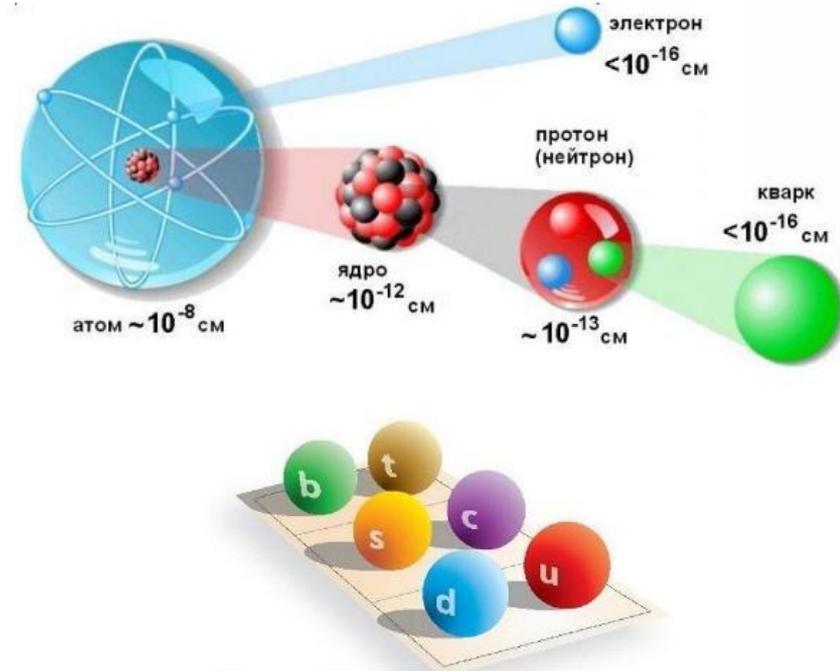
Физика частиц изучает **элементарные частицы** – самые фундаментальные составляющие материи и их взаимодействия. Она объясняет:

- Из чего состоит Вселенная?
- Какие силы управляют материей?
- Как Вселенная эволюционировала до сегодняшнего состояния?

Почему нужны высокие энергии?

- Чем **меньше частица**, тем **больше энергии** требуется, чтобы её увидеть.
- Чтобы исследовать элементарные частицы, используются **ускорители** (например, LHC), где создаются **высокоэнергетические столкновения**

🎯 Физика частиц объясняет структуру Вселенной. Физика высоких энергий даёт инструменты для её изучения.



Фундаментальные частицы и их масштабы

Стандартная модель физики частиц



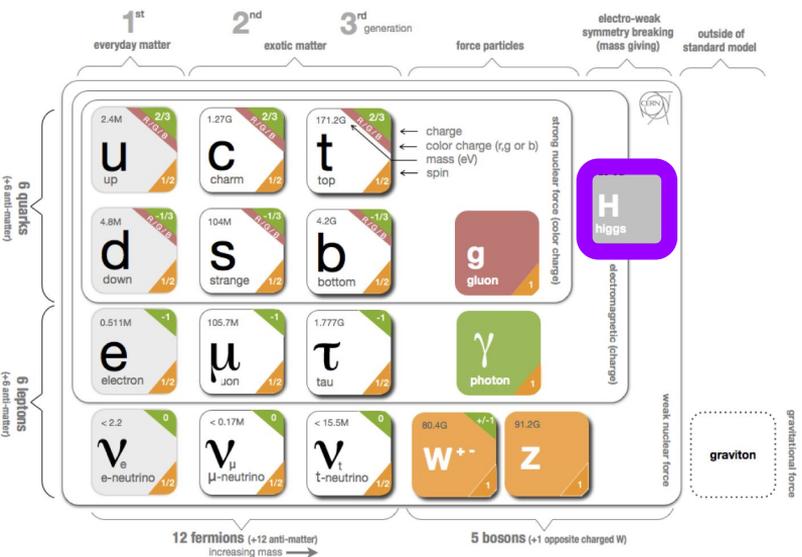
Стандартная модель (СМ) – это **фундаментальная теория**, описывающая **элементарные частицы** и их **взаимодействия**.

СМ включает два класса частиц:

- **Фермионы** – частицы материи (**кварки и лептоны**).
- **Бозоны** – переносчики фундаментальных взаимодействий (**фотон, глюоны, W/Z**) и Хиггс бозон.

Почему СМ важна?

- Объясняет широкий спектр явлений в физике частиц.
- Предсказания теории **совпадают с экспериментами**.
- Открытие бозона Хиггса подтвердило механизм массы.



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Формула Лагранжиана Стандартной модели включает все фундаментальные взаимодействия.

Фермионы – частицы материи



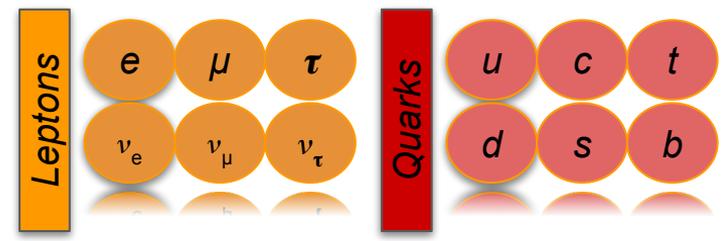
Фермионы – это **фундаментальные частицы с полуцелым спином ($1/2$)**, из которых состоит вся материя.

Существуют два типа фермионов:

- **Кварки (quarks)** – участвуют в сильном взаимодействии.
- **Лептоны (leptons)** – не взаимодействуют сильным образом.

Фермионы организованы в три поколения:

- **1-е поколение:** u, d, e^-, ν_e – обычная материя.
- **2-е поколение:** c, s, μ^-, ν_μ – более тяжёлые копии.
- **3-е поколение:** t, b, τ^-, ν_τ – ещё более массивные.



Античастицы

Для каждой частицы существует **античастица**, которая:

- Имеет **ту же массу, спин и импульс**,
- но **обладает противоположными зарядами** (электрическим, цветовым и др.).

💡 Какие примеры античастиц вы можете назвать?

Фермионы: первое поколение

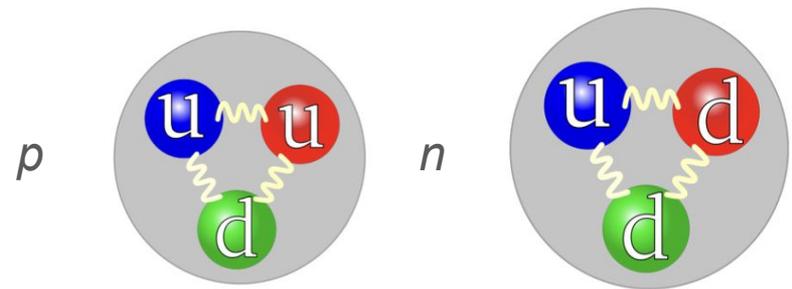


- Почти вся материя во Вселенной состоит из частиц первого поколения.

Частица	Символ	Тип	Заряд [e]
Электрон	e^-	лептон	-1
Нейтрино	ν_e	лептон	0
Up кварк	u	кварк	+2/3
Down кварк	d	кварк	-1/3

Протоны и нейтроны

- Протон (p) и нейтрон (n) – наиболее стабильные составные частицы, состоящие из трёх кварков.
- Протон состоит из двух u-кварков и одного d-кварка (uud).
- Нейтрон состоит из двух d-кварков и одного u-кварка (udd).
- Они образуют атомные ядра, поэтому атомная и ядерная физика фокусируются именно на этих частицах.



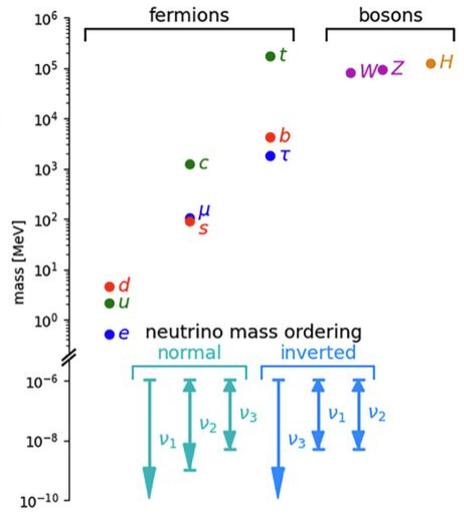
Структура протона и нейтрона

Фермионы: три поколения



- Фермионы (частицы материи) делятся на **три поколения**, отличающиеся массой и стабильностью.

1 поколение	2 поколение	3 поколение
Электрон (e ⁻)	Мюон (μ)	Тау лептон (τ)
Электронное нейтрино (ν _e)	Мюонное нейтрино (ν _μ)	Тау нейтрино (ν _τ)
Up quark (u)	Charm quark (c)	Top quark (t)
Down quark (d)	Strange quark (s)	Bottom quark (b)



Основные свойства поколений:

- Масса частиц увеличивается от первого к третьему поколению:
 - Частицы **первого поколения** (u, d, e⁻, ν_e) – самые лёгкие и **стабильные**.
 - Частицы **второго и третьего поколений** (c, s, μ⁻, ν_μ, t, b, τ⁻, ν_τ) – **тяжелее и нестабильны**, распадаются на более лёгкие.

Почему только три поколения?

- Мы знаем, что поколений **ровно три**, но **почему не больше?**
- Как природа **"выбирает"** массы частиц?

Распады лептонов:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

Фейнмановские диаграммы



Ричард Фейнман разработал графический метод для вычисления матричных элементов взаимодействий между фундаментальными частицами. Диаграммы Фейнмана следуют нескольким простым правилам и широко используются в физике частиц.

Топологические особенности диаграмм Фейнмана

Диаграммы Фейнмана непосредственно связаны с членами матричного элемента.

Обозначение частиц (и античастиц):

Спин 1/2	Кварки и лептоны	
Спин 1	γ, W^\pm, Z	
	g	

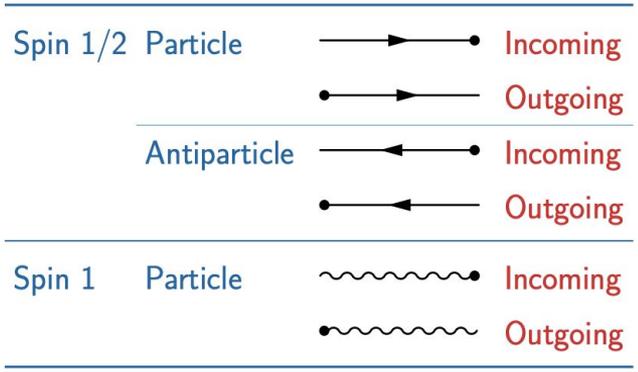
Каждая вершина взаимодействия обозначается точкой (\bullet).

- Каждый вертекс вносит множитель, равный константе связи g .

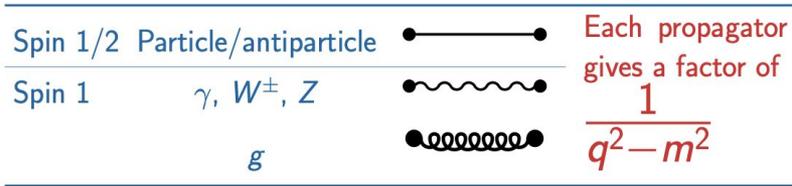
Фейнмановские диаграммы



- Внешние линии (реальные частицы, которые можно наблюдать)



- Внутренние линии (пропагаторы, виртуальные частицы)



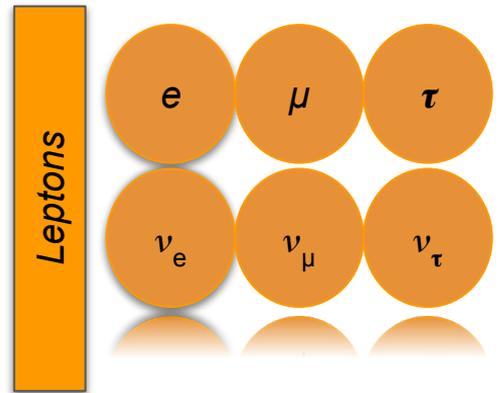
Фермионы: лептоны



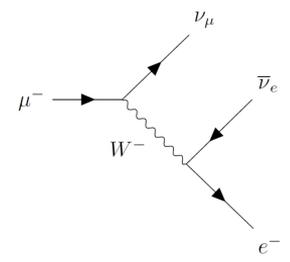
- Лептоны – это фермионы, которые **не участвуют в сильном взаимодействии**, но взаимодействуют через **слабые и электромагнитные силы**.
- Фермионы со спином 1/2.
- Существует **6 лептонов**.
- Заряженные лептоны: e^- , μ^- , τ^- .
- Нейтральные лептоны (**нейтрино**): ν_e , ν_μ , ν_τ .
- Существуют античастицы e^+ , ν_e^- и т. д.
- Электрон стабилен, а мюон и тау-лептон нестабильны.

Свойства нейтрино

- Нейтрино **стабильны** и практически **безмассовы**.
- Ограничения на массы нейтрино: $< 1 \text{ эВ}/c^2$ (измерено по разнице масс).
- Заряженные лептоны испытывают только **электромагнитное и слабое взаимодействие**.
- Нейтрино взаимодействуют только через **слабое взаимодействие**.



Распады лептонов:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$
$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$
$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$


Фермионы: кварки

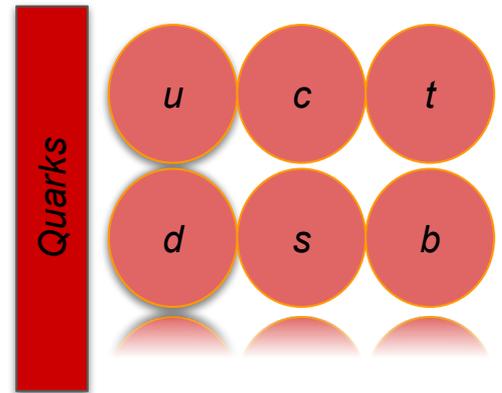


Кварки — это фермионы, которые участвуют во **всех фундаментальных взаимодействиях: сильном, слабом, электромагнитном.**

- Фермионы со спином 1/2.
- Существует **6 кварков**, сгруппированных в три поколения.
- Обладают **дробным электрическим зарядом:**

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

- **+2/3 (up-type: u, c, t)**
- **-1/3 (down-type: d, s, b)**
- Кварки не существуют в свободном виде, они объединяются в адроны:
 - **Барионы:** p = (uud)
 - **Мезоны:** π⁺=(u \bar{d})
- Кварки обладают **цветовым зарядом** в квантовой хромодинамике (QCD).
 - **Три "цвета": Красный, Зелёный, Синий (RGB).**
- **Цветовой заряд** аналогичен электрическому заряду, но имеет **три состояния** вместо двух.



Фейнмановская диаграмма для распада пиона:
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

- Кварки аннигилируют → образуется W⁺.
- W⁺ распадается на пару лептонов μ^+ и ν_μ .

Фермионы: адроны



Свободные кварки никогда не наблюдались. Они всегда существуют в связанных состояниях, называемых **адронами**.

Мезоны (qq)

- Связанные состояния **кварка и антикварка**.
- Обладают **целым спином (0, 1, 2...)**, т.е. являются **бозонами**.

Примеры мезонов:

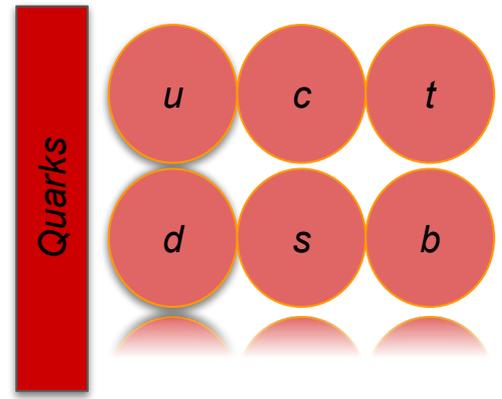
- **Положительный пион:**
- **Отрицательный пион** (античастица π^+):
- **Нейтральный пион** (собственная античастица):

Барионы (qqq)

- Связанные состояния **трёх кварков**.
- Обладают **полуцелым спином (1/2, 3/2, ...)**, т.е. являются **фермионами**.

Примеры барионов:

- **Протон:** $p \equiv (uud), Q = ?$
- **Нейтрон:** $n \equiv (dud), Q = ?$



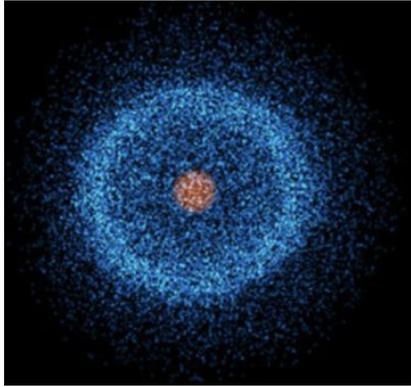
$$\pi^+ \equiv (u\bar{d}), \quad Q = \left(+\frac{2}{3} + +\frac{1}{3} \right) e = +1e$$

$$\pi^- \equiv (\bar{u}d), \quad Q = \left(-\frac{2}{3} + -\frac{1}{3} \right) e = -1e$$

$$\pi^0 \equiv \frac{(u\bar{u} - d\bar{d})}{\sqrt{2}}, \quad Q = 0$$

Задание: построить Фейнман диаграммы

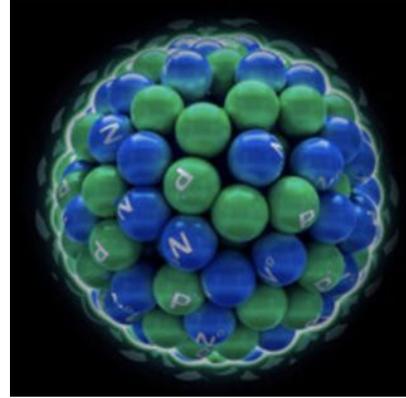
Фундаментальные взаимодействия



Переносчик: фотон (γ).

Роль: Определяет взаимодействие заряженных частиц.

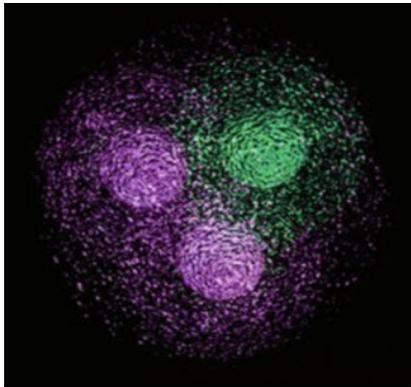
- Описывается **квантовой электродинамикой (QED)**.
- Бесконечно дальнедействующее, но ослабевает с расстоянием.



Переносчик: глюон (g).

Роль: Удерживает кварки вместе в адронах и связывает протоны и нейтроны в ядре атома.

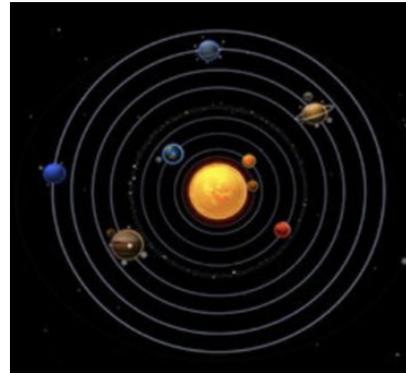
- Описывается **квантовой хромодинамикой (QCD)**.
- Обладает свойством **конфайнмента** – кварки не могут существовать в свободном виде.



Переносчики: W и Z-бозоны.

Роль: Отвечает за радиоактивный распад частиц.

- Описывается **теорией электрослабого взаимодействия**.
- Может изменять кварковый состав частиц (например, β -распад).



Гип. переносчик: гравитон (G).

Роль: Действует между массивными частицами, удерживает планеты на орбитах.

- Самая слабая из фундаментальных сил.
- Описывается **Общей теорией относительности Эйнштейна**.



Бозоны – это частицы с **целым спином**, которые являются **переносчиками фундаментальных взаимодействий** в Стандартной модели.

1. **Фотон (γ)** – квант **электромагнитного взаимодействия**.
 - Не имеет массы и заряда.
 - Отвечает за взаимодействие между заряженными частицами, например, между электронами и протонами в атоме.
2. **Бозоны W и Z (80, 91 GeV)** – посредники **слабого взаимодействия**, которое играет ключевую роль в ядерных процессах, таких как **бета-распад**.
 - **W-бозон** существует в **положительно (W^+)** и **отрицательно (W^-)** заряженной форме.
 - **Z-бозон** нейтрален и отвечает за слабое нейтральное течение.
3. **Глюоны (g)** – переносчики **сильного взаимодействия**, которое связывает кварки в адронах (например, в протонах и нейтронах).
 - Уникальны тем, что **переносят цветовой заряд**, что делает сильное взаимодействие самым сложным из всех фундаментальных сил.
4. **Бозон Хиггса (H)** – **единственный известный скалярный бозон со спином 0**.
 - Возникает из **поля Хиггса** и отвечает за **механизм Хиггса**, который наделяет частицы массой.
 - Открытие бозона Хиггса в 2012 году стало важным подтверждением Стандартной модели.

Бозон Хиггса



В Стандартной модели постулируется существование **комплексного скалярного дублета**, который имеет **вакуумное среднее значение**. Это приводит к **спонтанному нарушению электрослабой симметрии**, что:

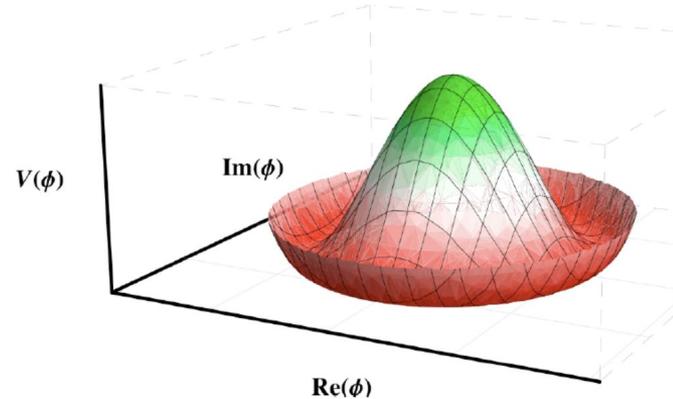
- Обеспечивает массы всем массивным элементарным частицам в теории.
- Приводит к появлению физической скалярной частицы – **бозона Хиггса**.

Что такое бозон Хиггса?

- Это **фундаментальная частица**, предсказанная **Броутом, Энглером и Хиггсом** в 1960-х годах.
- Экспериментально обнаружен в **2012 году детекторами ATLAS и CMS** на Большом адронном коллайдере.
- Бозон Хиггса является **переносчиком поля Хиггса**, которое присутствует во всей Вселенной.

Как работает механизм Хиггса?

- Частицы приобретают массу через **взаимодействие с полем Хиггса**.
- Чем **сильнее** частица взаимодействует с этим полем, тем **больше ее масса**.



Производство бозона Хиггса



- **Слияние глюонов (ggF – gluon fusion)**
 - a. **Доминирующий процесс** в производстве Хиггса.
 - b. Глюоны из протонов сталкиваются, образуя **петлевую диаграмму с топ-кварками**, которая затем рождает бозон Хиггса.

- **Слияние векторных бозонов (VBF – vector boson fusion)**
 - a. Два кварка испускают **W^\pm или Z- бозоны**, которые затем взаимодействуют и рождают бозон Хиггса.
 - b. Характерной особенностью процесса являются **два отлетевших кварка** («форвардные» джеты), которые помогают выделить этот канал.

- **Ассоциированное производство (VH и ttH)**
 - a. **VH-процесс:** Бозон Хиггса рождается вместе с **W^\pm или Z бозоном**.
 - b. **ttH-процесс:** Бозон Хиггса рождается **вместе с парой топ-кварков**.

Production mode	LO diagram
ggF production	
VBF production	
VH production	
q-q-bar H production	

Векторные бозоны = W^\pm и Z

Каналы распада



В **Стандартной модели** бозон Хиггса может **распадаться** как на пары фермионов, так и на пары бозонов.

Основные режимы распада (BR) для массы 125 ГэВ

На слайде представлена таблица **относительных вероятностей (BR) распада бозона Хиггса** при массе 125 ГэВ.

1. **Распад в адроны (~70%)**
 - Основной канал – распад в **b-кварки** ($H \rightarrow b\bar{b}$).
2. **Распад в нейтрино (~20%)**
 - Хиггс может распадаться на **нейтрино** через промежуточные лептоны.
3. **Лептонные распады (~10%)**
 - Основные: $H \rightarrow e^+e^-$, $H \rightarrow \mu^+\mu^-$, $H \rightarrow \tau^+\tau^-$.
 - **Электроны и мюоны восстанавливаются с большей эффективностью**, что делает их важными каналами для анализа.

Decay channel	Branching ratio	Rel. uncertainty
$H \rightarrow \gamma\gamma$	2.28×10^{-3}	+5.0% -4.9%
$H \rightarrow ZZ$	2.64×10^{-2}	+4.3% -4.1%
$H \rightarrow W^+W^-$	2.15×10^{-1}	+4.3% -4.2%
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.32×10^{-2}	+5.7% -5.7%
$H \rightarrow b\bar{b}$	5.77×10^{-1}	+3.2% -3.3%
$H \rightarrow Z\gamma$	1.54×10^{-3}	+9.0% -8.9%
$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	2.19×10^{-4}	+6.0% -5.9%

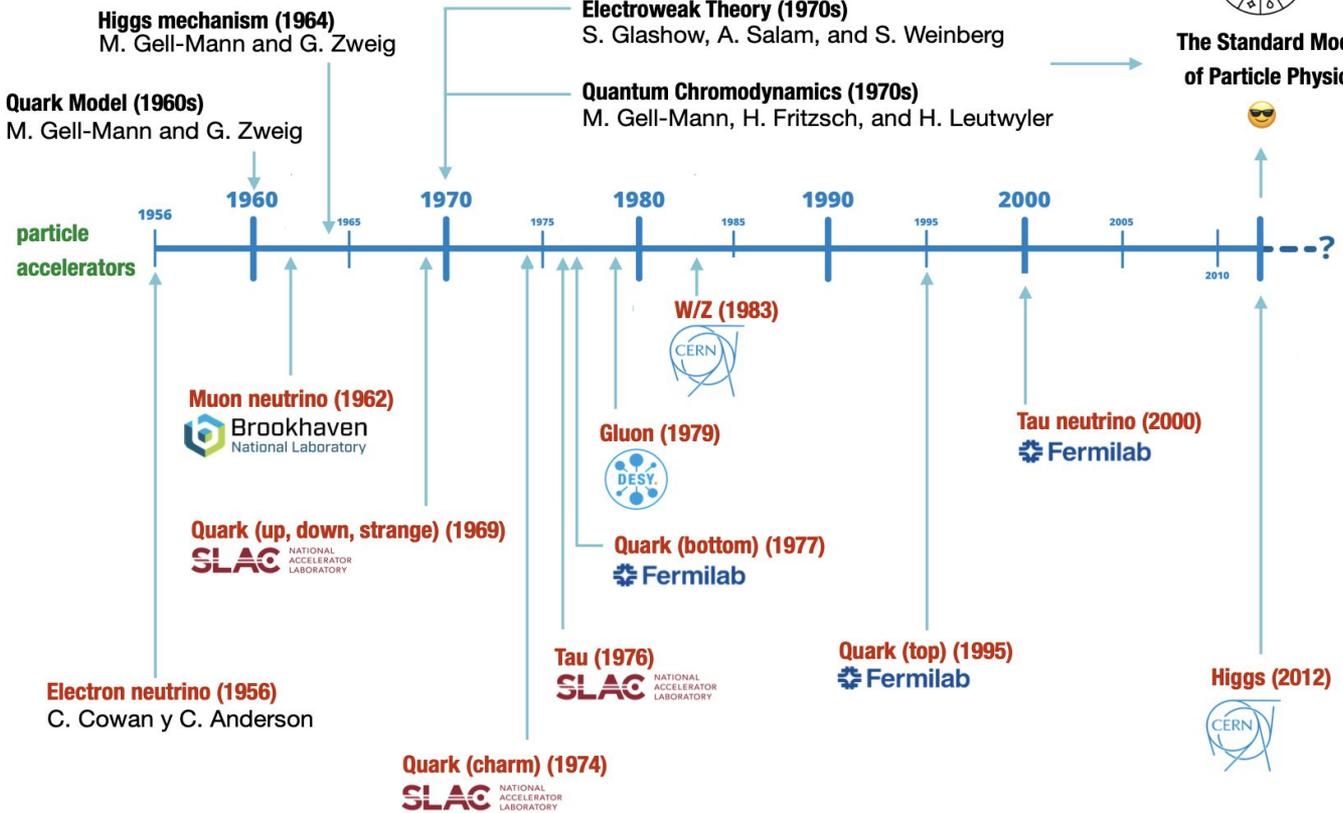
Немного истории

Towards the Modern Era: The Standard Model and Beyond

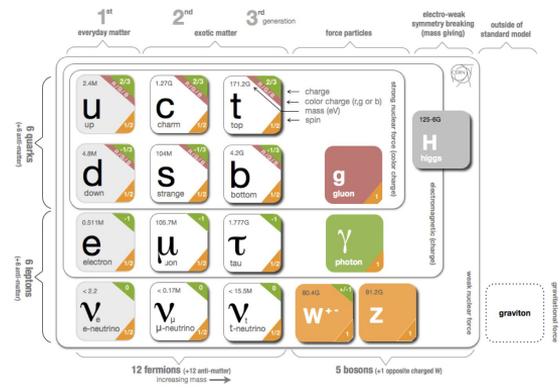
• The development of the SM was a hard road! 😓



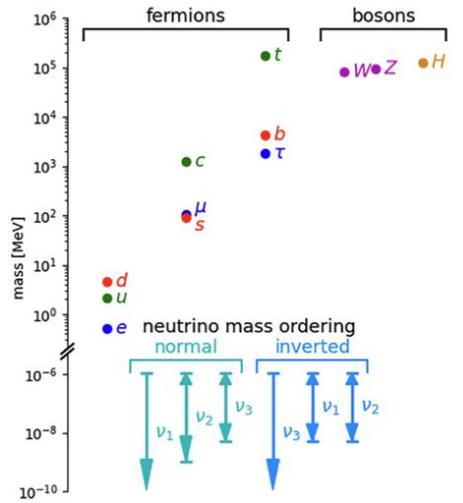
The Standard Model of Particle Physics



Стандартная модель физики частиц



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\
 & + i\bar{\psi} \not{D} \psi \\
 & + \chi_i^\dagger y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\
 & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)
 \end{aligned}$$



Стандартная модель (SM) содержит в общей сложности 19 свободных параметров:

- Константы калибровочной связи (слабое взаимодействие, электромагнетизм, сильное взаимодействие).
- Массы кварков (up, down, charm, strange, top, bottom).
- Массы лептонов (электрон, мюон, тау-лептон).
- Параметры смешивания кварков (матрица CKM) – флейворное смешивание.
- Сектор Хиггса (константа самосвязи, вакуумное ожидание и масса).

Если учитывать массы и смешивание нейтрино, общее число свободных параметров увеличивается до 26:

- Массы нейтрино.
- Параметры смешивания лептонов (матрица PMNS) – флейворное смешивание (нейтрино).

Стандартная модель и новая физика

Нет гравитации

No verified theory of quantum gravity

Нет нейтрино масс

Are they Dirac or Majorana particles?

Естественность

Higgs field parameters seem highly fine-tuned

Нет темной материи

But needed to explain astrophysical observations

Нет темной энергии

The universe is in accelerated expansion invisible source of energy?

Несимметричность материи и антиматерии

To explain dominance of matter today

Почему 3 поколения фермионов?

Underlying symmetry connecting quark and lepton sectors?

Иерархическая структура Юкава-констант?

Why is the top quark so heavy?

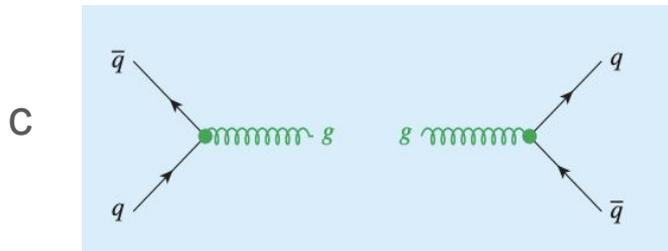
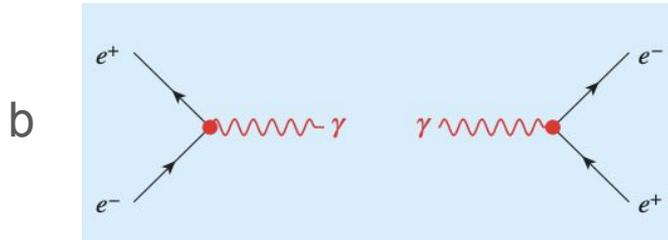
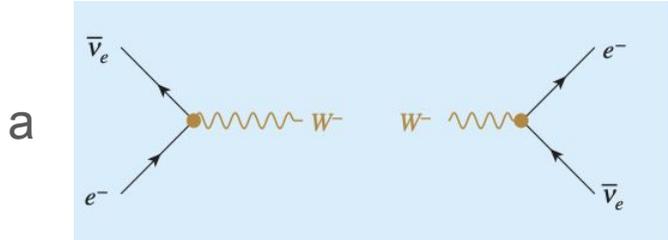
Заключение

Таким образом, на сегодняшней лекции мы познакомились с фундаментальными концепциями физики частиц:

- Мы рассмотрели, что изучает физика элементарных частиц и почему для её исследования необходимы высокие энергии.
- Изучили Стандартную модель, её составляющие – фермионы и бозоны, и разобрали, как элементарные частицы организованы в поколения.
- Познакомились с методом Фейнмана, который позволяет графически представлять взаимодействия частиц.
- Обсудили фундаментальные взаимодействия – электромагнитное, слабое, сильное и затронули гравитационное – и увидели, как они реализуются через переносчиков: фотон, глюоны, W/Z -бозоны и гипотетический гравитон.
- Подробно разобрали роль бозона Хиггса и механизм, через который частицы приобретают массу.
- Рассмотрели экспериментальные аспекты – производство и распад бозона Хиггса, а также нерешённые проблемы, стоящие за пределами Стандартной модели.

Quiz-test

1. Какие взаимодействия изображены на диаграммах?



2. Чем отличаются кварки от лептонов?

3. Что такое калибровочные бозоны и почему они не относятся к фермионам?

4. Какую роль играет бозон Хиггса в Стандартной модели и почему он выделен отдельно на схеме?