

Нерешённые проблемы физики элементарных частиц

С.В. Троицкий

Институт ядерных исследований РАН,
кафедра физики частиц и космологии физического ф-та МГУ

физфак МГУ, 6 октября 2009

Нерешённые проблемы физики частиц

План:

1. Введение
современное состояние физики частиц
2. Стандартная модель
частицы и взаимодействия
3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
осцилляции нейтрино
4. Проблемы электрослабой теории
масса бозона Хиггса
5. Проблемы теории сильных взаимодействий
от кварков к адронам
6. Эстетические проблемы
параметры Стандартной модели
7. Выводы
современное состояние физики частиц

Нерешённые проблемы физики частиц

План:

- 1. Введение**
современное состояние физики частиц
2. Стандартная модель
частицы и взаимодействия
3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
осцилляции нейтрино
4. Проблемы электрослабой теории
масса бозона Хиггса
5. Проблемы теории сильных взаимодействий
от кварков к адронам
6. Эстетические проблемы
параметры Стандартной модели
7. Выводы
современное состояние физики частиц

Введение

современное состояние физики частиц

предмет изучения?

**физика элементарных частиц =
субъядерная физика**

(частицы могут быть составными=не-элементарными)



Введение

современное состояние физики частиц

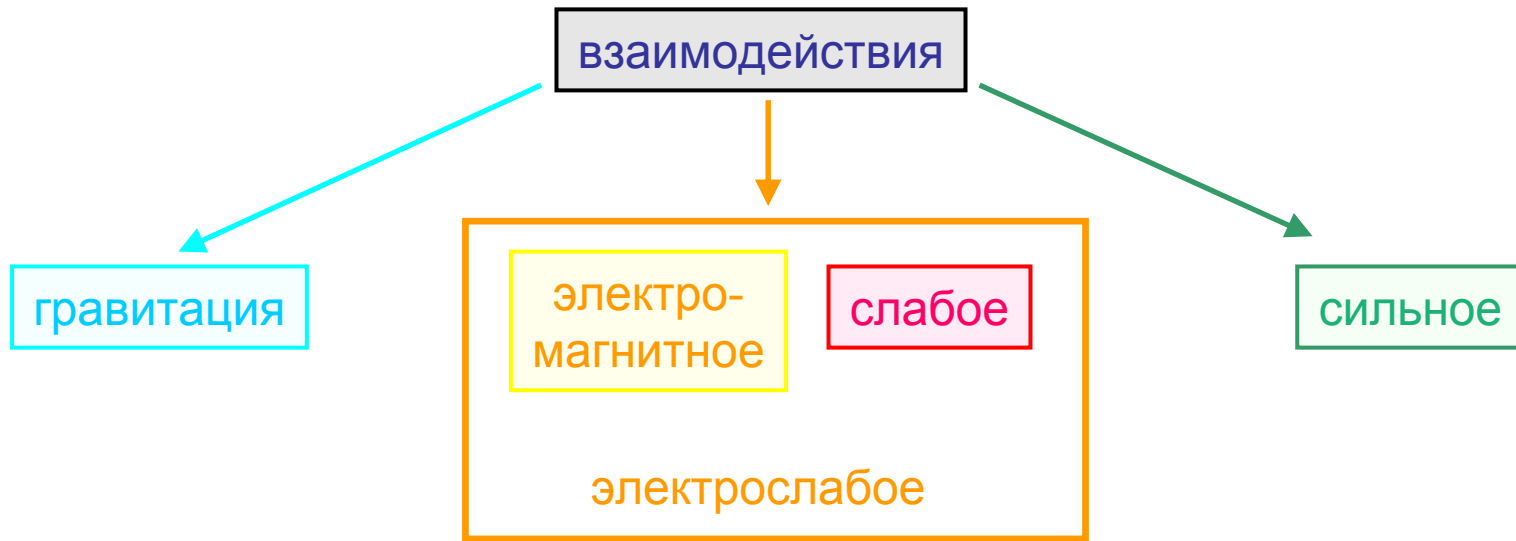
- Имеется **Стандартная модель** физики элементарных частиц
- Стандартная модель даёт прекрасное описание результатов **подавляющего большинства** экспериментов
- Стандартная модель имеет теоретические и эстетические **проблемы**
- Стандартная модель **неспособна** описать результаты астрофизических наблюдений, в частности, относящихся к строению и эволюции Вселенной

Нерешённые проблемы физики частиц

План:

1. Введение
современное состояние физики частиц
- 2. Стандартная модель**
частицы и взаимодействия
3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
осцилляции нейтрино
4. Проблемы электрослабой теории
масса бозона Хиггса
5. Проблемы теории сильных взаимодействий
от кварков к адронам
6. Эстетические проблемы
параметры Стандартной модели
7. Выводы
современное состояние физики частиц

Стандартная модель взаимодействия



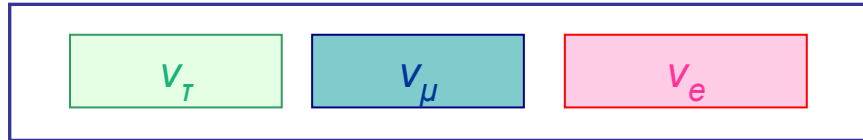
Электрослабое объединение:
блестящие экспериментальные подтверждения

Сильное взаимодействие:
сила растет с расстоянием!

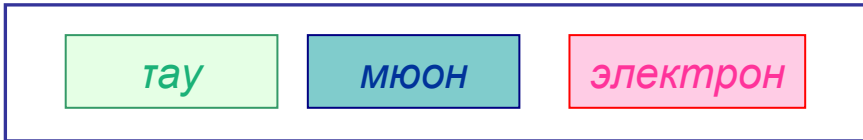
- асимптотическая свобода (малые расстояния)
- конфайнмент (большие расстояния)

Стандартная модель

частицы

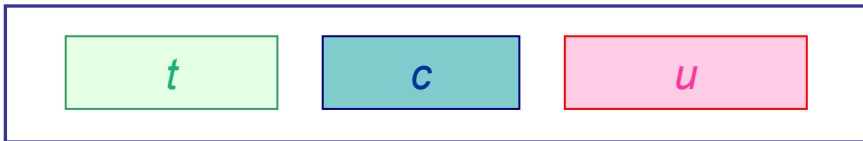


нейтрино



заряженные лептоны

ЛЕПТОНЫ



«верхние» кварки



«нижние» кварки

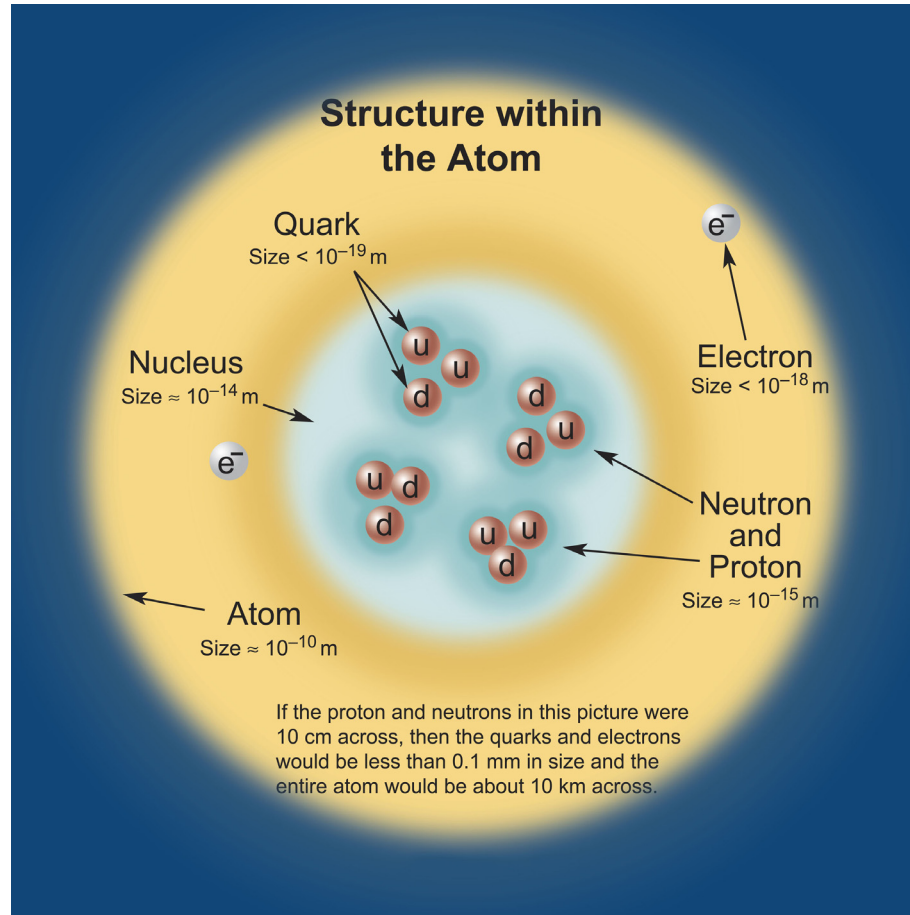
кварки

частицы – переносчики взаимодействий:

электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z

сильного: глюоны

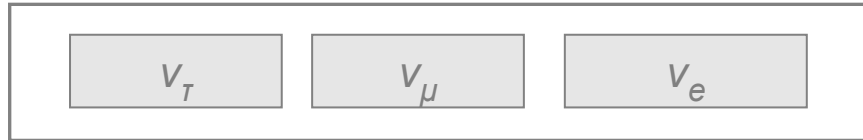
Стандартная модель частицы



МИР СОСТОИТ (В ОСНОВНОМ) ИЗ АТОМОВ...

Стандартная модель

частицы, встречающиеся в быту



нейтрино



заряженные лептоны

ЛЕПТОНЫ



«верхние» кварки

p=uud, n=udd



«нижние» кварки

кварки

частицы – переносчики взаимодействий:

электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z

сильного: глюоны

Стандартная модель

частицы, встречающиеся в быту

электрон

$p=uud, n=udd$

фотон

где же все остальные частицы?..

- нейтрино не взаимодействует электромагнитно
- более тяжелые распадаются на более легкие
- конфайнмент:
сильновзаимодействующие кварки и глюоны связаны в адроны

Стандартная модель частицы и взаимодействия

физика

заряженных лептонов,
фотонов,
W и Z бозонов } – при всех изученных энергиях,

кварков и глюонов – при высоких энергиях

**прекрасно описывается
Стандартной моделью**

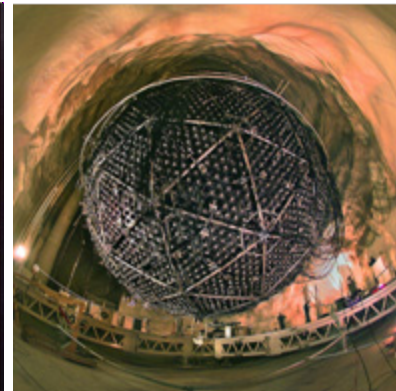
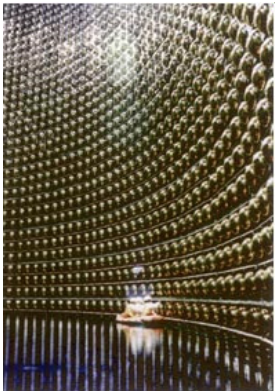
Нерешённые проблемы физики частиц

План:

1. Введение
современное состояние физики частиц
2. Стандартная модель
частицы и взаимодействия
- 3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
*осцилляции нейтрино***
4. Проблемы электрослабой теории
масса бозона Хиггса
5. Проблемы теории сильных взаимодействий
от кварков к адронам
6. Эстетические проблемы
параметры Стандартной модели
7. Выводы
современное состояние физики частиц

Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели *осцилляции нейтрино*

- нейтрино в Стандартной модели строго безмассовое!
- масса нейтрино экспериментально не зарегистрирована
- осцилляции нейтрино (превращения нейтрино в нейтрино другого типа) возможны только для массивных нейтрино
- многочисленные эксперименты зарегистрировали превращения нейтрино



...

- точность этих экспериментов несравненно ниже, чем экспериментов по проверке электрослабой теории

Нерешённые проблемы физики частиц

План:

1. Введение
современное состояние физики частиц
2. Стандартная модель
частицы и взаимодействия
3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
осцилляции нейтрино
- 4. Проблемы электрослабой теории**
масса бозона Хиггса
5. Проблемы теории сильных взаимодействий
от кварков к адронам
6. Эстетические проблемы
параметры Стандартной модели
7. Выводы
современное состояние физики частиц

Проблемы электрослабой теории (намечающиеся экспериментальные)

Требуется **бозон Хиггса** – единственная до сих пор не найденная частица Стандартной модели.

- Прямой поиск рождения бозона Хиггса на ускорителях



- Уровень точности других экспериментов

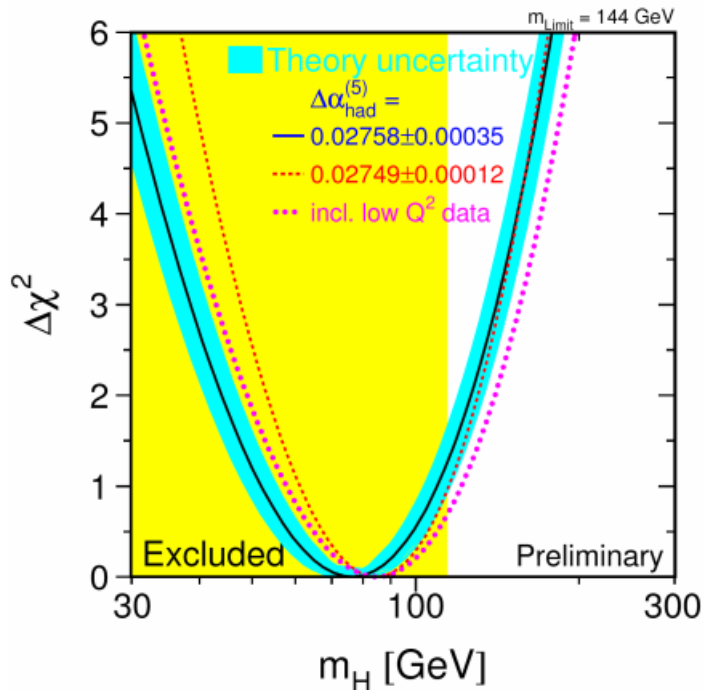


влияние бозона Хиггса на совсем другие процессы может быть заметно



предпочтительные значения его массы

Проблемы электрослабой теории (намечающиеся экспериментальные)



Требуется бозон Хиггса – единственная до сих пор не найденная частица Стандартной модели элементарных частиц. Многочисленные измерения дают косвенные указания на наиболее вероятное значение его массы (минимум голубой полосы). Прямые поиски исключают массу в закрашенной жёлтым области, так что наиболее вероятное значение уже исключено экспериментально!

отсутствие лёгкого бозона Хиггса – повод задуматься о механизме электрослабого нарушения, а значит, и о Стандартной модели в целом

Нерешённые проблемы физики частиц

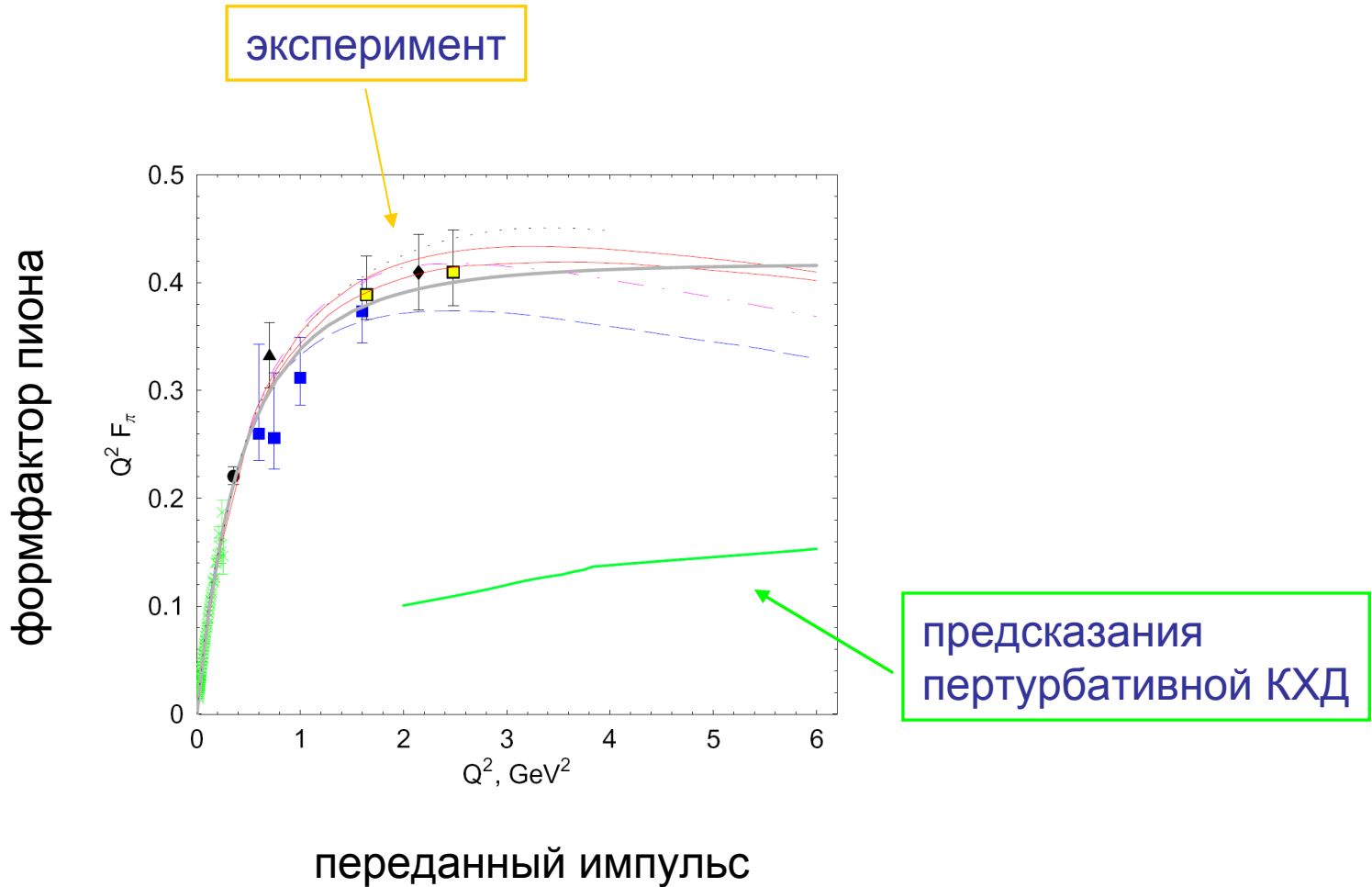
План:

1. Введение
современное состояние физики частиц
2. Стандартная модель
частицы и взаимодействия
3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
осцилляции нейтрино
4. Проблемы электрослабой теории
масса бозона Хиггса
- 5. Проблемы теории сильных взаимодействий
*от кварков к адронам***
6. Эстетические проблемы
параметры Стандартной модели
7. Выводы
современное состояние физики частиц

Проблемы теории сильных взаимодействий *от кварков к адронам*

- основной метод квантовой теории поля –
 теория возмущений по константе взаимодействия
- сильное взаимодействие = большая константа! (*и не только...*)
- **пертурбативное** описание не работает
- непертурбативного описания из КХД не существует

Проблемы теории сильных взаимодействий от кварков к адронам

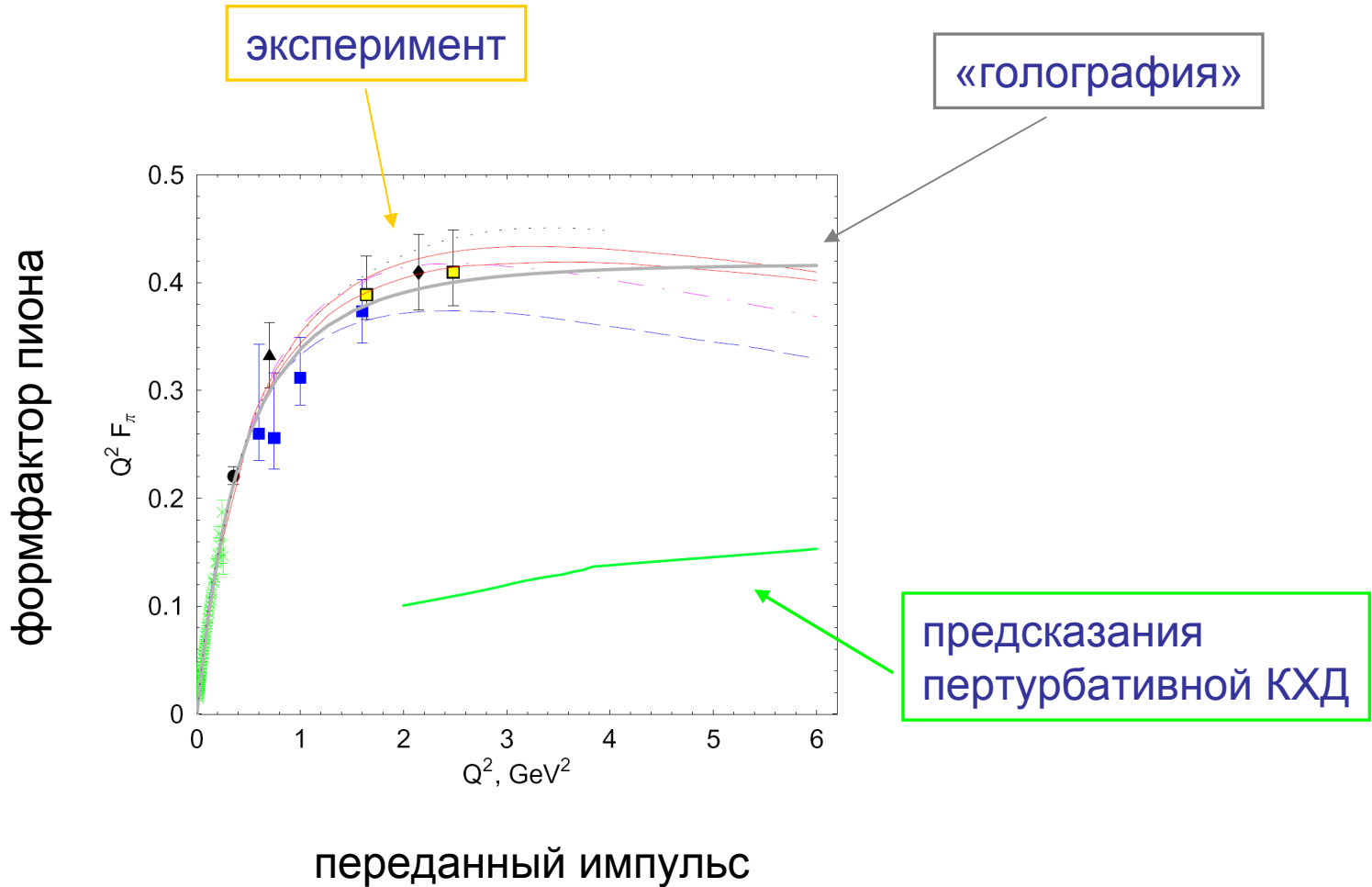


Проблемы теории сильных взаимодействий *от кварков к адронам*

- основной метод квантовой теории поля –
теория возмущений по константе взаимодействия
- сильное взаимодействие = большая константа! (*и не только...*)
- **пертурбативное** описание не работает
- непертурбативного описания из КХД не существует

Это **не** означает, что теория (КХД) – неправильная.
Это означает, что её нельзя применить и **проверить**
(в этой области энергий).

Проблемы теории сильных взаимодействий от кварков к адронам



Проблемы теории сильных взаимодействий *от кварков к адронам*

Многочисленные попытки связать **успешные** теории,
работающие при высоких и при низких энергиях

«Голография»...

теория с **сильным** взаимодействием в **(3+1)** измерениях
эквивалентна

теории со **слабым** взаимодействием в **(4+1)** измерениях
(слабым = несильным)

- это – **гипотеза**, а не строгий результат
- выдерживает многочисленные **проверки** на самосогласованность
- может быть доведена до сравнения с **экспериментом**
(ещё много работы...)
- это – **не** «многомерный мир»!

Нерешённые проблемы физики частиц

План:

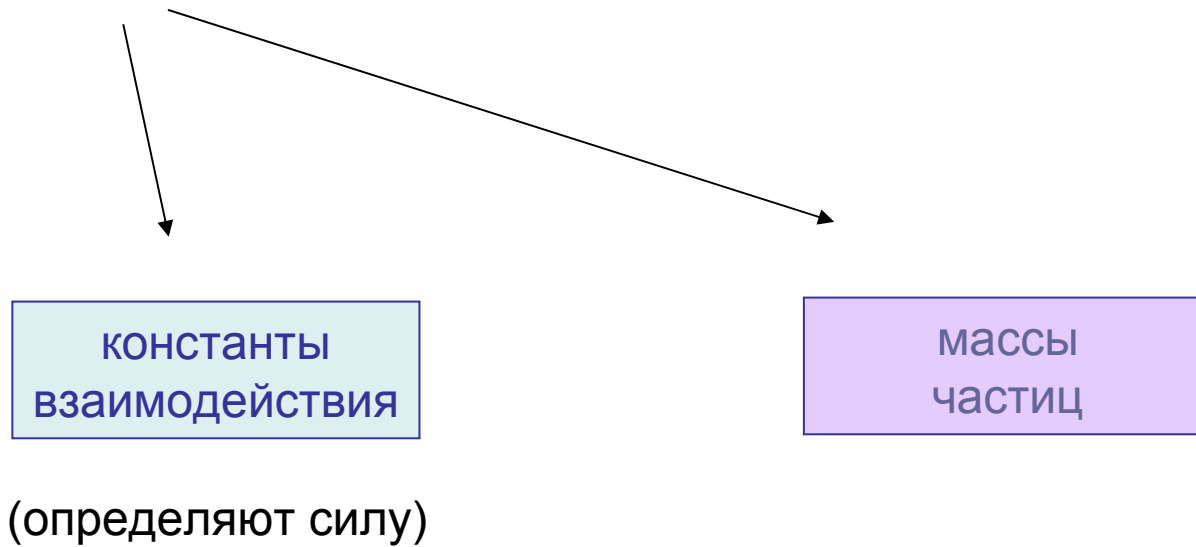
1. Введение
современное состояние физики частиц
2. Стандартная модель
частицы и взаимодействия
3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
осцилляции нейтрино
4. Проблемы электрослабой теории
масса бозона Хиггса
5. Проблемы теории сильных взаимодействий
от кварков к адронам
- 6. Эстетические проблемы**
параметры Стандартной модели
7. Выводы
современное состояние физики частиц

Эстетические проблемы *параметры Стандартной модели*

Может, тебе просто не нравится,
как мир устроен, ЙЦУКЕН?

Виктор Пелевин
«Акико»

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели



17 произвольных параметров
(не предсказываются теорией, а
измеряются экспериментально)

Эстетические проблемы *параметры Стандартной модели*

принцип натуральности:

все
безразмерные
параметры
примерно равны
единице!
(иначе их надо объяснить)

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели

константы
взаимодействия

- электромагнитного
- слабого
- сильного

- определяют силу взаимодействия
- зависят от расстояния («бег констант») (квантовые эффекты)

закон Кулона:

$$\frac{e^2}{r^2}$$



$$\frac{e(r)^2}{r^2}$$

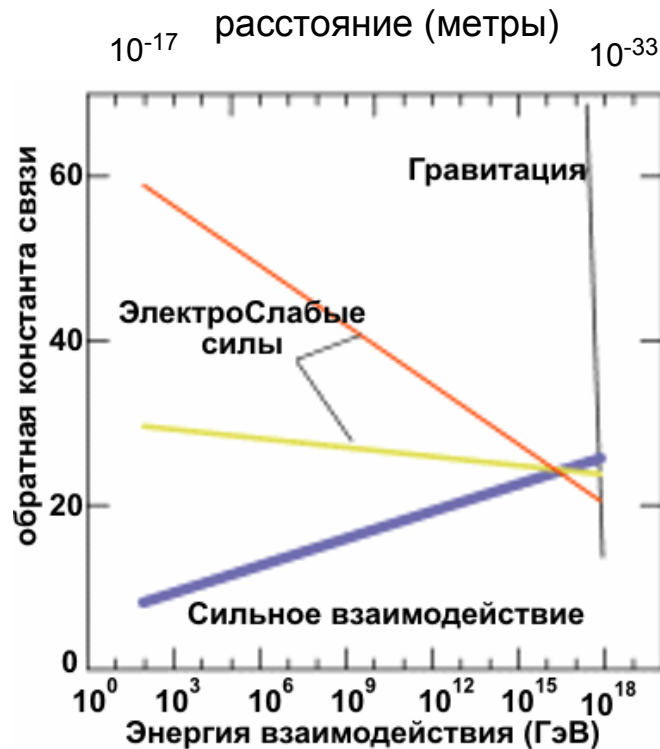
(условно...)

зависимость от расстояния вычислима
в квантовой теории поля!

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели

КОНСТАНТЫ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

- электромагнитного
- слабого
- сильного

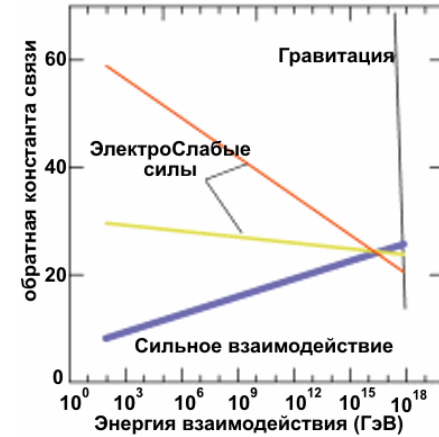


зависимость от расстояния вычислима в квантовой теории поля

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели

константы
взаимодействия

- электромагнитного
- слабого
- сильного



масштаб
электрослабого
объединения

масштаб
Большого
объединения гравитация

эксперименты



● известные частицы

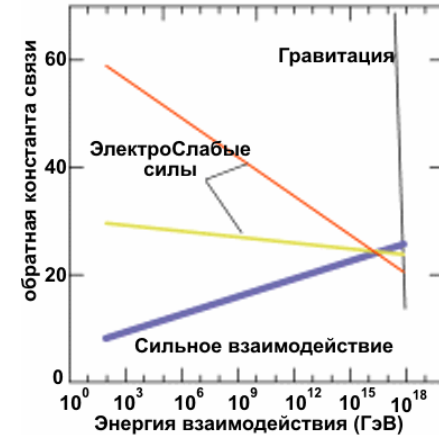
иерархия масштабов:

$$M_{\text{GUT}}/M_{\text{EW}} \sim 10^{14}$$

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели

константы
взаимодействия

иерархия масштабов:
 $M_{GUT}/M_{EW} \sim 10^{14}$



масштаб
электрослабого
объединения

масштаб
Большого
объединения гравитация

эксперименты



● известные частицы

- 1) происхождение иерархии (принцип натуральности)
- 2) «стабильность иерархии»
- подстраивать в каждом порядке теории возмущений

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели

константы
взаимодействия

- 1) происхождение иерархии (принцип натуральности)
- 2) «стабильность иерархии»
- подстраивать в каждом порядке теории возмущений

СУПЕРСИММЕТРИЯ:

- решает вопрос **стабильности** иерархии
- увеличивает число частиц примерно вдвое
- усложняет электрослабое нарушение
- **105** параметров вместо 17
- специальные соотношения между этими параметрами
- объяснение **происхождения** иерархии и этих соотношений требует дальнейшего усложнения теории
- **НО** есть красивые подходы!

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели

массы
частиц

иерархия трёх поколений

t
1777 МэВ

μ
106 МэВ

электрон
0.511 МэВ

заряженные лептоны

t
171000 МэВ

c
1270 МэВ

u
2 МэВ

«верхние» кварки

b
4200 МэВ

s
104 МэВ

d
5 МэВ

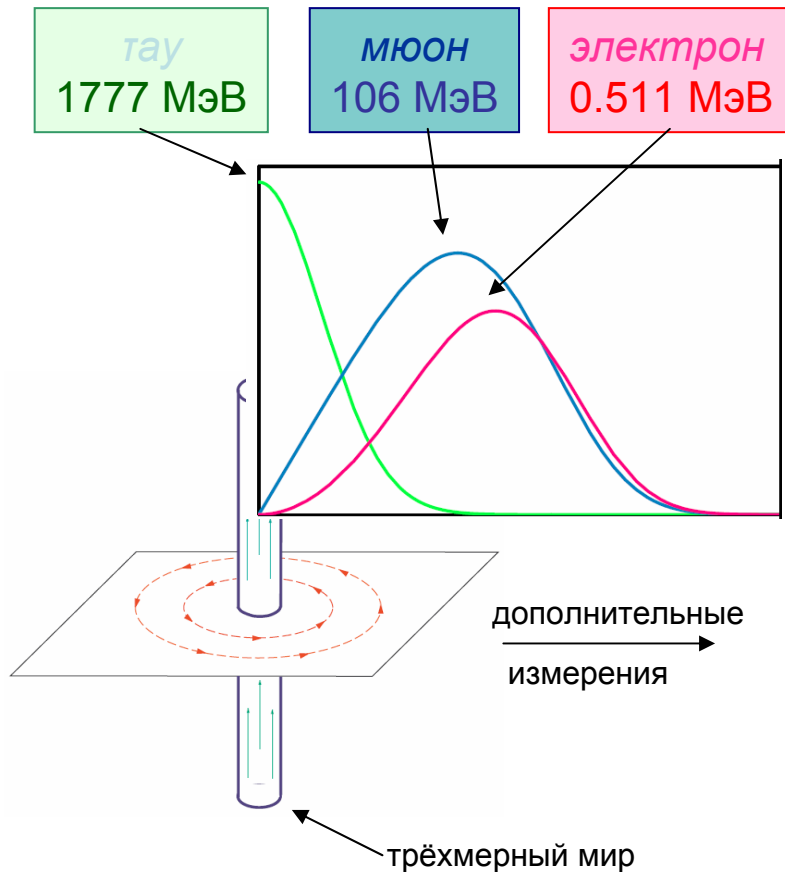
«нижние» кварки

В природе имеются три поколения элементарных частиц (кварков и лептонов). Соответствующие частицы трёх поколений взаимодействуют одинаково, но массы их отличаются на порядки.

Эстетические проблемы параметры Стандартной модели

массы
частиц

иерархия трёх поколений



Красивое объяснение даёт модель **многомерного мира**, в которой одно поколение частиц в 5-и пространственных измерениях эффективно описывает три поколения в 3-х измерениях, а иерархия масс является следствием линейной независимости собственных функций оператора Дирака. (см. следующую лекцию!)

Эстетические проблемы *параметры Стандартной модели*

Может, тебе просто не нравится,
как мир устроен, ЙЦУКЕН?

...

Не знаю, думай.

*Виктор Пелевин
«Акико»*

Нерешённые проблемы физики частиц

План:

1. Введение
современное состояние физики частиц
2. Стандартная модель
частицы и взаимодействия
3. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели
осцилляции нейтрино
4. Проблемы электрослабой теории
масса бозона Хиггса
5. Проблемы теории сильных взаимодействий
от кварков к адронам
6. Эстетические проблемы
параметры Стандартной модели
- 7. Выводы**
современное состояние физики частиц

Выводы

современное состояние физики частиц

- Имеется **Стандартная модель** физики элементарных частиц
- Стандартная модель даёт прекрасное описание результатов **подавляющего большинства** экспериментов
- Стандартная модель имеет теоретические и эстетические **проблемы**
- Стандартная модель **неспособна** описать результаты астрофизических наблюдений, в частности, относящихся к строению и эволюции Вселенной