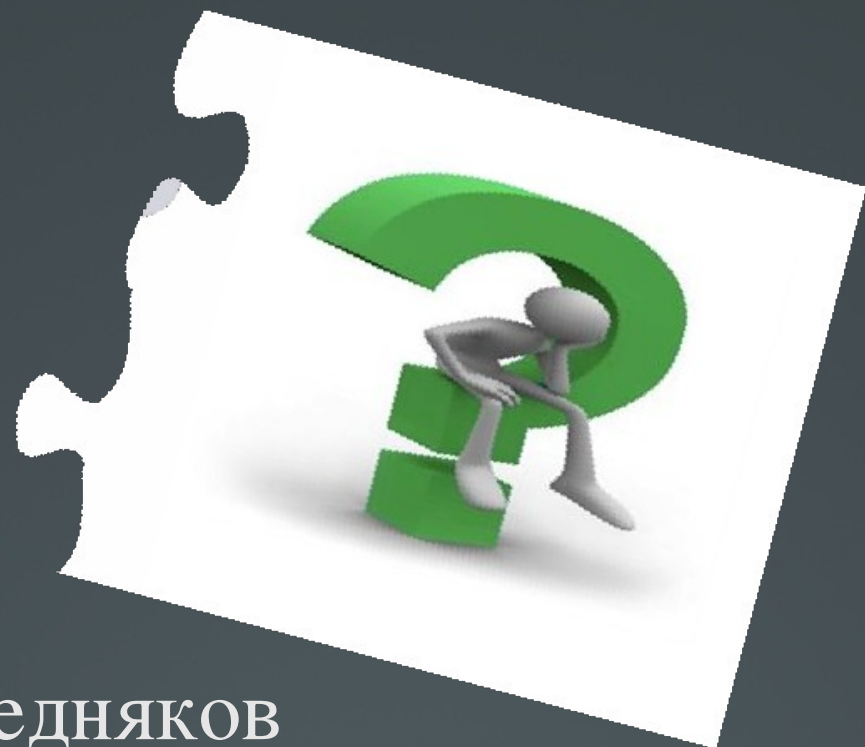
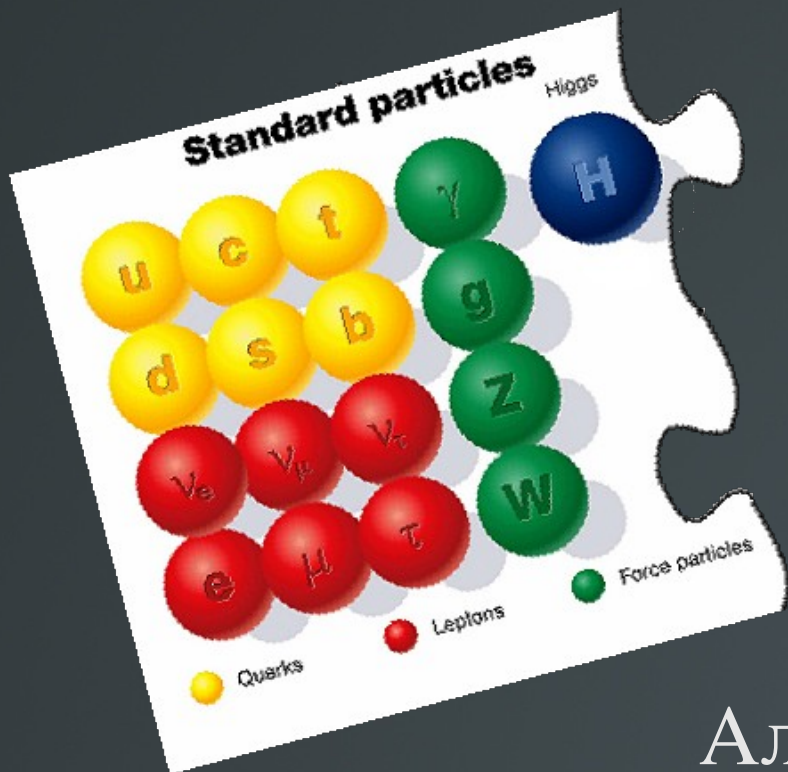


Суперсимметрия в физике частиц и астрофизике



Александр Бедняков

ЛТФ ОИЯИ



Успехи Стандартной Модели

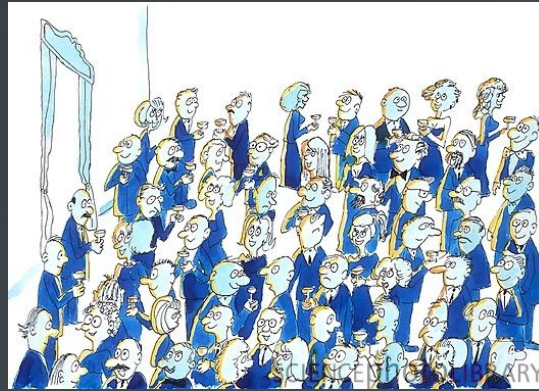
- ”Объединение” слабых и электромагнитных взаимодействий $SU(2) \times U(1)$
- Предсказание W и Z бозонов, а также c - и t -кварков, обнаруженных впоследствии экспериментально
-



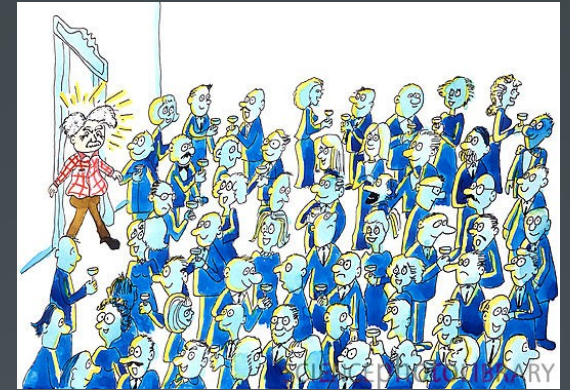
Открытые вопросы в Стандартной Модели

- Почему частицы имеют массу?

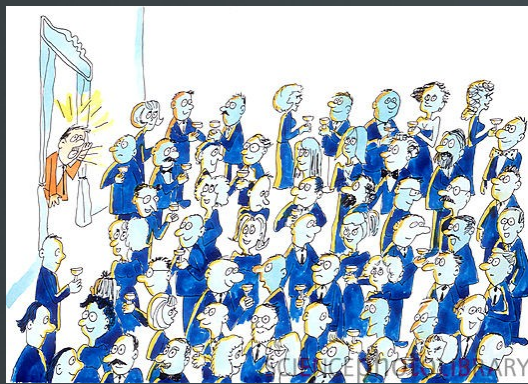
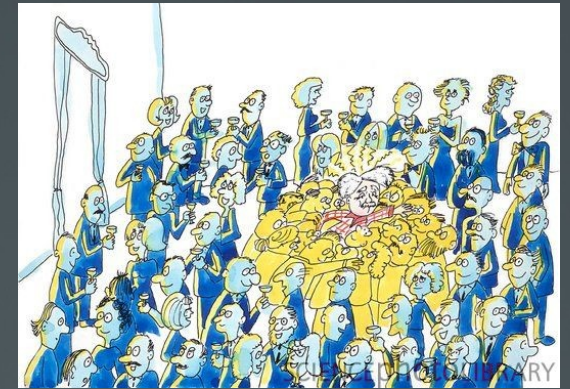
Вакуум



Частица



Бозон Хиггса



Открытые вопросы в Стандартной Модели

- Почему частицы имеют массу?

Бозон Хиггса

× Пока не найден!

× За счет

взаимодействия

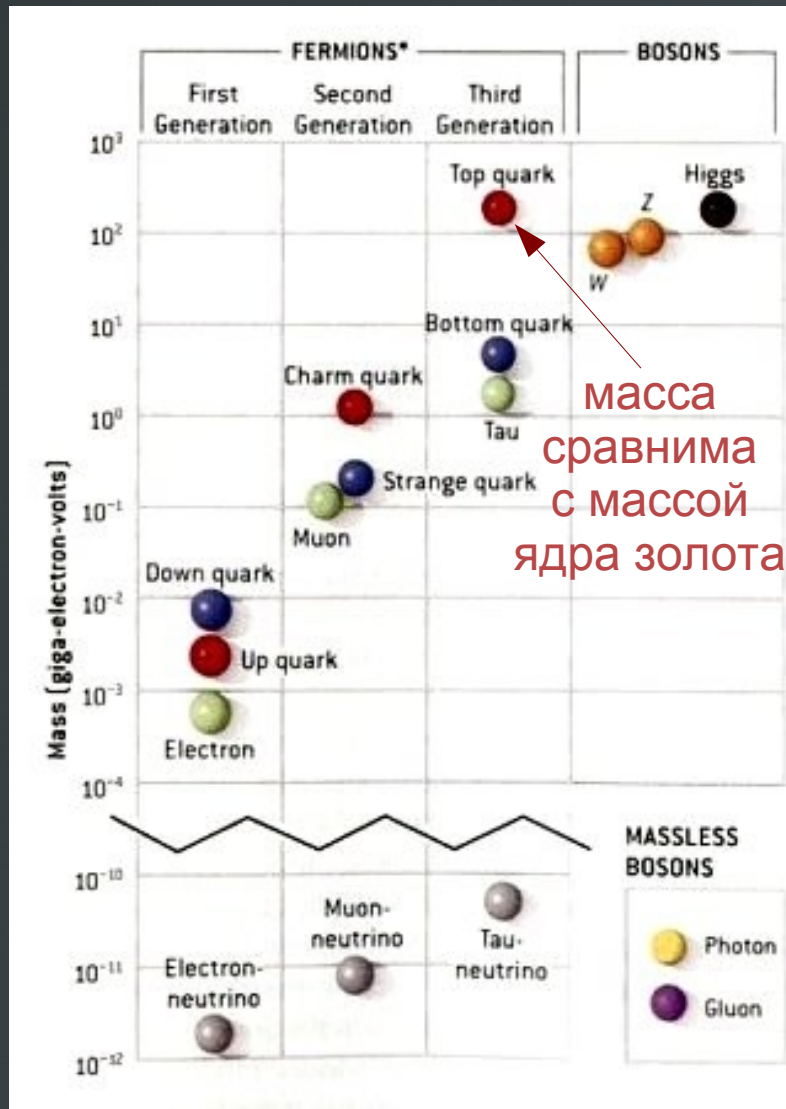


с очень массивными виртуальными частицами приобретает очень большую массу.

(проблема ИЕРАРХИИ)



Открытые вопросы в Стандартной Модели

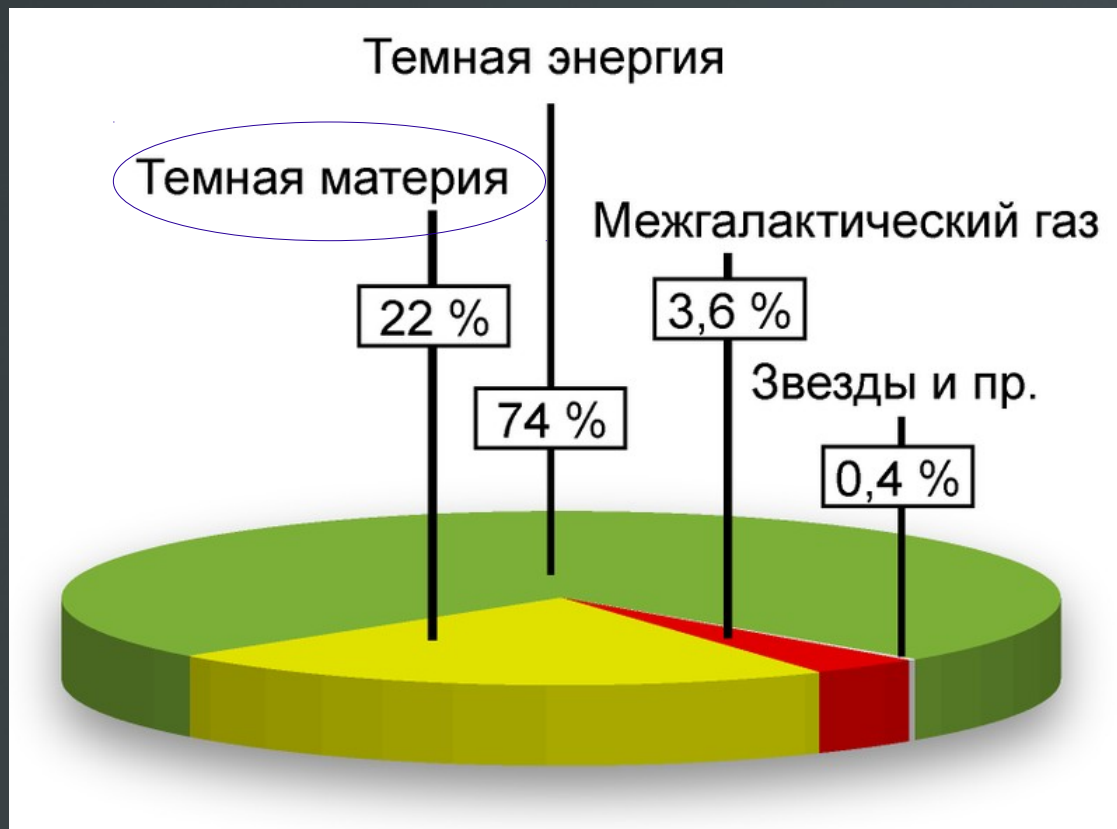


- Если массы частиц возникли за счет взаимодействия с полем Хиггса, то почему они так сильно различаются ?
- Почему существуют три поколения ?



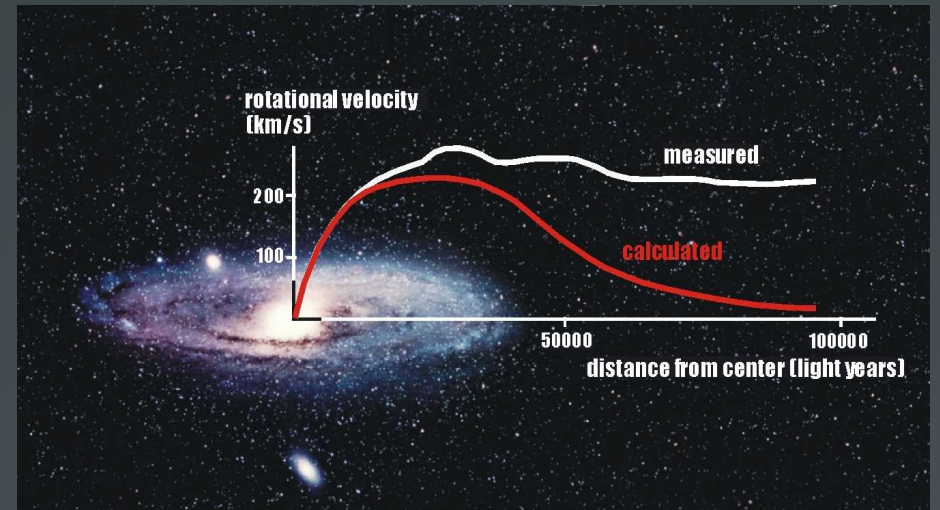
Открытые вопросы в Стандартной Модели

- Из чего состоит темная материя?



Необходимость тёмной материи


- Движение галактик под действием гравитационных сил



- Гравитационное линзирование



Открытые вопросы в Стандартной Модели

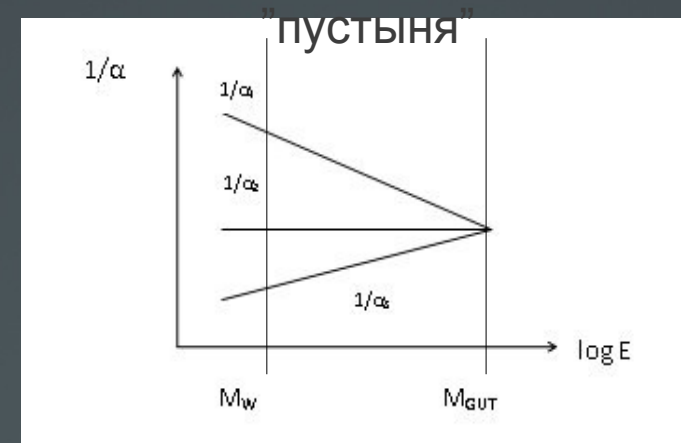
- Почему частицы имеют массу?
 - Почему массы частиц так сильно различаются ?
 - Почему существуют три поколения?
 - Из чего состоит темная материя?
 - Почему мы существуем? CP-нарушение..
 - Где же объединение взаимодействий?
 - Есть ли возможность уменьшить число параметров?
- 

Путь за пределы Стандартной модели

- СМ – эффективная низкоэнергетическая теория
- Предположение о существовании новых симметрий, лежащих в основе более фундаментальных моделей.

Теории **Великого Объединения**

при энергиях в **10000000000000000**
больших, чем энергия
сталкивающихся частиц
на LHC



Суперсимметрия

- Одна из возможностей решить некоторые проблемы СМ и заселить "Великую пустыню" новыми обитателями...

Симметрия между

Бозонами

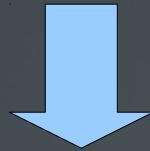


Фермионами

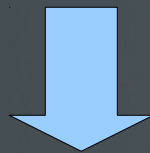
Следствие: Для каждого **фермиона** должен существовать брат-близнец **бозон**, взаимодействующий похожим образом

Суперсимметрия и Стандартная Модель

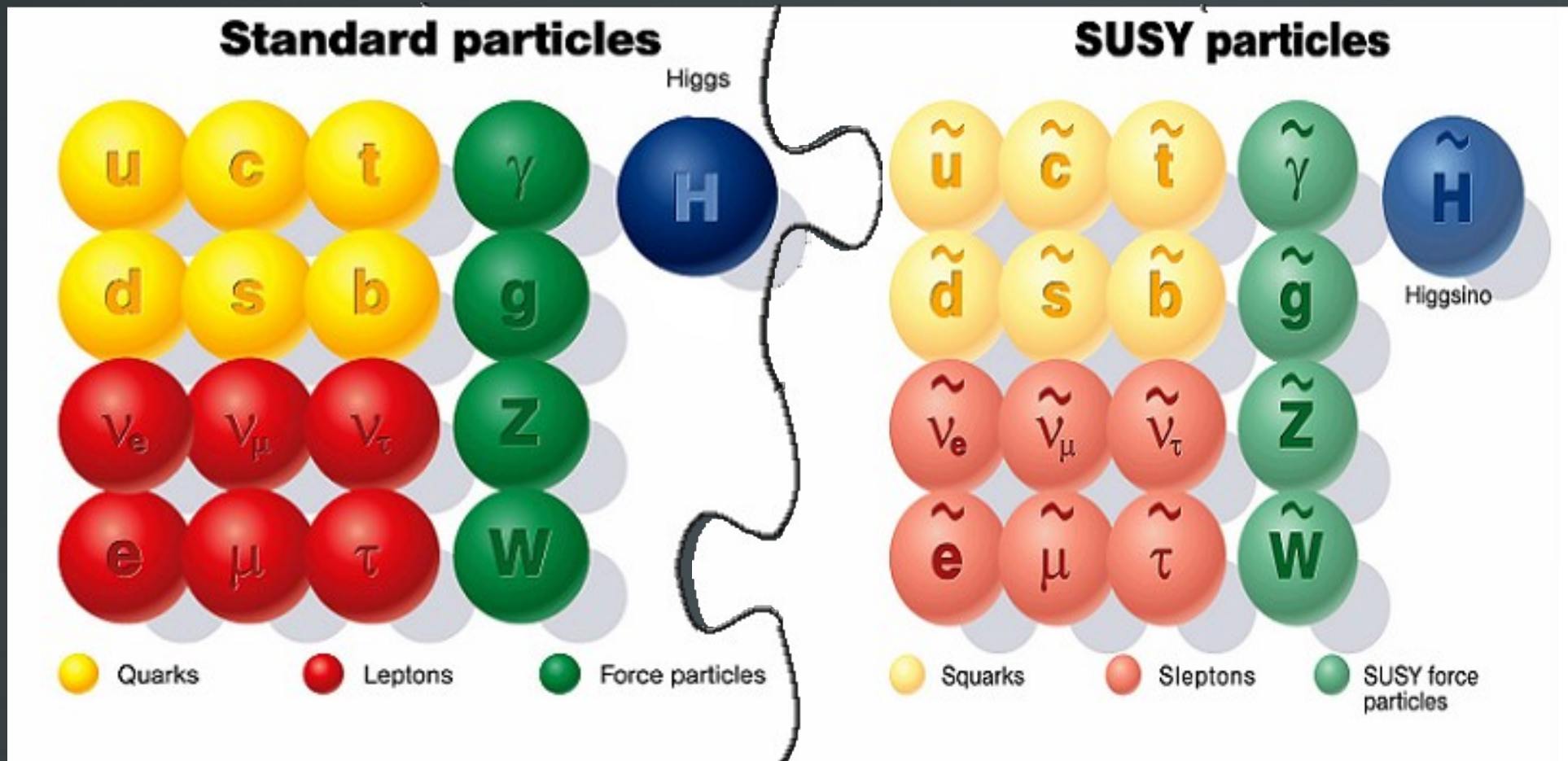
- В суперсимметричных теориях количество бозонов и фермионов должно быть одинаково.
- В СМ у нас есть 28 бозонных степеней свободы и 90 (96) фермионных степеней свободы.



СМ *сама по себе* не может обладать (даже нарушенной) суперсимметрией



Минимальная суперсимметричная стандартная модель



Суперсимметрия в природе?

НО:

Где скалярный
электрон с массой
511 кэВ?

Суперсимметрия
гарантирует
равенство масс
обычных частиц и
их суперпартнеров

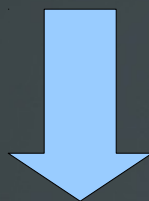
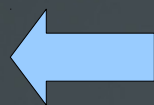


Суперсимметрия в природе?

НО:

Где скалярный электрон с массой 511 кэВ?

Суперсимметрия гарантирует равенство масс обычных частиц и их суперпартнеров



Должна быть нарушена



Суперсимметрия в природе?

НО:

Где скалярный электрон с массой 511 кэВ?

Должна быть нарушена

Суперсимметрия гарантирует равенство масс обычных частиц и их суперпартнеров



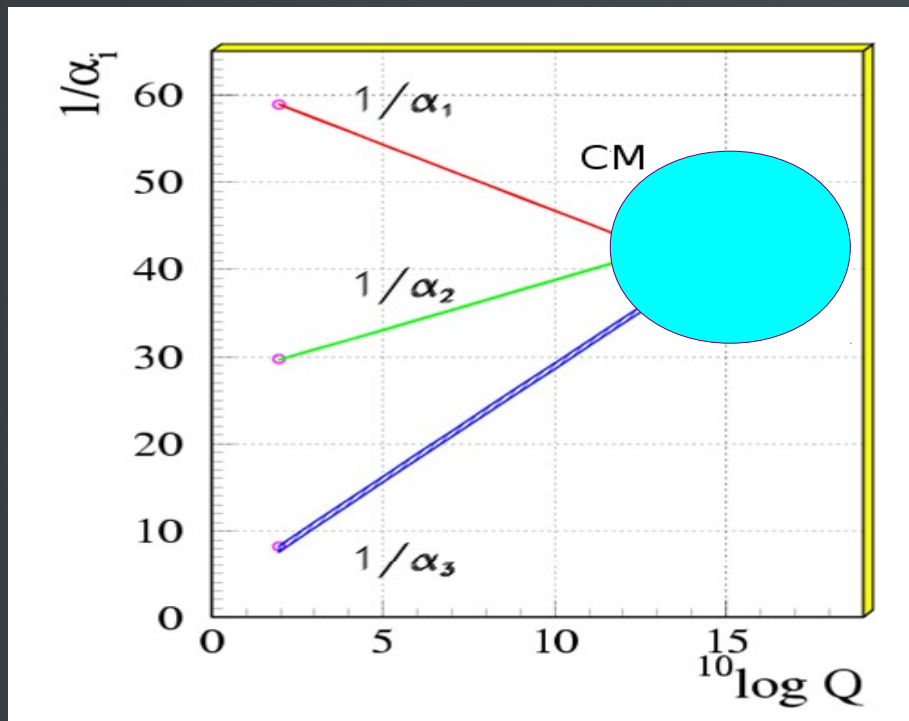
скалярный электрон
(селектрон)

электрон



Шкала (нарушения) суперсимметрии

- Где в "Великой пустыне" поселились новые частицы (= чему равно M ?)

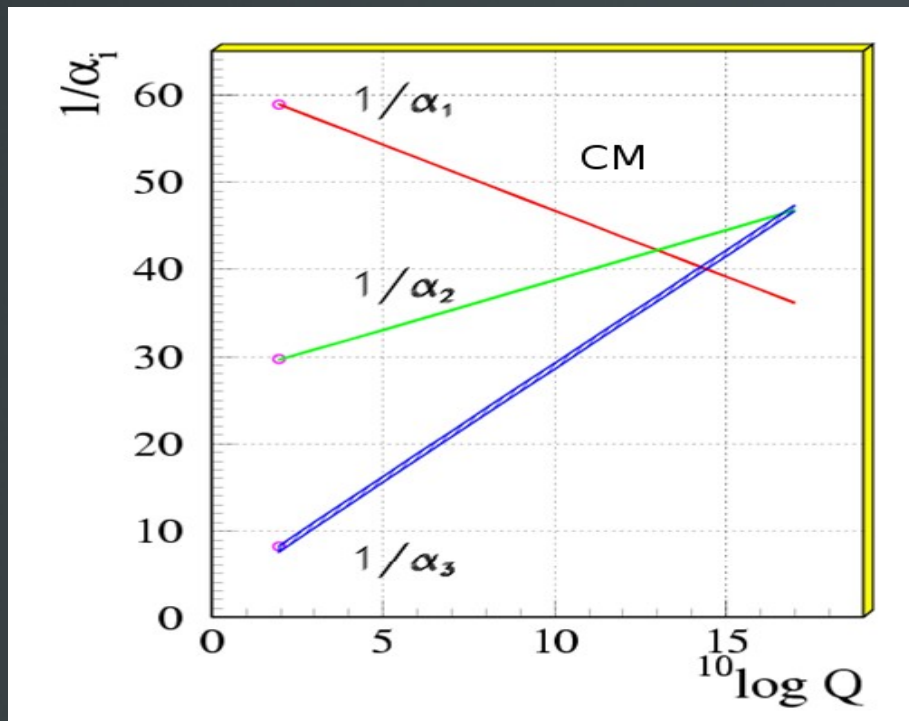


Подсказка:
объединение
взаимодействий



Шкала (нарушения) суперсимметрии

- Где в "Великой пустыне" поселились новые частицы (= чему равно M ?)

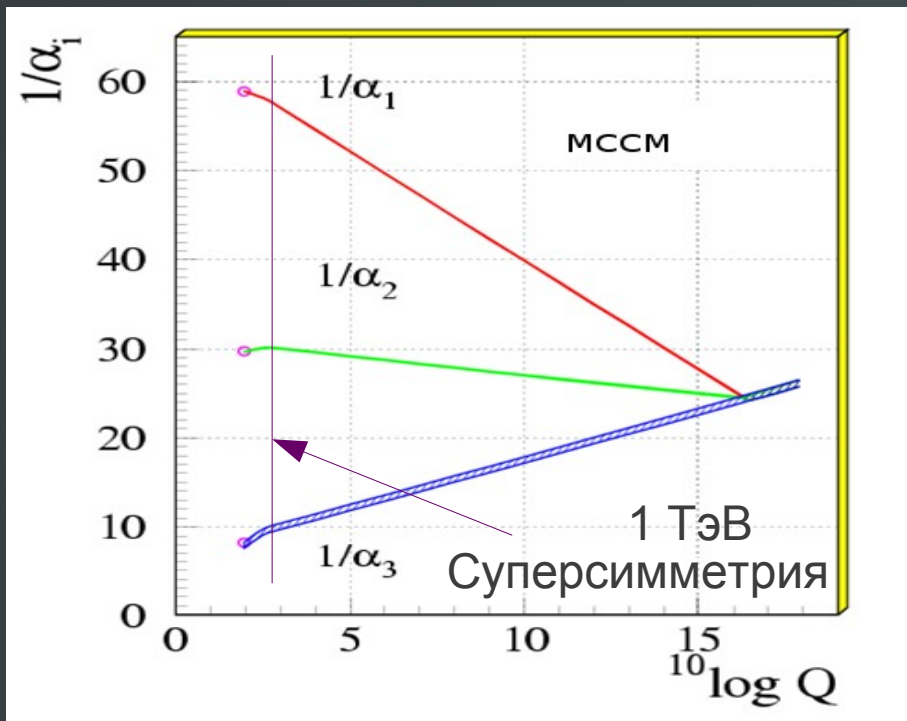


Подсказка:
объединение
взаимодействий



Шкала (нарушения) суперсимметрии

- Где в "Великой пустыне" поселились новые частицы (= чему равно M ?)



Подсказка:
объединение
взаимодействий

$M \sim 1 \text{ ТэВ}$



Нарушение суперсимметрии

- Простейший способ ввести такое нарушение в МССМ – добавить его руками.
- НО **очень осторожно! Мягко....** Чтобы не испортить хорошие свойства теории



Нарушение суперсимметрии

- Простейший способ ввести такое нарушение в МССМ – добавить его руками.
- **НО очень осторожно! Мягко....** Чтобы не испортить хорошие свойства теории



Пусть суперпартнеры частиц СМ имеют массы порядка M – шкалы нарушения суперсимметрии....



Нарушение суперсимметрии

- Простейший способ ввести такое нарушение в МССМ – добавить его руками.
- **НО очень осторожно! Мягко....** Чтобы не испортить хорошие свойства теории



Пусть суперпартнеры частиц СМ имеют массы порядка M – шкалы нарушения суперсимметрии....

120 новых параметров!



Нарушение суперсимметрии



Гипотеза универсальности

- Пять дополнительных параметров:

$$m_0, m_{1/2}, A_0, \tan \beta, \mu$$

добавка к массам
слептонов и
скварков

задающих нарушение
суперсимметрии при
высоких энергиях.

добавка к массам калибрино
(суперпартнеров бозонов СМ,
переносящих взаимодействия)

Ну и какая же польза от суперсимметрии?

- ✓ Проблема иерархии получает более-менее сносное решение...
- ✓ Нарушение электрослабой симметрии не закладывается в теорию руками....
- ✓ Объединение взаимодействий более реалистично в МССМ....
- ✓ Есть кандидат на роль частицы тёмной материи – нейтралино, легчайшая из суперчастиц (LSP), которая обычно является стабильной...



Ограничения на новые параметры

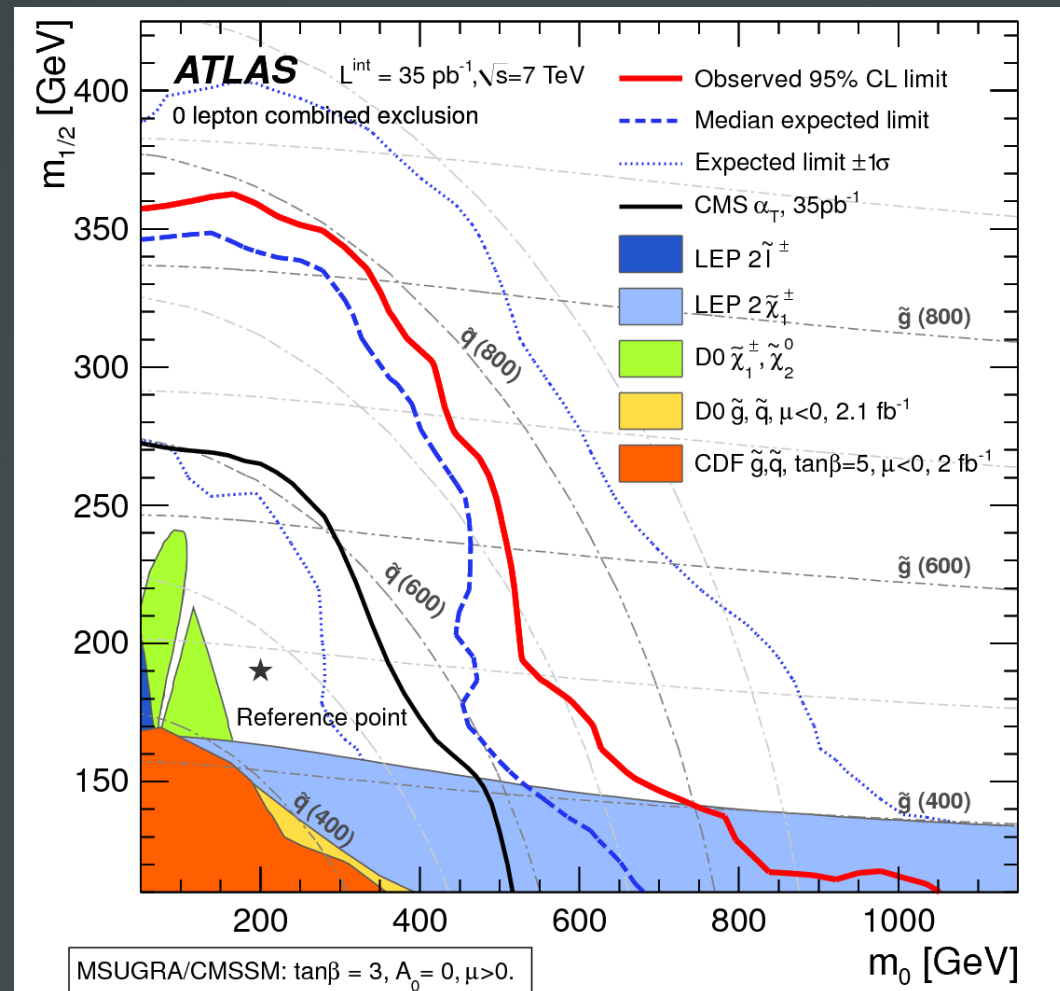
- Прямое (не) наблюдение суперчастиц на колладерах

LEP

Tevatron

LHC

- Масса бозона Хиггса...

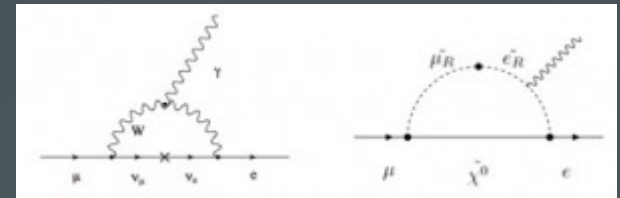
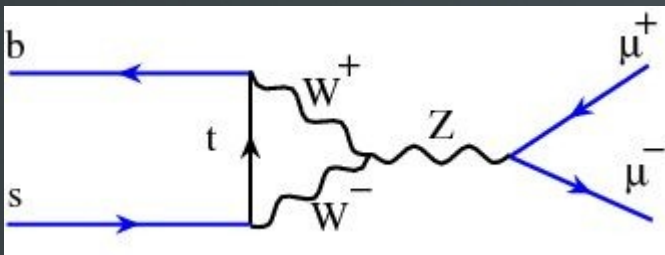


Ограничения на новые параметры

- Косвенные ограничения при учете суперчастиц в виртуальных состояниях при рассмотрении процессов с участием обычных частиц.

Редкие распады!

(в СМ сильно подавлены)



Ограничения на новые параметры

- Косвенные астрофизические и космологические ограничения....
 - Количество тёмной материи в Вселенной определяется моментом, когда **скорость аннигиляции** стала меньше скорости расширения Вселенной...

Частица тёмной материи должна быть **массивной**, нейтральной и слабвзаимодействующей (WIMP)



Вместо заключения

- ✓ Всем ограничениям можно удовлетворить!
- × Но подходящих сценариев все равно СЛИШКОМ МНОГО....
 - × Ищут там, где светло...
- × И до сих пор никаких следов суперчастиц...
 - ✓ Возникает вопрос о реалистичности низкоэнергетической суперсимметрии...
 - ✓ Но: может быть она прячется и её трудно выделить на фоне СМ...

Нужно ждать результатов LHC

