

# Суперимметрия

Что это? Зачем? Почему?

Евгений Храмов

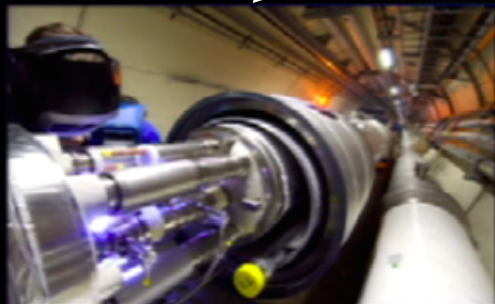
# Timeline of the Universe

13.7 млрд лет

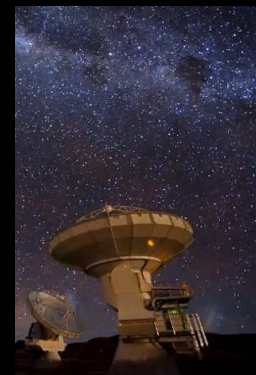
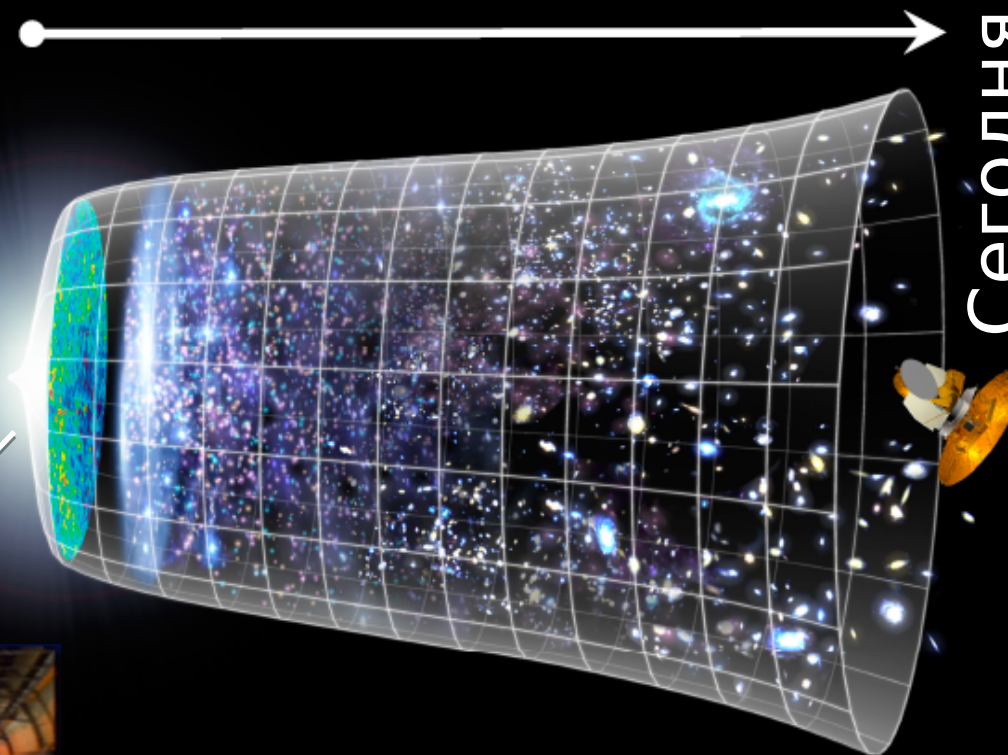
Big Bang

Сегодня

БАК



Супермикроскоп



Телескопы для  
наблюдения на  
больших  
расстояниях

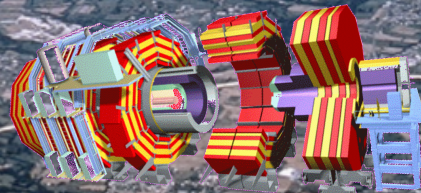
**БАК воссоздаёт условия 1 миллиардной секунды после Большого Взрыва**

# Ускорительный комплекс БАК

Окружность 27 км  
100 м под землей

Протоны ускоряются до энергии 7 ТэВ

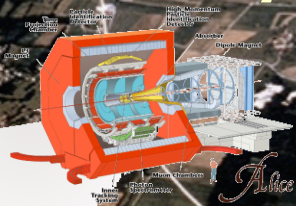
CMS



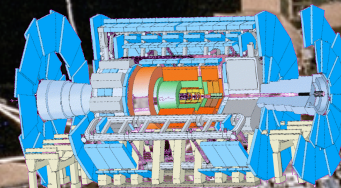
LHCb



ALICE



ATLAS

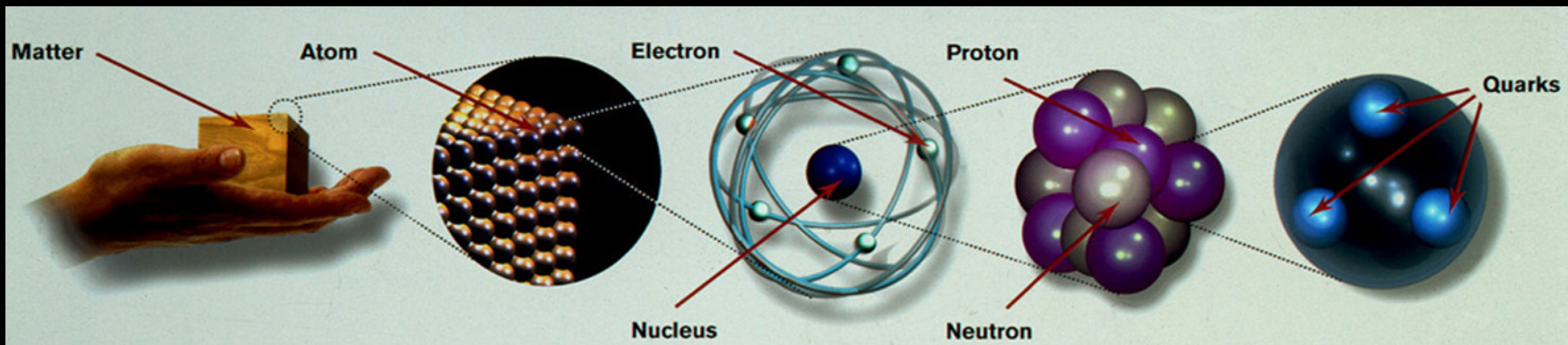


# Что нам известно на сегодня?

## Кварки

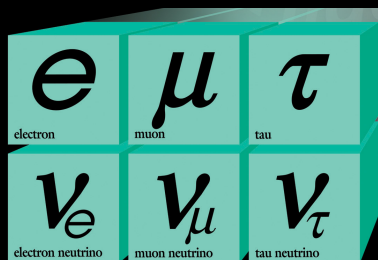
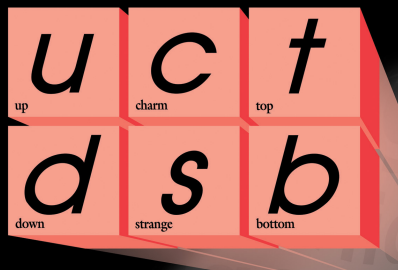


## Видимая материя



Что нам известно на сегодня?

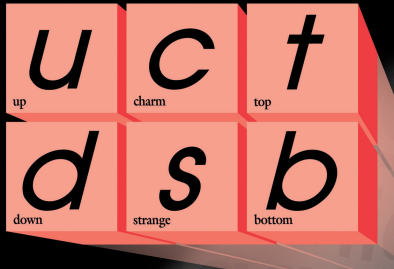
## Кварки



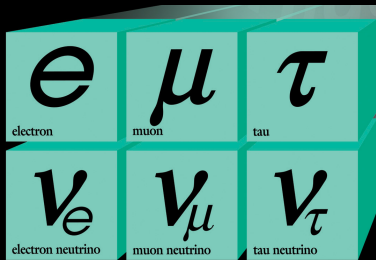
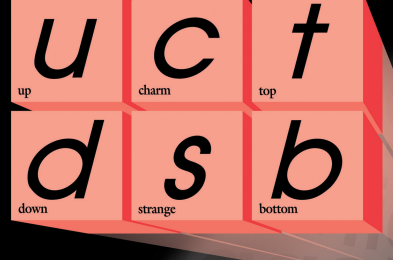
## Лептоны

# Что нам известно на сегодня?

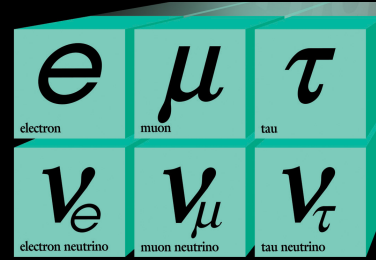
## Кварки



## Анти-Кварки



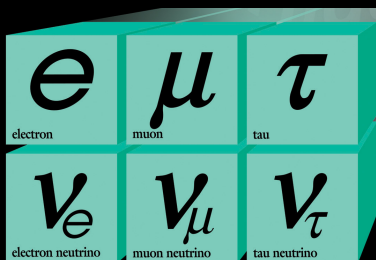
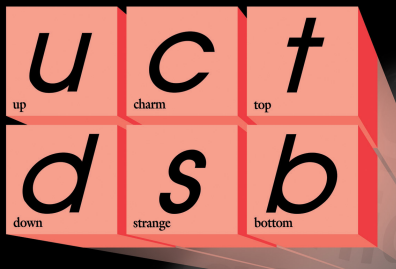
## Лептоны



## Анти-Лептоны

Каждой частице соответствует античастица, которая обладает такими же свойствами за исключением электрического заряда

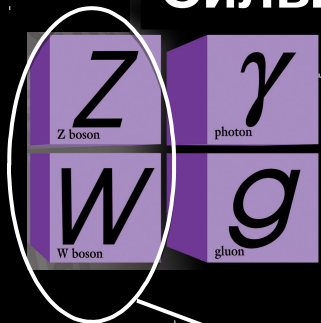
# Кварки



# Лептоны

Гравитационное вз-ие

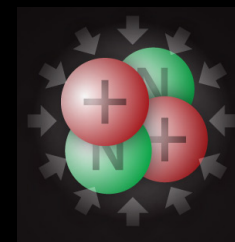
# Силы



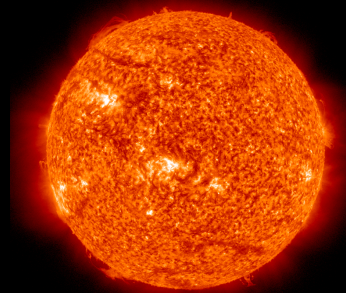
Электромагнитное взаимодействие



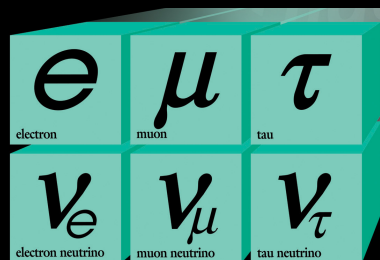
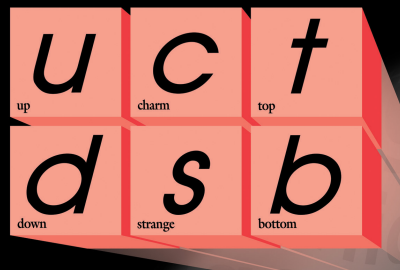
Сильное вз-ие



Слабое вз-ие

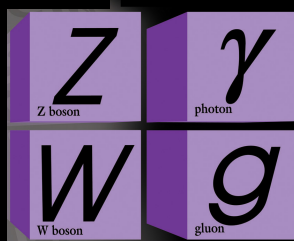


# Кварки



# Лептоны

# Силы

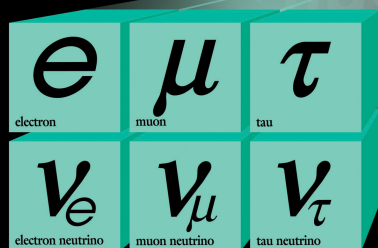
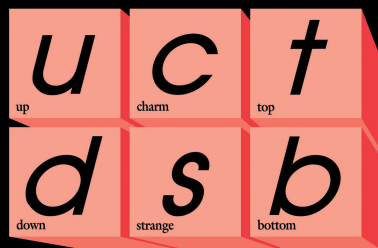


$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^a g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^d + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^a \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} + \\
 & \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - ig_s w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g[W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_s w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig_s w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \mathcal{E}^\lambda (\gamma \partial + m_\lambda^2) e^\lambda - \mathcal{P}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \mathcal{U}_j^\lambda (\gamma \partial + m_\lambda^2) u_j^\lambda - \mathcal{D}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_\lambda^2) d_j^\lambda + ig_s w A_\mu [-(\mathcal{E}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\mathcal{U}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\mathcal{D}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2c_w} Z_\mu^0 [(\mathcal{P}^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) \nu^\lambda) + (\mathcal{E}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\mathcal{U}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + \\
 & (\mathcal{D}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\mathcal{E}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\mathcal{U}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{\lambda c} d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\mathcal{E}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\mathcal{D}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{M} [-\phi^+ (\mathcal{E}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\mathcal{E}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g m_\lambda^2}{2M} [H (\mathcal{E}^\lambda e^\lambda) + \\
 & i\phi^0 (\mathcal{E}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_\lambda^2 (\mathcal{U}_j^\lambda C_{\lambda c} (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + m_\lambda^2 (\mathcal{U}_j^\lambda C_{\lambda c} (1 + \\
 & \gamma^5) d_j^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^2 (\mathcal{D}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_\lambda^2 (\mathcal{D}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\mathcal{U}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\mathcal{D}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\mathcal{U}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\mathcal{D}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + \\
 & igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_s w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + \\
 & igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_s w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + \\
 & igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- + \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig_s w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- + \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \\
 & \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^- + \\
 & \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \\
 & \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

Но и это еще не все!

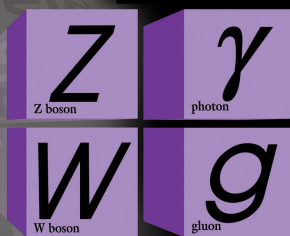


## Кварки



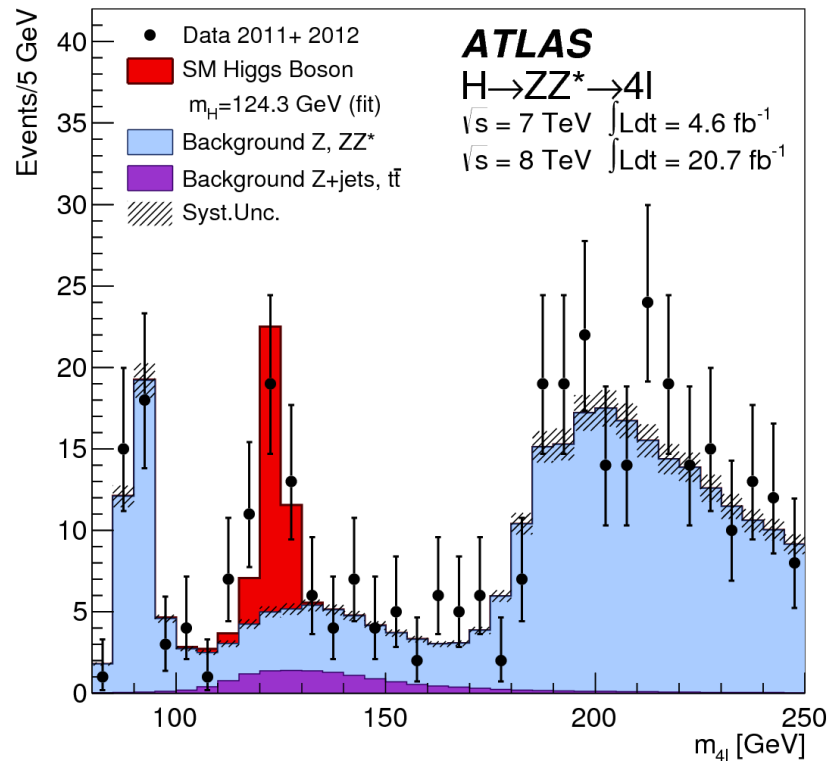
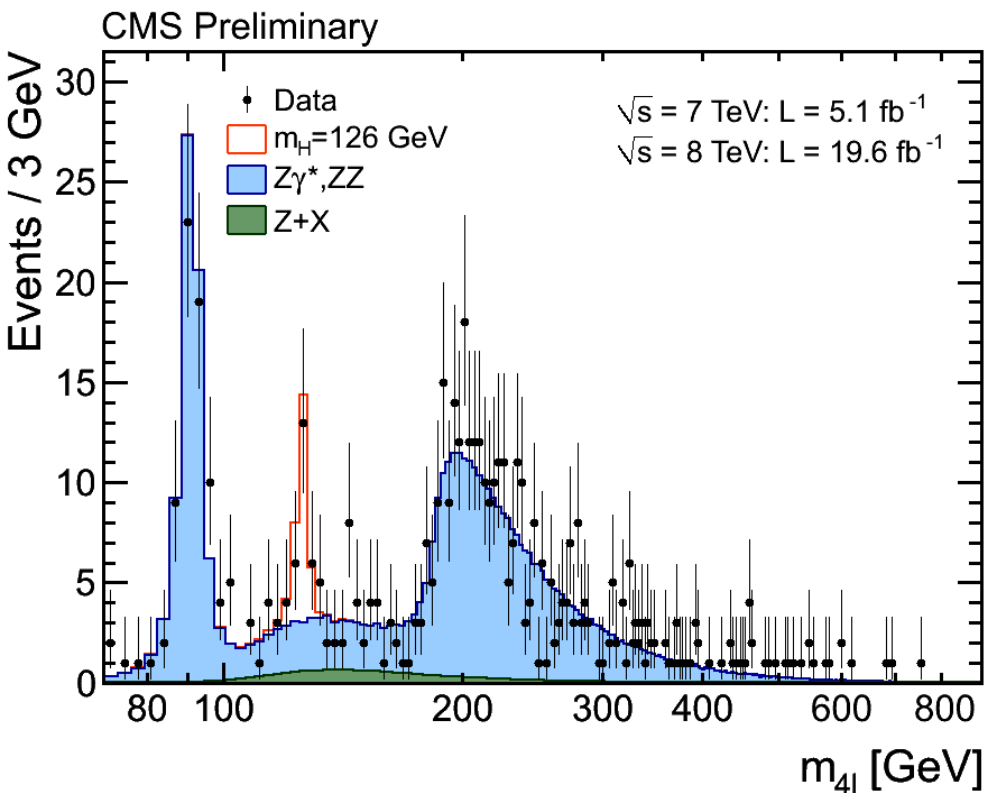
## Лептоны

## Силы



Бозон Хиггса был последней недостающей частицей Стандартной Модели

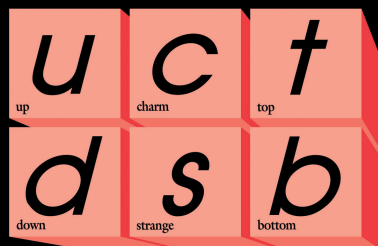
# Полувековая эпопея закончилась успехом!



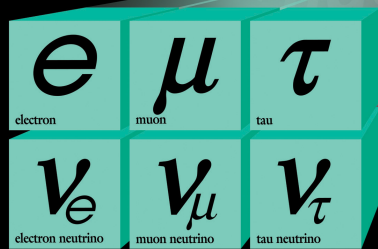
Открытие было сделано одновременно на  
обоих экспериментах

# Ну теперь-то хоть все?

## Кварки



## Силы

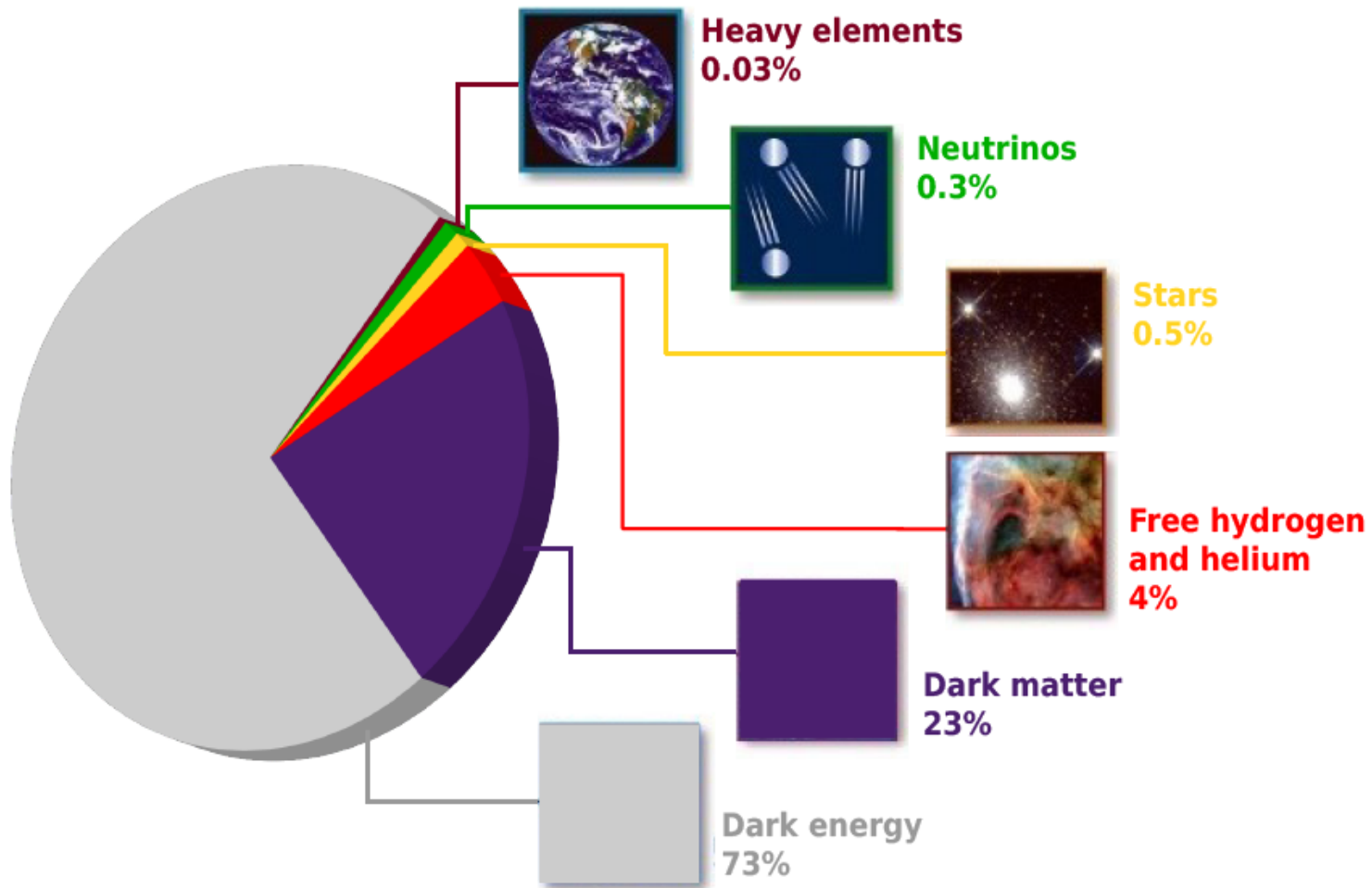


## Лептоны

Вообще-то мы все еще мало знаем!

# Материя во вселенной...

Мы знаем только о ~5% ее...



# Указания на Темную Материю

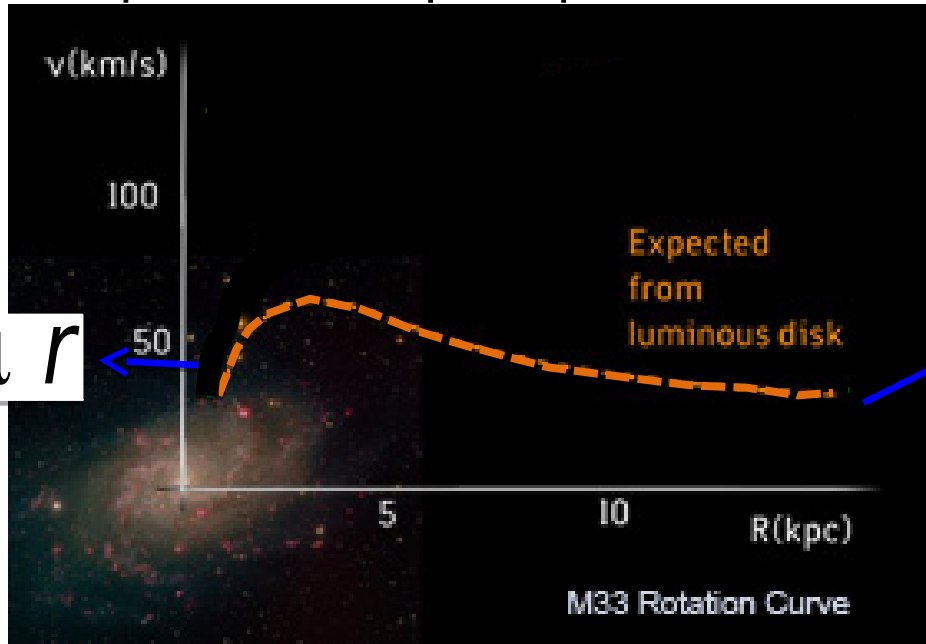
Вращение звезд в галактиках



Орбитальные скорости звезд не совпадают с расчетами!

# Указания на Темную Материю

Скорость как ф-ия расстояния для галактики М33

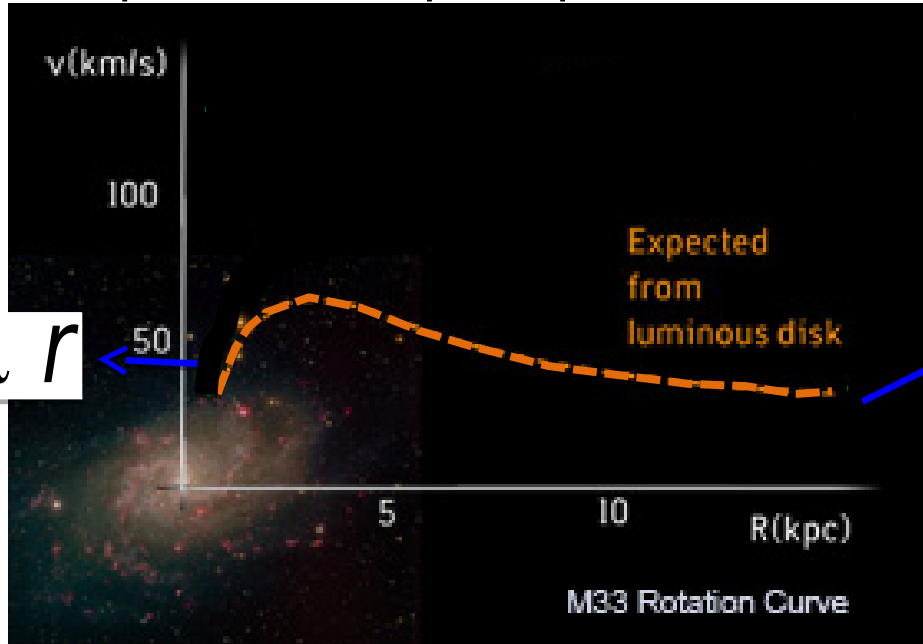


$$v \propto r$$

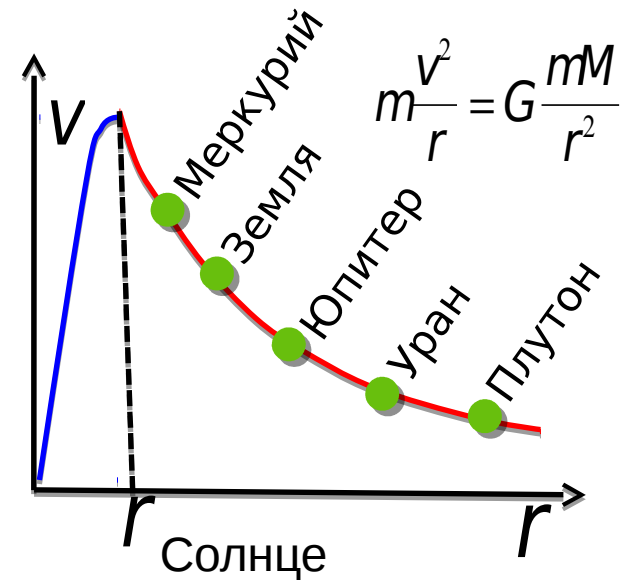
$$v^2 \propto \frac{M}{r}$$

# Указания на Темную Материю

Скорость как ф-ия расстояния для галактики М33

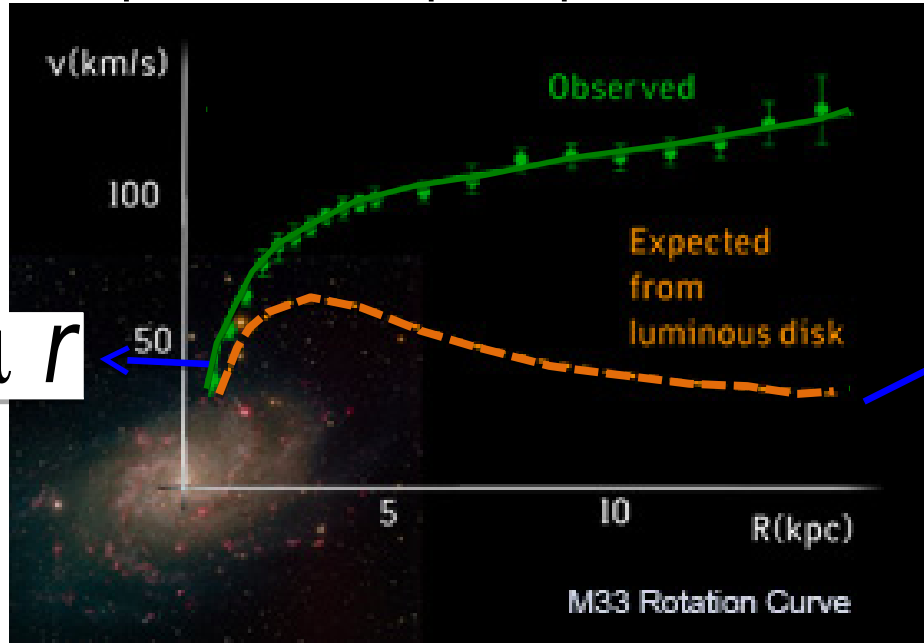


Аналогично в нашей Солнечной системе!



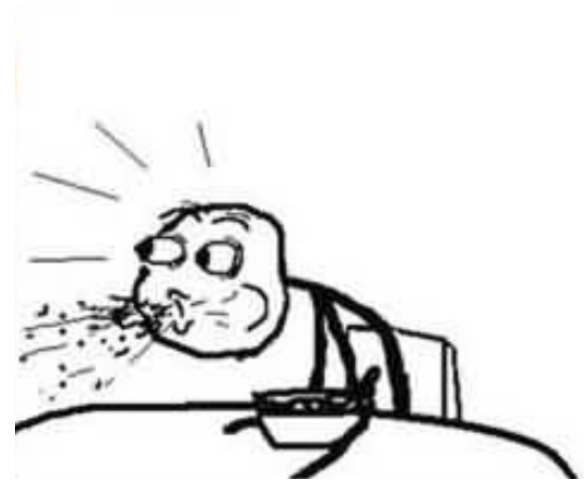
# Указания на Темную Материю

Скорость как ф-ия расстояния для галактики М33



$$v \propto r$$

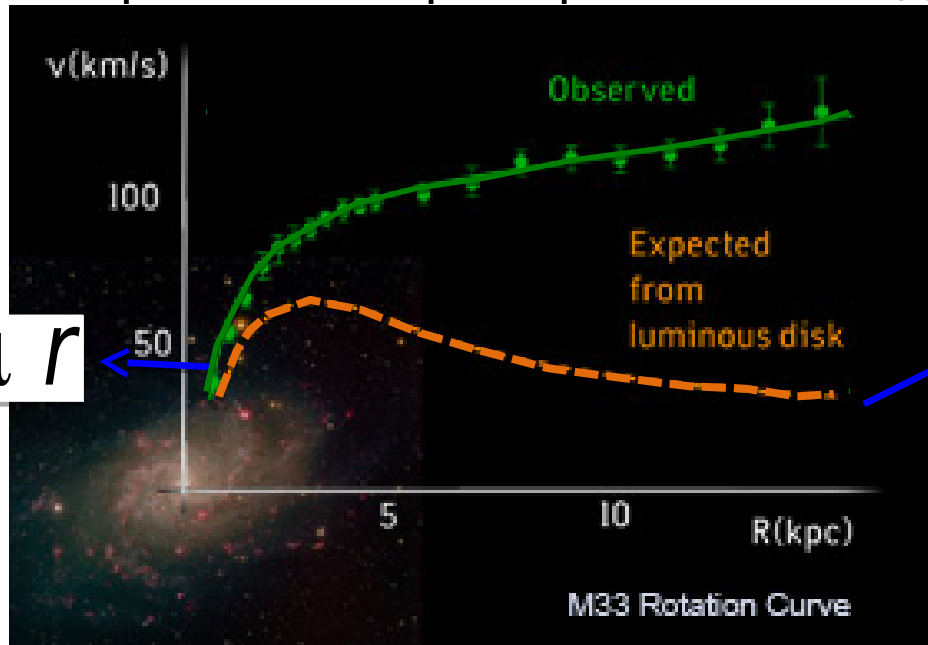
$$v^2 \propto \frac{M}{r}$$





# Указания на Темную Материю

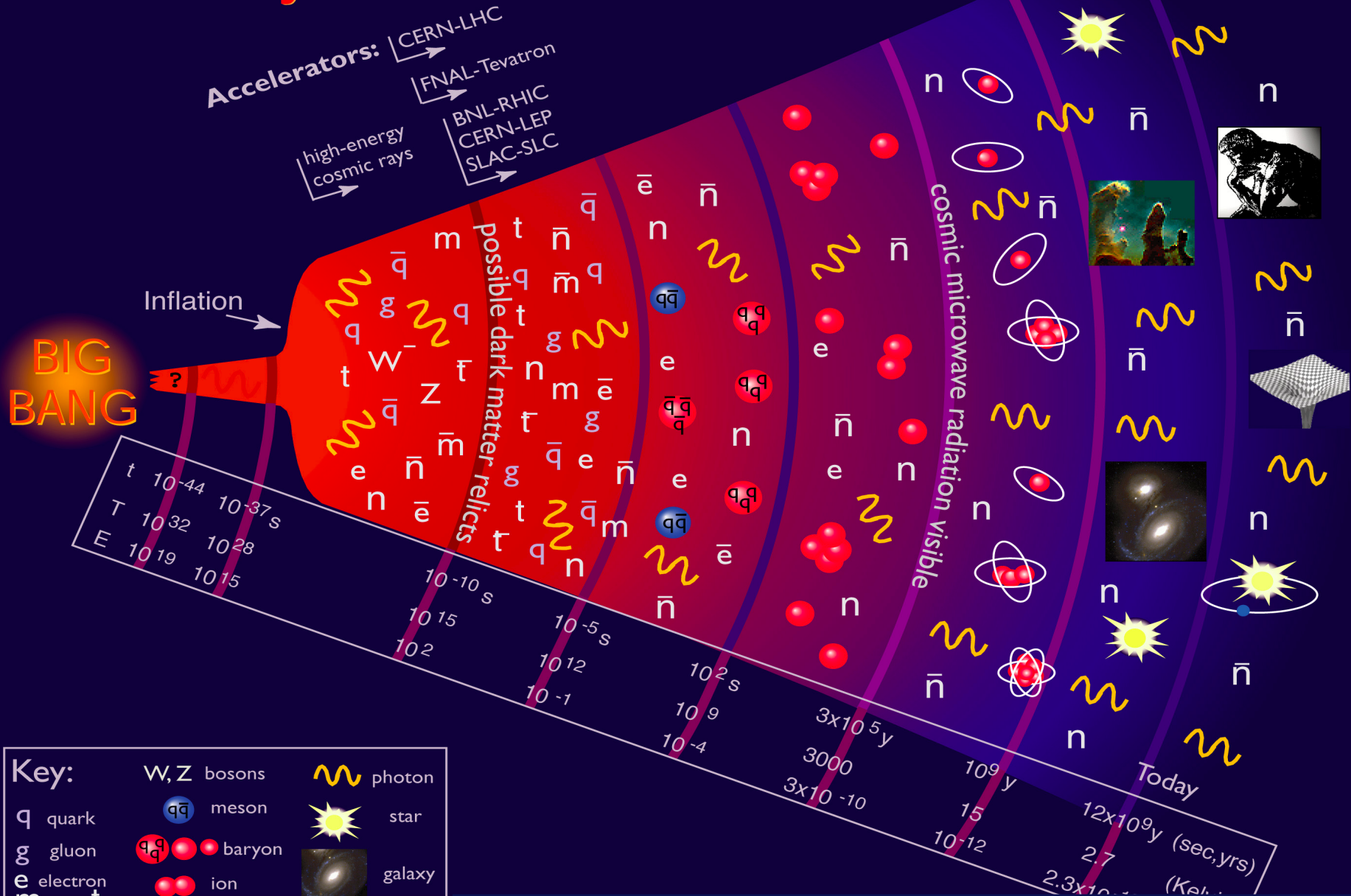
Скорость как ф-ия расстояния для галактики М33



## Одно из популярных объяснений - Темная Материя:

- Электрически нейтральная – нет электромагнитного взаимодействия
- Массивная – гравитационное взаимодействие
- Долгоживущая или стабильная
- Может распадаться на частицы СМ

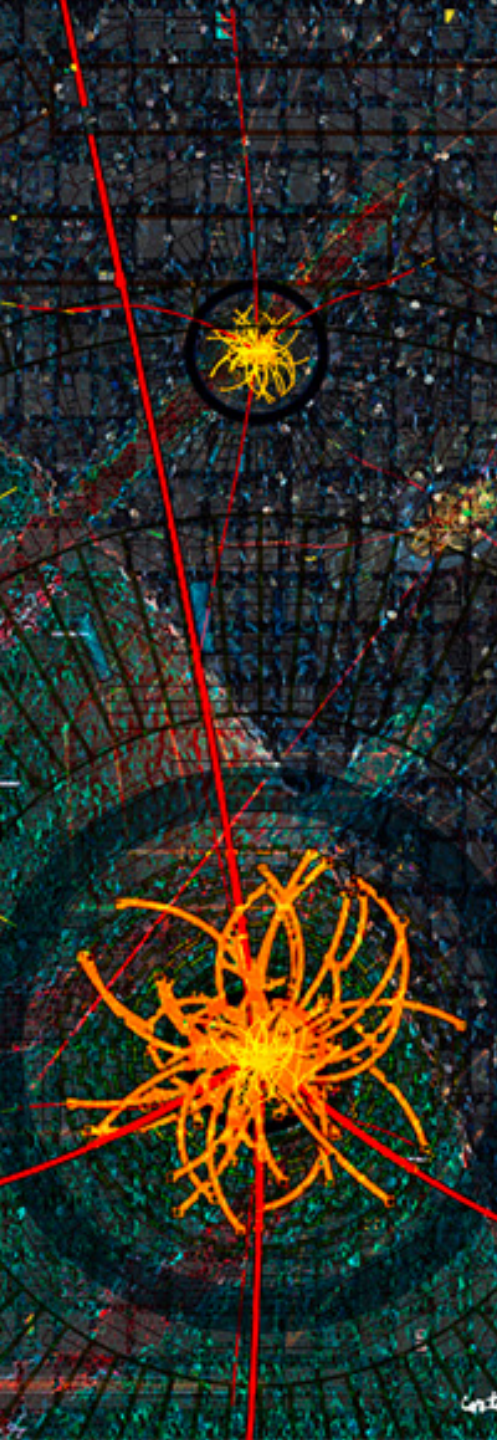
# History of the Universe



Где антивещество?

# Асимметрия материи и антиматерии

- Вселенная зародилась с равным количеством материи и антиматерии
- Если законы природы одинаково применимы к частицам и античастицам, то сегодня мы наблюдали одинаковое количество материи и антиматерии
  - ✉ но галактик из антиматерии никто не наблюдал...
  - ✉ Т.е. есть законы природы, для которых материя и антиматерия не равны
  - ✉ На БАК для поиска новых эффектов исследуются распады частиц и античастиц



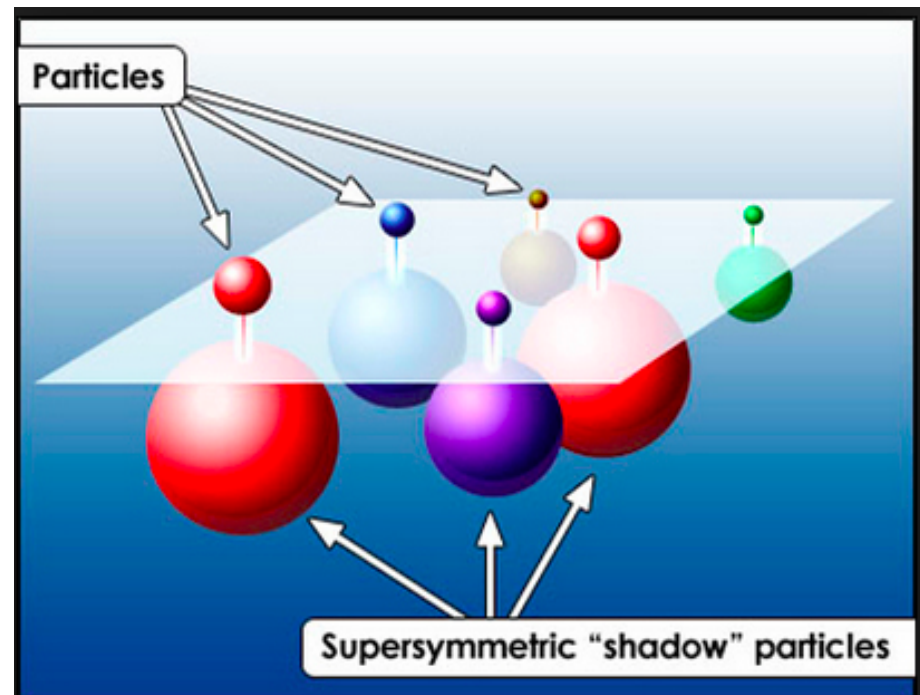
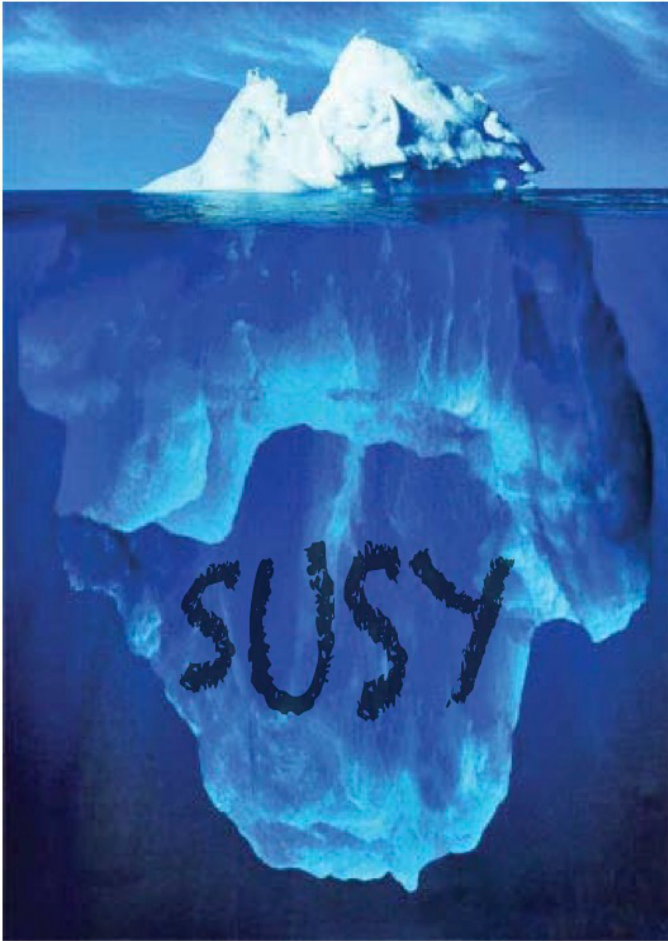
- Стандартная модель прекрасна при низких энергиях
- Но не дает ответов на ряд вопросов
- При высоких энергиях предполагается существование более фундаментальной теории (Новая Физика)

- На сегодняшний момент предложено большое количество новых теорий:
  - Дополнительный измерения, Суперсимметрия
  - ... 1000-и теоретических статей



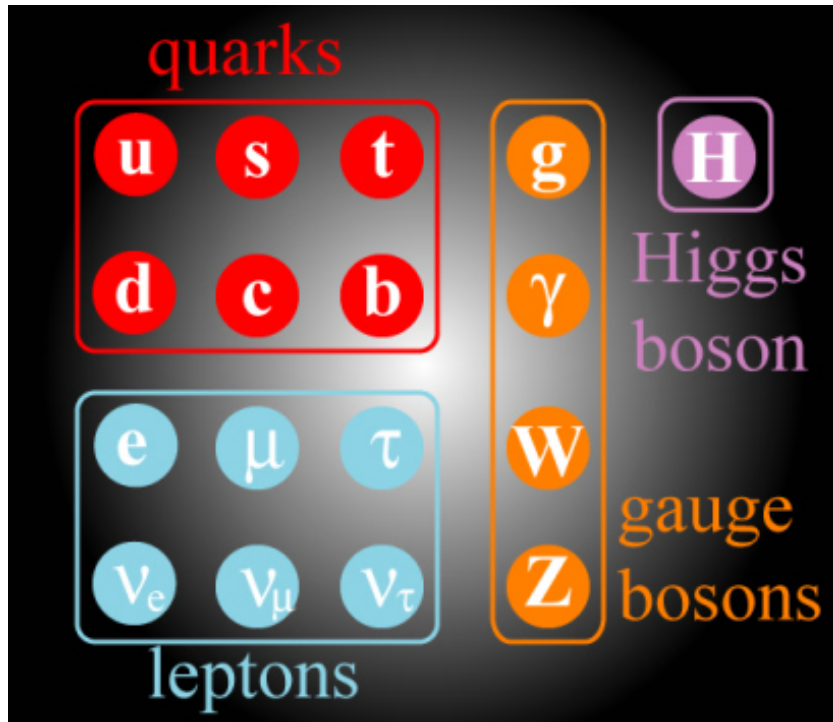
# Суперсимметрия

Для каждой известной частицы существует ее более массивный суперпартнер

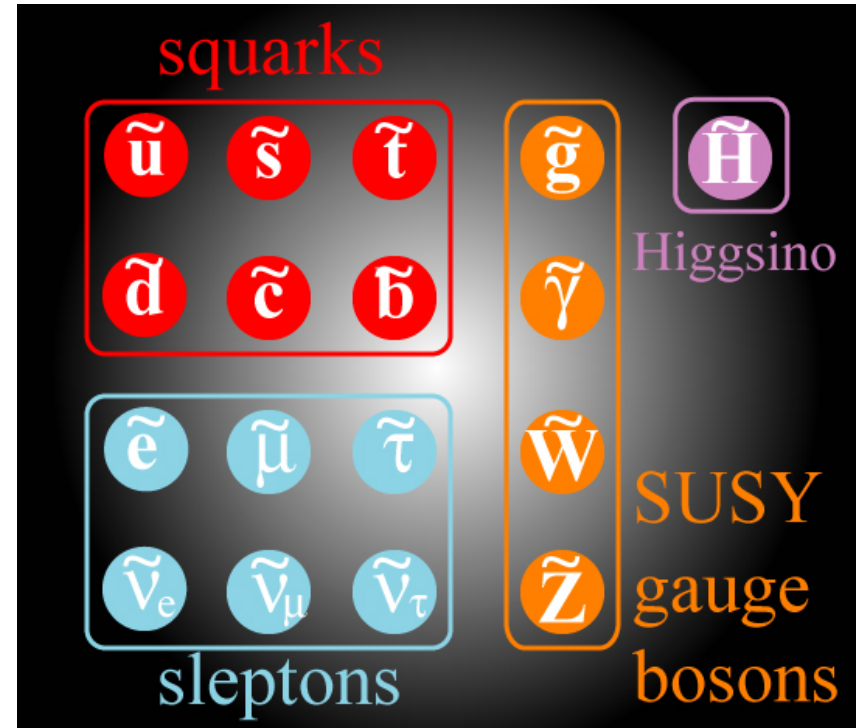


# Суперсимметрия

## Частицы в Стандартной Модели



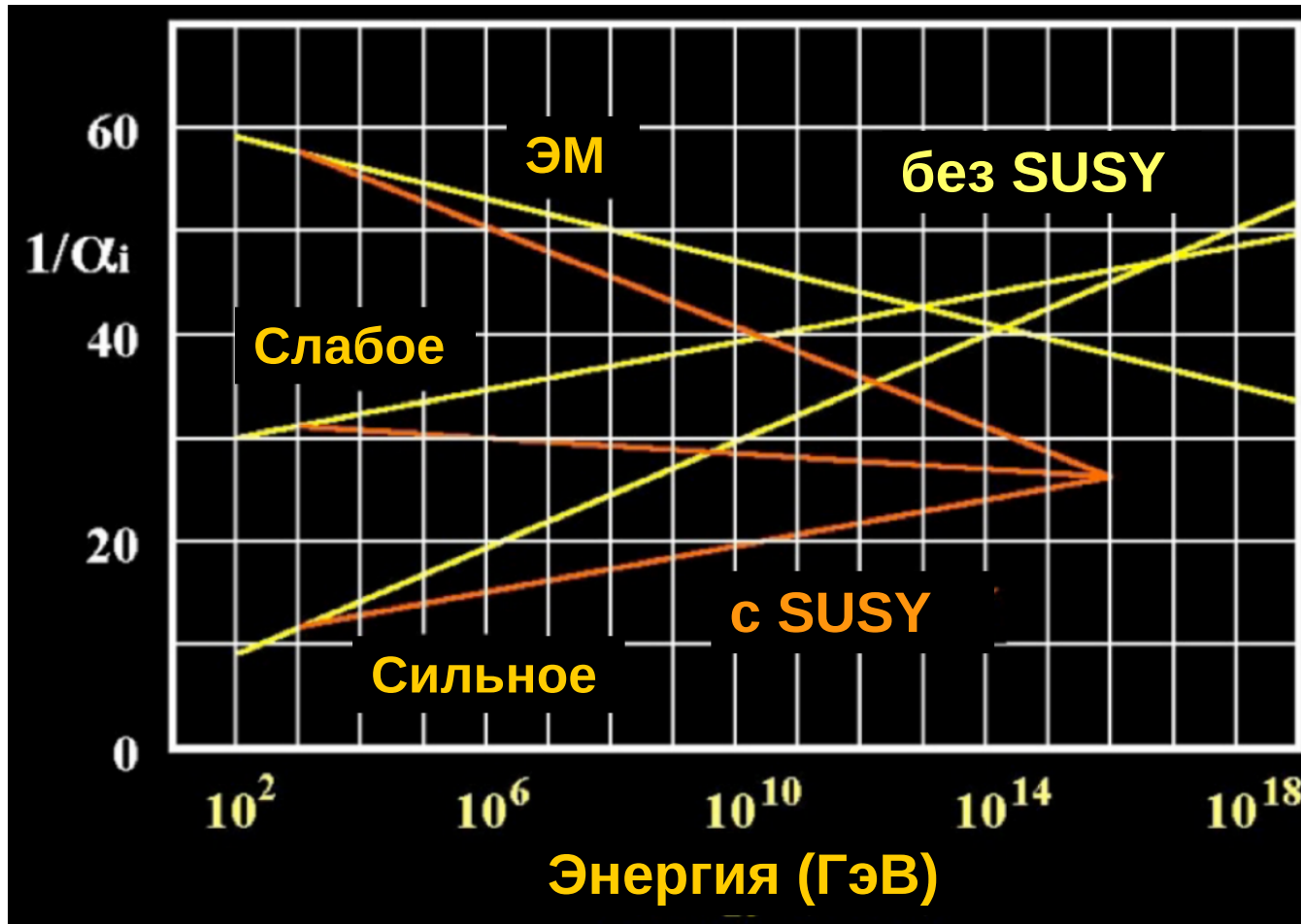
## Суперсимметричные частицы



Кроме массы суперчастицы отличаются от частиц только одним свойством – спин

# Одно взаимодействие?

Если смотреть при больших масштабах взаимодействия...



Получится ли объединить взаимодействия при  $\sim 10^{16}$  ГэВ?



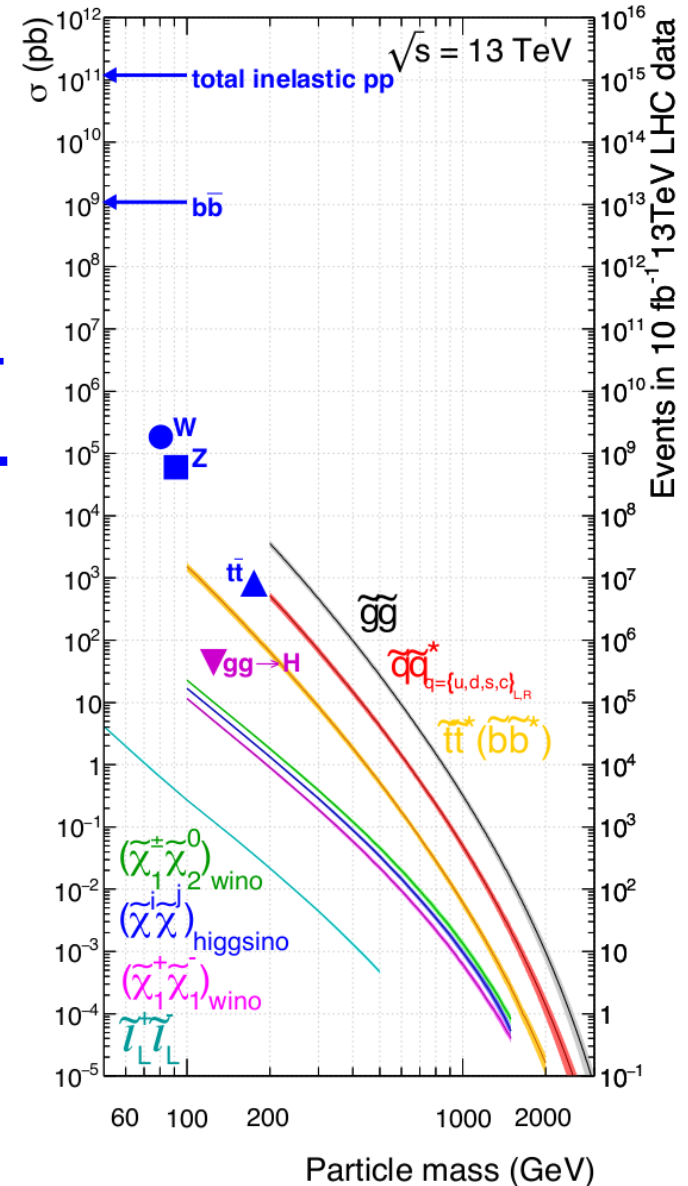
# Как часто рождаются суперсимметричные частицы

На сегодняшний день

Всего ~2000 трлн pp вз-ий:

- W бозон: ~4 млрд
- Z бозон : ~1.2 млрд
- Пара топ-кварков: ~17 млн
- Хиггс : 1.3 млн
- Пара глюино ( $M \sim 1000$  ГэВ): ~6 тыс
- Пара скварков ( $M \sim 1000$  ГэВ): ~1 тыс

Сечение процесса

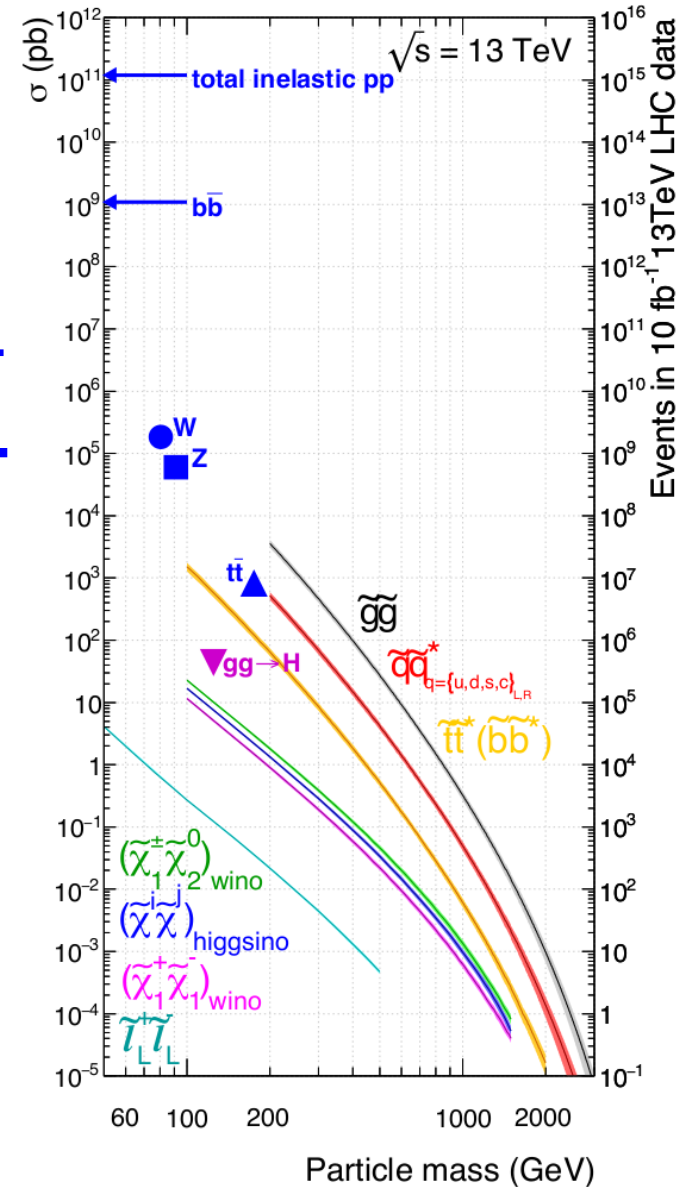


# Как часто рождаются суперсимметричные частицы



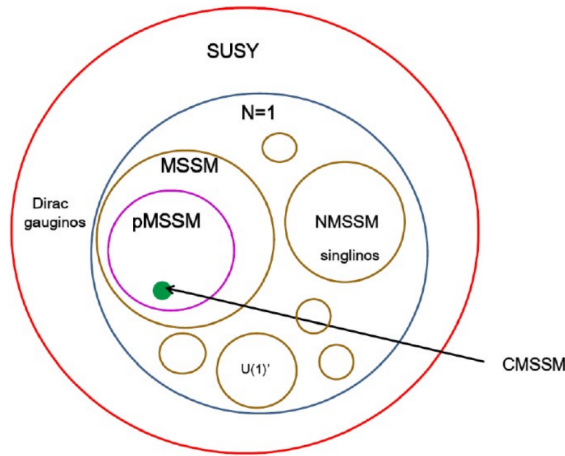
Обнаружить суперсимметричное событие в триллионах фоновых событий – как искать иголку в стоге сена

Сечение процесса



# Но теория не так проста...

- Массы суперпартнеров не предсказываются!
- Количество параметров  $\sim 200$  и они варьируются!



Число параметров можно уменьшить в рамках некоторых моделей:

**MSSM:** 109 параметров

**pMSSM:** 19 параметров

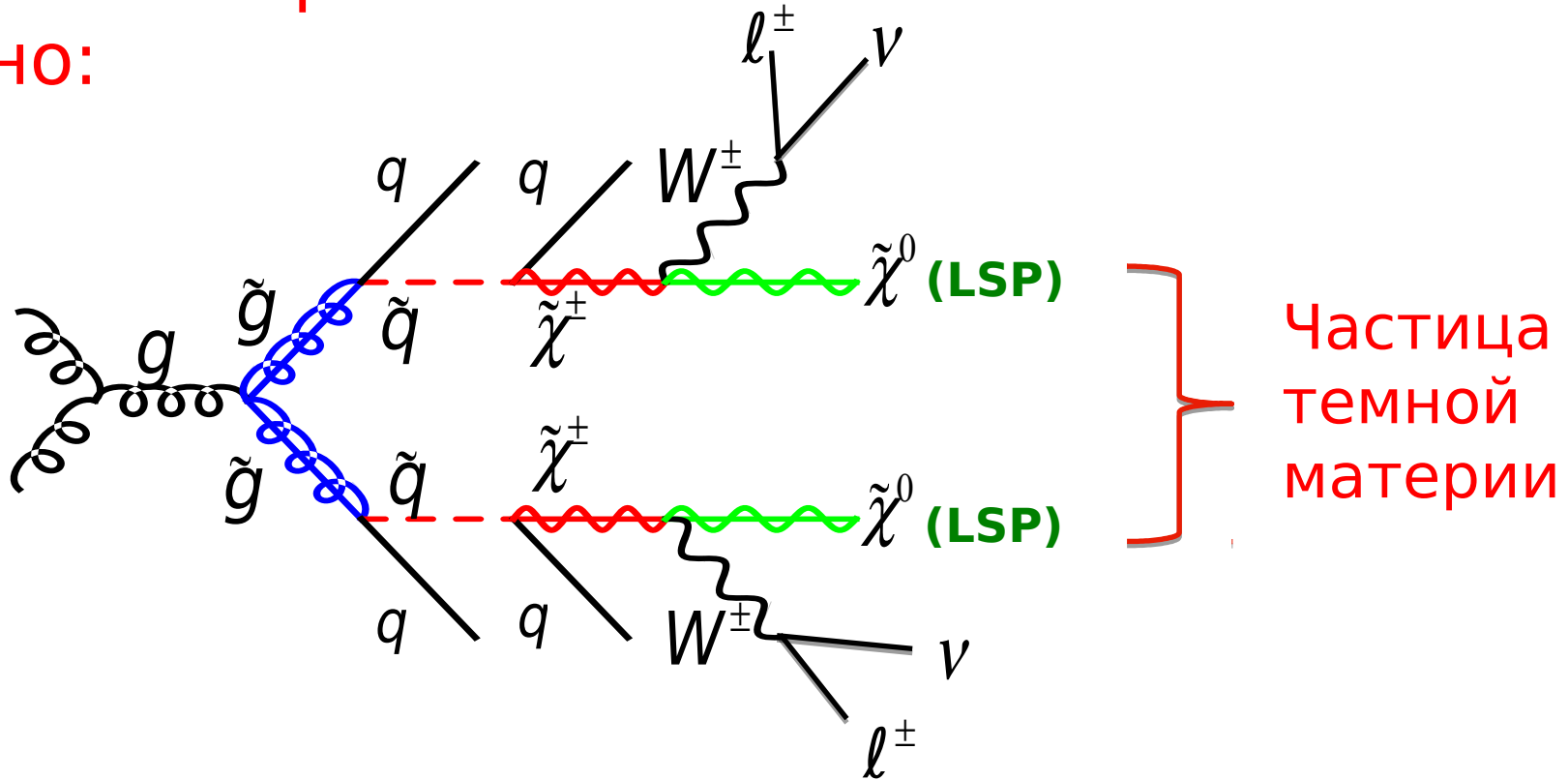
**CMSSM:** 5 параметров

Необходима стратегия взаимодополняющих исследований, чтобы максимально уменьшить количество параметров:

- Эксперименты по прямому и непрямоу поиску темной материи
- Исследование редких событий
- Прецизионные измерения процессов Стандартной Модели
- Прямое рождение суперсимметричных частиц (например на БАК)

# Пример рождения суперсимметрии

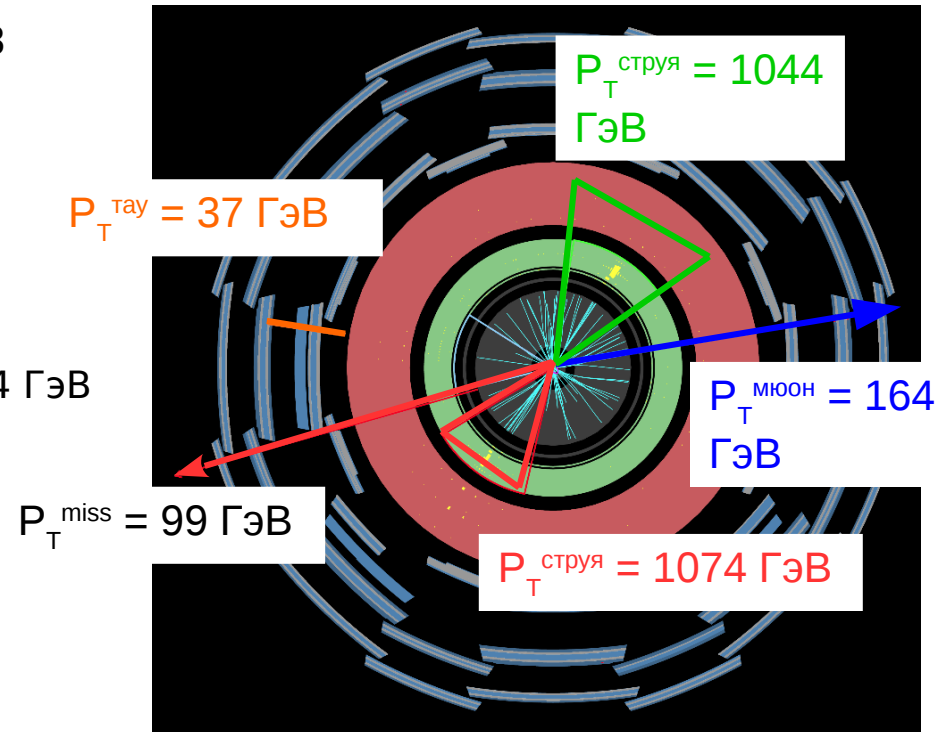
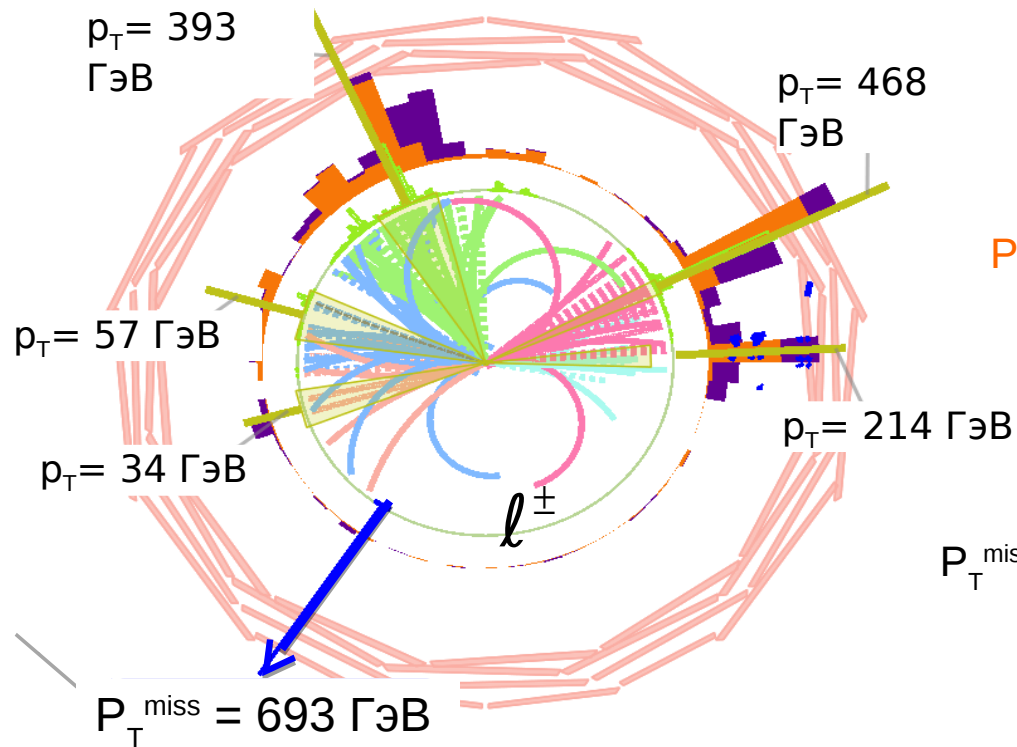
рождение пары  
глюино:



В некоторых моделях SUSY существует легчайшая суперсимметричная частица (LSP) – кандидат на темную материю

# Пример рождения суперсимметрии

## Событие в поперечной плоскости

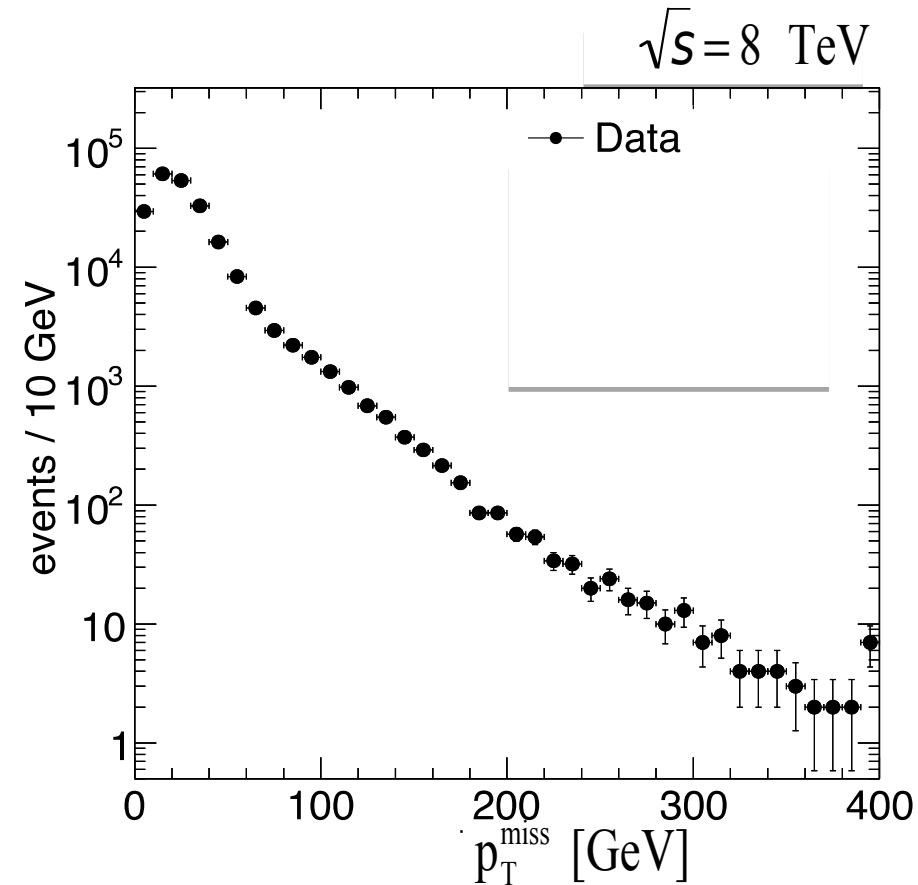


Проверка закона сохранения энергии

✉ Высокое значение незарегистрированной энергии

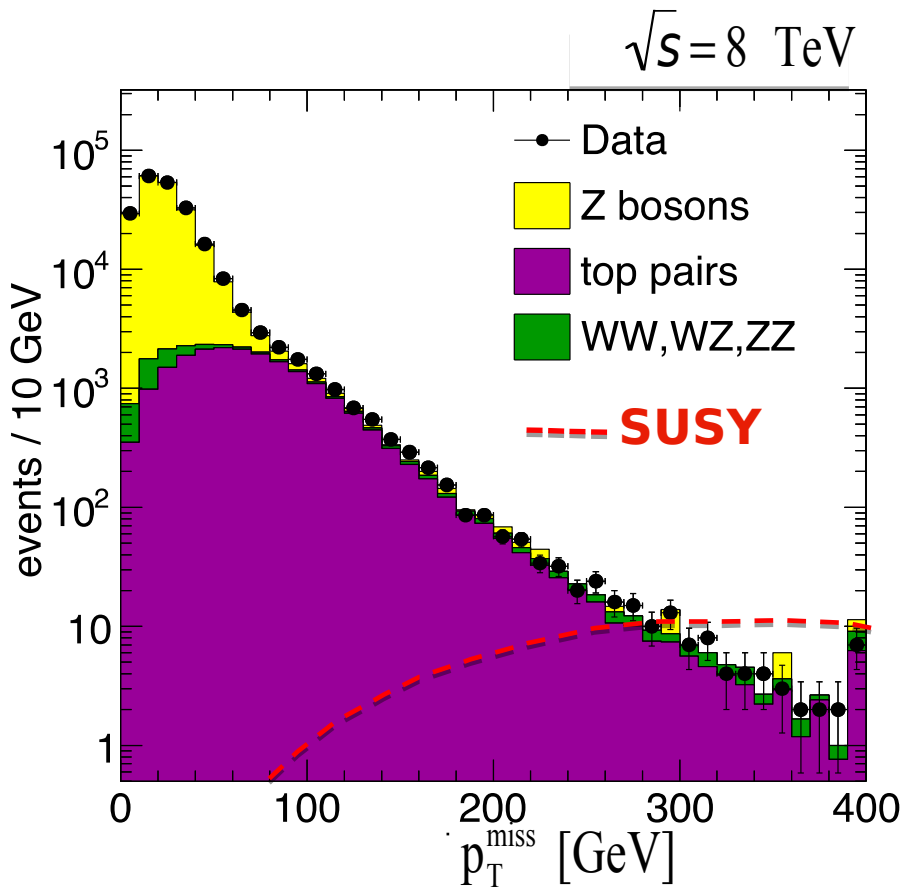
# Пример рождения суперсимметрии

Мы регистрируем все частицы в событии и рассчитываем “потерянную энергию” от частицы темной материи



# Пример рождения суперсимметрии

Мы регистрируем все частицы в событии и рассчитываем “потерянную энергию” от частицы темной материи



Проверяем, согласуются ли данные от взаимодействия с нашими предположениями в рамках Стандартной модели???



Рассчитываем минимальную вероятность SUSY процесса, чтобы открыть суперсимметрию



*That's all Folks!*