

Бозон Хиггса. Что дальше?

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН;
кафедра физики частиц и космологии
физического факультета МГУ

И
Я
И

И
Н
Р



С открытием бозона Хиггса Стандартная модель завершена

- LHC + прецизионные измерения на LEP, SLC, Tevatron:

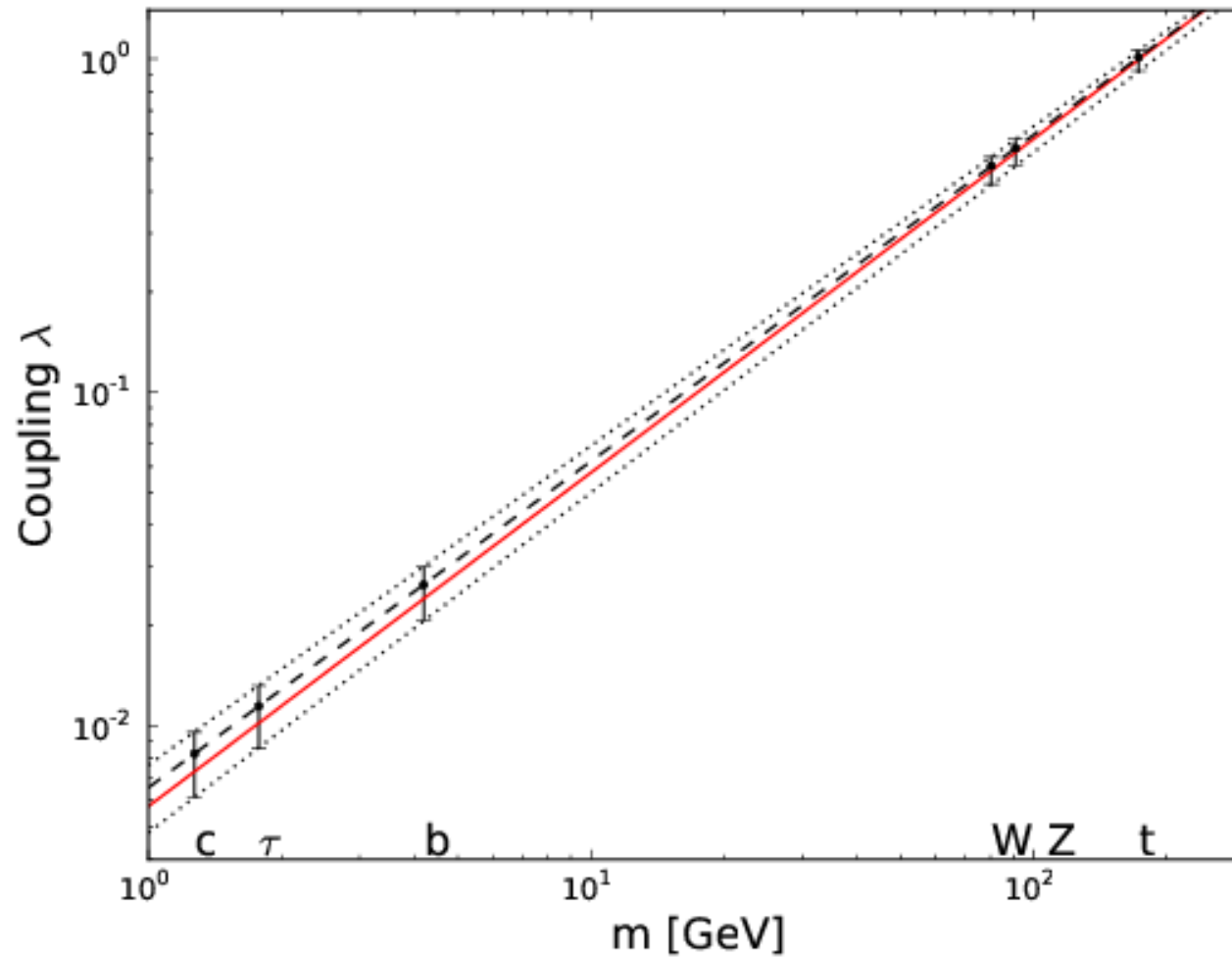
Новая частица на удивление похожа на бозон, предсказанный “наивной теорией” Энглера–Браута–Хиггса:

- Элементарное скалярное поле
- Один единственный дублет
- Пропорциональность констант связи и масс:

$$\lambda_{HXX} = \frac{\sqrt{2}m_X}{v}$$

$$X = t, W, Z, b, \tau; \quad v = \sqrt{2\langle H^\dagger H \rangle} = 246 \text{ ГэВ}$$

Константы связи vs SM



Ellis, You, March 2013

● Выход за Стандартную модель **требуется**

- ν -осцилляции,
- темная материя,
- барионная асимметрия Вселенной

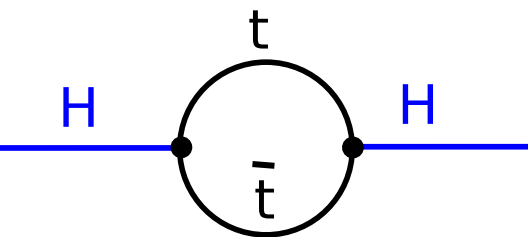
● Аргументы в пользу новой физики **при энергиях LHC**
никто не отменял

- Проблема калибровочной иерархии
- Сценарий WIMP для темной материи

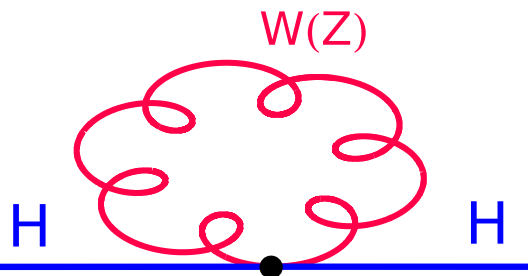
● **Элегантные теоретические схемы терпят фиаско**

Элегантные теоретические схемы терпят фиаско

Стандартная модель как эффективная низкоэнергетическая теория до масштаба энергий Λ



$$\delta m_H^2 \simeq -\frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2 = -(100 \text{ ГэВ})^2 \left(\frac{\Lambda}{500 \text{ ГэВ}} \right)^2$$



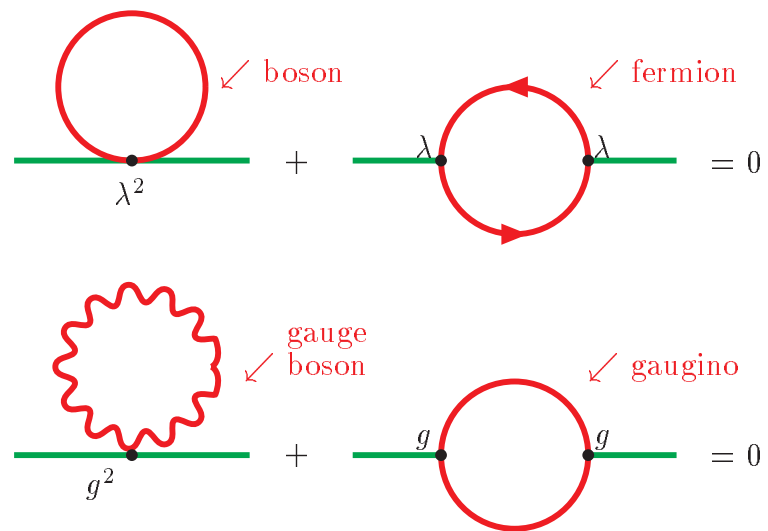
$$\delta m_H^2 \simeq \frac{1}{16\pi^2} g^2 \Lambda^2 = (100 \text{ ГэВ})^2 \left(\frac{\Lambda}{1.5 \text{ ТэВ}} \right)^2$$

NB: Лучше говорить не про m_H , а про EW масштаб v .

- Новая физика должна бы начинаться при 500 ГэВ.
По крайней мере для t -кварка.

Низкоэнергетическая суперсимметрия

Фольклор: Квадратичные вклады в m_H сокращаются.



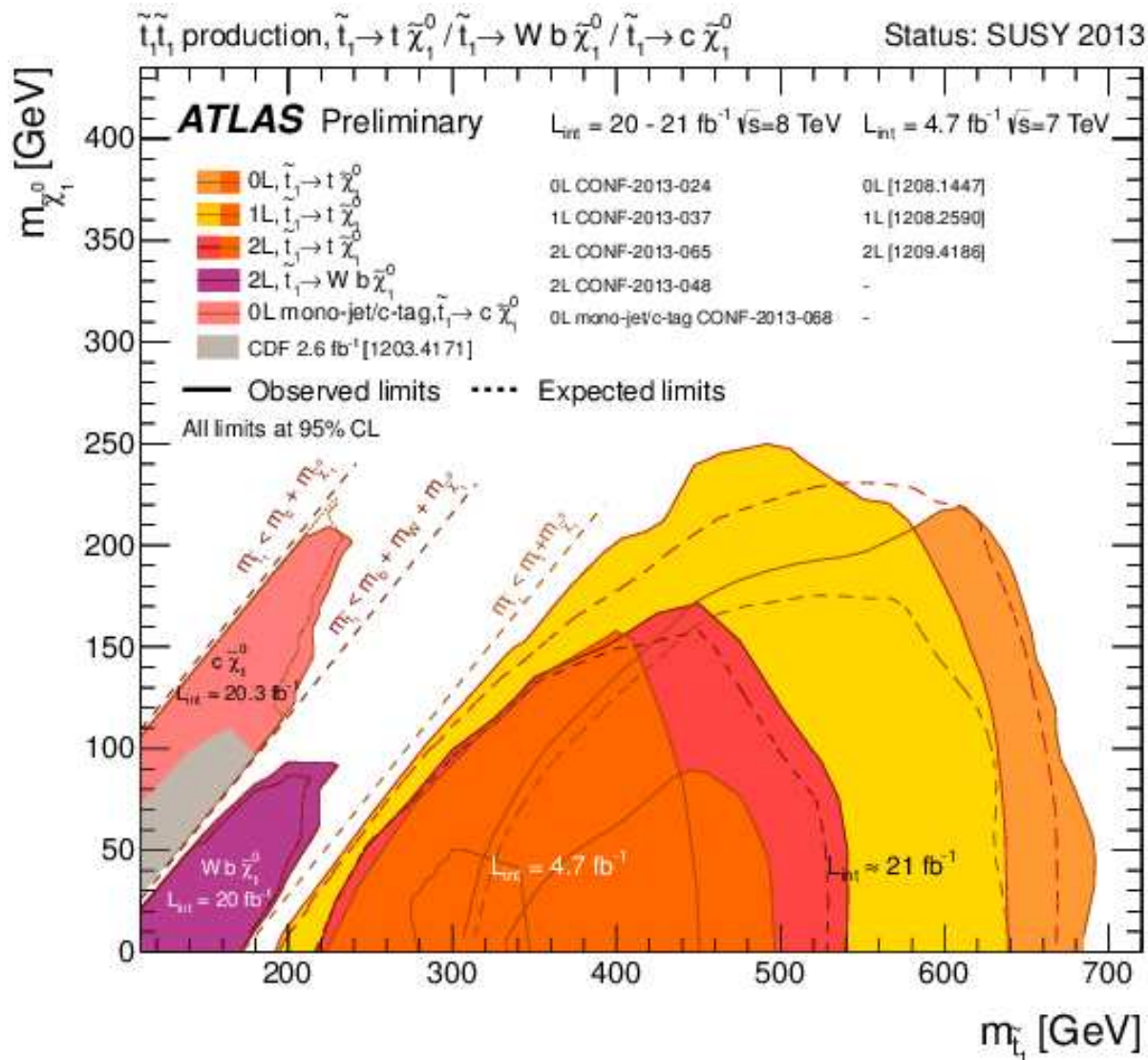
- Но суперпартнеры тяжелые (по крайней мере некоторые)

- Минимальное требование – легкий \tilde{t} (и \tilde{b} при $\text{tg } \beta \gg 1$),
немного тяжелее \tilde{W} , \tilde{Z} и \tilde{g} : $m_{\tilde{t}} \lesssim 500 \text{ ГэВ}$,

$$m_{\tilde{W}, \tilde{Z}} \lesssim 1.5 \text{ ТэВ}, \quad m_{\tilde{g}} \lesssim 1.5 \text{ ТэВ} \quad [\text{NB: } \delta m_{\tilde{t}}^2 \simeq \frac{8\alpha_s}{3\pi} m_{\tilde{g}}^2]$$

Глюино и скварки 1,2 поколений могут быть тяжелее.

Такое еще не запрещено

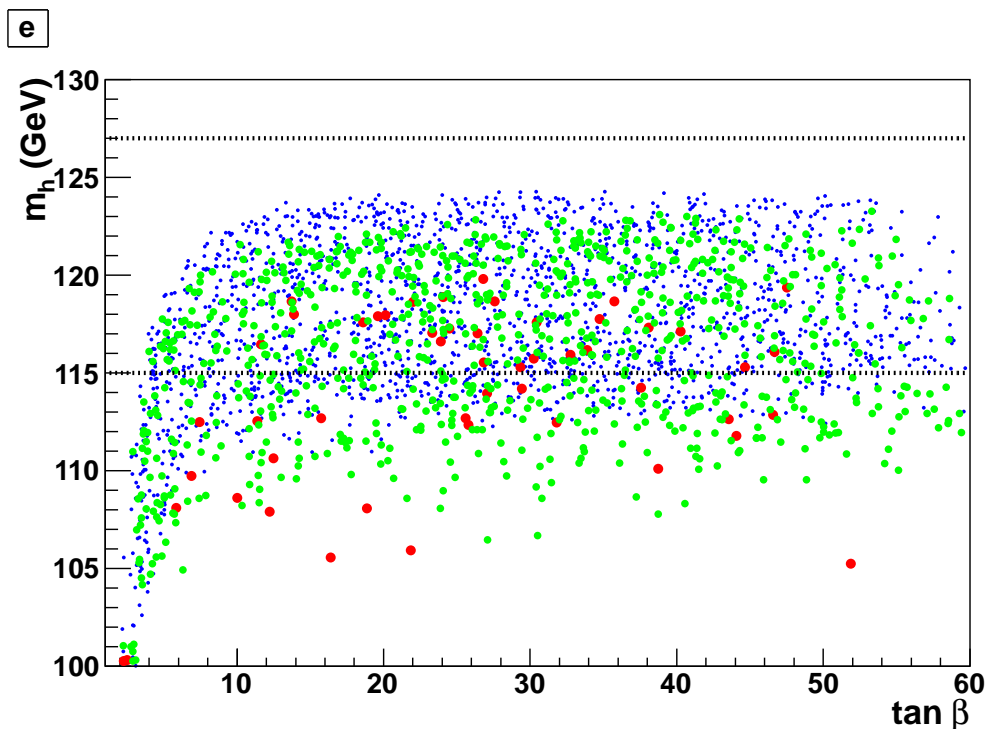


Но!

- Как сделать $m_{\tilde{t}} \ll m_{\tilde{u}}, m_{\tilde{d}}, \dots$ без FCNC??

Нарушение SUSY различает ароматы. Как добиться одновременной диагонализуемости матриц $m_{\tilde{q}}$ и λ_q ??

- Кроме того, бозон Хиггса оказался слишком тяжелым



$$m_{\tilde{t}} = 1.5 \text{ ТэВ}$$

$$m_{\tilde{t}} = 1.0 \text{ ТэВ}$$

$$m_{\tilde{t}} = 0.5 \text{ ТэВ}$$

Baer et. al., March 2012

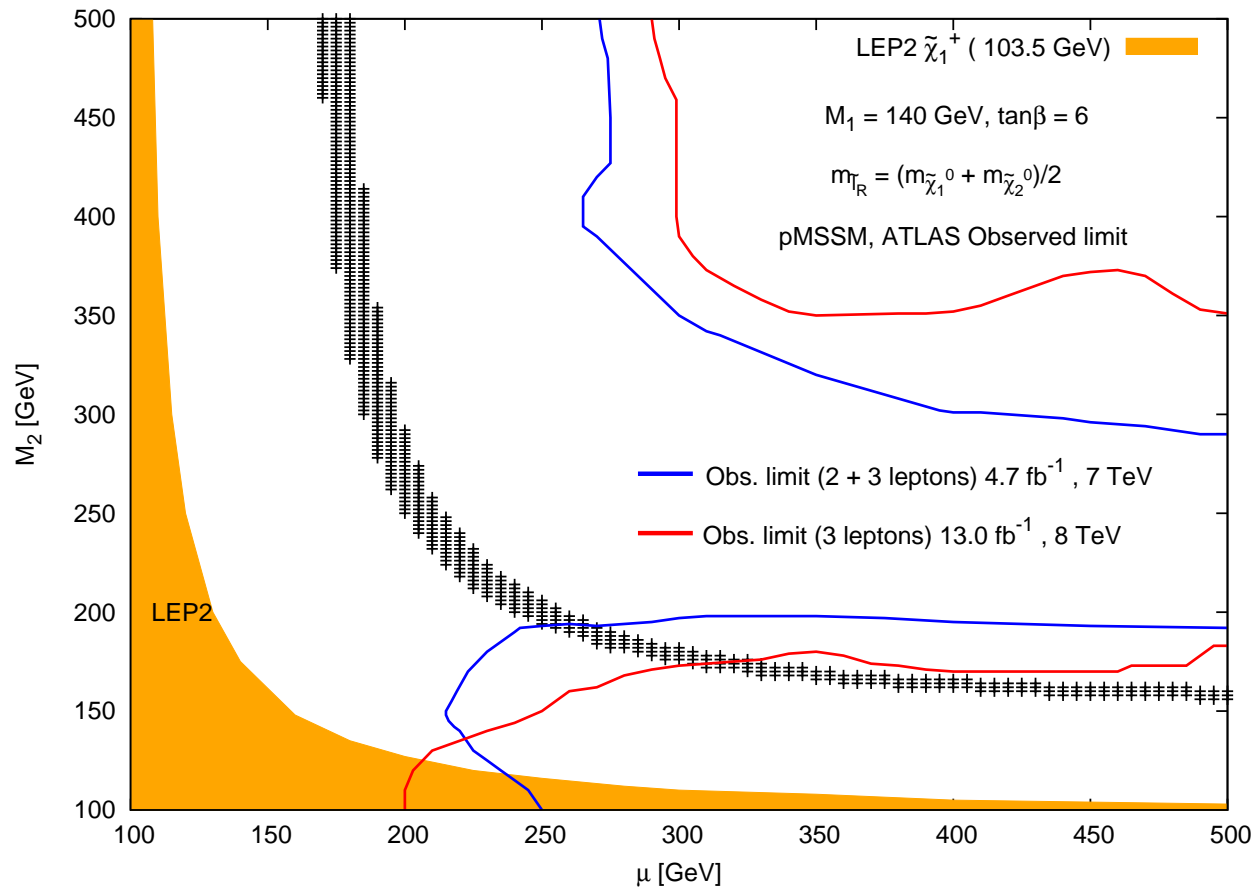
Темная материя

Фольклор: нейтралино – естественный кандидат.

Реальность:

- Ограничения LHC на массы суперпартнеров
 - ⇒ малые сечения аннигиляции нейтралино
 - ⇒ **перепроизводство темной материи**
- Требуется **fine tuning**:
 - $m_{\chi} \approx m_H/2 \implies$ резонансная аннигиляция
и/или
 - $m_{\chi^+} \approx m_{\chi}$, NLSP почти вырождена с LSP \implies
ко-аннигиляция

Даже это не очень помогает



Choudhury, Datta, May 2013

Модель с ко-аннигиляцией. Черная область – правильная плотность темной материи, область внутри красного контура закрыта LHC

SUSY перестает быть привлекательной

SUSY is no longer best guess
(even good guess)

Составные модели

- А priori правдоподобны:
 - КХД: нарушение киральной симметрии
 - Многочисленные примеры в физике конденсированных сред
 - Ограничения могут быть менее жесткими: затрагивается только электрослабый сектор
- Но!
- Большинство моделей: “неправильный” бозон Хиггса (см. техницвет)

● Жизнеспособная возможность:

Хиггс = псевдо-намбу-голдстоуновский бозон.

- **Пример:** Глобальная группа ароматов $SO(5)$, сильная связь \implies нарушение до $SO(4)$.

Поле Энглера–Браута–Хиггса живет на многообразии $SO(5)/SO(4) \implies$

4 вещественных поля = 1 комплексный дублет.

- Неизвестно, в какой теории (типа КХД?) такое бывает.

● Проблема с генерацией масс фермионов

- Смешивание элементарных и составных фермионов.
Как его организовать?

● До сих пор: игрушечные модели, мотивированные голографией.

Желаемое за действительное? Где резонансы??

На распутье

- Предпочтительный сценарий:

Новая физика на LHC-14 ТэВ \implies ILC или CLIC

Скорее всего, то, о чем теоретики не подозревают

\implies модельно-независимый поиск

- Стандартная модель на LHC-14 ТэВ

\implies Фабрика Хиггсов (а также Z и $t\bar{t}$).

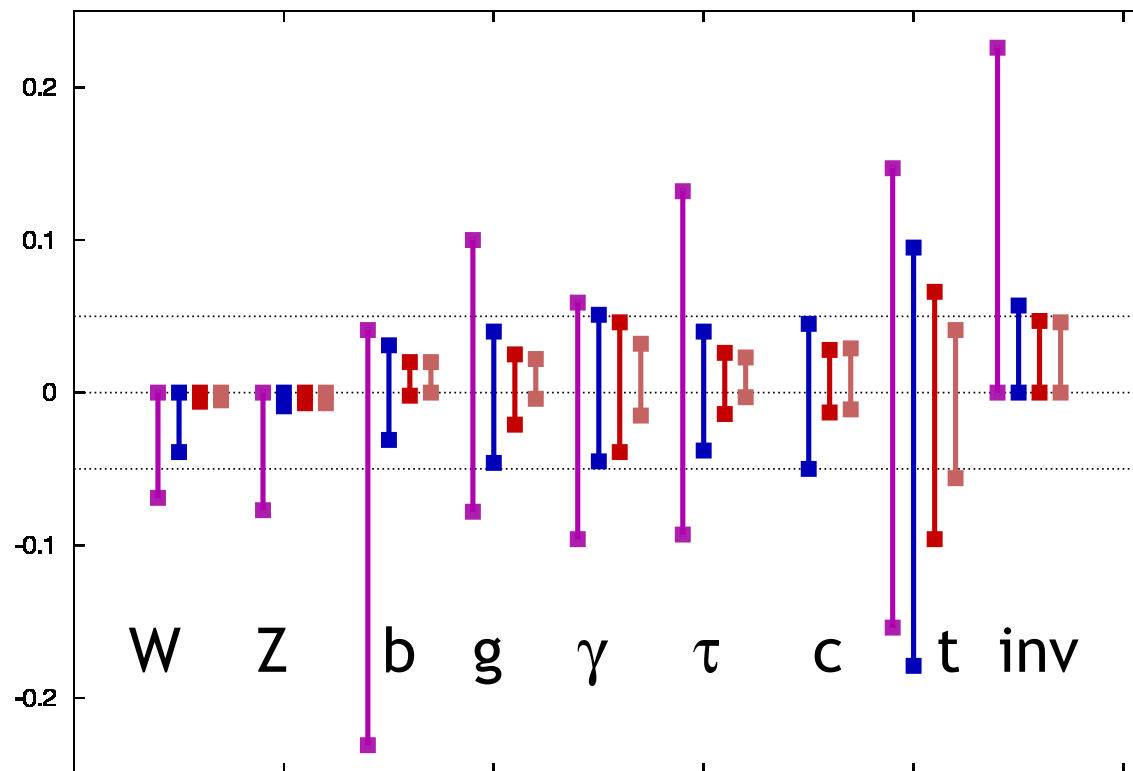
- Малые отклонения от Стандартной модели

$$\frac{\delta\lambda_{HXX}}{\lambda_{HXX,SM}} \sim 5\% \cdot \left(\frac{1 \text{ ТэВ}}{\Lambda} \right)^2$$

Нужна точность не хуже 1%

ЛНС и ИЛС не дотягивают

$g(hAA)/g(hAA)|_{SM} - 1$ ЛНС/ИЛС1/ИЛС/ИЛСТеV



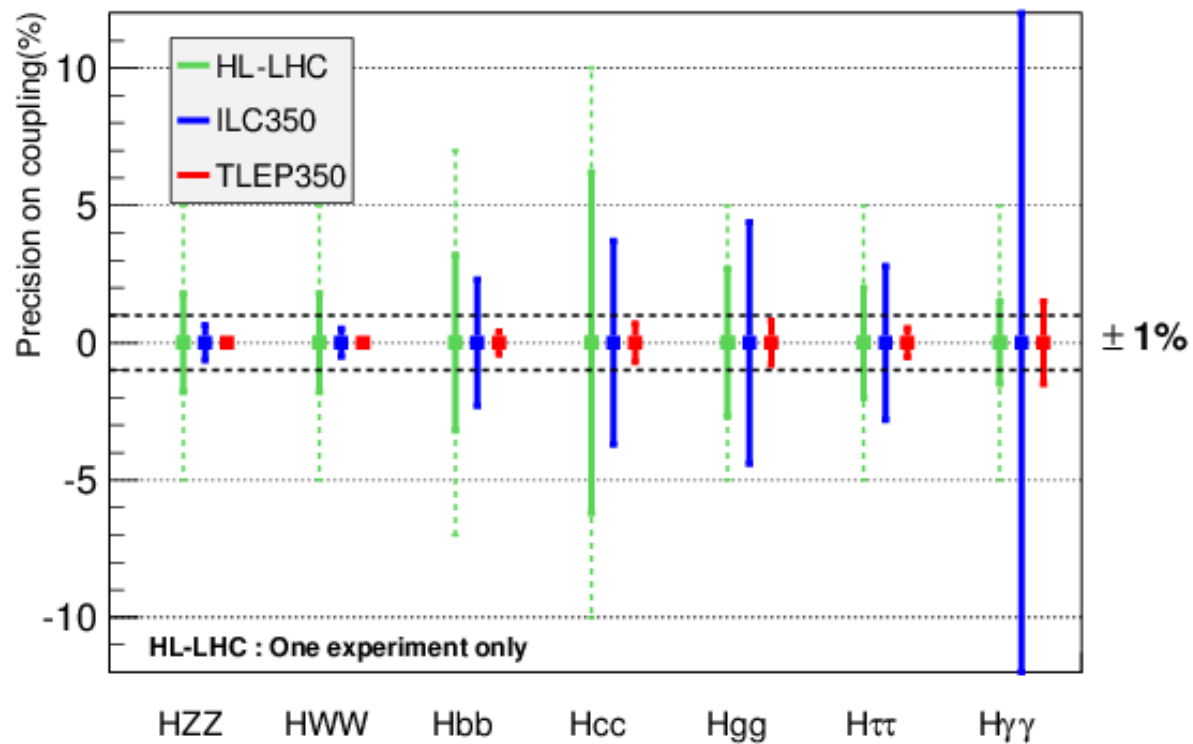
Peskin, 2012

TLEP

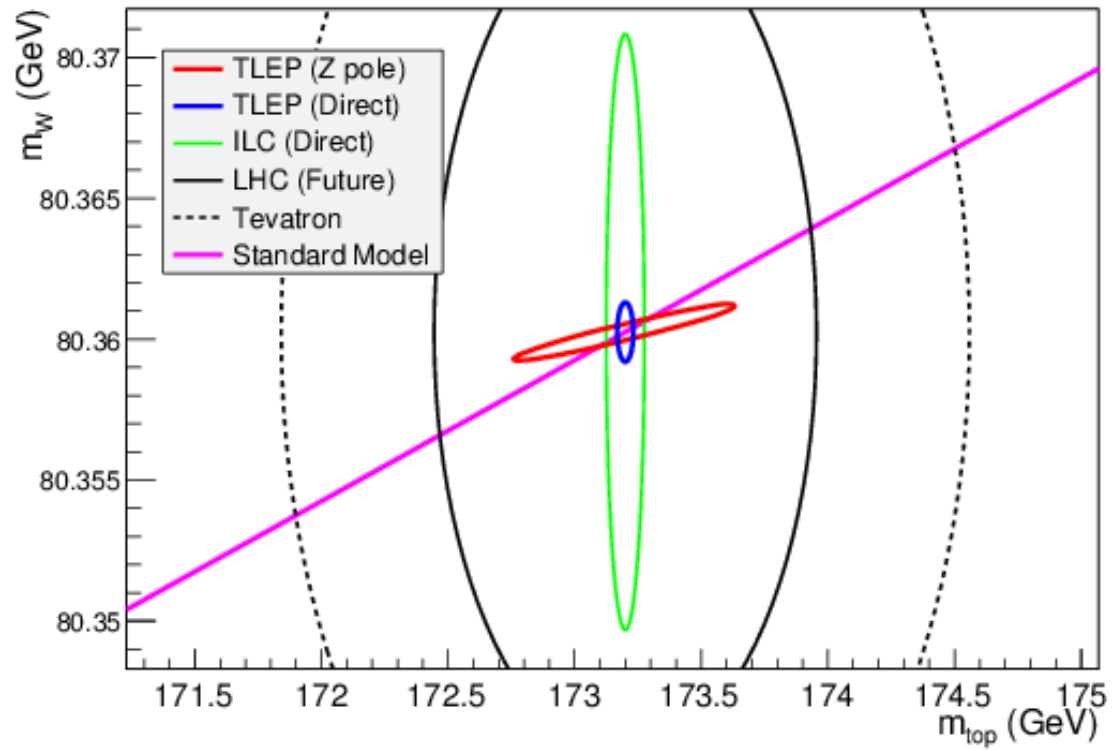
Кольцевой e^+e^- -коллайдер на энергию до $\sqrt{s} = 350 - 500$ ГэВ,
длина кольца 80 – 100 км,
светимость $5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ при $\sqrt{s} = 240$ ГэВ



Измерение больших констант связи бозона Хиггса с точностью лучше 1%



Прецизионное измерение m_W и m_t



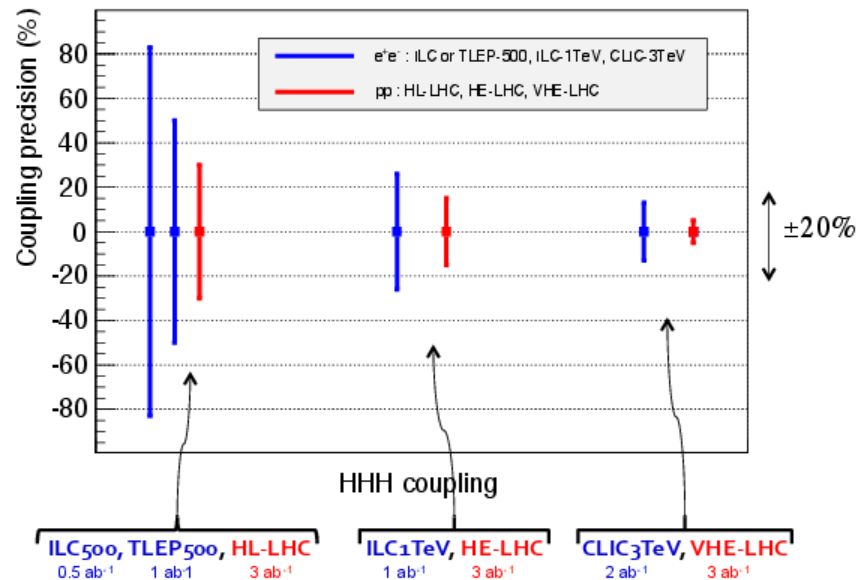
Кубическая вершина HHH

- Перенормируемый сектор Энглера–Браута–Хиггса

$$V(H) = \frac{\lambda}{2} \left(H^\dagger H - \frac{v^2}{2} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{HHH} = \frac{m_H^2}{2v}$$

(петлевые поправки в СМ $\sim 0.5\%$).

- Сильная связь в секторе Энглера–Браута–Хиггса в ТэВной области \Rightarrow отклонения $\delta\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH} = O(1)$.



А если ничего этого нет?

Только Стандартная модель при энергиях ЛНС

Иерархия энергетических масштабов $m_H \ll M_{Pl}$ — далеко не единственная загадка в физике.

Еще загадки

- Энергетический масштаб темной энергии во Вселенной $\Lambda_{DE} = 0.001$ эВ (!!!).

Чрезвычайно тонкая подстройка параметров нужна и для $\Lambda_{DE} \ll \Lambda_{QCD}, M_W$.

- Иерархия масс элементарных частиц

$$m_e = 0.0005 \text{ ГэВ}, \quad \dots, \quad m_t = 173 \text{ ГэВ}$$

- Примерное равенство плотностей массы тёмной материи и обычного вещества во Вселенной
- Многое другое ...

Накопившиеся загадки: что это?

- Доминирующая точка зрения: Свидетельство новой физики при доступных энергиях. Целых пластов!
- Другая возможность: “случайности” действительно имеют место на самом фундаментальном уровне. Значения некоторых параметров могут быть – и являются – ненатуральными.

Антропный принцип:

фундаментальные параметры таковы, что наше существование возможно.

На первый взгляд, лженаука. Но только на первый взгляд.

Дружелюбные случайности

- Космологическая постоянная (плотность темной энергии) должна быть мала, чтобы успели образоваться галактики

Linde, 87 , Weinberg, 87

- Протон и нейтрон: $m_p = 0.9383$ ГэВ, $m_n = 0.9396$ ГэВ
Массы u, d -кварков и α_{EM} таковы, что $m_n > m_p$ (водород существует), но ядра стабильны

- Первичные возмущения плотности во Вселенной как раз таковы, что образуются звёзды и планетные системы

Tegmark, Rees, 97

- Множество других ...

Теоретические идеи
(инфляционная теория ранней Вселенной; дочерние
вселенные; “ландшафт” теории суперструн):

Вселенная гораздо больше, чем ее видимая часть

“Наше положение во Вселенной
с необходимостью выделено тем,
что оно допускает существование
нас как наблюдателей”

Б. Картер’ 1974

“Our location in the Universe
is necessarily privileged to
the extent of being compatible
with our existence as observers”

В. Carter’ 1974



- Законы физики, в том числе “фундаментальные” константы, различны в разных частях Вселенной
- Мы там, где подходящие законы и константы

НАШЕ СУЩЕСТВОВАНИЕ – ПРОСТО ОДИН ИЗ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ФАКТОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ
ОКРУЖАЮЩУЮ НАС ОБЛАСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

Нас же не удивляет,
что на Земле температура от 220 до 320 градусов Кельвина,
хотя в подавляющем большинстве мест во Вселенной $T \sim 3 \text{ K}$

Антропный принцип/environmentalism:

- если работает – плохо для теоретиков
критерий естественности не работает
- трудно опровергнуть:
мы же в самом деле существуем
- вполне могут появиться аргументы “против”
например, открытие зависимости плотности
тёмной энергии от времени
- может появиться (хорошо бы нет!) аргумент “за”,
если на LHC не будет найдено “новой физики”

Не исключено, что электрослабый масштаб $m_H \sim 100$ ГэВ —
это ещё одна “антропная” величина

При $m_H > 10$ ТэВ термоядерные реакции в звездах
невозможны.

При $m_H \sim M_{Pl} \sim 10^{19}$ ГэВ любой кусок вещества
был бы черной дырой

Интрига:

НОВАЯ ФИЗИКА — ЗА УГЛОМ

ИЛИ

МЫ НАХОДИМСЯ НА ПОРОГЕ ПЕРЕХОДА
ОТ ТРАДИЦИОННОГО К АНТРОПНОМУ ВЗГЛЯДУ
НА ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ?

