

# **LHC, шкала новой физики и КОСМОЛОГИЯ**

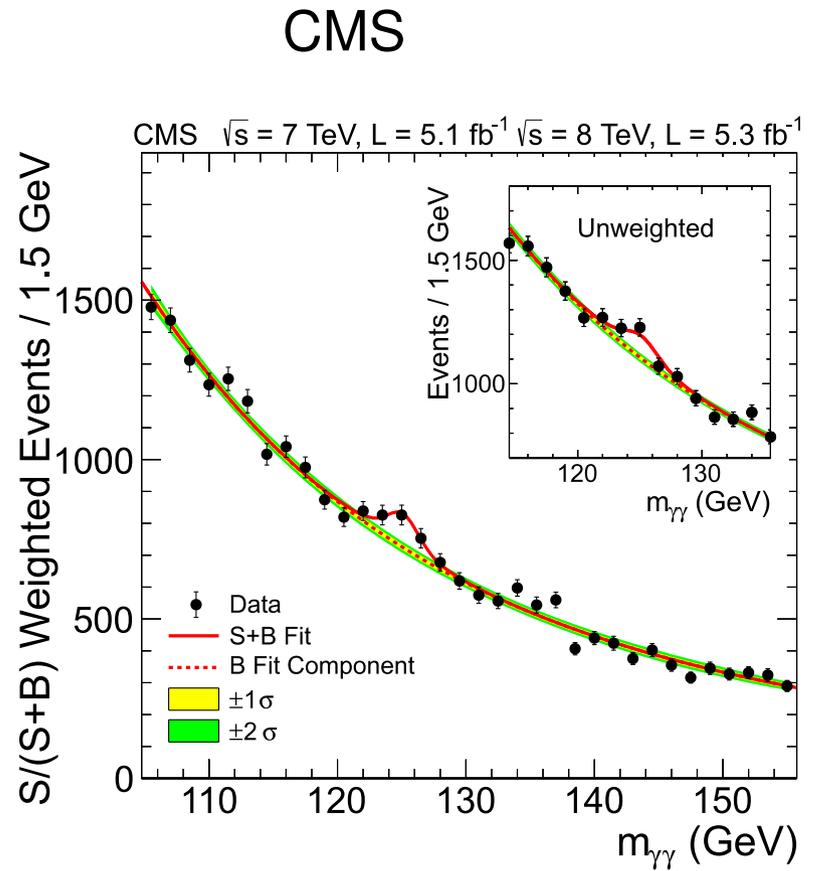
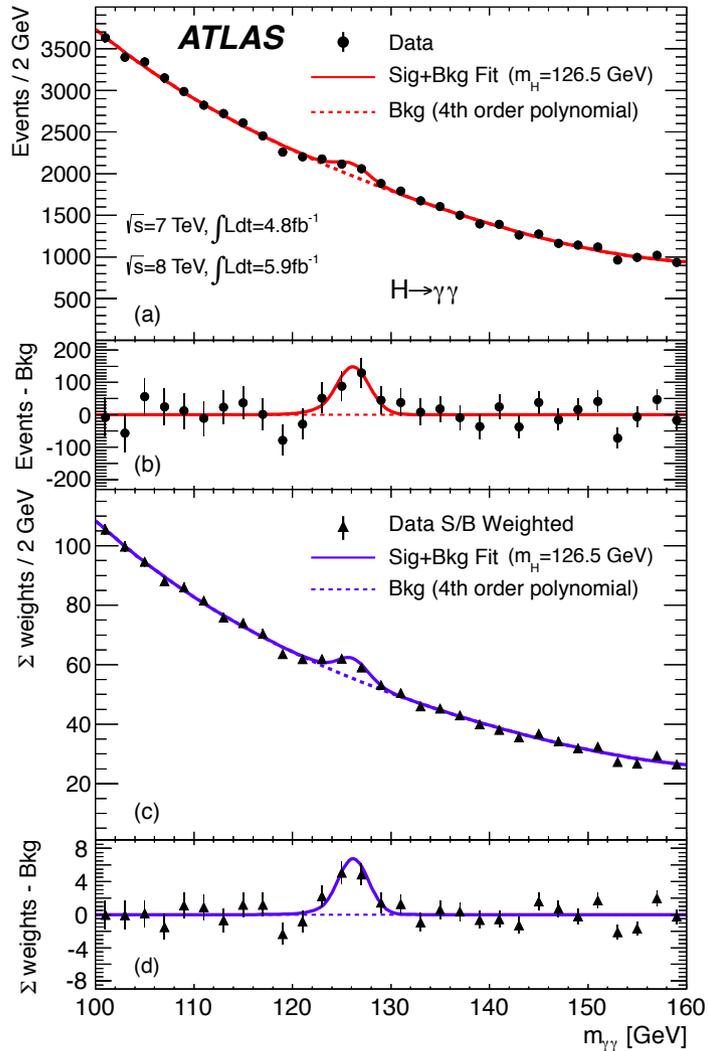
**Михаил Шапошников**

**Семинар, посвященный  
60-летию Валерия Рубакова**

По мотивам работы F. Bezrukov, MS, arXiv:1411.1923, “Why should we care about the top quark Yukawa coupling?”, и беседы с Валерием в столовой CERN

# Открытия на LHC

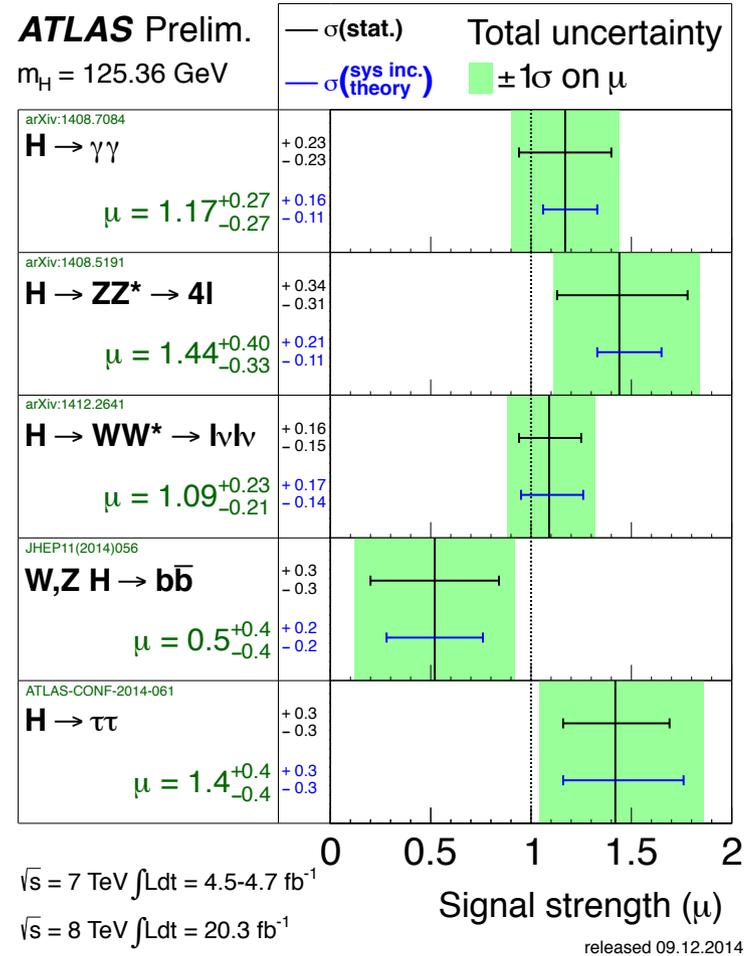
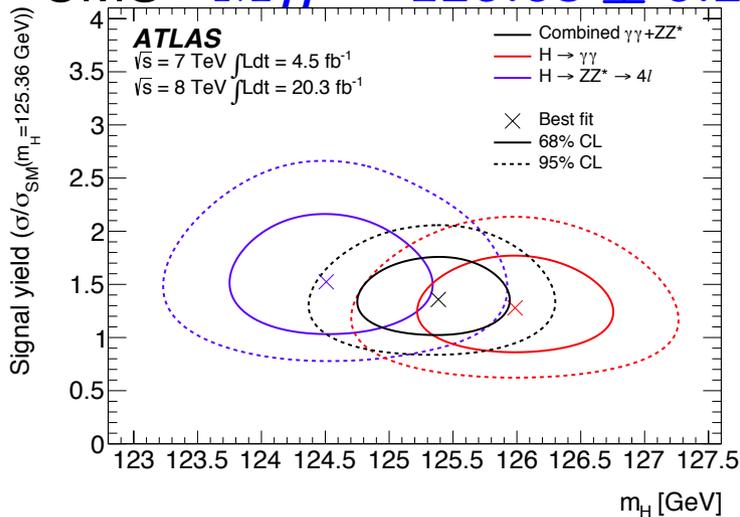
# 4 июля 2012, открытие бозона Хиггса на ATLAS и CMS



# Свойства бозона Хиггса

Atlas -  $M_H = 125.36 \pm 0.41$  GeV

CMS -  $M_H = 125.03 \pm 0.29$  GeV



Свойства новой частицы соответствуют свойствам бозона Хиггса  
 Стандартной модели

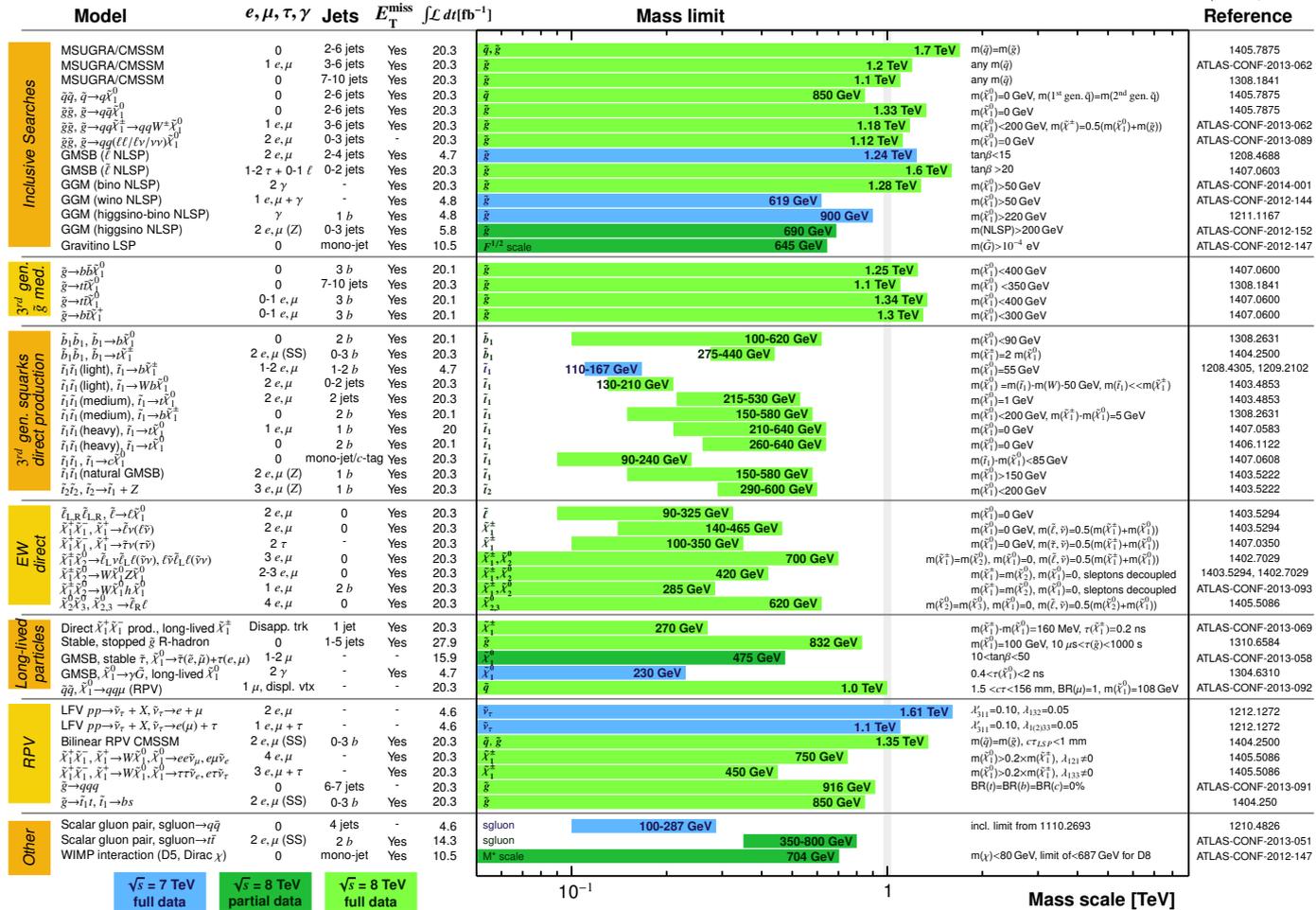
# Поиск новой физики, SUSY

## ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: ICHEP 2014

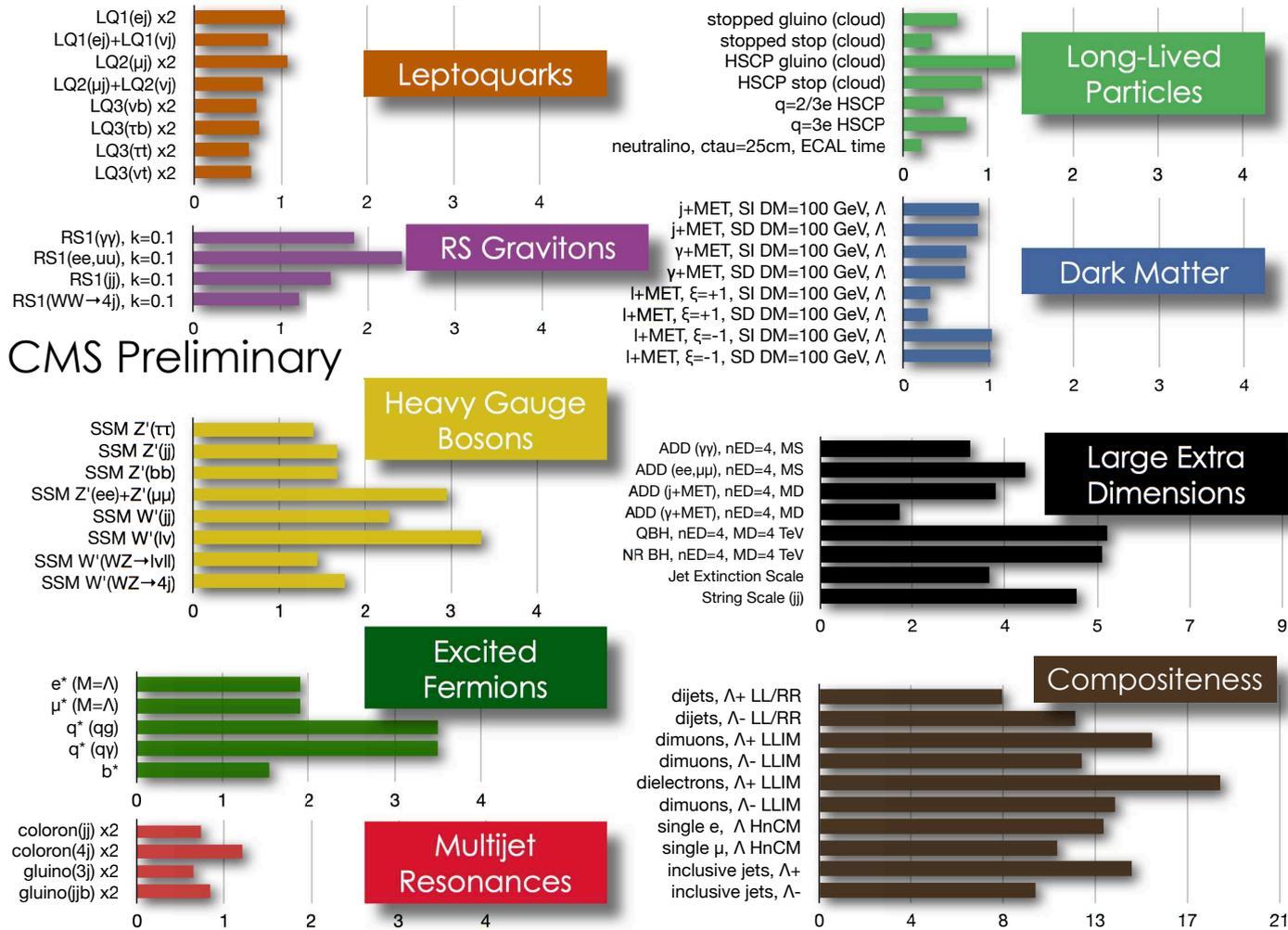
ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$



\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 $\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

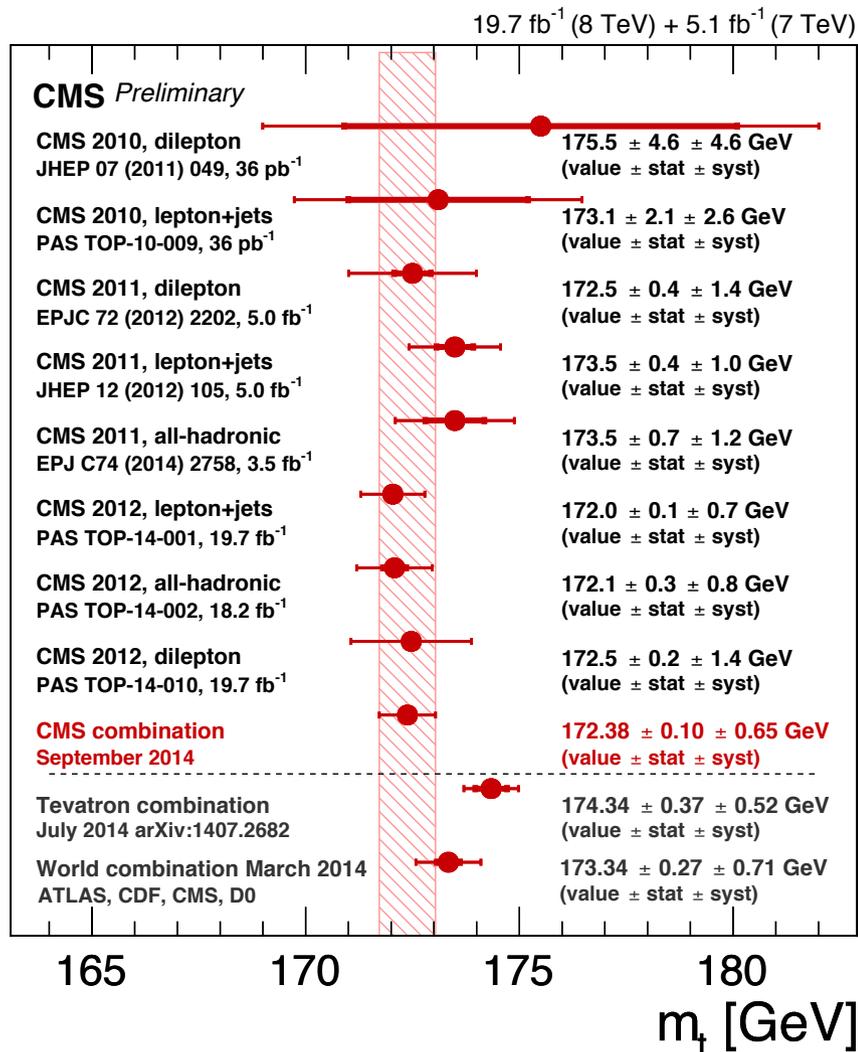
# Поиск новой физики, экзотика



CMS Exotica Physics Group Summary – ICHP, 2014

# Определение массы топ кварка

Монте-Карловская масса:  $m_t = 172.38 \pm 0.10 \pm 0.65 \text{ GeV}$



# Сводка результатов, полученных на LHC

---

- Стандартная Модель (СМ) подтверждена: найдена последняя частица, предсказываемая ею.

# Сводка результатов, полученных на LHC

---

- Стандартная Модель (СМ) подтверждена: найдена последняя частица, предсказываемая ею.
- Отклонений от СМ не обнаружено.

# Сводка результатов, полученных на LHC

---

- Стандартная Модель (СМ) подтверждена: найдена последняя частица, предсказываемая ею.
- Отклонений от СМ не обнаружено.

Что можно сказать про  
масштаб новой физики?

# Сводка результатов, полученных на LHC

---

- Стандартная Модель (СМ) подтверждена: найдена последняя частица, предсказываемая ею.
- Отклонений от СМ не обнаружено.

Что можно сказать про масштаб новой физики?

Есть ли новая физика между масштабами Ферми (100 ГэВ) и Планка ( $10^{19}$ ) ГэВ?

# Если да

- Распад протона **да** (?)

$$\tau_p \sim \frac{\Lambda_{new}^4}{m_p^5}$$

Текущее ограничение  $\tau_p > 10^{32}$  лет;

- Новая физика на LHC **да** (?)

Решение проблемы иерархии на электрослабом масштабе - стабильность относительно радиационных поправок.

Суперсимметрия, композитный бозон Хиггса, большие дополнительные измерения и т.д. Масштаб новой физики - сотни GeV.

# Если да

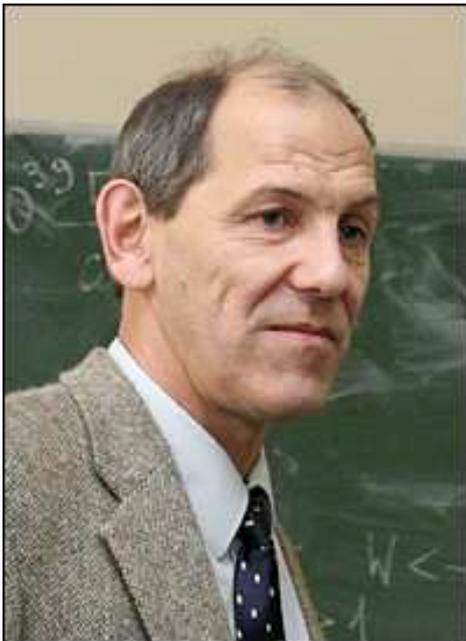
- Поиск слабо взаимодействующих массивных частиц темной материи (ТМ) **да** (?)  
SUSY кандидат - нейтралино
- Поиск аннигиляции частиц ТМ **да** (?)  
SUSY кандидат - нейтралино
- Поиск аксионов **да** (?)  
Аксион - это гипотетическая частица, призванная решить проблему сильного CP-нарушения

# Если нет

- Распад протона **нет**  
 $\tau_p \simeq 10^{45}$  лет для  $\Lambda_{new} \simeq M_P$
- Хиггс и ничего больше на LHC
- Поиск слабо взаимодействующих массивных частиц темной материи (ТМ) **нет**
- Поиск аннигиляции частиц ТМ **нет**
- Поиск аксионов **нет**  
взаимодействует слишком слабо, если  $\Lambda_{new} \simeq M_P$

На самом деле, ставки  
еще выше

# На самом деле, ставки еще выше



оулки верного

С п о р

$O(\pi)$

П а р а м е т р ы

м о д е л и  $\nu M S M$

и.е.  $M_1 \sim [2 \div 5] \text{ KeV}$ ,

$m_1 < 10^{-5} \text{ eV}$

DM:  $N_1, N_2$  и  $N_3$ : BAV

в е р н ы .

з а : М. Шапошников  
Ф. Безруков

п р о т и в : В. Рубако'в

Н а : 10 бутылок  
алкогольного напитка на выбор  
участника.

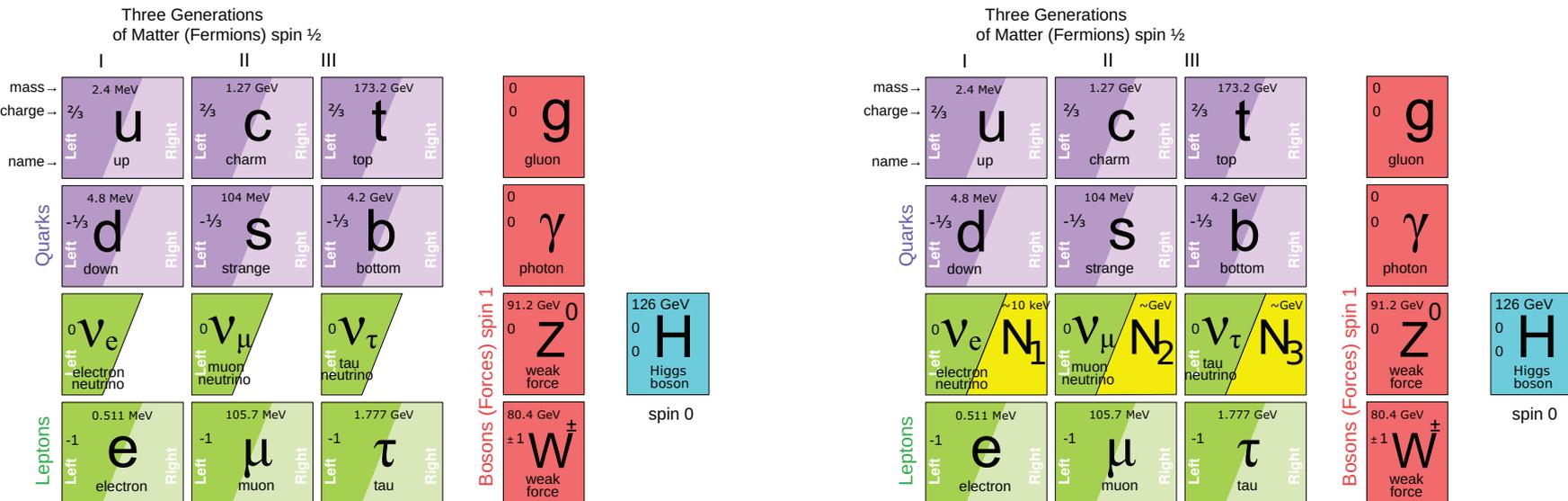
13.05.2005

Рубако'в

Безруков

# Новая физика при низких энергиях:

$\nu$ MSM



$N$  = Тяжелый нейтральный лептон - HNL

Роль  $N_1$  с массой порядка keV: темная материя

Роль  $N_2, N_3$  с массой порядка 100 MeV – GeV: Источник масс нейтрино и барионной асимметрии Вселенной

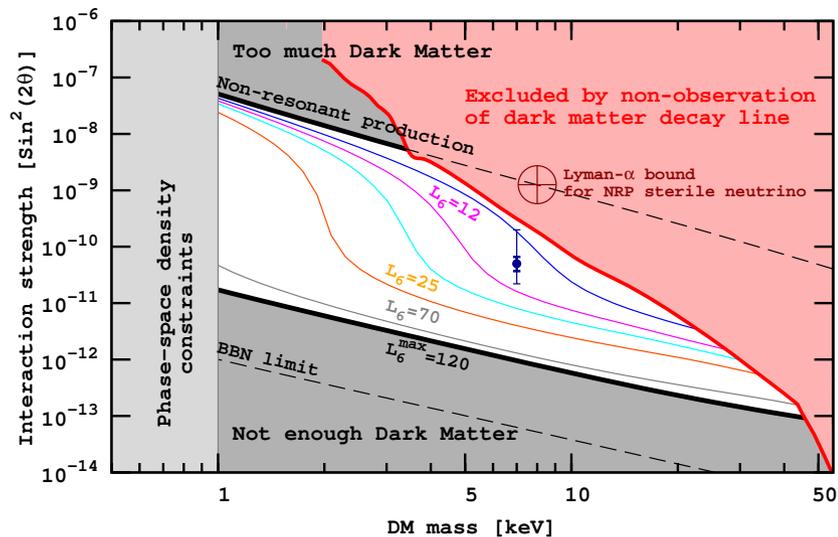
Федор и я решили в 2014, что мы проиграли спор, и стали думать, какой именно алкогольный напиток приобрести.

Федор и я решили в 2014, что мы проиграли спор, и стали думать, какой именно алкогольный напиток приобрести.

Причина: наблюдение 3.5 KeV линии, возможно означающей распад частиц ТМ по каналу  $N_1 \rightarrow \gamma\nu$ , с массой  $7 \text{ keV} = 3.5 \times 2 \text{ keV} > (3 - 5) \text{ keV}$ , было представлено обсерваториями Гарварда (Bulbul et al) и Leiden/EPFL (Boyarsky et al).

Федор и я решили в 2014, что мы проиграли спор, и стали думать, какой именно алкогольный напиток приобрести.

Причина: наблюдение 3.5 KeV линии, возможно означающей распад частиц ТМ по каналу  $N_1 \rightarrow \gamma\nu$ , с массой  $7 \text{ keV} = 3.5 \times 2 \text{ keV} > (3 - 5) \text{ keV}$ , было представлено обсерваториями Гарварда (Bulbul et al) и Leiden/EPFL (Boyarsky et al).



ошибка в формуле  
 $O(\pi)$

# С п о р

П а р а м е т р ы  
м о д е л и  $\nu M S M$

и.е.  $M_1 \sim [2 \div 5] \text{ KeV}$ ,  
 $m_1 < 10^{-5} \text{ eV}$   
DM:  $N_1, N_2$  и  $N_3$ : BAV  
в е р н ы .

з а : М. Шапошников  
Ф. Безруков  
п р о т и в : В. Рубако'в

Н а : 10 бутылок  
алкогольного напитка на выбор  
участника.

13.05.2005

  
Безруков

  
Рубако'в

Другой спор, 1989 (?): Рубаков и Шапошников против Ringwald,  
McLerran

Другой спор, 1989 (?): Рубаков и Шапошников против Ringwald,  
McLerran

Предмет спора: процессы с несохранением барионного числа в  
Стандартной Модели экспоненциально подавлены при высоких  
энергиях

Другой спор, 1989 (?): Рубаков и Шапошников против Ringwald,  
McLerran

Предмет спора: процессы с несохранением барионного числа в  
Стандартной Модели экспоненциально подавлены при высоких  
энергиях

● Р и Ш : да, R+M : нет

Другой спор, 1989 (?): Рубаков и Шапошников против Ringwald,  
McLerran

Предмет спора: процессы с несохранением барионного числа в  
Стандартной Модели экспоненциально подавлены при высоких  
энергиях

- Р и Ш : да, R+M : нет
- Андреас и Ларри проиграли в 2003 г (?)

## Другой спор, 1989 (?): Рубаков и Шапошников против Ringwald, McLerran

Предмет спора: процессы с несохранением барионного числа в Стандартной Модели экспоненциально подавлены при высоких энергиях

- Р и Ш : да, R+M : нет
- Андреас и Ларри проиграли в 2003 г (?)
- благодаря теоретическим работам Валерия с его учениками: Петра Тинякова, Федора Безрукова, Дам Сола

Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Найти несоответствия в СМ и понять, на каком масштабе их можно исправить.

Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Найти несоответствия в СМ и понять, на каком масштабе их можно исправить.

- Массы и осцилляции нейтрино, отсутствующие в СМ

Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Найти несоответствия в СМ и понять, на каком масштабе их можно исправить.

- Массы и осцилляции нейтрино, отсутствующие в СМ
  - не годится: массы правых нейтрино могут быть от  $1 \text{ eV}$  до  $10^{15} \text{ GeV}$

Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Найти несоответствия в СМ и понять, на каком масштабе их можно исправить.

- Массы и осцилляции нейтрино, отсутствующие в СМ
  - не годится: массы правых нейтрино могут быть от  $1 \text{ eV}$  до  $10^{15} \text{ GeV}$
- Темная материя, отсутствующая в СМ

## Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Найти несоответствия в СМ и понять, на каком масштабе их можно исправить.

- Массы и осцилляции нейтрино, отсутствующие в СМ
  - не годится: массы правых нейтрино могут быть от  $1 \text{ eV}$  до  $10^{15} \text{ GeV}$
- Темная материя, отсутствующая в СМ
  - не годится: массы частиц ТМ могут быть от  $10^{-5} \text{ eV}$  (аксионы) до  $10^{20} \text{ GeV}$  ("Вимпзиллы", Q-шары)

## Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Найти несоответствия в СМ и понять, на каком масштабе их можно исправить.

- Массы и осцилляции нейтрино, отсутствующие в СМ
  - не годится: массы правых нейтрино могут быть от  $1 \text{ eV}$  до  $10^{15} \text{ GeV}$
- Темная материя, отсутствующая в СМ
  - не годится: массы частиц ТМ могут быть от  $10^{-5} \text{ eV}$  (аксионы) до  $10^{20} \text{ GeV}$  ("Вимпзиллы", Q-шары)
- Бариогенезис, отсутствующий в СМ

## Как определить энергетический масштаб новой физики из текущих экспериментов?

Найти несоответствия в СМ и понять, на каком масштабе их можно исправить.

- Массы и осцилляции нейтрино, отсутствующие в СМ
  - не годится: массы правых нейтрино могут быть от  $1 \text{ eV}$  до  $10^{15} \text{ GeV}$
- Темная материя, отсутствующая в СМ
  - не годится: массы частиц ТМ могут быть от  $10^{-5} \text{ eV}$  (аксионы) до  $10^{20} \text{ GeV}$  ("Вимпзиллы", Q-шары)
- Бариогенезис, отсутствующий в СМ
  - не годится: массы новых частиц, ответственных за бариогенезис (например, правых нейтрино), могут быть от  $10 \text{ MeV}$  до  $10^{15} \text{ GeV}$

# Самосогласованность Стандартной модели

Требование самосогласованности накладывает следующие ограничения на массу Хиггса (считаем, масса топ кварка  $M_t = 173.2$  GeV, и прочие параметры в границах экспериментальных данных)

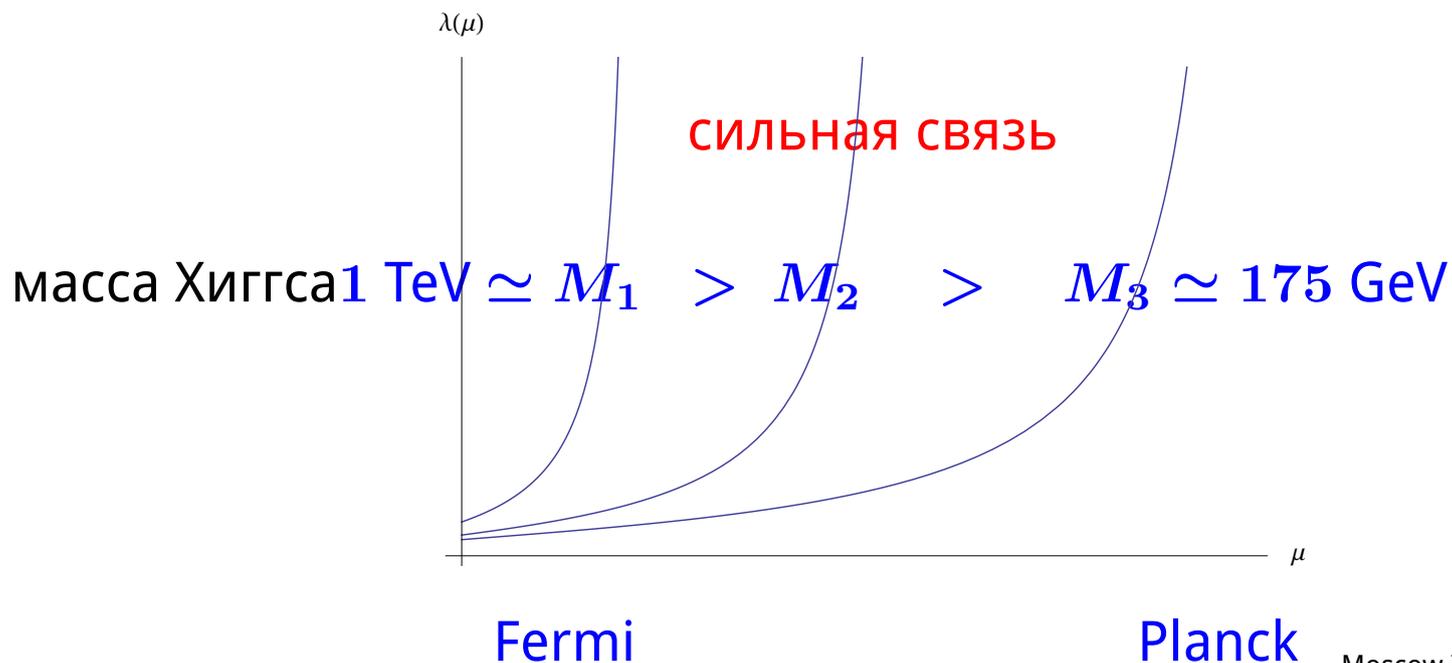
$m_{\text{meta}} \simeq 111 \text{ GeV}$  (граница метастабильности вакуума)

до

$m_{\text{Landau}} \simeq 1 \text{ TeV}$   
(граница тривиальности теории)

# Граница тривиальности

L. Maiani, G. Parisi and R. Petronzio '77; Lindner '85; T. Hambye and K. Riesselmann '96;... Константа самодействия Хиггса имеет полюс Ландау при энергии, определяемой массой Хиггса. Для  $M_H \simeq m_{\text{Landau}} \simeq 1 \text{ TeV}$  полюс находится близко к электрослабому масштабу.



# Граница тривиальности

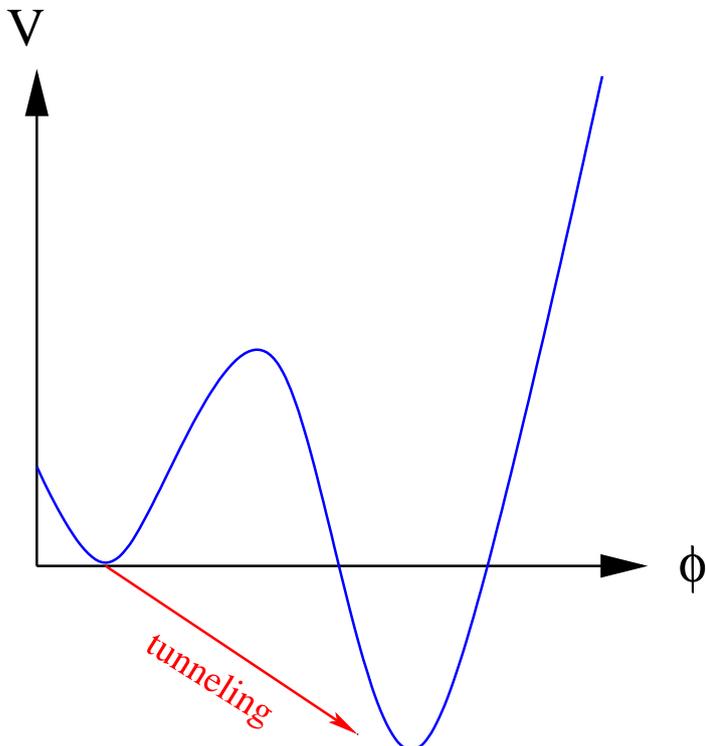
---

Если  $m_H < m_{\max} \simeq 175 \text{ GeV}$ , полюс Ландау достигается при энергиях, превышающих планковскую,  $E > M_P$ .

LHC: SM находится в режиме слабой связи при всех энергиях вплоть до планковской.

# Граница стабильности вакуума

Krasnikov '78, Hung '79; Politzer and Wolfram '79; Altarelli and Isidori '94; Casas, Espinosa and Quiros '94,'96;...; Ellis, Espinosa, Giudice, Hoecker, Riotto '09;...



Время жизни нашего вакуума меньше возраста Вселенной, если  $m_H < m_{\text{meta}}$ , где  $m_{\text{meta}} \simeq 111 \text{ GeV}$  Espinosa, Giudice, Riotto '07

# Граница стабильности вакуума

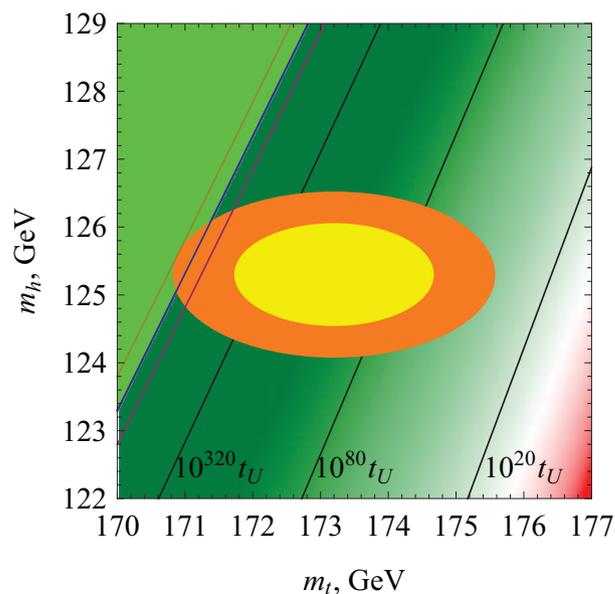
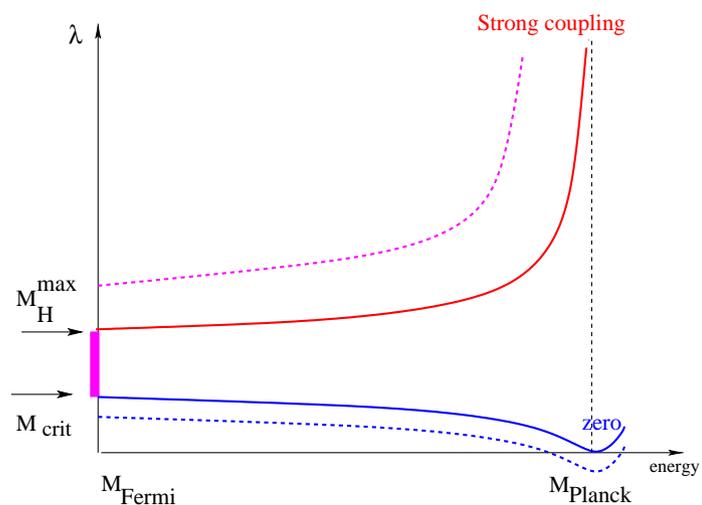
---

Если бы масса Хиггса была меньше, чем  $m_{\text{meta}} \simeq 111 \text{ GeV}$ , нам пришлось бы признать существование физики за пределами СМ, которая стабилизирует вакуум СМ.

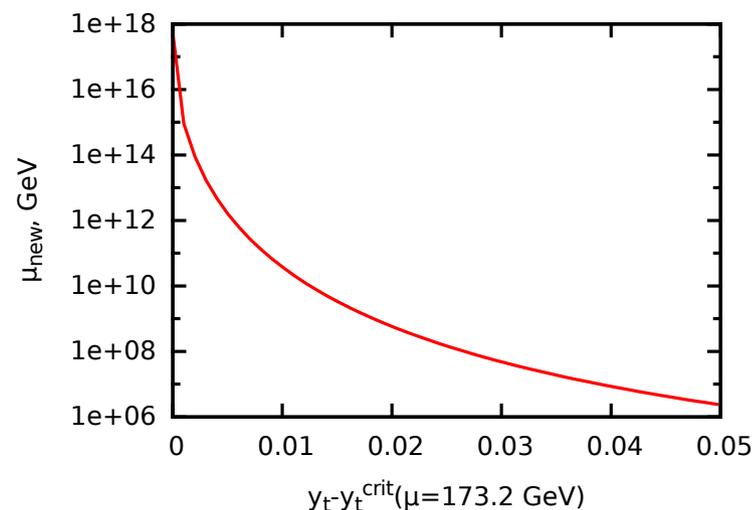
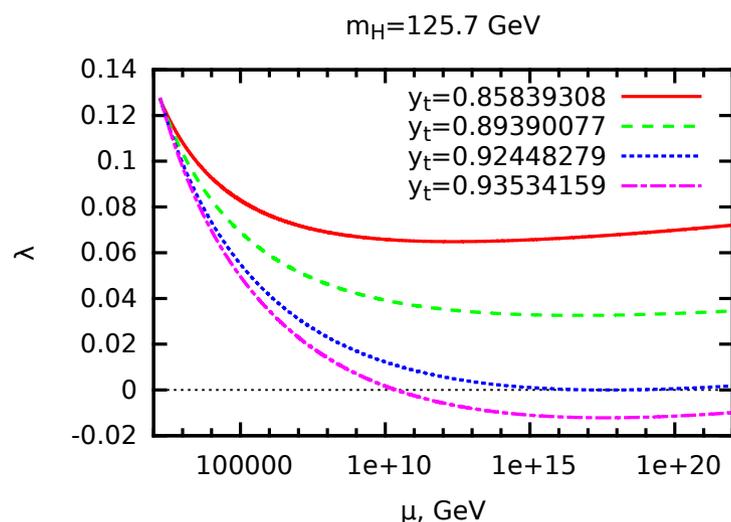
Однако, уже из данных LEP мы знаем, что  $m_H > m_{\text{meta}}$ , так что в новой физике нет необходимости.

# Главый результат ЛНС: СМ - согласованная эффективная теория при всех энергиях вплоть до планковской.

- Нет сигналов новой физики
- $M_H < 175 \text{ GeV}$  : СМ в режиме слабой связи при энергиях вплоть до планковской
- $M_H > 111 \text{ GeV}$ : Электрослабый вакуум стабилен или метастабилен, с временем жизни, превышающем возраст Вселенной.



## Метастабильность или стабильность?



Энергия  $\mu_0$ , при которой константа самодействия  $\lambda$  становится отрицательной (возможно, сигнализируя о новой физике), зависит от юкавской константы связи  $y_t$ .

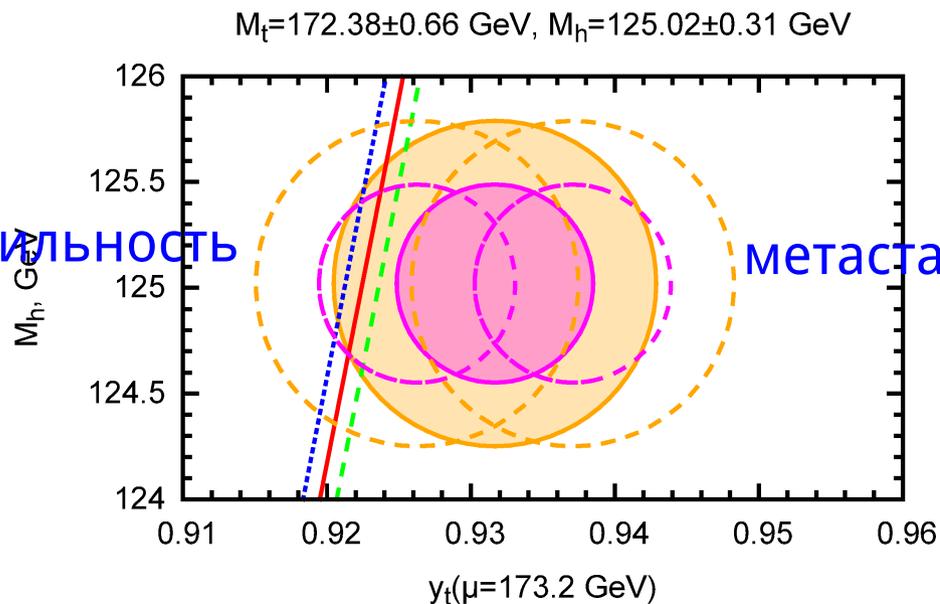
Вообще говоря,  $\mu_0 > 10^{10} \text{ GeV}$  :  
может быть критично для  
физики в ранней Вселенной!

# Космология и Стандартная модель

# Жизнь на грани

Мы живем очень близко к границе, разделяющей стабильный и метастабильный вакуумы, и неизвестно, с какой стороны!

абсолютная стабильность



# Инфляция и разогрев

---

Эволюция Вселенной сильно зависит от значения константы связи топ кварка (его массы):

# Инфляция и разогрев

---

Эволюция Вселенной сильно зависит от значения константы связи топ кварка (его массы):

- Стабильный СМ вакуум,  $y_t < y_t^{\text{crit}}$  : Вселенная в безопасности

# Инфляция и разогрев

---

Эволюция Вселенной сильно зависит от значения константы связи топ кварка (его массы):

- Стабильный СМ вакуум,  $y_t < y_t^{\text{crit}}$  : Вселенная в безопасности
- Метастабильный вакуум,  $y_t > y_t^{\text{crit}}$  : Могут появляться области истинного вакуума, приводящие к коллапсу Вселенной

# Выводы

---

# Выводы

---

- Если нет новой физики между масштабами Ферми и Планка: проверяемое ограничение на константу связи топ кварка,  $y_t < y_t^{\text{crit}}$ . Требуется:  $e^+e^-$  коллайдер, настроенный на порог рождения топ кварка - ILC, FCC.

# Выводы

- Если нет новой физики между масштабами Ферми и Планка: проверяемое ограничение на константу связи топ кварка,  $y_t < y_t^{\text{crit}}$ . Требуется:  $e^+e^-$  коллайдер, настроенный на порог рождения топ кварка - ILC, FCC.
- Или некая новая физика все же имеется между электрослабым масштабом и масштабом квантовой гравитации. Например, неминимальное взаимодействие Хиггса с гравитацией, новые частицы с массами порядка масштаба неустойчивости  $\mu_0$  и т.д.

# Заключение

Ответ на вопрос

Каков масштаб новой физики?

Ответ на вопрос

Каков масштаб новой физики?

до сих пор неизвестен,

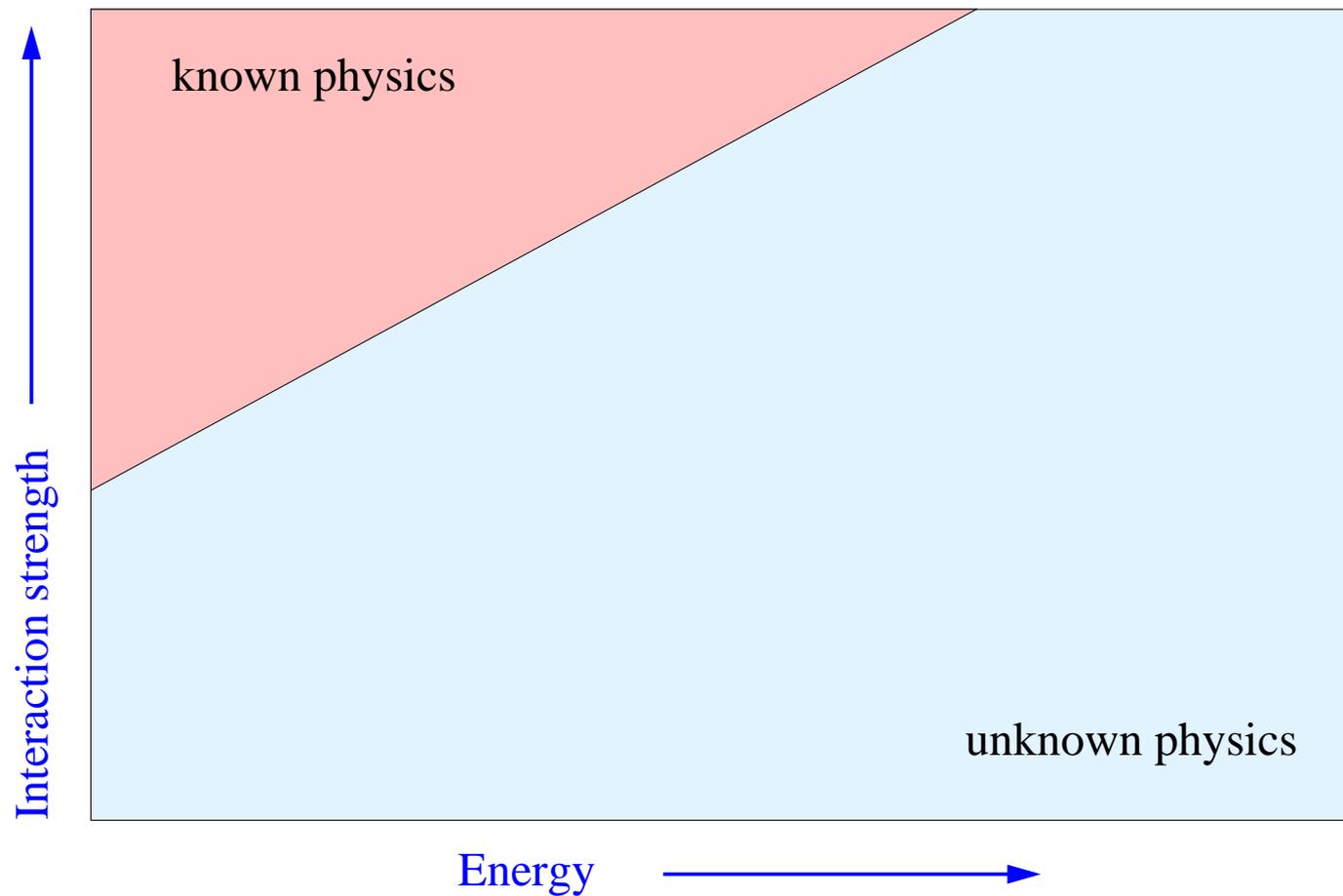
Ответ на вопрос

Каков масштаб новой физики?

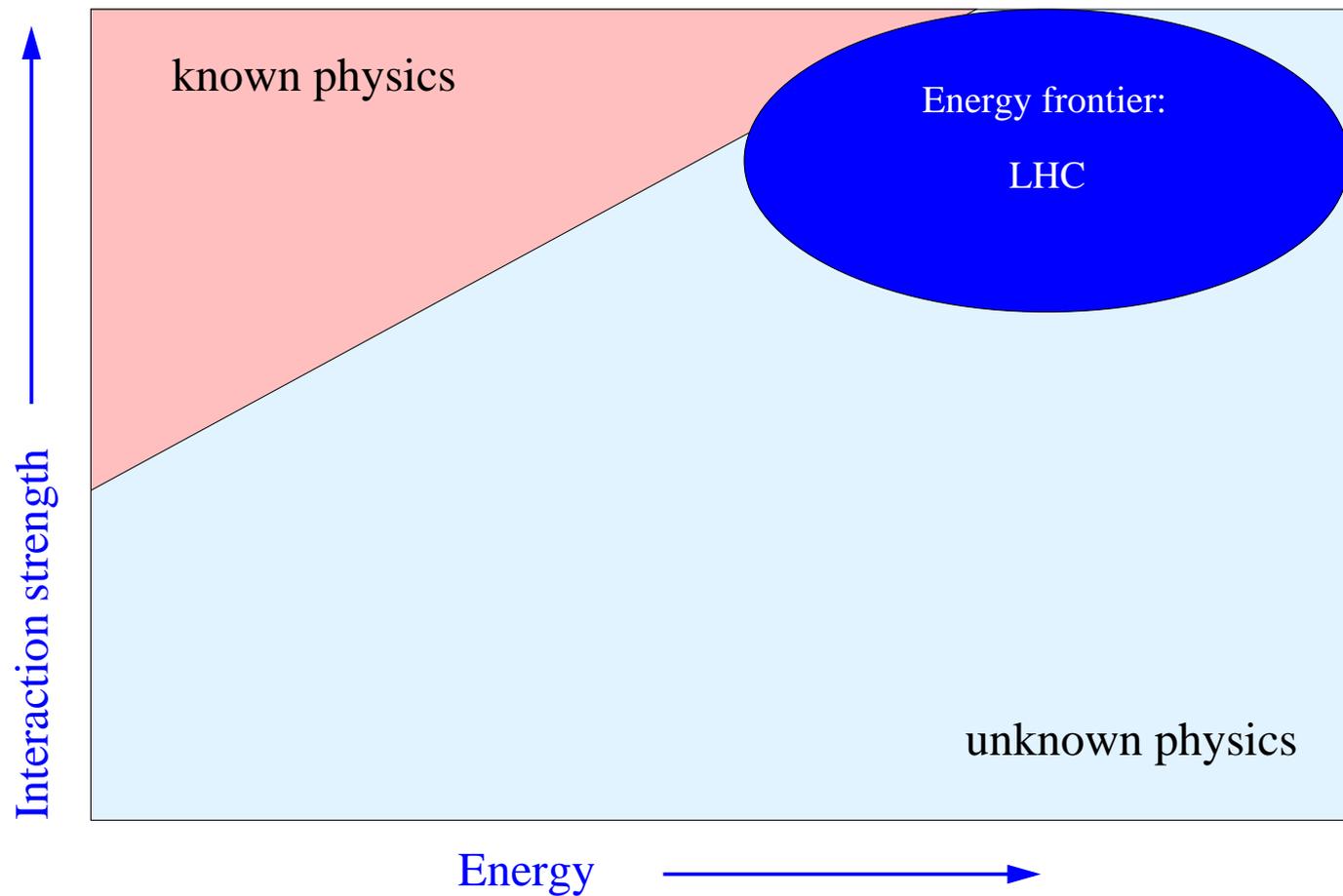
до сих пор неизвестен,

решить должен эксперимент!

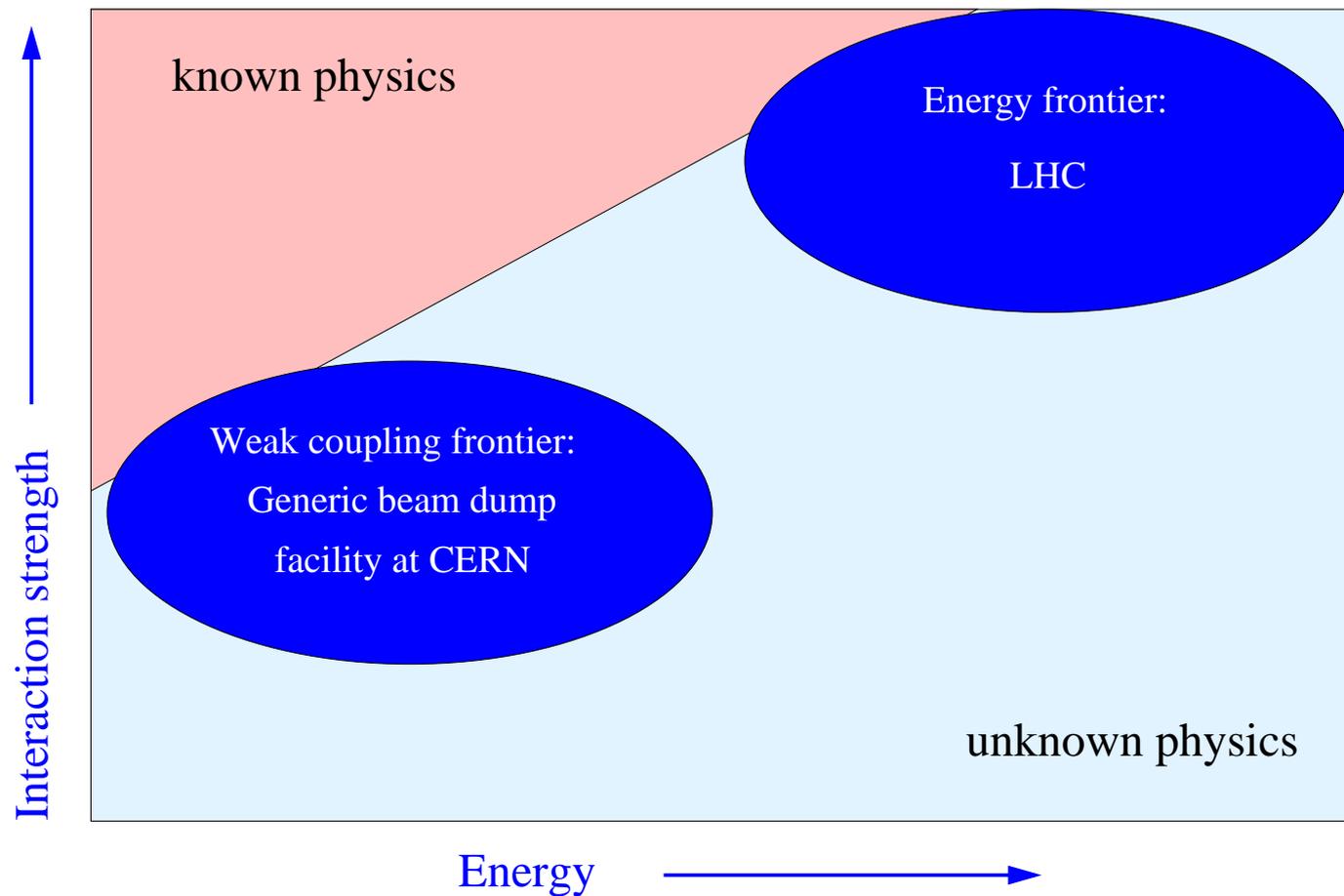
# Где новая физика?



# Где новая физика?



# Где новая физика?



# А также - точные измерения

---

- Масса Хиггса с наибольшей возможной точностью (LHC)
- Константа связи топ кварка с точностью  $5 \times 10^{-4}$   
( $\delta M_t \simeq 100 \text{ MeV}$ ) (LHC? будущий  $e^+e^-$  коллайдер?)
- $\alpha_s$  с неопределенностью  $\delta\alpha_s \simeq 2 \times 10^{-4}$

Стабильность электрослабого вакуума? Масштаб новой физики?

# С Днем рождения, Валера!

