

Статус и проблемы современной физики элементарных частиц

Арбузов Андрей Борисович

д.ф.-м.н., проф. РАН

начальник сектора Лаборатории теоретической физики им.
Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна





План лекции

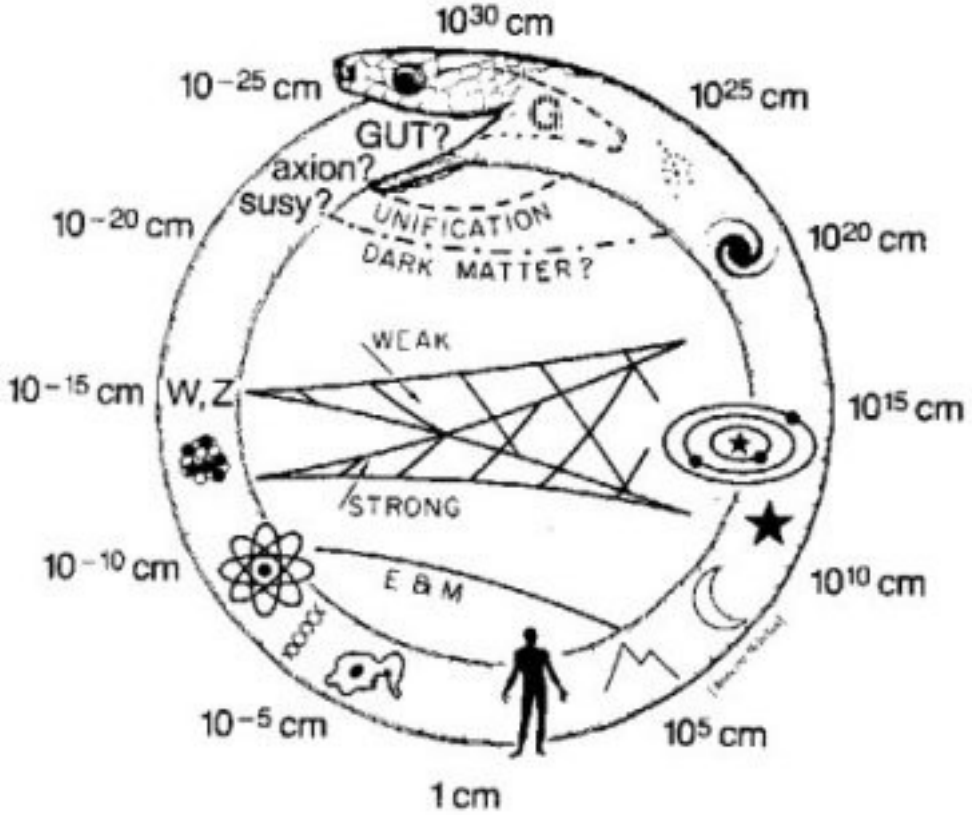
1. Кризис в современной фундаментальной физике
2. Стандартная модель физики элементарных частиц
3. Статус и достижения этой модели
4. Поиск новых физических явлений
5. Проблемы и перспективы современной фундаментальной физики
6. Ответы на вопросы



Кризис современной физики

- Физика **почти** идеально справляется с описанием окружающей реальности
- Т.е. мы умеем делать **предсказания** путем решения написанных нами уравнений
- Это касается и микро-, и макромира
- Мы отвечаем на вопрос **"как?"** но очень редко можем ответить на вопрос **"почему?"**
- "Теория всего" не построена
- Есть много нерешенных задач и загадок
- **Мир прекрасен и удивителен!**

Физика макро- и микромира одина!



Стандартная модель физики элементарных частиц

Standard Model of Elementary Particles

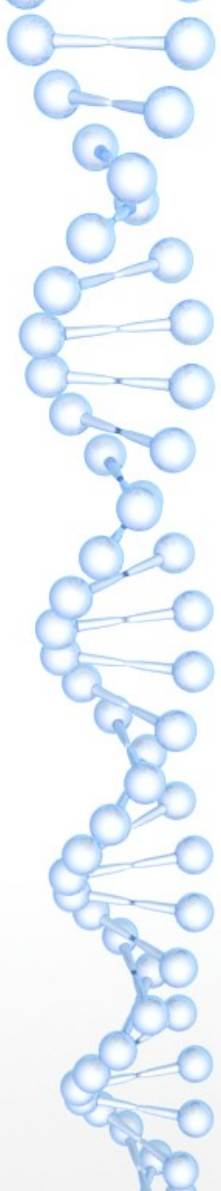
three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS (left side of the quark section)

LEPTONS (left side of the lepton section)

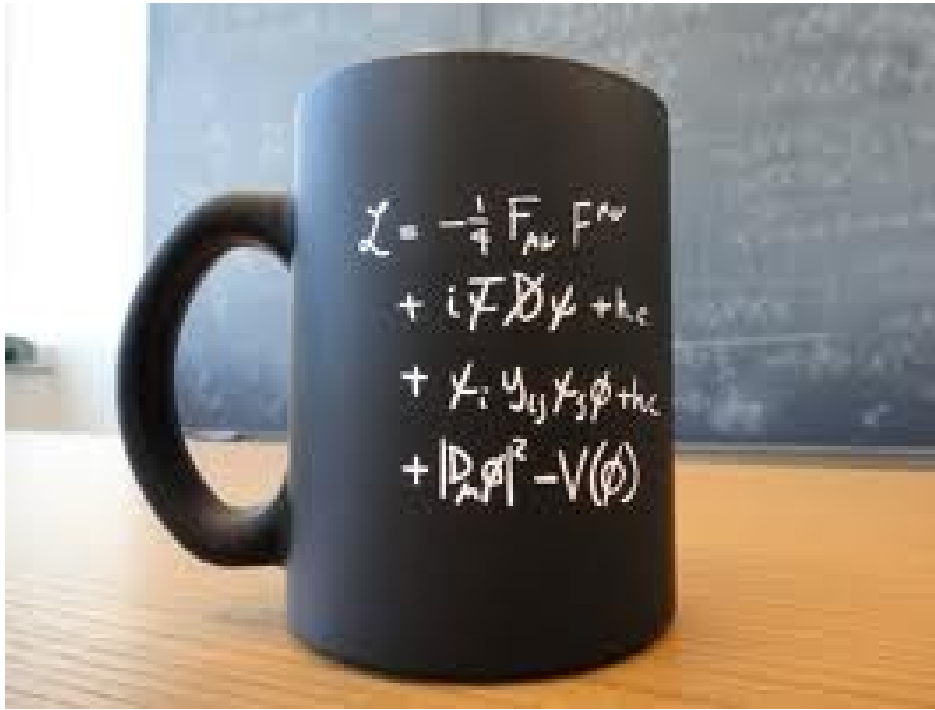
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (left side of the boson section)

SCALAR BOSONS (right side of the boson section)



Сколько в Природе фундаментальных взаимодействий?

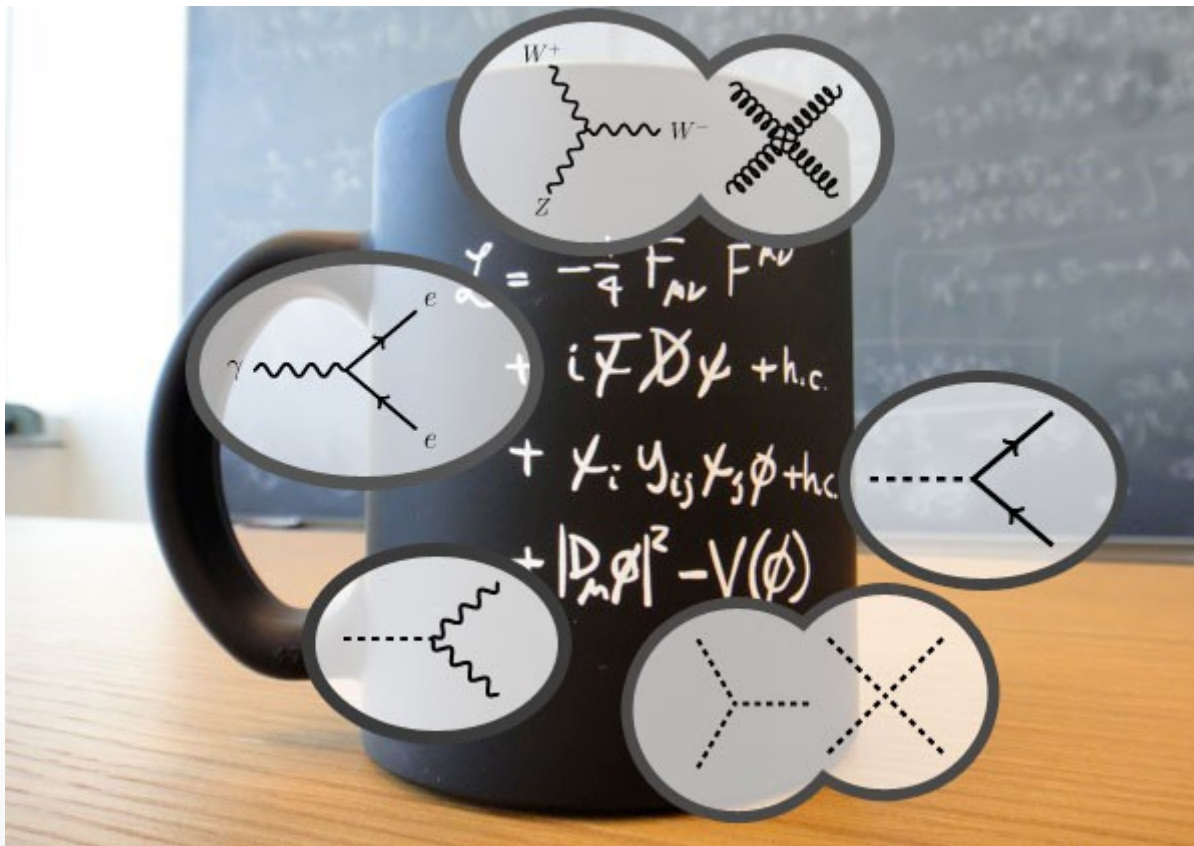
Законы наблюдаемого микромир просты:

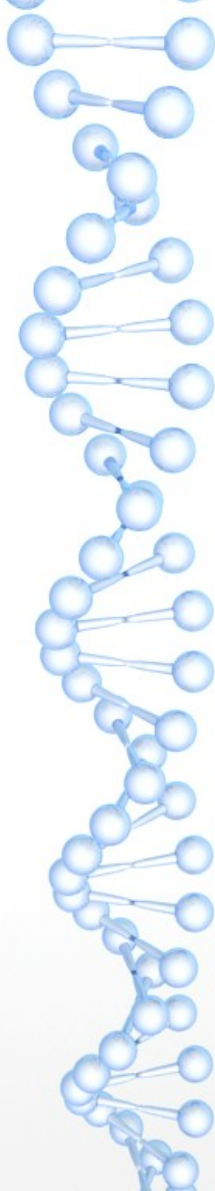


Откуда они берутся?



Фундаментальные взаимодействия: СМ + гравитация





Лагранжиан Стандартной модели на практике:

Exercise 1.1.1.1a: Given locality, causality, Lorentz invariance, and known physical data since 1860, show that the Lagrangian describing all observed physical processes (sans gravity) can be written:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - g_\nu^{abc} \partial_\mu g_\nu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_\nu^{abc} f^{abc} g_\mu^b g_\nu^c + \\
 & \frac{1}{2}g_\nu^2 (\bar{q}_i^\mu \gamma^\mu q_j^\nu) g_\mu^\alpha + \bar{G}^0 \partial^2 G^0 + g_\nu^{abc} \partial_\mu \bar{G}^0 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^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - ig c_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu 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_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu 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_\nu^+ W_\mu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + 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_\nu^+ W_\mu^-] - 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] - \\
 & g M W_\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^+ (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{g^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^2} Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{g^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{g^2}{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{g^2}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - e^\lambda (\gamma\theta + m_c^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu} \gamma \theta \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma\theta + m_c^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma\theta + m_c^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [- (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [\bar{\nu} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda 6} d_j^\lambda) + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_c^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu} \gamma^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_c^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_c^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda 6} (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & m_c^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda 6} (1 + \gamma^5) d_j^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_c^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda 6} (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_c^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda 6} (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_c^2}{M} \phi^0 (\bar{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 + ig c_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) + ig c_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^+) + ig c_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} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} X^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

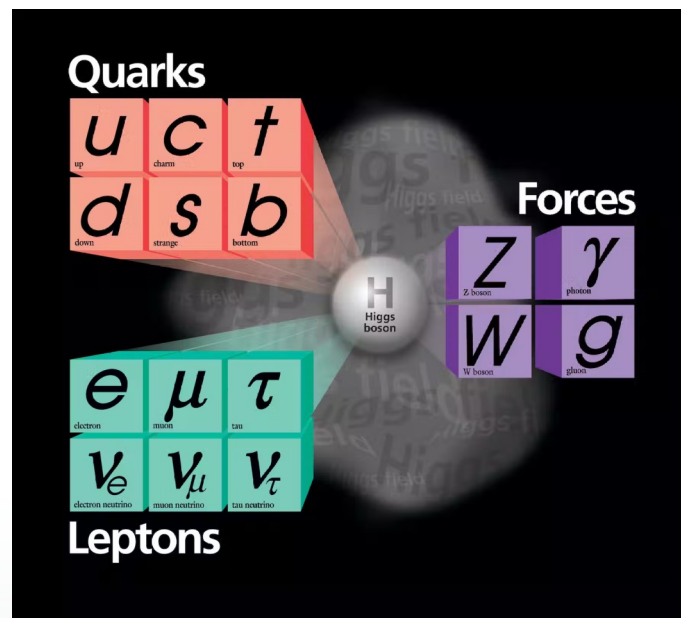
Что такое Стандартная модель?

СМ это:

- самая успешная модель в физике за все времена
- написана на языке квантовой теории поля
- основана на принципах симметрии
- минимальная модель ...

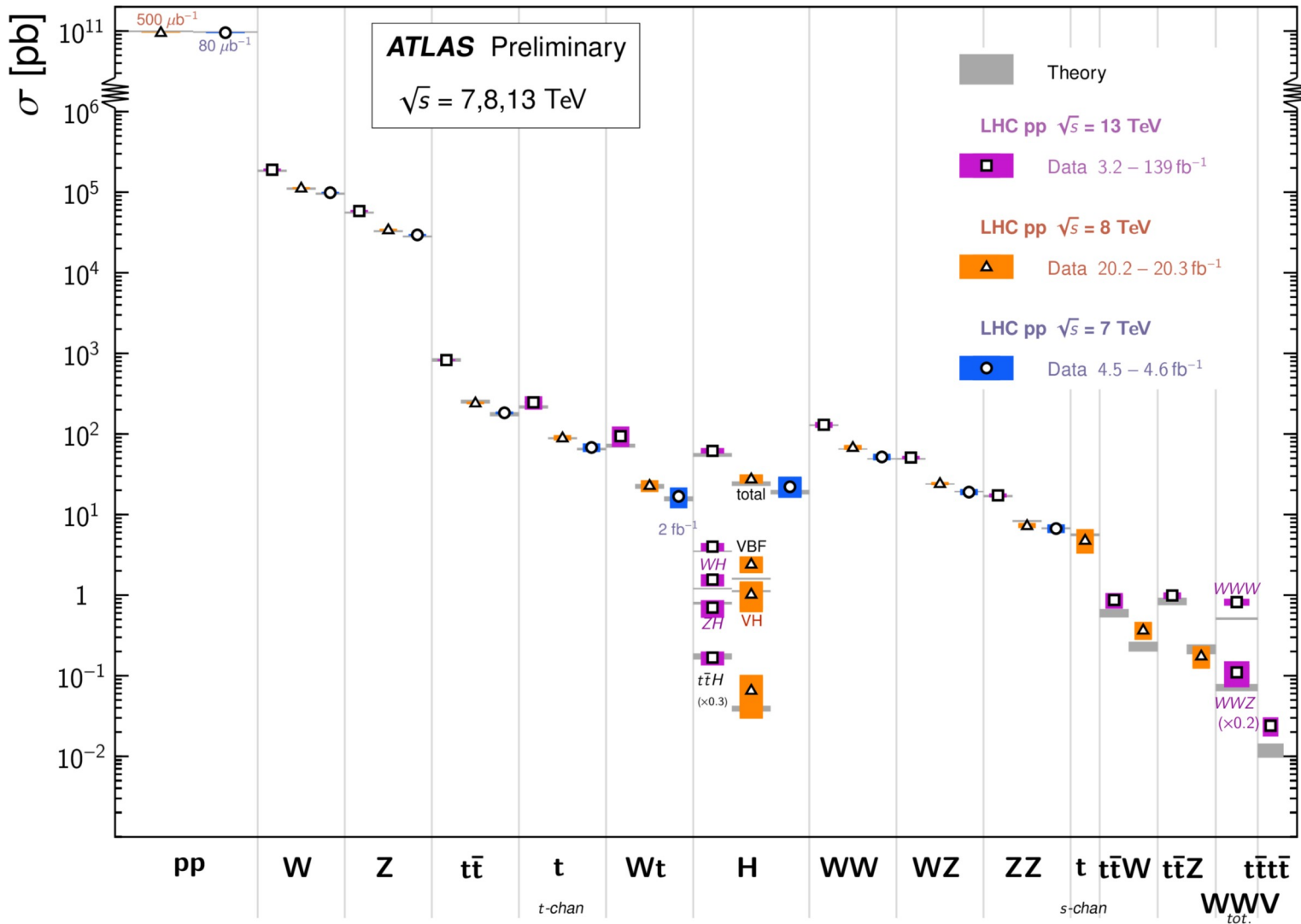
Вопросы к СМ:

- является ли она фундаментальной?
- если нет, где границы ее применимости?
- фундаментальны ли ее частицы (поля)?
- можно ли ее объединить с гравитацией?
- дает ли она указания, где искать новую физику?

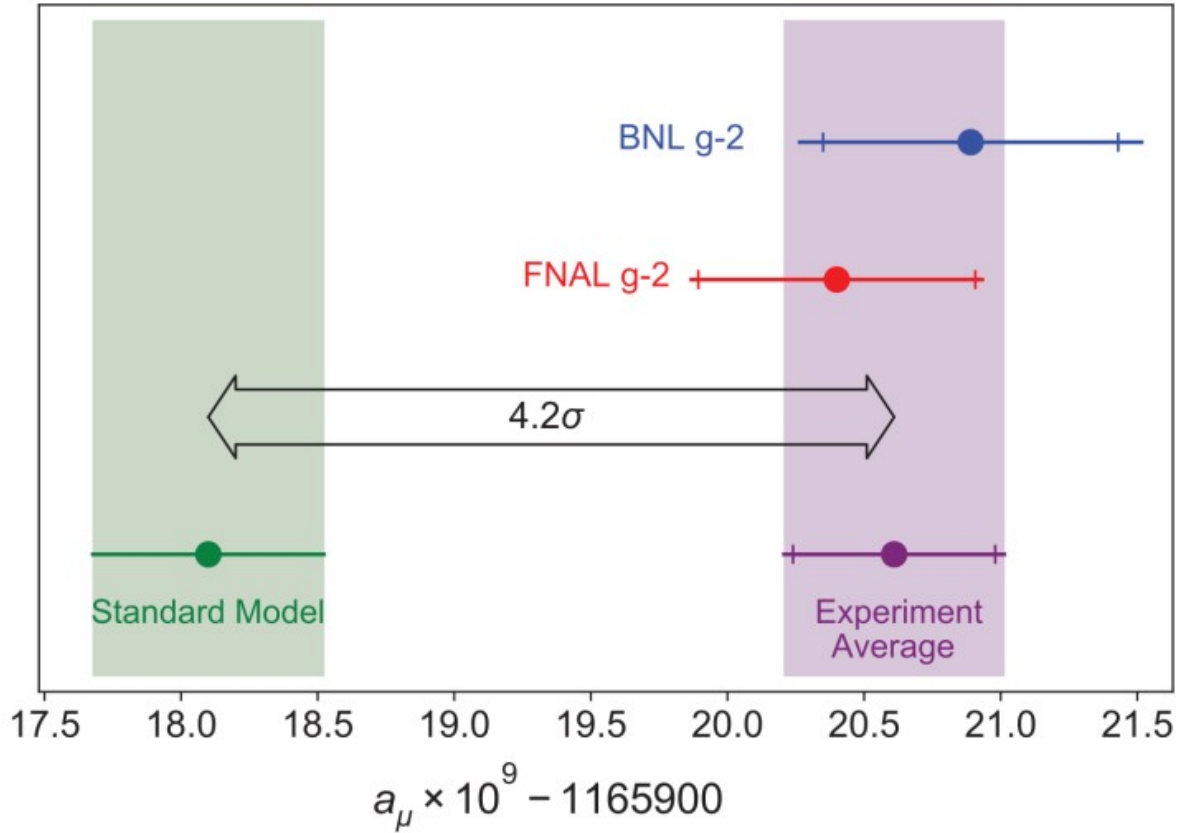


Standard Model Total Production Cross Section Measurements

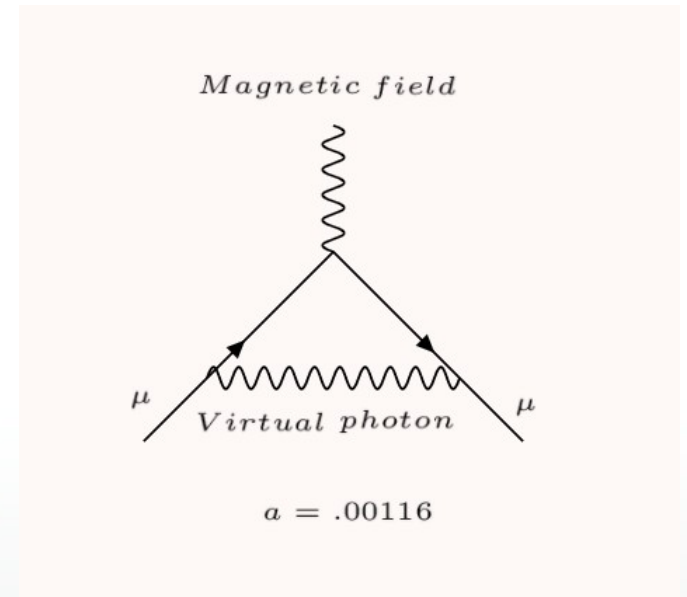
Status: February 2022



Отклонений от предсказаний СМ мало



Аномальный магнитный момент мюона



Shots to prevent cancer show early promise p. 126

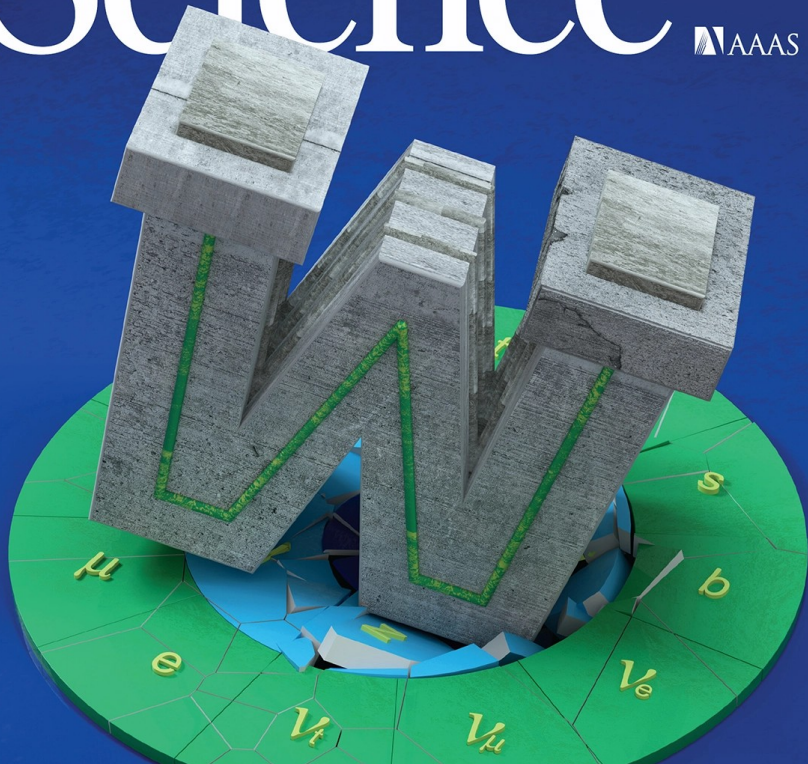
Visualizing a key step in cytokine signaling pp. 139 & 163

Silk-wrapped food wins BII & Science Prize p. 146

Science

\$15
8 APRIL 2022
science.org

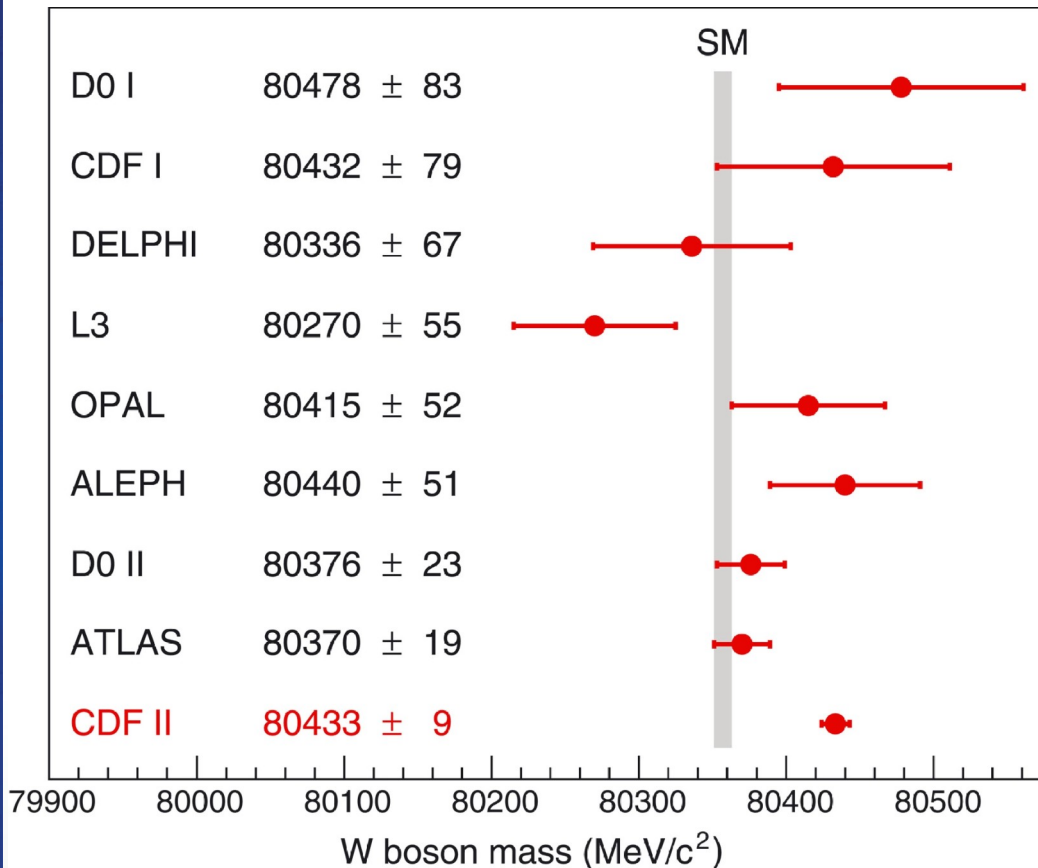
AAAS



HEAVYWEIGHT

W boson mass measures higher than expected pp. 125, 136, & 170

Загадка массы W бозона





Поиск “новой физики”?!

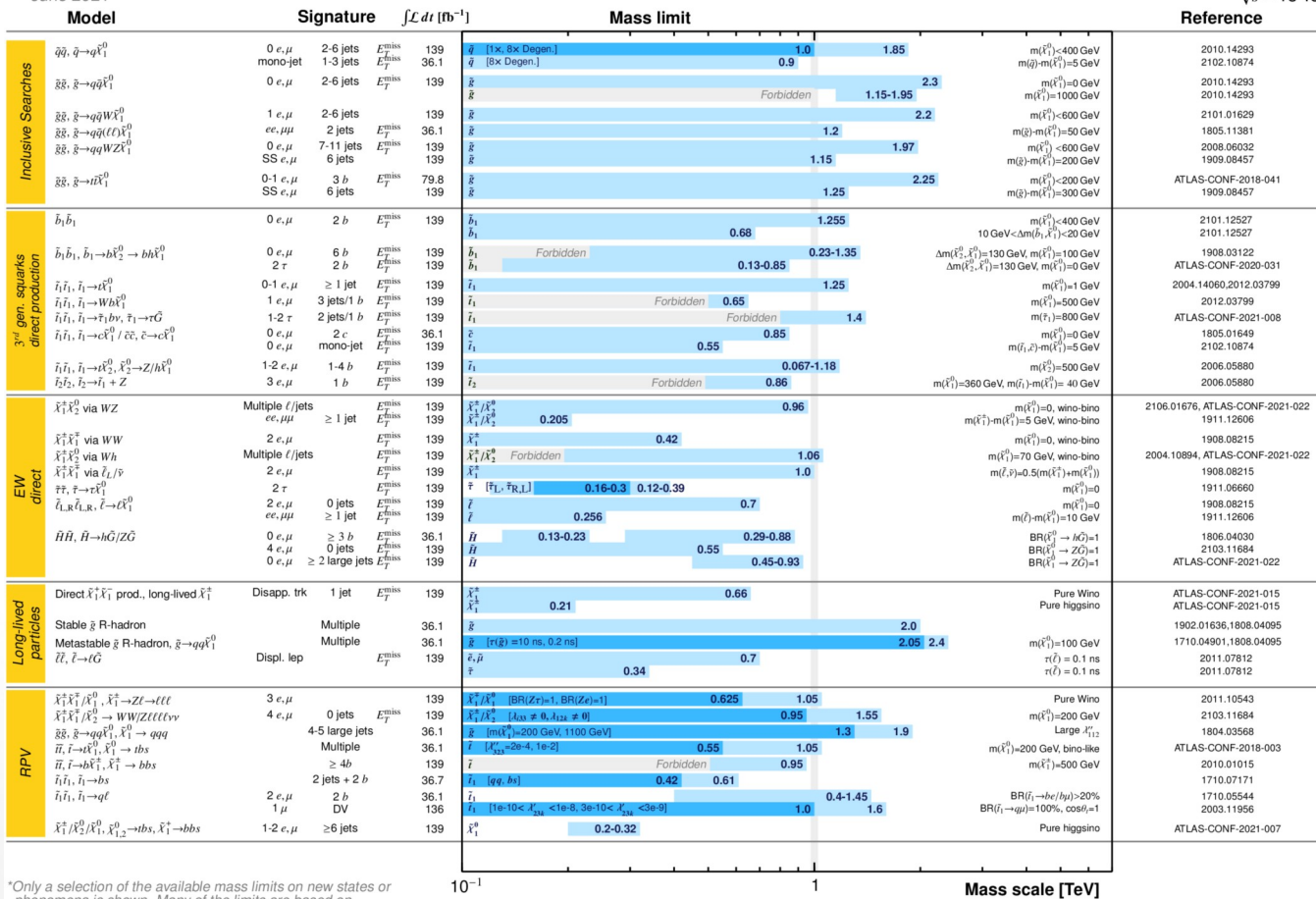
Поиск суперсимметрии?

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

June 2021

ATLAS Preliminary

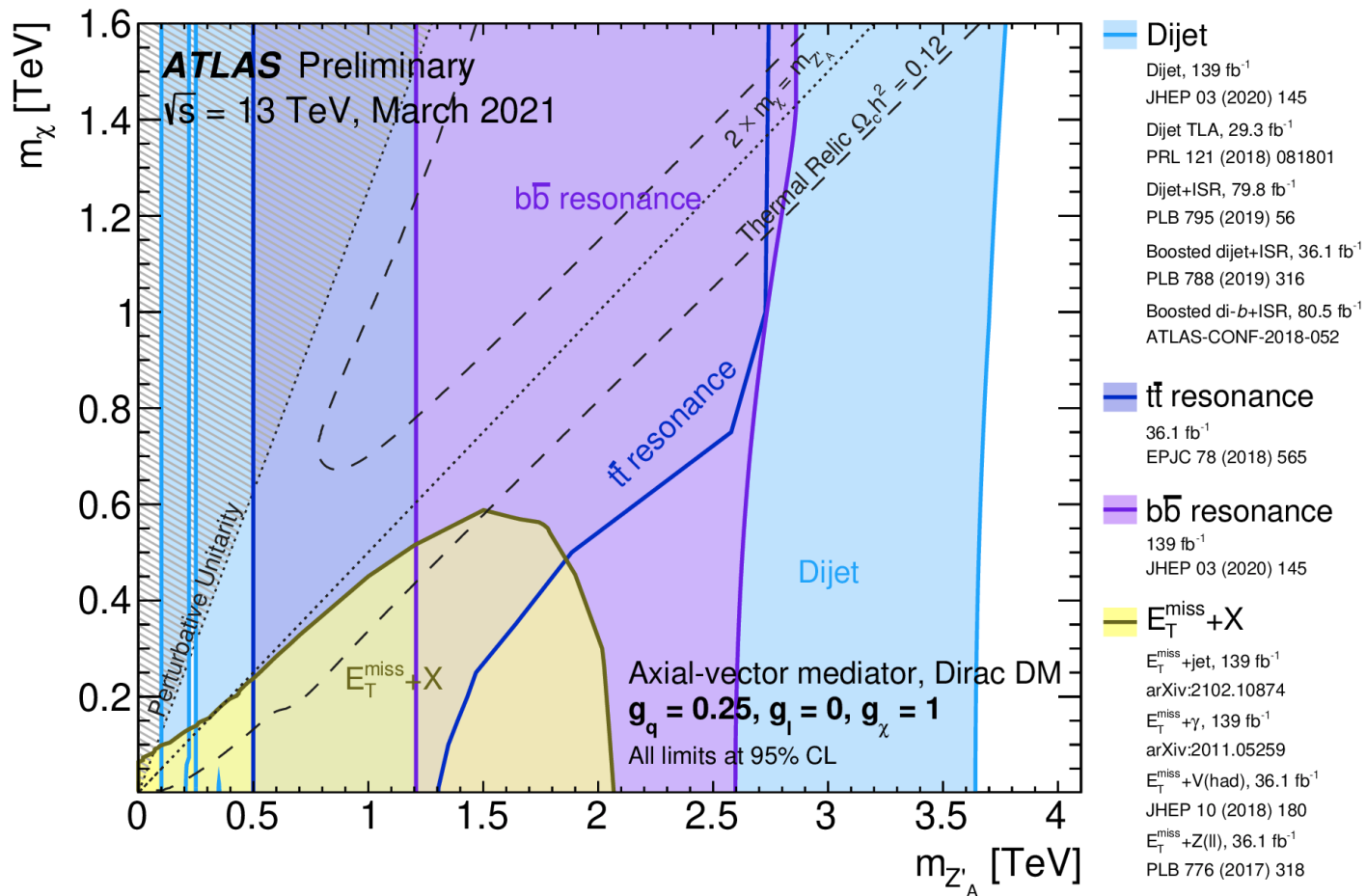
$\sqrt{s} = 13$ TeV



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

10⁻¹ 1 Mass scale [TeV]

Поиск темной материи?

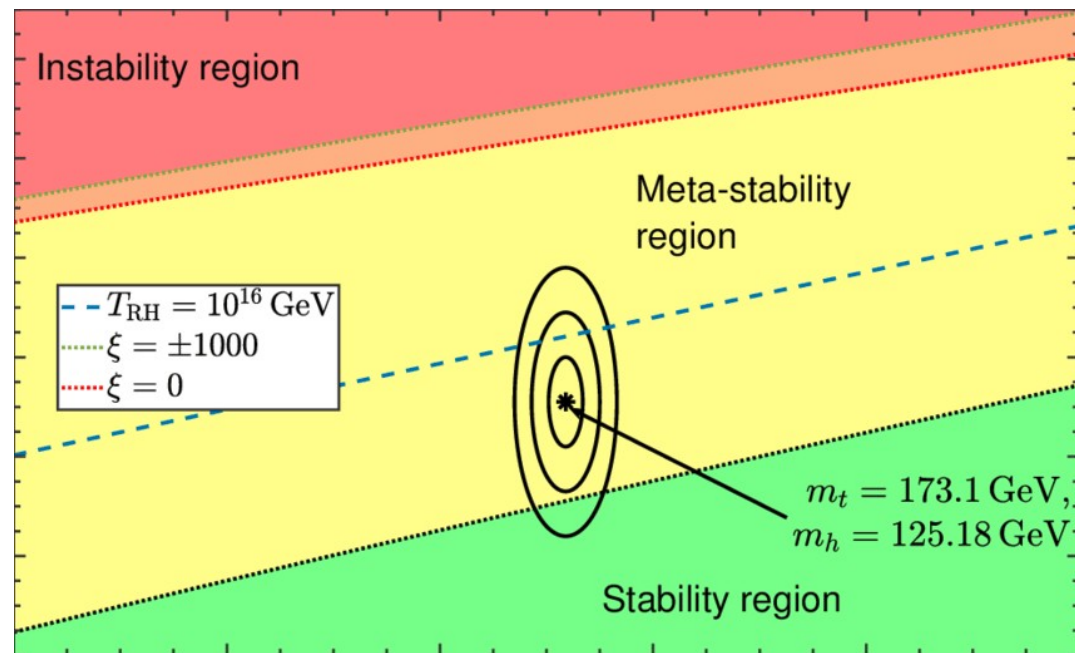
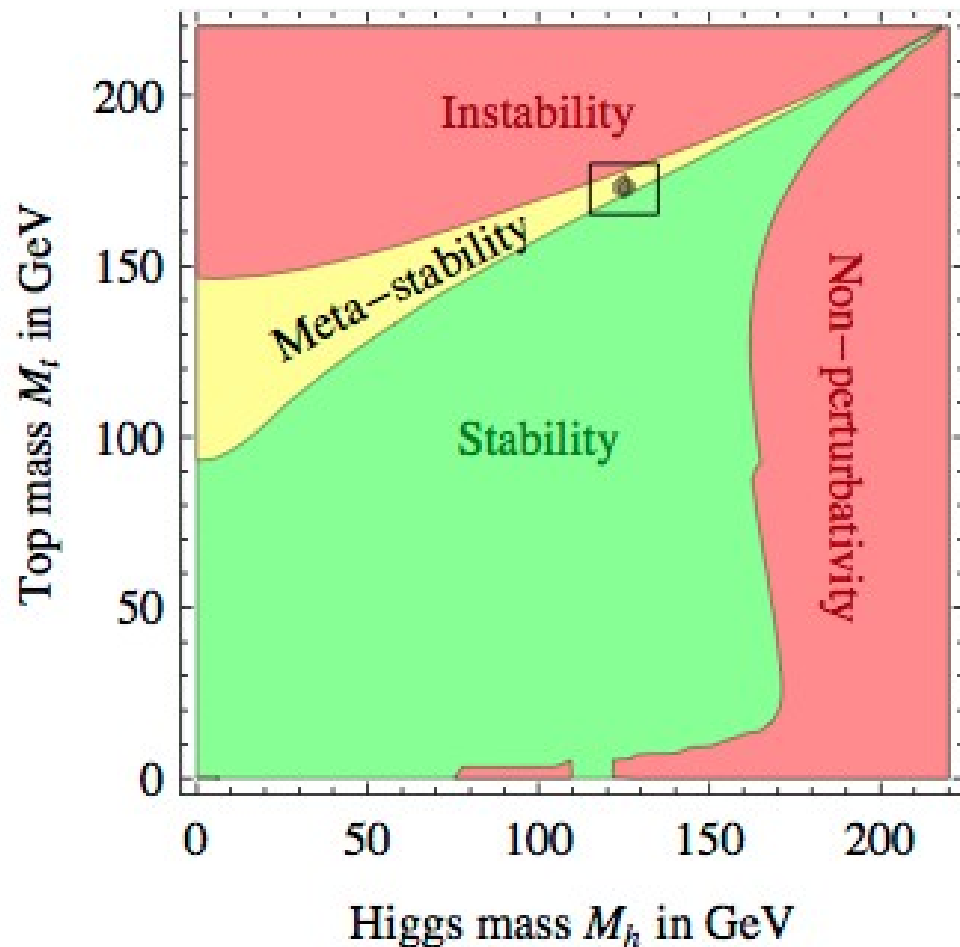


Проблемы стандартной модели

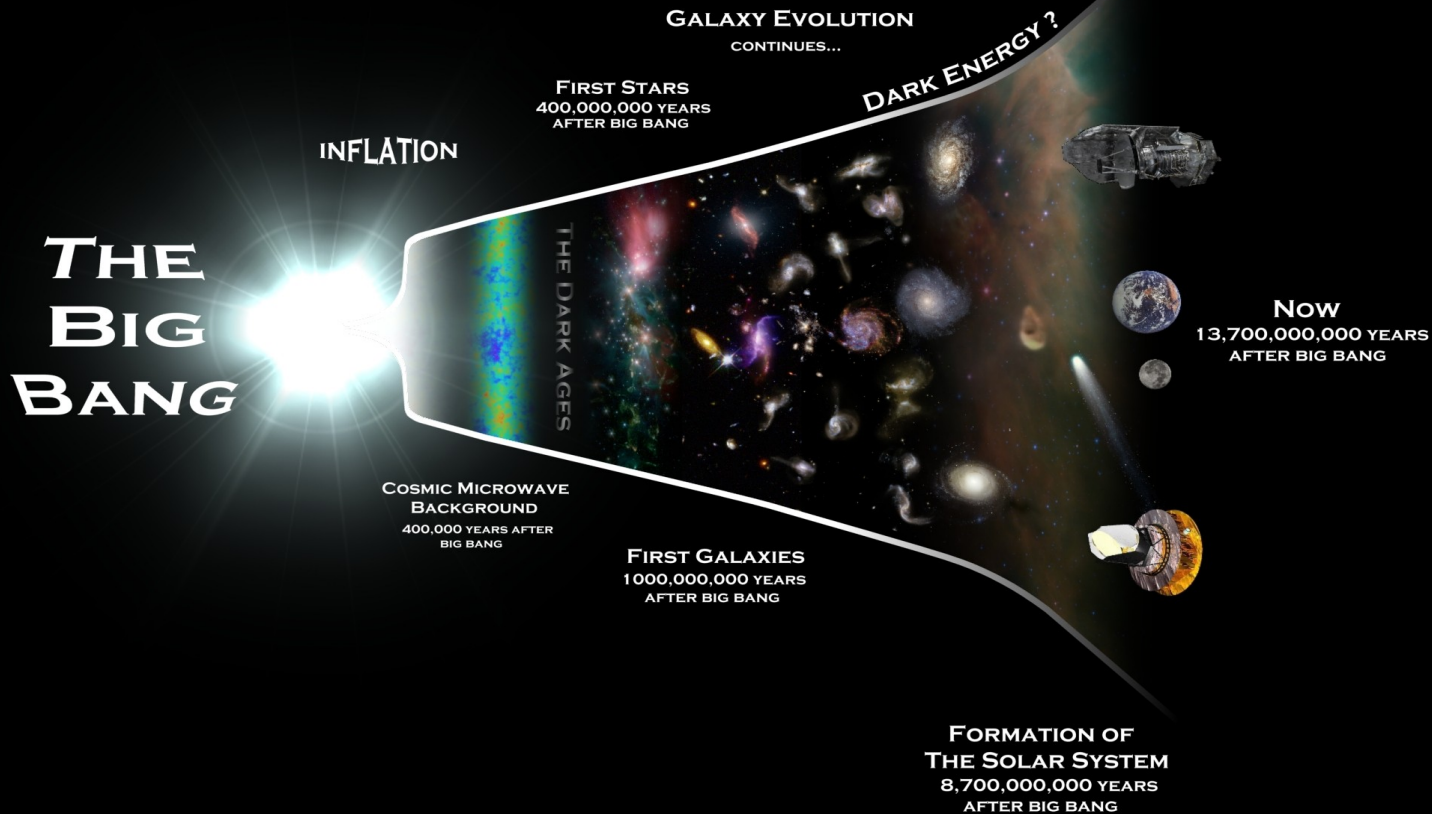
- Взаимодействия разного типа
- Объединение с гравитацией?
- Много параметров
- Конфайнмент в КХД
- Бариогенезис
- Энергия и стабильность вакуума
- Темная материя
- Точная подгонка
- Много еще вопросов "почему?"
- Считаем, что СМ – эффективная теория, т. е. низкоэнергетическое приближение более общей теории



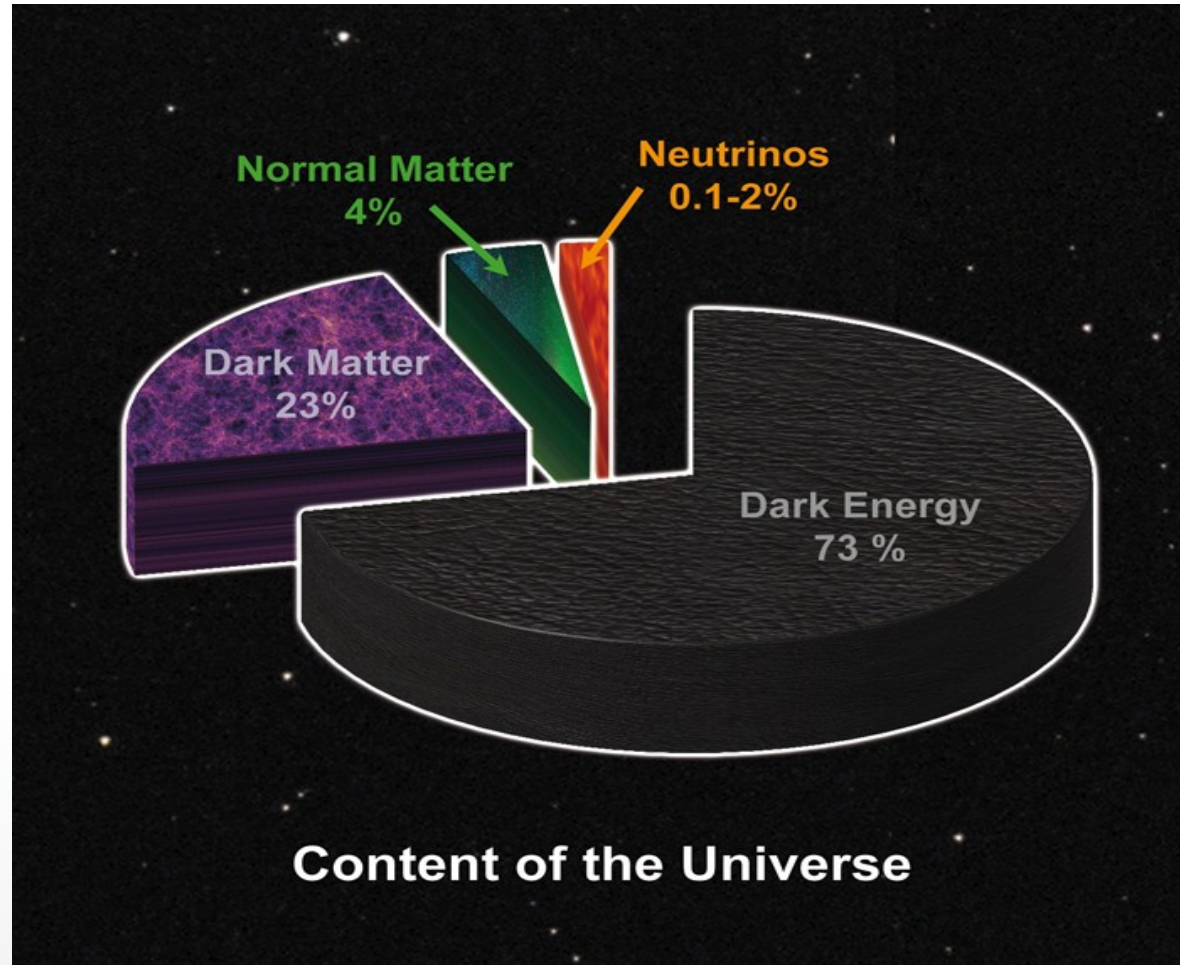
Метастабильность вакуума СМ



Космология: история Вселенной



Из чего состоит наша Вселенная?



Антропный принцип?

- **Теория струн** и **M-теория** допускают существование астрономически большого количества типов вселенных, но не могут объяснить, почему мы видим именно ту, в которой живем.
- Однако наша Вселенная обладает очень **специфическими свойствами** без которых и жизнь не смогла бы зародиться:
 - значения масс протона, нейтрона и электрона
 - существование дейтрона
 - резонанс ядра атома углерода
 - плоскостность Вселенной
 - количество темной энергии, темной материи, и т. д.
- Возможны ли **другие вселенные**? Существуют ли они параллельно с нашей?
- **Антропный принцип = неумение ответить на сложные вопросы?**





Как решать проблемы физики?

- Научный метод: построение и верификация моделей
- Наблюдения + эксперимент + теория
- Физика частиц + гравитация + ядерная физика + ...
- Создание новых телескопов на Земле и в космосе
- "Мультимессенджер" (многоканальные) наблюдения
- Взаимодействие с философами; политиками; ...
- Поиск и применение фундаментальных принципов
- Мы находимся в стадии кризиса после накопления знаний
- **Кризис - время возможностей!**
- **Прорыв в понимании впереди!**