

НЕРЕШЁННЫЕ ПРОБЛЕМЫ физики элементарных частиц

Сергей Троицкий

(отдел теоретической физики ИЯИ РАН
и кафедра физики частиц и космологии физфака МГУ)



лекция для младшекурсников, физфак МГУ, 31.03.2026



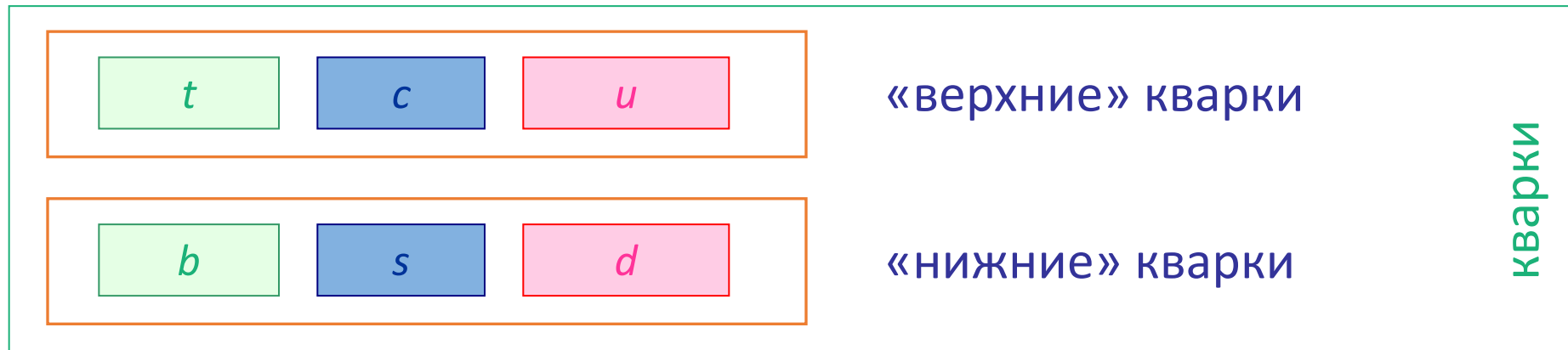
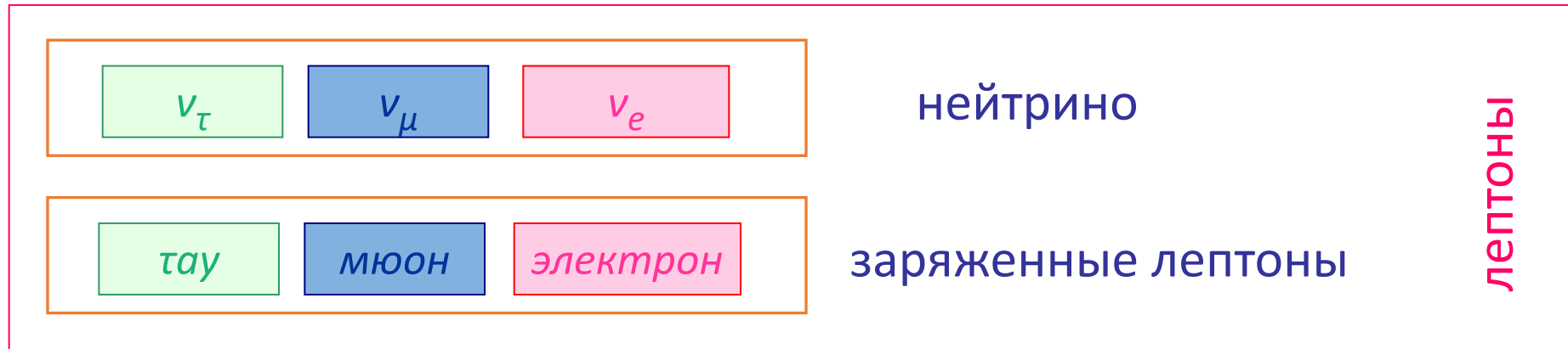
Стандартная модель физики частиц



- описывает элементарные частицы и их взаимодействия
- сформулирована в 1970-е годы
- предсказания проверены экспериментально
- все частицы обнаружены
- согласуется со всеми коллайдерными экспериментами
- содержит 19 свободных параметров
(с весьма странными значениями)
- экспериментально доказано, что не полна
(не описывает массы нейтрино и ряд результатов астрофизики)



Стандартная модель физики частиц :

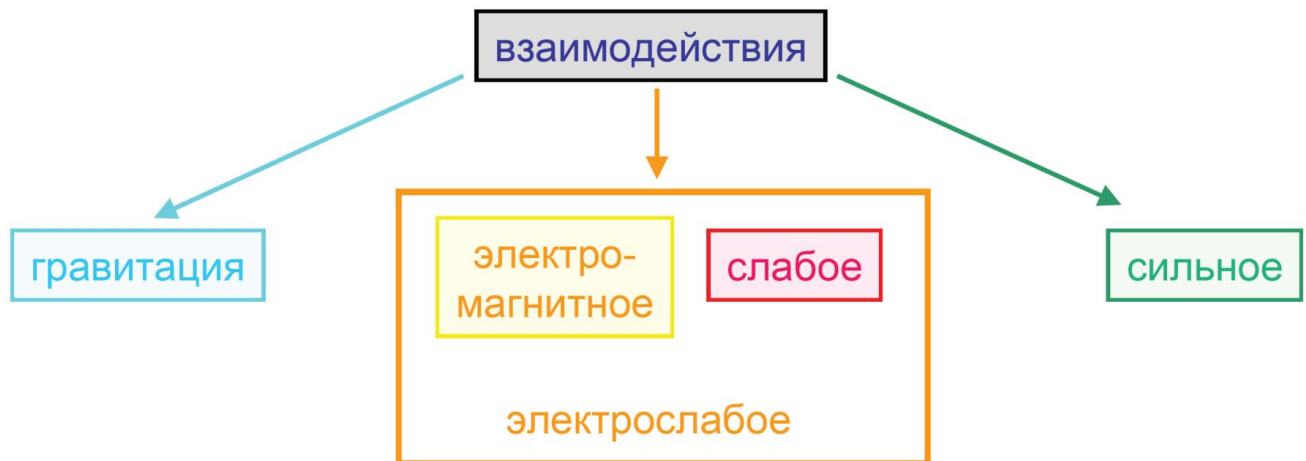


частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z ,
сильного: глюоны

бозон Хиггса



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами



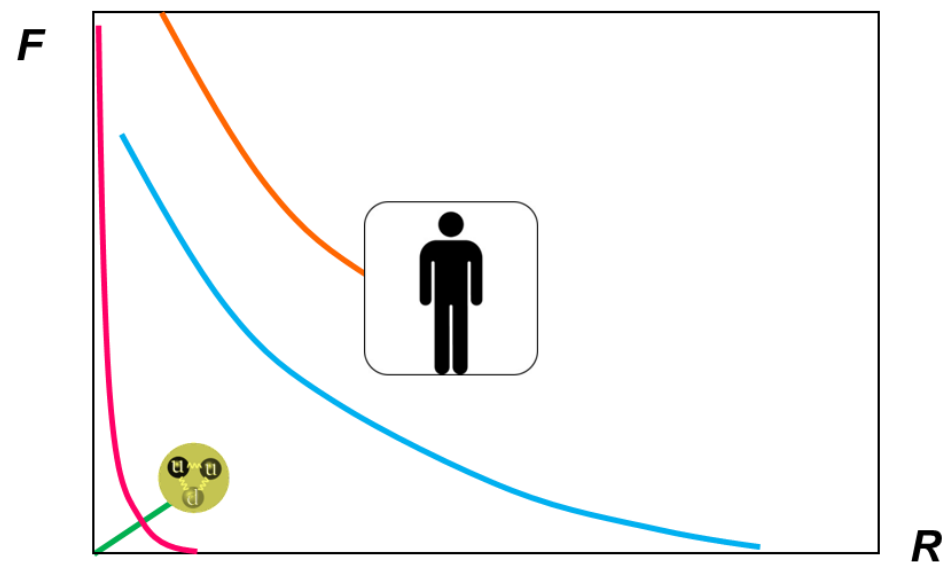
слабое
 $\sim e^{-A R}$

сильное
 $\sim R$

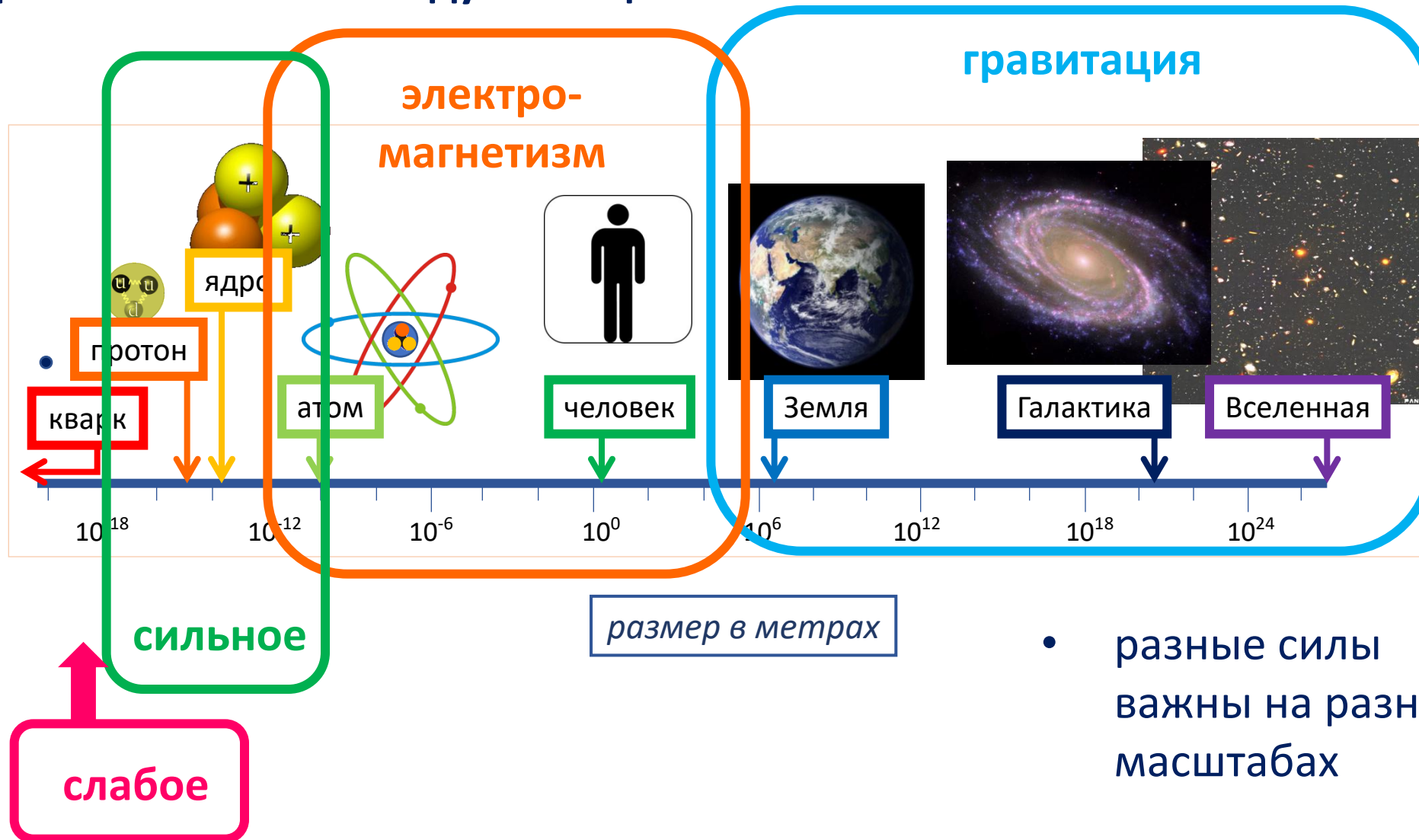
электромагнетизм
 $\sim 1/R^2$

гравитация
 $\sim 1/R^2$

- разные силы важны на разных масштабах



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

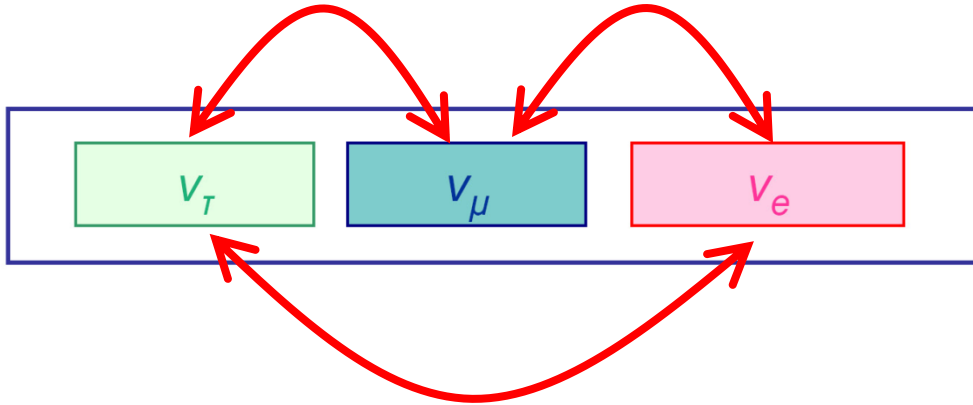


- разные силы важны на разных масштабах



Стандартная модель физики частиц **не полна:**

взаимные превращения нейтрино нарушают законы сохранения SM



В Стандартной модели
тип нейтрино сохраняется

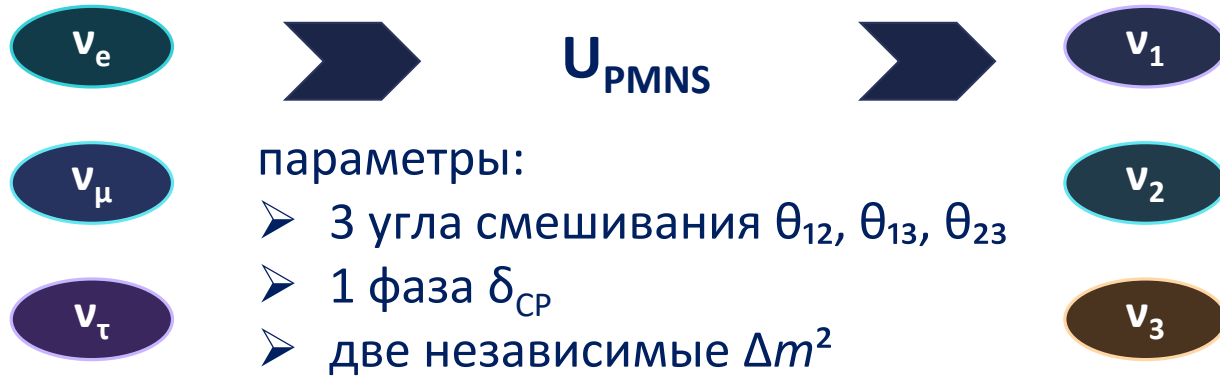
- запрещено несохранение лептонного числа каждого поколения (три закона сохранения)
- превращения возможны при неравных массах
- массы обычных частиц связаны с механизмом Хиггса
- в Стандартной модели нельзя написать взаимодействие нейтрино с полем Хиггса



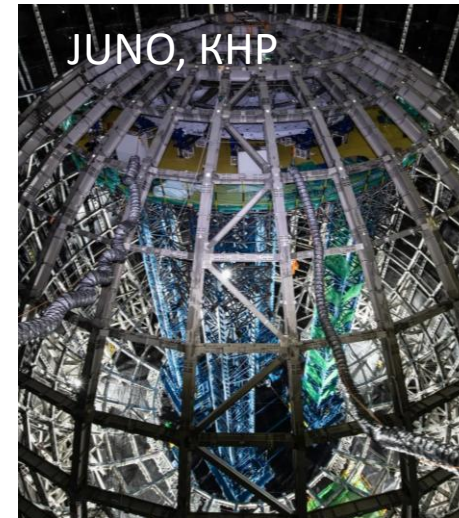
Стандартная модель физики частиц **не полна:** взаимные превращения нейтрино надежно измерены

«ароматовые» состояния

«массовые» состояния



- превращения дают Δm^2 , а не абсолютные массы
- открытый вопрос по массам: чему они равны? $m(\bar{\nu}_e) < 0.45$ eV
- открытый вопрос по массам: иерархия ($\Delta m^2_{21} > 0$, но где m_3 ?)



Стандартная модель физики частиц **не полна:** взаимные превращения нейтрино надежно измерены

Глобальный fit (NuFIT 6.1, ноябрь 2025)

Параметр	Значение	Эксперименты
$\sin^2\theta_{12}$	$0.3088^{+0.0067}_{-0.0066}$	солнечные, реакторные
Δm^2_{21}	$(7.357^{+0.094}_{-0.100}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	солнечные, реакторные
$\sin^2\theta_{13}$	$0.02248^{+0.0055}_{-0.0059}$	солнечные, реакторные
$\sin^2\theta_{23}$	NO : $0.470^{+0.017}_{-0.014}$ IO : $0.550^{+0.013}_{-0.016}$	атмосферные, ускорительные
$\Delta m^2_{3\ell}$	NO : $(+2.511^{+0.021}_{-0.020}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ IO : $(-2.483 \pm 0.020) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	атмосферные, ускорительные
δ_{CP}	NO : $212^\circ \text{ }^{+26^\circ}_{-36^\circ}$ IO : $274^\circ \text{ }^{+22^\circ}_{-25^\circ}$	ускорительные

Эксперименты:

солнечные:

Homestake, GNO, Gallex,
SAGE, SuperK, SNO, Borexino

атмосферные:

SuperK, IceCube

реакторные:

KamLAND, Double-Chooz,
Reno, Daya Bay, SNO+, JUNO

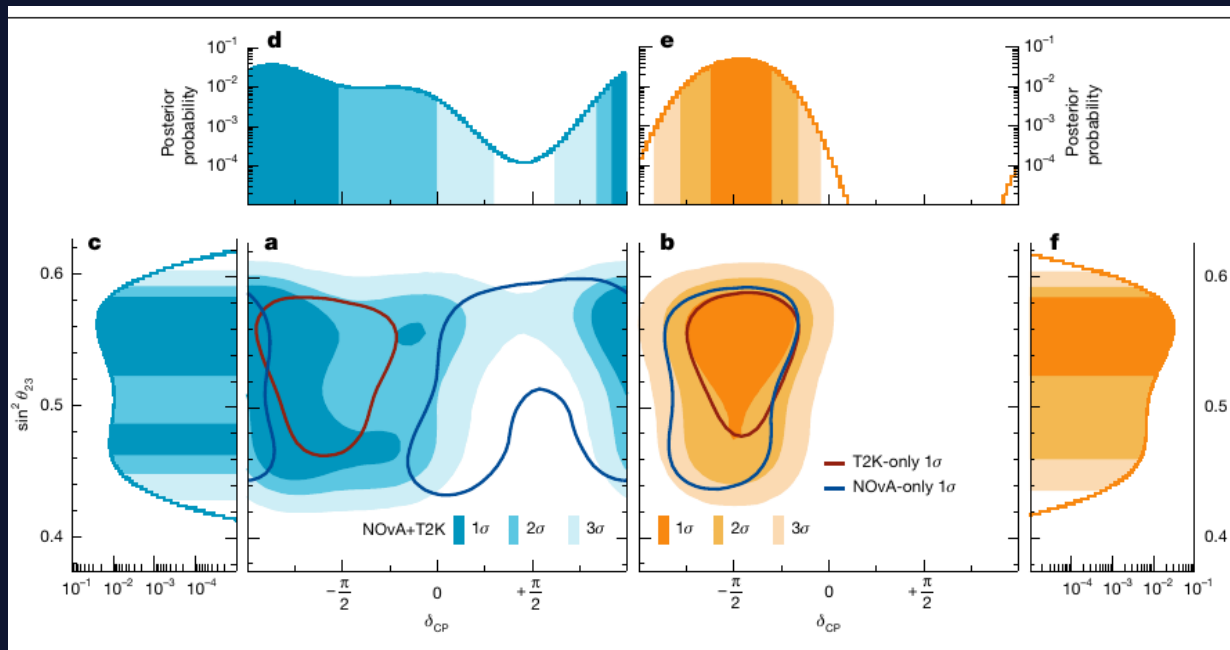
ускорительные:

MINOS, T2K, NOvA



Стандартная модель физики частиц **не полна**: взаимные превращения нейтрино надежно измерены, но есть вопросы

Контуры в плоскости $\sin^2\theta_{23} - \delta_{CP}$ (T2K, NOvA):
неопределённость всё ещё велика



**Хорошо
определены**

$\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m^2_{21}, |\Delta m^2_{3\ell}|$

Точно не известны

октант θ_{23} , точное значение δ_{CP} и
иерархия масс

Сумма масс:

> 59 мэВ (NO), > 99 мэВ (IO)

(если одно безмассовое)

Космология:

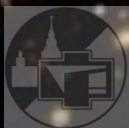
< 64 мэВ

(в стандартной
космологической модели)



Стандартная модель физики частиц **не полна:** тёмная материя

СТОЛКНУВШИЕСЯ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК



Стандартная модель физики частиц **не полна:** тёмная материя



СТОЛКНУВШИЕСЯ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК



Стандартная модель физики частиц **не полна:** тёмная материя

**темная материя = несветящаяся материя
(прозрачная)**

- не испытывает электромагнитного взаимодействия
(иначе излучала и поглощала бы свет)
- не испытывает сильного взаимодействия
(иначе образовала бы компактные структуры)
- нейтрино – слишком легкое



требуются новые, неизвестные частицы!
(взаимодействия – не обязательно, но вероятно)

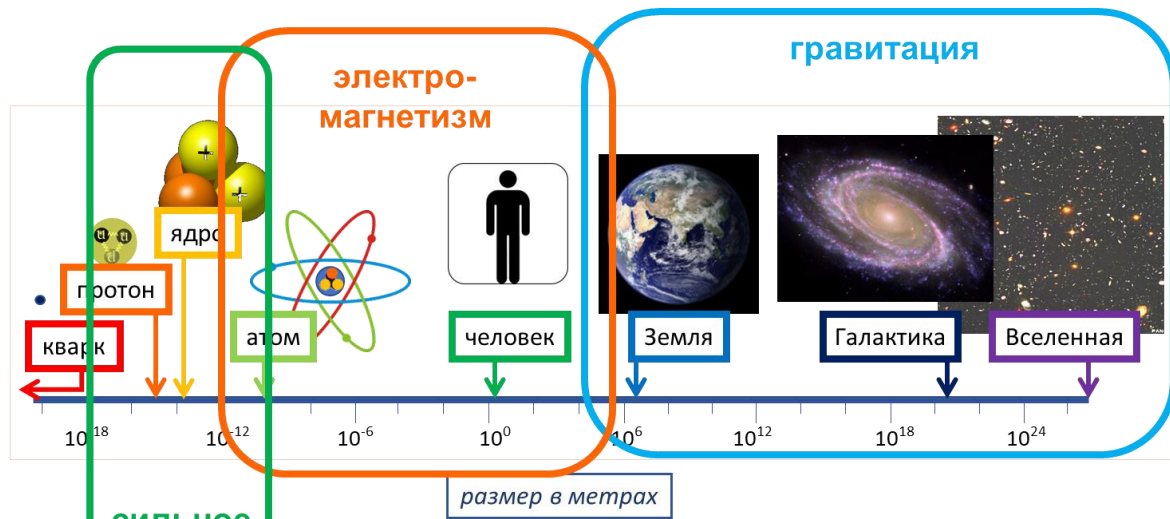


Стандартная модель физики частиц **не полна:** тёмная материя

- Большой адронный коллайдер не обнаружил те частицы, которые считались основными кандидатами на роль тёмной материи
- Теперь нет какой-либо одной выделенной модели, надо изучать множество вариантов



Стандартная модель физики частиц: странные параметры эстетические проблемы?



- гравитация не описывается
- почему разные масштабы?
- почему такие параметры?

Может, тебе просто не нравится, как мир устроен, ЙЦУКЕН?
 Виктор Пелевин
 «Акико»



Стандартная модель физики частиц: странные параметры

19 важных чисел

параметры взаимодействий

$\alpha^{-1}(0)$	137.035999177(21)
$\sin^2 \theta_W(M_Z)$	0.23122(6)
$\alpha_s(M_Z)$	0.1180(9)
v	246.21967 ± 0.00006 GeV
m_H	125.20 ± 0.11 GeV

сильное CP-нарушение

θ_{QCD}	$< 10^{-10}$
-----------------------	--------------

массы заряженных лептонов

m_e	$0.51099895000 \pm 0.00000000015$ MeV
m_μ	$105.6583755 \pm 0.0000023$ MeV
m_τ	1776.93 ± 0.09 MeV

массы кварков

m_u	2.16 ± 0.07 MeV
m_d	4.70 ± 0.07 MeV
m_s	93.5 ± 0.8 MeV
m_c	1.2730 ± 0.0046 GeV
m_b	4.183 ± 0.007 GeV
m_t	172.56 ± 0.31 GeV

смешивание кварков

θ_{12}	$13.00 \pm 0.04^\circ$
θ_{23}	$2.40 \pm 0.05^\circ$
θ_{13}	$0.214 \pm 0.006^\circ$
δ	$65.7 \pm 1.3^\circ$

[Particle Data Group, 2025 Review of particle properties]



Стандартная модель физики частиц: странные параметры

эстетические проблемы?

- гравитация не описывается
- почему разные масштабы?
- почему такие параметры?

- полвека работы не привели к построению эстетически привлекательного, решающего одновременно разные проблемы расширения Стандартной модели, предсказания которого были бы подтверждены экспериментально
- попытки построения объединённой теории, основанной на теории струн, показали отсутствие у этого подхода предсказательной силы (10^{100} основных состояний, в каждом – эффективная теория со своим набором параметров)
- многие стали надеяться объяснить выбор основного состояния, в котором мы живём, эффектом наблюдателя (\pm антропный принцип)



Стандартная модель физики частиц: странные параметры

иерархия энергетических масштабов



Стандартная модель физики частиц: странные параметры хиггсовский бозон создаёт проблемы

- хиггс — скалярная частица

для скаляров масса обычно чувствительна к вкладам высокоэнергетической физики

- у других частиц есть защита

симметрии:
калибровочные или киральные

- отсюда ожидание «натуральности»

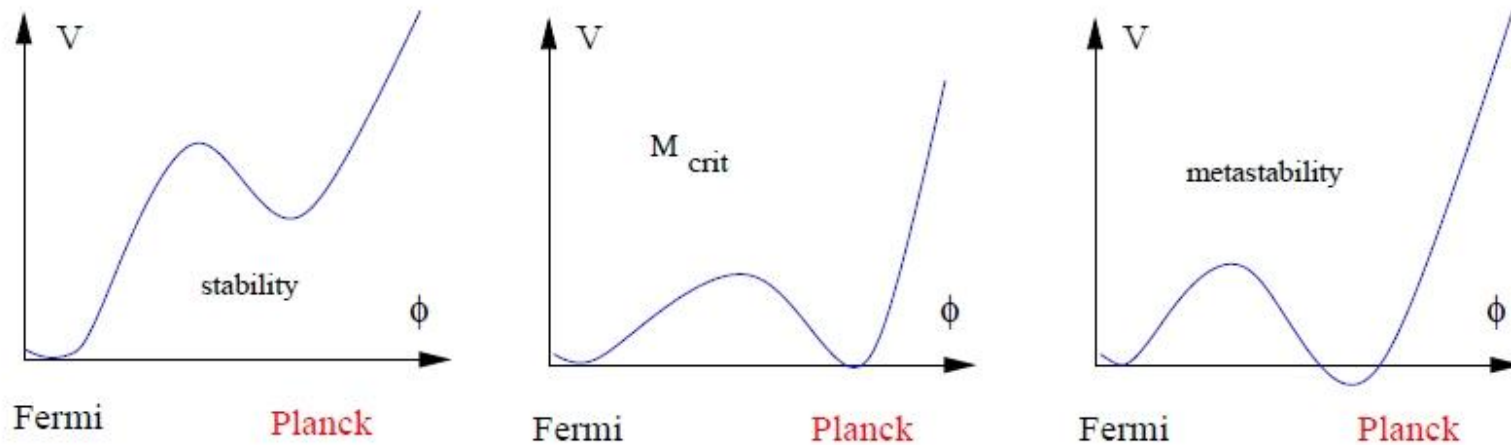
хотелось бы иметь механизм, который не говорит, что **125 GeV** — результат сокращения очень больших чисел

Проблема иерархии:
почему **ЭТОТ** масштаб не «утягивается» вверх?

Условно: «натуральность» — это ожидание, что маленький электрослабый масштаб должен быть объясним, а не получаться из очень точной подстройки параметров.



Стандартная модель физики частиц: странные параметры вакуум – стабилен или метастабилен?

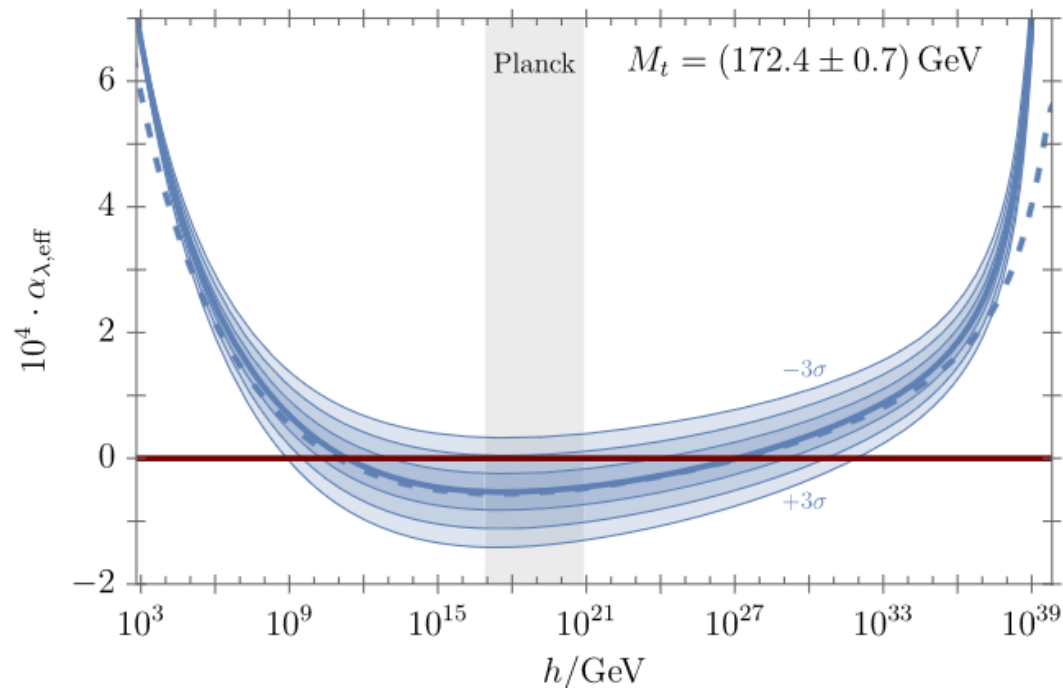


- если есть более энергетически выгодное состояние всей Вселенной, туда можно протуннелировать (или перескочить барьер, если хватит энергии)
- плохая новость: потенциал хиггсовского бозона – как раз полином 4 степени
- хорошая новость: если вдруг что, мы об этом не успеем узнать (граница вакуумов движется почти со скоростью света)



Стандартная модель физики частиц: странные параметры вакуум – стабилен или метастабилен?

Если взять измеренные m_H и m_t и продолжить Стандартную модель к очень большим энергиям, получится, что мы живём очень близко к границе между стабильностью и метастабильностью.



СТАБИЛЕН

истинный минимум не
появляется
ниже Планк-масштаба

МЕТАСТАБИЛЕН

наш вакуум ложный, но живёт
намного дольше возраста
Вселенной

НЕСТАБИЛЕН

распад бы уже
случился

★ наш мир – почти
точно на границе!



Стандартная модель физики частиц: странные параметры

три поколения – отличаются только массами

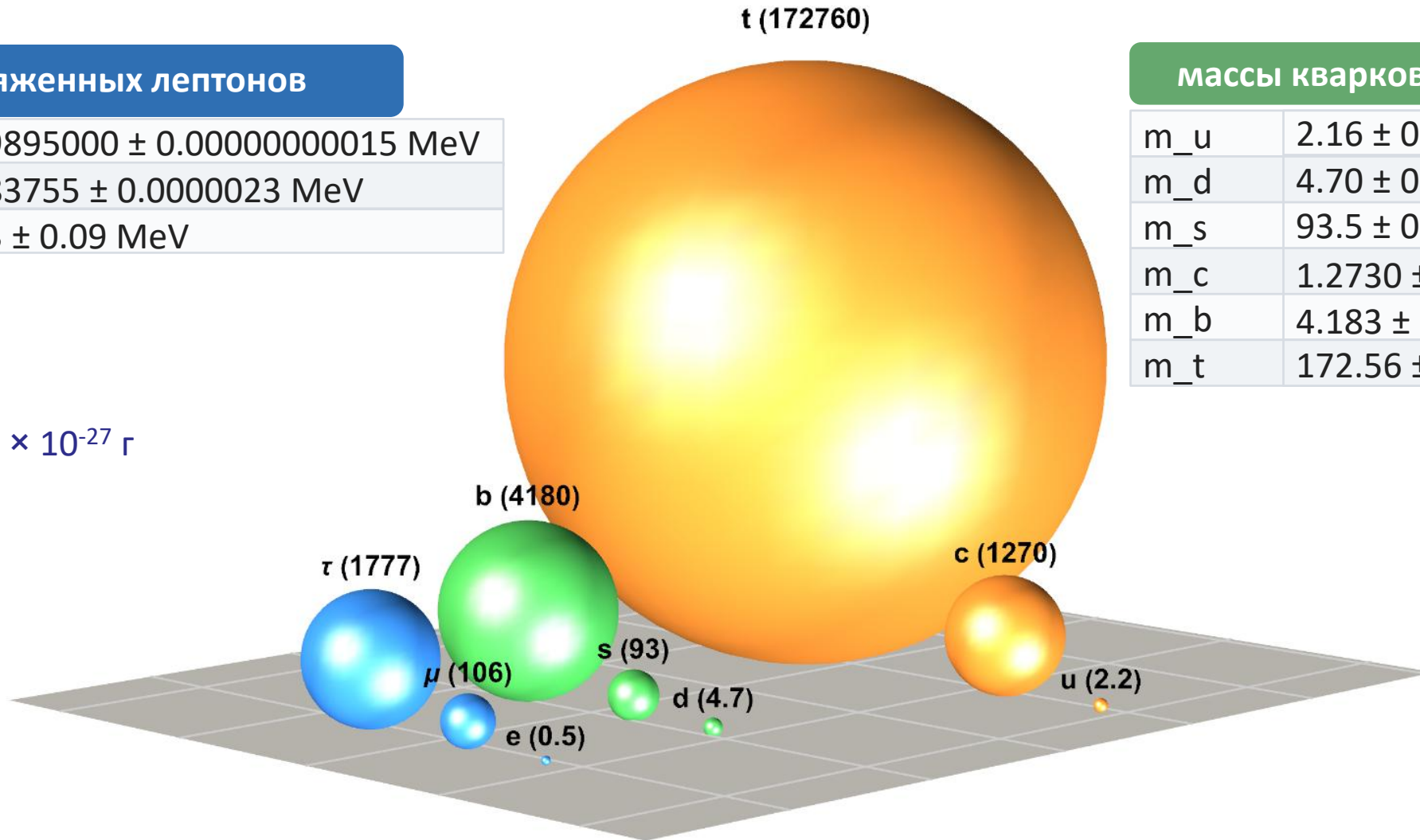
массы заряженных лептонов

m_e	$0.51099895000 \pm 0.00000000015$ MeV
m_μ	$105.6583755 \pm 0.0000023$ MeV
m_τ	1776.93 ± 0.09 MeV

массы кварков

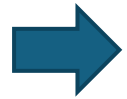
m_u	2.16 ± 0.07 MeV
m_d	4.70 ± 0.07 MeV
m_s	93.5 ± 0.8 MeV
m_c	1.2730 ± 0.0046 GeV
m_b	4.183 ± 0.007 GeV
m_t	172.56 ± 0.31 GeV

1 МэВ = 1.8×10^{-27} г



Стандартная модель физики частиц: странные параметры «сильная CP-проблема»

$$\Delta\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{\alpha_s}{8\pi} \underbrace{(\Theta - \arg \det M_q)}_{\bar{\Theta}} \text{Tr} \tilde{G}_{\mu\nu} G^{\mu\nu}$$



электрический дипольный момент нейтрона:

$$d_n \sim \bar{\Theta} \times 10^{-16} e \text{ cm}$$

эксперимент:

$$|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} e \text{ cm} \quad 90\% \text{ C.L.}$$

Abel et al. PRL 2020

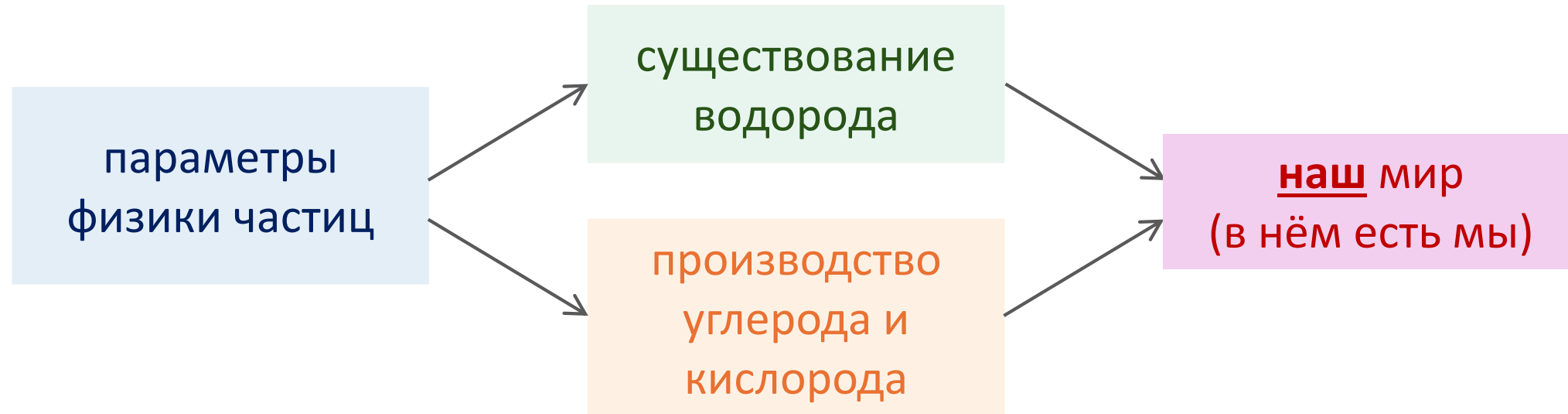


$$\bar{\Theta} < 10^{-10}$$



Стандартная модель физики частиц: странные параметры

антропный аргумент



- антропный аргумент — фильтр по совместимости с ядрами, звёздами и химией, а не динамическое объяснение (вычисление) параметров



Стандартная модель физики частиц: странные параметры антропный аргумент

относится к лёгкому сектору (первое поколение)



- нужны по крайней мере два очень лёгких кварка с зарядами $+2/3$ и $-1/3$
- окно по параметрам узкое для u , d , e и ядерной физики миров, похожих на наш
- **но это не объясняет всю иерархию трёх поколений**

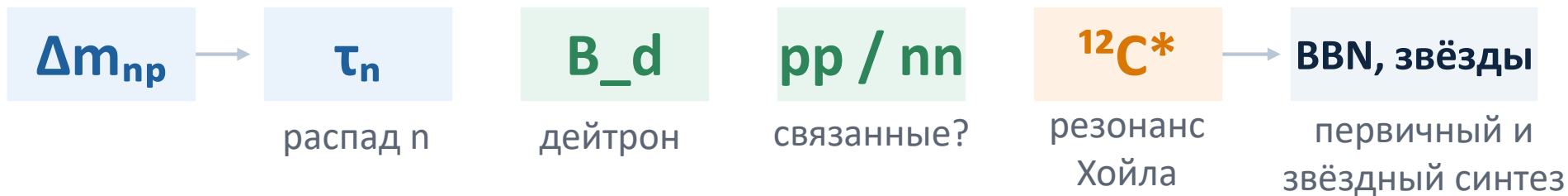


Стандартная модель физики частиц: странные параметры антропный аргумент

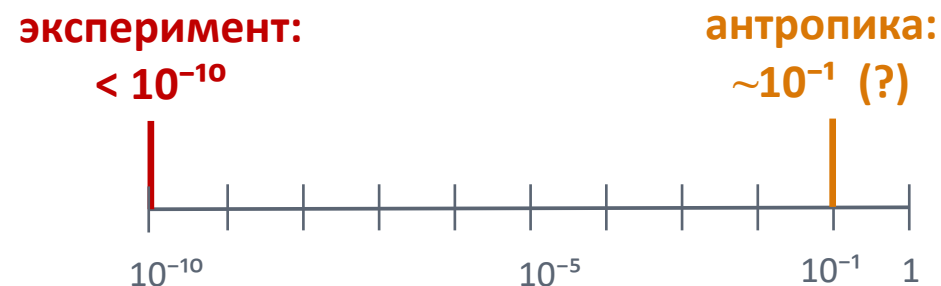
- что будет при другом $\bar{\Theta}$?
- связано с сильным взаимодействием, может повлиять на ядерную физику

$$\underbrace{(\Theta - \arg \det M_q)}_{\bar{\Theta}}$$

$$\bar{\Theta} < 10^{-10}$$



- влияние незначительное, вплоть до $\bar{\Theta} \sim 0.1$
- нуклеосинтез меняется в деталях, но эволюция звёзд это компенсирует
- в подходе landscape большие $\bar{\Theta}$ даже слегка более мотивированы...



Стандартная модель физики частиц: странные параметры

антропный аргумент

Массы кварков

- есть реальные границы: существование водорода, дейтрона и тяжёлых ядер
- антропика выделяет лёгкий сектор: $m_u, m_d, m_e \ll \Lambda_{\text{QCD}}$
- не объясняет полную иерархию
- ✓ антропика задаёт окно совместимости, но не решает проблему иерархии масс частиц трёх поколений

Сильная CP-проблема

- значение $\bar{\theta}$ влияет на многие наблюдаемые, связанные с ядерной физикой
- но вплоть до $\bar{\theta} \sim 0.1$ наш мир был бы таким же, как в реальности

$$|\bar{\theta}|_{\text{exp}} \lesssim 10^{-10} \ll 10_{\text{anth}}^{-1}$$

- ✓ для сильного CP-нарушения антропный фильтр слишком груб и слишком слаб

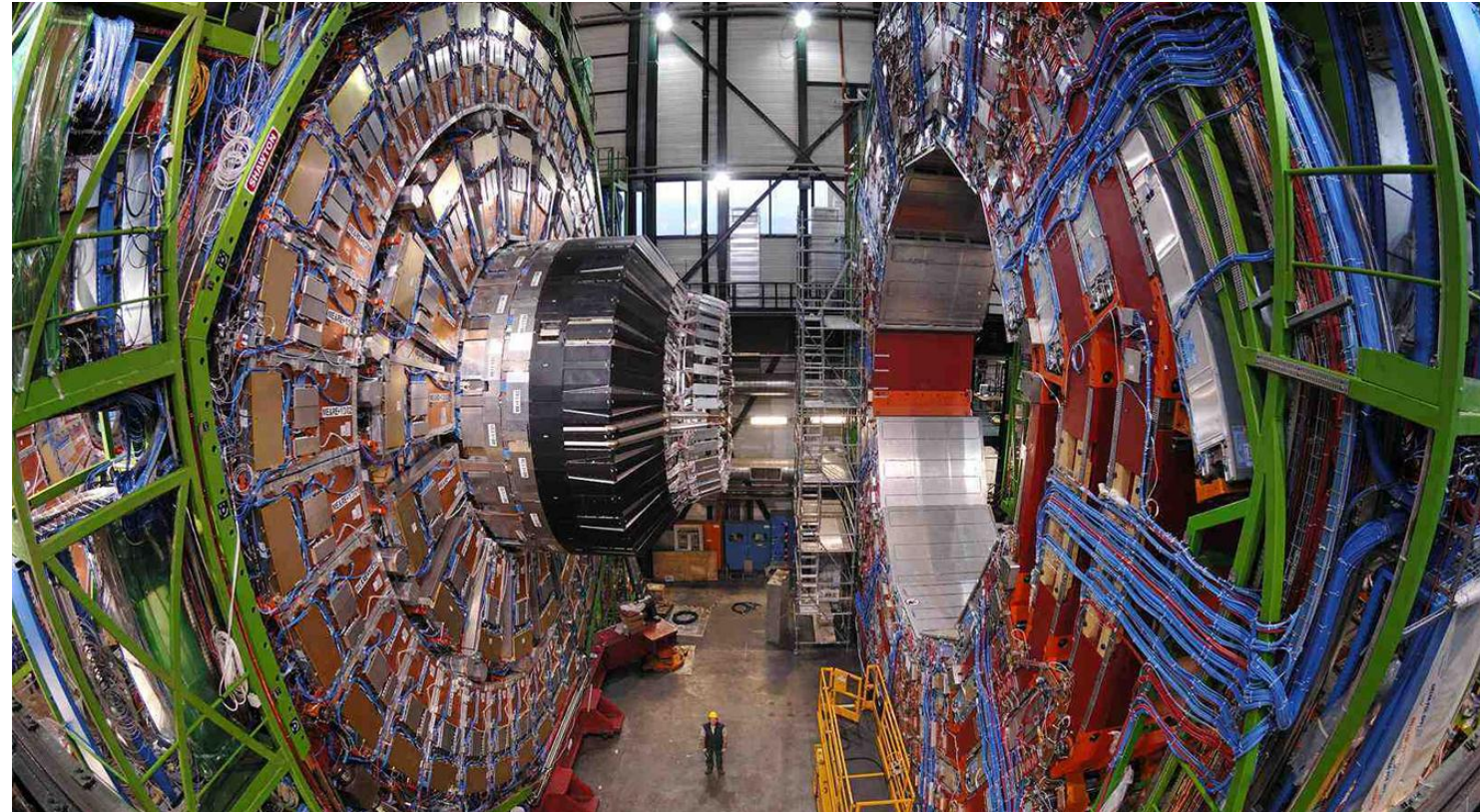


За пределы Стандартной модели

➤ фундаментальная физика = исследования на пределе возможностей человечества

– технологических

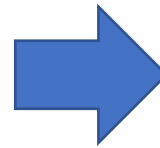
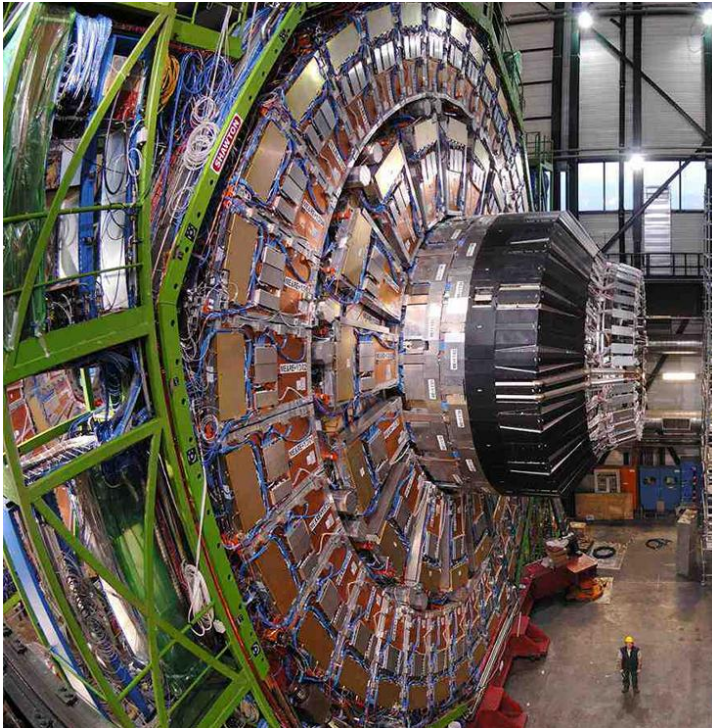
детектор CMS
Большого
адронного
коллайдера



За пределы Стандартной модели

➤ фундаментальная физика = исследования на пределе возможностей человечества

– технологических



MPT



За пределы Стандартной модели

➤ фундаментальная физика = исследования на пределе возможностей человечества

– технологических

(раздвигая пределы сперва для науки, затем для повседневной жизни) – томографы, WWW,...



Стандартная модель прекрасна, но требует расширения

Может, тебе просто не нравится,
как мир устроен, ЙЦУКЕН?

...

Не знаю, *думай*.

*Виктор Пелевин
«Акико»*



Стандартная модель прекрасна, но требует расширения

Может, тебе просто не нравится,
как мир устроен, ЙЦУКЕН?

...

Не знаю, *думай*.

Виктор Пелевин
«Акико»

ДУМАТЬ УЧАТ НА КАФЕДРЕ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

