

Теоретическая физика. Барионная асимметрия вселенной: ОКНО В НОВУЮ ФИЗИКУ

Михаил Шапошников

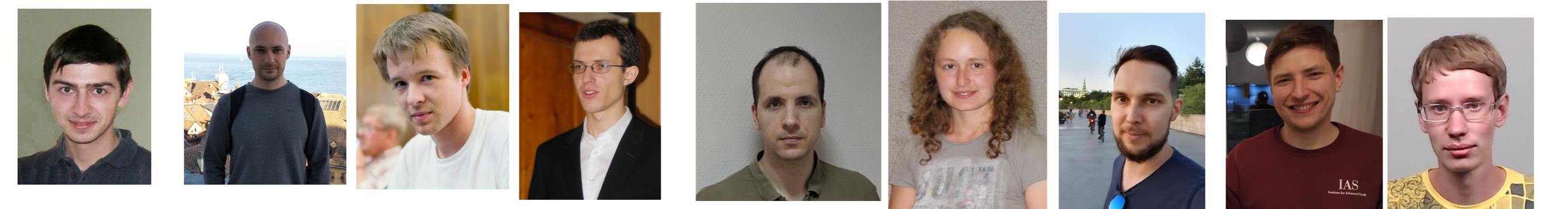


Теоретическая физика в ИЯИ

Славная 50-летняя история, 1970-2020:

Направления исследований теоретической физики высоких энергий, пионерами которых являются теоретики ИЯИ:

- Физика элементарных частиц и космология
- Многопетлевые вычисления в квантовой теории поля, теория перенормировок
- Теоретическая физика нейтрино - нейтринные осцилляции в среде



Ч

К

на ПИТОМНИКЕ



- Асимметрия между материей и антиматерией во Вселенной
- Ранняя Вселенная
- Темная материя

Частицы и Космология на питомнике



- Асимметрия между материей и антиматерией во Вселенной
- Ранняя Вселенная
- Темная материя

Барионная асимметрия Вселенной

- **Все началось здесь, в Москве:** Сахаров (Институт Лебедева) 1967, Кузьмин (Институт Лебедева) 1970, Игнатьев, Красников, Кузьмин и Тавхелидзе (ИЯИ) 1977
- **Над этой темой работали многие теоретики ИЯИ:** Тавхелидзе, Кузьмин, Красников, Рубаков, Игнатьев, Шапошников, Ткачев, Григорьев, Бочкарев, Хлебников, Горбунов, Демидов, Кирпичников, Пахов, Панин, Тимирясов.
- Эта тема мне очень близка: первая статья (с Игнатьевым и Кузьминым) в 1978 году и последняя (надеюсь) в 2020 году (с Klaric и Тимирясовым).

Ключевые исторические этапы

- **До 1930 года:** нет антиматерии — нет проблемы. Единственными известными элементарными частицами были протоны, нейтроны, электроны и фотоны.
- **1933:** Картина Дирака (Нобелевская лекция): во Вселенной 50% материи и 50% антиматерии. Четность P и зарядовое сопряжение C считались точными симметриями.
- **1956:** Открытие нарушения P и C в слабых взаимодействиях (L_i , Y_n , V_u)
- **1957:** Предложение о строгом сохранении комбинированной CP -симметрии (Ландау)

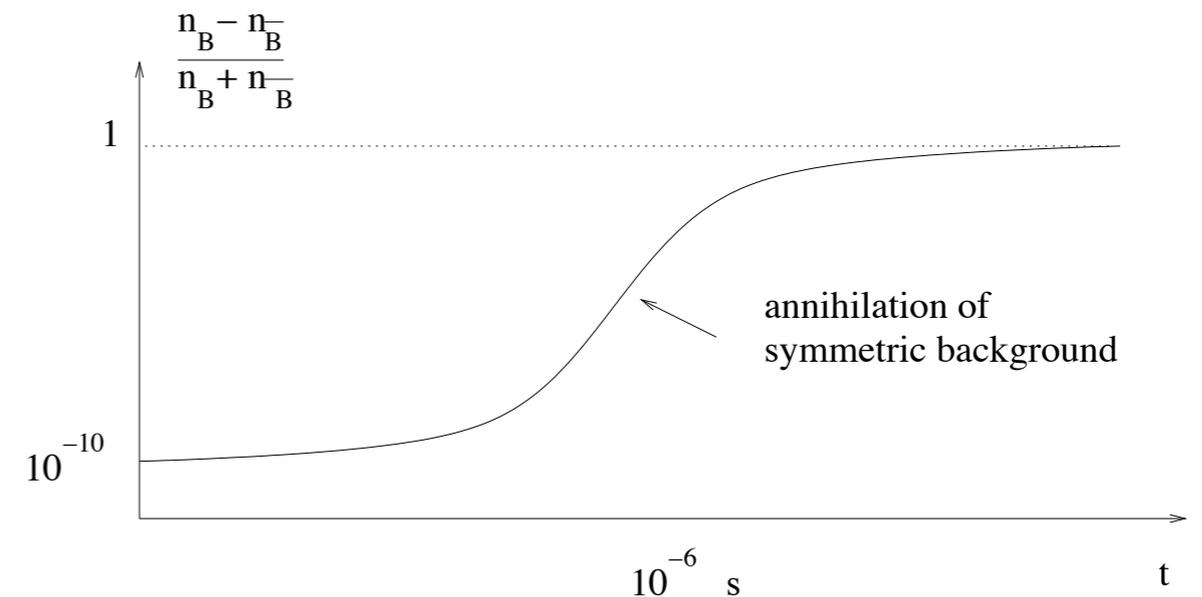
Ключевые исторические этапы

- **1964:** открытие CP-нарушения в распадах K^0 (Cronin, Fitch, Christenson, Turlay), показывающее, что материя и антиматерия различны ($\delta_{CP} \sim 10^{-3}$)
- Множество космологических доказательств того, что Вселенная не содержит антивещества: никаких антиядер в космических лучах, никаких следов аннигиляции материи и антиматерии во Вселенной,...
- **1965:** открытие космического микроволнового фонового излучения (Penzias, Wilson): **правильная мера барионной асимметрии Вселенной**

$$\Delta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_B + n_{\bar{B}}} \Big|_{T \sim 1 \text{ GeV}} \simeq \frac{n_B}{n_\gamma} \Big|_{\text{сейчас}} \simeq 10^{-10} \ll \delta_{CP} \text{ в каонах}$$

Большой взрыв и барионная асимметрия

- При $t \sim 10^{-6}$ с после Большого взрыва на каждые 10^{10} кварков приходится $(10^{10} - 1)$ антикварков. Несколько позже симметричный фон аннигилирует на фотоны и нейтрино, тогда как асимметричная часть выживает и дает начало галактикам, звездам, планетам.



Зависимость барионной асимметрии от времени

Большой взрыв и барионная асимметрия

Проблемы, которые хотелось бы решить:

Почему в ранней Вселенной количество барионов больше, чем количество антибарионов?

Как вычислить барионную асимметрию?

Из наблюдений $n_B/n_\gamma \simeq 10^{-10}$.



Предложение Сахарова, 1967 г.

VIOLATION OF CP INVARIANCE, C ASYMMETRY, AND BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE

A. D. Sakharov

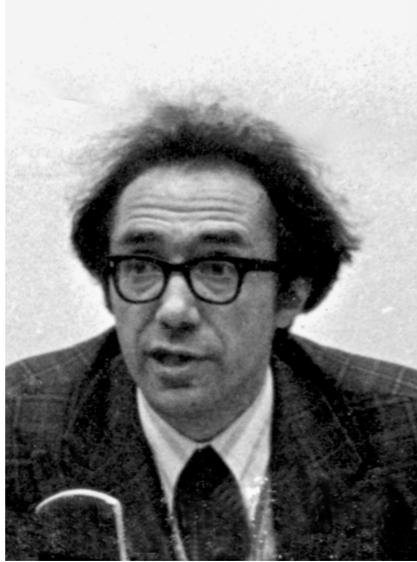
Submitted 23 September 1966

ZhETF Pis'ma 5, No. 1, 32-35, 1 January 1967

According to our hypothesis, the occurrence of C asymmetry is the consequence of violation of CP invariance in the nonstationary expansion of the hot universe during the superdense stage, as manifest in the difference between the partial probabilities of the charge-conjugate reactions. This effect has not yet been observed experimentally, but its existence is theoretically undisputed

Источник барионной асимметрии:

распады марковских максимонов с массами $\sim 10^{19}$ GeV



Работа Кузьмина, 1970 г.

CP-NONINVARIANCE AND BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE

V.A. Kuz'min

P.N. Lebedev Physics Institute, USSR Academy of Sciences

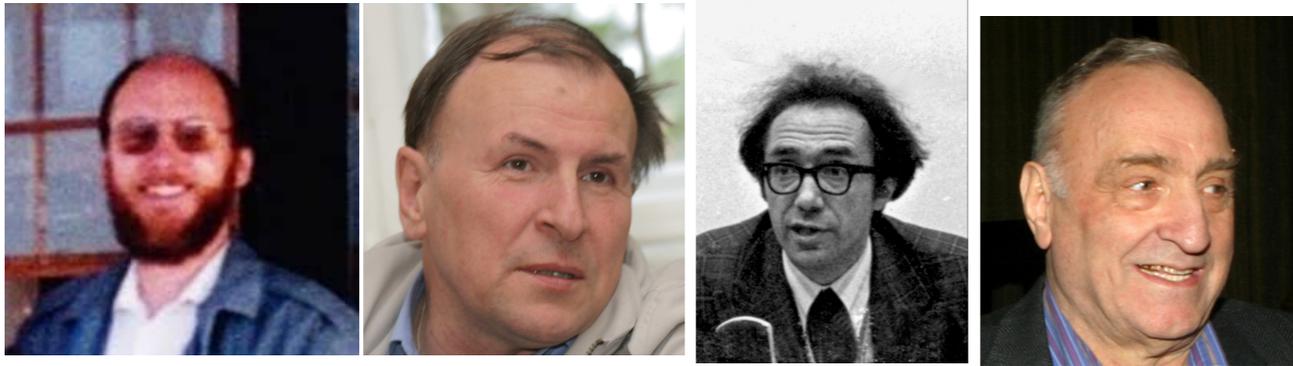
Submitted 10 August 1970

ZhETF Pis. Red. 12, No. 6, 335 - 337 (20 September 1970)

Новые идеи:

- Источник асимметрии - распады нового майорановского фермиона с массой $M > 1$ ТэВ (прототип современного лептогенеза)
- Связь с CP-нарушением в K-распадах
- Предложение по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций

Работы Сахарова и Кузьмина оставались незамеченными до 1978 года ...



UNIVERSAL *CP*-NONINVARIANT SUPERWEAK INTERACTION AND BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE

A.Yu. IGNATIEV, N.V. KRASNIKOV, V.A. KUZMIN and A.N. TAVKHELIDZE
Institute for Nuclear Research of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow, USSR

Received 4 April 1978

Unified Gauge Theories and the Baryon Number of the Universe



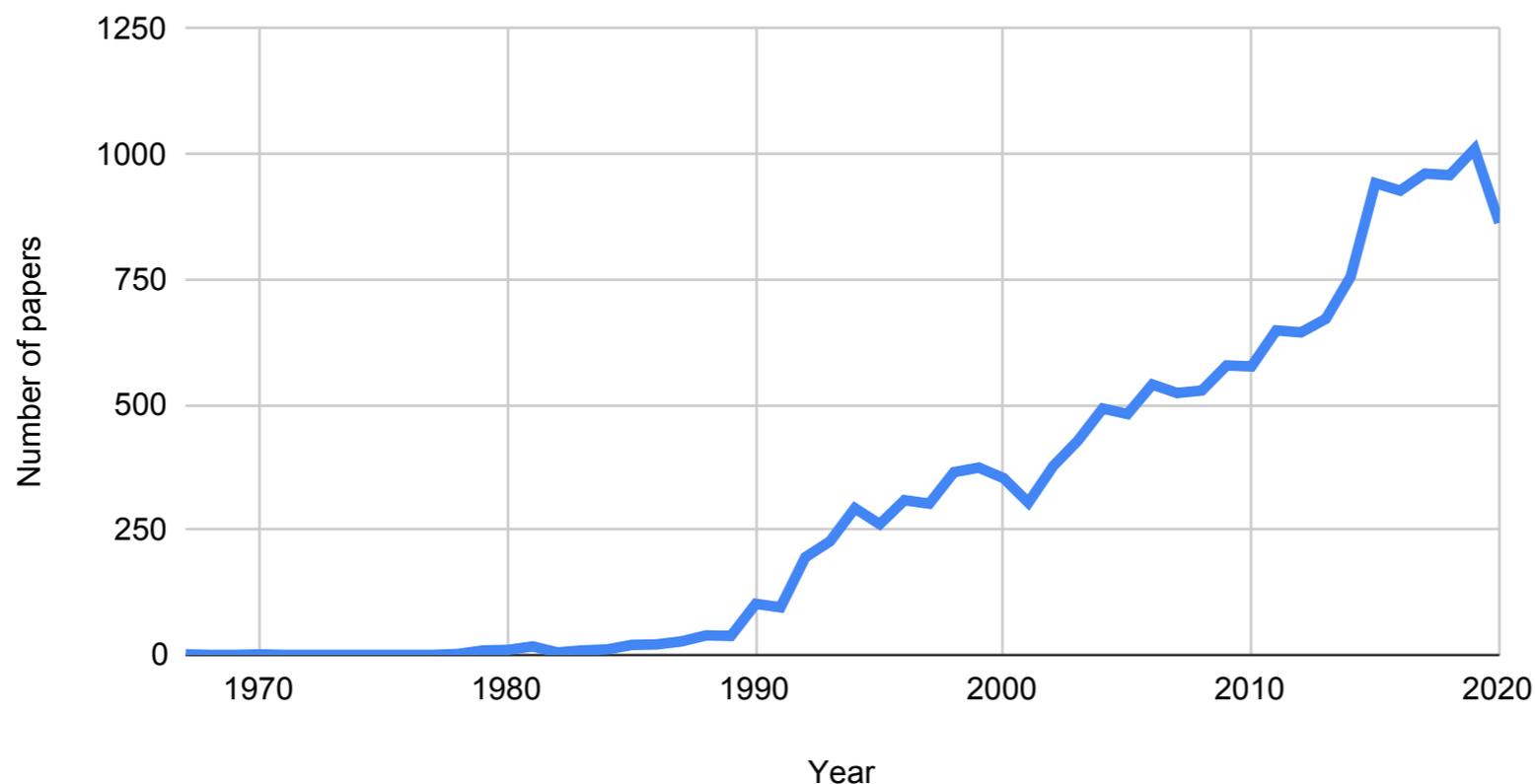
Motohiko Yoshimura
Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980, Japan
(Received 27 April 1978)

Интересно: статья Yoshimura была вдвойне неверной:

- Он получил барионную асимметрию в термодинамическом равновесии
- Он получил барионную асимметрию в минимальной модели великого объединения SU(5) (недостаточно CP-нарушения)

Эти две работы во многом повысили интерес к проблеме: почти каждый написал статью с обсуждением или упоминанием этой проблемы!

Number of papers vs. Year



Basic stats over all years	
Years:	1960-2020
Articles	16436
Authors	13452
Authors per article	2.9

Предоставлено: Олег Ручайский
<https://www.prophy.science>

Вычисление барионной асимметрии

Первый кандидат - Стандартная Модель

Качественно подходит:

- **B-несохранение:** Есть. Электрослабая аномалия + сфалероны (Кузьмин, Рубаков, М.Ш. '1985)
- **Отклонение от равновесия:** Есть. Расширение Вселенной, электрослабый фазовый переход?
- **CP-нарушение:** Есть. Комплексные фазы в константах Хиггс-фермионного взаимодействия, СКМ матрица

Баритонная асимметрия в Стандартной Модели

В Стандартной модели: все известно (все параметры, CP-нарушение, механизм несохранения барионного числа). Точных вычислений асимметрии не проводилось, но мы убеждены, что Стандартная модель не работает: не хватает много порядков.

Мера нарушения CP. Полная барионная асимметрия пропорциональна комбинации (МШ '86).

$$G_F^6 s_1^2 s_2 s_3 \sin \delta m_t^4 m_b^4 m_c^2 m_s^2 \sim 10^{-20} \ll \Delta \sim 10^{-10}$$

Ряд попыток найти усиление:

- * Усиление временным фактором $M_P/M_W \sim 10^{16}$, Конденсат Черна-Саймонса калибровочных полей (МШ' 86,87) - не работает (Ambjorn, Laursen, МШ' 89)
- * Усиление временным фактором $M_P/M_W \sim 10^{16}$, Z-конденсация на стенках пузыря (Nasser, Turok ' 94) - не работает, стенки пузырей отсутствуют, как следует из более поздних работ
- * Усиление температурными эффектами (аналогично усилению CP-нарушения в распадах каонов) (Farrar, МШ '93) - не работает из-за потери когерентности при столкновении частиц в плазме (Gavela, Hernandez, Orloff, Pene, Quimbay ' 94; Huet, Sather' 94)

Отклонения от теплового равновесия слишком малы, электрослабый фазовый переход отсутствует при массах Хиггса, превышающих 73 ГэВ. (Kajantie, Laine, Rummukainen, МШ ' 96). Это значение было исключено на LEP в 1997.

Недавняя неудачная попытка воскрешения: Kharzeev, Shuryak, Zahed '2020



Барионная асимметрия указывает на физику за пределами СМ!

Бариогенезис: окно в физику за пределами СМ

Но окно открыто настежь. Есть только **одно число** n_B/n_γ , которое нужно объяснить, и, следовательно, много возможностей.

Эпистемология утверждает, что

$$\# \text{ теорий} \sim \text{const}/(\# \text{ измеренных параметров})^\alpha, \alpha > 0$$

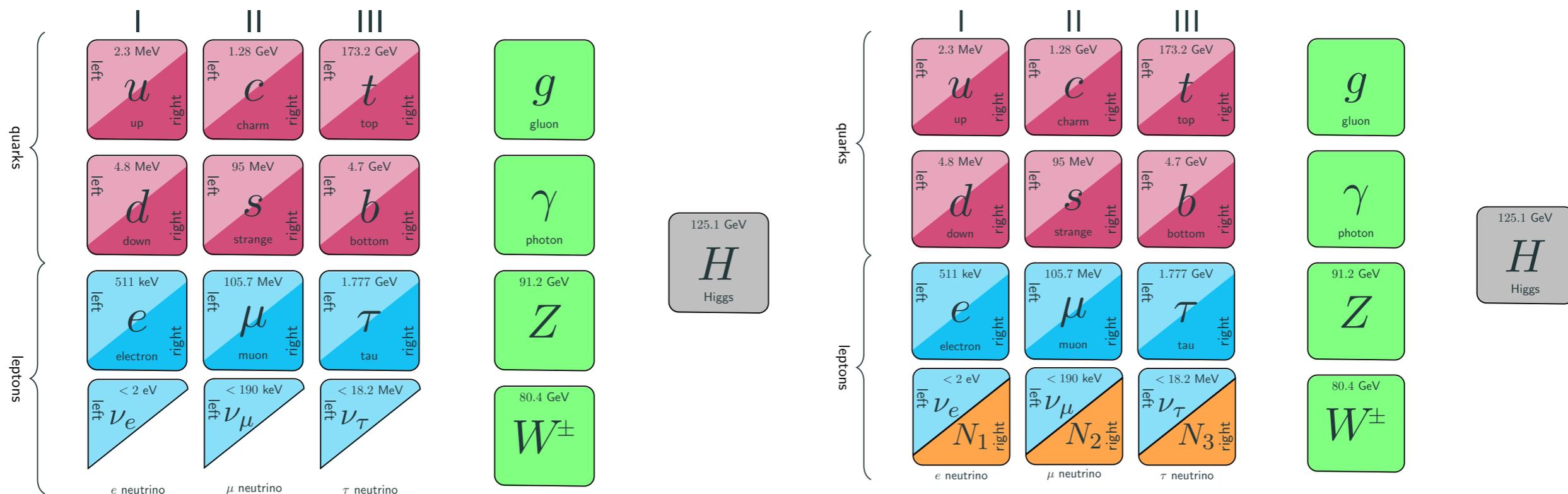
Механизмы бариогенезиса

- В 2004 году мне удалось насчитать ровно 42 (ср. Дуглас Адамс) механизма бариогенезиса:
- 1. GUT baryogenesis 2. GUT baryogenesis after preheating 3. Baryogenesis from primordial black holes 4. String scale baryogenesis 5. Affleck-Dine (AD) baryogenesis 6. Hybridized AD baryogenesis 7. No-scale AD baryogenesis 8. Single field baryogenesis 9. Electroweak (EW) baryogenesis 10. Local EW baryogenesis 11. Non-local EW baryogenesis 12. EW baryogenesis at preheating 13. SUSY EW baryogenesis 14. String mediated EW baryogenesis 15. Baryogenesis via leptogenesis 16. Inflationary baryogenesis 17. Resonant baryogenesis 18. Spontaneous baryogenesis 19. Coherent baryogenesis 20. Gravitational baryogenesis 21. Defect mediated baryogenesis 22. Baryogenesis from long cosmic strings 23. Baryogenesis from short cosmic strings 24. Baryogenesis from collapsing loops 25. Baryogenesis through collapse of vortons 26. Baryogenesis through axion domain walls 27. Baryogenesis through QCD domain walls 28. Baryogenesis through unstable domain walls 29. Baryogenesis from classical force 30. Baryogenesis from electrogenesis 31. B-ball baryogenesis 32. Baryogenesis from CPT breaking 33. Baryogenesis through quantum gravity 34. Baryogenesis via neutrino oscillations 35. Monopole baryogenesis 36. Axino induced baryogenesis 37. Gravitino induced baryogenesis 38. Radion induced baryogenesis 39. Baryogenesis in large extra dimensions 40. Baryogenesis by brane collision 41. Baryogenesis via density fluctuations 42. Baryogenesis from hadronic jets

Уверен, что сейчас различных механизмов стало еще больше.

Простота как руководящий принцип

Простейшая теория новой физики, которая может объяснить все экспериментальные недостатки Стандартной модели (массы и осцилляции нейтрино, темная материя, барионная асимметрия Вселенной, включая космологическую инфляцию, ведущую к наблюдаемой Вселенной), представляет собой расширение СМ 3 правыми нейтрино (= тяжелые нейтральные лептоны - HNL): ν MSM (Asaka, МШ; Безруков, МШ)

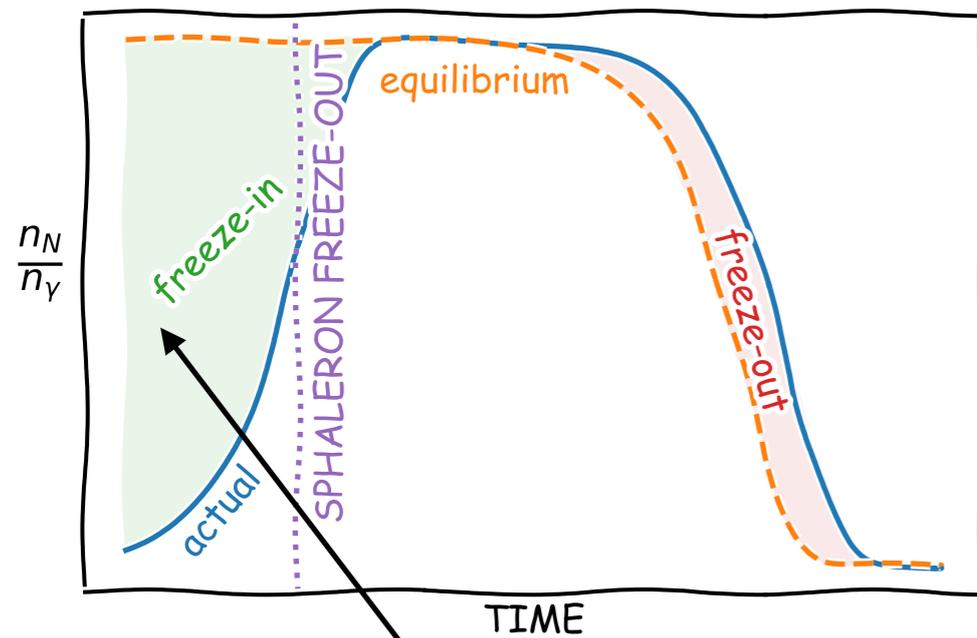


Бариогенезис в ν MSM

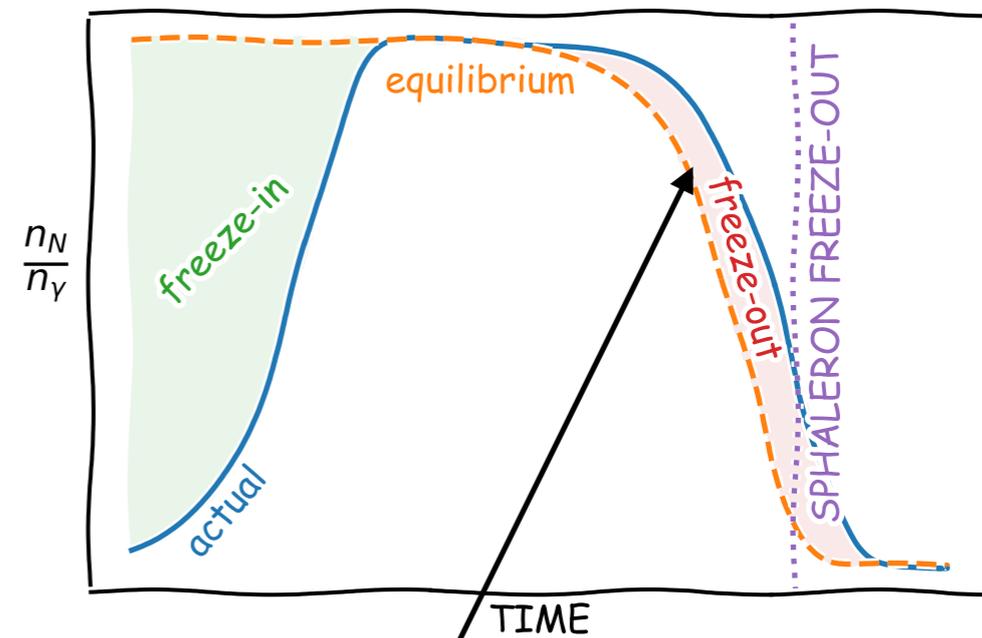
Мы (Blondel, Graverini, Serra, МШ' 2014) думали, что существуют **два окна** для новой физики:

- $M_N > 130$ GeV, “freeze-out” лептогенезис за счет **неравновесных распадов HNL** (a’la Кузьмин; Fukugita, Yanagida, ...) производящих лептонную асимметрию. Сфалеронные процессы, отщепляющиеся при температуре $T_{\text{sph}} = 130$ GeV, преобразуют ее в барионную асимметрию. Если $M_N < T_{\text{sph}}$ то N находятся в тепловом равновесии при $T = T_{\text{sph}}$: условие Сахарова об отклонении от равновесия не выполняется.
- $M_N < M_W \sim 80$ GeV, “freeze-in” лептогенезис за счет **неравновесных осцилляций HNL** (a’la Ахмедов, Рубаков, Смирнов - первоначальная идея; Asaka, МШ - кинетическая теория ...). Если $M_N > M_W \sim 80$ GeV то HNL-ы приходят в равновесие за счет быстрых распадов $N \rightarrow Wl$: условие Сахарова об отклонении от равновесия не выполняется.

Freeze-in and freeze out



Генерация лептонного числа:
freeze-in



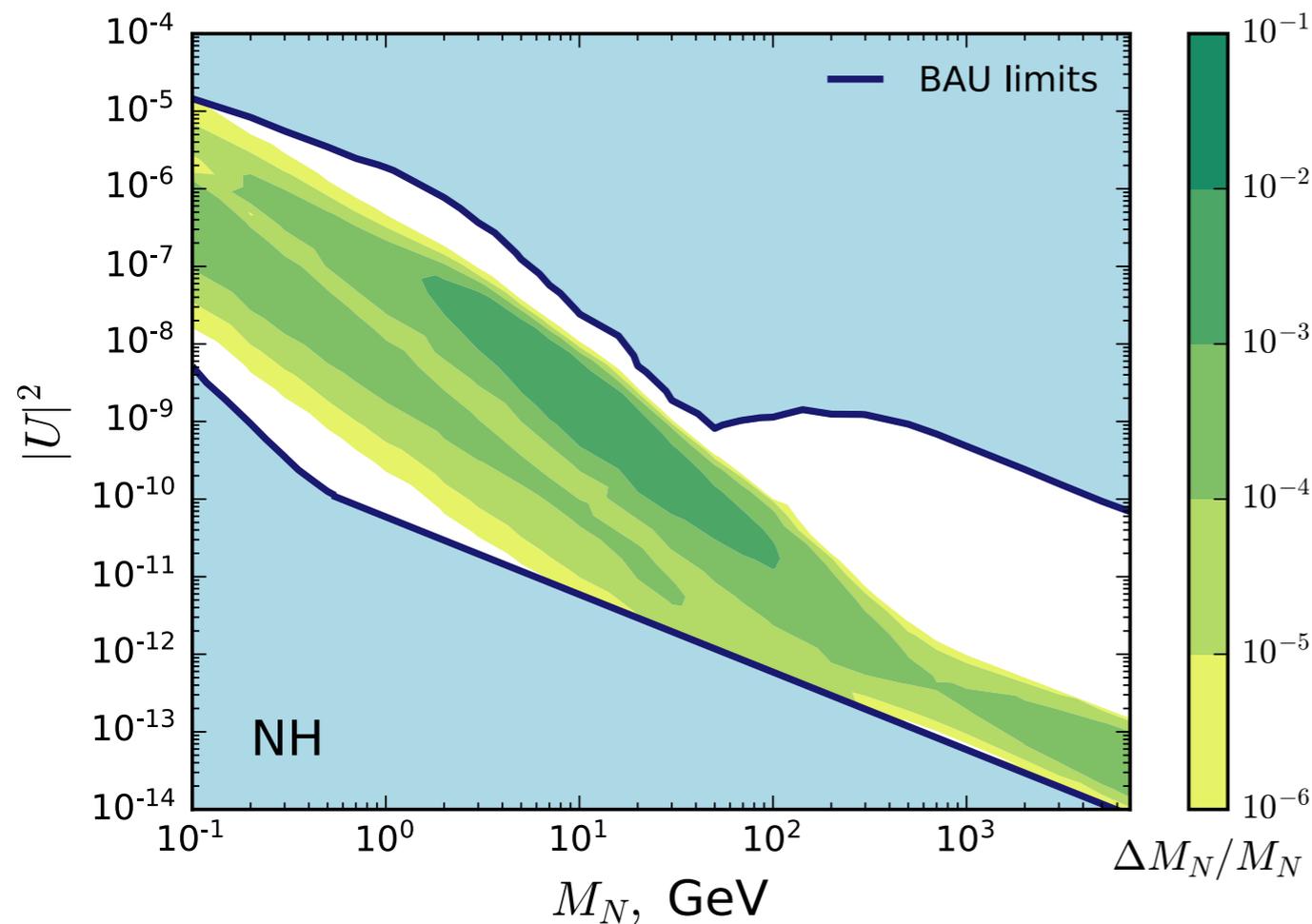
Генерация лептонного числа:
freeze-out

Объединенный лептогенезис

Juraj Klarić, МШ, Инар Тимирясов 2020, <https://arxiv.org/abs/2008.13771>

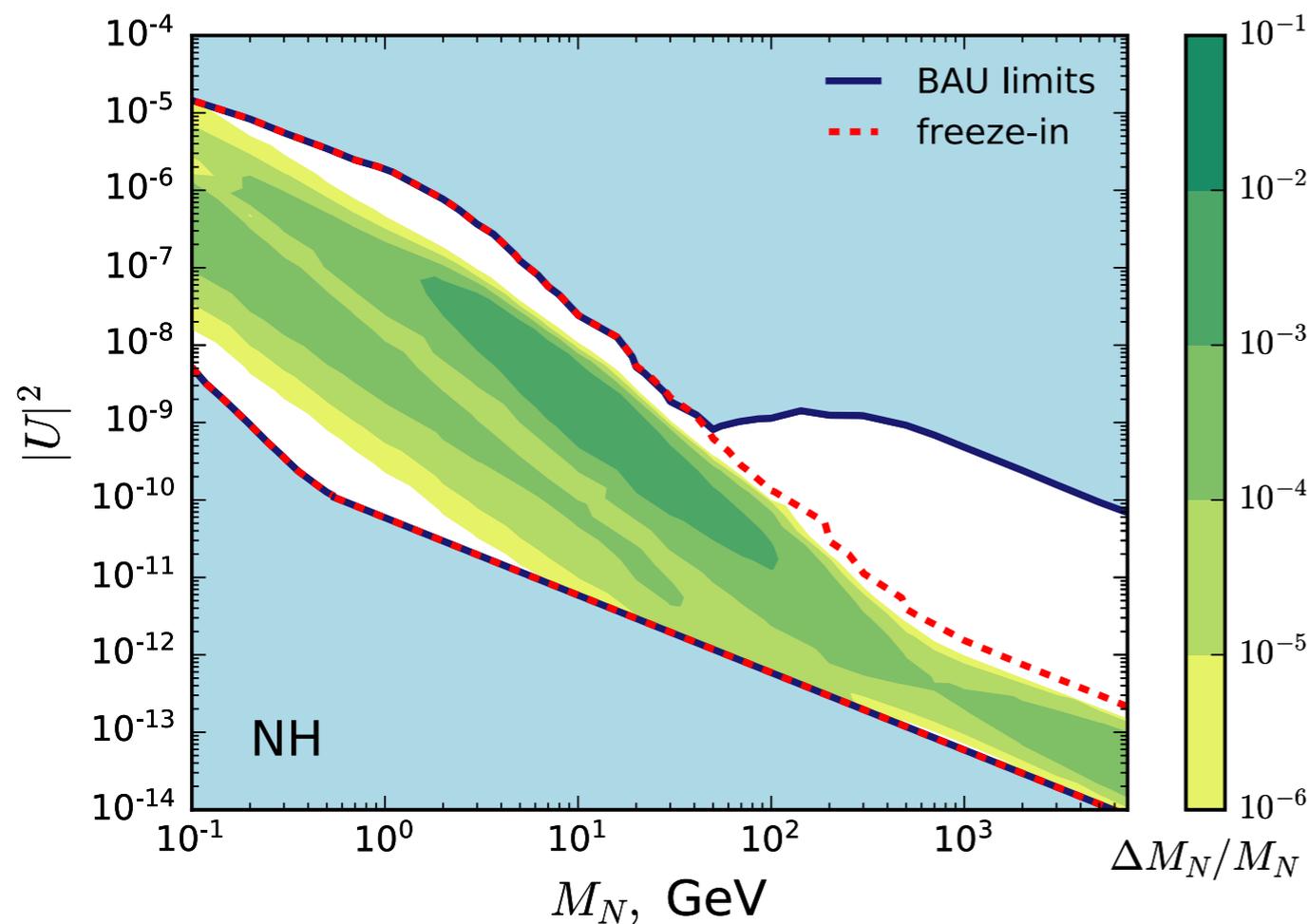
Оба механизма (freeze-in и freeze-out) описываются одними и теми же кинетическими уравнениями и допускают систематическое изучение без каких-либо упрощающих предположений. Вычисления довольно сложны: resummations, hard thermal loops, эффект Ландау-Померанчука-Мигдала и т. д. Главный результат: области **freeze-in** и **freeze-out** связаны, есть только одно объединенное окно для новой физики.

Объединенный лептогенезис



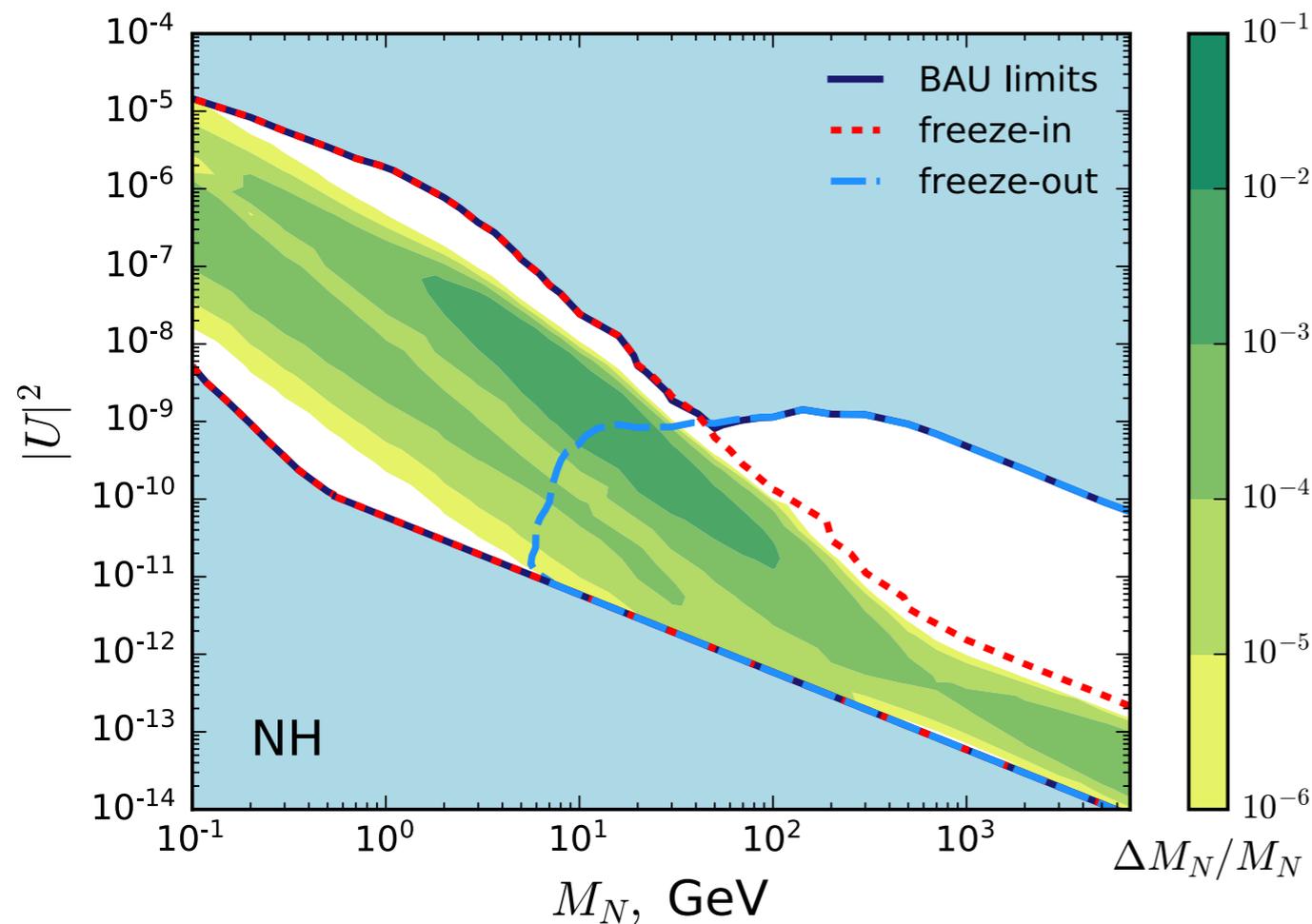
- “Freeze-in” лептогенезис: нулевые начальные условия для плотности HNL и пренебрежение отклонениями от теплового равновесия, вызванными массой
- “Freeze-out” лептогенезис: равновесные начальные условия для плотностей HNL

Объединенный лептогенезис



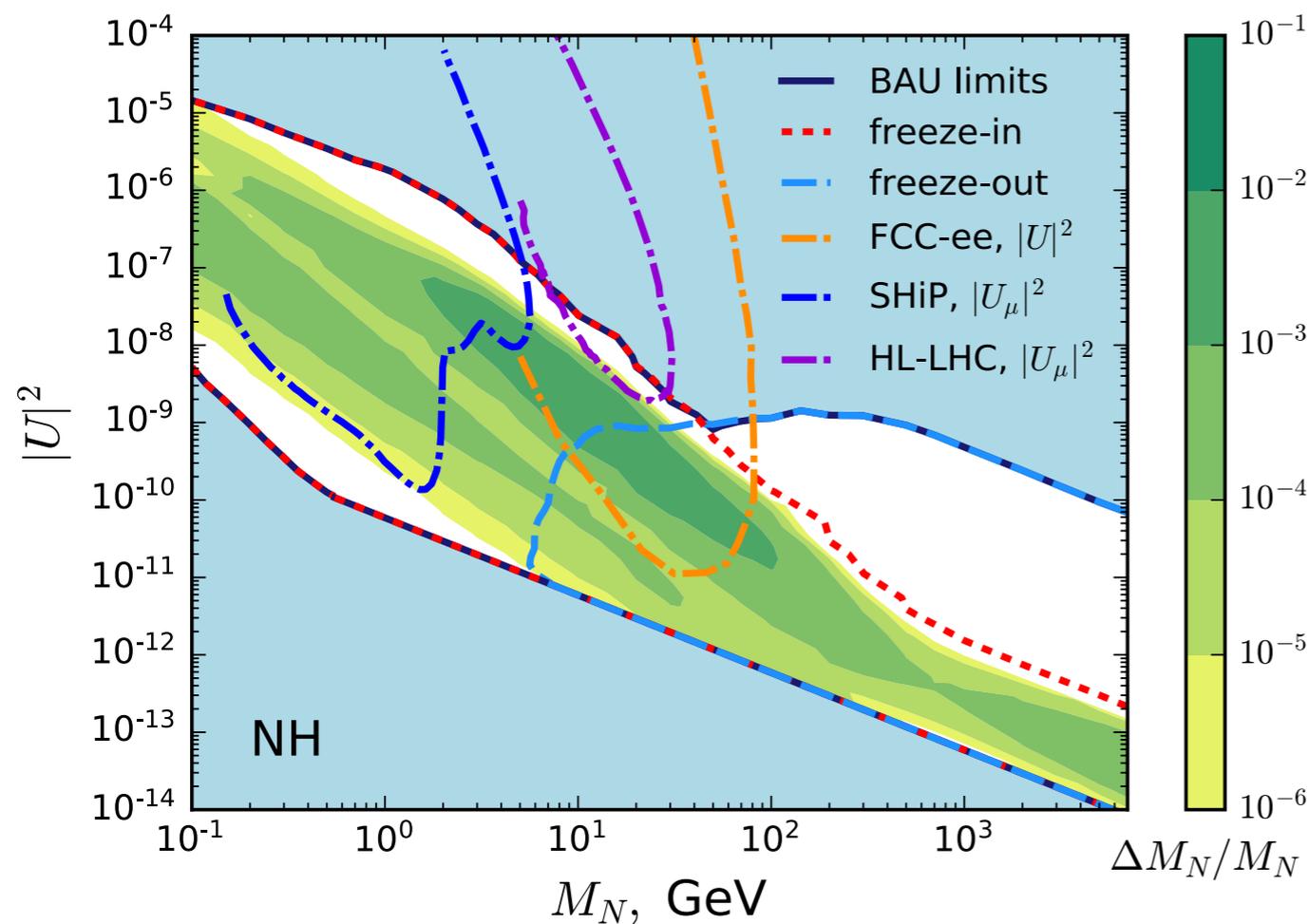
- “Freeze-in” лептогенезис: нулевые начальные условия для плотности HNL и пренебрежение отклонениями от теплового равновесия, вызванными массой
- “Freeze-out” лептогенезис: равновесные начальные условия для плотностей HNL

Объединенный лептогенезис



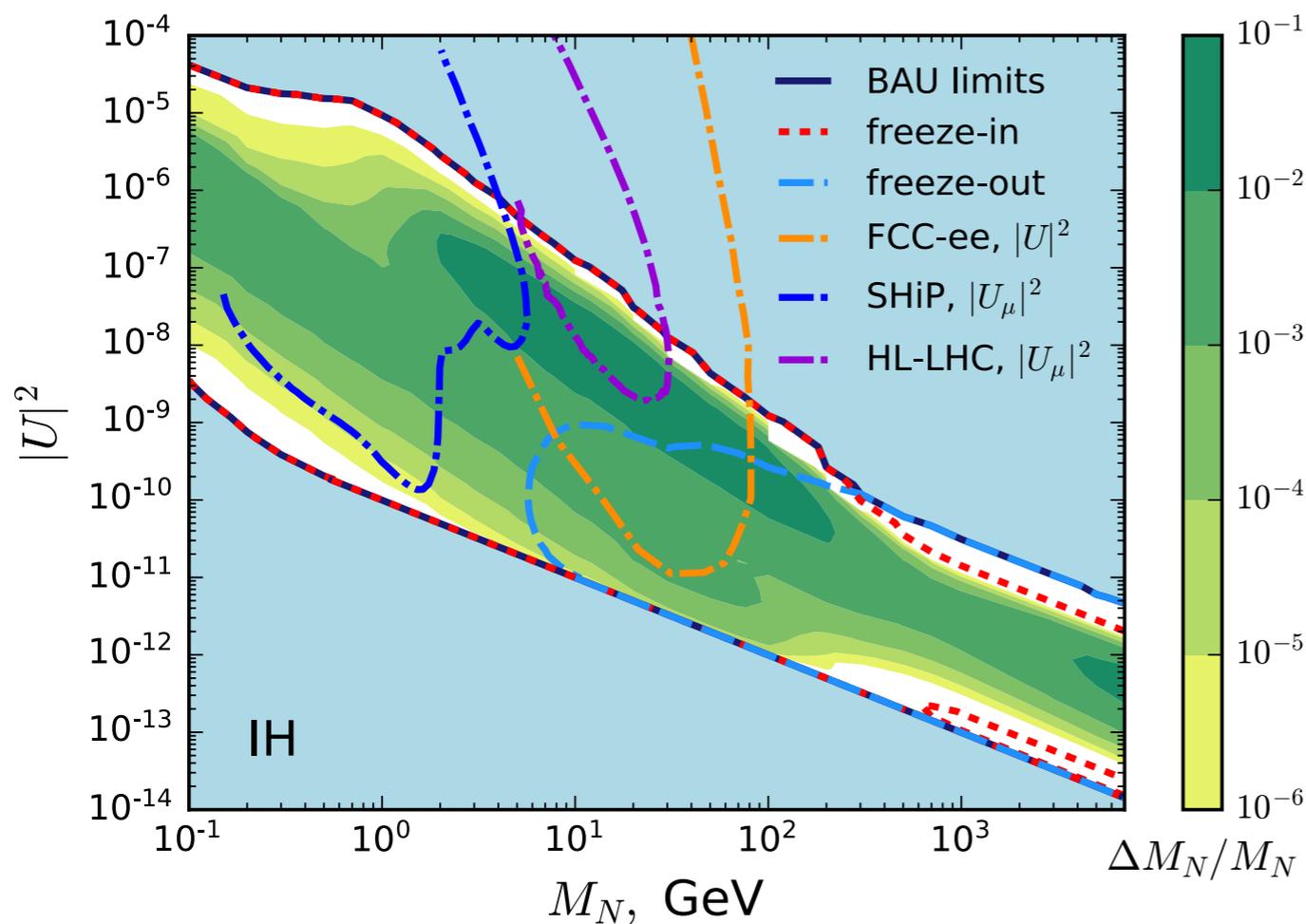
- “Freeze-in” лептогенезис: нулевые начальные условия для плотности HNL и пренебрежение отклонениями от теплового равновесия, вызванными массой
- “Freeze-out” лептогенезис: равновесные начальные условия для плотностей HNL

Объединенный лептогенезис



- “Freeze-in” лептогенезис: нулевые начальные условия для плотности HNL и пренебрежение отклонениями от теплового равновесия, вызванными массой
- “Freeze-out” лептогенезис: равновесные начальные условия для плотностей HNL

Объединенный лептогенезис



- “Freeze-in” лептогенезис: нулевые начальные условия для плотности HNL и пренебрежение отклонениями от теплового равновесия, вызванными массой
- “Freeze-out” лептогенезис: равновесные начальные условия для плотностей HNL

Экспериментальный поиск HNL

Рождение и распад HNL сильно подавлены -
необходимы специальные эксперименты:

Масса ниже ~ 5 ГэВ - “Intensity frontier”, CERN
SPS: NA62 beam dump mode, SHiP

Масса выше ~ 5 ГэВ - FCC $e^+ e^-$ в Z -пике, LHC

Заключение

Даже окно в простейшую новую физику широко открыто.

- 😊 Возможно, это хорошо: барионная асимметрия и массы нейтрино - общее явление.
- 😞 Возможно, это плохо: мы не можем сказать нашим друзьям - экспериментаторам, где именно искать HNL: объяснение барионной асимметрии и осцилляций нейтрино существует для всех масс HNL выше $O(1)$ МэВ

В любом случае, мы находимся на захватывающем этапе истории: запланированные будущие эксперименты, такие как SHiP и FCC-ее в режиме Z-резонанса, имеют шансы вскоре (?) раскрыть загадку происхождения масс нейтрино и барионной асимметрии Вселенной.

С днем рождения!

