

Стерильное нейтрино — Темная материя



$N \rightarrow$



Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН
ИЯФ Г.И.Будкера СО РАН

Калашников Д. ИЯИ РАН

Горбунов Д., Круган Г.

Март 2026

Работа поддержана
грантом Минобр РФ

Мотивация и постановка задачи



Ключевая идея

Стерильные нейтрино как кандидаты на тёмную материю требуют механизма их эффективного рождения в ранней Вселенной. Резонанс в присутствии лептонной асимметрии обеспечивает необходимую эффективность, однако динамика системы остаётся недостаточно изученной.

Цели исследования

- Учесть эволюцию лептонной асимметрии в процессе резонансного рождения
- Определить условия уничтожения асимметрии нейтринными осцилляциями
- Исследовать вопрос существования нижнего предела на угол смешивания
- Учесть вклады μ и τ лептонов при больших химических потенциалах

Ключевые параметры

Лептонная асимметрия

$$L = \Delta n/s$$

Нормированная разность чисел лептонов и антилептонов

Угол смешивания

$$\theta$$

Угол смешивания активного и стерильного состояний

Масса стерильного нейтрино

$$m_s$$

Майорановская масса

Механизм резонансного рождения



Ключевая идея

Резонанс возникает при совпадении эффективной массы активных и стерильных состояний в среде с ненулевой лептонной асимметрией. В точке резонанса смешивание становится максимальным, что обеспечивает эффективное рождение стерильных нейтрино.

1 Космологический фон



$$L_\alpha = \frac{\Delta n_\alpha}{s} \quad e, \mu, \tau, \nu, \pi, \rho, s, H$$

→ Формирует условия резонанса

2 Условия резонанса

$$L_\alpha \uparrow \Rightarrow T_{res} \downarrow$$

→ Определяют параметры осцилляций

3 Плотность стерильных нейтрино

$$n_{\nu_s} \propto \sum_{p_{res}} \frac{p_{res}^2 f_{\nu_\alpha} \times \sin^2(2\theta) \times \Delta^2(p_{res})}{\left| \frac{\partial}{\partial p} (\Delta(p) - V_\alpha) \right|_{p_{res}}}$$

🔄 Связь параметров

Температура резонанса определяется величиной лептонной асимметрии. Увеличение L приводит к снижению T_{res} , что критически влияет на динамику осцилляций.

⚠️ Новые эффекты

Большая асимметрия приводит к появлению новых эффектов, например, конденсация пионов и повышенные концентрации тяжелых лептонов

Конденсации пионов



Ключевая идея

При больших значениях L заряженные пионы в плазме конденсируются, что сказывается на космологическом фоне и, следовательно, на плотности активных нейтрино



Модель

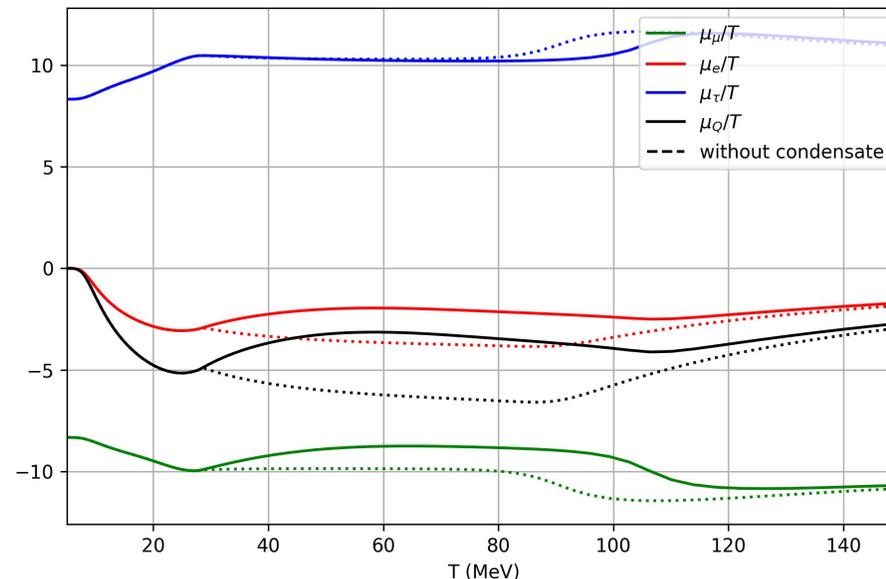
[2507.06518]

1 Мезонный потенциал

$$\Omega_M = \frac{\lambda}{4} (\sigma^2 + \pi^2 - v^2)^2 - h\sigma - \mu_Q^2 \pi^2$$

2 Фермионный потенциал

$$\Omega_F = -2N_c T \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \sum_{\pm} \ln \left(1 + e^{-\frac{E_{\Delta}^{\pm} \pm \mu_q}{T}} \right)$$



Химпотенциалы нейтрино с учетом и без учета пионного конденсата. $L=0.4$



Влияние

Пионный конденсат заметно влияет на плотность активных нейтрино

Конденсации пионов



Ключевая идея

При больших значениях L заряженные пионы в плазме конденсируются, что сказывается на космологическом фоне и, следовательно, на плотности активных нейтрино



Модель

[2507.06518]

1

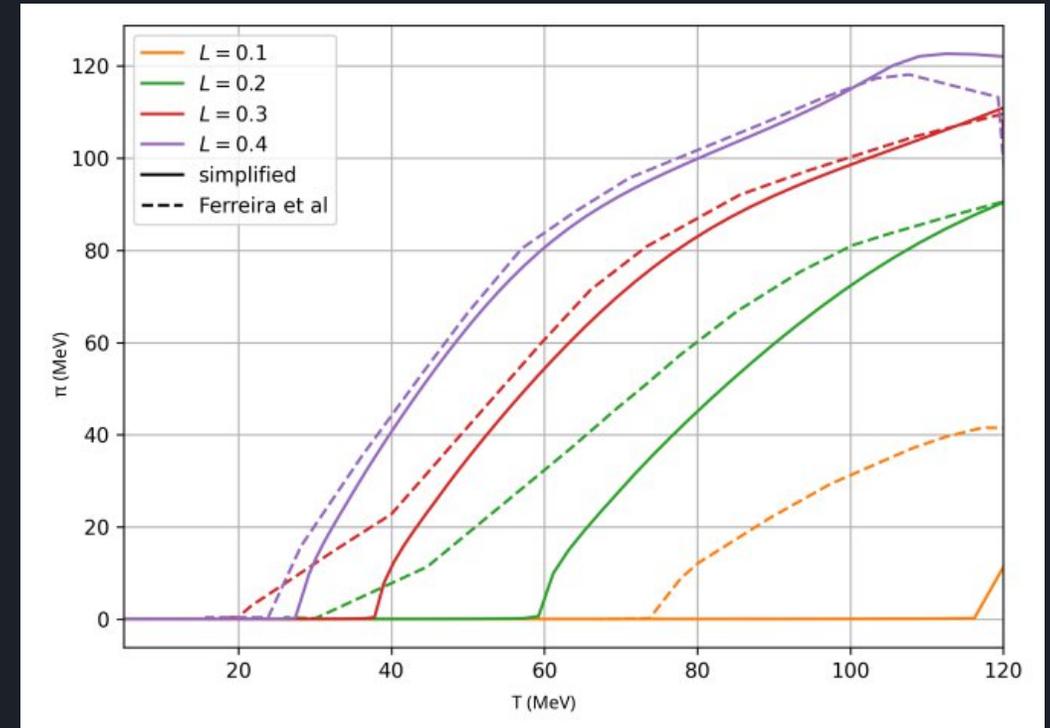
Мезонный потенциал

$$\Omega_M = \frac{\lambda}{4} (\sigma^2 + \pi^2 - v^2)^2 - h\sigma - \mu_Q^2 \pi^2$$

2

Фермионный потенциал

~~$$\Omega_F = -2N_c T \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \sum_{\pm} \ln \left(1 + e^{\pm (E_{\Delta} \pm \mu_q)/T} \right)$$~~



Сравнение полной и упрощенной моделей



Упрощенная модель

При достаточно больших асимметриях, минимум полной модели приближается к минимуму мезонного потенциала

Уничтожение лептонной асимметрии



Ключевая идея

В Осцилляции активных нейтрино перераспределяют асимметрию. В случае, когда полная асимметрия равна нулю, осцилляции могут привести к нулевым асимметриям в каждом отдельном флейворе.



Механизм уничтожения

[2502.17374]

[2502.14960]

1

Перераспределение между флейворами

Нейтринные осцилляции приводят к перераспределению асимметрии между различными флейворными состояниями

2

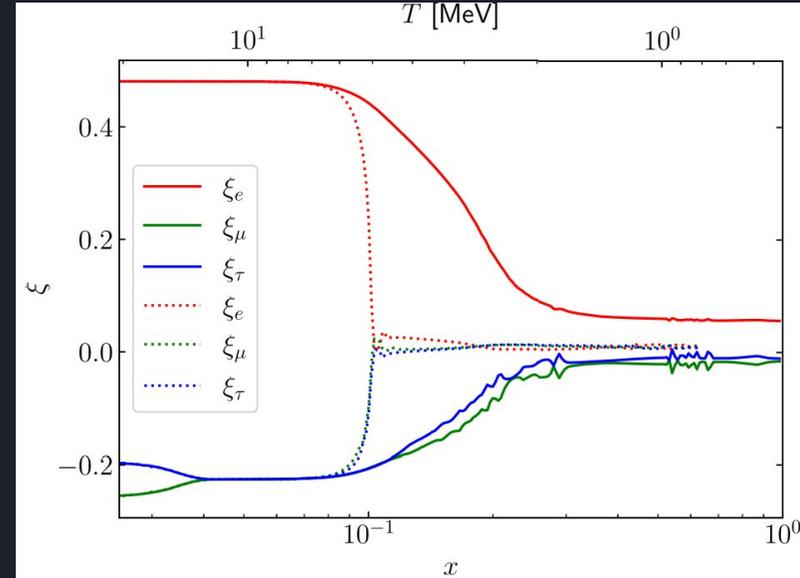
Эволюция к нулю

В некоторых режимах полное значение L эволюционирует к нулю, изменяя условия резонанса

3

Направление лептонной асимметрии

В некоторых конфигурациях асимметрий и иерархии масс нейтрино, итоговая электронная асимметрия может быть равна нулю. Тем самым удовлетворив требования BBN.



Перераспределение асимметрии между флейворами
Доклад Г. Кругана во вторник

$$\sum_{\alpha} L_{\alpha} = 0$$

I
IH

$$L_e = -L_{\mu}$$

$$L_{\tau} = 0$$

II
NH

$$L_e = -\frac{2}{3}L_{\mu}$$

$$L_{\tau} = 0$$

III

$$L_{\mu} = -L_{\tau}$$

$$L_e = 0$$



Физические следствия

При определенных параметрах асимметрий и иерархии масс нейтрино итоговая асимметрия в каждом флейворе может быть равна нулю и удовлетворять требованиям BBN.

Температура резонанса



Ключевая идея

Осцилляции активных нейтрино могут влиять на процесс генерации стерильных нейтрино, так как изменяют асимметрию плазмы



Связь осцилляций

1

Характерные температуры осцилляций

Активные нейтрино активно осциллируют в ранней Вселенной при температурах от 20 МэВ до 1 МэВ

2

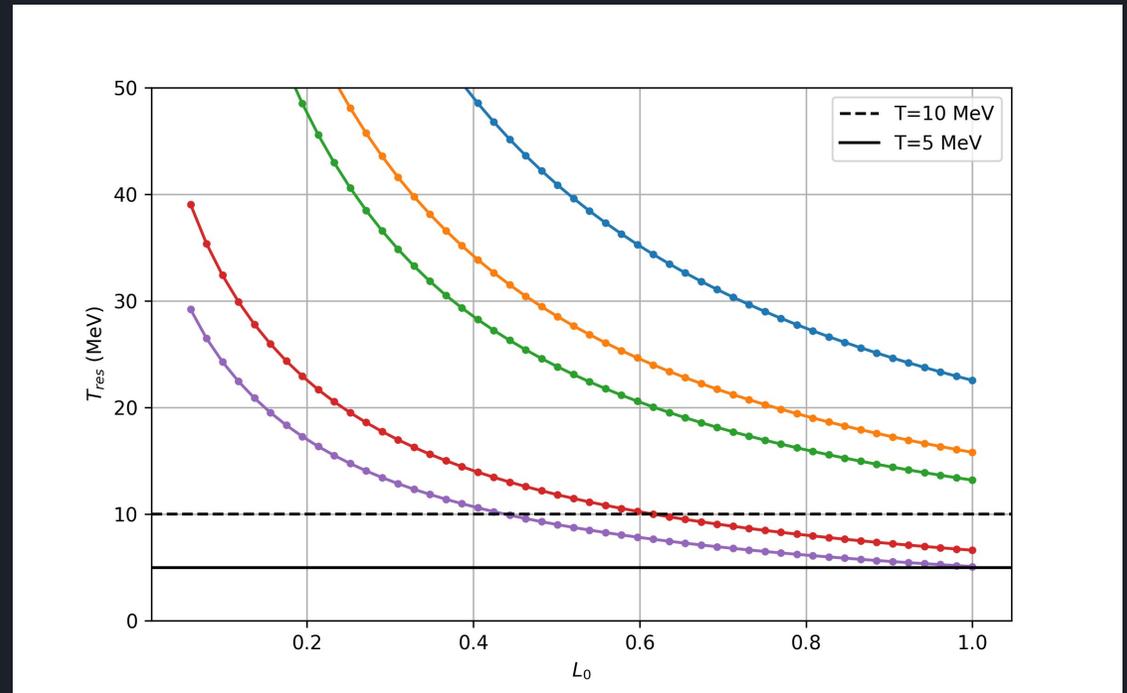
Резонансная температура падает с ростом асимметрии

При больших асимметриях температура резонанса некоторых мод может оказаться в диапазоне, где происходят осцилляции активных нейтрино

3

Влияние на стерильный нейтрино

Во время осцилляций активных нейтрино, асимметрия может быстро изменяться от начальных значений до нуля, что напрямую влияет на генерацию стерильных нейтрино



Температура резонанса для нескольких импульсов



Физические следствия

Генерация стерильных нейтрино происходит во время осцилляций

Температура резонанса при высоких асимметриях падает до значений меньше, чем характерные температуры осцилляций активных нейтрино, которые влияют на значения асимметрий

Плотность стерильных нейтрино



Ключевая идея

Так как осцилляции активных нейтрино уничтожают асимметрию, генерация стерильных нейтрино тормозится. Это приводит к меньшей плотности стерильных нейтрино и даже может создать естественный предел на максимальную плотность.



Влияние на плотность стерильных нейтрино

1

Без осцилляций асимметрия не меняется

В условиях постоянной асимметрии L плотность стерильных нейтрино растет линейно с увеличением начальной асимметрии

2

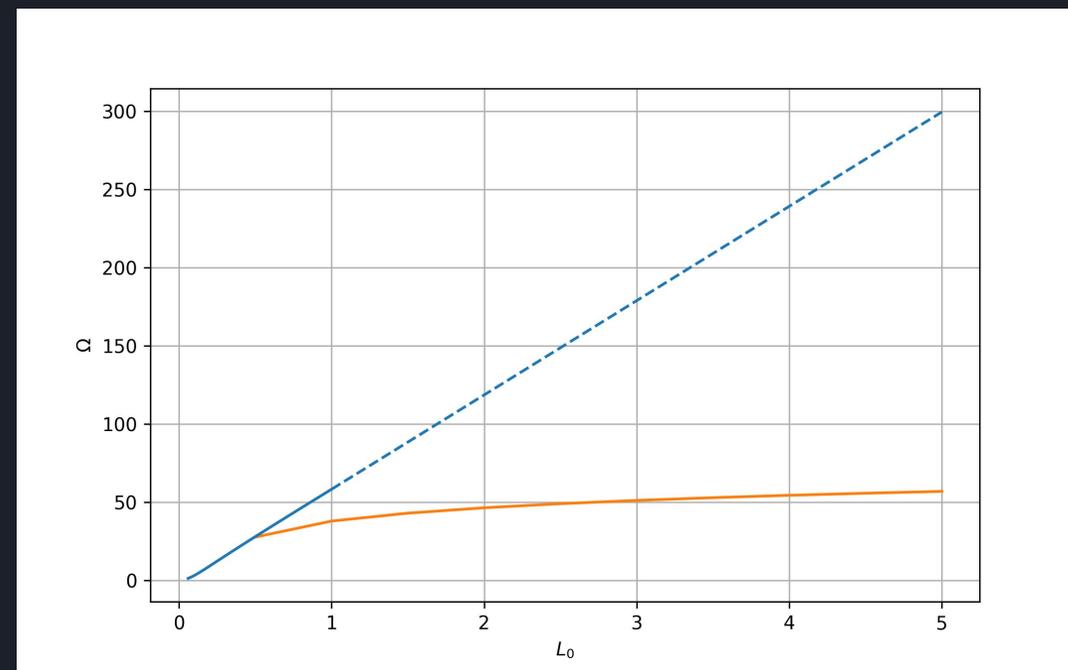
Осцилляции уничтожают асимметрию

При уменьшающейся асимметрии генерация стерильных нейтрино происходит за короткий промежуток времени перед концом осцилляций

3

Плотность стерильных нейтрино перестает расти линейно

В случае уменьшающейся асимметрии до нуля, итоговая плотность стерильных нейтрино перестает линейно расти с асимметрией. Предполагаются три варианта: слабая (логарифмическая зависимость), асимптота, переход от роста к падению



Плотность темной материи в зависимости от асимметрии



Физические следствия

Осцилляции активных нейтрино создают естественный предел на плотность стерильных нейтрино

μ и τ ЛЕПТОНЫ ПРИ БОЛЬШИХ ХИМИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛАХ



Ключевая идея

При больших значениях L химические потенциалы лептонов возрастают, что приводит к существенным вкладам μ и τ флейворов на низких температурах. Это изменяет эффективные параметры осцилляций и структуру матрицы смешивания.

Физические эффекты

1

Возрастание химических потенциалов

При больших L химические потенциалы μ и τ лептонов становятся значительными, что влияет на эффективные параметры осцилляций в среде

2

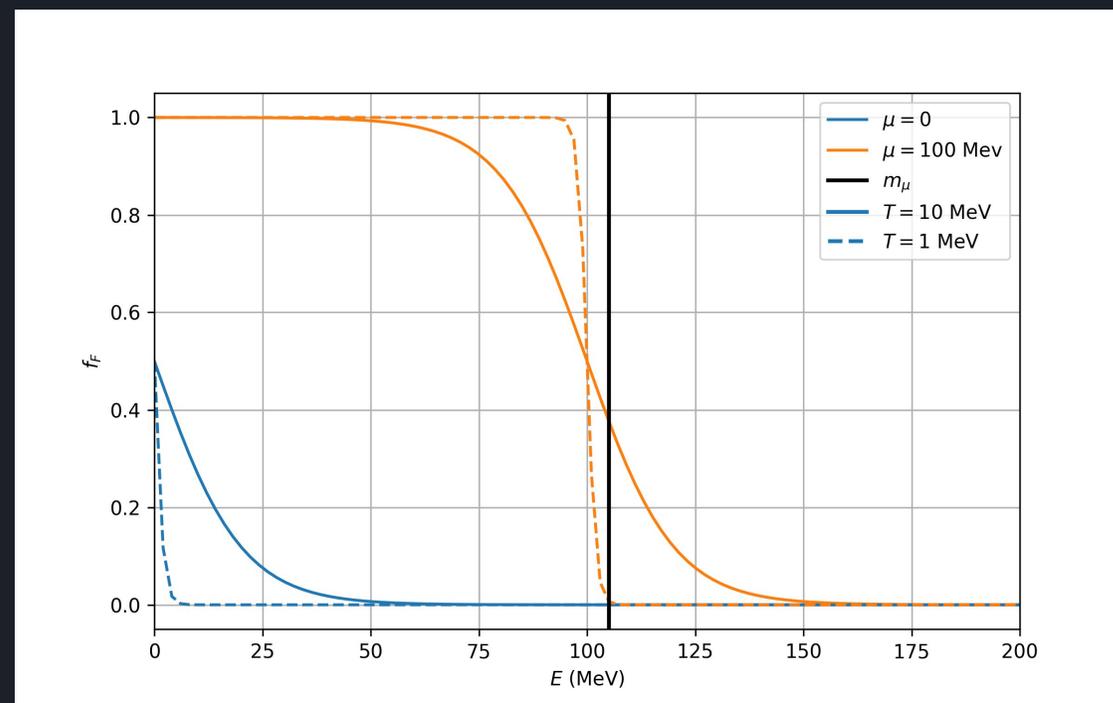
Вклады на низких температурах

Вклады μ и τ флейворов становятся ненулевыми и значимыми именно в режиме низких температур, где происходит резонанс при больших L

3

Изменение матрицы смешивания

Структура матрицы смешивания в среде модифицируется, что влияет на характеристики резонанса и эффективность генерации



Ферми функции при разных химпотенциалах

Усложнение модели



Учёт μ и τ лептонов существенно усложняет динамику системы

Открытые вопросы и перспективы исследования



Статус исследований

Работа находится на активной стадии, и ряд фундаментальных вопросов прямо сейчас исследуется

? Открытые вопросы

1

Нижний предел θ

Вопрос о существовании и величине нижнего предела на угол смешивания остаётся открытым

2

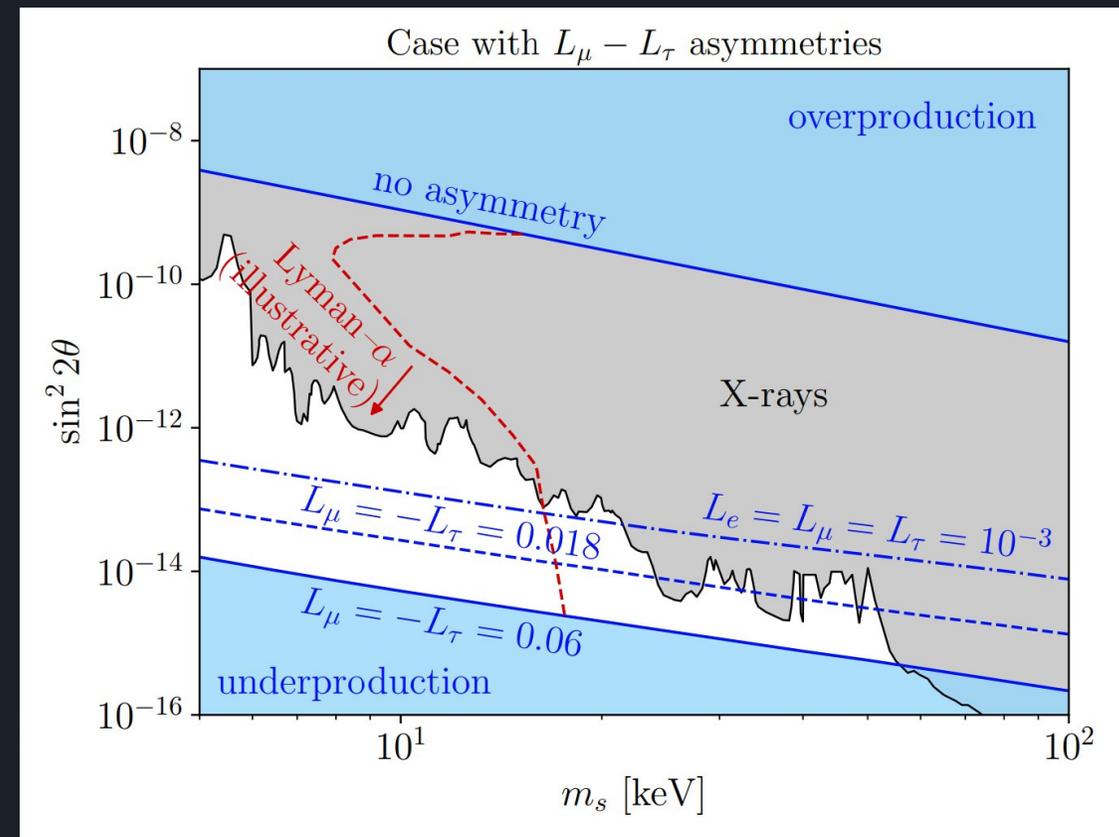
Осцилляции активных нейтрино

Требуется учет вклада лептонов в асимметрию во время осцилляций

3

Лептонная асимметрия в ранней Вселенной

Какие направления асимметрий согласуются с данными по BBN?



Текущие ограничения на параметры стерильных нейтрино
[2507.20659]



Калашников Д. ИЯИ РАН

Горбунов Д., Круган Г.



Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН
ИЯФ Г.И.Будкера СО РАН

Март 2026