Стерильные нейтрино как кандидаты на роль частиц тёмной материи

Владислав Баринов

#### ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук 1.3.3 — теоретическая физика

12 октября, 2023 г.

# Состав Вселенной



# Before Planck

# After Planck

www.sci.esa.int/web/planck/-/51557-planck-new-cosmic-recipe

# Кандидаты на роль частиц темной материи



www.explainxkcd.com

# Кандидаты на роль частиц темной материи



www.explainxkcd.com

# Мотивация



# Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является изучение чувствительности нейтринных экспериментов и астрофизических наблюдений к параметрам моделей стерильных нейтрино как возможных кандидатов на роль частиц темной материи, а также поиск ограничений на параметры стерильных нейтрино.

Для достижения поставленных целей были выделены следующие задачи:

- 1. Вычисление уточненных сечений захвата нейтрино на галлии для искусственных источников  $^{51}\mathrm{Cr}, ^{37}\mathrm{Ar}$ и  $^{65}\mathrm{Zn}$  на основе данных измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки  $^{71}\mathrm{Ga}(^{3}\mathrm{He},\,\mathrm{t})^{71}\mathrm{Ge}$ и на основе значения пороговой энергии перехода галлия в основное состояния германия, равного Q = 233.5  $\pm$  1.2 кэB;
- Проведение совместного анализа данных галлиевых экспериментов с искусственными источниками нейтрино и реакторных антинейтринных экспериментов, переоценка галлиевой аномалии и определение областей разрешенных параметров осцилляций в модели с одним стерильным нейтрино массой несколько эВ;
- Оценка чувствительности телескопов миссии Спектр Рентген Гамма (СРГ) к обнаружению следов распада темной материи, состоящей из стерильных нейтрино с массами несколько кэВ, в рамках обзора нашей Галактики;
- 4. Оценка чувствительности телескопов миссии СРГ к обнаружению следов распада темной материи, состоящей из стерильных нейтрино с массами несколько кэВ в рамках корреляционного анализа космических структур и пространственного распределения галактик по данным каталога 2MRS.

# Часть I Сечения захвата нейтрино на галлии и влияние результатов эксперимента BEST на гипотезу о стерильных нейтрино

Баксанский эксперимент по поиску стерильных нейтрино (BEST)

$$\nu_{\rm e} + {}^{71}\,{\rm Ga} \to {\rm e}^- + {}^{71}\,{\rm Ge},$$



Phys.Rev.Lett. 128 (2022) 23, 232501

# Сечение захвата нейтрино на галлии / Результаты

$$\nu_{\rm e} + {}^{71}\,{\rm Ga} \to {\rm e}^- + {}^{71}\,{\rm Ge},$$
 (1)

$$Q = 233.5 \pm 1.2 \,\text{keV}$$
 (Frekers2015), (2)

 $3/2^{-} 0.500 \text{ M}_{9}\text{B}$   $5/2^{-} 0.175 \text{ M}_{9}\text{B}$   $1/2^{-} 0.175 \text{ M}_{9}\text{B}$   $1/2^{-} 0.233 \text{ M}_{9}\text{B}$   $\downarrow$ 

Энергетические спектры нейтрино: энергии  $E_{\nu}$ , доли нейтрино  $f_{E_{\nu}}$  и соответствующие сечения захвата нейтрино на галлии для рассматриваемого набора искусственных источников.

Изотоп	$E_{\nu}$ , МэВ	$f_{E_{\nu}},\%$	$\sigma(E_{\nu}), 10^{-46}  \mathrm{cm}^2$
$^{51}\mathrm{Cr}$			
	0.752	8.49(1)	$63.22 \pm 1.40$
	0.747	81.63(1)	$62.58 \pm 1.39$
	0.432	0.93(1)	$27.14 \pm 0.52$
	0.427	8.95(1)	$26.72\pm0.51$
$^{37}\mathrm{Ar}$			
	0.813	9.80(1)	$71.63 \pm 1.62$
	0.811	90.20(1)	$71.35 \pm 1.61$
$^{65}$ Zn			
	1.352	48.35(11)	$181.5\pm4.2$

#### Пересмотр галлиевой аномалии

		SAGE1	SAGE2	GALLEX1	GALLEX2	AVE
Old	R	$0.95\substack{+0.12 \\ -0.12}$	$0.79^{+0.09}_{-0.10}$	$0.95^{+0.11}_{-0.11}$	$0.81^{+0.11}_{-0.11}$	$0.86^{+0.05}_{-0.05}$
New	R	$0.93_{-0.12}^{+0.12}$	$0.77_{-0.08}^{+0.09}$	$0.93^{+0.11}_{-0.11}$	$0.80^{+0.11}_{-0.11}$	$0.84_{-0.05}^{+0.05}$

Верх: Отношения измеренного числа событий к ожидаемому для всех серий экспериментов SAGE и GALLEX, полученные на основе уточненных данных о сечении поглощения нейтрино (New) в сравнении с отношениями, для сечения поглощения нейтрино, вычисленным Джоном Бакалом (Old). AVE – означает средневзвешенное значение по всем сериям экспериментов.

Справа: Разрешенные области параметров осцилляций, полученные путем объединения результатов SAGE + GALLEX с использованием уточненных данных по сечению захвата.



# Потенциал источника $^{65}\mathrm{Zn}$



Слева: Разрешенные области параметров осцилляций, построенные в предположении, что результат эксперимента BEST с цинковым источником соответствует точке наилучшего соответствия для результата BEST с хромовым источником. Справа: Разрешенные области параметров осцилляций, построенные в предположении, что результат эксперимента BEST с цинковым источником соответствует точке наилучшего соответствия для объединения результатов SAGE, GALLEX, BEST (<sup>51</sup>Cr). Представленные области построены с учетом корреляции ошибок в сечении захвата для каждого типа искусственных источников в экспериментах.

# Влияние результатов эксперимента BEST на гипотезу о стерильных нейтрино

Области (в оттенках синего), выделенные в результате совместного ана- лиза галлиевых экспериментов, DANSS и NEUTRINO4. Также на дан- ном рисунке приведены области исключения на 95% уровне значимости по дан- ным реакторных антинейтринных экспериментов STEREO и PROSPECT. Области, обведенные зеленой линией, построены для реакторной антинейтринной аномалии (RAA) на 95% уровне значимости. Область справа от черной вертикальной линии исключена на 95% по наблюдениям солнечных нейтри- но.



# Часть II

# Ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино из астрофизических наблюдений в рамках миссии СРГ

#### Стерильные нейтрино с массами несколько КэВ

В этой и следующей главах мы сосредоточимся на конкретных кандидатах на роль частиц темной материи, а именно на стерильных нейтрино, которые могут распадаться на активное нейтрино (электронное, мюонное или таунейтрино) и фотон вследствие смешивания с активными нейтрино

$$\nu_{\rm s} \to \nu_{{\rm e},\mu,\tau} + \gamma.$$
 (3)

Ширина распада стерильного нейтрино в этом процессе определяется следующим выражением

$$\Gamma_{\nu_{\rm s}} = \frac{9}{1024} \frac{\alpha}{\pi^4} G_{\rm F}^2 m_{\nu_{\rm s}}^5 \sin^2 2\theta = 1.36 \times 10^{-22} \left(\frac{m_{\nu_{\rm s}}}{1\,\rm keV}\right)^5 \sin^2 2\theta \ \rm s^{-1}.$$
(4)

При этом двухчастичном распаде энергия вылетающего фотона равна  $E_{\gamma} = m_{\nu_s}/2$ , а стерильные нейтрино, образующие темную материю галактики, создают монохроматический фотонный спектр порядка скорости частиц темной материи в галактике, т.е. v ~  $10^{-4} - 10^{-3}$ .

# Обсерватория Спектр – Рентген – Гамма (СРГ)

Обзор всего неба!





# Spectrum-Roentgen-Gamma Observatory (SRG) / Technical Performance

Технические характеристики обсерватории SRG

	eROSITA	ART-XC
Energy [Kev]	0.2 - 10	4 - 30
FWHM	$138\mathrm{eV}$ at $6\mathrm{keV}$	$10\%$ at $14{\rm Kev}$
$FOV [deg^2]$	0.833	0.3 - 2.0

Справа: Светособирающая способность для телескопов eROSITA, ART-XC, XMM и NuSTAR, доступных для поиска стерильных распадов нейтрино темной материи. Для телескопа ART-XC показано покрытие в режиме телескоп + концентратор. Нижняя и верхняя кривые покрытия NuSTAR рассчитаны только для апертуры рассеянного света, которая используется при поиске стерильных распадов нейтрино в центре галактики и балджах.



#### Ожидаемый сигнал и стратегия наблюдений

Интенсивность фотонов от распада частиц темной материи записывается как

$$I_{\gamma} \equiv \frac{d^2 F_{\gamma}}{d E_{\gamma} d\Omega},\tag{5}$$

Сигнальный поток от распадов

$$F_{\gamma} = \frac{1}{4\pi} \int \int \frac{\Gamma_{\nu_{s}}}{m_{\nu_{s}}} \frac{dN}{dE_{\gamma}} \frac{d\mathcal{S}_{DM}}{d\Omega} dE_{\gamma} d\Omega, \qquad (6)$$

где  $S_{\rm DM}$  — плотность темной материи на луче зрения при заданном телесном угле  $\Omega$ . dN/dE $_{\gamma}$  – спектр фотонов.

Таким образом, поток сигнала принимает вид

$$F_{\gamma} = \frac{1}{7.88 \times 10^{-4}} \left( \frac{S_{\rm DM}}{M_{\odot} {\rm pc}^{-2}} \right) \left( \frac{2E_{\gamma}}{1 \, {\rm keV}} \right)^4 \sin^2(2\theta)$$



Иллюстрация, изображающая геометрию, в которой оценивается поток сигнальных фотонов при наблюдении вокруг центра Млечного Пути.

#### Распределение плотности темной материи

Для описания распределения плотности темной материи в галактике Млечный Путь мы используем стандартный профиль NFW.

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{\rho_{\rm s}}{\left(r/r_{\rm s}\right)\left(1 + r/r_{\rm s}\right)^2}$$
(7)

Справа: Схема распределения плотности темной материи  $S_{\rm DM}$  для разных направлений и углов обзора Млечного Пути. Значения  $S_{\rm DM}$  представлены в  $M_{\odot} {\rm pc}^{-2}$ .



#### Распределение плотности темной материи / Неопределенности

Существует значительная разница в оценках профилей плотности темной материи. Мы иллюстрируем неопределенности, связанные с дисперсией профиля плотности темной материи геометрического фактора  $S_{\rm DM}$ .

На правой панели мы показываем различные профили плотности темной материи для галактики Млечный Путь и показываем изменения профиля в зависимости от параметров модели.



#### Стратегия наблюдений

Мы используем рассчитанные сигнальные потоки для оценки ограничений, которые можно получить за время наблюдения Т. А именно, наблюдение за период Т позволяет нам установить ограничение на поток фотонов  $F_{\gamma}$  и, следовательно, на угол смешивания  $\theta$ , если ожидаемый сигнал за заданное время не превышает требуемого уровня значимости  $\sigma$ , такого, что

$$\sigma^{2} = \frac{[F_{\gamma} \times G(E)/\Omega]^{2} \times T^{2}}{[F_{\gamma} \times G(E)/\Omega + C_{BG}] \times T},$$
(8)

где  $G(E)/\Omega$  — отношение покрытия к угловому размеру источника, а C<sub>BG</sub> — фоновая скорость счета (в отсчетах в секунду).

Обратите внимание, что это уравнение верно только в том случае, если угловой размер источника больше поля зрения телескопа.



60° радиус вокруг центра Млечного Пути!

#### Ожидаемые ограничения

Текущие и ожидаемые ограничения в пространстве параметров стерильных нейтрино по направлению к центру Галактики в телесном угле конуса 60°, которые можно получить в ходе четырехлетнего обзора всего неба с помощью eROSITA (красная сплошная линия) и ART-XC (сплошная синяя линия).

# Чего мы ожидаем через 4 года наблюдений в радиусе 60° вокруг центра Млечного Пути



#### Ожидаемые и предварительные ограничения

Ограничения по данным обзора за 2 года, полученным телескопом ART-XC в режиме обзора всего неба (красная сплошная линия). Синяя пунктирная линия показывает ожидаемые пределы, основанные на оценке чувствительности ART-XC, для периода наблюдений 2 года.

Стоит отметить, что ожидаемая чувствительность не содержит статистических флуктуаций, наблюдаемых в реальных данных.

Мы полагаем, что новые наблюдательные данные, доступные в будущем, позволят нам усилить текущие ограничения, а также детально исследовать следы распада темной материи в более мягком диапазоне энергий 0.5–8 кэВ, доступном телескопу eROSITA. Это также может позволить провести совместный анализ ограничений в перекрывающихся областях 4–10 кэВ, охватываемых обоими телескопами миссии SRG.

#### Выглядит очень оптимистично!



# Часть III Ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино из корреляционного анализа структур в рамках миссии СРГ

# Общие идеи

- Поскольку частицы темной материи концентрируются внутри галактик и скоплений галактик, каждый фотон распада темной материи должен указывать на конкретный объект (структуру), где происходит распад.
- Если фотоны не отклонялись, они указывают на часть этой структуры на небе. Включая пространственное распределение этой структуры из-за красного смещения.
- Даже если объект пока не может быть опознан наблюдателем (неразрешенные источники), связь между фотоном и его источником существует и может быть прослежена статистически, путем совместного анализа распределения всех зарегистрированных фотонов в направлении прибытия, энергии и карты распределения космических структур.

### Корреляционный анализ І

Этот подход основан на изучении авто- и кросскорреляционного углового спектра мощности темной материи и галактик.

В рамках корреляционного анализа для каждой пары сигнатур (темная материя – темная материя, галактики – галактики, темная материя – галактики) рассчитывается нелинейный спектр мощности, а затем строится функция взаимной корреляции для всех пар изучаемых сигнатур. Корреляционная функция флуктуаций интенсивности различных сигнатур i, j определяется как

$$\langle \delta I_{i}(\vec{n_{1}}) \delta I_{j}(\vec{n_{2}}) \rangle = \sum_{l} \frac{2l+1}{4\pi} C_{l}^{ij} P_{l}(\cos\theta), \qquad (9)$$

 $\mathrm{C}_l^{\mathrm{in}}$  - спектр корреляции угловой мощности между флуктуациями сигнатур і и ј

$$\delta I_{i}(\vec{n}) = I_{i}(\vec{n}) - \langle I_{i} \rangle \tag{10}$$

 $\Phi$ луктуации интенсивности разных сигнатур, где  $\langle I_i \rangle$  — средняя интенсивность по небу. Почти как CMB  $\Delta T$ 



# Корреляционный анализ II

Угловой спектр мощности представляет собой двухточечную корреляционную функцию для заданных сигнатур. Он определяет величину и свойства анизотропии сигнатуры и определяется следующим выражением:

$$C_l^{ij} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \mathrm{d}\chi \int_0^\infty \mathrm{d}\chi' \int_0^\infty k^2 \mathrm{d}k \ \overline{W}_i(\chi) \ \overline{W}_j(\chi') \ P_{ij}(k,\chi,\chi') \ j_l(k\chi) j_l(k\chi')$$

В приближении больших мультиполей данное выражение принимает вид

$$C_{l}^{ij} = \int_{0}^{\infty} \frac{\mathrm{d}\chi}{\chi^{2}(z)} \overline{W}_{i}(\chi) \overline{W}_{j}(\chi) P_{ij}\left(k \approx \frac{l}{\chi}, z\right), l \gg 1, l \approx kr = k\chi$$

$$\overline{W}_{i}(z) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \mathrm{d}EW_{i}(E, z)$$

$$W_{g}(z) = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}\chi} \left[\frac{1}{N_{2\mathrm{MRS}}} \frac{\mathrm{d}N_{2\mathrm{MRS}}}{\mathrm{d}z}\right]$$

$$W_{\mathrm{dm}}(E, z) = \frac{\Omega_{\mathrm{CDM}}\rho_{crit}}{(1+z)} \frac{\Gamma_{\nu_{s}}}{4\pi m_{\nu_{s}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{E}^{2}}} \exp\left[-\frac{\left(E - \frac{m_{\nu_{s}}}{2(1+z)}\right)^{2}}{2\sigma_{E}^{2}}\right]$$

# Анализ данных

дробовой шум, усредненный по небу в заданном диапазоне энергий.

го шума галактик

# Ожидаемые ограничения / eROSITA

Ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино, полученные в рамках нашего анализа для различных диапазонов мультиполей. Фиолетовая линия соответствует ограничениям для телескопа eROSITA (полупрозрачные фиолетовые линии показывают вклады в ограничения для разных диапазонов мультиполей). Желтая линия соответствует телескопу ART-XC. Для сравнения представлены ограничения из работ (Zandanel 2015, Caputo 2019). Время наблюдений — 4 года в режиме полного неба.



# Ожидаемые ограничения / ART-XC

Ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино, полученные в нашем анализе, сравниваются с ограничениями, которые можно получить из астрофизических наблюдений центра Млечного Пути в конусе с телесным углом 60 градусов (красная линия соответствует ограничениям для Телескоп eROSITA, синяя линия соответствует телескопу ART-XC).



#### Положения выносимые на защиту

- ▶ Вычислены сечения захвата нейтрино на галлии для искусственных источников <sup>51</sup>Cr и <sup>37</sup>Ar на основе измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки <sup>71</sup>Ga(<sup>3</sup>He, t)<sup>71</sup>Ge и на основе значения пороговой энергии перехода галлия в основное состояния германия, равного Q = 233.5 ± 1.2 кэВ. Это позволило уточнить сечение захвата нейтрино на галлии с результирующей ошибкой, не превышающей 2%, а также уточнить вклад возбужденных уровней в полное сечение захвата. На основе этих данных была пересмотрена галлиевая аномалия.
- ▶ Вычислено сечение захвата нейтрино на галлии для искусственного источника <sup>65</sup>Zn, на основе измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки <sup>71</sup>Ga(<sup>3</sup>He, t)<sup>71</sup>Ge и на основе значения пороговой энергии перехода галлия в основное состояния германия, равного Q = 233.5 ± 1.2 кэВ, с точностью 2.3% и определен вклад возбужденных уровней в полное сечение захвата. На основе этих данных продемонстрирован потенциал цинкового источника для проверки галлиевой аномалии.

Показано, что результаты эксперимента BEST согласуются с результатами экспериментов SAGE и GALLEX, и реакторного антинейтринного эксперимента NEUTRINO4, однако результаты других реакторных антинейтринных экспериментов имеют расхождение с результатами последних. Показано, что объяснение результата эксперимента BEST в рамках гипотезы о наличии одного легкого стерильного нейтрино, в ходе совместного анализа данных других осцилляционных экспериментов, указывает на область больших масс и углов смешивания стерильных нейтрино.

# Положения выносимые на защиту (Продолжение)

- ▶ Была выполнена оценка чувствительности телескопов миссии СРГ к монохроматическому сигналу от распадающихся стерильных нейтрино в области масс 6 30 кэВ, что позволило получить ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино в данном диапазоне масс в рамках стратегии наблюдений Млечного пути с угловым радиусом 60° в направлении на центр галактики.
- Был проведен корреляционный анализ космических структур (гало темной материи) и пространственного распределения галактик по данным каталога 2MRS с учетом обновленных данных о рентгеновском фоне для телескопов миссии СРГ. Получены ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино для телескопа eROSITA и показано, что предсказываемые ограничения в целом согласуются с тем, что было исследовано ранее другими группами. Такой же анализ впервые был выполнен для телескопа ART – XC. Были получены ожидаемые ограничения в пространстве параметров стерильных нейтрино. Показано, что ожидаемые ограничения из анализа структур оказываются слабее, чем ожидаемые ограничения из локальных астрофизических наблюдений.

# Апробация работы

Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, входящих в WoS/Scopus, а также изложены на семинарах и международных конференциях:

- Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2022 (НЕА-2022). ИКИ РАН, Москва. 19 22 декабря, 2022 г.
- Международная школа субъядерной физики. 58 курс: гравитация и материя в субъядерном мире. Фонд «Этторе Майорана» и Центр научной культуры, Эриче, Италия. 15 – 24 июня 2022 г.
- Совместный астрофизический семинар Отдела теоретической астрофизики и лаборатории астрофизики высоких энергий. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт – Петербург. 26 октября, 2021 г.
- Международная сессия конференция секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий посвященная 50 – летию Баксанской нейтринной обсерватории. КБГУ, Нальчик. 6 – 8 июня, 2017 г.
- Международная сессия конференция секции ядерной физики ОФН РАН. ОИЯИ, Дубна. 12 – 15 апреля, 2016 г.
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2016». МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва. 11 – 15 апреля 2016 г.

# Спасибо за внимание!