

Оценка массы стерильных нейтрино с помощью Gravsphere

Костарева Станислава Павловна

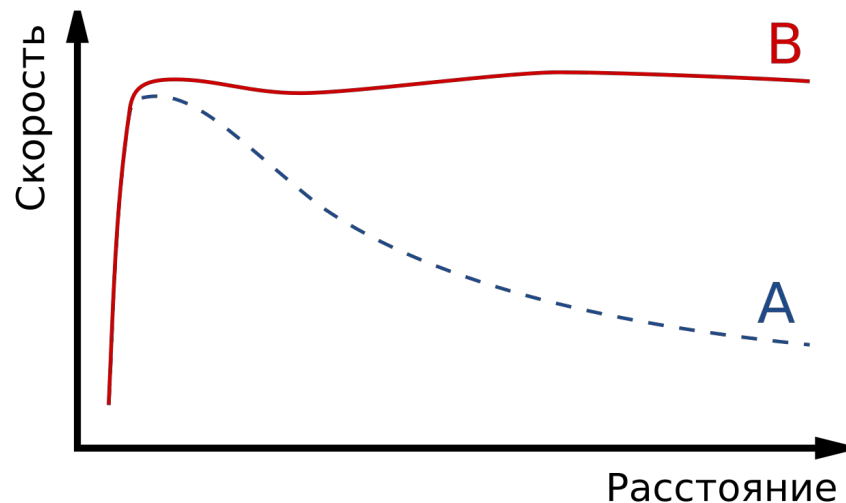
Научный руководитель:

член-корр. РАН,

доктор физ.-мат. наук

Горбунов Дмитрий Сергеевич

Тёмная материя



Наблюдаемые кривые вращения галактик не совпадают с теоретическими. Это можно объяснить существованием тёмной материи.

Стерильные нейтрино – кандидат в частицы тёплой тёмной материи.

Уравнения Джинса

Движение звёзд в галактиках подчиняется уравнению Джинса:

$$\frac{1}{\nu} \frac{\delta(\nu\sigma_r^2)}{\delta r} + 2\beta(r) \frac{\sigma_r^2}{r} = -\frac{d\Phi}{dr} = -\frac{GM(< r)}{r^2}$$

где Φ - гравитационный потенциал, σ_r^2 - дисперсия скоростей, $M(< r)$ - масса, заключённая в пределах радиуса r , состоящая из массы звёзд и тёмной материи, $\nu(r)$ - объёмная плотность звёзд, $\beta = 1 - (\frac{\sigma_t}{\sigma_r})^2$ - анизотропия скоростей, описывающая орбитальную структуру системы.

После решения уравнения Джинса для $\sigma_r^2(r)$ и проецирования на луч зрения:

$$\sigma_{LOS}^2(R) = \frac{2}{\Sigma_*(R)} \int_R^\infty \left(1 - \beta \frac{R^2}{r^2}\right) \frac{\nu(r)\sigma_r(r)r}{\sqrt{R^2 - r^2}} dr$$

Вырождение массы-анизотропии

Из предыдущего уравнения видно, что профили анизотропии и дисперсии скоростей, а, следовательно, и массы вырождаются.

Один из способов решения данной проблемы – введение виральных параметров. В Gravsphere они определяются как:

$$\begin{cases} v_{s1} = \int_0^\infty \Sigma_* \langle v_{LOS}^4 \rangle R dR = \frac{2}{5} \int_0^\infty GM\nu(5 - 2\beta)\sigma_r^2 dr \\ v_{s2} = \int_0^\infty \Sigma_* \langle v_{LOS}^4 \rangle R^3 dR = \frac{4}{35} \int_0^\infty GM\nu(7 - 6\beta)\sigma_r^2 r^3 dr \end{cases}$$

Gravsphere

Принцип работы Gravsphere следующий:

1. Задаются границы значения параметров.
2. Из наблюдательных данных рассчитывается поверхностная плотность звёзд и дисперсия их скоростей.
3. С помощью emcee получают параметры модели.
4. Для полученной модели рассчитывается поверхностная плотность и дисперсия скоростей.
5. Полученные значения сравниваются с наблюдаемыми, модели присваивается правдоподобие.
6. Пункты 3-5 повторяются тысячи раз, пока цепь Маркова не достигнет равновесного состояния.
7. 75% полученных моделей отсекаются, из оставшихся случайным образом выбирается 1000, которые используются для дальнейшего анализа.

Теорема Лиувилля и ограничение массы частиц

Теорема Лиувилля устанавливает, что для диссипативных безстолкновительных систем фазовая плотность не увеличивается:

$$F_{obs}^{max} \leq F_{prod}^{max}$$

где F_{obs}^{max} - максимум наблюдаемой фазовой плотности, F_{prod}^{max} - максимум фазовой плотности при рождении частиц.

Для нерезонансно-рождённых стерильных нейтрино оценка нижней границы массы:

$$m^3 \geq \frac{2(2\pi)^{3/2}}{11.16eV} \left(\frac{\rho(r)}{(1-\beta)\sigma_r^3} \right)_{max}$$

Постановка задачи

Источник →	Keck/DEIMOS		Simbad		m [Vega mag]	References
	R, kpc	N (kinematic)	R, kpc	N (kinematic)		
CVn I	220.0	254	218	91	13.1	[6], [7]
Draco	81.5	999	76	205	10.6	[6], [7]
Fornax	142.5	665	147	3207	7.4	[6], [7]
Sculptor	83.9	378	84	1073	8.6	[6], [7]
Sextans	86.0	246	86	218	10.4	[6], [7]
Leo I	258.0	795	300	415	10.0	[6], [7]
Leo II	233.0	305	233	261	12.0	[6], [7]
UMi	70.0	832	76	103	10.6	[6], [7]

Таблица 1: Список галактик для исследования. R - расстояние до галактики, N - количество трейсеров, m - видимая звёздная величина. Simbad - данные из [1].

Постановка задачи

Для оценки звёздной массы использовалась светимость галактики:

$$M_* = 10^{-m/2.5} \left(\frac{R}{D_V} \right)^2 M_V,$$

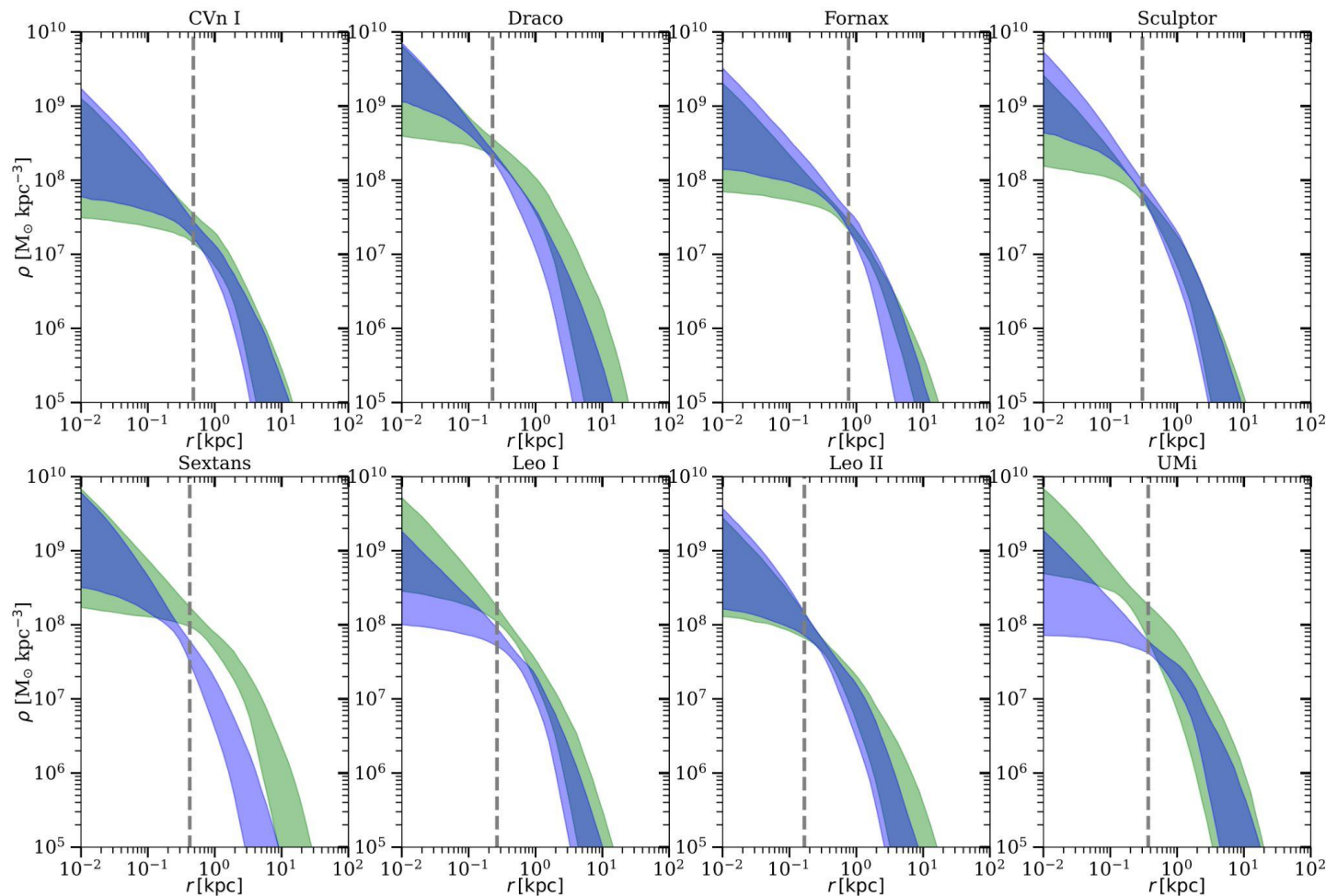
где m - видимая звёздная величина в светимостях Веги, $D_V = 7.83$ пк - расстояние до Веги, $M_V = 2.135 M_\odot$ - масса Веги в солнечных массах.

Дисперсия скоростей тёмной материи считается аналогично дисперсии скоростей звёзд:

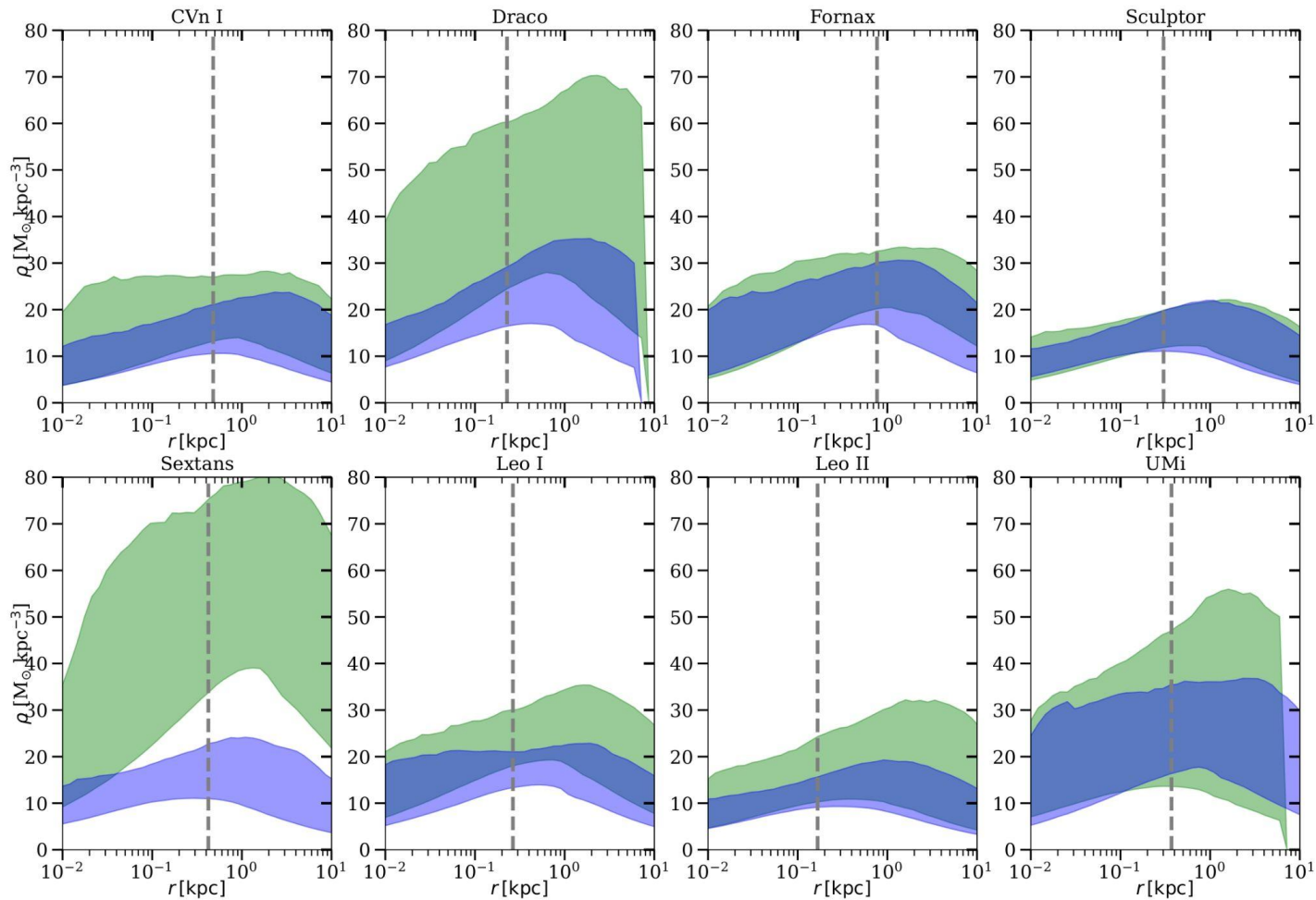
$$\sigma_{DM}^2(r) = \frac{1}{\rho_{DM}(r) g_{DM}(r)} \int_r^\infty \frac{GM(< \bar{r}) \rho_{DM}(\bar{r})}{\bar{r}^2} g_{DM}(\bar{r}) d\bar{r},$$

Параметры анизотропии получаются из симуляций и равны:

$$\beta_0 = 0, \beta_\infty = [0; 0.56], r_0 = [0; 3.10], n = [0.73; 1.36].$$

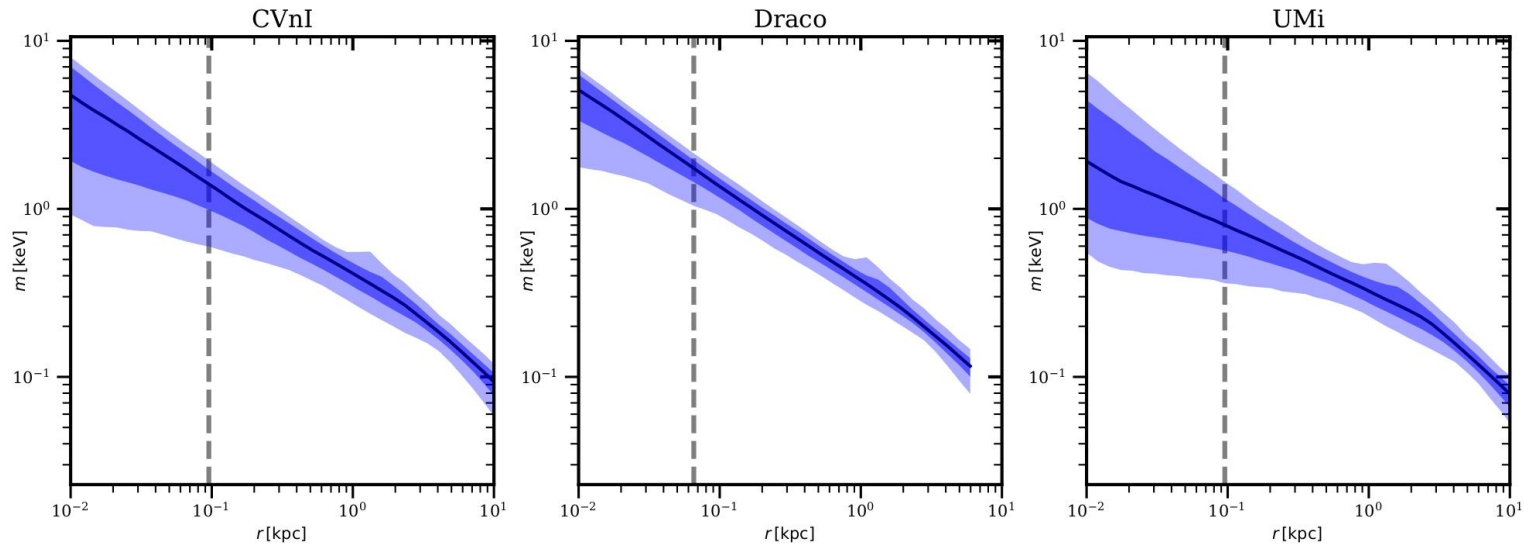


Графики зависимости плотности тёмной материи от расстояния, полученные с помощью данных Кеск/DEIMOS (синий) и в [1] (зелёный) для 95% доверительного интервала. Штрихованная линия - эффективный радиус.



Графики зависимости стандартного отклонения скоростей частиц тёмной материи от расстояния, полученные с помощью данных Кеск/DEIMOS (синий) и в [1] (зелёный) на 95% доверительном интервале. Штрихованная линия - эффективный радиус. Затемнение - область пересечения значений.

Результаты



Слева: оценки массы тёмной материи в зависимости от расстояния для 68% и 95% доверительных интервалов, а также для наилучшего значения (сплошная линия) для CVn I. Штрихованная вертикальная линия - расстояние, на котором взята оценка массы для CVn I. Середина: то же самое для Draco. Справа: то же самое для UMi.

Результаты

Источник →	Keck/DEIMOS			Simbad		
Название	\bar{r} , pc	\bar{m} , keV	m, keV	\bar{r} , pc	\bar{m} , keV	m, keV
CVn I	79	1.56	0.73	65	0.98	0.41
Draco	95	1.40	1.00	65	0.98	0.47
Fornax	139	0.95	0.60	115	0.81	0.47
Sculptor	66	2.09	1.48	65	1.78	1.02
Sextans	66	2.04	1.15	65	0.90	0.30
Leo I	115	1.01	0.68	115	1.10	0.63
Leo II	95	1.65	1.08	95	1.35	0.71
UMi	115	0.75	0.43	44	1.89	0.81

Таблица 2: Оценки массы темной материи. \bar{r} - расстояние, на котором берётся оценка массы, \bar{m} - наилучшая оценка, m - нижняя оценка на уровне 95% доверительного интервала.

Обсуждение

- Уменьшение оценки массы для UM_i связано с уменьшением плотности и увеличением количества трейсеров.
- Профили плотности для UM_i и Leo I уменьшаются в силу большего количества трейсеров.
- Данные Kesk/DEIMOS дают меньшую дисперсию скоростей частиц тёмной материи.

Способы улучшения исследования:

- Gravsphere предвзят для галактик с постоянной плотностью в центре. Использование других методов может дать другой результат.
- Оценка массы гало, используемая для оценки дисперсии, плохо ограничена.
- Учёт собственного движения звёзд приведёт к более качественному анализу.
- Бинирование данных влечет к потере данных. Использование методов Джинса без бинирования, например, Gravsphere2, улучшит качество исследования.

Заключение

Таким образом, полученная с помощью теоремы Лиувилля для данных Кеск/DEIMOS нижняя граница массы нерезонансно-рождённых стерильных нейтрино составляет

$$m > 1.48 \text{ кэВ.}$$

Источники

1. Bezrukov F., Gorbunov D. and Koreshkova E. 2025 Int.J.Mod.Phys.A 40 33, Refining lower bounds on sterile neutrino dark matter mass from estimates of phase space densities in dwarf galaxies, arXiv:2412.20585 [hep-ph]
2. Read J. I., Steger P. 2017 MNRAS 471 4, How to break the density-anisotropy degeneracy in spherical stellar systems, arXiv:1701.04833 [astro-ph.GA]
3. Andrés Bañares-Hernández, Justin I. Read, Mariana P. Júlio, 2026 A&A 705 A212, GravSphere2: A higher-order Jeans method for mass-modeling spherical stellar systems, arXiv:2509.24103 [astro-ph.GA]
4. Binney, J. & Tremaine, S. 2008, Galactic Dynamics: Second Edition
5. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. 2016, Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва
6. Marla Geha et al 2026 ApJ 999 140, The Keck/DEIMOS Stellar Archive: I. Uniform Velocities and Metallicities for 78 Milky Way Dwarf Galaxies and Globular Clusters, arXiv:2602.10200 [[astro-ph.GA](#)]
7. Alan W. McConnachie 2012 AJ 144 4, The Observed Properties of Dwarf Galaxies in and around the Local Group, arXiv:1204.1562 [astro-ph.CO]