

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

Литературный обзор по теме

Исследование физических оснований
и космофизических проявлений
моделей асимметричной скрытой массы

Аспирант:

Сопин Д.О.

Научный руководитель:

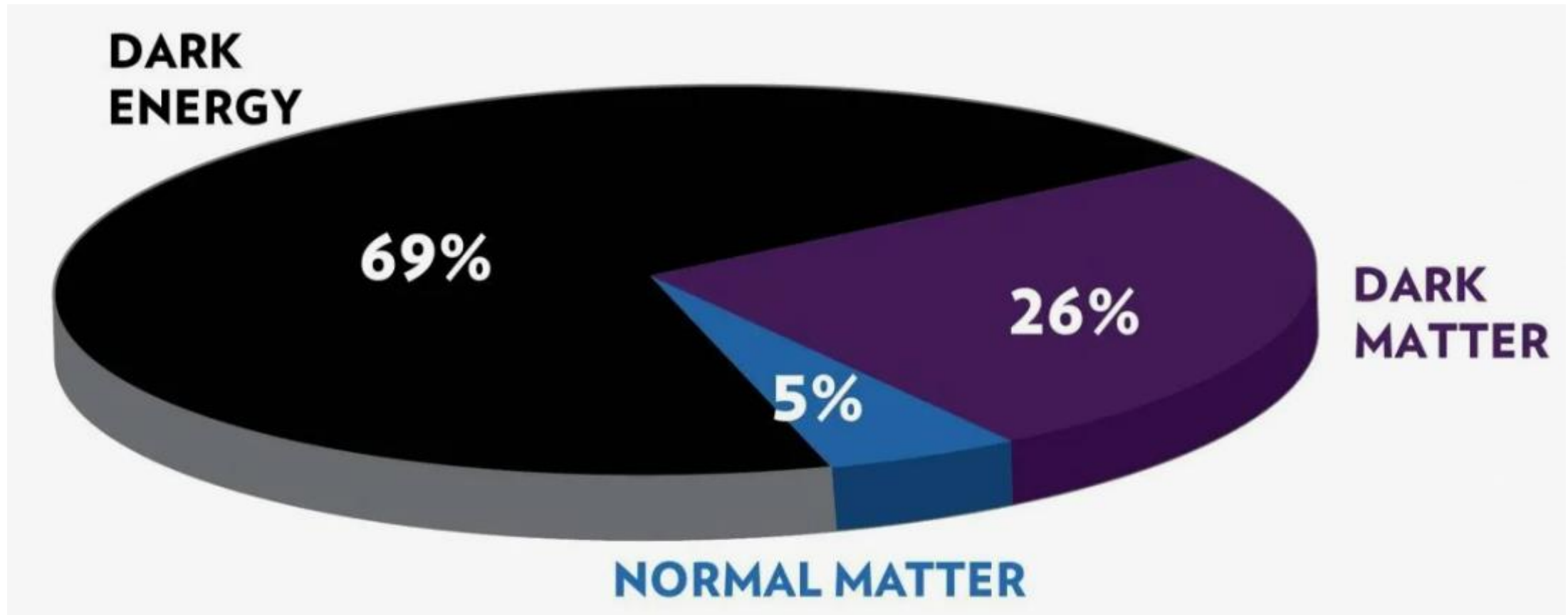
д.ф.-м.н., проф. Хлопов М. Ю.

2026 г.

Содержание

- Доказательства существования скрытой массы
- Возможные частицы-переносчики
 - WIMP и SUSY
 - DAMA/LIBRA и аналоги
 - Тяжёлые составные частицы
- Экспериментальные ограничения
 - на многозарядные частицы
 - на SIMP
 - Частицы конечного размера
 - Аномальные изотопы
- Первичный нуклеосинтез

Доказательства существования скрытой массы



[1] Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters / and N. Aghanim [et al.] // Astron. Astrophys. — 2020. — Vol. 641. — A6.


[2] Review of particle physics / S. Navas [et al.] // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 110, no. 3. — P. 030001.

Доказательства существования скрытой массы

- Ф. Цвикке: дисперсия скоростей галактик в скоплении

1. Under the supposition that the Coma system has reached, mechanically, a stationary state, the Virial Theorem implies

$$\bar{\epsilon}_k = -\frac{1}{2}\bar{\epsilon}_p, \quad (4)$$


$$\left(\overline{v^2}\right)^{1/2} = 80 \text{ km/s.}$$

- Но: *Apparent velocities in the Coma cluster*

$v = 8500 \text{ km/s}$	6900 km/s
7900	6700
7600	6600
7000	5100 (?)



Масса должна быть в 400 раз больше

(часть из этого – несветящееся обычное вещество в форме межгалактического газа [4])

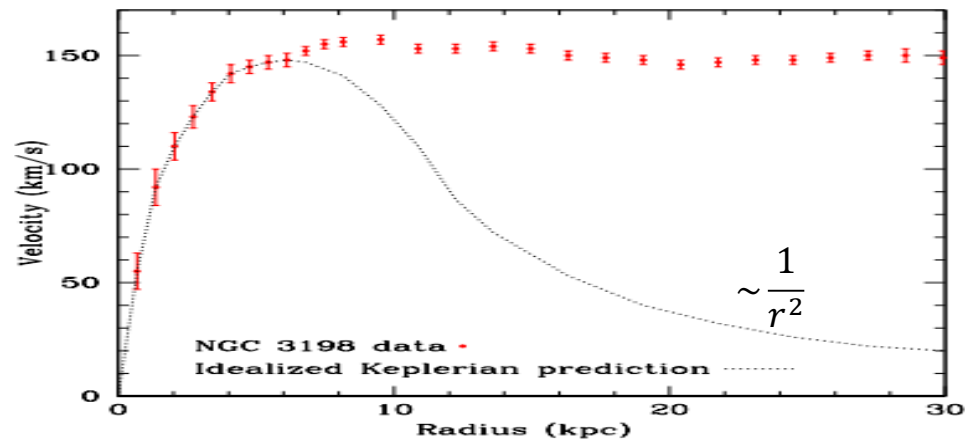
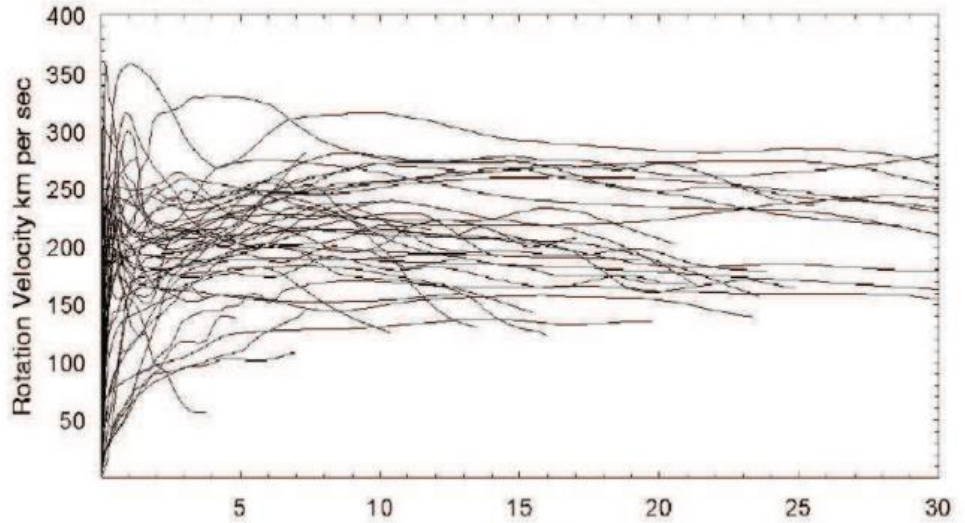
- При наблюдаемых скоростях система не является гравитационно связанной

[3] Zwicky F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // Helv. Phys. Acta. — 1933. — Vol. 6. — P. 110–127.

[4] Feng J. L. Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2010. — Vol. 48, no. 1. — P. 495–545. — ISSN 1545-4282.

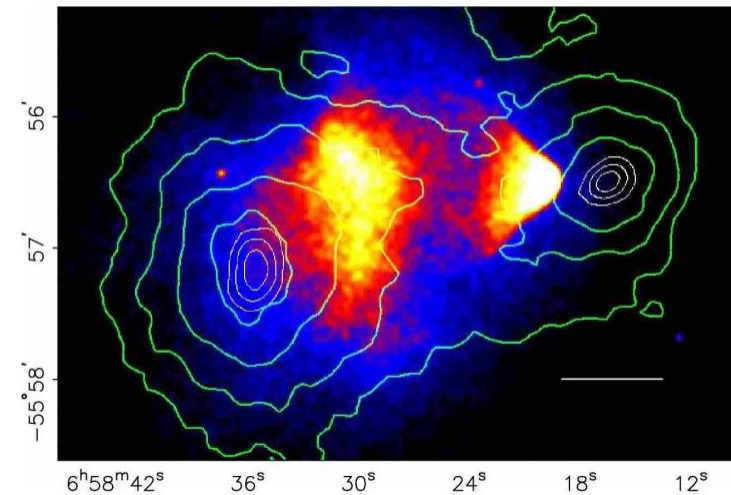
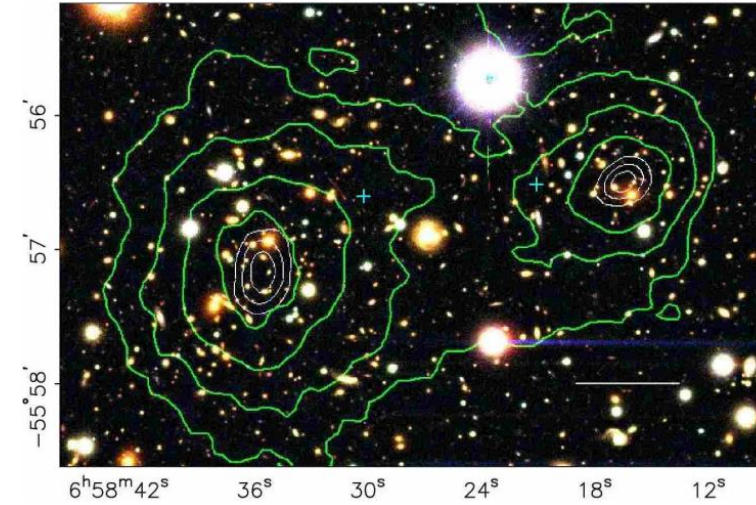
Доказательства существования скрытой массы

Кривые вращения



Гало из ненаблюдаемой материи

Гравитационное линзирование

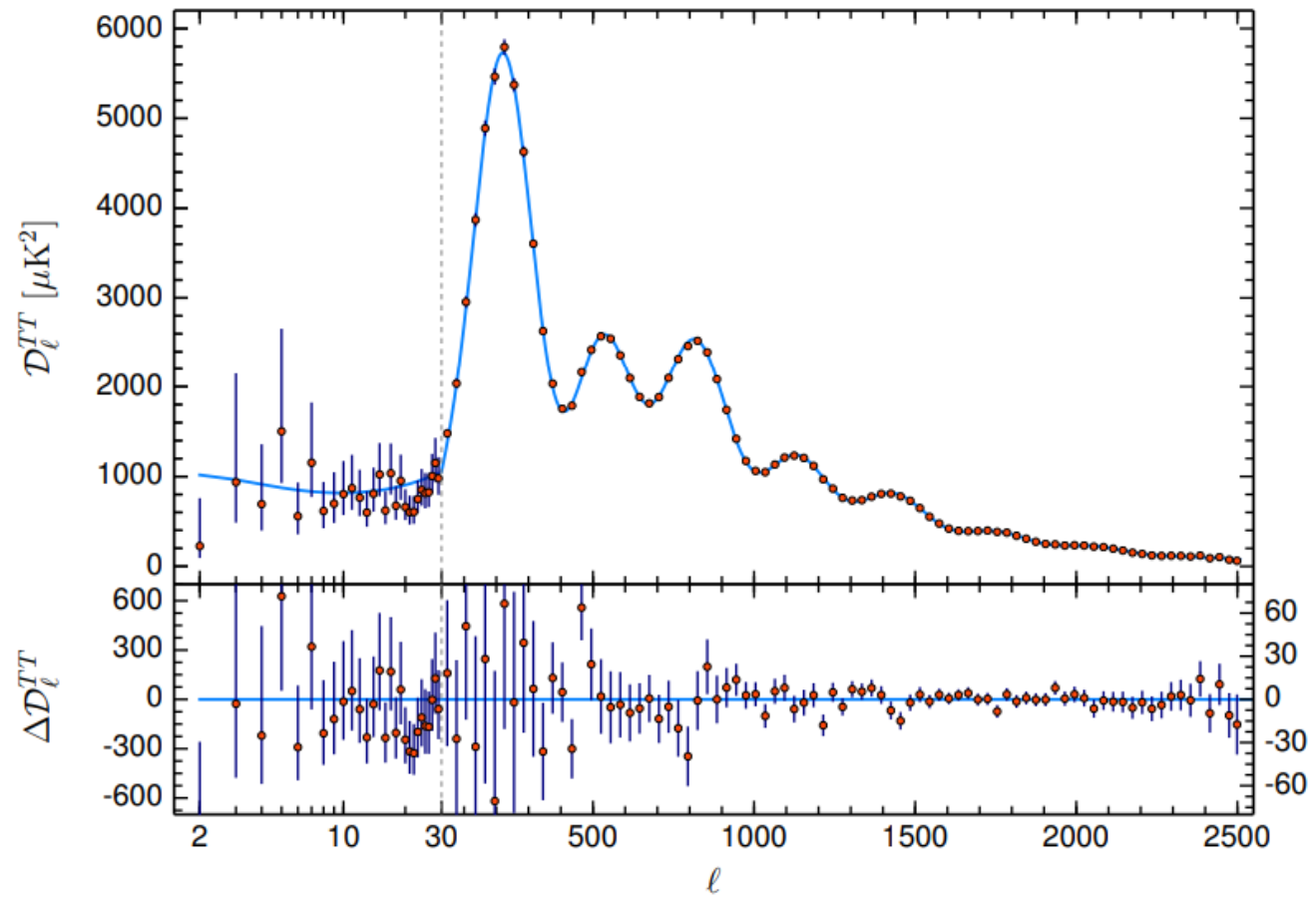
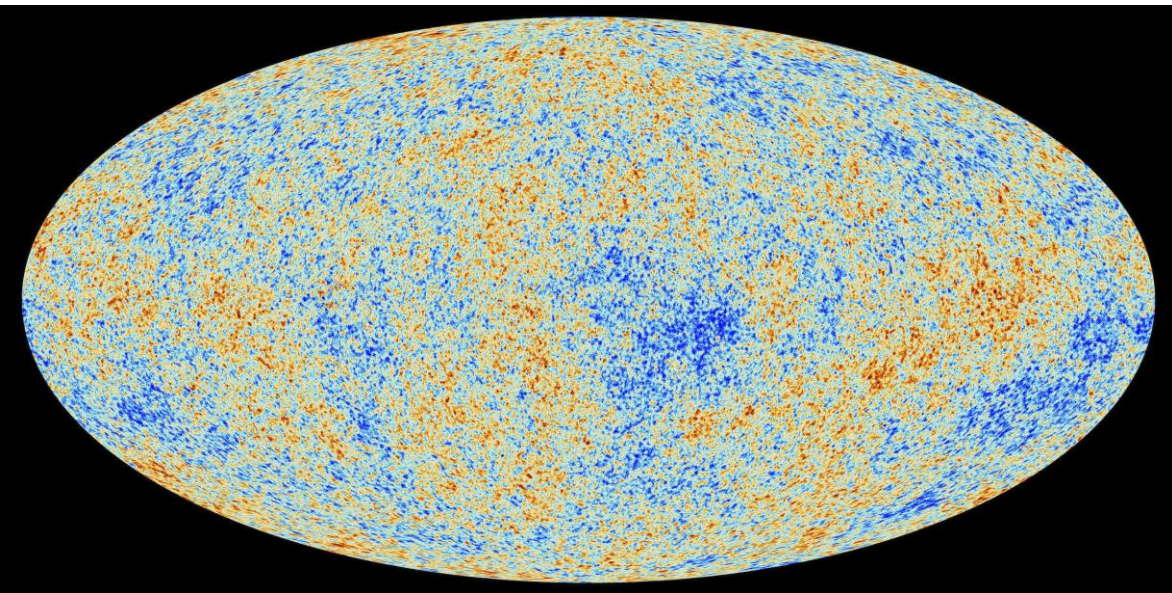


[5] Sofue Y., Rubin V. Rotation Curves of Spiral Galaxies // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2001. — Vol. 39, no. 1. — P. 137–174. — ISSN 1545-4282.

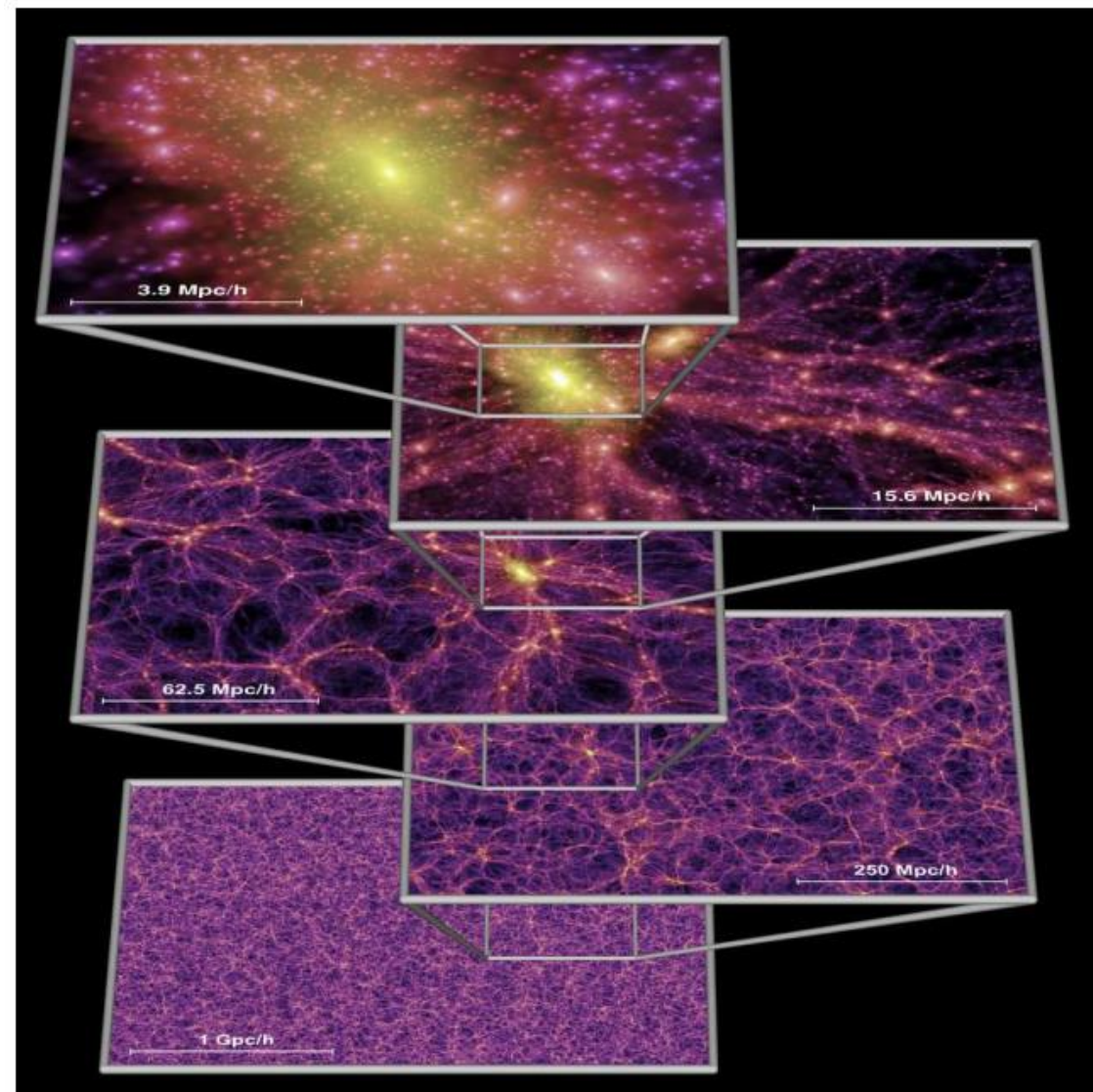
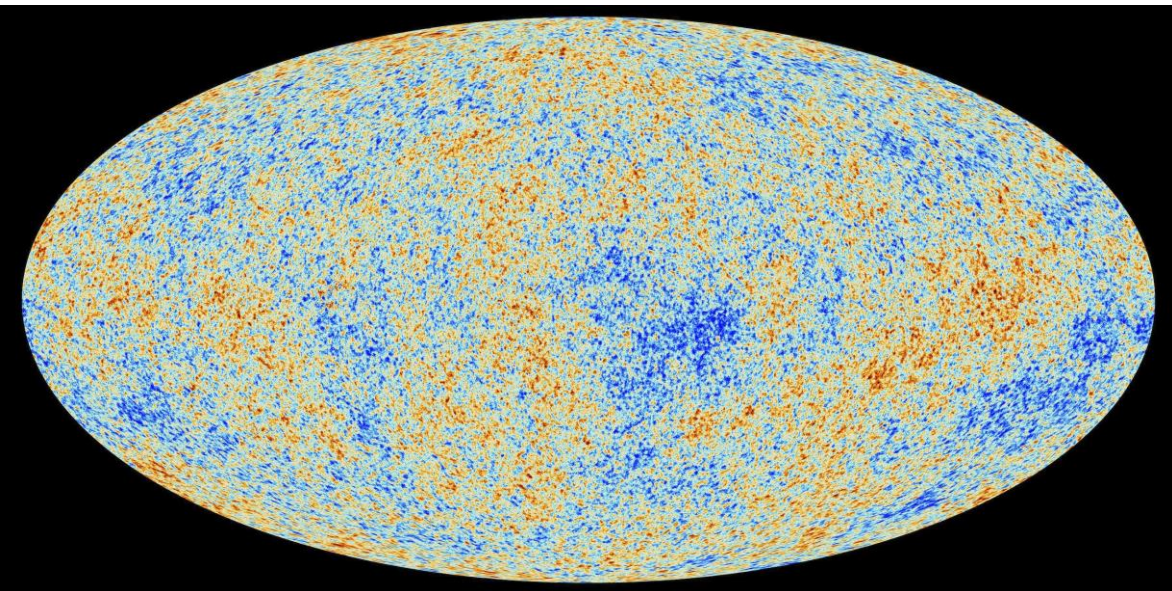
[6] A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter / D. Clowe [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2006. — Vol. 648, no. 2. — P. L109–L113. — ISSN 1538-4357.

[7] Garrett K., Duda G. Dark Matter: A Primer // Advances in Astronomy. — 2011. — Vol. 2011. — P. 1–22. — ISSN 1687-7977.

Доказательства существования скрытой массы



Доказательства существования скрытой массы



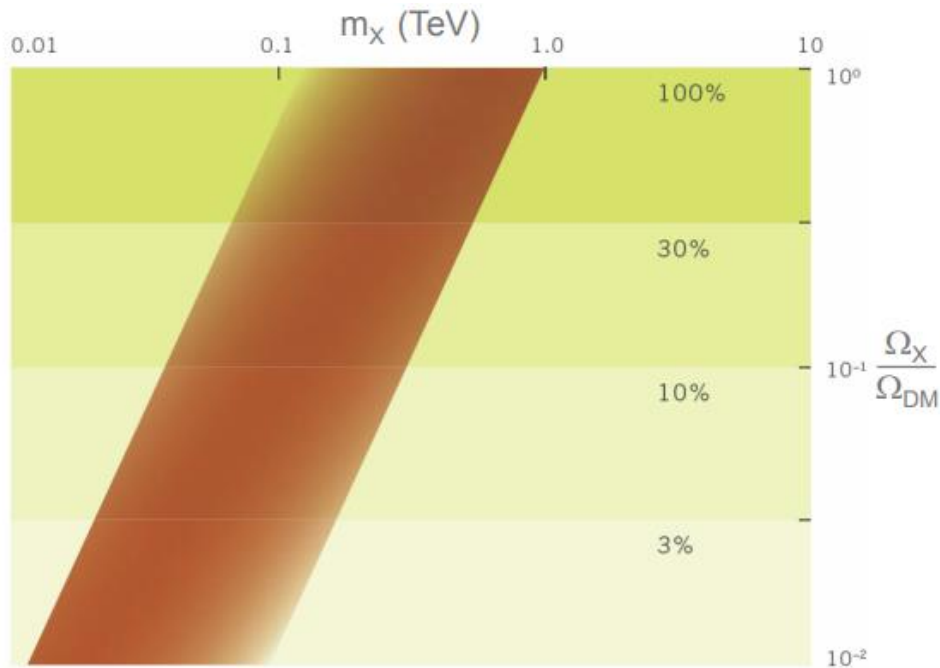
[1] Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters / and N. Aghanim [et al.] // Astron. Astrophys. — 2020. — Vol. 641. — A6

[8] Simulating the joint evolution of quasars, galaxies and their large-scale distribution / V. Springel [et al.] // Nature. — 2005. — Vol. 435. — P. 629–636. — arXiv: astro-ph/0504097.

Возможные частицы-переносчики?

Возможные частицы-переносчики

WIMP и SuSy



The neutral supersymmetric particles are then

$$\text{Spin } 3/2 \text{ Fermion: Gravitino } \tilde{G} \quad (12)$$

$$\text{Spin } 1/2 \text{ Fermions: } \tilde{B}, \tilde{W}, \tilde{H}_u, \tilde{H}_d \rightarrow \text{Neutralinos } \chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4 \quad (13)$$

$$\text{Spin } 0 \text{ Scalars: Sneutrinos } \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau . \quad (14)$$

As indicated, the neutral spin 1/2 fermions mix to form four mass eigenstates, the neutralinos. The lightest of these, $\chi \equiv \chi_1$, is a WIMP dark matter candidate (35; 36). The

FIG. 3 A band of natural values in the $(m_X, \Omega_X/\Omega_{DM})$ plane for a thermal relic X , where $\Omega_{DM} \simeq 0.23$ is the required total dark matter density (29).

- Суперсимметричные частицы не обнаружены на LHC [9]
- При прямом поиске WIMP (частицы отдачи) не обнаружены [10,11]

[4] Feng J. L. Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. —2010. — Vol. 48, no. 1. — P. 495–545. — ISSN 1545-4282.

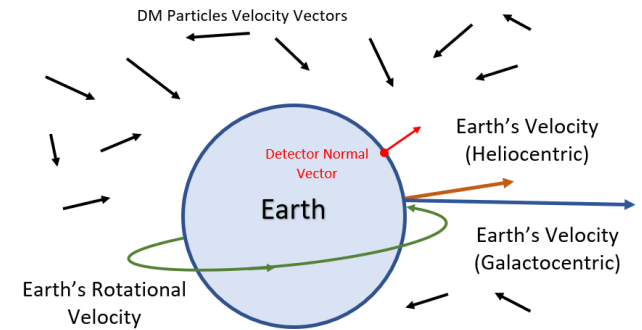
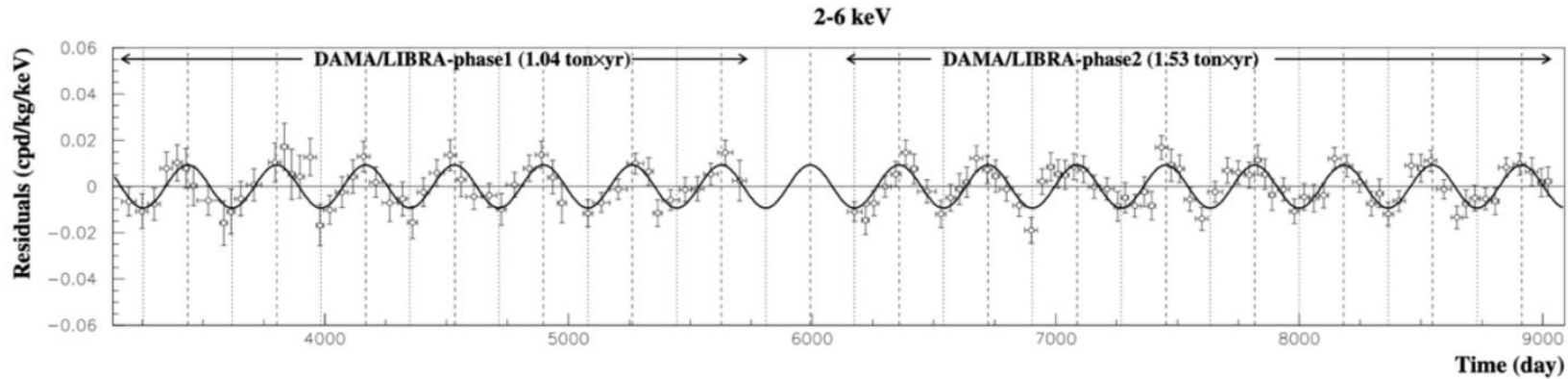
[9] Melzer-Pellmann I., Pralavorio P. Lessons for SUSY from the LHC after the first run // The European Physical Journal C. — 2014. — Vol. 74, no. 5. — ISSN 1434-6052.

[10] Aprile, E.; Aalbers, J.; Abe, K. et al. WIMP Dark Matter Search using a 3.1 tonne \times year Exposure of the XENONnT Experiment. Phys. Rev. Lett. 2025, 135, 221003

[11] SuperCDMS Collaboration Search for low-mass electron-recoil dark matter using a single-charge sensitive SuperCDMS-HVeV Detector. arXiv:2509.03608

Возможные частицы-переносчики

DAMA/LIBRA и аналоги



- DAMA/LIBRA [12]: положительный результат, 13σ C.L, 21+7 лет наблюдений
- ANAIS-112 и COSINE-100 [13]: отрицательный результат, Расхождение с DAMA на уровне 4.7σ (1-6 кэВ) и 3.5σ (2-6 кэВ)

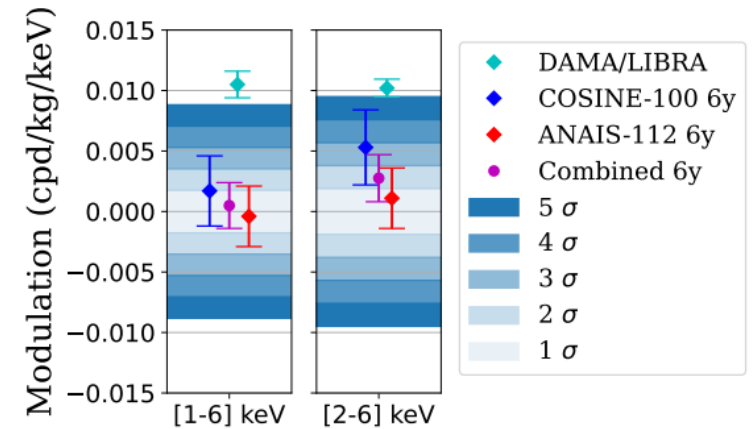


FIG. 4. Simple combination results of the COSINE-100 full dataset [18] and ANAIS-112 6-year [17] annual modulation searches. The colored bands show the sensitivity region for 6-year data from both experiments combined in 1σ (lightest blue) to 5σ (darkest blue).

[12] Further results from DAMA/Libra-phase2 and perspectives / R. Bernabei [et al.] // Nucl. Phys. Atom. Energy. — 2021. — Vol. 22, no. 4. —P. 329–342.

[13] Combined Annual Modulation Dark Matter Search with COSINE-100 and ANAIS-112 / N. Carlin [et al.] // Physical Review Letters. — 2025. — Vol. 135, no. 12. — ISSN 1079-7114.

Возможные частицы-переносчики

Тяжёлые составные частицы

- Walking Technicolor model.

Возможные частицы-переносчики

Тяжёлые составные частицы

- Walking Technicolor model:

$$Q_L^a = \begin{pmatrix} U^a \\ D^a \end{pmatrix}_L, \quad U_R^a, \quad D_R^a, \quad a = 1, 2, 3, \quad L_L = \begin{pmatrix} N \\ E \end{pmatrix}_L, \quad N_R, \quad E_R.$$

- Новая калибровочная симметрия SU(2) (техникварки, присоединённое представление)
- Глобальная симметрия SU(4) нарушается до
 - Sp(4) => 5 псевдо-Голдстоуновских бозонов:
продольные компоненты W, Z; Хиггс h и WIMP ρ
 - SO(4) => 9 псевдо-Голдстоуновских бозонов, среди которых
3 технибариона UU, UD, DD – заряженных частиц, легчайшая из которых стабильна

[14] Minimal walking technicolor: Setup for collider physics / R. Foadi [et al.] // Physical Review D. — 2007. — Vol. 76, no. 5. — ISSN 1550-2368.

[15] G. Cacciapaglia, C. Pica, F. Sannino Fundamental Composite Dynamics: A Review arXiv2002.04914 [hep-ph] 2020

Возможные частицы-переносчики

Тяжёлые составные частицы

- Модель Глэшоу: $SU(3) \times SU(2) \times SU(2)' \times U(1)$
 - Каждому $SU(2)$ дублету фермионов сопоставляется тяжёлый $SU(2)'$ дублет

$$E^- + p \rightarrow (E^- p) + \gamma.$$

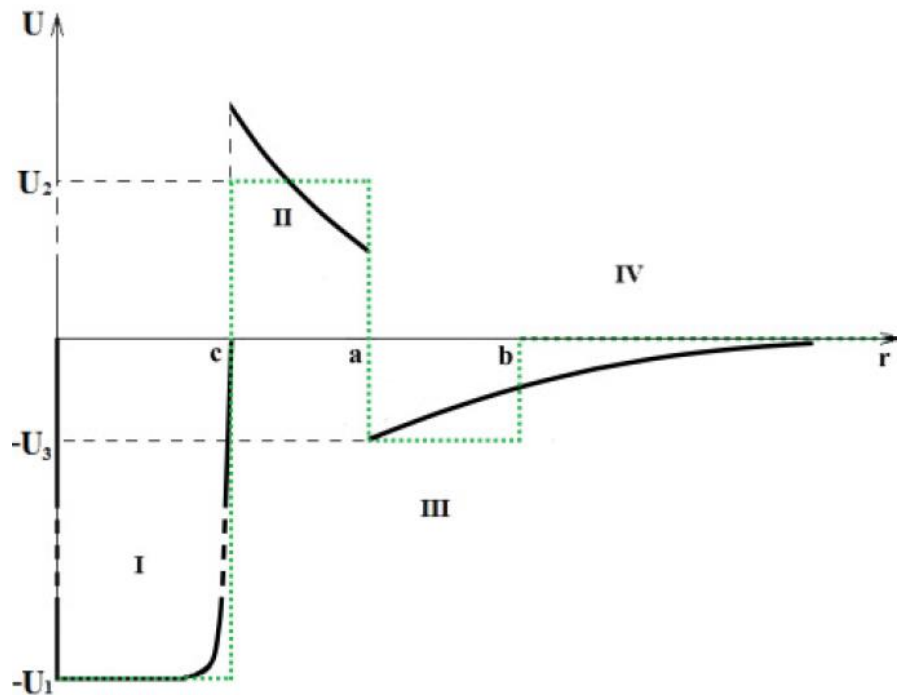
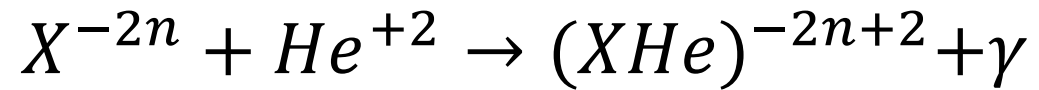
$$E^+ + (Ep) \rightarrow (E^+ E) + p.$$

$$X^- + He^{+2} \rightarrow (XHe)^+ + \gamma$$

Возможные частицы-переносчики

Тяжёлые составные частицы

- Модель тёмных атомов



Экспериментальные ограничения

на многозарядные частицы

Минимальные массы X^{-2n}

$2n$	2	4	6	8	10
$m_X, \text{ГэВ}$	1060 [17]	1520 [17]	1600 [17]	~ 2800 [19]	790 [18]

- Поиск многозарядных «мюонов»:
 - ATLAS [17]: снижение эффективности сигнала не позволяет рассматривать $|Q| > 7$
 - MoEDAL [18]: исследует $|Q| = 10-400$
- Поиск двухфотонной аннигиляции [19]: даёт более строгие ограничения при $|Q| > 6$

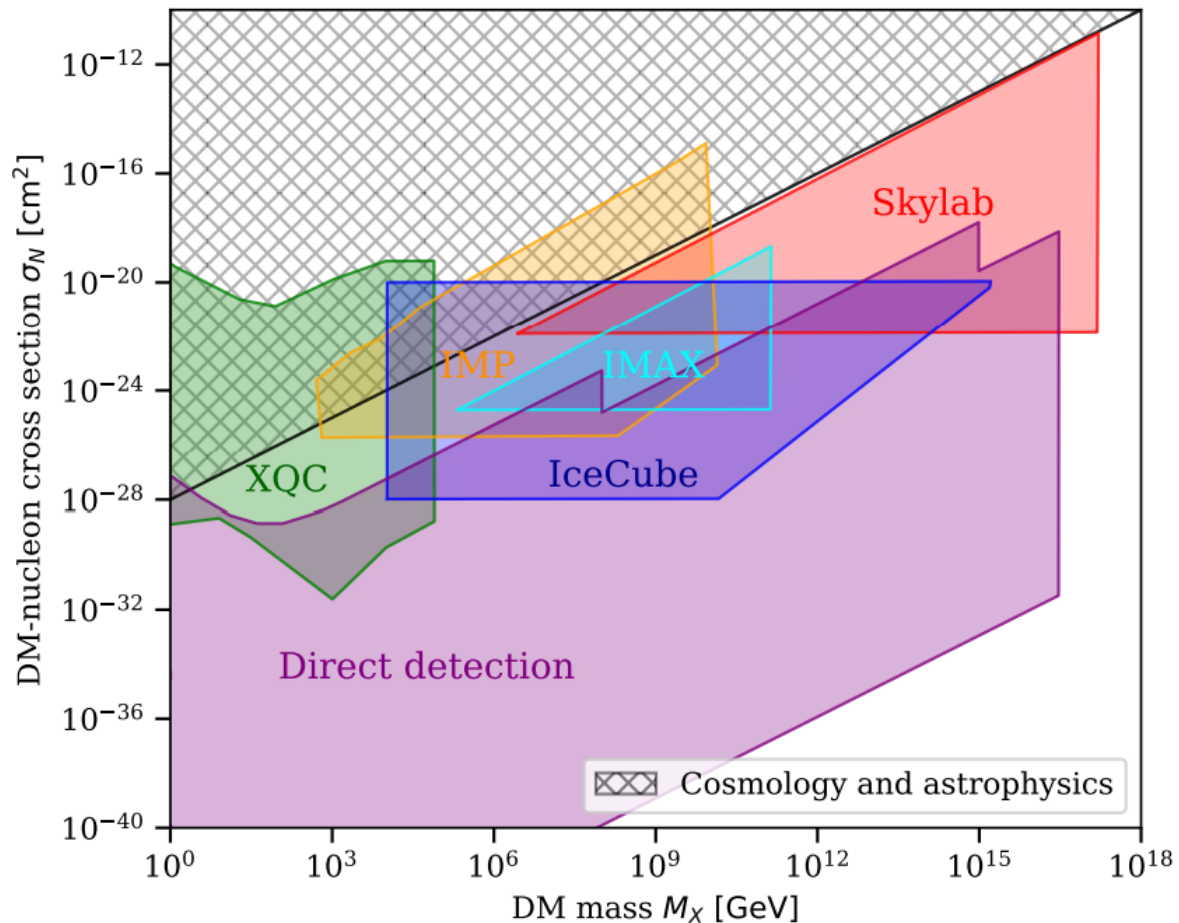
[17] Search for heavy long-lived multi-charged particles in the full LHC Run 2 pp collision data at $s = 13$ TeV using the ATLAS detector / G. Aad [et al.] // Physics Letters B. — 2023. — Vol. 847. — P. 138316. — ISSN 0370-2693.

[18] Search for Highly Ionizing Particles in pp Collisions during LHC Run 2 Using the Full MoEDAL Detector / B. Acharya [et al.] // Physical Review Letters. — 2025. — Vol. 134, no. 7. — ISSN 1079-7114.

[19] Discovery prospects for long-lived multiply charged particles at the LHC / M. M. Alkhalaf [et al.] // The European Physical Journal C. — 2022. — Vol. 82, no. 9. — ISSN 1434-6052.

Экспериментальные ограничения

на SIMP



• XQC:

- 90 сек работы
- Снижение чувствительности при $m > 100$ ГэВ
- Когерентность: $qR \ll 1$

$$\sigma_{\text{coh}}(A) = A^2 \left[\frac{m_{\text{red}}(\text{DM}, \text{Nuc})}{m_{\text{red}}(\text{DM}, \text{n})} \right]^2 \sigma_{\text{Dn}},$$

$$\sigma_{\text{coh}}(A) \approx A^4 \sigma_n$$

Экспериментальные ограничения

Частицы конечного размера

- Nugget and puffy dark matter

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} e^{-m_\phi r}, \quad a \equiv \frac{v}{2\alpha}, \quad b \equiv \frac{2\mu\alpha}{m_\phi},$$

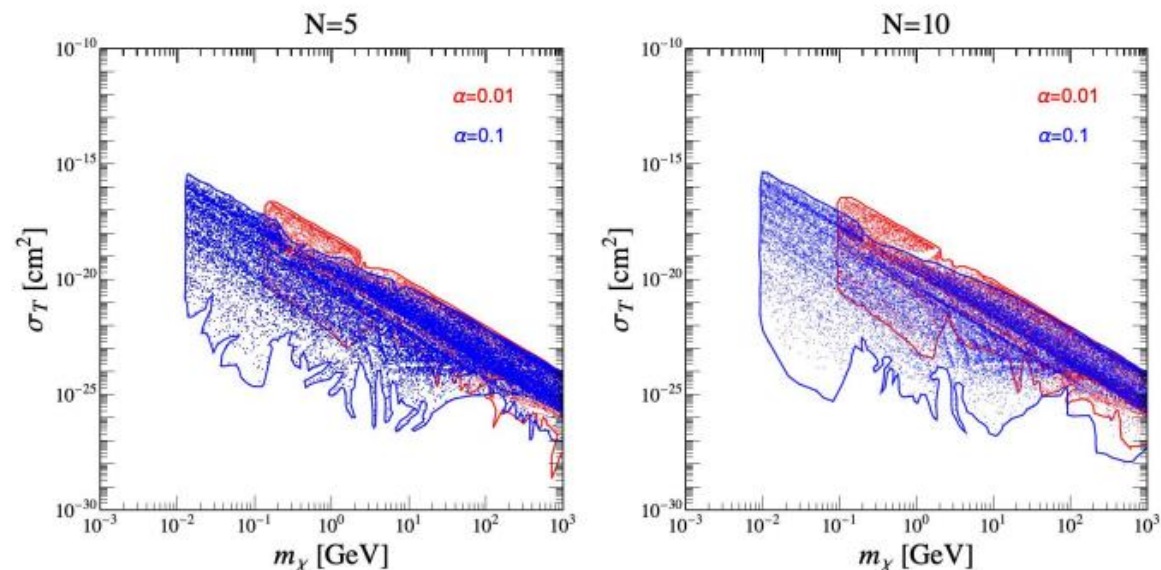
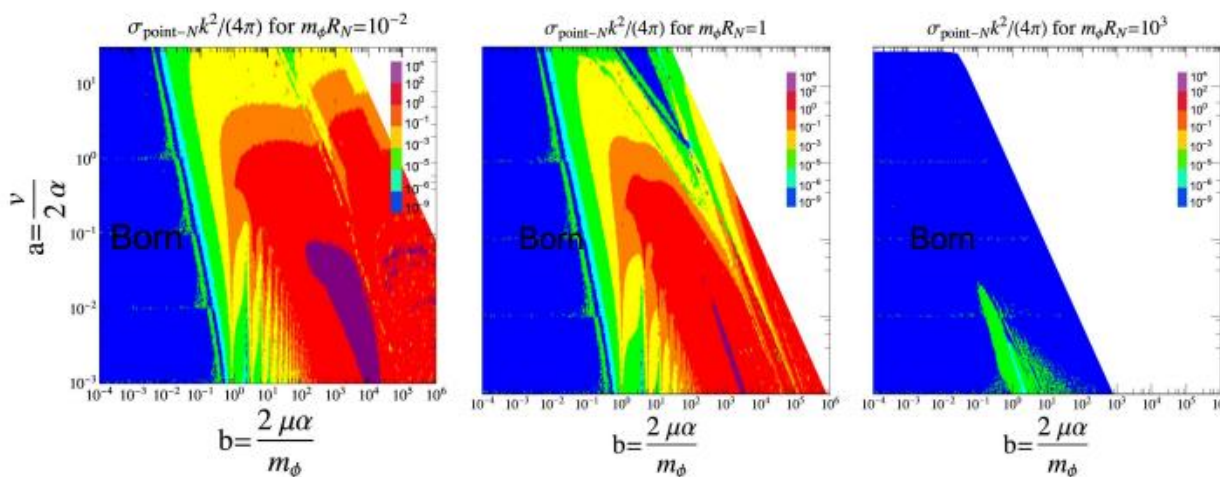


Figure 8. The parameter space (m_χ, σ_T) for nugget particle-Xe nucleus scattering with a fixed coupling $\alpha = 0.01$ (red points), 0.1 (blue points). The left panel corresponds to $N = 5$ and the right panel to $N = 10$.

Figure 5. The parameter space of a versus b for point dark matter particle scattering off a proton with different $R_N m_\phi$ values, showing the values of $\sigma_{\text{point-N}} k^2 / (4\pi)$.

[21] Xu X., Farrar G. Resonant scattering between dark matter and baryons: Revised direct detection and CMB limits // Phys. Rev. D. — 2023. — Vol. 107, issue 9. — P. 095028.

[22] Xu W.-L., Yang J. M., Zhao J. Scattering of non-relativistic finite-size particles and puffy dark matter direct detection. — 2025. — arXiv: 2510.10641 [hep-ph].

Экспериментальные ограничения

Частицы конечного размера

- Nugget and puffy dark matter

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} e^{-m_\phi r},$$

$$a \equiv \frac{v}{2\alpha}, \quad b \equiv \frac{2\mu\alpha}{m_\phi},$$

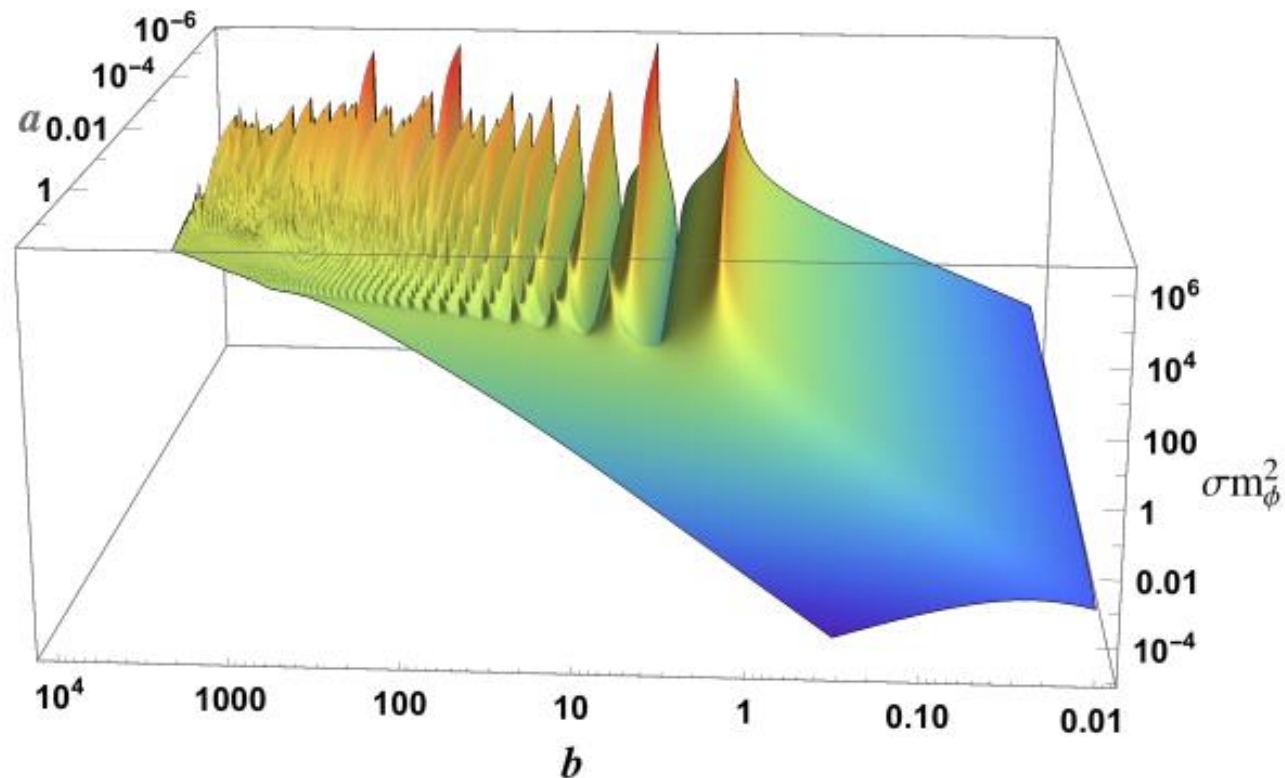


Figure 3. 3D plot of σm_ϕ^2 as a function of (a, b) for a point source, with σm_ϕ^2 along the z-axis. The "crenellated" appearance is merely a sampling artifact due to the resolution of the figure.

Экспериментальные ограничения

Частицы конечного размера

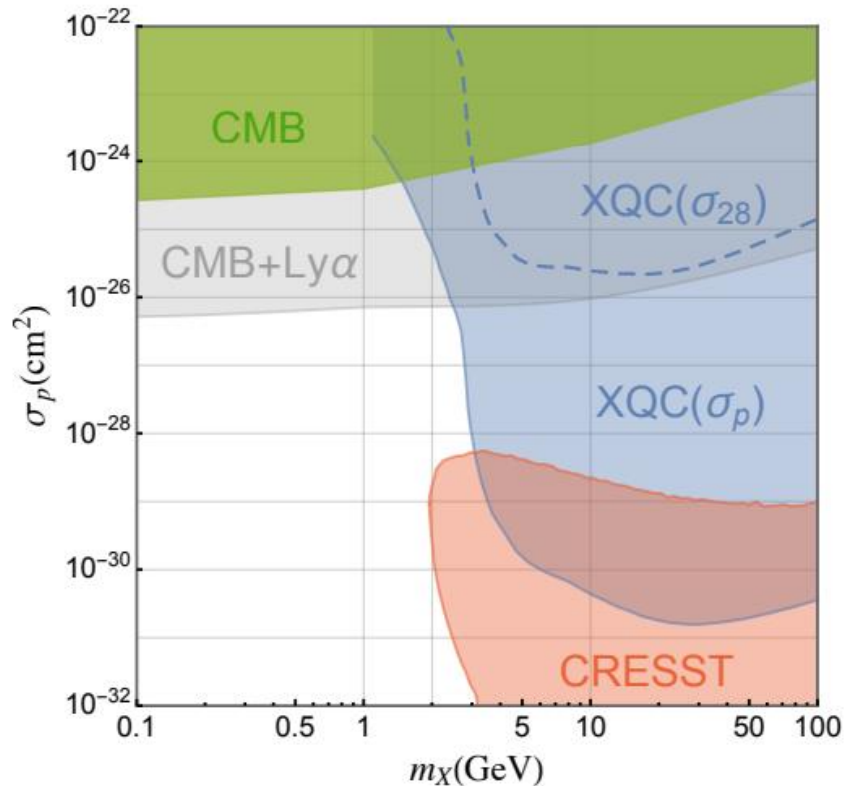


Figure 1. Born-approximation-based DM-nucleon spin-independent cross section limits from XQC [9] (blue); CMB (green) and CMB+Lyman- α (gray) [6]; and CRESST surface detector (red) [9, 11]. The dashed line is the limit on the DM-Si cross section, σ_{28} , which is the actual constraint from XQC. For XQC and CRESST we display the limit corresponding to a thermalization efficiency of 0.01; simple estimates suggest a higher efficiency is implausible [3, 9]. A measurement of the thermalization efficiency is critically needed. To reiterate: the limits shown in this plot are generally invalid and must be replaced by those in Fig. 14 obtained using a fully non-perturbative treatment.

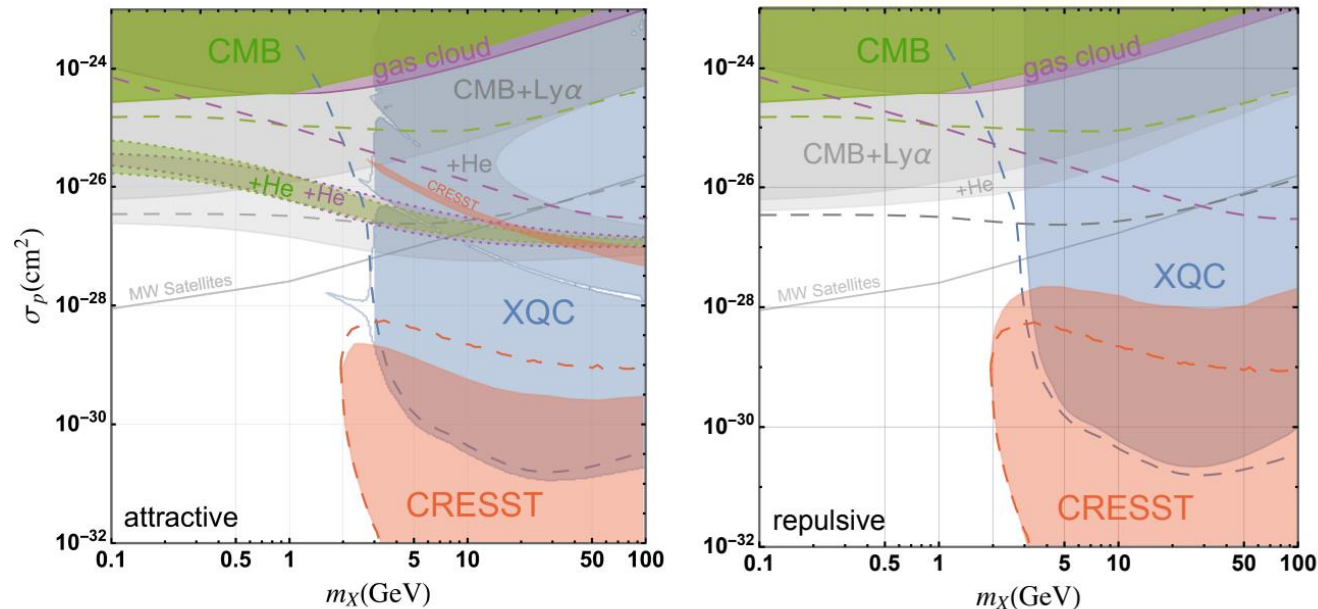


Figure 14. Exclusion region in (σ_p, m_X) space from various constraints

Экспериментальные ограничения

Аномальные изотопы

Допустимые концентрации аномальных изотопов

N	n_N^{anom}/n_N		
	1 ТэВ	5 ТэВ	10 ТэВ
H [23]	$3 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-21}$	$6 \cdot 10^{-20}$
He [25]	$\sim 10^{-19}$ (Earth); $\sim 10^{-16}$ (Solar system)		
Li [23]	$6 \cdot 10^{-13}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-10}$
Be [23]	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$
B [23]	$6 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-11}$
C [23]	$8 \cdot 10^{-20}$	$3 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-16}$
O [23]	$4 \cdot 10^{-17}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-14}$
F [23]	$4 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-12}$
Na [24]	$5 \cdot 10^{-12}$		

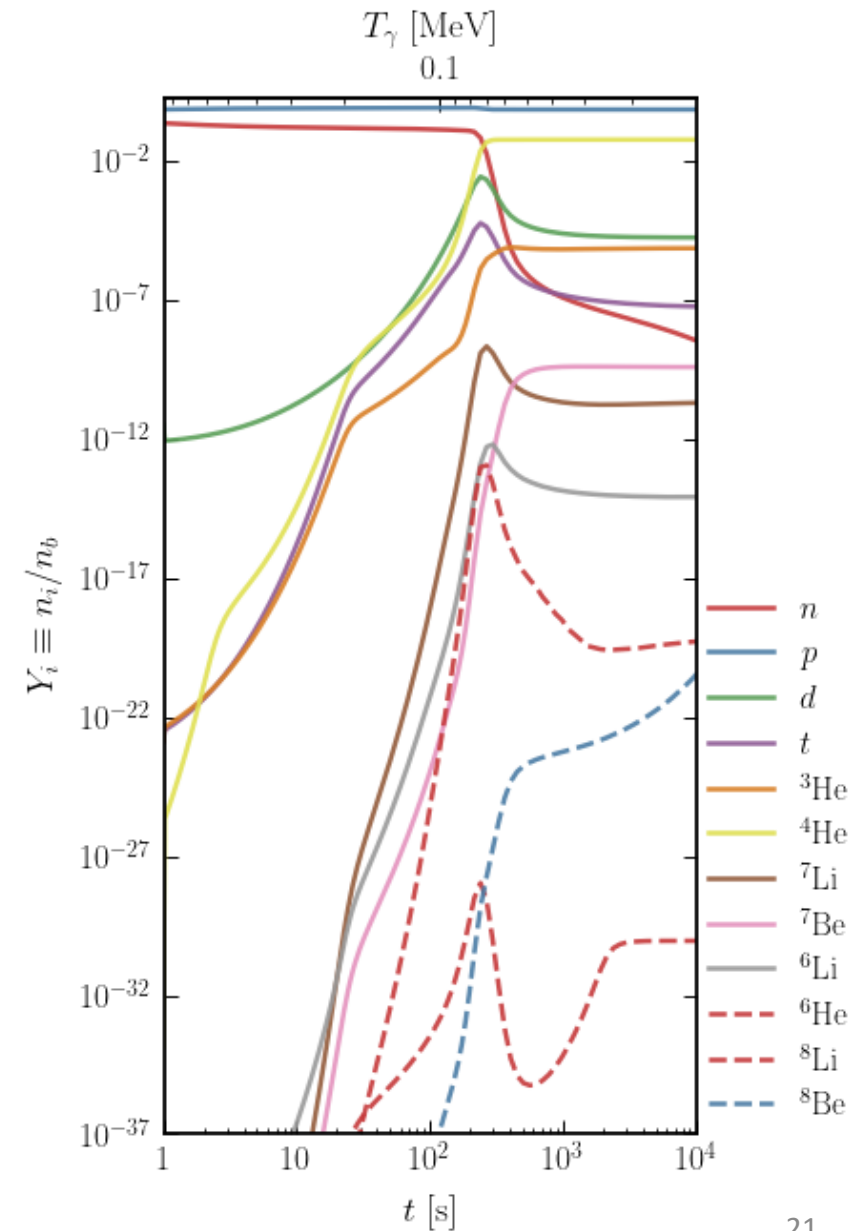
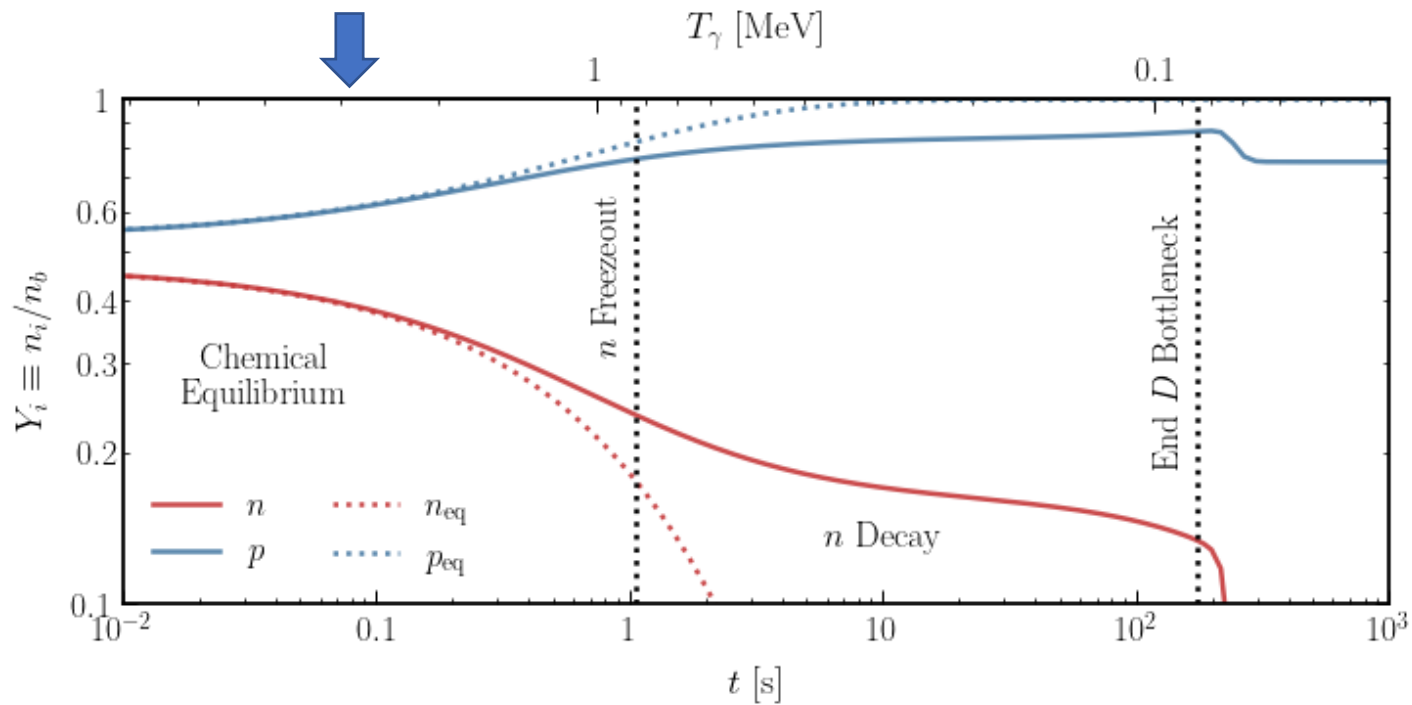
[23] Search for low-Z nuclei containing massive stable particles / T. K. Hemmick [et al.] // Phys. Rev. D. — 1990. — Vol. 41, issue 7. — P. 2074–2080.

[24] Dick W. J., Greenlees G. W., Kaufman S. L. Search for Anomalous Isotopes of Sodium // Phys. Rev. Lett. — 1984. — Vol. 53, issue 5. — P. 431–434.

[25] Search for Anomalously Heavy Isotopes of Helium in the Earth's Atmosphere / P. Mueller [et al.] // Physical Review Letters. — 2004. — Vol. 92, no. 2. — ISSN 1079-7114.

Первичный нуклеосинтез

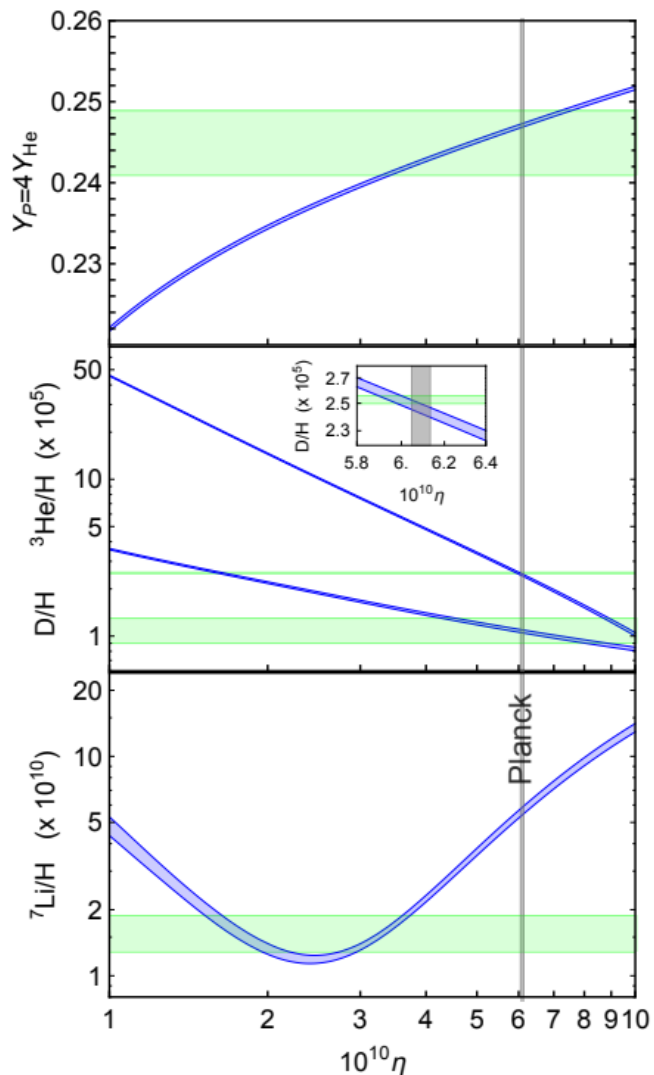
- Изотопный состав
- Дейтериевое бутылочное горлышко



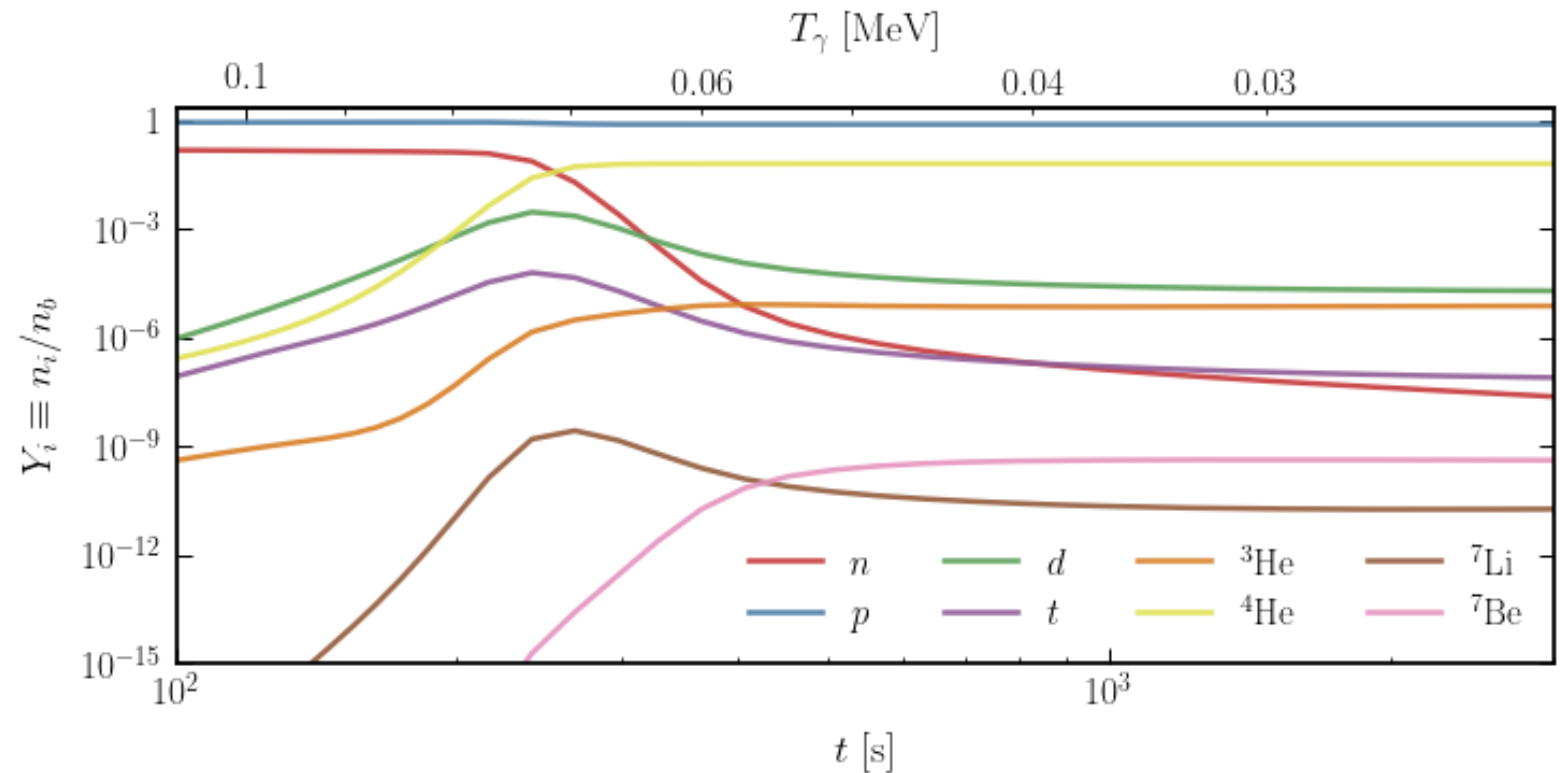
[26] Горбунов Д., Рубаков В. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. — Издательство ЛКИ, 2008.

[27] LINX: A Fast, Differentiable, and Extensible Big Bang Nucleosynthesis Package / C. Giovanetti [et al.] // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, issue 6. — P. 063531.

Первичный нуклеосинтез



Литиевая аномалия:
концентрация первичного лития меньше
ожидаемой в несколько раз



[2] Review of particle physics / S. Navas [et al.] // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 110, no. 3. — P. 030001.

[28] Precision big bang nucleosynthesis with improved Helium-4 predictions / C. Pitrou [et al.] // Physics Reports. — 2018. — Vol. 754. — P. 1– 66. — ISSN 0370-1573.

[29] Akhmedov E., Pospelov M. BBN catalysis by doubly charged particles // JCAP. — 2024. — Vol. 08. — P. 028. — arXiv: 2405.06019 [hep-ph].

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

Литературный обзор по теме

Исследование физических оснований
и космофизических проявлений
моделей асимметричной скрытой массы

Аспирант:

Сопин Д.О.

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф. Хлопов М. Ю.

2026 г.

Список литературы

- [1] Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters / and N. Aghanim [et al.] // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 641. — A6.
- [2] Review of particle physics / S. Navas [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2024. — Vol. 110, no. 3. — P. 030001.
- [3] Zwicky F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // *Helv. Phys. Acta.* — 1933. — Vol. 6. — P. 110–127.
- [4] Feng J. L. Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 2010. — Vol. 48, no. 1. — P. 495–545. — ISSN 1545-4282.
- [5] Sofue Y., Rubin V. Rotation Curves of Spiral Galaxies // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 2001. — Vol. 39, no. 1. — P. 137– 174. — ISSN 1545-4282.
- [6] A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter / D. Clowe [et al.] // *The Astrophysical Journal.* — 2006. — Vol. 648, no. 2. — P. L109–L113. — ISSN 1538-4357.
- [7] Garrett K., Duda G. Dark Matter: A Primer // *Advances in Astronomy.* — 2011. — Vol. 2011. — P. 1–22. — ISSN 1687-7977.
- [8] Simulating the joint evolution of quasars, galaxies and their large-scale distribution / V. Springel [et al.] // *Nature.* — 2005. — Vol. 435. — P. 629–636. — arXiv: astro-ph/0504097.
- [9] Melzer-Pellmann I., Pralavorio P. Lessons for SUSY from the LHC after the first run // *The European Physical Journal C.* — 2014. — Vol. 74, no. 5. — ISSN 1434-6052.
- [10] Aprile, E.; Aalbers, J.; Abe, K. et al. WIMP Dark Matter Search using a 3.1 tonne × year Exposure of the XENONnT Experiment. *Phys. Rev. Lett.* 2025, 135, 221003
- [11] SuperCDMS Collaboration Search for low-mass electron-recoil dark matter using a single-charge sensitive SuperCDMS-HVeV Detector. arXiv:2509.03608
- [12] Further results from DAMA/Libra-phase2 and perspectives / R. Bernabei [et al.] // *Nucl. Phys. Atom. Energy.* — 2021. — Vol. 22, no. 4. —P. 329–342.
- [13] Combined Annual Modulation Dark Matter Search with COSINE-100 and ANAIS-112 / N. Carlin [et al.] // *Physical Review Letters.* — 2025. — Vol. 135, no. 12. — ISSN 1079-7114.
- [14] Minimal walking technicolor: Setup for collider physics / R. Foadi [et al.] // *Physical Review D.* — 2007. — Vol. 76, no. 5. — ISSN 1550-2368.

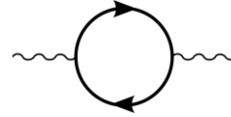
Список литературы

- [15] S. L. Glashow, A Sinister Extension of the Standard Model to $SU(3)_{SU(2)_{SU(2)XU(1)}$, arXiv:hep-ph/0504287 (2005).
- [16] Khlopov, M. Yu.; Mayorov, A. G.; Soldatov, E. Yu. Towards nuclear physics of OHe dark matter. Bled 1503 Workshops Phys. 2011, 12, 94.
- [17] Search for heavy long-lived multi-charged particles in the full LHC Run 2 pp collision data at $s = 13$ TeV using the ATLAS detector / G. Aad [et al.] // Physics Letters B. — 2023. — Vol. 847. — P. 138316. — ISSN 0370-2693.
- [18] Search for Highly Ionizing Particles in pp Collisions during LHC Run 2 Using the Full MoEDAL Detector / B. Acharya [et al.] // Physical Review Letters. — 2025. — Vol. 134, no. 7. — ISSN 1079-7114.
- [19] Discovery prospects for long-lived multiply charged particles at the LHC / M. M. Altakach [et al.] // The European Physical Journal C. — 2022. — Vol. 82, no. 9. — ISSN 1434-6052.
- [20] Niedermann F., Sloth M. S. Radiation exposure from the dark // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2025. — Vol. 2025, no 05. — P. 042. — ISSN 1475-7516.
- [21] Xu X., Farrar G. Resonant scattering between dark matter and baryons: Revised direct detection and CMB limits // Phys. Rev. D. — 2023. — Vol. 107, issue 9. — P. 095028.
- [22] Xu W.-L., Yang J. M., Zhao J. Scattering of non-relativistic finite-size particles and puffy dark matter direct detection. — 2025. — arXiv: 2510.10641 [hep-ph].
- [23] Search for low-Z nuclei containing massive stable particles / T. K. Hemmick [et al.] // Phys. Rev. D. — 1990. — Vol. 41, issue 7. — P. 2074–2080.
- [24] Dick W. J., Greenlees G. W., Kaufman S. L. Search for Anomalous Isotopes of Sodium // Phys. Rev. Lett. — 1984. — Vol. 53, issue 5. — P. 431–434.
- [25] Search for Anomalously Heavy Isotopes of Helium in the Earth's Atmosphere / P. Mueller [et al.] // Physical Review Letters. — 2004. — Vol. 92, no. 2. — ISSN 1079-7114.
- [26] Горбунов Д., Рубаков В. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. — Издательство ЛКИ, 2008.
- [27] LINX: A Fast, Differentiable, and Extensible Big Bang Nucleosynthesis Package / C. Giovanetti [et al.] // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, issue 6. — P. 063531
- [28] Precision big bang nucleosynthesis with improved Helium-4 predictions / C. Pitrou [et al.] // Physics Reports. — 2018. — Vol. 754. — P. 1– 66. — ISSN 0370-1573.
- [29] Akhmedov E., Pospelov M. BBN catalysis by doubly charged particles // JCAP. — 2024. — Vol. 08. — P. 028. — arXiv: 2405.06019 [hep-ph].

Возможные частицы-переносчики

Тяжёлые составные частицы

Параметры Пескина-Такеучи:



$$\alpha(M_Z^2)T \equiv \frac{\Pi_{WW}^{\text{new}}(0)}{M_W^2} - \frac{\Pi_{ZZ}^{\text{new}}(0)}{M_Z^2},$$

$$\frac{\alpha(M_Z^2)}{4s_W^2 c_W^2} S \equiv \frac{\Pi_{ZZ}^{\text{new}}(M_Z^2) - \Pi_{ZZ}^{\text{new}}(0)}{M_Z^2} - \frac{c_W^2 - s_W^2}{c_W s_W} \frac{\Pi_{Z\gamma}^{\text{new}}(M_Z^2)}{M_Z^2} - \frac{\Pi_{\gamma\gamma}^{\text{new}}(M_Z^2)}{M_Z^2},$$

$$\frac{\alpha(M_Z^2)}{4s_W^2} (S + U) \equiv \frac{\Pi_{WW}^{\text{new}}(M_W^2) - \Pi_{WW}^{\text{new}}(0)}{M_W^2} - \frac{c_W}{s_W} \frac{\Pi_{Z\gamma}^{\text{new}}(M_Z^2)}{M_Z^2} - \frac{\Pi_{\gamma\gamma}^{\text{new}}(M_Z^2)}{M_Z^2}$$

	Result	Correlation		Result	Correlation	
<i>S</i>	0.026 ± 0.075	1.00		0.021 ± 0.096	1.00	
<i>T</i>	0.047 ± 0.066	0.90	1.00	0.04 ± 0.12	0.91	1.00
<i>U</i>	0	–	–	0.008 ± 0.092	–0.62	–0.83 1.00

Table 10.8: Results of the global fit of the oblique parameters to all EW precision observables. The left half of the table presents the results assuming $U = 0$, whereas this parameter is an independent degree of freedom in the fit in the right half of the table.

- **S** – measures the **momentum dependence** of custodial-symmetric new-physics effects **modifying the neutral-current interactions**.
- **T** – receives contributions from custodial **SU(2) breaking** new physics, measuring the difference between contributions to **neutral and charged-current** processes at low energies
- **U** – probes the **momentum dependence of such contributions**

Возможные частицы-переносчики

Тяжёлые составные частицы

- Walking Technicolor model:

- «адронизация»:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = & \frac{1}{2}\text{Tr} [D_\mu M D^\mu M^\dagger] + \frac{m^2}{2}\text{Tr}[MM^\dagger] \\ & - \frac{\lambda}{4}\text{Tr} [MM^\dagger]^2 - \lambda'\text{Tr} [MM^\dagger MM^\dagger] + 2\lambda'' [\text{Det}(M) + \text{Det}(M^\dagger)] \\ & + \frac{m_{\text{ETC}}^2}{4} \text{Tr} [MBM^\dagger B + MM^\dagger] ,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{vector}} = & -\frac{1}{2}\text{Tr} [\widetilde{W}_{\mu\nu} \widetilde{W}^{\mu\nu}] - \frac{1}{4}\text{Tr} [B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}] - \frac{1}{2}\text{Tr} [F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}] \\ & + \frac{1}{2}\text{Tr} [D_\mu N (D^\mu N)^\dagger] + \frac{1}{2}\text{Tr} [D_\mu M (D^\mu M)^\dagger] \\ & + \tilde{g}^2 a_1 \text{Tr} [P_\mu P^\mu]^2 + \tilde{g}^2 a_2 \text{Tr} [P_\mu P^\mu P_\nu P^\nu] + \tilde{g}^2 a_3 \text{Tr} [P_\mu P_\nu P^\mu P^\nu] \\ & - i \tilde{g} b \text{Tr} [P_\mu, P_\nu] N F^{\mu\nu} N^\dagger \\ & + \tilde{g}^2 r_1 \text{Tr} [P_\mu P^\mu M M^\dagger] + \tilde{g}^2 r_2 \text{Tr} [P_\mu M P^{\mu T} M^\dagger] \\ & + i \tilde{g} r_3 \text{Tr} [P_\mu (M (D^\mu M)^\dagger - (D^\mu M) M^\dagger)] + \tilde{g}^2 s \text{Tr} [P_\mu P^\mu] \text{Tr} [M M^\dagger] ,\end{aligned}$$

$$\chi \equiv \frac{v^2 \tilde{g}^2}{2M_A^2} r_3$$

$$\hat{S} = \frac{(2 - \chi)\chi g^2}{2\tilde{g}^2 + (2 - 2\chi + \chi^2)g^2} ,$$

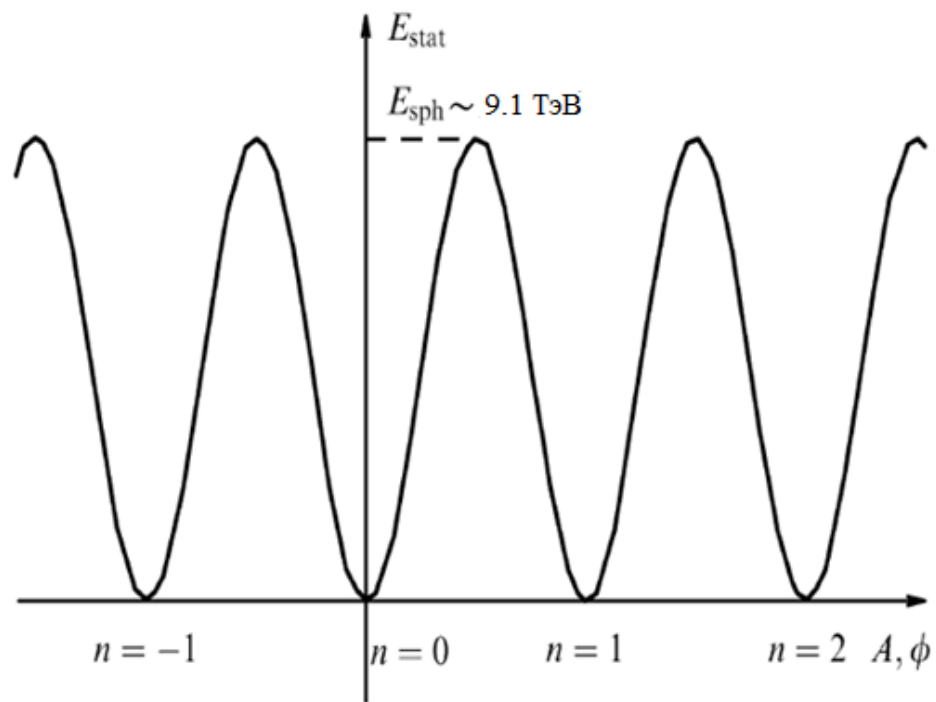
$$\hat{T} = 0 ,$$

$$\hat{U} = 0 ,$$

Многочарядные частицы

Образование зарядовой асимметрии

- Сфалеронные переходы



$(B - L)$ - сохраняющаяся величина

$(B + L)$ - НЕ сохраняющаяся величина

$$\sigma_{\text{inst}} \propto \exp\left(-\frac{4\pi}{\alpha_W}\right) \sim 10^{-170}$$

[a] Manton N. S. Topology in the Weinberg-Salam Theory // Phys. Rev. D. — 1983. — Vol. 28. — P. 2019.

[b] Kunz J., Kleihaus B., Brihaye Y. Sphalerons at finite mixing angle // Phys. Rev. D. — 1992. — Vol. 46, issue 8. — P. 3587–3600.

[c] Nolte G., Kunz J., Kleihaus B. Nondegenerate fermions in the background of the sphaleron barrier // Physical Review D. — 1996. — Vol. 53, no. 6. — P. 3451–3459. — ISSN 1089-4918.

[d] Рубаков В. А., Шапошников М. Е. Электрослабое несохранение барионного числа в ранней Вселенной и в столкновениях частиц при высоких энергиях // Усп. физ. наук. — 1996. — Т. 166, № 5. — С. 493— 537.

Многочарядные частицы

Образование зарядовой асимметрии

$$B = \frac{6}{gT^2}(n_b - n_{\bar{b}}) = \frac{6}{gT^2} \sum_i \frac{1}{6} g T^3 \frac{\mu_i}{T} \sigma\left(\frac{m_i}{T}\right) = \\ = \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot (2 + \sigma_t)(\mu_{uL} + \mu_{uR}) + \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot 3 \cdot (\mu_{dL} + \mu_{dR}),$$

$$\sigma(z) = \begin{cases} \frac{6}{4\pi^2} \int_0^\infty dx x^2 (\cosh(\frac{1}{2}\sqrt{x^2 + z^2}))^{-2}, & \text{для фермионов;} \\ \frac{6}{4\pi^2} \int_0^\infty dx x^2 (\sinh(\frac{1}{2}\sqrt{x^2 + z^2}))^{-2}, & \text{для бозонов.} \end{cases}$$

Стандартная Модель [a]:

$$B + L = -\frac{16N + 5(m + 2)}{48N + 13(m + 2)}(B - L);$$

$$B = \frac{16N + 4(m + 2)}{48N + 13(m + 2)}(B - L);$$

$$L = -\frac{32N + 9(m + 2)}{48N + 13(m + 2)}(B - L).$$