

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

Отчет о «Научно-исследовательской деятельности
аспиранта и подготовке к защите диссертации на
соискание ученой степени кандидата наук» за
четвёртый семестр

«Исследование физических оснований и космофизических
проявлений моделей асимметричной скрытой массы»

Аспирант
Научная специальность

Д. О. Сопин
1.3.15 «Физика атомных ядер и эле-
ментарных частиц, физика высоких
энергий»

Научный руководитель,
д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Ю. Хлопов

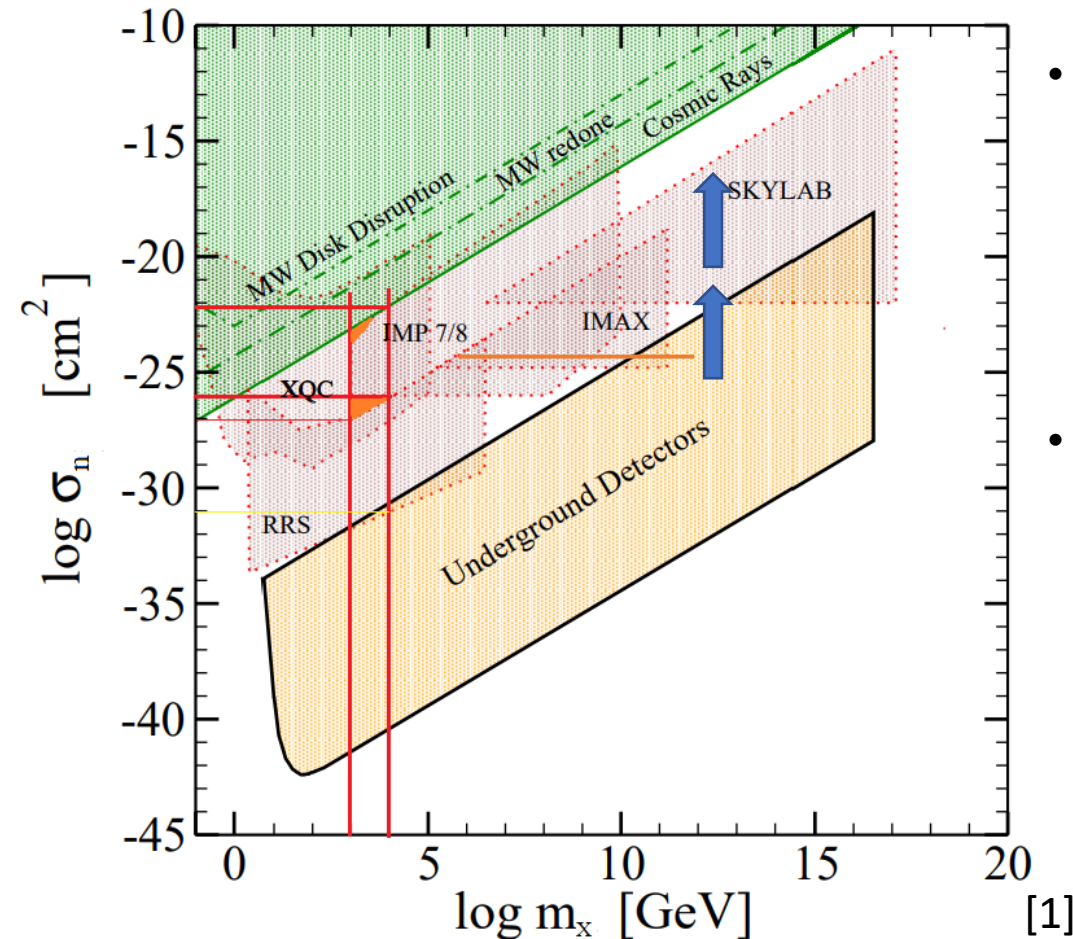
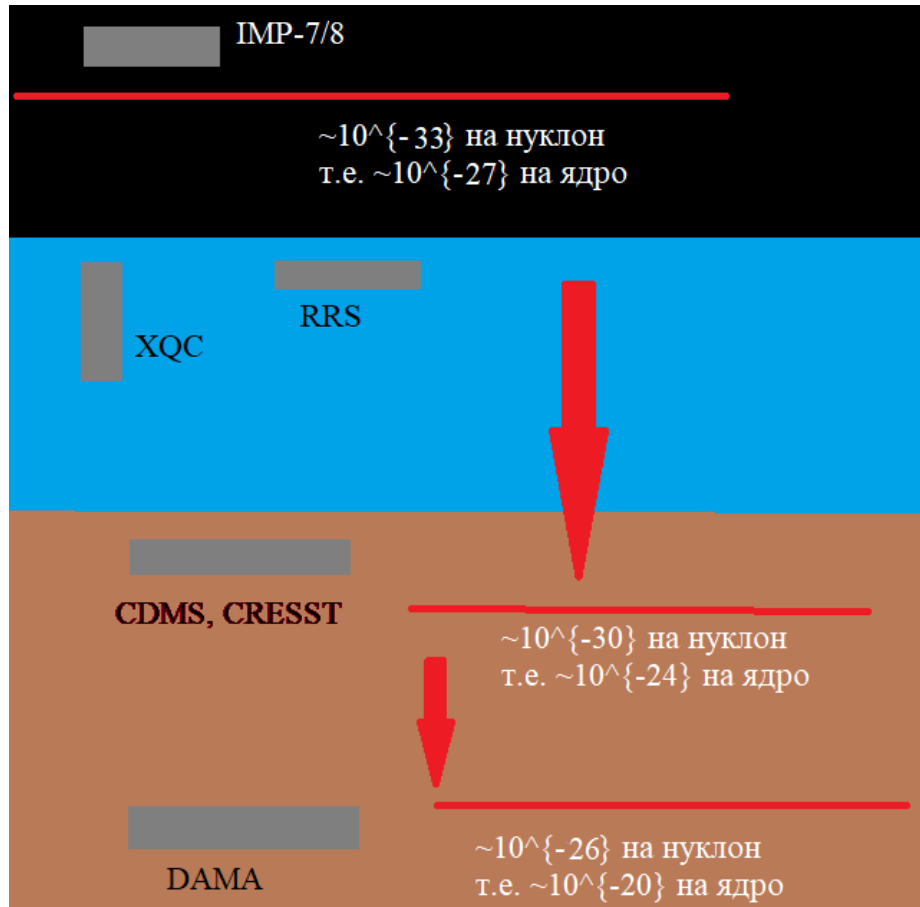
Москва 2026

Содержание

- Анализ ограничений на тёмные атомы
- Исследование сфалеронных переходов
 - Общий вид
 - Частные случаи
- Модифицированный нуклеосинтез
 - Скорости «тёмной» рекомбинации
 - Скорости процессов, имеющих стандартные аналоги
 - Моделирование нуклеосинтеза
- Заключение
- Апробация результатов
- Педагогическая практика

Анализ ограничений на тёмные атомы

Ограничения SIMP



- $\sigma \sim 1/v^2$ - характерная особенность дипольной скрытой массы [2,3].
- $\frac{v_0^2}{v^2} \sim 10^7 - 10^8$ - «галактическа» скорость к термальной [4]

[1] Mack G. D., Beacom J. F., Bertone G. Towards closing the window on strongly interacting dark matter: Far-reaching constraints from Earth's heat flow // Physical Review D. — 2007. — Vol. 76, no. 4. — ISSN 1550-2368.

[2] Masso E., Mohanty S., Rao S. Dipolar Dark Matter // Phys. Rev. D. — 2009. — Vol. 80. — P. 036009. — arXiv: 0906.1979 [hep-ph].

[3] Li Y., Liu Z., Xue Y. XQC and CSR constraints on strongly interacting dark matter with spin and velocity dependent cross sections // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2023. — Vol. 2023, no. 05. — P. 060. — ISSN 1475-7516.

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

Анализ ограничений на тёмные атомы

Ограничения на аномальные изотопы

Ограничения на модели X

Допустимые концентрации аномальных изотопов

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

Минимальные массы X^{-2n}

$2n$	2	4	6	8	10
$m_X, \text{ТэВ}$	1060 [8]	1520 [8]	1600 [8]	~ 2800 [10]	790 [9]

Result	
S	0.018 ± 0.095
T	0.04 ± 0.12
U	-0.013 ± 0.086

$$T, U = 0 : -0.072 \leq S \leq 0.039;$$

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

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

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

[9] 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.

[10] 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.

Исследование сфалеронных переходов

Общий вид

- Уравнения на химические потенциалы:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1 \\ 0 & a_{22} & 0 & \cdots & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & a_{33} & \cdots & 0 & b_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-1,n-1} & b_{n-1} \\ c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_{n-1} & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \vdots \\ \mu_{n-1} \\ \mu_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_{n-1} \\ 0 \end{pmatrix}$$



$$\mu_i = \frac{A_i}{a_{ii}} + \frac{b_i}{a_{ii}} \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{c_j}{a_{jj}} A_j}{d - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_j}{a_{jj}} b_j},$$

$$\mu_n = -\frac{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{c_j}{a_{jj}} A_j}{d - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{c_j}{a_{jj}} b_j}$$

- Дополнительные уравнения

Сфалеронное уравнение $\sum s_i \mu_i = 0$ может быть представлено как

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{a_{ii}} \left(s_i d - s_n c_i + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{b_j}{a_{jj}} (s_j c_i - c_j s_i) \right) \cdot A_i = 0.$$



$$\sum_{i=3}^{n-1} \frac{m_i}{m_b} \left| \frac{A_i}{B} \right| = \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}.$$

$$\frac{B'}{B} \rightarrow \begin{cases} -\alpha' \sigma_{B'} \left(\frac{L}{B} + \beta \right), \\ \pm B' \frac{m_b}{m_{B'}} \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}, \end{cases} \quad m_{B'} \gg m_{L'}$$

$$\frac{L'}{B} \rightarrow \begin{cases} \pm L' \frac{m_b}{m_{L'}} \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}, \\ -\alpha' \sigma_{L'} \left(\frac{L}{B} + \beta \right), \end{cases} \quad m_{B'} \ll m_{L'}$$

Исследование сфалеронных переходов

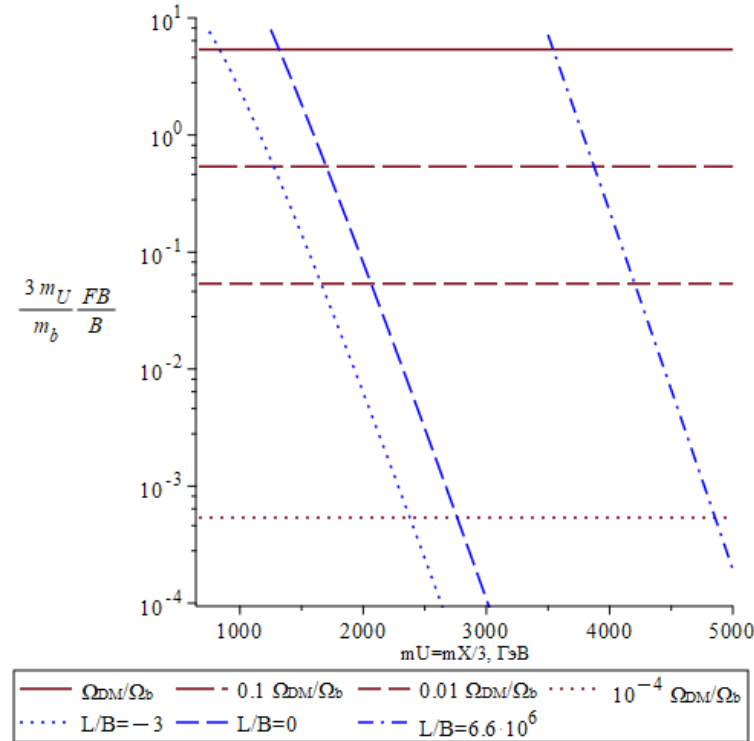
Частные случаи

WTC

$$\frac{TB}{TL} = - \frac{m_N \alpha(\sigma_i) \left(\frac{L}{B} + \beta(\sigma_i) \right) \pm_2 \gamma(\sigma_i) \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}}{\pm_1 \pm_2 m_{UU} \alpha(\sigma_i) \left(\frac{L}{B} + \beta(\sigma_i) \right) \pm_2 \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}}$$

- TB/TL – любое, если $m < m_{crit}$,
 -> $1/3$, если $m > m_{crit}$
- $m_{crit} \sim 3.6$ ТэВ
- Случаи, когда знаки (TB, TL)
 $= (+, +)$ и $(-, -)$ исключаются

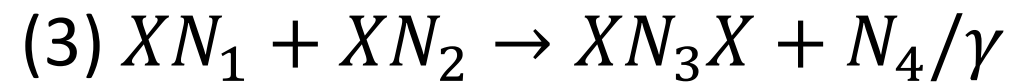
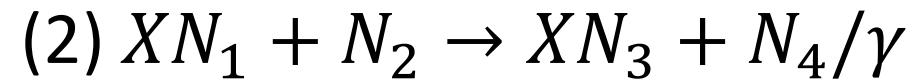
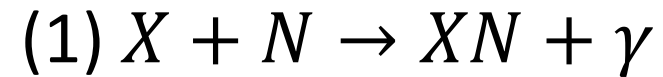
4 поколения



=> $m < 11$ ТэВ

$$|L/B| < 6.6 \cdot 10^6 \text{ [11]}$$

Модифицированный нуклеосинтез



Эти реакции могут быть разделены на
имеющие стандартные аналоги и
не имеющие таковых

Модифицированный нуклеосинтез

Скорости «тёмной» рекомбинации

- (1) $X + N \rightarrow XN + \gamma$

$$\langle \sigma_{rr} v \rangle = \frac{2\sqrt{2\pi} Z_N}{3} \frac{1}{Z_X m_N^4 r_B^5} \frac{1}{(m_N T)^{3/2}} \cdot \int \frac{1 + \eta^2}{\eta^4} \exp\left(-\frac{1}{2m_N r_B^2 T} \frac{1}{\eta^2}\right) \left| \int \rho^2 R_{\chi 1}(\rho) \partial_\rho R_{10}(\rho) d\rho \right|^2 d\eta.$$

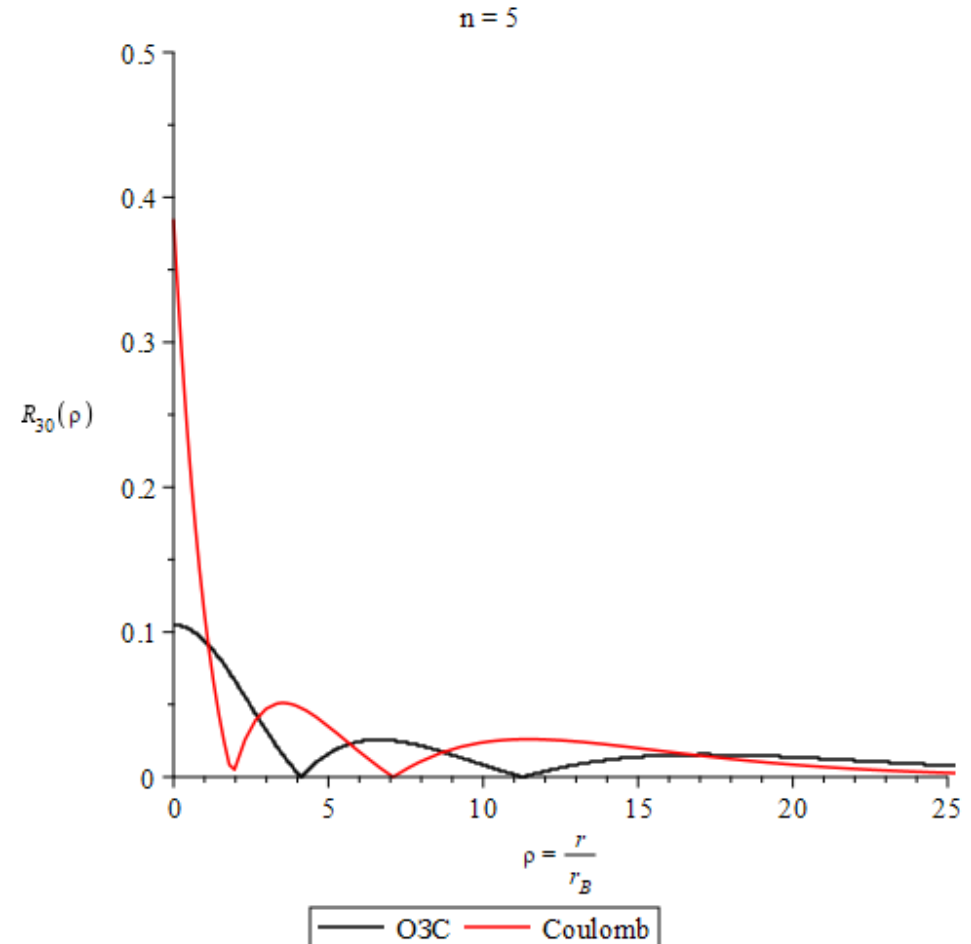
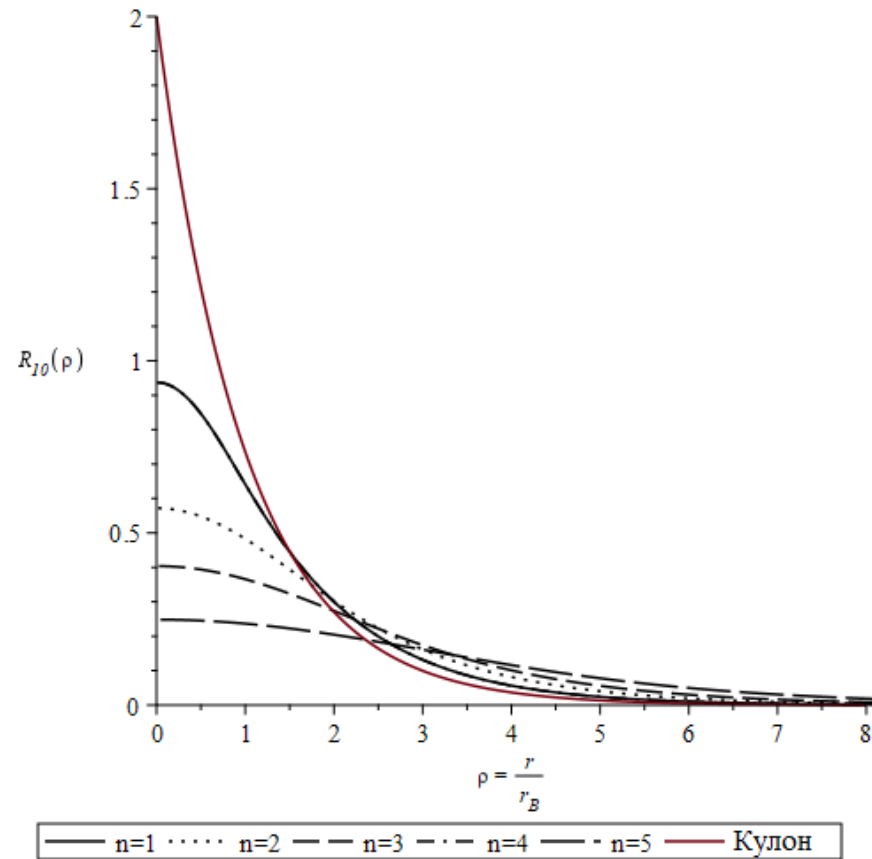
$$V(\rho) = \begin{cases} -\frac{1}{a} \left(3 - \frac{\rho^2}{a^2}\right), & \rho < a \\ -\frac{2}{\rho}, & \rho > a \end{cases}$$

$\rho = r/r_{\text{Bohr}}$

Модифицированный нуклеосинтез

Скорости «тёмной» рекомбинации

- Дискретный спектр на примере гелия-4



Модифицированный нуклеосинтез

Скорости «тёмной» рекомбинации

• Энергии связи

Table 1. Properties of $X^{-2n} - p$ bound states

		p				
q		2	4	6	8	10
Radii	r_N , Fm	0.841				
	r_B , MeV^{-1}	0.073	0.037	0.024	0.018	0.015
	a	0.058	0.115	0.173	0.230	0.288
E_{XN} , MeV	E_{XN}^{Coulomb} , MeV	0.100	0.400	0.900	1.599	2.500
	E_{XN}^{Sphere} , MeV	0.100	0.396	0.883	1.550	2.388

Table 2. Properties of $X^{-2n} - d$ bound states

		d				
q		2	4	6	8	10
Radii	r_N , Fm	2.127				
	r_B , MeV^{-1}	0.037	0.018	0.012	0.009	0.007
	a	0.291	0.583	0.873	1.165	1.456
E_{XN} , MeV	E_{XN}^{Coulomb}	0.200	0.799	1.798	3.196	4.994
	$E_{XN}^{\text{Oscillator}}$	—	—	—	0.604	1.762
	E_{XN}^{Sphere}	0.191	0.701	1.439	2.343	3.370

Table 3. Properties of $X^{-2n} - t$ bound states

		t				
q		2	4	6	8	10
Radii	r_N , Fm	1.7591				
	r_B , MeV^{-1}	0.0244	0.0122	0.008	0.006	0.005
	a	0.361	0.721	1.082	1.443	1.803
E_{XN} , MeV	E_{XN}^{Coulomb}	0.299	1.197	2.692	4.787	7.479
	$E_{XN}^{\text{Oscillator}}$	—	—	0.288	1.666	3.176
	E_{XN}^{Sphere}	0.280	1.005	2.023	3.242	4.608

Table 4. Properties of $X^{-2n} - {}^3\text{He}$ bound states

		${}^3\text{He}$				
q		2	4	6	8	10
Radii	r_N , Fm	1.970				
	r_B , 10^{-3}MeV^{-1}	12.20	6.10	4.07	3.05	2.44
	a	0.808	1.615	2.423	3.230	4.037
E_{XN} , MeV	E_{XN}^{Coulomb}	1.196	4.786	10.768	19.142	29.910
	$E_{XN}^{\text{Oscillator}}$	—	1.894	4.767	7.888	11.164
	E_{XN}^{Sphere}	0.978	3.094	5.740	8.690	11.837

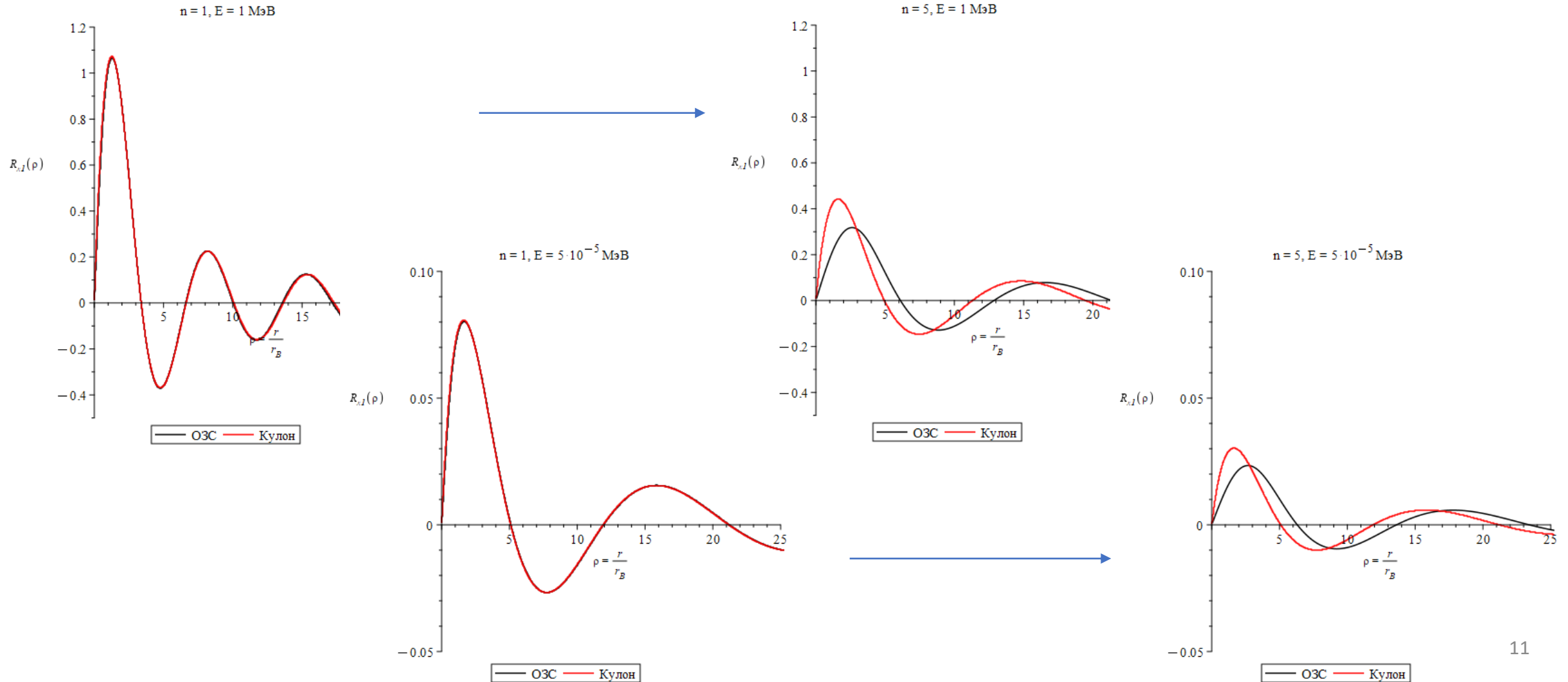
Table 5. Properties of $X^{-2n} - {}^4\text{He}$ bound states

		${}^4\text{He}$				
q		2	4	6	8	10
Radii	r_N , Fm	1.678				
	r_B , 10^{-3}MeV^{-1}	9.19	4.60	3.06	2.30	1.84
	a	0.913	1.826	2.739	3.652	4.566
E_{XN} , MeV	E_{XN}^{Coulomb}	1.588	6.352	14.291	25.406	39.698
	$E_{XN}^{\text{Oscillator}}$	—	2.713	6.195	9.950	13.878
	E_{XN}^{Sphere}	1.256	3.891	7.130	10.708	14.506

Модифицированный нуклеосинтез

Скорости «тёмной» рекомбинации

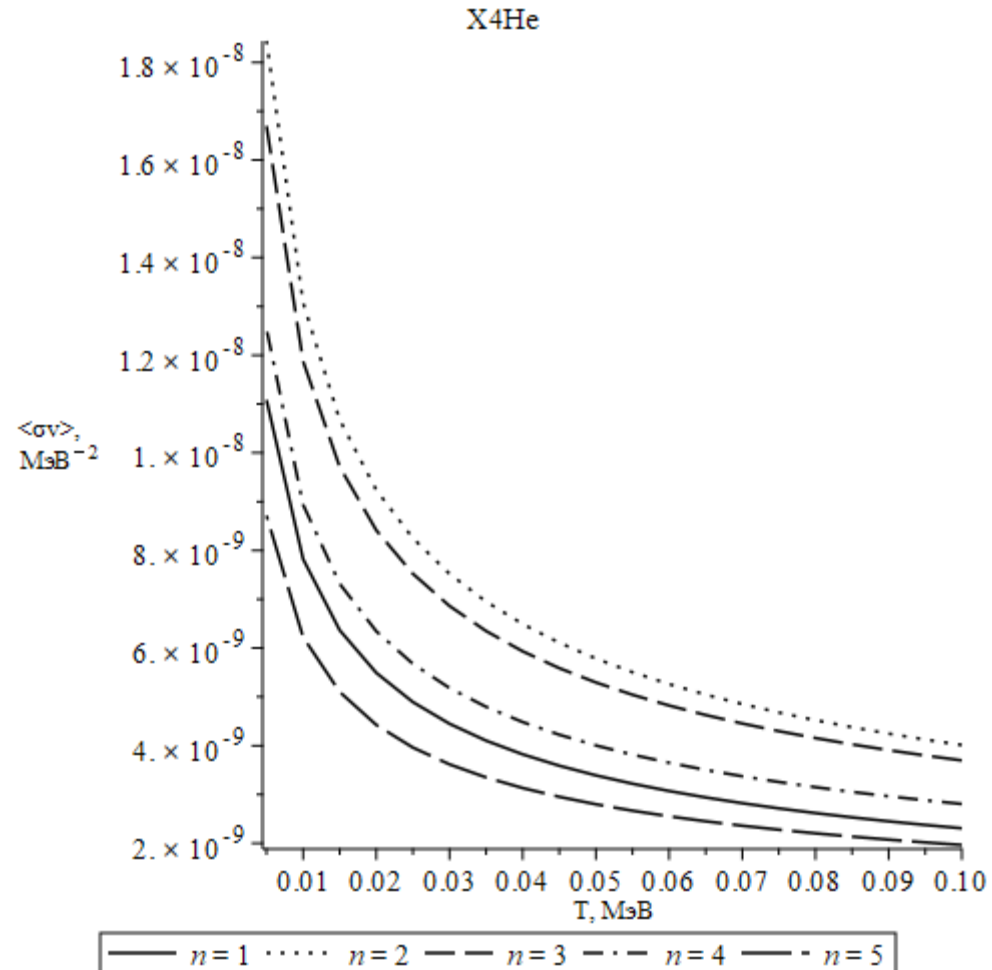
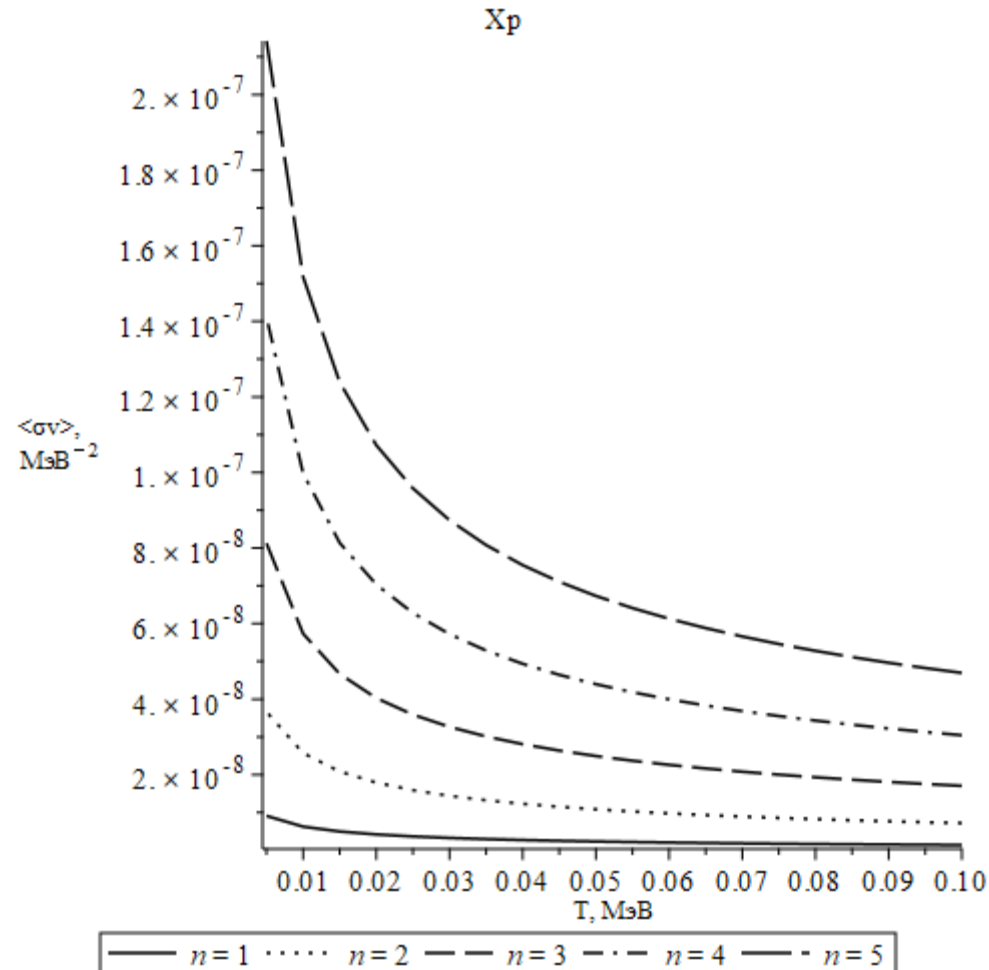
- Непрерывный спектр



Модифицированный нуклеосинтез

Скорости «тёмной» рекомбинации

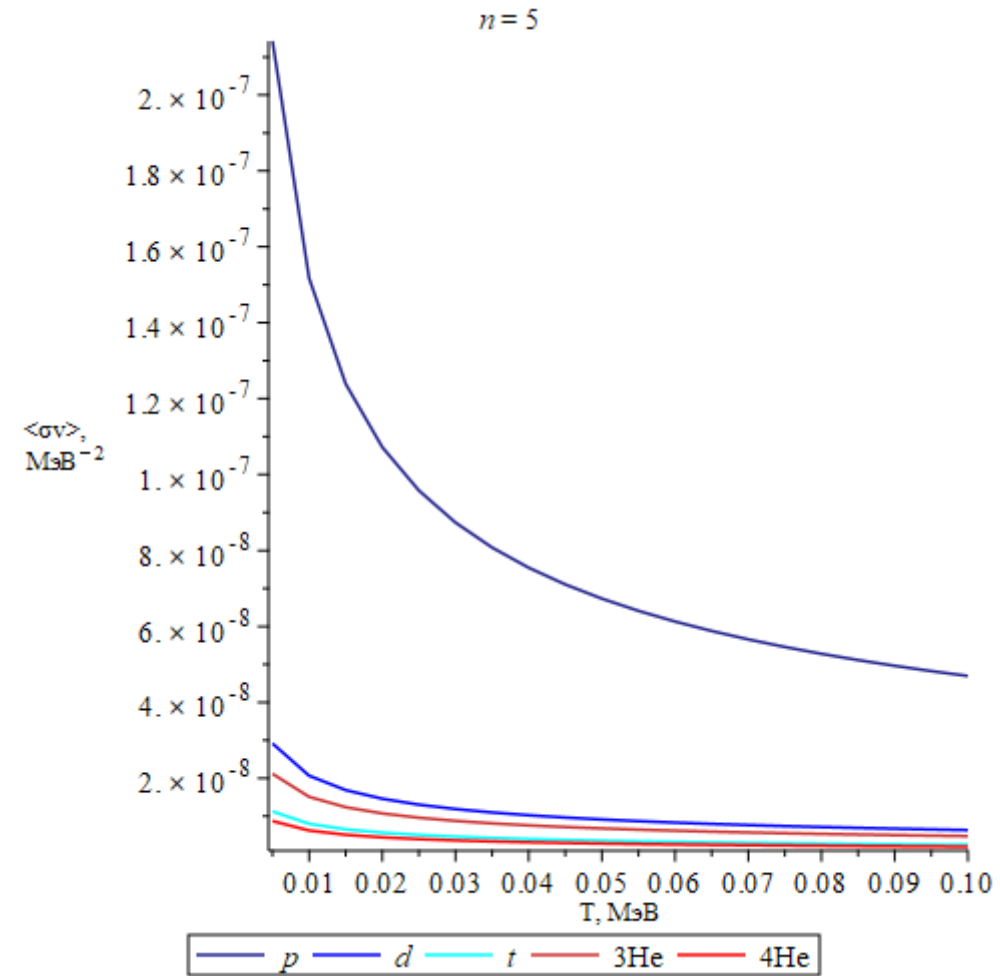
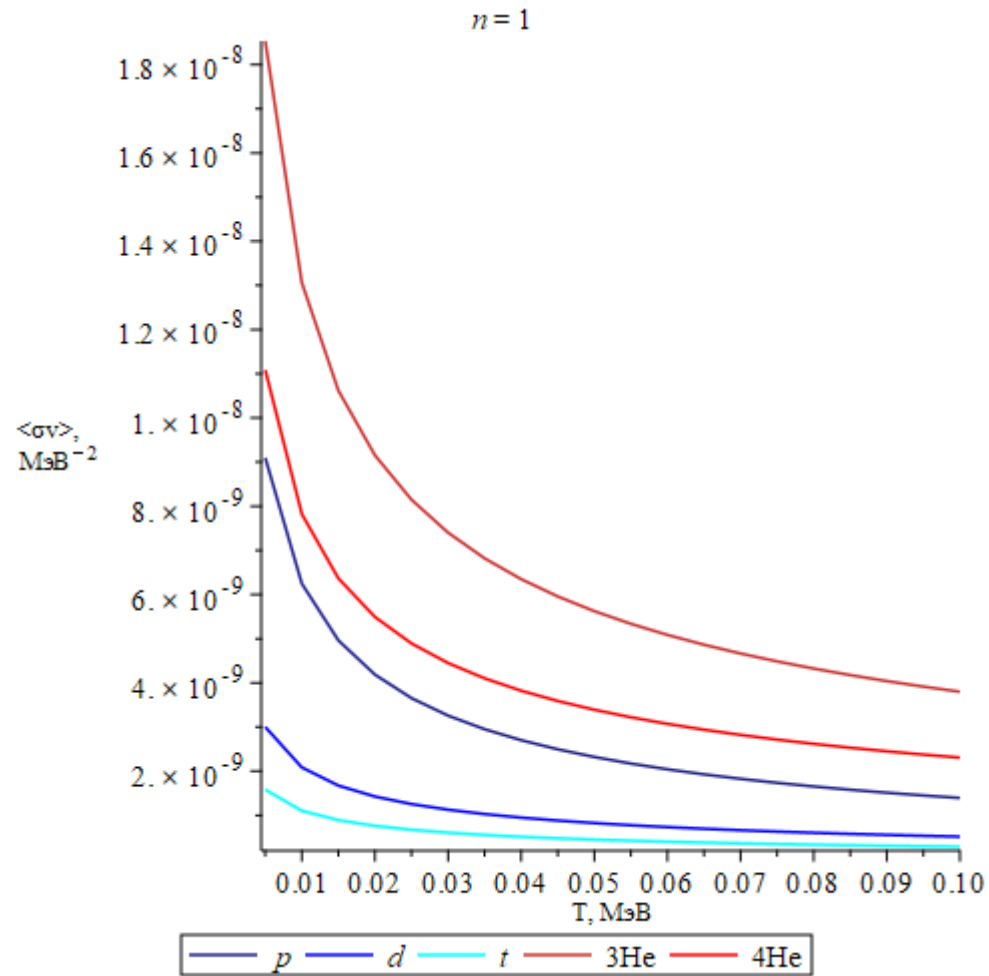
- Скорости



Модифицированный нуклеосинтез

Скорости «тёмной» рекомбинации

- Скорости



Модифицированный нуклеосинтез

Сечения процессов, имеющих стандартные аналоги

$$\begin{aligned} \sigma_{2 \rightarrow 2} &= \int (2\pi)^4 \delta^{(4)}(P_i - P_f) |M_{fi}|^2 \frac{1}{4p_i(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \prod_f \frac{d^3 p_f}{(2\pi)^3 2\varepsilon_f} = \\ &= \int \delta(\varepsilon_i - \varepsilon_f) |M_{fi}^\theta|^2 \frac{1}{16\pi} \frac{1}{p_i(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\varepsilon_3\varepsilon_4} p_f^2 dp_f, \end{aligned} \quad |M_{fi}^\theta|^2 = \int |M_{fi}|^2 d\phi_f d(\cos\theta_f)$$

$XN_1 + N_2 \rightarrow XN_3 + N_4$:

$$\approx \frac{1}{16\pi} \frac{\mu_f \sqrt{\mu_f \mu_i}}{m_1 m_2 m_3 m_4} \sqrt{\frac{E_i + Q}{E_i}} \left| M_{fi}^{\theta, \text{nuclear}} \right|^2 \cdot |\psi(0)|^2.$$

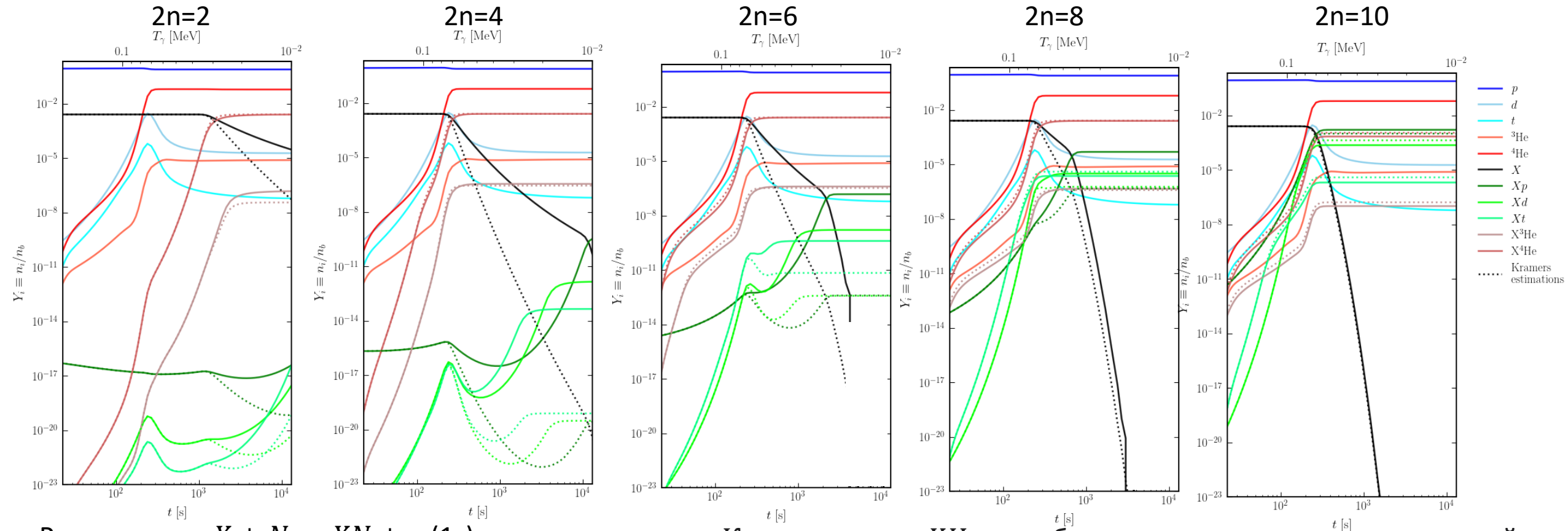
$XN_1 + N_2 \rightarrow XN_3 + \gamma$:

$$\approx \frac{\sqrt{2}}{32\pi} \frac{\sqrt{\mu_i}}{m_1 m_2 m_3} \frac{E_i + Q}{\sqrt{E_i}} \left| M_{fi}^{\theta, \text{nuclear}} \right|^2 \cdot |\psi(0)|^2.$$

$$|\psi(0)|^2 = \begin{cases} \frac{2\pi\eta}{\exp(2\pi\eta) - 1}, & \text{для поля отталкивания;} \\ \frac{2\pi\eta}{1 - \exp(-2\pi\eta)}, & \text{для поля притяжения;} \\ 1, & \text{при отсутствии кулоновского взаимодействия.} \end{cases}$$

Модифицированный нуклеосинтез

Моделирование нуклеосинтеза ($m=2T_{\text{эВ}}$)



Рассмотрены $X + N \rightarrow XN + \gamma$ (1s) реакции.

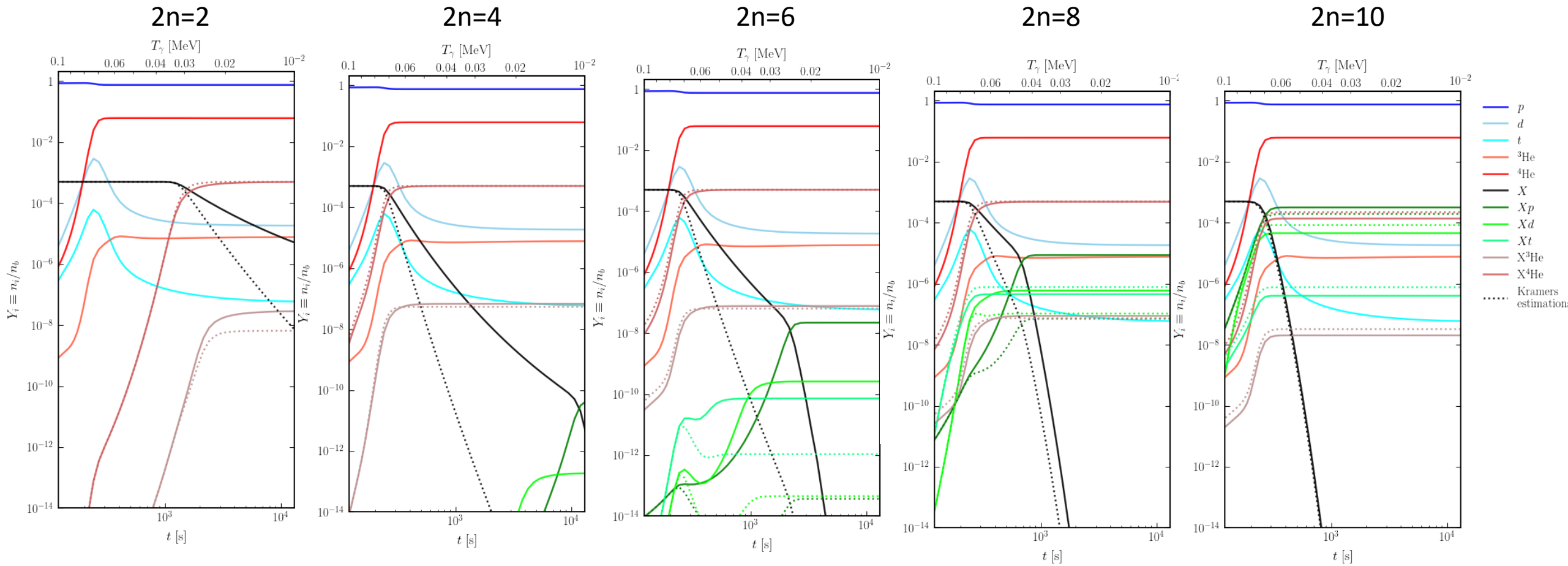
- $n \leq 3$ захват **гелия** – основной канал
- $n \geq 5$ захват **протонов** – основной канал
- $n = 4$ два канала почти равноправны

Концентрации XN могут быть достаточно высоки из-за малой скорости захвата гелия

- Может быть решено учётом возбуждённых состояний

Модифицированный нуклеосинтез

Моделирование нуклеосинтеза



Заключение

В ходе данной работы:

- Были проанализированы новые экспериментальные ограничения на тёмные атомы. Замечено, что, хотя в целом ограничения на SIMP справедливы, частицы скрытой массы могут избегать обнаружения в каждой отдельной установке из-за роста сечения упругого взаимодействия с уменьшением скорости за счёт взаимодействия со средой.
- Проведён модельно-независимый анализ закалки сфалеронных переходов. Выявлены общие закономерности. Результаты применены к двум пробным моделям. Учтены современные ограничения на лептонную асимметрию.
- Оценены энергии связи для простейших связанных состояний χN . Продолжается работа по изучению влияния принятых приближений на результаты.
- Найдены скорости ряда реакций с участием тёмных ионов для температур нуклеосинтеза. Выявлены зависимости от зарядов и масс участвующих частиц.

Приложение

Апробация

- **Публикаций по теме диссертации в научных изданиях за 5 и 6 семестры:**
 - Beylin V., Khlopov M., Sopin D. Formation of dark atoms // Physics of atomic nuclei. 2025. Vol. 88. PP. 535–539 (Q3)
 - A Dark Atom Solution for Direct Dark Matter Investigation. Universe/P. Belli, R. Bernabei, V.A. Beylin et al. // Universe. 2026. Vol. 12, No. 4. Article 116 (Scopus Q1, WoS Q2)
<https://doi.org/10.3390/universe12040116>
- **Апробация на конференциях результатов по теме диссертации:**
 - XXVIII Bled Workshop "What comes beyond the Standard models", 9-17 июля 2025, международная
Статья: Anomalous Isotopes In Dark Atoms models/ Baliño M.I [et. al.] //Bled Workshops in Physics. 2025. Vol. 26. pp. 31-37
 - Interaction of heavy multiply charged particles with light nuclei during Big Bang nucleosynthesis, The 3rd International Online Conference on Universe, Satellite Workshop, 4-6 и 9 марта, онлайн
- **Участие в грантах:**
 - Комплексное исследование физических оснований и проявлений темной материи во Вселенной на масштабах от Метагалактики до Земли, МИНОБРНАУКИ РОССИИ, FENW-2026-0028
 - Космомикрофизика структур скрытой массы Вселенной, РФФ, № 25-22-00006

- Всего публикаций к защите:
 - Beylin V., Khlopov M., Sopin D. Asymmetric Dark Matter in Baryon Asymmetrical Universe // Symmetry. 2024. Vol. 16, No. 3. Article 311 <https://doi.org/10.3390/sym16030311> (Q2)
 - Dark atoms of nuclear interacting dark matter. Universe/ V.A. Beylin, T.E. Bikbaev, M.Yu. Khlopov et al. // Universe. 2024. Vol. 10, No. 9. Article 368 <https://doi.org/10.3390/universe10090368> (Scopus Q1, WoS Q2)
 - Beylin V., Khlopov M., Sopin D. Formation of dark atoms // Physics of atomic nuclei. 2025. Vol. 88. PP. 535–539 (Q3)
 - A Dark Atom Solution for Direct Dark Matter Investigation. Universe/P. Belli, R. Bernabei, V.A. Beylin et al. // Universe. 2026. Vol. 12, No. 4. Article 116 <https://doi.org/10.3390/universe12040116> (Scopus Q1, WoS Q2)

Приложение

Педагогическая практика

- Консультирование НИРС:
 - Балиньо М. И. (Б22-102)
 - Мвилима Дж. (Б22-102)
 - Байкова С.Ф. (Б23-102)

Приложение

Педагогическая практика

№ п/п	Планируемые формы организационной, методической учебной работы (лабораторные, практические, семинарские занятия, пробные лекции, курсовые и дипломные работы), руководство НИРС	Количество часов	Календарные сроки проведения работ
1.	Руководство НИРС	55	01.09.2024 – 26.06.2026
2.	Контроль НИРС и дипломных работ	55	26.12.2024 - 28.12.2024, 06.05.2025 – 27.06.2025, 24.12.2025 – 30.01.2026, 08.05.2026 – 26.06.2026
3.	Руководство подготовкой научных статей и докладов студентами	12	01.06.2025 - 01.11.2025
4.	Учебно-методическая работа	14	01.09.2024 – 26.06.2026
5.	Организационная работа	8	06.05.2025 – 27.06.2025
	Общее количество часов	144	

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

Отчет о «Научно-исследовательской деятельности
аспиранта и подготовке к защите диссертации на
соискание ученой степени кандидата наук» за
четвёртый семестр

«Исследование физических оснований и космофизических
проявлений моделей асимметричной скрытой массы»

Аспирант
Научная специальность

Д. О. Сопин
1.3.15 «Физика атомных ядер и эле-
ментарных частиц, физика высоких
энергий»

Научный руководитель,
д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Ю. Хлопов

Москва 2026