

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 космомикрорфизических
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

Формирование тёмных атомов

$$N^1 + N^2 \rightarrow N^3 + \gamma/N^4,$$

$$X + N \rightarrow XN + \gamma,$$

$$XN^1 + N^2 \rightarrow XN^3 + \gamma/N^4,$$

$$XN^1 + XN^2 \rightarrow X_2N^3 + \gamma/N^4.$$

Содержание

- Модифицированный нуклеосинтез
 - Структура тёмных ионов и молекул
 - Температура рекомбинации
 - Концентрация тёмных ионов: простейший случай
- Заключение
- Приложение
 - Апробация
 - Педагогическая практика

Модифицированный нуклеосинтез

Структура тёмных ионов и молекул

n	A			
	H	He	Li	Be
1	B	4	3	T
2	4	3	T	T
3	3	T	T	T
4	3	T	T	T
5	2	T	T	T

Таблица 2.1 — Структура тёмных ионов XN .

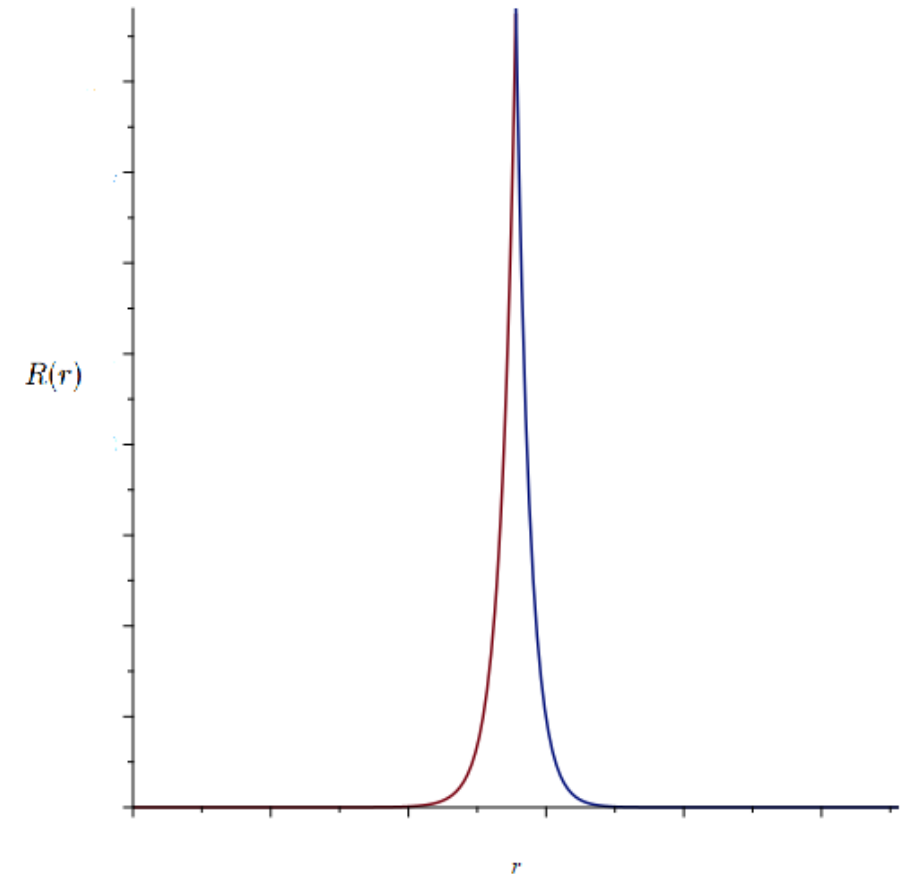
Модифицированный нуклеосинтез

Структура тёмных ионов и молекул

$$\begin{cases} P_{\text{in}}(r)'' + \left(-\frac{1}{4} + C_{\text{in}} \exp(-B_{\text{in}} r) \right) P_{\text{in}}(r) = 0, \\ P_{\text{out}}(r)'' + \left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{r} \right) P_{\text{out}}(r) = 0, \end{cases}$$

$$P_{\text{in}}(0) = 0, \quad P_{\text{in}}(R_{He}) = P_{\text{out}}(R_{He}), \quad P_{\text{out}}(\infty) = 0.$$

+ условие нормировки



Модифицированный нуклеосинтез

Температура рекомбинации

$$T_{\text{rec}} = E_{X-N} \left(\ln \left(\frac{g_X g_N}{g_{XN}} \left(\frac{m_N T_{\text{now}}^2}{2\pi E_{X-N}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{n_N^{\text{now}}} \right) \right)^{-1}$$

$$E_{X-N}^{\text{Bohr}} = 2n^2 Z^2 \alpha^2 m_N = \frac{1}{2m_N r_D^2}$$

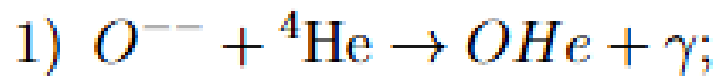
$$[1] \quad E_{W-N}^{\text{Thompson}} = \frac{3 Z_X Z_N \alpha}{2 r_N} \left(1 - \sqrt{\frac{r_B}{r_N}} \right)$$

n	$T_{\text{rec}}, \text{ кэВ}$			
	p	D	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
1	3 (B)	4 (B)	28 (B)	37 (B)
2	13 (B)	19 (B)	~ 42 (T)	85 (T)
3	29 (B)	44 (B)	~ 116 (T)	180 (T)
4	54 (B)	79 (B)	~ 198 (T)	285 (T)
5	86 (B)	~ 126 (B)	~ 286 (T)	395 (T)

- $n < 4$ the dominant branch is
 $X + \text{He} \rightarrow X\text{He} + \gamma$
- $n \geq 4$ it is
 $X + \text{H} \rightarrow X\text{H} + \gamma$

Модифицированный нуклеосинтез

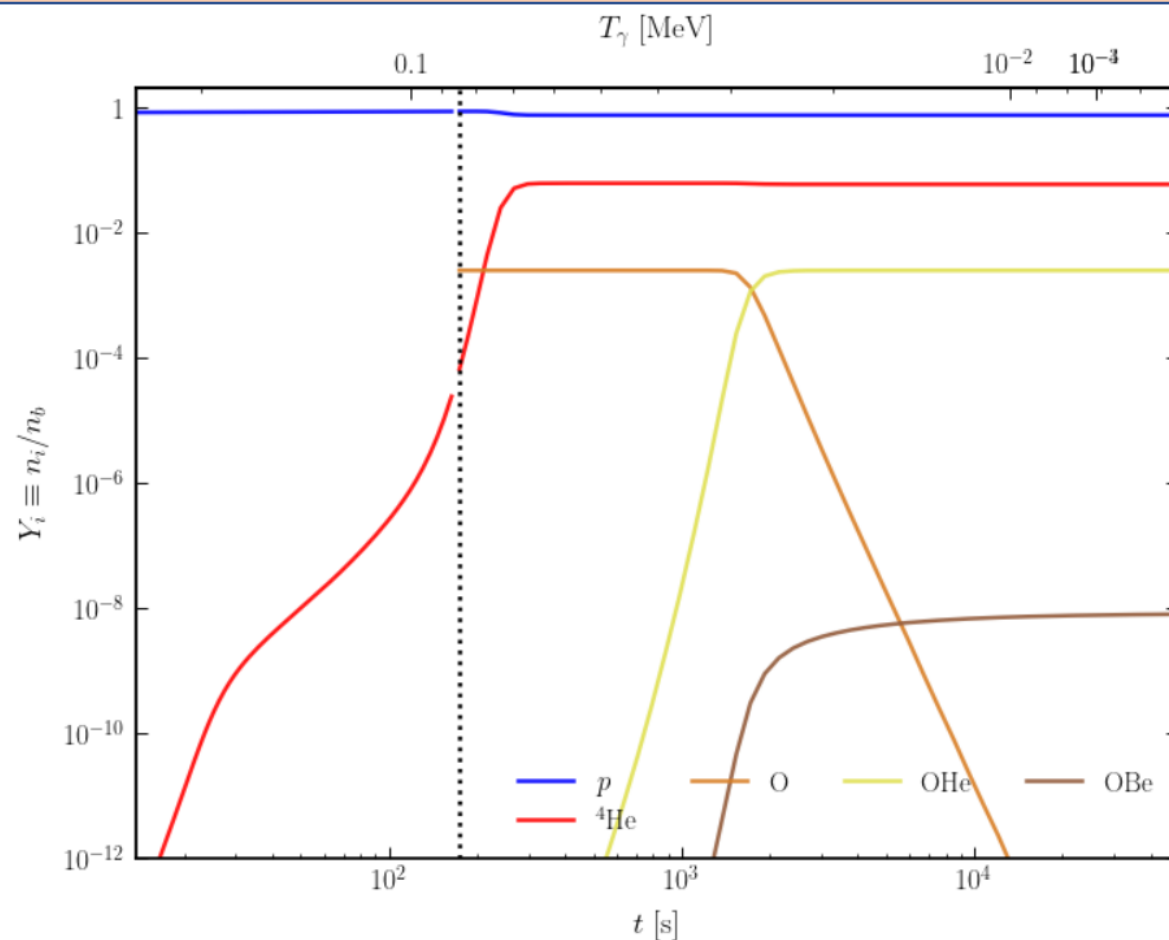
Концентрация тёмных ионов: простейший случай



$$[2] \langle \sigma v \rangle_{\text{rec}} = \frac{32}{3} \sqrt{\frac{2\pi E_{X-N}}{3m_N}} (Z_X Z_N \alpha)^3 r_B^2 \cdot \left(\frac{E_{X_N}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\ln \left(\frac{E_{X_N}}{T} \right) + \gamma \right),$$

$$[3] \langle \sigma v \rangle = \frac{f\pi\alpha}{m_p^2} \frac{3}{\sqrt{2}} \left(\frac{Z}{A} \right)^2 \frac{T}{\sqrt{Am_p E}},$$

$$\frac{n_O}{n_b} \approx 8.7 \cdot 10^{-19}, \quad \frac{n_{O\text{He}}}{n_b} \approx 2.5 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{n_{O\text{Be}}}{n_b} \approx 8.1 \cdot 10^{-9}.$$



[2] Kotelnikov I. A., Milstein A. I. Electron radiative recombination with a hydrogen-like ion // Physica Scripta. — 2019. — Vol. 94, no. 5. — P. 055403. — ISSN 1402-4896..

[3] Khlopov M. Y., Mayorov A. G., Soldatov E. Y. Dark Atoms of the Uni-verse: towards OHe nuclear physics. — 2010. — arXiv: 1011.4586[astro-ph.CO]

[4] LINX: A Fast, Differentiable, and Extensible Big Bang Nucleosynthesis Package / C. Giovanetti [et al.]. — 2024. — arXiv: 2408.14538[astro-ph.CO].

Заключение

Был рассмотрен процесс формирования тёмных атомов (захвата лёгких ядер многозарядными частицами) на этапе нуклеосинтеза:

- Оценены температуры рекомбинации для различных зарядов;
Вывод: при больших зарядах ($n > 3$) сценарий рекомбинации тёмных атомов должен меняться. Это потенциально может дать ограничения на модель, однако требует более точного описания внутренней структуры тёмных атомов томпсоновского типа.
- Найдены концентрации связанных состояний для O^{--}
Вывод: наблюдается перепроизводство аномальных изотопов гелия. В дальнейшем следует учесть больше реакций, аккуратнее пересчитать сечения процессов.

Приложение

Апробация

- **Публикаций по теме диссертации в научных изданиях:**

- 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)

- **Апробация на конференциях результатов по теме диссертации:**

- XXVII Bled Workshop "What comes beyond the Standard models", 8-17 июля 2024, международная

Статья: Beylin V.A., Khlopov M.Yu., Sopin D.O. Problems of dark atom cosmology // Bled Workshops in Physics. 2024. 25(1). P. 17-25

- VII International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2024), 22-25 октября 2024, международная

Статья: Beylin V., Khlopov M., Sopin D. Formation of Dark Atoms // Physics of Atomic Nuclei — 2025. — Vol. 88, no 3.

- **Готовится:** совместная статья с группой эксперимента DAMA/LIBRA по вопросу поиска тёмных атомов

- **Участие в грантах:**

- Исследование космомикрорфизических процессов в Галактике и их связи с динамикой магнитосферы и ионосферы Земли, МИНОБРНАУКИ РОССИИ, GZ0110/23-10-IF
- Космомикрофизика структур скрытой массы Вселенной, РНФ, № 25-22-00006
- Подана заявка на Мегагрант РНФ

Приложение

Педагогическая практика

- Консультирование НИРС:
 - Балиньо Аначе Махела Ирене (Б22-102), 2 семестра
 - Мвилима Джошуа (Б22-102), 2 семестра
 - Гонсалес Андрес (Б22-102), 1 семестр

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 космомикрорфизических
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