



Выпускная квалификационная работа бакалавра

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ В МОДЕЛЯХ ТЁМНЫХ АТОМОВ

Студент: М. И. Балиньо

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. М. Ю. Хлопов

Научный консультант: Д. О. Сопин

25.06.2026

Актуальность и научная проблема

- Скрытая масса составляет значительную часть плотности энергии Вселенной, но её микроскопическая природа остаётся неизвестной.
- В моделях тёмных атомов стабильная частица X^{-2n} связывается с n -ядрами ${}^4\text{He}$ и образует нейтральное состояние.



- Критическая проверка таких моделей — не приводит ли взаимодействие $X\text{He}$ с лёгкими ядрами к перепроизводству аномальных изотопов.



Цель и задачи работы

Цель

Описать формирование аномального изотопа $X\text{Be}$ и оценить возможность его перепроизводства в процессе первичного нуклеосинтеза.

Задачи

- получить волновую функцию и энергию связанного состояния $X\text{He}$, $X\text{Be}$;
- оценить скорость радиационного захвата;
- оценить концентрацию $X\text{Be}$

Система XHe

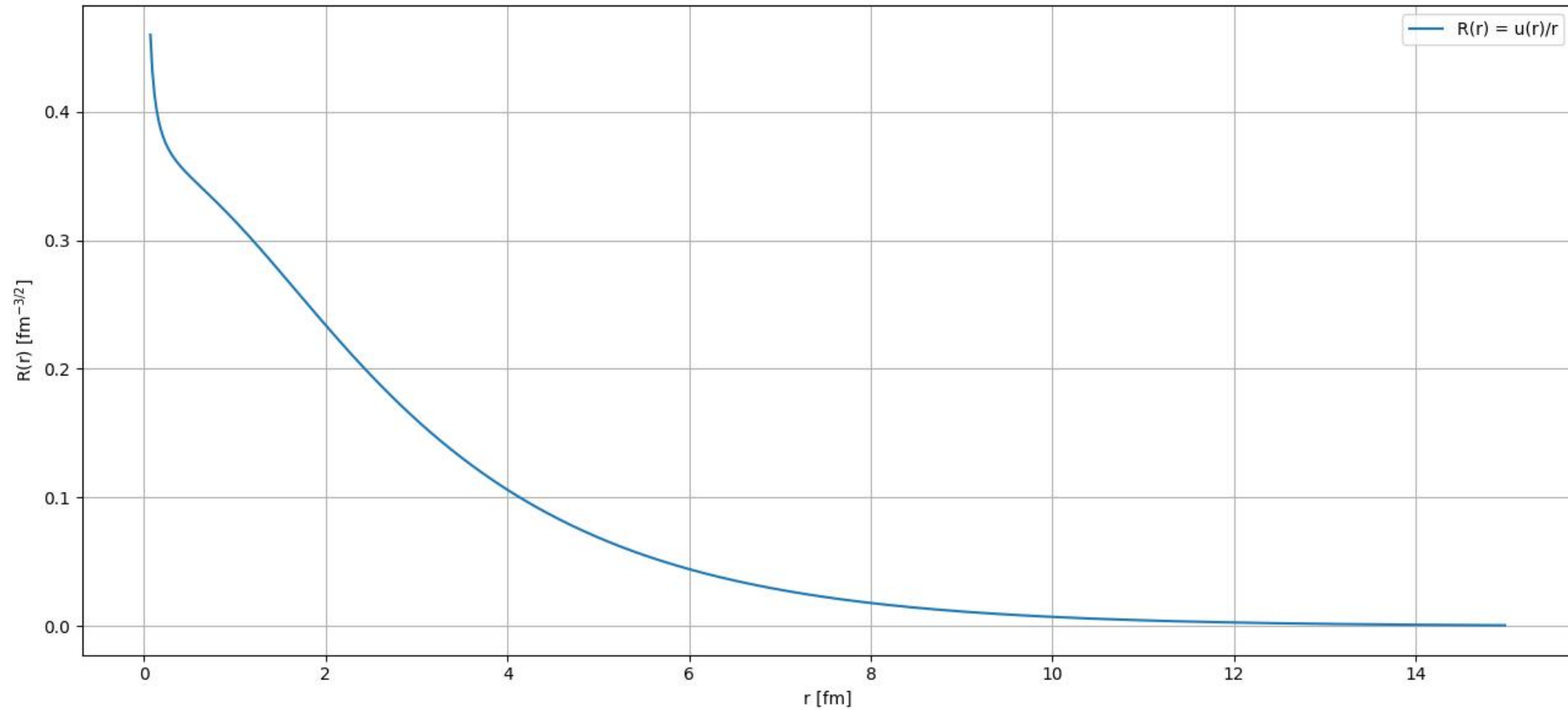
-Взаимодействие определяется кулоновским притяжением с учётом конечного размера ядра через распределение плотности заряда [1]

$$\rho_{\text{He}}(r) = \frac{p_1}{1 + 2 \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \left[\cosh\left(\frac{r}{a}\right) - 1\right]} + p_2 \exp\left[-\frac{(r - c)^2}{d^2}\right]$$

$$B_{X\text{He}} = 1.16 \text{ МэВ.}$$

[1] A. S. Bazhin and V. V. Samarin, "Study of the Structure of the ^9Be Nucleus in the Alpha-Cluster Model by the Method of Hyperspherical Functions," Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 88, no. 8, 1177–1184 (2024). doi: 10.1134/S1062873824707281

Волновая функция XHe



Система XBe

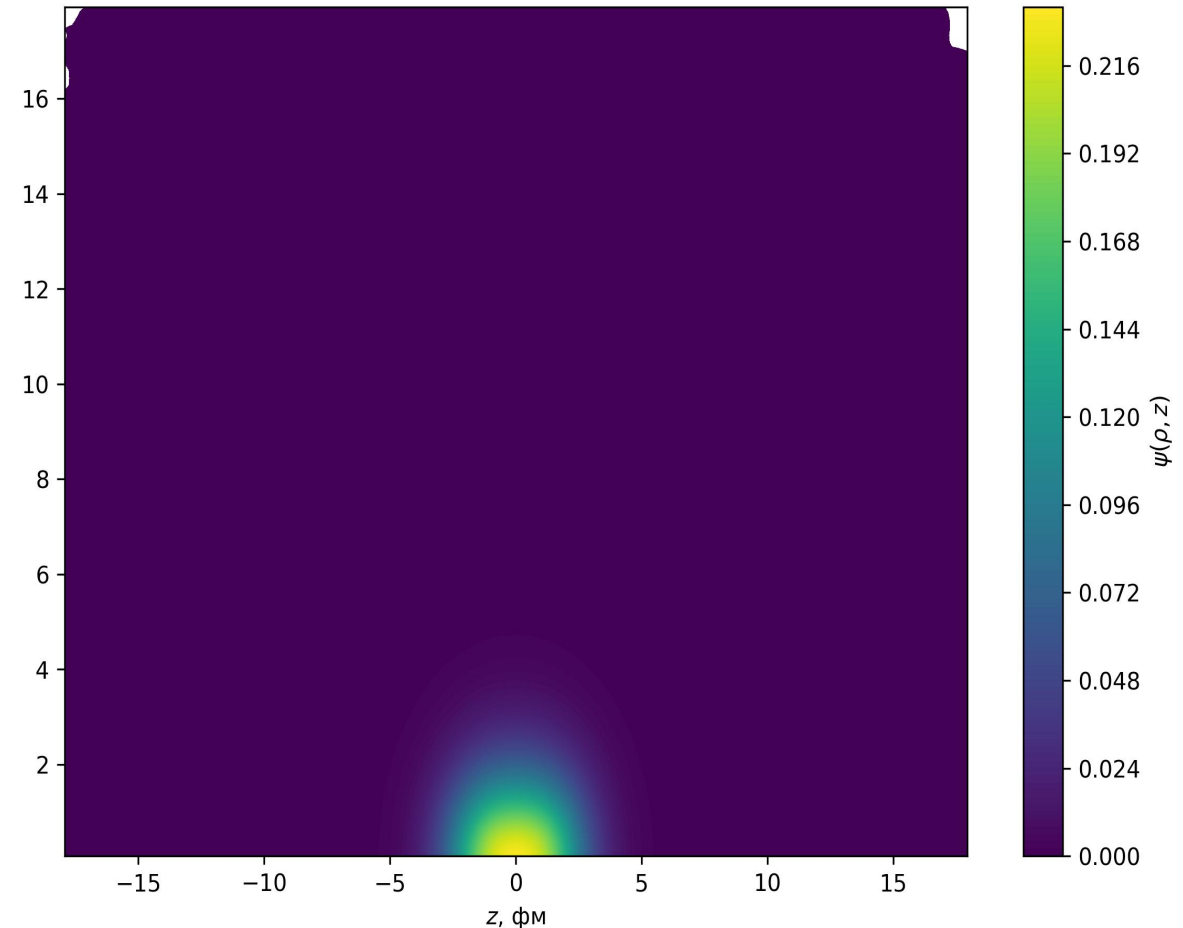
- Ядро ${}^8\text{Be}$ рассматривается как две α -частицы
- Плотность заряда задаётся как сумма двух смещённых плотностей ${}^4\text{He}$:

$$\rho_{\text{Be}}(\vec{R}, \vec{s}) = \rho_{\text{He}}\left(\vec{R} - \frac{\vec{s}}{2}\right) + \rho_{\text{He}}\left(\vec{R} + \frac{\vec{s}}{2}\right).$$

$$s = 3.4 \text{ фм},$$

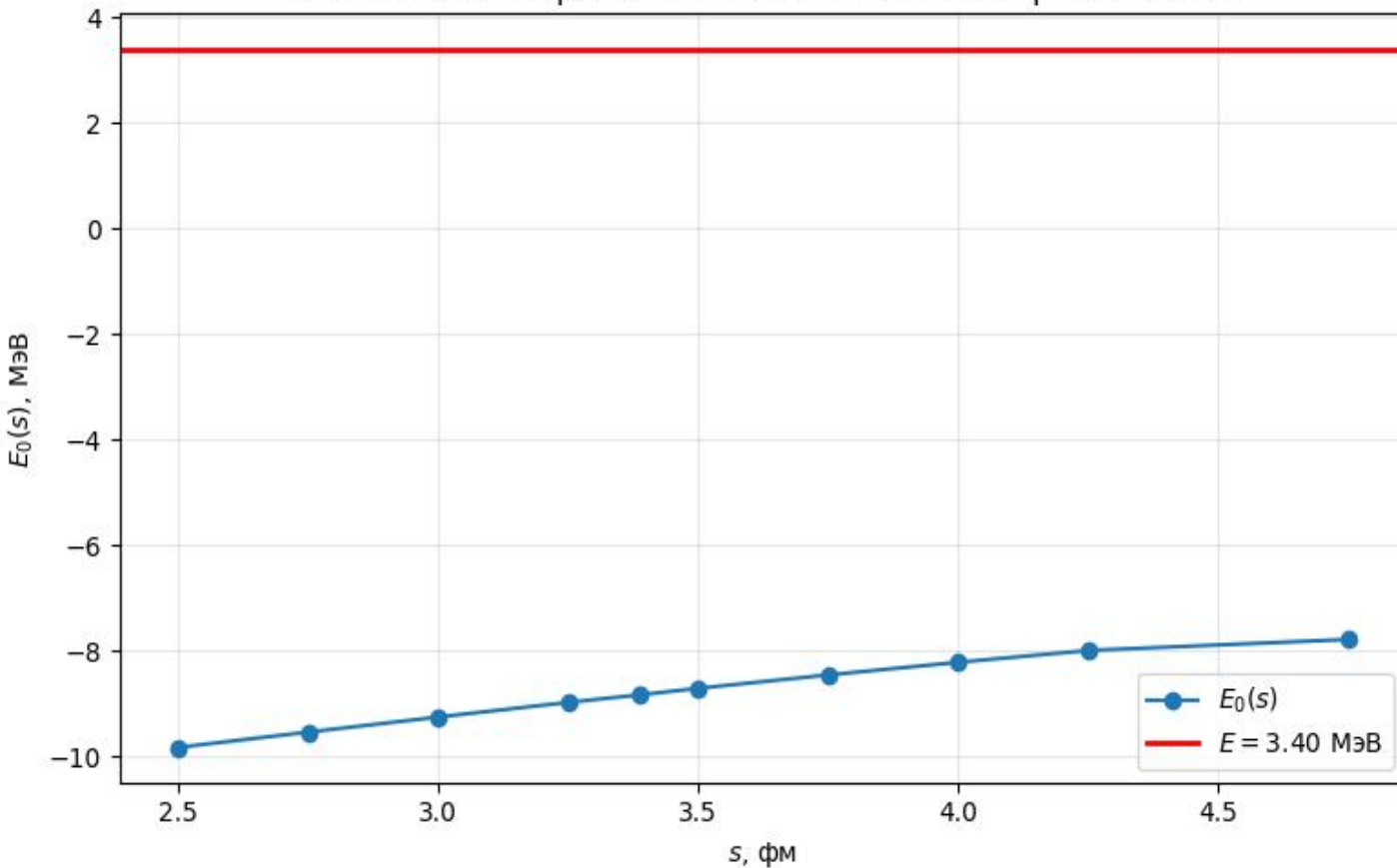
Основной результат: волновая функция локализуется в области между двумя α

Волновая функция основного состояния



Зависимость энергии от расстояния между α частицами

Зависимость энергии основного состояния от расстояния s



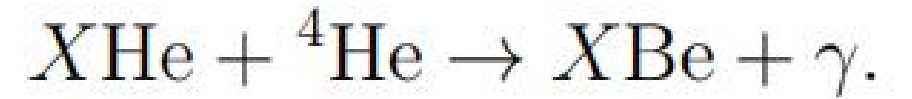
Основной результат:

При увеличении расстояния между α частицами энергия связи системы уменьшается

Сравнение с работой Ахмедова и Поспелова [2]

$$X^{--} - {}^8\text{Be} : 3.40 \text{ MeV.}$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА



Скорость реакции определяется квадратом матричного элемента перехода:

$$\sigma v = \frac{\alpha Z_{\text{He}}^2 \omega_{\gamma}^3}{2\pi} \sum_{\lambda} \int d\Omega_{\gamma} |I_{\lambda}|^2$$

результат:

$$\sigma v = (2.22 \pm 0.17) \times 10^{-21} \text{ cm}^3/\text{s}.$$

Численная оценка образования XBe в LINX

Стандартная сеть первичного нуклеосинтеза была расширена двумя дополнительными состояниями и одним основным каналом образования XBe.

$$Y_{XHe}^{inicial} = 2.05 \times 10^{-3}, \quad Y_{XBe}^{final} = 1.5 \times 10^{-3}.$$

Это означает, что около 75 % начальной концентрации XHe было преобразовано в состояние X Be.

Основные результаты и выводы

- Получены волновые функции связанных состояний $X\text{He}$ и $X\text{Be}$.
- Показано, что для системы $X\text{Be}$ существенна α -кластерная структура ядра.
- Оценена скорость радиационного захвата:
 $\sigma v = (2.22 \pm 0.17) \times 10^{-21} \text{ cm}^3/\text{s}$.
- Для модифицированной сети реакции в LINX было получено $Y_{X\text{Be}} = 1.5 \times 10^3$.
- Результат указывает на возможное перепроизводство $X\text{Be}$

Важно

Это предварительный вывод: в расчёте был включён основной канал образования $X\text{Be}$, но не были добавлены каналы последующей эволюции $X\text{Be}$.

Дальнейшее развитие работы

- расширить сеть LINX каналами разрушения и преобразования XBe;
- учесть реакции XBe с лёгкими ядрами и возможное образование более тяжёлых связанных состояний;
-

Главная идея продолжения

Понять, является ли образование XBe реальной проблемой для модели или его концентрация может снизиться за счёт дальнейшей ядерной эволюции.





Спасибо за внимание

М. И. Балиньо
НИЯУ МИФИ · 2026

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ В МОДЕЛЯХ ТЁМНЫХ АТОМОВ

Дополнительный слайд

$$\sigma v = \frac{\alpha Z_{\text{He}}^2 \omega_\gamma^3}{2\pi} \sum_\lambda \int d\Omega_\gamma \left| \int d^3 r_1 d^3 r_2 \psi_{\text{BeX}}^* \left(\frac{\vec{r}_1 + \vec{r}_2}{2} \right) \psi_{\text{Be}}^* (|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|) \right. \\ \left. \times \vec{\epsilon}_\lambda \cdot (\vec{r}_1 + \vec{r}_2) \psi_{\text{HeX}}(\vec{r}_1) \psi_{\text{He}}(\vec{r}_2) \right|^2,$$