

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 работе на тему:
Аномальные изотопы в моделях тёмных атомов

Научный руководитель
д.ф-м.п, проф

_____ М. Ю. Хлопов

Научный консультант

_____ Д. О. Сопин

Выполнила
студентка группы Б22-102

_____ М. И. Балиньо

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	2
2	Цели и задачи исследования	3
3	Темные атомы и их взаимодействие с ядрами	3
4	Расчёт численной плотности OBe с помощью модели нуклеосинтеза LINX	4
4.1	Космологические параметры и начальные условия	4
4.2	Результаты моделирования	5
4.3	Физические последствия	5
5	Заключение	6

1. ВВЕДЕНИЕ

Скрытая масса, составляет около $\sim 26\%$ плотности энергии вселенной, природа которой является одним из важнейших направлений исследования[1]. Мы знаем о её существовании благодаря таким эффектам, как гравитационное линзирование, анизотропия реликтового излучения, а также крупномасштабной структуре Вселенной.[2; 3]

Одно из объяснений скрытой массы связано с тёмными атомами. В этой гипотезе вводится частица с электрическим зарядом $-2p$, которая в период нуклеосинтеза может образовывать темные атомы объясняющие скрытую массу Вселенной. Такие атомы, образуемые в период нуклеосинтеза, могут участвовать во взаимодействии с продуктами нуклеосинтеза, играя важную роль на ранних этапах эволюции Вселенной[3] Для самосогласованного описания ядерных процессов в этот период требуется анализа захвата темными атомами ядер гелия, при котором могут образовываться ядра аномального гелия. Поэтому задача состоит в том, чтобы провести расчет процессов такого захвата

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной целью данной работы является изучение процессов захвата лёгких ядер атомами скрытой массы и анализ их влияния на физические процессы в ранней Вселенной.

3. ТЕМНЫЕ АТОМЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЯДРАМИ

В рамках данного проекта предполагается, что атомы скрытой массы, такие как XHe , способны взаимодействовать с лёгкими атомными ядрами, такими как ядра гелия.

В нашей задаче мы анализируем ситуацию, когда OHe ($n=1$) захватывают ядро He на свою боровскую орбиту.

Скорость захвата OHe ядрами может быть рассчитана с использованием аналогии с радиационным захватом нейтрона протоном с учётом следующих факторов:

1. отсутствие $M1$ -перехода, что следует из закона сохранения орбитального момента;
2. подавление $E1$ -перехода в случае OHe .

Поскольку OHe является изоскалярным, изовекторный $E1$ -переход в системе OHe -ядро возможен только благодаря эффекту нарушения изоспина, который можно оценить через фактор $f \sim 10^{-3}$, соответствующий относительной разнице масс нейтрона и протона.

В результате скорость радиационного захвата OHe ядром с атомным номером A и зарядом Z на энергетический уровень E в среде с температурой T задаётся следующим выражением[4]:

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

В нашем случае $Z(He) = 2$, $A(He) = 4$, а E — это энергия реакции, которая определяется как энергия связи и равна 1.6 МэВ.

После подстановки всех значений в уравнение и оценки при температурах порядка 100 кэВ, мы получили, что значение сечения для данного процесса находится на уровне порядка 10^{-36} см^2 .

4. РАСЧЁТ ЧИСЛЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ОВЕ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ НУКЛЕОСИНТЕЗА LINX

Для количественного анализа изменения состава скрытой массы в результате реакции захвата атомом ОНе ядра гелия-4 использовалась численная модель **LINX**, предназначенная для моделирования ядерных реакций в условиях первичного нуклеосинтеза. Модель была адаптирована для учёта дополнительных частиц — ОНе и ОВе — и соответствующих им каналов взаимодействия.

4.1. КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

В расчётах использовались следующие значения космологических параметров:

- плотность барионов: $\Omega_b h^2 = 0,02237$,
- плотность холодной скрытой массы: $\Omega_c h^2 = 0,1200$,
- масса бариона: $m_u \approx 931,494 \text{ МэВ}$,
- масса тёмного атома: $m_{\text{ОНе}} = 2 \times 10^6 \text{ МэВ}$.

Предполагалось, что на начальном этапе вся небарионная плотность вещества Вселенной состоит исключительно из атомов ОНе. Отношение плотностей скрытой массы и барионов:

$$\frac{\rho_{\text{DM}}}{\rho_B} = \frac{0,1200}{0,02237} \approx 5,3643. \quad (1)$$

Соответственно, начальная массовая доля ОНе:

$$Y_{\text{ОНе}} = \left(\frac{\rho_{\text{DM}}}{\rho_B} \right) \left(\frac{m_u}{m_{\text{ОНе}}} \right) \approx 5,3643 \times \frac{931,494}{2 \times 10^6} \approx 0,0025. \quad (2)$$

Массовая доля гелия-4 принималась равной $Y_{\text{He}} = 0,245$, а концентрация ядер OBe на начальном этапе считалась равной нулю. Температура начала моделирования: $T \approx 50$ КэВ.

4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Согласно результатам, полученным с помощью LINX, финальная массовая доля ядер OBe составляет:

$$Y_{\text{OBe}}^{\text{фин.}} \approx 5,25 \times 10^{-15}. \quad (3)$$

Согласно расчётам, только крайне незначительная доля атомов OHe была преобразована в OBe . Это свидетельствует о том, что перепроизводства аномальных изотопов в ранней Вселенной не происходит.

4.3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Реакция захвата гелия атомом OHe представляет собой эффективный механизм изменения состава скрытой массы. Образование ядер OBe может существенно повлиять на дальнейшую космологическую эволюцию, включая распространение лёгких элементов, динамику образования структур и интерпретацию данных экспериментов по поиску скрытой массы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования позволяют сделать важные выводы относительно роли тёмных атомов в современной космологии. Тёмные атомы, представляют собой одну из ключевых моделей скрытой массы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters / Planck Collaboration, N. Aghanim, [et al.] // Astronomy & Astrophysics. — 2020. — Vol. 641.
2. *Khlopov M.* What comes after the Standard Model? // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2021. — Vol. 116. — P. 103824.
3. *Beylin V. A., Khlopov M. Y., Sopin D. O.* Problems of Dark Atom Cosmology // arXiv preprint. — 2024. — arXiv: 2410.13424 [hep-ph].
4. *Khlopov M. Y., Mayorov A. G., Soldatov E. Y.* Composite Dark Matter and Puzzles of Dark Matter Searches // International Journal of Modern Physics D. — 2010. — eprint: arXiv:1003.1144 ; — arXiv:1003.1144 [astro-ph.CO].