

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
5	Применение метода Ахмедова для расчёта сечения реакции	5
6	Заключение	8

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 $-2n$, 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.

5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АХМЕДОВА ДЛЯ РАСЧЁТА СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ

В настоящей работе используется метод Ахмедова–Поспелова для расчёта сечения радиационного захвата в системах с участием тяжёлой отрицательно заряженной частицы X^{--} . Основной целью является определение величины σv , необходимой для вычисления скорости ядерной реакции и последующей оценки образования аномальных изотопов OBe и ОС в ранней Вселенной.

Рассматривается система, в которой тяжёлая частица X^{--} расположена в начале координат, а координаты двух α -частиц (ядер ${}^4\text{He}$) обозначены векторами \vec{r}_1 и \vec{r}_2 . В силу большой массы частицы X^{--} центр масс системы практически совпадает с её положением, что позволяет считать частицу неподвижной.

В рамках α -кластерной модели ядро ${}^8\text{Be}$ трактуется как связанное состояние двух ядер ${}^4\text{He}$, находящихся в относительной s -волне.

В обозначениях статьи Ахмедова–Поспелова выражение сечения ради-

ационного захвата имеет вид

$$\sigma v = \frac{\alpha Z_{\text{He}}^2 \omega_\gamma^3}{2\pi} \sum_\lambda \int d\Omega_\gamma \left| \int d^3 r_1 d^3 r_2 \psi_{\text{BeX}}^* \left(\frac{\vec{r}_1 + \vec{r}_2}{2} \right) \psi_{\text{Be}}^*(|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|) \vec{\epsilon}_\lambda \cdot (\vec{r}_1 + \vec{r}_2) \psi_{\text{HeX}} \right|^2 \quad (4)$$

Здесь $\vec{\epsilon}_\lambda$ — вектор поляризации испущенного фотона, $Z_{\text{He}} = 2$, а ω_γ — энергия фотона. Волновые функции ψ_{HeX} и ψ_{BeX} описывают связанные состояния систем $X\text{--He}$ и $X\text{--Be}$ соответственно, а ψ_{Be} — внутреннюю структуру ядра ${}^8\text{Be}$. Взаимодействие с электромагнитным полем рассматривается в рамках теории возмущений.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для построения волновых функций связанных состояний используется эффективный потенциал взаимодействия, получаемый методом двойной свёртки зарядовых плотностей. В общем виде потенциал взаимодействия между двумя распределёнными системами с плотностями $\rho_1(\vec{r}_1)$ и $\rho_2(\vec{r}_2)$ задаётся выражением

$$U(\vec{r}) = \int d^3 r_1 d^3 r_2 v(|\vec{r} + \vec{r}_2 - \vec{r}_1|) \rho_1(\vec{r}_1) \rho_2(\vec{r}_2), \quad (5)$$

где $v(r)$ — локальное двухтельное взаимодействие, а \vec{r} — расстояние между центрами масс систем.

Поскольку частица X^{--} значительно тяжелее ядер, она рассматривается как точечная и неподвижная. В этом приближении взаимодействие в системах $X^{--}\text{--}{}^4\text{He}$ и $X^{--}\text{--}{}^8\text{Be}$ считается кулоновским, а кулоновский потенциал усредняется по распределению заряда ядер.

ПОТЕНЦИАЛ СИСТЕМЫ $X^{--}\text{--}{}^4\text{He}$

С учётом конечных размеров ядра гелия эффективный потенциал системы $X^{--}\text{--}{}^4\text{He}$ имеет вид

$$U_{X\text{He}}(r) = -8\pi Z_{\text{He}} e^2 \int_0^\infty dk \frac{\sin(kr)}{kr} \rho_{\text{He}}(k), \quad (6)$$

где $\rho_{\text{He}}(k)$ — преобразование Фурье зарядовой плотности ядра ${}^4\text{He}$.

Распределение заряда ядра ${}^4\text{He}$ описывается ферми-распределением (Woods–Saxon)

$$\rho_{\text{He}}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R}{a}\right)}. \quad (7)$$

ПОТЕНЦИАЛ СИСТЕМЫ $X^{--}{}^8\text{Be}$

Для системы $X^{--}{}^8\text{Be}$ используется аналогичный подход. Ядро ${}^8\text{Be}$ рассматривается в α -кластерной модели как система из двух ядер ${}^4\text{He}$, что приводит к дополнительной модуляции потенциала, связанной с их относительным расположением. Эффективный потенциал имеет вид

$$U_{X\text{Be}}(r) = -64\pi e^2 \int_0^\infty dk \frac{\sin(kr)}{kr} \rho_{\text{He}}(k) \cos\left(\frac{kd}{2}\right), \quad (8)$$

где d — расстояние между α -кластерами в ядре ${}^8\text{Be}$.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные эффективные потенциалы используются для численного решения уравнения Шрёдингера и определения волновых функций связанных состояний $X\text{--He}$ и $X\text{--Be}$. Эти волновые функции далее подставляются в выражение для сечения радиационного захвата, что позволяет вычислить величину σv и использовать её для анализа образования аномальных изотопов OBe в ранней Вселенной.

6. 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].