

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
боровского/томпсоновского типа

Научный руководитель:

проф., д.ф.-м.н.

_____ М. Ю. Хлопов

Научный консультант:

_____ Сопин Д. О.

Выполнил:

студент группы Б22-102

_____ Г. А. Гонсалес

Содержание

1. Аннотация
2. Введение
3. Эффект туннелирования
4. Физические параллели
 - (a) Схожесть механизмов взаимодействия
 - (b) Расчёт эффективного сечения
5. Астрофизическая значимость
 - (a) Образование тяжёлых элементов
 - (b) Космические наблюдения
6. Заключение
7. Список литературы

Введение

Тёмная материя составляет около 85% нерелятивистского вещества Вселенной. Выяснение её природы остается важнейшей задачей фундаментальной физики. Среди теоретических моделей выделяется концепция тёмных атомов, в которой частицы тёмной материи взаимодействуют с барионным веществом кулоновской силой, образуя сложные составные системы.

Основной целью данной работы является ознакомление с моделью тёмных атомов и изучение её теоретических основ. Особое внимание уделяется взаимодействию тёмных атомов OHe с ядрами ${}^4\text{He}^{++}$. В рамках исследования проводится анализ факторов, влияющих на вероятность образования связанного состояния BeX , и закладываются основы для оценки сечения этой реакции.

Для достижения поставленных целей в работе рассматриваются аналогии между мюонным катализом и взаимодействием тёмных атомов, а также изучаются ключевые параметры, определяющие эффективность ядерных реакций в данной системе.

1. Темные атомы и их свойства

Тёмные атомы представляют собой гипотетические составные системы, состоящие из частиц тёмной материи, взаимодействующих между собой или с барионным веществом через кулоновские силы либо другие гипотетические взаимодействия. Такие атомы являются потенциальными кандидатами на роль тёмной материи и открывают возможности для объяснения экспериментальных и астрофизических наблюдений, которые не укладываются в рамки стандартной модели холодной тёмной материи.

1.1. Состав и структура тёмных атомов

Тёмный атом состоит из:

- Тяжёлого заряженного ядра (O^{--}), представляющего стабильную частицу тёмной материи, которая может быть аналогом лептонов или экзотическим кластером кварков.
- Протоядерной оболочки в виде ${}^4\text{He}^{++}$, образующей связанное состояние с O^{--} за счёт кулоновской силы.

Эти системы напоминают атомы в барионной материи, однако их динамика определяется специфическими характеристиками, которые дальше рассмотрим в конкретном примере.

1.2. Взаимодействие с барионным веществом

Тёмные атомы взаимодействуют с барионным веществом преимущественно через ядро ${}^4\text{He}$, в то время как O^{--} остаётся эффективно экранированным. Такое экранирование снижает вероятность сильных взаимодействий с обычным веществом, что объясняет трудности в прямом обнаружении тёмных атомов:

- Кулоновское взаимодействие: Электростатическое взаимодействие ${}^4\text{He}$ с ядрами обычной материи играет ключевую роль в их детектировании.
- Нейтральность: Поскольку тёмные атомы в целом являются электрически нейтральными, их столкновения с материей характеризуются малым поперечным сечением, что делает их "невидимыми" для большинства детекторов.

1.3. Свойства и параметры

Ключевые физические параметры тёмных атомов включают:

- Приведённая масса: Для тёмного атома с ядром ${}^4\text{He}$ и компонентой O^{--} приведённая масса определяется выражением:

$$\mu_{\text{dark}} = \frac{m_O m_{\text{He}}}{m_O + m_{\text{He}}}, \quad (1)$$

где m_O и m_{He} — массы O^{--} и ${}^4\text{He}$ соответственно.

- Радиус взаимодействия: Благодаря сильной кулоновской связи радиус системы значительно меньше, чем у обычного атома водорода, что повышает вероятность туннелирования при ядерных взаимодействиях.

- Поперечное сечение взаимодействия: Зависит от энергии и типа столкновений и может быть рассчитано с использованием подходов физики частиц.

2. Квантовые аналоги: Тёмные атомы и мюонные системы

Тёмные атомы, такие как система OHe , обладают структурными и динамическими особенностями, которые делают их аналогичными мюонным атомам. В обоих случаях ключевую роль играет уменьшение эффективного радиуса взаимодействия благодаря наличию тяжёлой заряженной частицы, что облегчает ядерные взаимодействия и делает их важным катализатором ядерных реакций. Один из конкретных случаев, который мы будем анализировать, — это взаимодействие ядра ${}^4He^{++}$ с тёмным атомом OHe , в результате которого может образоваться связанное состояние BeX .

2.1. Структурная аналогия

Мюонные атомы образуются, когда мюон (μ^-) замещает электрон в атоме водорода. Поскольку мюон в 200 раз тяжелее электрона, радиус системы уменьшается пропорционально этой массе, что значительно снижает кулоновский барьер и увеличивает вероятность ядерного слияния.

Аналогичным образом, в тёмных атомах OHe тяжёлая частица O^{--} связывается с ядром ${}^4He^{++}$, формируя систему, размер которой гораздо меньше, чем у обычных атомов. Это уменьшение радиуса обусловлено сильной кулоновской связью между ${}^4He^{++}$ и O^{--} . В результате ядра тёмных атомов обладают высокой плотностью энергии взаимодействия, что делает их значимыми для изучения в контексте астрофизических и экспериментальных сценариев.

2.2. Взаимодействие ${}^4He^{++}$ с тёмными атомами OHe

2.2.1. Кулоновское взаимодействие

Ключевая особенность взаимодействия ${}^4He^{++}$ с тёмными атомами OHe заключается в его электростатической природе. OHe представляет собой нейтральную систему, в которой отрицательно заряженная частица O^{--} полностью экранируется ${}^4He^{++}$ внутри системы. Однако, несмотря на общую нейтральность, наружный гелиевый компонент OHe способен вступать в кулоновское взаимодействие с другими ${}^4He^{++}$ ядрами.

Электростатическое взаимодействие на больших расстояниях определяется следующим потенциалом:

$$U_C(r) = -\frac{Z_{He}Z_{OHe}\alpha}{r},$$

где:

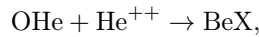
- $Z_{He} = 2$: заряд ядра ${}^4He^{++}$,
- Z_{OHe} : эффективный заряд OHe , связанный с наружной оболочкой 4He ,
- r : расстояние между взаимодействующими частицами,
- α : постоянная тонкой структуры.

Этот потенциал действует как сила притяжения между ${}^4\text{He}^{++}$ и наружной оболочкой OHe . Такое взаимодействие в основном отвечает за эластическое рассеяние и слабую связь на больших расстояниях.

2.2.2. Ядерное взаимодействие

При сближении ядра ${}^4\text{He}^{++}$ и OHe на расстояния порядка фемтометров начинают доминировать ядерные силы. Эти взаимодействия приводят к потенциальным реакциям слияния и образованию новых ядерных состояний.

Одним из таких процессов является:



где BeX представляет собой стабильный или метастабильный изотоп бериллия, связанный с O^{--} . Возможность такой реакции зависит от энергии сталкивающихся частиц и характеристик потенциального барьера, определяемого структурой OHe .

Ключевые параметры, влияющие на вероятность слияния:

Приведённая масса системы:

$$\mu = \frac{m_{\text{OHe}}m_{\text{He}}}{m_{\text{OHe}} + m_{\text{He}}},$$

где m_{OHe} и m_{He} — массы темного атома и ядра ${}^4\text{He}$. При условии, что $m_{\text{O}} > 1 \text{ ТэВ}$, масса m_{OHe} приблизительно равна массе m_{He} . В этом случае приведённая масса системы упрощается и становится примерно равной половине массы ${}^4\text{He}$:

$$\mu \approx \frac{m_{\text{He}}}{2}.$$

Этот факт существенно влияет на параметры системы, поскольку приводит к более компактному размеру взаимодействующей системы и уменьшению характерных энергий, необходимых для преодоления кулоновского барьера.

В следующем разделе будет рассмотрено эффективное сечение этой реакции, включая математическое описание и физические параметры, определяющие её вероятность.

3. Основные моменты расчёта эффективного сечения для образования связанного состояния OBe

Расчёт эффективного сечения для реакции $\text{OHe} + \text{He}^{++} \rightarrow \text{BeX}$ требует учета квантовомеханических, ядерных и термодинамических факторов, определяющих вероятность взаимодействия. Общая формула для эффективного сечения реакции в условиях центра масс имеет вид:

$$\sigma(E) = \frac{\pi}{k^2} T(E) P(E),$$

где:

- $\sigma(E)$ — эффективное сечение реакции при энергии E ,
- $k = \frac{\sqrt{2\mu E}}{\hbar}$ — волновое число, зависящее от приведённой массы системы μ и энергии E ,
- $T(E)$ — вероятность туннелирования через кулоновский барьер (фактор Гамова),
- $P(E)$ — вероятность ядерной реакции на малых расстояниях.

3.1. Волновое число k

Волновое число k определяется как:

$$k = \frac{\sqrt{2\mu E}}{\hbar},$$

где:

- $\mu = \frac{m_{\text{OHe}}m_{\text{He}}}{m_{\text{OHe}}+m_{\text{He}}}$ — приведённая масса системы OHe и ${}^4\text{He}^{++}$,
- E — энергия в системе центра масс,
- \hbar — приведённая постоянная Планка.

Волновое число описывает длину волны де Бройля для системы, что напрямую влияет на вероятность взаимодействия.

3.2. Фактор туннелирования $T(E)$

Малые размеры OHe и высокая плотность энергии взаимодействия способствуют квантовомеханическому туннелированию через кулоновский барьер. Это ключевой процесс, определяющий вероятность сближения ядер OHe и ${}^4\text{He}^{++}$ до расстояний, где начинают доминировать ядерные силы.

Вероятность туннелирования описывается фактором Гамова:

$$T(E) \propto \exp\left(-\frac{2\pi Z_{\text{OHe}}Z_{\text{He}}\alpha}{\hbar v}\right),$$

где:

- $Z_{\text{OHe}} = 2$ — заряд гелиевой части тёмного атома,
- $Z_{\text{He}} = 2$ — заряд ядра ${}^4\text{He}^{++}$,
- α — постоянная тонкой структуры ($\alpha \approx 1/137$),
- v — относительная скорость взаимодействующих частиц.

Этот эффект туннелирования позволяет преодолевать кулоновский барьер даже при низких энергиях, что особенно важно для астрофизических условий, таких как ранняя Вселенная.

3.3. Вероятность ядерной реакции $P(E)$

На малых расстояниях, где ядерные силы начинают доминировать, вероятность ядерной реакции $P(E)$ определяется перекрытием волновых функций взаимодействующих ядер и потенциалом взаимодействия. Эта вероятность может зависеть от:

- ядерных характеристик, таких как радиус и плотность ядерной оболочки,
- эффекта экранирования, связанного с внутренней структурой тёмного атома OHe,
- наличия возможных новых взаимодействий в тёмном секторе.

3.4. Общая формула эффективного сечения

Эффективное сечение $\langle\sigma v\rangle$ в астрофизических условиях может быть усреднено по распределению скоростей Максвелла-Больцмана:

$$\langle\sigma v\rangle = \int_0^\infty \sigma(E)v f(v) dv,$$

где:

- v — относительная скорость сталкивающихся частиц,
- $f(v)$ — распределение скоростей Максвелла-Больцмана:

$$f(v) \propto v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T}\right),$$

где k_B — постоянная Больцмана, а T — температура среды.

Заключение

Основной целью данной работы было ознакомление с моделью тёмных атомов и изучение её теоретической основы. В рамках исследования рассматривался конкретный случай — образование связанного состояния $O\text{Ve}$, который представляет собой одну из самых интересных реакций с точки зрения космофизики. Особое внимание уделялось анализу всех факторов, влияющих на расчёт эффективного сечения данной реакции.

В результате работы была изучена структура модели тёмных атомов, их взаимодействие с ядрами ${}^4\text{He}^{++}$, а также аналогия с мюонным катализом, что позволило заложить основы для оценки сечения реакции $O\text{He} + \text{He}^{++} \rightarrow \text{VeX}$. Полученные результаты позволяют обобщить подходы к моделированию подобных систем, подчеркнув их значимость как в астрофизическом контексте, так и в экспериментальных исследованиях.

Практическая значимость работы заключается в возможности дальнейшего использования представленных методов для оценки взаимодействий тёмной материи с обычным веществом и прогнозирования экспериментальных сигналов, связанных с этими процессами. Для дальнейшего исследования данной области важно:

- Провести численные расчёты эффективного сечения реакции с учётом астрофизических условий.
- Изучить влияние различных параметров модели (массы, заряда O^{--} , температуры) на динамику взаимодействий.
- Подготовить рекомендации для экспериментальных исследований, направленных на детектирование тёмных атомов и их взаимодействий.

Таким образом, данное исследование способствует более глубокому пониманию свойств тёмных атомов и их роли в космологии и астрофизике, а также закладывает основы для дальнейшего изучения взаимодействий тёмной материи с обычным веществом.

Список литературы

- [Beylin, Others(2024)A. Beylin, Others] Beylin A., Others . Dark Atoms of Nuclear Interacting Dark Matter // Universe. 2024. 10. 368.
- [Collaboration(2000)T. M. H. Collaboration] Collaboration TRIUMF Muonic Hydrogen. Resonant Formation of $d\mu t$ Molecules in Deuterium: An Atomic Beam Measurement of Muon Catalyzed dt Fusion // Physical Review Letters. 2000. 85, 3. 467.
- [Kamimura et al.(2023)M. Kamimura, Y. Kino, T. Yamashita] Kamimura M., Kino Y., Yamashita T. Comprehensive study of muon-catalyzed nuclear reaction processes in the $dt\mu$ molecule // Physical Review C. 2023. 107, 3. 034607.
- [Khlopov(2024)M. Y. Khlopov] Khlopov M. Yu. Dark Atoms: Theoretical Foundations and Astrophysical Implications // Hypothetical Astrophysics Journal. 2024. 10. 32–44.
- [Nagamine(2002)K. Nagamine] Nagamine K. Muon Catalyzed Fusion: Past, Present, and Future // Hyperfine Interactions. 2002. 138, 1-4. 1–10.