

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Численное моделирование взаимодействия атома OHe „тёмной“ материи с
ядрами барионного вещества

Руководитель НИР,
д.ф.-м.н. _____ М.Ю. Хлопов
Студент _____ Т.Э. Бикбаев
Консультант по НИР,
канд.ф.-м.н. _____ А.Г. Майоров

Москва 2019


Содержание

Введение	2
1. Система OHe	6
2. Конечный размер ядер.	9
3. Моделирование взаимодействия атома OHe с ядром барионного вещества в лабораторной системе отсчёта. Кулоновские силы.	10
4. Добавление ядерной силы.	12
5. Заключение	14
Список используемых источников	15

Введение

Главной причиной актуальности данной работы является то, что одной из фундаментальных проблем современной физики продолжает оставаться проблема скрытой массы. До сих пор остаётся неизвестным, что в точности из себя представляет „тёмная“ материя.

Согласно современной космологии, „тёмная“ материя, составляющая примерно 25% от всей массы Вселенной и доминирующая в её материальном составе, является небарионной и связана с „новой“ физикой. Если она состоит из частиц, то эти частицы предсказываются за пределами Стандартной модели. Для того, чтобы эти частицы могли рассматриваться в качестве кандидатов на роль скрытой массы, они должны удовлетворять некоторому набору условий: они должны быть стабильными, должны обеспечивать измеренную плотность „тёмной“ материи и отделиться от плазмы и излучения, по крайней мере до начала стадии доминирования вещества. Неопределённость в выборе частиц скрытой массы порадила множество разнообразных теорий, предлагающих на роль кандидатов „тёмной“ материи различные объекты. Однако самый простой способ удовлетворить вышеперечисленным условиям - это задействовать нейтральные, элементарные, слабовзаимодействующие частицы. Кроме того, возможны более развитые модели скрытой массы. В частности, новые стабильные частицы могут обладать некоторой новой фундаментальной симметрией и соответствующим ей сохранённым зарядом. Если частицы обладают новой калибровочной $U(1)$ -симметрией, они могут связываться с помощью соответствующего кулоновского взаимодействия в составных „тёмных“ атомах, испуская невидимые $U(1)$ фотоны.

Здесь рассматриваются сложные сценарии „тёмной“ материи, в которых новые стабильные частицы, имеющие обычный электрический заряд, являющиеся в большей степени гипотетическими, не испускающими электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействующими с ним, избегают экспериментального открытия, потому что они скрыты в атомоподобных состояниях и их обнаружение и прямое наблюдение является затруднительным. Основная проблема для этих сценариев состоит в подавлении обилия положительно заряженных частиц, связанных с обычными электронами, которые ведут себя как аномальные изотопы водорода или гелия. Эта проблема неразрешима, если модель предсказывает .

сте с положительно заряженными частицами стабильные частицы с зарядом -1 (E^-). Как только первичный гелий образуется в нуклеосинтезе большого взрыва, он захватывает весь свободный E^- в положительно заряженном $(HeE)^+$ -ионе, предотвращая любое дальнейшее подавление положительно заряженных частиц. Следовательно, чтобы избежать перепроизводства аномальных изотопов, стабильные частицы с зарядом -1 должны отсутствовать, в связи с чем стабильные отрицательно заряженные частицы могут иметь только заряд -2 . Поскольку все эти модели также предсказывают соответствующие $+2$ зарядовые античастицы, космологический сценарий должен обеспечить механизм их подавления, что, естественно, может иметь место в асимметричном случае, соответствующем избытку -2 заряженных частиц, O^{--} . Тогда их положительно заряженные античастицы могут эффективно аннигилировать в ранней Вселенной. После формирования в стандартном нуклеосинтезе большого взрыва $4He$ экранирует заряженные частицы O^{--} в составных $(4He^{++}O^{--})$ О-гелиевых «атомах».[2] Во всех этих формах О-гелия O^{--} ведет себя как лептон или как специфический "кластер тяжелых кварков" с сильно подавленным адронным взаимодействием. Поэтому взаимодействие О-гелия с веществом определяется ядерным взаимодействием He. Эти нейтральные первичные ядерно-взаимодействующие объекты обеспечивают современную плотность скрытой массы и играют роль нетривиальной формы сильно взаимодействующей „тёмной“ материи. Активное влияние этого типа „тёмной“ материи на ядерные превращения требует специальных исследований и развития ядерной физики OHe . Это особенно важно для количественной оценки роли OHe в нуклеосинтезе Большого взрыва и в эволюции звезд.[4]

Привлекательной чертой модели OHe является то, что она освобождает физику скрытой массы от неизвестных особенностей „новой“ физики и включает в себя только один её параметр – массу O^{--} , но в то же время, она требует глубокого понимания деталей известной ядерной и атомной физики, которые до сих пор не так хорошо изучены.

Важность гипотезы OHe также в том, что она может объяснить противоречивые результаты прямого поиска „тёмной“ материи, за счет специфики взаимодействия OHe с веществом подземных детекторов. А именно результаты таких экспериментов как *DAMA/NaI* и *DAMA/LIBRA*, которые дали положительные результаты по обнаружению частиц скрытой массы, но следует ска-

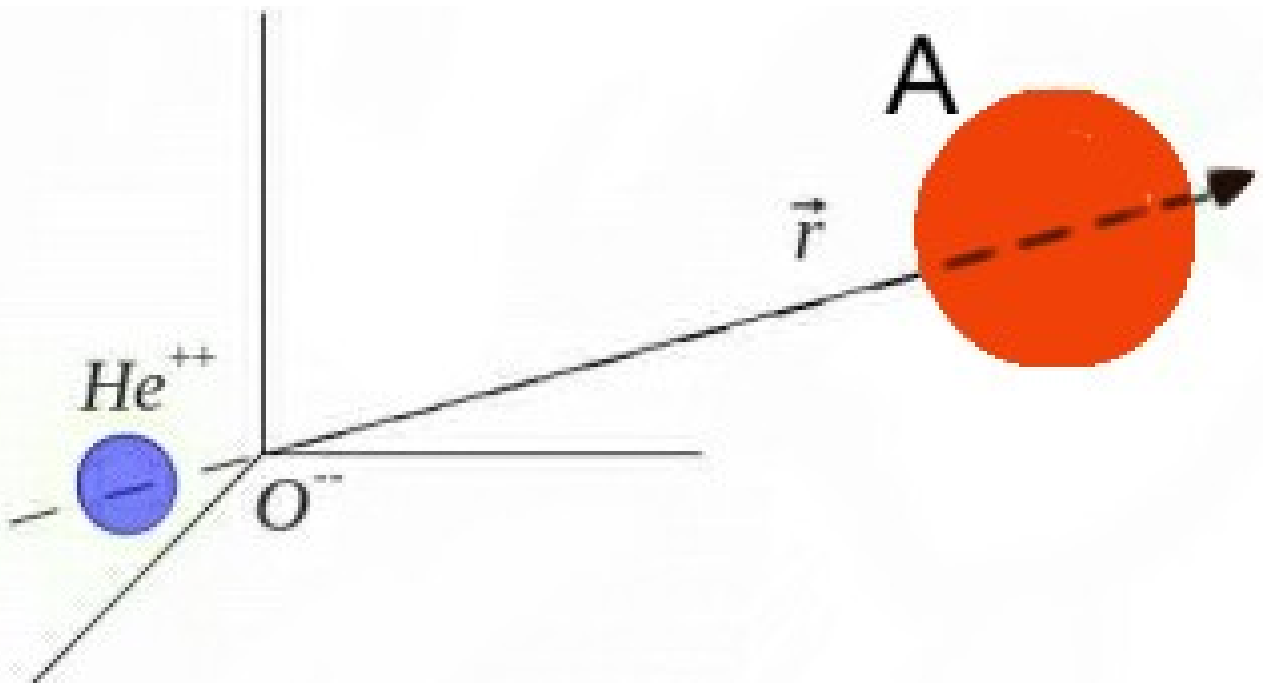


Рисунок 1: Атом О-гелия и внешнее ядро

зять, что есть так же эксперименты, давшие отрицательные результаты, например *XENON100*, *LUX*, *CDMS*.

Замедленный в земном веществе *ONe* не подходит для прямых методов обнаружения подземной „тёмной“ материи, основанных на поиске эффектов отдачи ядер при столкновениях *WIMP*-ов с ядрами обычного вещества. Однако взаимодействие *ONe* с внешним ядром приводит к их низкоэнергетическому связыванию. В пределах неопределенности параметров ядерной физики существует диапазон, в котором энергия связи в системе *ONe–Na* находится в интервале 2-4 кэВ. Радиационный захват *ONe* в это связанное состояние приводит к соответствующему выделению энергии, наблюдаемому как ионизационный сигнал в детекторе *DAMA*. Концентрация *ONe* в веществе подземных детекторов определяется равновесием между поступающим космическим потоком *ONe* и диффузией к центру Земли. Концентрация *ONe* в веществе подземных детекторов быстро регулируется с учетом поступающего космического О-гелия и следует за изменением этого потока. Поэтому скорость радиационного захвата *ONe* должна испытывать годовые модуляции, отраженные в годовых модуляциях ионизационного сигнала от этих реакций. Неизбежным следствием предложенного объяснения является появление в веществе детектора *DAMA/NaI* или *DAMA/LIBRA* аномальных сверхтяжелых изотопов натрия, масса которых примерно на порядок больше, чем

у обычных изотопов этих элементов. Если атомы этих аномальных изотопов не полностью ионизованы, их подвижность определяется атомными сечениями и становится примерно на 9 порядков меньше, чем для O -гелия. Это обеспечивает их сохранение в детекторе. Поэтому масс-спектроскопический анализ этого вещества может обеспечить дополнительную проверку на наличие O -гелиевой природы сигнала *ДАМА*. Методы такого анализа должны учитывать хрупкую природу связанных состояний $OHe - Na$, поскольку их энергия связи составляет всего несколько кэВ.

Взаимодействие OHe с веществом может привести к образованию различных экзотических форм ядерных соединений. При условии, что масса частицы O^{--} составляет около 1.25 ТэВ, гипотеза OHe может объяснить наблюдаемый избыток позитронной линии аннигиляции в центре галактики образованием пар в результате возбуждения атомов OHe , сталкивающихся в этой области.

Одной из главных проблем „тёмных“ атомов OHe является то, что их составляющие могут слишком сильно взаимодействовать с обычным веществом. Это происходит потому что OHe хоть и нейтрален, но априори обладает незэкранированным ядерным притяжением к внешним ядрам вещества, что может привести к разрушению связанной системы O -гелия и образованию аномальных изотопов. В свою очередь на концентрацию этих изотопов в земном грунте и морской воде имеются очень сильные экспериментальные ограничения.[1] Чтобы избежать этой проблемы, предполагается, что эффективный потенциал между OHe и ядром вещества будет иметь барьер, предотвращающий попадание He и/или O^{--} в ядро и обеспечивающий доминантность процессов упругого рассеяния (Рисунок 2). В этих условиях во взаимодействиях O -гелия с веществом доминируют упругие столкновения, что важно для многих аспектов сценария OHe .

В данной исследовательской работе продолжается последовательное численное моделирование взаимодействия „тёмных“ атомов O -гелия с ядрами барионного вещества в пакете Matlab с целью выявления условий существования их низкоэнергетического связанного состояния.

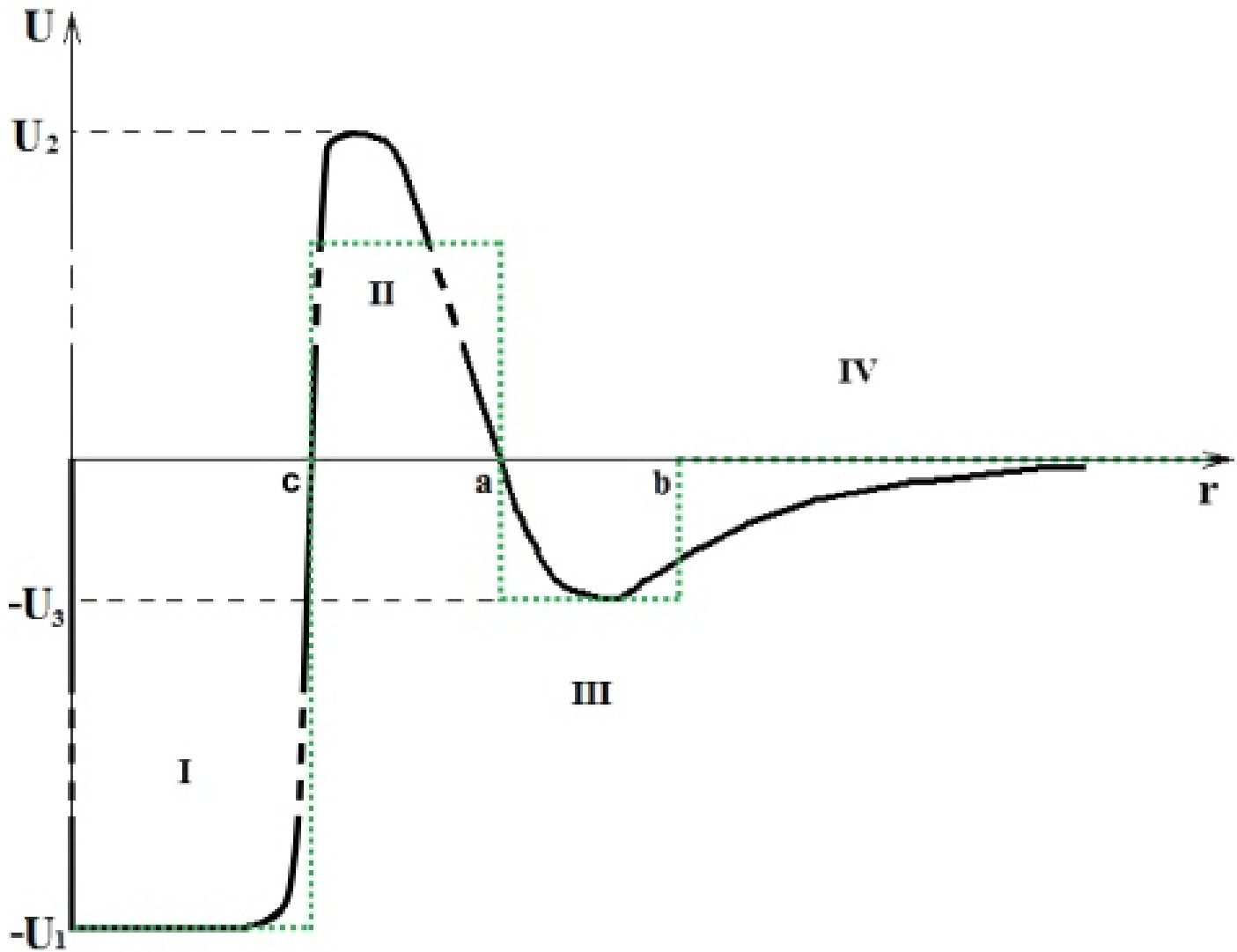


Рисунок 2: Эффективный потенциал между OHe и ядром барионного вещества

1. Система OHe .

На этом этапе была написана отдельная программа для моделирования системы центра масс „тёмного“ атома O -гелия, чтобы после совместить эту программу с основной, в которой моделируется движение и взаимодействие атома OHe с ядром барионного вещества в лабораторной системе отсчёта с расположенным в начале координат соответствующим ядром вещества. Задачей данного этапа являлось описать движение альфа-частицы вокруг O^{--} , расположенной в начале координат, по боровскому радиусу, в каждый момент времени.

В программе были заданы все необходимые константы, в том числе радиус вектор ядра He , то есть боровский радиус альфа-частицы, скорость вращения

альфа-частицы и сила Кулоновского взаимодействия между альфа-частицей и O^{--} . Инициализировались все необходимые для работы матрицы. В программе изменяются только полярный и азимутальный углы альфа-частицы, через которые выражаются её декартовы координаты.

Таким образом в программе задаются начальные углы, через которые вычисляются начальные декартовы координаты ядра He . Далее с помощью цикла, через выведенные соотношения и с использованием встроенной в пакет Matlab функции генерирования случайных чисел *rand* определяются изменения полярного и азимутального углов, которые прибавляясь к начальным углам дают их новые значения и соответственно новые декартовы координаты альфа-частицы.

Изменение полярного $d\theta$ и азимутального $d\phi$ углов вычисляются следующим образом:

$$d\theta = \left(\frac{V_\alpha dt}{R_b} \frac{180}{\pi} \right) (2rand - 1) \quad (1)$$

$$d\phi = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_\alpha dt}{R_b} \right)^2 - \left(d\theta \frac{\pi}{180} \right)^2}}{\cos\left(\theta \frac{\pi}{180} \right)} \left(\frac{180}{\pi} \right) (2rand - 1) \quad (2)$$

где V_α это скорость альфа-частицы, R_b - борковский радиус, а dt это длительность одной итерации.

При этом в программе учитывается, что должно выполняться следующее неравенство:

$$\left(d\theta \right)^2 + \left(\cos \theta d\phi \right)^2 \leq \left(\frac{V_\alpha dt}{R_b} \right)^2 \quad (3)$$

Далее приводится результат работы программы:

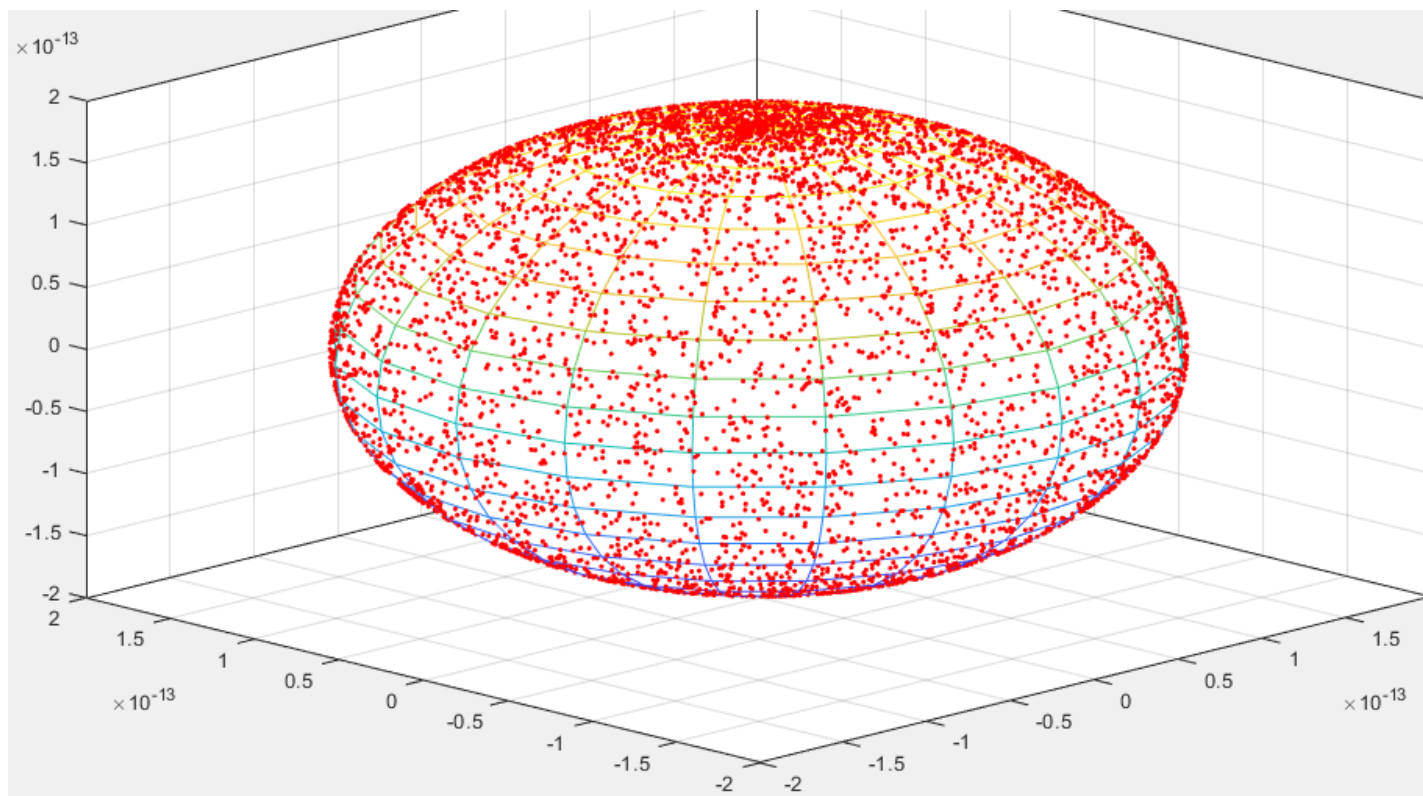


Рисунок 3: Траектория движения альфа-частицы в системе ONe

2. Конечный размер ядер.

На этой стадии была сделана заготовка для будущих этапов работы, в которых будут учтены конечные размеры ядер через учёт распределения плотности нуклонов (ядерный радиус) и плотности протонов (электромагнитный радиус). Для этого в программе были написаны внешние функции для извлечения этих сведений на основе эмпирических моделей по заданным (A, Z) , то есть числу нуклонов A и числу протонов Z в ядре. Была использована статья с одной из эмпирических моделей.[5]

Суть работы функций заключается в следующем: при их вызове в них отправляются значения массового числа A , зарядового числа Z , плотности протонов или нейтронов в центре ядра $\rho_{o_{p,n}}$, параметр квадрупольного деффекта ядра β_2 , значения которых берутся из базы данных, и расстояние от центра ядра r . Используя полученные данные, функция вычисляет плотность протонов или нейтронов в точке r — $\rho_{p,n}$, по следующей формуле:

$$\rho_{p,n} = \rho_{o_{p,n}} \left(1 + \exp \left(\frac{r - R_{p,n}^{rms}}{a_{p,n}} \right) \right)^{-1} \quad (4)$$

a_p , a_n и $R_{p,n}^{rms}$ вычисляются следующим образом:

$$a_p = 0.449 + 0.071 \frac{Z}{N} \quad (5)$$

$$a_n = 0.446 + 0.072 \frac{N}{Z} \quad (6)$$

$$R_{p,n}^{rms} = \left(\frac{3}{5} R_{o_{p,n}}^2 + \frac{7\pi^2}{5} a_{p,n}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{5}{4\pi} \beta_2^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

где R_{o_p} и R_{o_n} вычисляются следующим образом:

$$R_{o_p} = 1.322 Z^{\frac{1}{3}} + 0.007 N + 0.022 \quad (8)$$

$$R_{o_n} = 0.953 N^{\frac{1}{3}} + 0.015 Z + 0.774 \quad (9)$$

где $N = A - Z$ это число нейтронов в ядре.

3. Моделирование взаимодействия атома OHe с ядром барионного вещества в лабораторной системе отсчёта. Кулоновские силы.

На данном этапе рассматривается система трёх точечных, взаимодействующих друг с другом, посредством Кулоновских сил, заряженных частиц. Под частицей в начале координат подразумевается ядро-мишень барионного вещества с зарядовым числом Z , а под движущимися частицами понимаются альфа-частица с зарядовым числом Z_α и частица O^{--} с зарядовым числом Z_O . При этом альфа-частица вращается по боровскому радиусу вокруг частицы O^{--} .

Между альфа-частицей и ядром-мишенью происходит Кулоновское взаимодействие с силой:

$$\vec{F}_{Z\alpha} = \vec{F}_{Z\alpha}(\vec{r}_\alpha) = \frac{ZZ_\alpha e^2 \vec{r}_\alpha}{r_\alpha^3}, \quad (10)$$

где r_α это радиус вектор альфа-частицы, e это элементарный заряд.

При этом:

$$\vec{r}_\alpha = \vec{r} + \vec{R}_b \quad (11)$$

где R_b это боровский радиус.

Между частицей O^{--} и ядром-мишенью происходит Кулоновское взаимодействие с силой:

$$\vec{F}_{ZO} = \vec{F}_{ZO}(\vec{r}) = \frac{ZZ_O e^2 \vec{r}}{r^3}, \quad (12)$$

где r это радиус вектор частицы O^{--} .

Данная система моделируется следующим образом: задаются все необходимые константы. Вводится число итераций и интервал времени dt определяющий время каждой итерации цикла.

Далее инициализируются все необходимые для работы программы матрицы и задаются начальные условия, то есть начальные координаты частицы O^{--} x_0 , y_0 , z_0 и начальные компоненты её скорости V_{x_0} , V_{y_0} и V_{z_0} . Далее вычисляются начальные значения всех инициализированных выше полярных и азимутальных углов частиц, начальные силы и их проекции.

После, с помощью цикла во все матрицы записываются данные полученные в каждой итерации.

При этом вычисляется суммарная сила, действующая на систему OHe \vec{F}_{sum} :

$$\vec{F}_{sum} = \vec{F}_{ZO} + \vec{F}_{Z\alpha} \quad (13)$$

И с её помощью вычисляется приращение импульса системы OHe , являющейся в совокупности приращением импульса частицы O^{--} :

$$dP = F_{sum}dt \quad (14)$$

Используя которое вычисляется приращение скорости частицы O^{--} для последующего нахождения новой скорости используемой в следующей итерации:

$$dV = \frac{dP}{M_{O^{--}} + M_{\alpha}} \quad (15)$$

где $M_{O^{--}}$ и M_{α} массы частицы O^{--} и альфа-частицы соответственно.

Также в программе учитывается условие того, что приращение кинетической энергии альфа-частицы dT не может превышать потенциал ионизации O -гелия I , примерно равный 1.6МэВ:

$$dT < I \approx 1.6MeV \quad (16)$$

$$dT = \frac{dP_{\alpha}^2}{2M_{\alpha}} \quad (17)$$

где dP_{α} приращение импульса альфа-частицы:

$$dP_{\alpha} = F_{Z\alpha}dt \quad (18)$$

На основе полученных данных, с целью показать результат работы программы, были построены траектории альфа-частицы и частицы O^{--} .

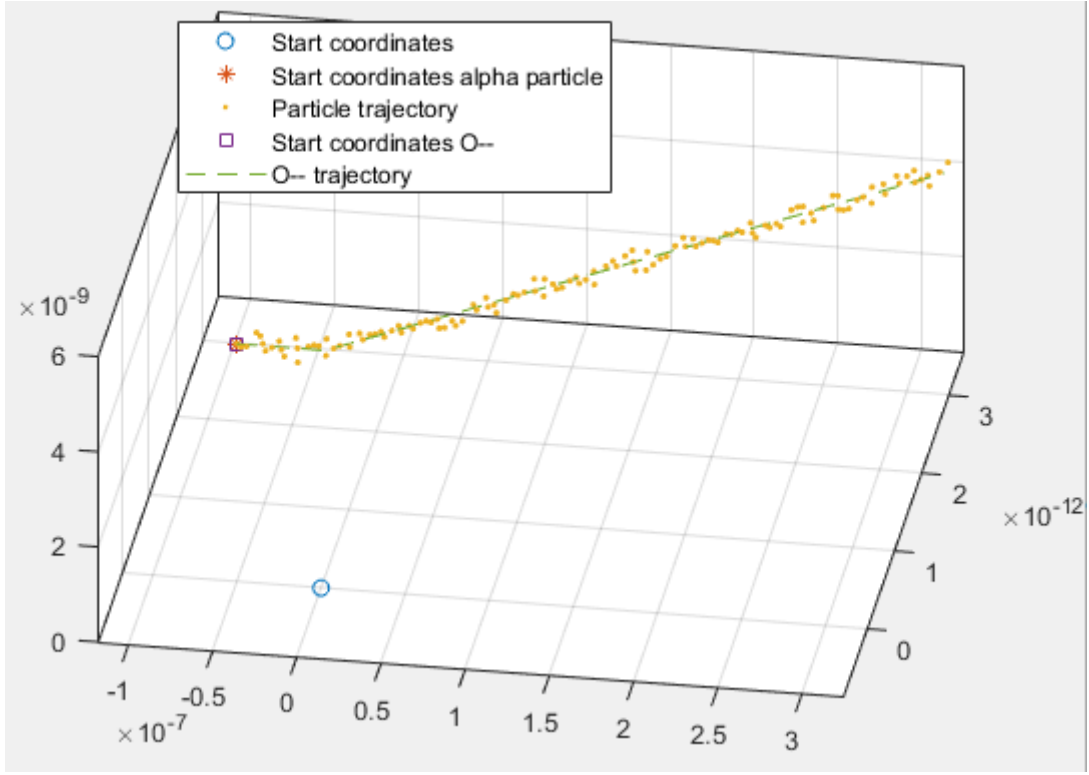


Рисунок 4: Траектории альфа-частицы и частицы O^{--}

4. Добавление ядерной силы.

На этом этапе программа описанная в предыдущем пункте была дополнена ядерным взаимодействием между ядром He и ядром-мишенью задаваемым силой $\vec{F}_{Z\alpha NUC}$

$$\vec{F}_{Z\alpha NUC} = -\frac{\frac{V_0}{a} \exp\left(\frac{r_\alpha - R_Z}{a}\right) \frac{\vec{r}_\alpha}{r_\alpha}}{\left(1 + \exp\left(\frac{r_\alpha - R_Z}{a}\right)\right)^2}, \quad (19)$$

где R_Z радиус ядра-мишени, V_0 глубина потенциальной ямы, a постоянный параметр.

При этом суммарная сила, действующая на систему OHe \vec{F}_{Sum} вычисляется теперь следующим образом:

$$\vec{F}_{Sum} = \vec{F}_{ZO} + \vec{F}_{\alpha Sum} \quad (20)$$

где $\vec{F}_{\alpha Sum}$ суммарная сила действующая на альфа-частицу:

$$\vec{F}_{\alpha Sum} = \vec{F}_{Z\alpha} + \vec{F}_{Z\alpha NUC} \quad (21)$$

Также как и в прошлой программе здесь читывается, что приращение кинетической энергии альфа-частицы dT не может превышать потенциал ионизации O -гелия I , примерно равный 1.6МэВ.

$$dT = \frac{dP_{\alpha Sum}^2}{2M_{\alpha}} \quad (22)$$

где $dP_{\alpha Sum}$ приращение импульса альфа-частицы определяемое как:

$$dP_{\alpha Sum} = F_{\alpha Sum} dt \quad (23)$$

Далее представлен рисунок демонстрирующий результат работы программы.

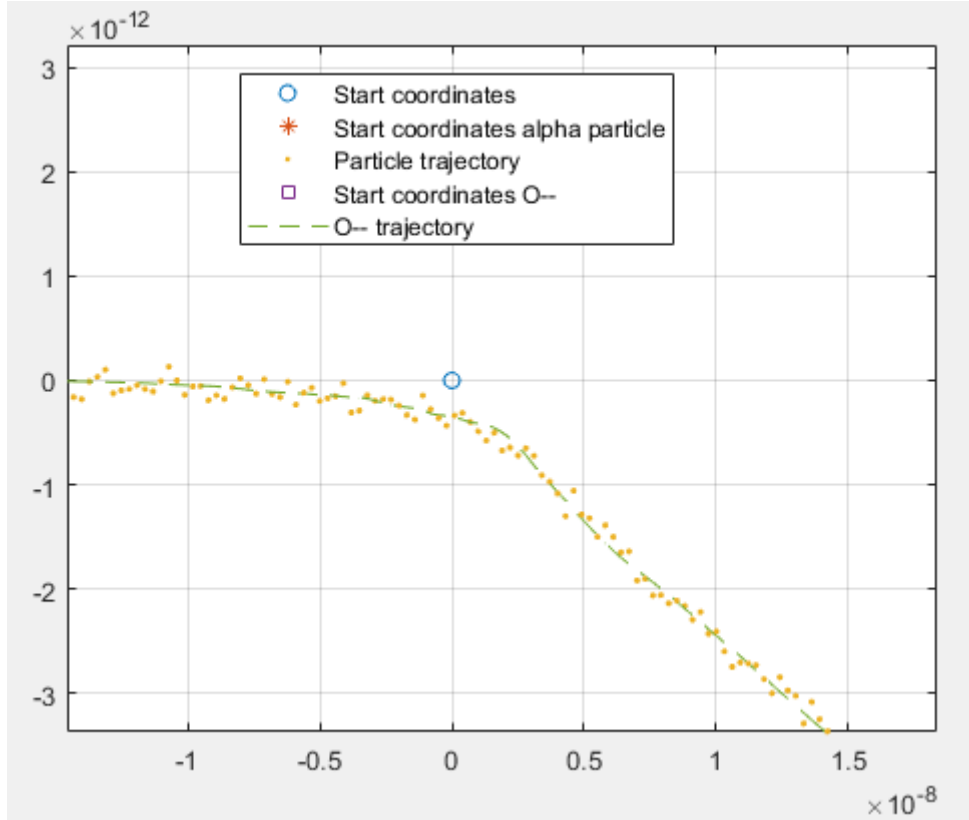


Рисунок 5: Траектория движения альфа-частицы и частицы O^{--} в плоскости XY

5. Заключение

Преимущества модели составной скрытой массы OHe в том, что она минимально связана с параметрами новой физики и в основном основана на эффектах известной атомной и ядерной физики. Однако корректное квантовое рассмотрение этой проблемы оказывается довольно сложным по ряду причин.

В моменты, когда внешнее ядро-мишень подходит достаточно близко к системе OHe , расстояния на которых рассматривается их взаимодействие может быть незначительным и недостаточным для того, чтобы рассматривать ядро He как точечную частицу. Также за пределами ядер, ядерные силы падают экспоненциально, но они могут быть достаточно сильными, чтобы вызвать неоднородное возмущение основного состояния атома OHe .

Данная модель не может работать, если на некотором расстоянии между OHe и ядром не возникнет отталкивающего взаимодействия, и решение данной задачи является жизненно важным для дальнейшего существования модели тёмного атома OHe [3].

Ядерная сила может действительно привести к изменению поляризации O -гелия, что может повлечь за собой создание дипольного кулоновского барьера, но это происходит, когда теория возмущений больше не может быть применена и решить уравнение Шрёдингера становится довольно проблематично, поэтому целью данной НИР предполагалось численное моделирование задачи с целью выявления условий существования низкоэнергетического связанного состояния барионного ядра с OHe . Предполагается, что в итоге должна возникнуть некоторая колебательная система.

Конечная цель моделирования ещё не достигнута и в будущем планируется продолжить усложнять систему. Вот что предполагается сделать дальше:

1. Доработать программу с ядерными силами
2. Ввести туннелирование через потенциальный барьер.
3. Вместо рассмотрения точечных частиц ввести конечный размер ядер через учёт распределения плотности нуклонов (ядерный радиус) и плотности протонов (электромагнитный радиус).

Список используемых источников

1. *Cudell J. R., Khlopov M., Wallemacq Q.* The nuclear physics of OHe // Bled Workshops Phys. — 2012. — т. 13. — с. 10—27. — arXiv: 1211.5684 [astro-ph.CO].
2. Hadronic and Hadron-Like Physics of Dark Matter / V. Beylin [и др.] // Symmetry. — 2019. — т. 11, № 4. — с. 587. — DOI: 10.3390/sym11040587. — arXiv: 1904.12013 [hep-ph].
3. *Khlopov M. Yu.* 10 years of dark atoms of composite dark matter // Bled Workshops Phys. — 2015. — т. 16, № 2. — с. 71—77. — arXiv: 1512.01081 [hep-ph].
4. *Khlopov M. Yu., Mayorov A. G., Soldatov E. Yu.* The dark atoms of dark matter // Prespace. J. — 2010. — т. 1. — с. 1403—1417. — arXiv: 1012.0934 [astro-ph.CO].
5. *Seif W. M., Mansour H.* Systematics of nucleon density distributions and neutron skin of nuclei // Int. J. Mod. Phys. — 2015. — т. E24, № 11. — с. 1550083. — DOI: 10.1142/S0218301315500834. — arXiv: 1504.08350 [nucl-th].