

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 2020

# Содержание

Введение . . . . .	2
1. Система $OHe$ . . . . .	6
2. Учёт конечного размера ядер. . . . .	9
3. Моделирование взаимодействия атома $OHe$ с ядром барионного вещества в лабораторной системе отсчёта. Кулоновские силы. . . . .	10
4. Добавление эффектов 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 плотности энергии Вселенной и доминирующая в формах её нерелятивистского вещества, 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 породила множество разнообразных теорий, предлагающих на роль кандидатов „тёмной“ материи различные объекты. Тем не менее самым простым способом удовлетворить вышперечисленным условиям является предположение о существовании нейтральных, элементарных, слабовзаимодействующих частиц. Однако существует значительно более широкий класс моделей скрытой массы в которых новые стабильные частицы могут обладать некоторой новой фундаментальной симметрией и соответствующим ей сохраняющимся 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 рассматривается сценарий составной скрытой массы, в которой новые стабильные частицы, имеющие обычный электрический заряд, избегают экспериментального открытия, потому что они скрыты в атомоподобных состояниях. 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 также неразрешима, если модель предсказывает стабильные частицы с зарядом  $-1$  ( $E^-$ ). Как только первичный гелий образуется в космологическом нуклеосинтезе, он захва-

тывает все свободные  $E^-$  частицы образуя положительно заряженные  $(HeE)^+$ -ионы. Это предотвращает любое дальнейшее подавление обилия 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  $-2$  (в общем случае  $-2n$ , где  $n$  любое натуральное число). 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  $({}^4He^{++}O^{--})$   $O$ -гелиевых «атомах». [2] Во всех этих формах  $O$ -гелия  $O^{--}$  ведет себя как лептон или как специфический "кластер тяжелых кварков" с сильно подавленным адронным взаимодействием. Поэтому взаимодействие  $O$ -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 первичном космологическом нуклеосинтезе и в эволюции звезд. [4]

Привлекательной чертой модели  $OHe$  является то, что она включает в себя минимальное число параметров „новой“ физики, а конкретнее только один её параметр – массу  $O^{--}$ . В то же время она требует глубокого понимания деталей известной ядерной и атомной физики, которые до сих пор не так хорошо изучены для параметров модели  $OHe$ .

Важность гипотезы  $OHe$  состоит также в том, что она может объяснить противоречивые результаты прямого поиска „тёмной“ материи, за счет специфики взаимодействия  $OHe$  с веществом подземных детекторов. А именно, положительные результаты по обнаружению частиц скрытой массы в таких экспериментах как  $DAMA/NaI$  и  $DAMA/LIBRA$ , которые вступают в кажущееся противоречие со всеми остальными экспериментами, например с  $XENON100$ ,  $LUX$ ,  $CDMS$  даю-

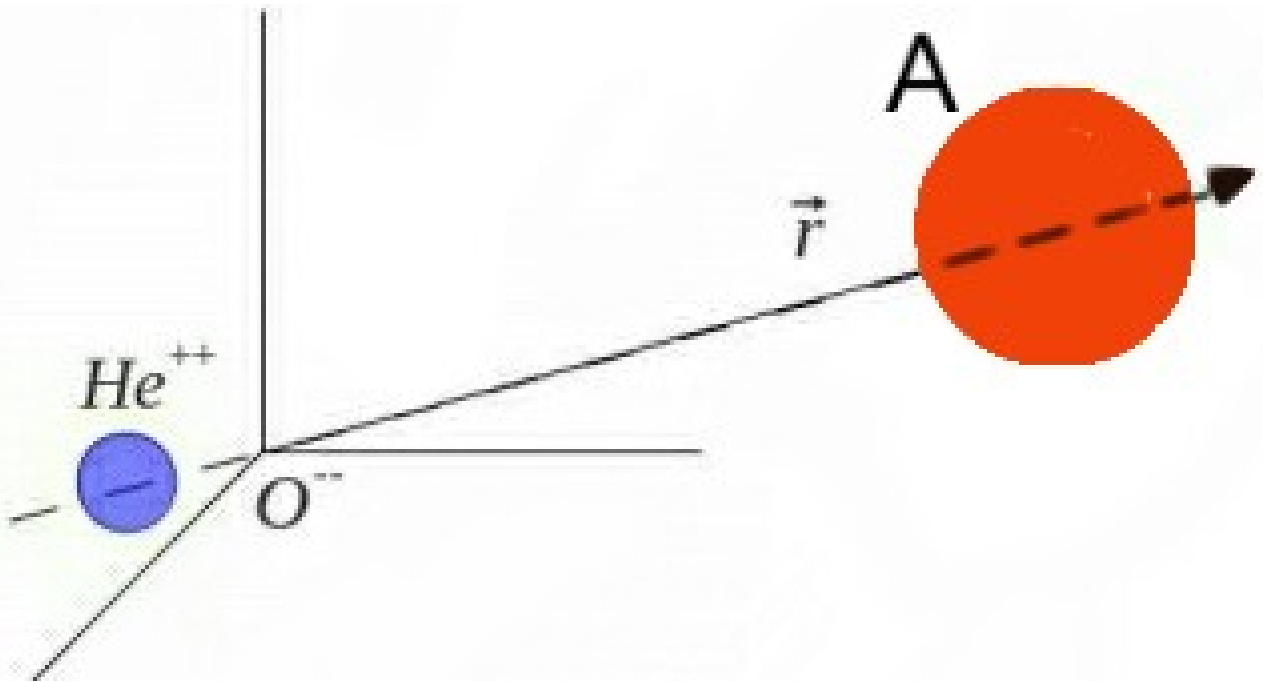


Рисунок 1: Атом O-гелия и внешнее ядро

щими отрицательный результат.

Дело в том, что замедление космического  $OHe$  в земном грунте не допускает прямых методов обнаружения частиц скрытой массы основанных на поиске эффектов отдачи ядер при столкновениях WIMP-ов (от английского WIMP, Weakly Interacting Massive Particle) с ядрами обычного вещества. Однако взаимодействие медленных атомов  $OHe$  с ядрами может приводить к их низкоэнергетическому связыванию. В пределах неопределенности параметров ядерной физики существует диапазон, в котором энергия связи в системе  $OHe - Na$  находится в интервале 2-4 кэВ. Радиационный захват  $OHe$  в это связанное состояние приводит к соответствующему выделению энергии, наблюдаемому как ионизационный сигнал в детекторе  $DAMA$ . Концентрация  $OHe$  в веществе подземных детекторов определяется равновесием между поступающим космическим потоком  $OHe$  и диффузией к центру Земли. Концентрация  $OHe$  в веществе подземных детекторов быстро регулируется с учетом поступающего космического O-гелия и следует за изменением этого потока. Поэтому скорость радиационного захвата  $OHe$  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 последовательно продолжалось численное моделирование взаимодействия „тёмных“ атомов  $O$ -гелия с ядрами барионного вещества в пакете Matlab с целью выявления условий существования их низкоэнергетического связанного состояния. В рамках нашего подхода к такому моделированию мы постепенно вводим эффекты квантовой физики и используем на данном этапе для выявления сущности процессов ядерного взаимодействия  $O$ -гелия с ядрами барионного вещества классическую модель.

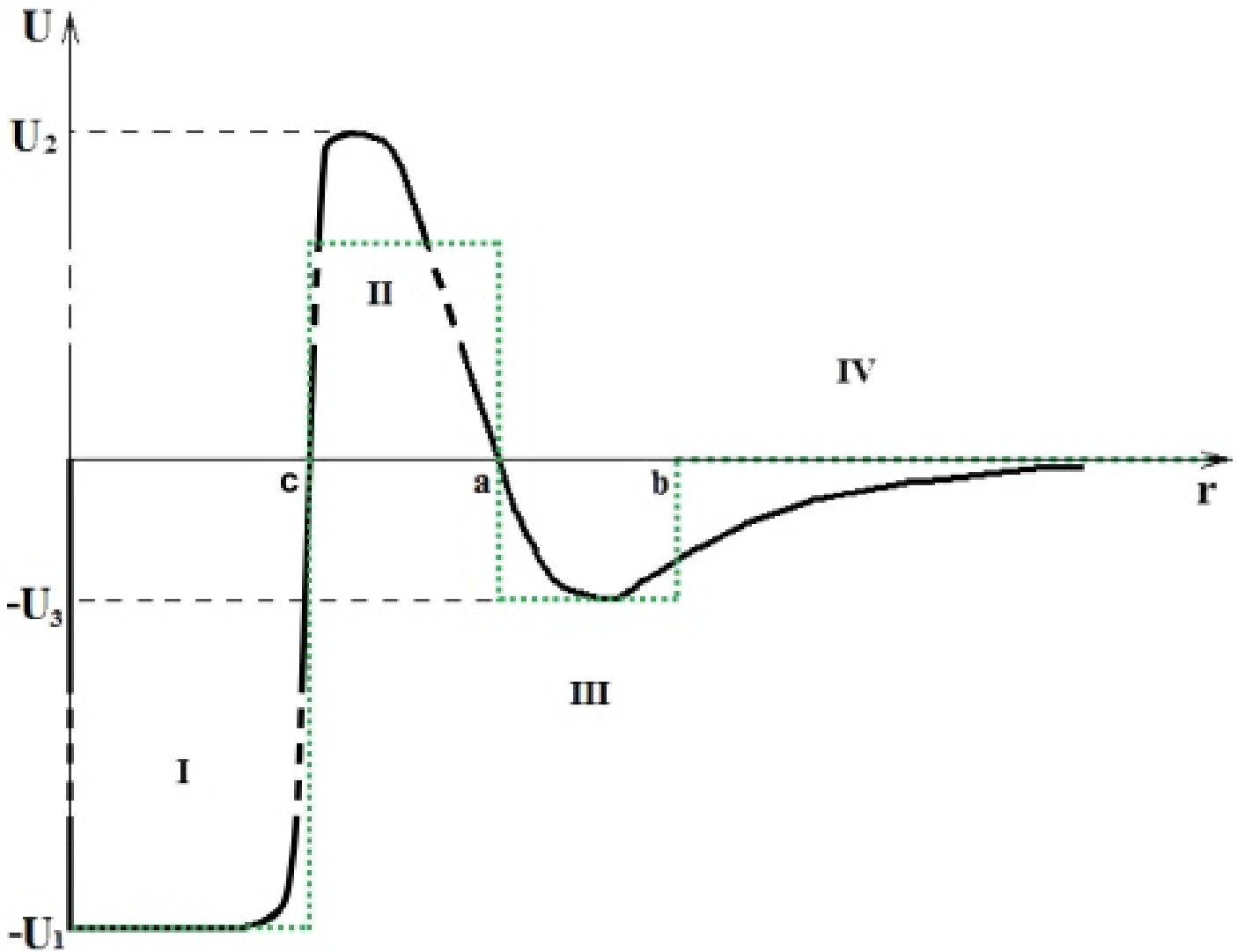


Рисунок 2: Эффективный потенциал между  $OHe$  и ядром барионного вещества

## 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 борновскому радиусу, в каждый момент времени.

В программе были заданы все необходимые константы, в том числе радиус вектор ядра  $He$ , то есть борновский 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  $V_\alpha$  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:



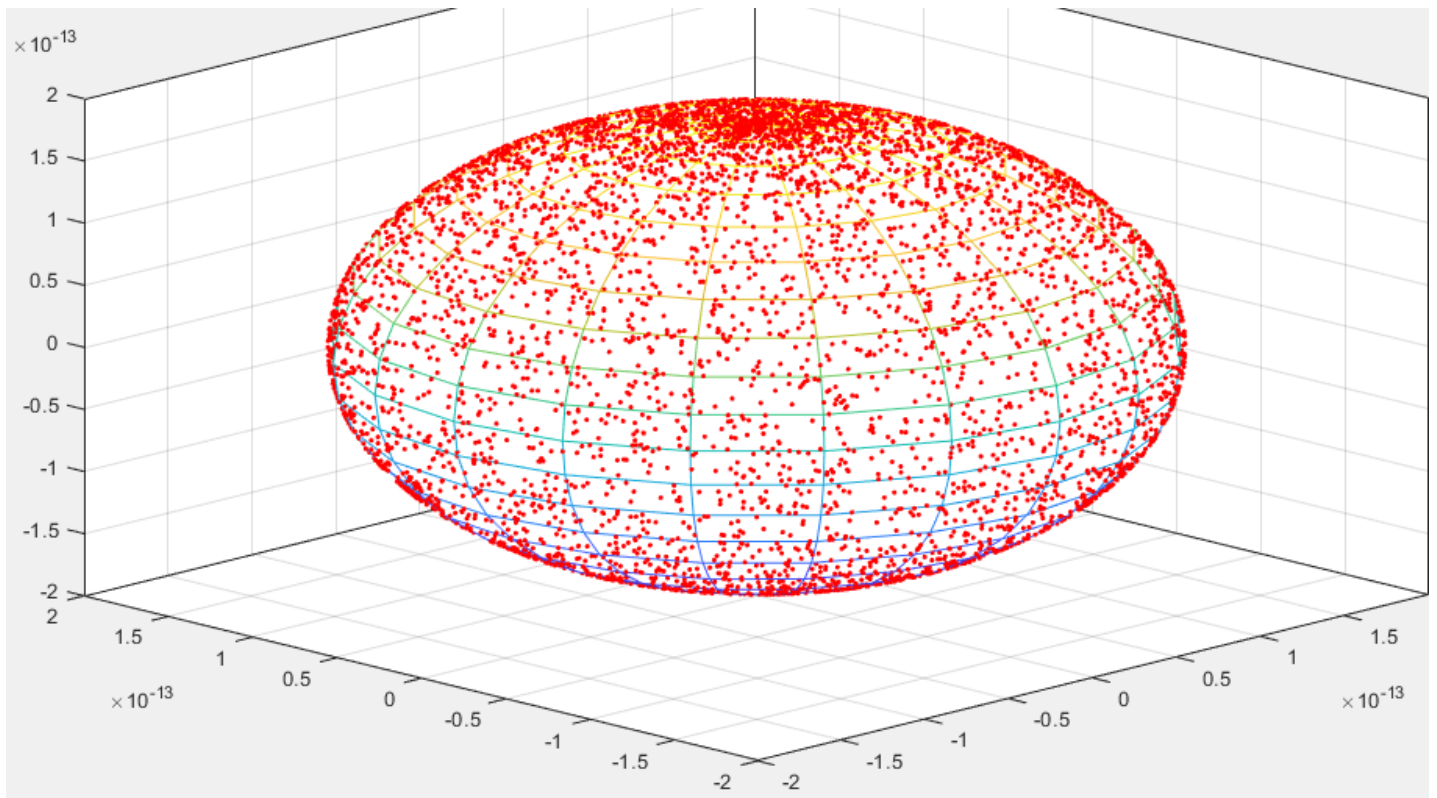


Рисунок 3: Траектория движения альфа-частицы в системе  $ONe$

## 2. Учёт конечного размера 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 данных внешних 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  $\beta_2$ , значения которых берутся из базы данных, и расстояние от центра ядра  $r$ . Используя полученные данные, внешняя функция вычисляет и возвращает значение плотности протонов или нейтронов в точке  $r = \rho_{p,n}$ , по следующей формуле:

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

где  $a_p$ ,  $a_n$  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  $R_{o_n}$  также вычисляются используя формулы:

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

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

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  $Z_\alpha$  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  $r_\alpha$  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  $dP$  системы  $OHe$ , являющееся в совокупности приращением импульса частицы  $O^{--}$ .

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

Далее используя приращение импульса  $dP$  вычисляется приращение скорости частицы  $O^{--}$   $dV$  для последующего нахождения новой скорости используемой в следующей итерации:

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

где  $M_{O^{--}}$  и  $M_{\alpha}$  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  $dP_{\alpha}$  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  $O^{--}$ .

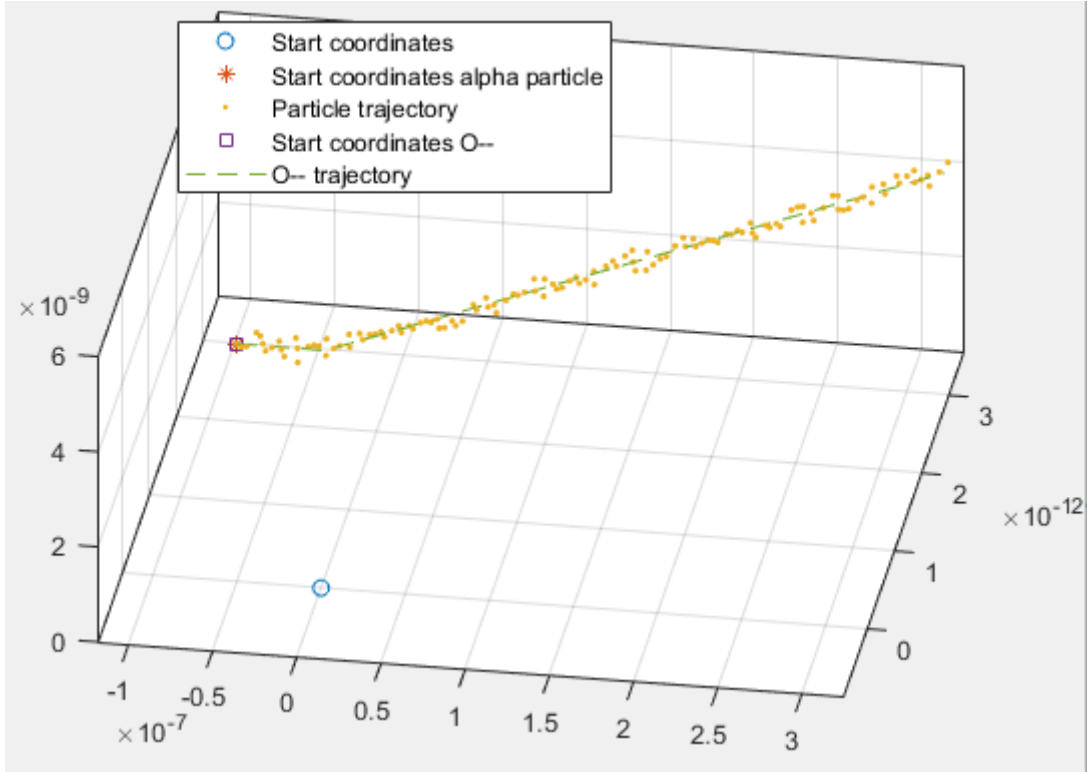


Рисунок 4: Траектории альфа-частицы и частицы  $O^{--}$

#### 4. Добавление эффектов 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.

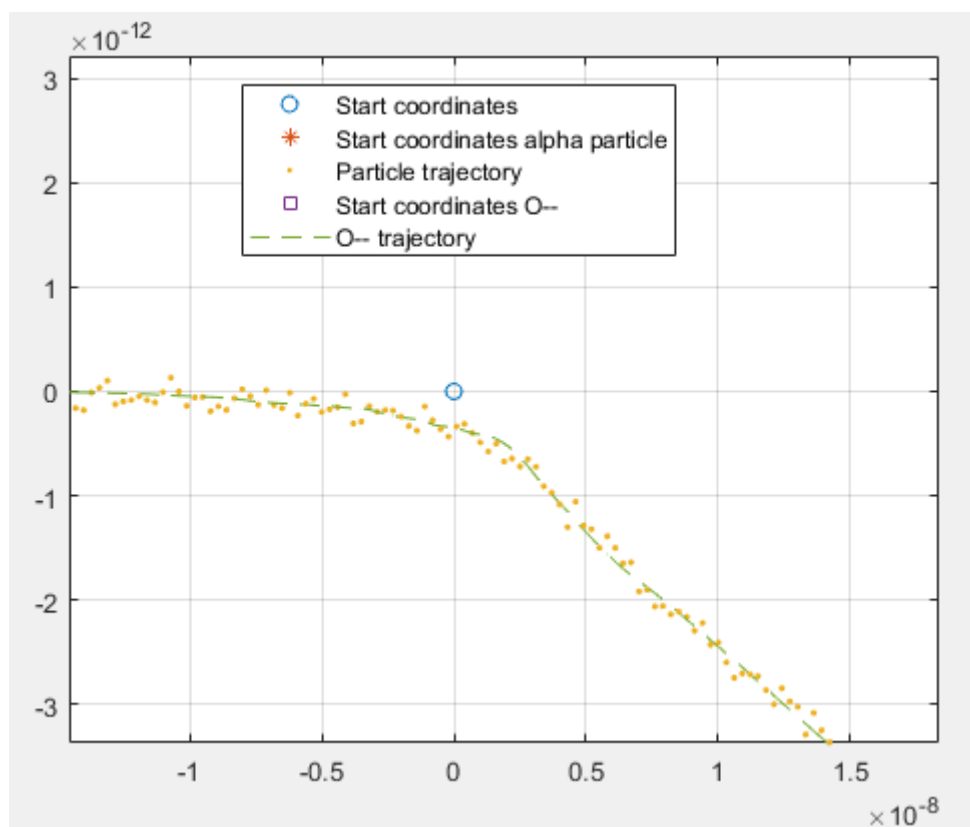


Рисунок 5: Траектория движения альфа-частицы и частицы  $O^{--}$  в плоскости XY

## 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 Огелия, 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].