

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Моделирование взаимодействия "тёмных" атомов  $O$ -гелия с ядрами  
вещества

Руководитель НИР,  
д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Студент

\_\_\_\_\_ Т. Э. Бикбаев

Научный консультант,  
к.ф.-м.н., доц.

\_\_\_\_\_ А. Г. Майоров

Москва 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>2</b>
I "Тёмные" атомы $O$ -гелия . . . . .	3
II Численное моделирование взаимодействия $O$ -гелия с ядром	4
1 Моделирование $O$ -гелия . . . . .	4
2 Система координат системы $OHe$ -ядро . . . . .	6
3 Кулоновское взаимодействие в системе $OHe$ -ядро . .	7
4 Ядерное взаимодействие в системе $OHe$ -ядро . . . .	9
5 Квантово-механический эффект туннелирования . . .	11
III Заключение . . . . .	12
Список использованных источников . . . . .	14

# ВВЕДЕНИЕ

Согласно современной космологии, скрытая масса небарионна и связана с новой, неизвестной для нас физикой. Если она состоит из частиц, то они предсказываются вне рамок Стандартной модели. Для того, чтобы эти частицы могли рассматриваться в качестве кандидатов на роль скрытой массы, формирующей крупномасштабную структуру Вселенной, нам нужно, чтобы они объяснили как можно больше астрономических наблюдений [1, 2]. Наиболее популярной является модель, в которой элементарные слабовзаимодействующие массивные частицы (от английского WIMP, Weakly Interacting Massive Particle) предлагаются как частицы скрытой массы. Поиски таких частиц пока не увенчались успехом, поэтому ученые предлагают альтернативные версии частиц скрытой массы [3–6]. В частности, предполагается, что могут существовать стабильные электрически заряженные частицы.

Важной проблемой для сценариев гипотетических, стабильных, электрически заряженных частиц является их отсутствие в окружающем нас веществе. Если они существуют, то должны быть связаны с обычным веществом и образовывать аномальные изотопы (с аномальным отношением  $Z/A$ ). Основная трудность для этих сценариев состоит в подавлении обилия положительно заряженных частиц, связанных с электронами, которые ведут себя как аномальные изотопы водорода или гелия. Серьезные экспериментальные ограничения на такие изотопы, особенно на аномальный водород, очень жёстко ограничивают возможность стабильных положительно заряженных частиц [7].

Эта проблема также неразрешима, если модель предсказывает стабильные частицы с зарядом  $-1$ . Такие частицы связываются с первичным гелием в  $+1$  заряженные ионы, которые рекомбинируют с электронами в атомы аномального водорода [8].

В связи с чем стабильные отрицательно заряженные частицы могут иметь только заряд  $-2$  – будем обозначать их  $O^{--}$  (в общем случае  $-2n$ ,

где  $n$  – любое натуральное число) [9].

В данной статье мы рассматриваем сценарий составной скрытой массы, в которой гипотетические стабильные частицы  $O^{--}$  избегают экспериментального открытия, потому что они формируют с первичным гелием нейтральные атомоподобные состояния  $OHe$ , называемые "тёмными" атомами [10]. Поскольку все эти модели также предсказывают соответствующие  $+2$  зарядовые античастицы, космологический сценарий должен обеспечить механизм их подавления, что, естественно, может иметь место в зарядово-асимметричном случае, соответствующем избытку  $-2$  заряженных частиц  $O^{--}$  [4]<sup>1</sup>. Тогда их положительно заряженные античастицы могут эффективно аннигилировать в ранней Вселенной. Существуют различные модели, в которых предсказываются такие стабильные  $-2$  заряженные частицы [11–13].

## I. "ТЁМНЫЕ" АТОМЫ O-ГЕЛИЯ

"Темный" атом – это связанная система, состоящая из частицы  $O^{--}$  и ядра  ${}^4He$ . В приближении нашей численной модели,  $\alpha$ -частица является точечной и движется по радиусу Бора. Тогда энергия связи  $OHe$  для точечного заряда  ${}^4He$  определяется выражением:

$$I_0 = \frac{Z_{O^{--}}^2 Z_\alpha^2 \alpha^2 m_{He}}{2} \approx 1.6 \text{ МэВ}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – это постоянная тонкой структуры,  $Z_{O^{--}}$  и  $Z_\alpha$  – зарядовые числа частицы  $O^{--}$  и ядра  $He$  соответственно,  $m_{He}$  – масса  $\alpha$ -частицы.

Боровский радиус вращения  $He$  в "тёмных" атомах  $OHe$  равен [14]:

$$R_b = \frac{\hbar c}{Z_{O^{--}} Z_\alpha m_{He} \alpha} \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}. \quad (2)$$

Во всех моделях  $O$ -гелия  $O^{--}$  ведет себя как лептон или как специфический кластер тяжелых кварков новых семейств с подавленным адронным взаимодействием [15]. А существующее ограничение на массу этого

---

<sup>1</sup>Электрический заряд этого избытка компенсируется соответствующим избытком положительно заряженных барионов, так что электронейтральность Вселенной сохраняется

типа частиц, согласно ускорителю LHC, составляет около 1ТэВ [16].

Существование гипотезы  $O$ -гелия важно, поскольку она может объяснить противоречивые результаты экспериментов по прямому поиску скрытой массы из-за особенностей взаимодействия "тёмных" атомов с веществом подземных детекторов [17]. Например, 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*, дающими отрицательный результат.

Основная проблема с атомами  $OHe$  заключается в том, что их составляющие могут слишком сильно взаимодействовать с веществом. Это происходит потому, что  $O$ -гелий имеет незэкранированное ядерное притяжение к ядрам вещества. Это, в свою очередь, может привести к разрушению связанной системы атомов скрытой массы и образованию аномальных изотопов. Существуют очень строгие экспериментальные ограничения на концентрацию этих изотопов в земной почве и морской воде [7]. Чтобы избежать проблемы перепроизводства аномальных изотопов, предполагается, что эффективный потенциал между  $OHe$  и ядром материи будет иметь барьер, препятствующий слиянию  $He$  и/или  $O^{--}$  с ядром. В данной работе мы пытаемся построить теоретическую модель такого взаимодействия.

## II. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ $O$ -ГЕЛИЯ С ЯДРОМ

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ $O$ -ГЕЛИЯ

"Тёмный" атом  $O$ -гелия (система  $OHe$ ) состоит из двух точечных и связанных между собой частиц: ядра  $He$  и частицы  $O^{--}$ . Сферическая система координат расположена в центре частицы  $O^{--}$ , вокруг неё по поверхности сферы, радиус которой равен радиусу атома  $OHe$   $R_b$ , ядро атома  $He$  движется стохастически с постоянной боровской скоростью  $V_\alpha$ .

Рассмотрим схему численного моделирования динамической системы

*ОНе*.

1)  $\alpha$  – частица в связанной системе *ОНе* имеет только две независимые степени свободы, в качестве которых принимаются полярный и азимутальный углы.  $\theta_0$  и  $\phi_0$  – начальные значения углов, через которые вычисляются начальные компоненты радиус-вектора  $\alpha$  – частицы  $r_0$ .

2) Изменения полярного  $d\theta$  и азимутального  $d\phi$  углов определяются как приращения углов при перемещении от точки  $r_{i-1}$  к точке  $r_i$  по поверхности сферы за время  $dt$ , где  $i$  – номер итерации:

$$d\theta = \left( \frac{V_\alpha dt}{R_b} \right) (2n - 1), \quad (3)$$

$$d\phi = \frac{\sqrt{\left( \frac{V_\alpha dt}{R_b} \right)^2 - (d\theta)^2}}{\cos(\theta)} (2n - 1), \quad (4)$$

где  $n$  – это случайная величина с равномерным распределением на отрезке от 0 до 1.

3) Проверяем условие для приращения углов:

$$(d\theta)^2 + (\cos \theta d\phi)^2 \leq \left( \frac{V_\alpha dt}{R_b} \right)^2. \quad (5)$$

Это условие необходимо для того, чтобы траектория альфа – частицы, вычисленная через приращения углов  $d\theta$  и  $d\phi$ , не превышала реального расстояния, которое альфа – частица прошла по сфере за время  $dt$ .

В результате, по полученным данным, записанным в матрицу, содержащую значения компонентов радиус-вектора альфа-частицы в каждый момент времени  $r$ , программа строит её траекторию движения по поверхности сферы боровского радиуса  $R_b$  (см. рисунок 1). На рисунке 1 изображена сфера радиуса  $R_b$ , на поверхности которой синими точками отмечено расположение альфа-частицы между моментами времени  $dt$ . Заполнение сферы точками зависит от количества итераций цикла.

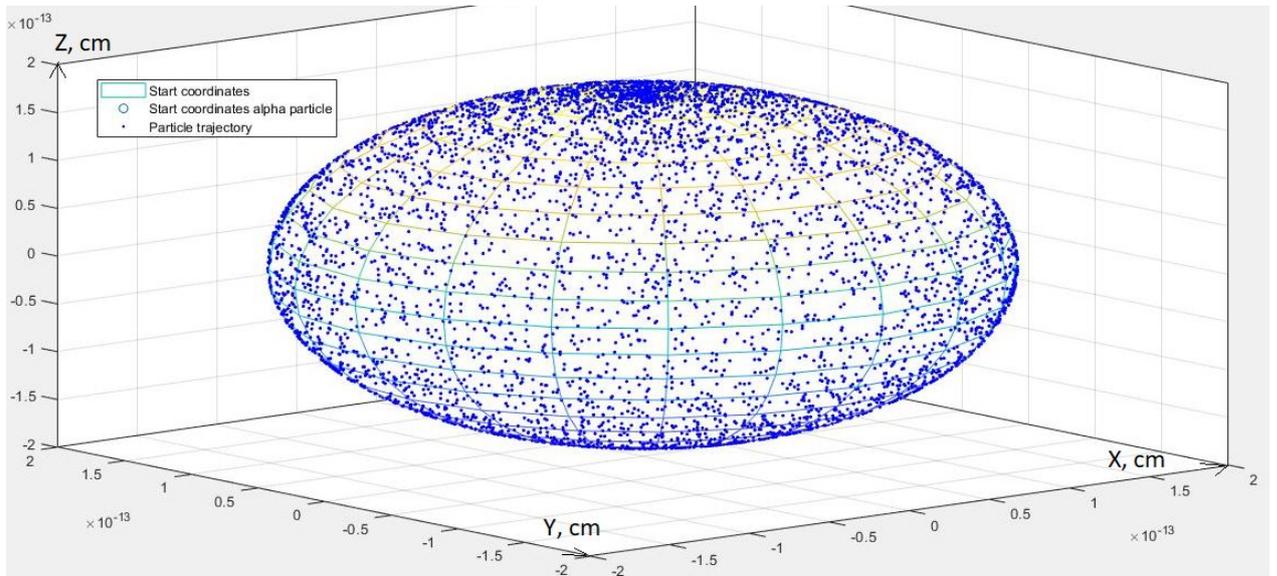


Рисунок 1 — Плотность распределения координат  $\alpha$ -частицы на орбите, соответствующей основному состоянию системы

## 2. СИСТЕМА КООРДИНАТ СИСТЕМЫ $ОНЕ$ -ЯДРО

Рассмотрим систему  $ОНе$ -ядро, состоящую из трёх заряженных, точечных (на данном этапе моделирования) частиц. Поместим систему координат в центр ядра  $A$ . В выбранной системе отсчёта  $O$ -гелий движется относительно начала координат. Введены радиус-вектор  $O^{--}$   $\vec{r}$  и радиус-вектор  $\alpha$ -частицы  $\vec{r}_\alpha$  (см. рисунок 2). В этом случае  $\vec{r}_\alpha$  определяется следующим образом:

$$\vec{r}_\alpha = \vec{r} + \vec{R}_b \quad (6)$$

Наша задача - рассмотреть взаимодействие  $ОНе$  с ядром, построив набор сил, действующих между всеми частицами в выбранной системе координат. Мы должны учитывать электромагнитные силы, действующие между  $O^{--}$  и ядром,  $O^{--}$  и  $He$ ,  $He$  и ядром. А также ядерное взаимодействие между гелием и ядром-мишенью. Эта задача сформулирована как задача трех тел и не имеет точного аналитического решения. Таким образом, в данной работе предлагается численный подход для описания перечисленных взаимодействий.

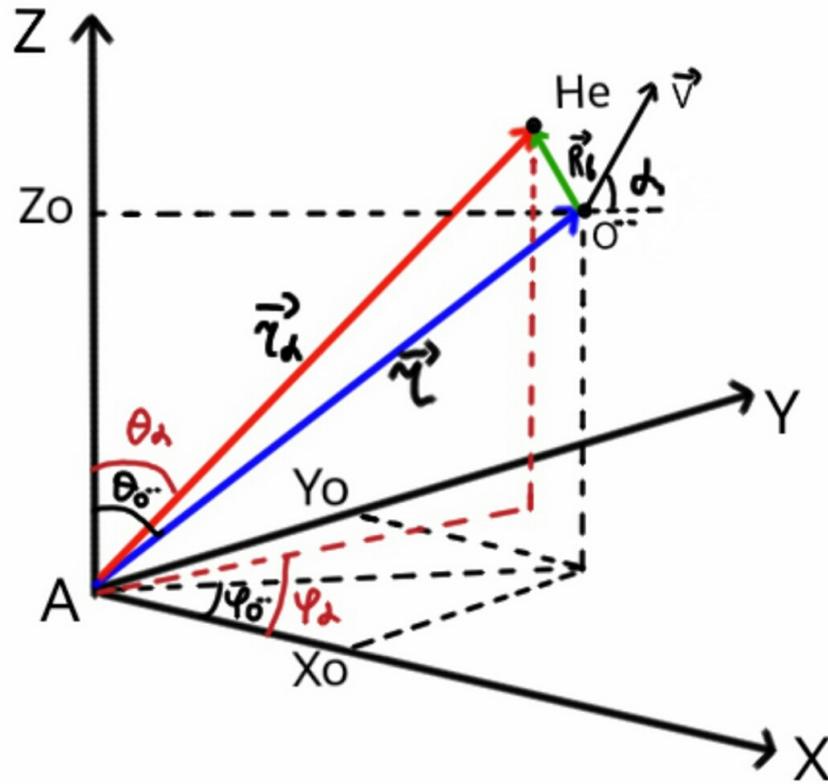


Рисунок 2 — Система координат  $OHe$  –ядро.

### 3. КУЛОНОВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ $OHe$ –ЯДРО

Кулоновское взаимодействие между  $\alpha$ -частицей и ядром-мишенью и кулоновское взаимодействие между  $O^{--}$  и ядром-мишенью задаются следующими формулами:

$$\vec{F}_{Z\alpha}^e = \vec{F}_{Z\alpha}^e(\vec{r}_\alpha) = \frac{ZZ_\alpha e^2 \vec{r}_\alpha}{r_\alpha^3}, \quad (7)$$

$$\vec{F}_{ZO}^e = \vec{F}_{ZO}^e(\vec{r}) = \frac{ZZ_{O^{--}} e^2 \vec{r}}{r^3}, \quad (8)$$

где  $Z$  это зарядовое число ядра.

Построим численную схему расчета этих сил в зависимости от расстояния между объектами. В этом случае предложенная ранее модель описания системы  $OHe$  будет использована для расчетов в системе  $OHe$  –ядро.

1) Мы используем следующие начальные условия: начальные координаты

наты  $O^{--}$  [ $x_0, y_0, z_0$ ] (или  $r_0$ ) и начальные компоненты его скорости [ $V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0}$ ] (или  $V_0$ ) ( $i = 0$ ).

2) Рассмотрим состояние системы в следующий момент времени, взятое на временном интервале  $dt$ . Определяется  $i$ -е значение приращения импульса  $\alpha$ -частицы  $d\vec{P}_{\alpha_i}$ :

$$d\vec{P}_{\alpha_i} = \vec{F}_{\alpha_i}^e dt. \quad (9)$$

3) Проверяется условие прерывания программы, когда избыток кинетической энергии  $dT_i$ , переданной  $\alpha$ -частице, превышает потенциал ионизации  $O$ -гелия  $I_0$ , что приводит к разрушению связанной системы  $OHe$ :

$$dT_i = \frac{d\vec{P}_{\alpha_i}^2}{2m_\alpha} < I_0 \approx 1.6 MeV. \quad (10)$$

4) В каждом цикле программа вычисляет полную силу, действующую на систему  $OHe$ :

$$\vec{F}_{i_{sum}} = \vec{F}_{i_{ZO}}^e + \vec{F}_{i_\alpha}^e. \quad (11)$$

5) Вычисляется приращение импульса  $d\vec{P}_i$  системы  $OHe$ , которое в совокупности является приращением импульса частицы  $O^{--}$ :

$$d\vec{P}_i = \vec{F}_{i_{sum}} dt. \quad (12)$$

6) Используя приращение импульса  $d\vec{P}_i$ , вычисляется приращение скорости частицы  $O^{--}$ ,  $d\vec{V}_i$ , для последующего нахождения новой скорости используемой в следующей итерации:

$$d\vec{V}_i = \frac{d\vec{P}_i}{m_{O^{--}} + m_\alpha}. \quad (13)$$

Результатом работы алгоритма являются восстановленные траектории  $\alpha$ -частицы и частицы  $O^{--}$  (см. рисунок 3). На рисунке 3 чёрный кружок показывает местоположение ядра-мишени, желтая звездочка и красный ромб - начальные местоположения  $\alpha$ -частицы и частицы  $O^{--}$  соответственно, синими точками и зеленой пунктирной линией показаны траектории  $\alpha$ -частицы и частицы  $O^{--}$  соответственно. На рассматриваемом рисунке можно наблюдать отклонение траектории  $O^{--}$  от первоначально-

го направления, которое связано с кулоновским взаимодействием между ядром  $He$  и ядром-мишенью. Это происходит потому, что  $He$  оказывается ближе к началу координат и отталкивается от ядра-мишени сильнее, чем к ней притягивается частица  $O^{--}$ .

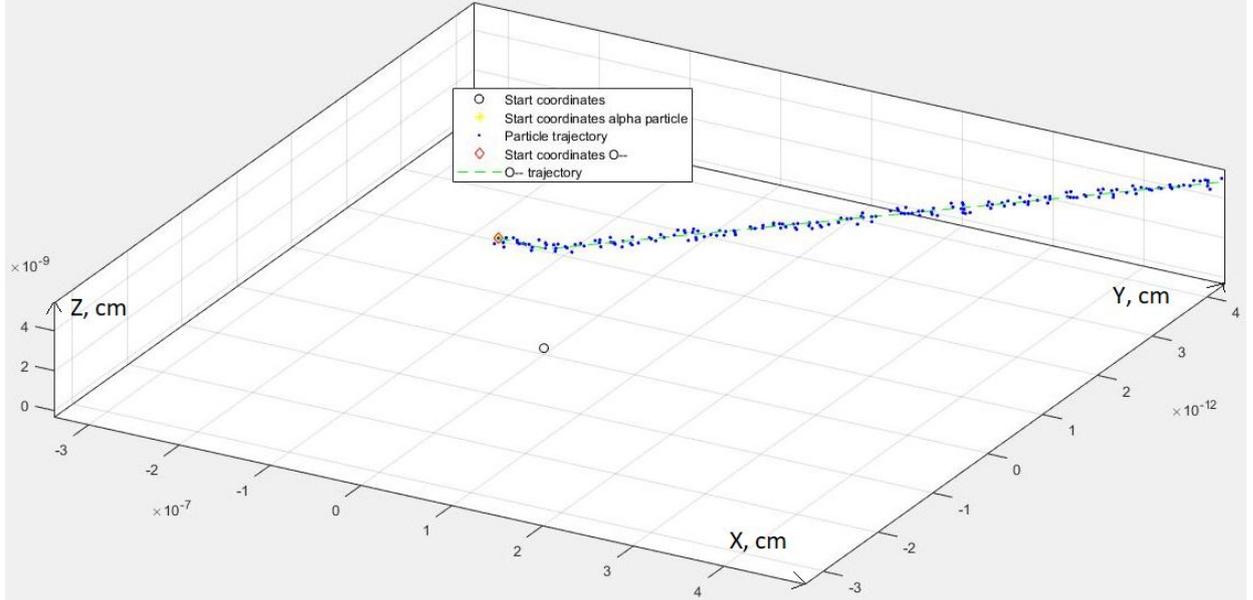


Рисунок 3 — Траектории  $\alpha$ -частицы и частицы  $O^{--}$

#### 4. ЯДЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ $OHe$ – ЯДРО

На этом этапе программа была дополнена ядерным взаимодействием типа Саксона-Вудса, между ядром  $He$  и ядром-мишенью, определяемым силой  $\vec{F}_{i\alpha}^N$ :

$$\vec{F}_{i\alpha}^N = -\frac{\frac{U_0}{a} \exp\left(\frac{r_\alpha - R_Z}{a}\right) \vec{r}_\alpha}{\left(1 + \exp\left(\frac{r_\alpha - R_Z}{a}\right)\right)^2} \frac{\vec{r}_\alpha}{r_\alpha} \quad (14)$$

где  $R_Z$  радиус ядра-мишени,  $U_0$  глубина потенциальной ямы,  $a$  - постоянный параметр.

Полная сила, действующая на систему  $OHe$ ,  $\vec{F}_{iSum}$ , вычисляется следующим образом:

$$\vec{F}_{iSum} = \vec{F}_{iZO}^e + \vec{F}_{i\alpha}, \quad (15)$$

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

$$\vec{F}_{i\alpha} = \vec{F}_{i\alpha}^e + \vec{F}_{i\alpha}^N. \quad (16)$$

Моделирование выполняется в соответствии с итерационным алгоритмом, описанным в предыдущем разделе, где  $d\vec{P}_{i\alpha}$ , приращение импульса  $\alpha$ -частицы, рассчитываемое следующим образом:

$$d\vec{P}_{i\alpha} = \vec{F}_{i\alpha} dt. \quad (17)$$

На основе полученных данных программа строит траектории  $\alpha$ -частицы и частицы  $O^{--}$  (см рисунок 4). На рисунке 4, демонстрирующем результат работы программы, черный кружок показывает расположение ядра мишени, синие точки и красная пунктирная линия показывают траектории  $\alpha$ -частицы и частицы  $O^{--}$  в плоскости XY соответственно.

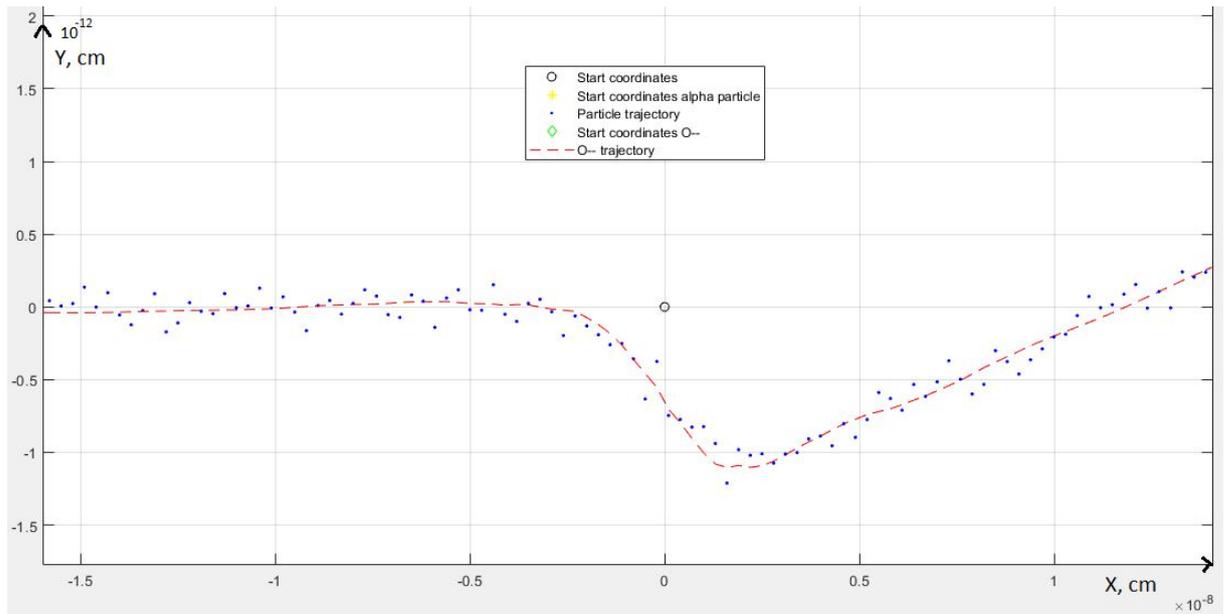


Рисунок 4 — Траектория движения  $\alpha$ -частицы и частицы  $O^{--}$  в плоскости XY

На рисунке 4 показан один из результатов нашего моделирования. Видно, что траектория  $O^{--}$  испытывает некоторые биения в отличие от предыдущего случая. Это связано с дополнительным ядерным взаимодействием между  $\alpha$ -частицей и ядром, которое приводит к притяжению  $\alpha$ -частицы. Соответственно, чем ближе  $\alpha$ -частица к ядру, тем больше эта сила и тем более искажается траектория  $O^{--}$ .

## 5. КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ТУННЕЛИРОВАНИЯ

Кулоновское взаимодействие заряженной частицы с ядром характеризуется высотой кулоновского барьера:

$$B_k = \frac{Zze^2}{R}, \quad (18)$$

где  $Z$  и  $z$  заряды ядра и частицы соответственно, а  $R$  радиус ядра. При сближении связанной системы  $ONe$  с ядром барионного вещества, когда кинетическая энергия альфа-частицы  $T < B_k$ , за счёт квантово-механического эффекта имеется конечная вероятность альфа-частице пройти через потенциальный барьер туннельным переходом и оказаться внутри ядра в какой-то доле случаев рассеяния, что приведёт к разрушению связанной системы  $O$ -гелия. В отличие от классического случая, в котором она никогда не сможет пройти через потенциальный кулоновский барьер. Вероятность туннельного перехода вычисляется по следующей формуле:

$$D \approx \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_R^{r_2} \sqrt{2\mu(V - T)} dr\right), \quad (19)$$

где  $\mu$  это приведённая масса,  $V = \frac{Zze^2}{r}$  кулоновский потенциал взаимодействия,  $r$  расстояние между ядром и  $\alpha$ -частицей,  $r_2 = \frac{Zze^2}{T}$ .

Таким образом, в численную модель, описанную в предыдущем разделе, было добавлено условие прекращения работы алгоритма программы. Для этого в каждой итерации цикла вычисляется скорость  $\alpha$ -частицы в системе координат  $ONe$ -ядро  $\vec{V}_{i\alpha_{sum}}$ . Которая определяется как сумма бортовской скорости  $\alpha$ -частицы  $\vec{V}_{i\alpha}$  в системе  $ONe$  и скорости частицы  $O^{--}$   $\vec{V}_i$ :

$$\vec{V}_{i\alpha_{sum}} = \vec{V}_{i\alpha} + \vec{V}_i. \quad (20)$$

Далее, с помощью  $\vec{V}_{i\alpha_{sum}}$  вычисляется кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы в системе координат  $ONe$ -ядро  $T$  и соответствующее ей значение  $r_2$ . После

чего определяется вероятность туннельного перехода  $D$ .

Наконец, с помощью полученного значения  $D$ , при условии, что расстояние между ядром и  $\alpha$ -частицей меньше или равно  $r_2$ , проверяется условие прекращения работы алгоритма программы. Для этого рассматривается отрезок от 0 до 1 и генерируется случайное число, равномерно распределённое на этом отрезке -  $n$ . При чём, если  $n \leq D$ , то туннельный переход происходит и программа прекращает свою работу, ибо это приводит к разрушению связанной системы  $O$ -гелия. Если  $n > D$ , значит туннельный переход не произошёл и, соответственно, работа алгоритма не прекращается.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается гипотеза составной скрытой массы, в которой гипотетические стабильные частицы с зарядом  $-2$  образуют нейтральные атомоподобные состояния  $OHe$  с первичным гелием.  $O$ -гелий будет взаимодействовать с ядрами обычного вещества и специфика этого взаимодействия может объяснить некоторые факты, наблюдаемые в экспериментах.

Гипотеза  $OHe$  не может работать, если на некотором расстоянии между  $OHe$  и ядром не возникнет отталкивающего взаимодействия, и решение данной проблемы является жизненно важным для дальнейшего существования модели атома  $OHe$  скрытой массы [8]. Поэтому, перед нами стояла задача построить численную модель взаимодействия  $OHe$  с ядром-мишенью. Такая численная модель построена в работе. Она описывает систему из трех точечных, взаимодействующих друг с другом посредством кулоновских и ядерных сил, заряженных частиц. При моделировании наблюдались следующие эффекты: траектория частицы  $O^{--}$  отклоняется от первоначального направления из-за действия кулоновской силы между  $\alpha$ -частицей и ядром-мишенью и траектория  $O^{--}$  испытывает биения в окрестности ядра из-за действия ядерного взаимодействия между  $\alpha$ -частицей и ядром-мишенью.

В дальнейшем планируется исследовать построенную модель, варьируя различные свободные параметры, например, прицельный параметр мо-

дели, энергию налетающей частицы и т. д.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] M.Yu. Khlopov in Cosmion-94, Eds. M.Yu.Khlopov et al. (Editions frontieres, 1996) P. 67; M. Y. Khlopov in hep-ph/0612250, p 51.
- [2] M.Y.Khlopov, Bled Workshops in Physics 8, 114 (2007); in arXiv:0711.4681, p. 114; M. Y. Khlopov and N. S. MankocBorstnik, ibid, p. 195.
- [3] G. Bertone, D. Hooper, J. Silk: Particle dark matter: evidence, candidates and constraints, Physics Reports **405**, 279 – 390 (2005)
- [4] M. Khlopov: Fundamental particle structure in the cosmological dark matter, International Journal of Modern Physics A. **28**, 1330042 (2013)
- [5] M. Y. Khlopov: Dark matter reflection of particle symmetry, Modern Physics Letters A. **32**, 1740001 (2017)
- [6] P. Scott: Searches for Particle Dark Matter: An Introduction, (2011), e-Print: arXiv:1110.2757.
- [7] J. R. Cudell, M. Y. Khlopov, Q. Wallemacq: The nuclear physics of OHe, Bled Workshops Physics **13**, 10 –27 (2012)
- [8] M. Yu. Khlopov: 10 years of dark atoms of composite dark matter, Bled Workshops Physics **16**, 71 –77 (2015)
- [9] O. V. Bulekov, M.Yu.Khlopov, A. S. Romaniouk, Yu. S. Smirnov: Search for Double Charged Particles as Direct Test for Dark Atom Constituents, Bled Workshops in Physics **18**, 11-24 (2017)
- [10] M. Y. Khlopov: Conspiracy of BSM physics and cosmology, Bled Workshops in Physics, V.20 PP.21-35 (2019), e-Print: arXiv: 1911.03294.

- [11] K. M. Belotsky, M. Y. Khlopov, K. I. Shibaev: Composite Dark Matter and its Charged Constituents, Grav.Cosmol., V.12 PP.93-99, (2006), arXiv:astro-ph/0604518
- [12] M. Y. Khlopov, C. A. Stephan, D. Fargion: Dark matter with invisible light from heavy double charged leptons of almost-commutative geometry?, Classical and Quantum Gravity **23**, 7305 –7354 (2006)
- [13] M. Y. Khlopov, C. Kouvaris: Strong interactive massive particles from a strong coupled theory, Physical Review D **77**, PP. 065002 (2008)
- [14] M. Yu. Khlopov, A. G. Mayorov, E. Yu. Soldatov: The dark atoms of dark matter, Prespace. J. **1**, 1403 –1417 (2010)
- [15] M. Y. Khlopov: Composite dark matter from 4th generation, JETP Letters **83**, 1 –4 (2006)
- [16] V. Beylin, M. Khlopov, V. Kuksa, N. Volchanskiy: New physics of strong interaction and Dark Universe, Universe **6**, 196 (2020)
- [17] R. Bernabei: Dark matter investigation by DAMA in Gran Sasso, International Journal of Modern Physics A **28**, 1330022 (2013)