

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 тёмного атома OHe с ядрами
барионного вещества

Руководитель НИР,

д.ф.-м.н.

_____ М.Ю. Хлопов

Студент

_____ Т.Э. Бикбаев

Москва 2019

Содержание

Введение	2
1. Третий этап. Переход к 3-х мерному случаю системы двух точечных зарядов.	9
2. Четвёртый этап. Задание возможности смещать систему координат (не размещать ядро-мишень только в точке $(0,0,0)$)	12
3. Пятый этап. Система OHe.	15
4. Шестой этап. Конечный размер ядер.	18
5. Седьмой этап. Система трёх тел.	20
6. Заключение	22
Список используемых источников	24

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, является небарионной и состоит из новых стабильных частиц. Для того, чтобы эти частицы могли рассматриваться в качестве кандидатов на роль скрытой массы, они должны удовлетворять некоторому набору условий: они должны быть стабильными, обеспечивать измеренную плотность „тёмной“ материи и быть отделены 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, слабо взаимодействующие частицы. Кроме того возможны более развитые модели скрытой массы. В частности, новые стабильные частицы могут обладать новыми калибровочными зарядами и связываться с помощью кулоновских сил в составных „тёмных“ атомах.

Здесь рассматриваются сложные сценарии „тёмной“ материи, в которых новые стабильные частицы имеют обычный электрический заряд, но 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 неразрешима, если модель предсказывает вместе с положительно заряженными частицами стабильные частицы с зарядом -1 (E^-). Как только первичный гелий образуется в стандартном нуклеосинтезе большого взрыва, он захватывает весь свободный E^- в положительно заряженном $(HeE)^+$ -ионе, предотвращая любое дальнейшее подавление положительно заряженных частиц. Поэтому, чтобы избежать перепроизводства аномальных изотопов, стабильные частицы с зарядом -1 должны отсутствовать, поэтому стабильные отрицательно заряженные части-

цы должны 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 композитных ($4He^{++}O^{--}$) 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 ОHe. Это особенно важно для количественной оценки роли в нуклеосинтезе Большого взрыва и в эволюции звезд.[4]

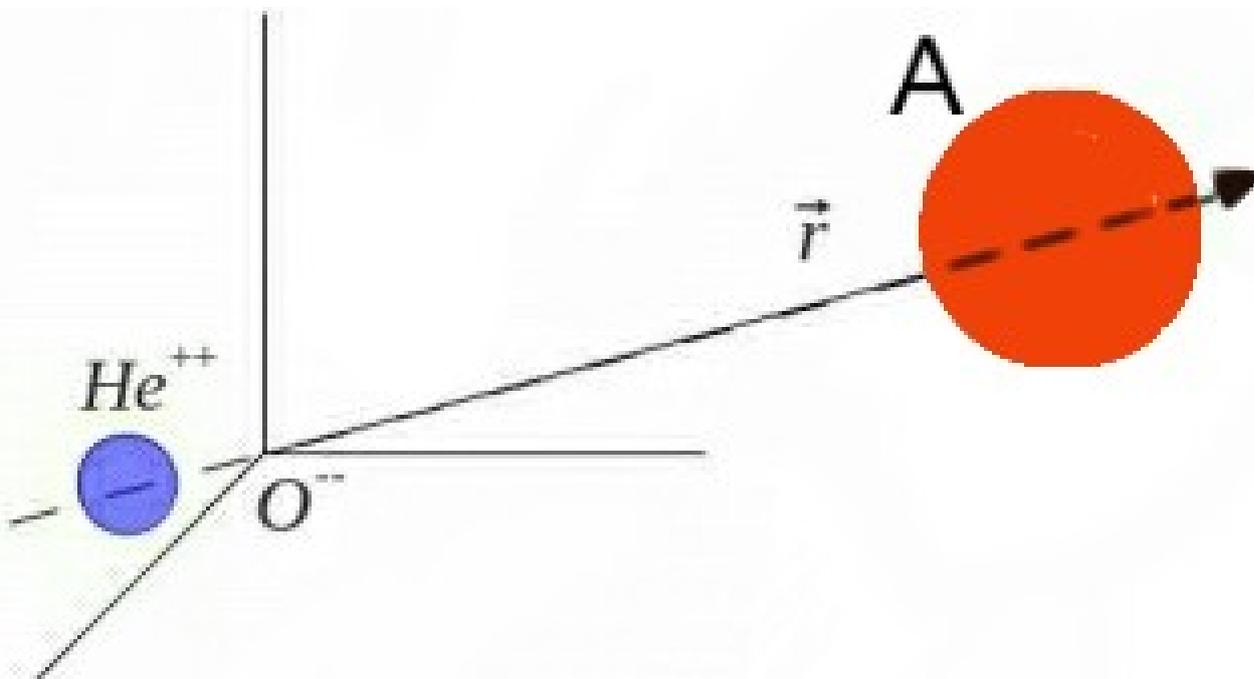


Рисунок 1: Атом О-гелия и внешнее ядро

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. Также гипотеза OHe может объяснить противоречивые результаты прямого поиска „тёмной“ материи, за счет специфики взаимодействия OHe в веществе подземных детекторов. Замедленный в земном веществе OHe не подходит для прямых методов обнаружения подземной темной материи, основанных на поиске эффектов отдачи ядер при столкновениях WIMP-ов с ядрами обычного вещества. Однако взаимодействие OHe с внешним ядром приводит к их связыванию. В системе $OHe - Na$ энергия такого уровня может находиться в интервале энергий 2-4 кэВ. Концентрация OHe в веществе подземных детекторов быстро корректируется с учетом поступающего космического O -гелия. Поэтому скорость выделения энергии при радиационном захвате Na с помощью OHe должна подвергаться ежегодным модуляциям. Это объясняет результаты экспериментов, таких как $DAMA/NaI$ и $DAMA/LIBRA$, которые дали положительные результаты по обнаружению „тёмных“ атомов, но есть так же эксперименты, давшие отрицательные результаты, в том числе $XENON100$, LUX , $CDMS$.

Вздействие OHe с веществом может привести к образованию различных экзотических форм ядерных соединений. При условии, что масса двойной заряженной частицы 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 является то, что их составляющие могут слишком сильно взаимодействовать с обычным веществом. Это происходит потому что OHe нейтрален, но априори обладает неэкранированным ядерным притяжением к внешним ядрам вещества, что может привести к разрушению связанной системы OHe 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. В этих условиях во взаимодействиях

O-гелия с веществом доминируют упругие столкновения, что важно для многих аспектов сценария *OHe*.

В предыдущем семестре были завершены первые два этапа численного моделирования задачи в пакете Matlab с целью выявления условий существования низкоэнергетического связанного состояния внешних ядер вещества с частицами *OHe*. А именно, на первом этапе была рассмотрена и смоделирована одномерная система двух точечных противоположно заряженных частиц.

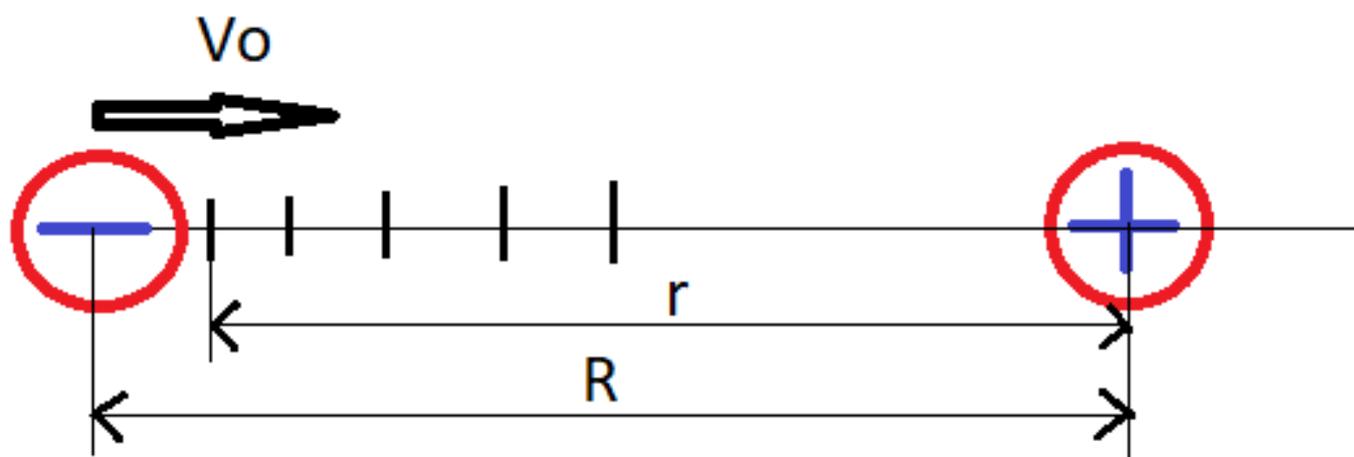


Рисунок 2: Взаимодействующие частицы

На основе полученных данных, помимо прочего, был построен график зависимости проекции скорости от расстояния между частицами. Из анализа графика был сделан вывод, что система находится в колебательном состоянии (Рисунок 3).

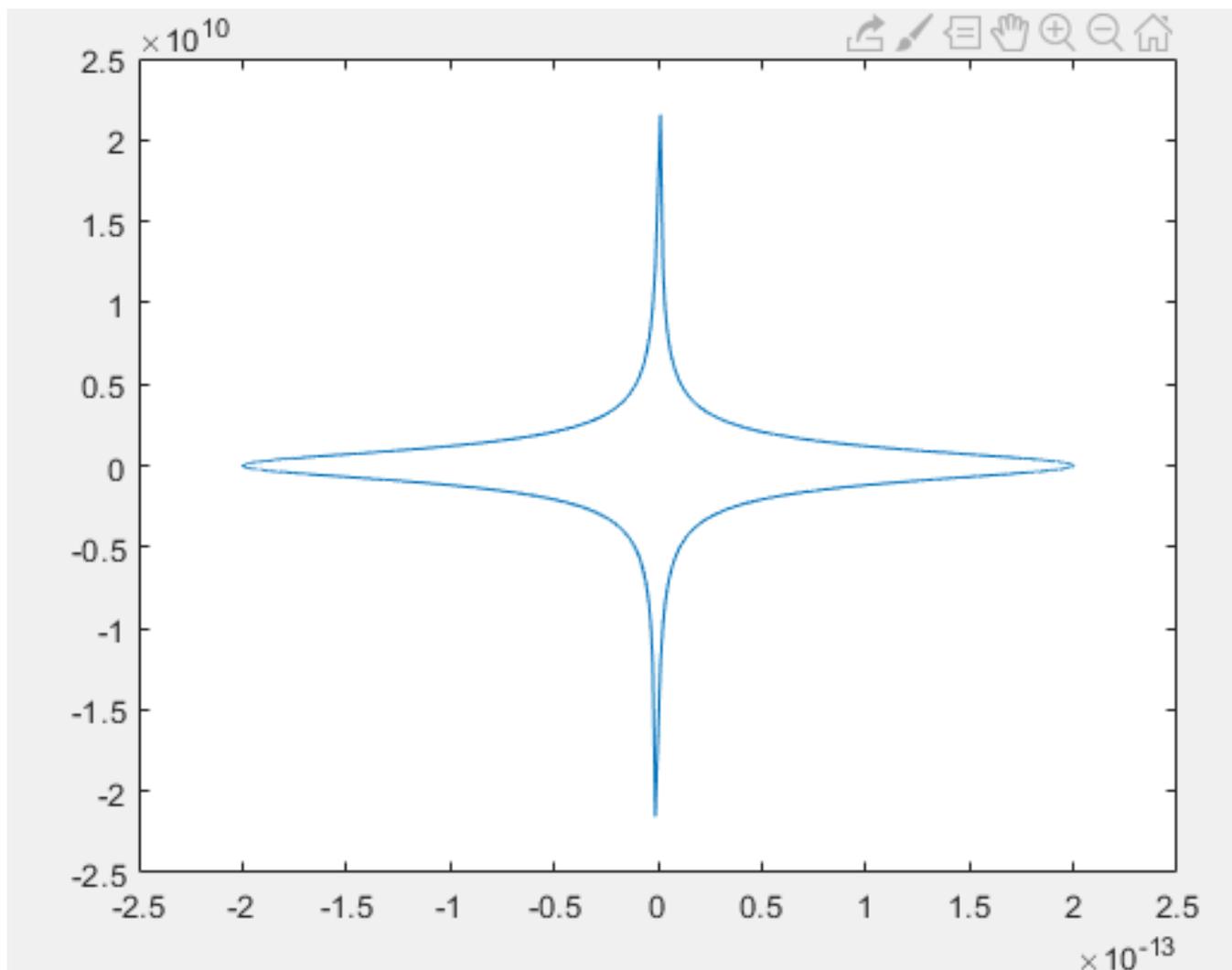


Рисунок 3: График зависимости проекции скорости от расстояния между частицами

На втором этапе было произведено моделирование опыта Резерфорда. По полученным результатам был представлен рисунок работы программы (Рисунок 5). Серый круг в центре рисунка – это ядро золота (радиус ~ 5 ферми), линиями показаны расчётные траектории альфа-частицы для разных прицельных параметров. Энергия частиц 50 МэВ, что в действительности не соответствует оригинальному опыту, поскольку естественные источники радиоактивности испускают излучение с энергией от 4 до 9 МэВ, редко до 16 МэВ. Зато эта энергия заведомо выше кулоновского отталкивания и альфа-частица должна проникать внутрь, это и наблюдается. Форма траекторий и пространственный масштаб соответствуют ожиданиям. Таким образом результат выглядит реалистично.

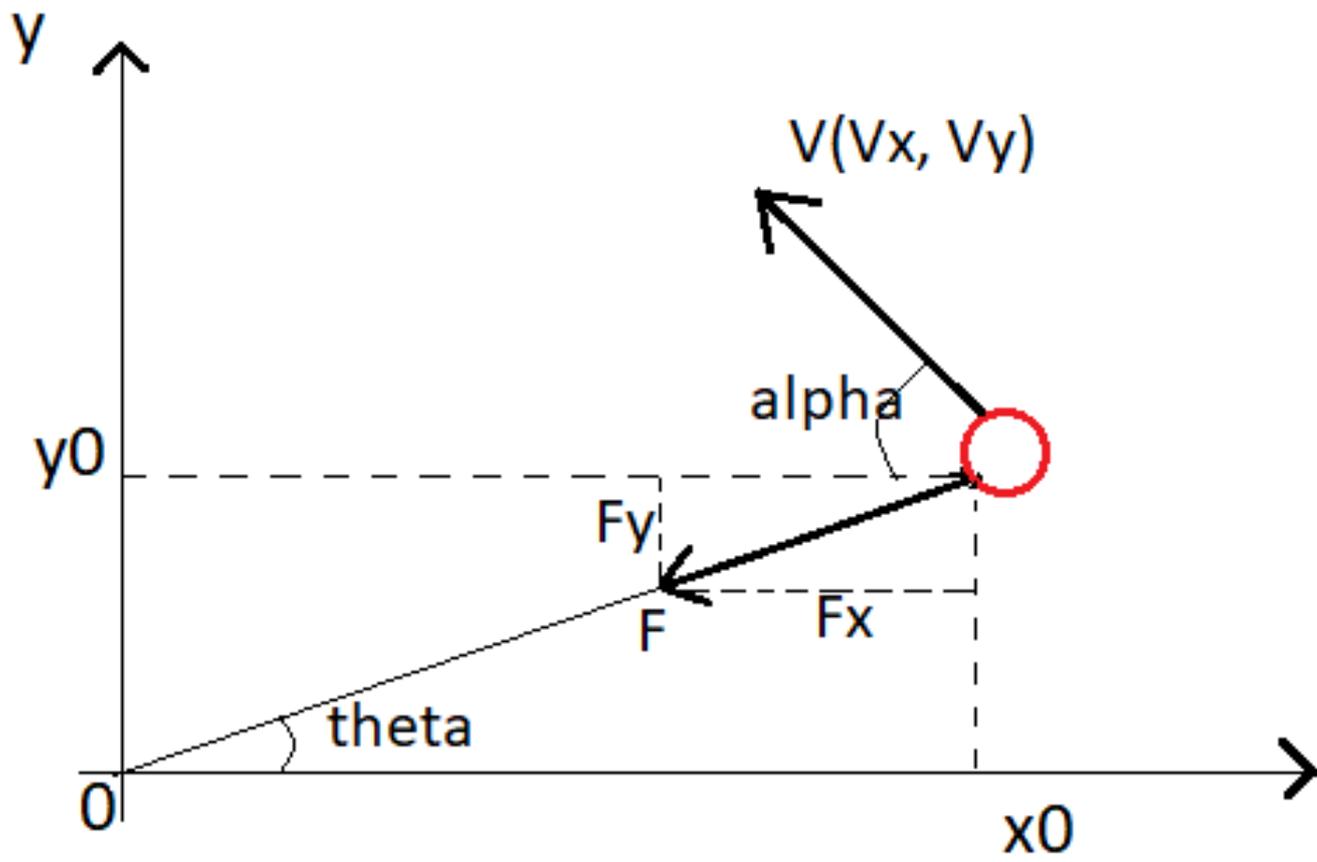


Рисунок 4: Рассматриваемая на втором этапе система

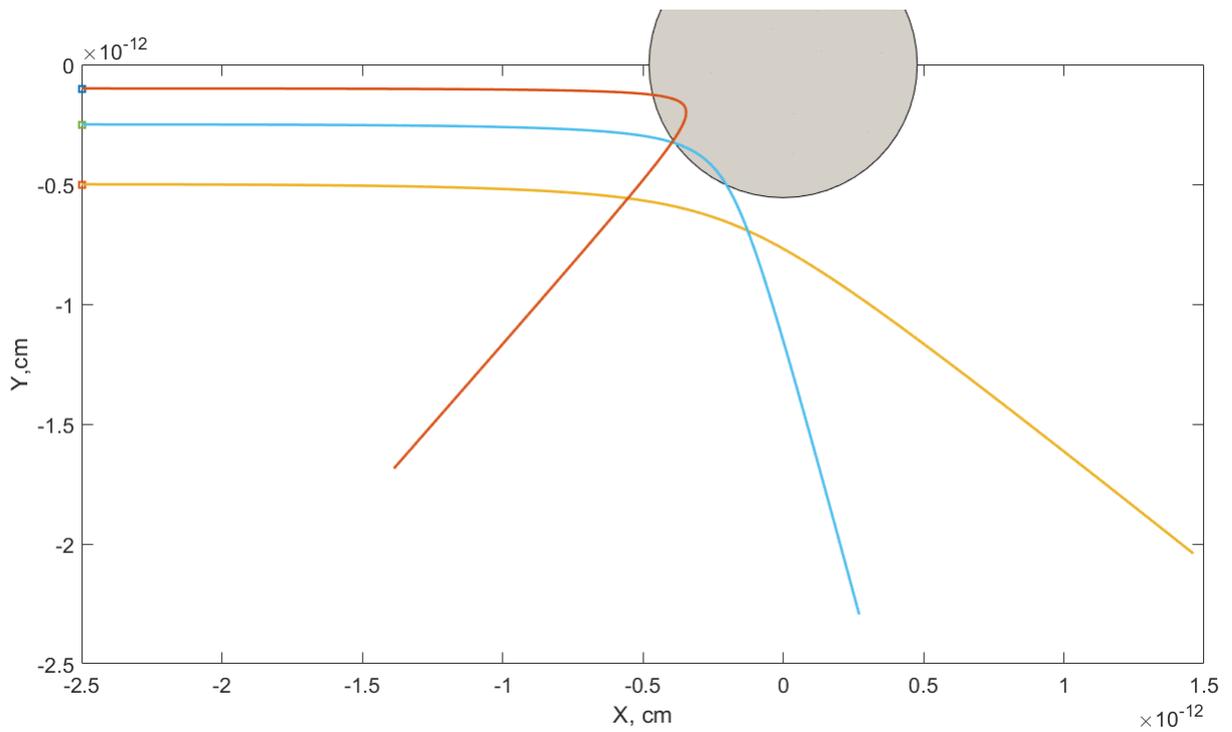


Рисунок 5: Траектории альфа-частицы для различных прицельных параметров

Таким образом, в данной исследовательской работе продолжается рассмотрение в виде кандидата на роль „тёмной“ материи „тёмный“ атом OHe и последовательно разрабатывается численное моделирование задачи в пакете Matlab с целью выявления условий существования низкоэнергетического связанного состояния внешних ядер вещества с частицами OHe .

1. Третий этап. Переход к 3-х мерному случаю системы двух точечных зарядов.

Дана система состоящая из двух взаимодействующих друг с другом заряженных точечных частиц одного знака, в которой к одной „закреплённой“, в начале координат частице движется другая. Под частицей в начале координат подразумевается ядро-мишень с зарядовым числом Z_1 , а под движущейся частицей понимается альфа-частица с зарядовым числом Z_2 .

Между телами происходит Кулоновское взаимодействие с силой:

$$\vec{F} = \vec{F}(\vec{r}) = \frac{Z_1 Z_2 e \vec{r}}{r^3}, \quad (1)$$

где r это расстояние между частицами, e это элементарный заряд.

Данная система моделируется следующим образом: задаются константы, то бишь масса альфа-частицы, элементарный заряд, зарядовые числа альфа-частицы и ядра-мишени, скорость света, ибо начальные компоненты скорости задаются как доля от скорости света. Также вводится число итераций и интервал времени dt определяющий время каждой итерации цикла.

Далее инициализируются матрицы угла между направлением вектора скорости и горизонтальной прямой α , угла между направлением вектора силы и вертикальной прямой θ , полярного угла ϕ , проекций расстояния между частицами r и самого расстояния R , проекций силы F и самой силы взаимодействия F_r , проекций скорости V , приращения проекций расстояния между частицами dr и приращения проекций импульса dP .

Вводятся начальные данные, то бишь начальные координаты альфа-частицы x_0 , y_0 и z_0 , также задаются начальные компоненты скорости V_{x_0} , V_{y_0} и V_{z_0} . Вычисляются перечисленные выше углы, начальная сила и её проекции.

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

Далее представлен фрагмент программы:

```

for i=1:Nsteps-1
    dr(i,:) = [V(i,1) V(i,2) V(i,3)]*dt;

    r(i+1,:) = r(i,:)+dr(i,:);

    dP(i,:)=[F(i,1) F(i,2) F(i,3)]*dt;
    V(i+1,:)=V(i,:)+dP(i,:)./Malpha;

    R(i+1)=norm(r(i+1,:));

    alpha(i+1)=atand(V(i+1,3)./sqrt(V(i+1,1)^2+V(i+1,2)^2));

    theta(i+1)=atan2d(sqrt(r(i+1,1)^2+r(i+1,2)^2),r(i+1,3));
    phi(i+1)=atan2d(r(i+1,2),r(i+1,1))+360*(GetQuarter(r(i,:))>2);

    Fr(i+1)=(Zb*Zt*Qelem^2)/R(i+1)^2;

F(i+1,:)=[Fr(i+1)*sind(theta(i+1))*cosd(phi(i+1)) Fr(i+1)*sind(theta(i+1))*sind(phi(i+1))
end

plot3(0,0,0,'o',r(1,1),r(1,2),r(1,3),'*',r(:,1),r(:,2),r(:,3),'r')
legend('Start coordinates','Start coordinates alpha particle','Particle trajectory')

plot3(0,0,0,'o',r(1,1),r(1,2),r(1,3),'*',r(:,1),r(:,2),r(:,3),'r')
legend('Start coordinates','Start coordinates alpha particle','Particle trajectory')
%plot3(h(1,1),h(1,2),h(1,3),'*',r(1,1),r(1,2),r(1,3),'s',r(:,1),r(:,2),r(:,3))
box on; grid on

function f=GetQuarter(r)
    f=1;
    if r(1)<0 && r(2)>0
        f=2;
    elseif r(1)<0 && r(2)<0
        f=3;
    elseif r(1)>0 && r(2)<0
        f=4;
    end
end
end

```

На основе полученных данных, для презентации результата работы программы, были построены две различные траектории альфа-частицы, соответствующие двум различным начальным данным.

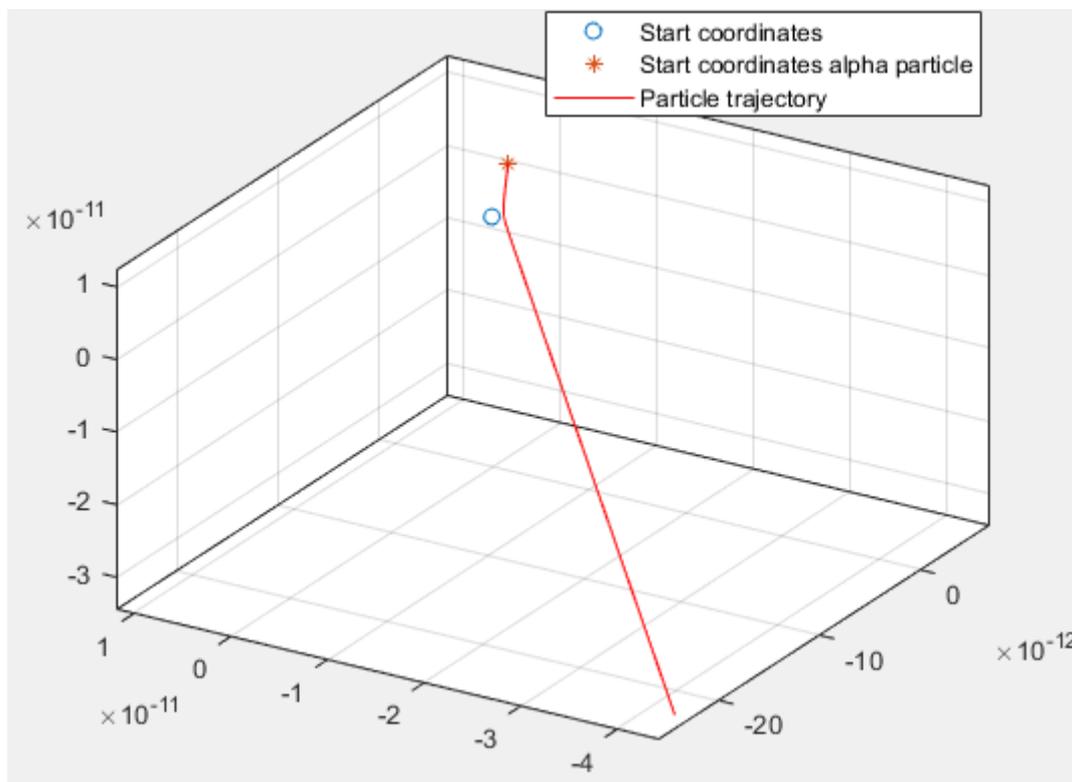


Рисунок 6: Траектория альфа-частицы I

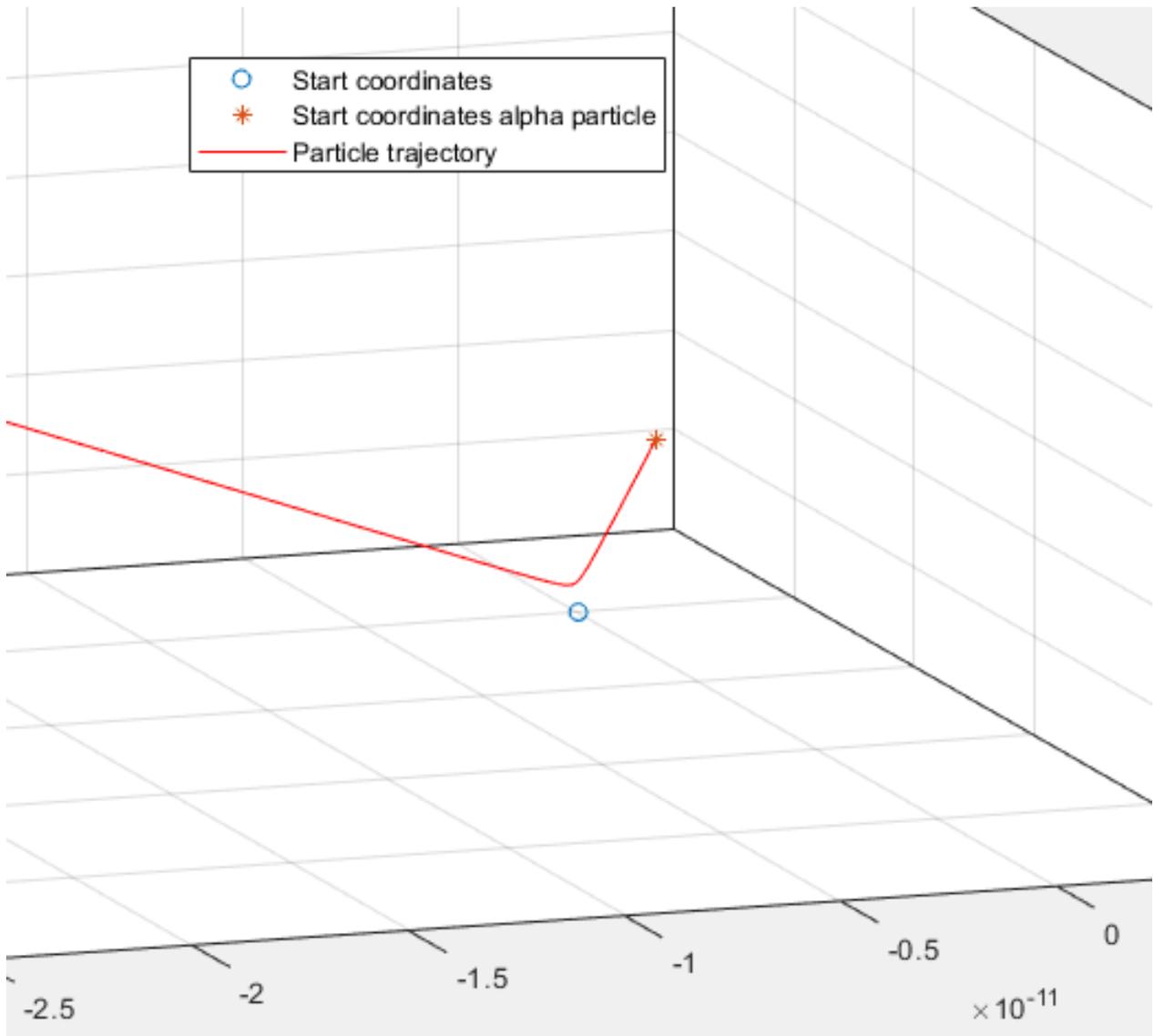


Рисунок 7: Траектория альфа-частицы II

2. Четвёртый этап. Задание возможности смещать систему координат (не размещать ядро-мишень только в точке $(0,0,0)$)

На четвёртом этапе программа написанная для третьего этапа была дополнена возможностью располагать ядро-мишень не только в начале координат. Таким образом были добавлены новые элементы: координаты ядра-мишени h , координаты вектора между ядром-мишенью и альфа-частицей l , расстояние между альфа-частицей и ядром-мишенью L .

Соответственно так же изменились алгоритмы вычисления ранее введённых

углов и силы, при условии, что ядро-мишень находится не в начале координат.

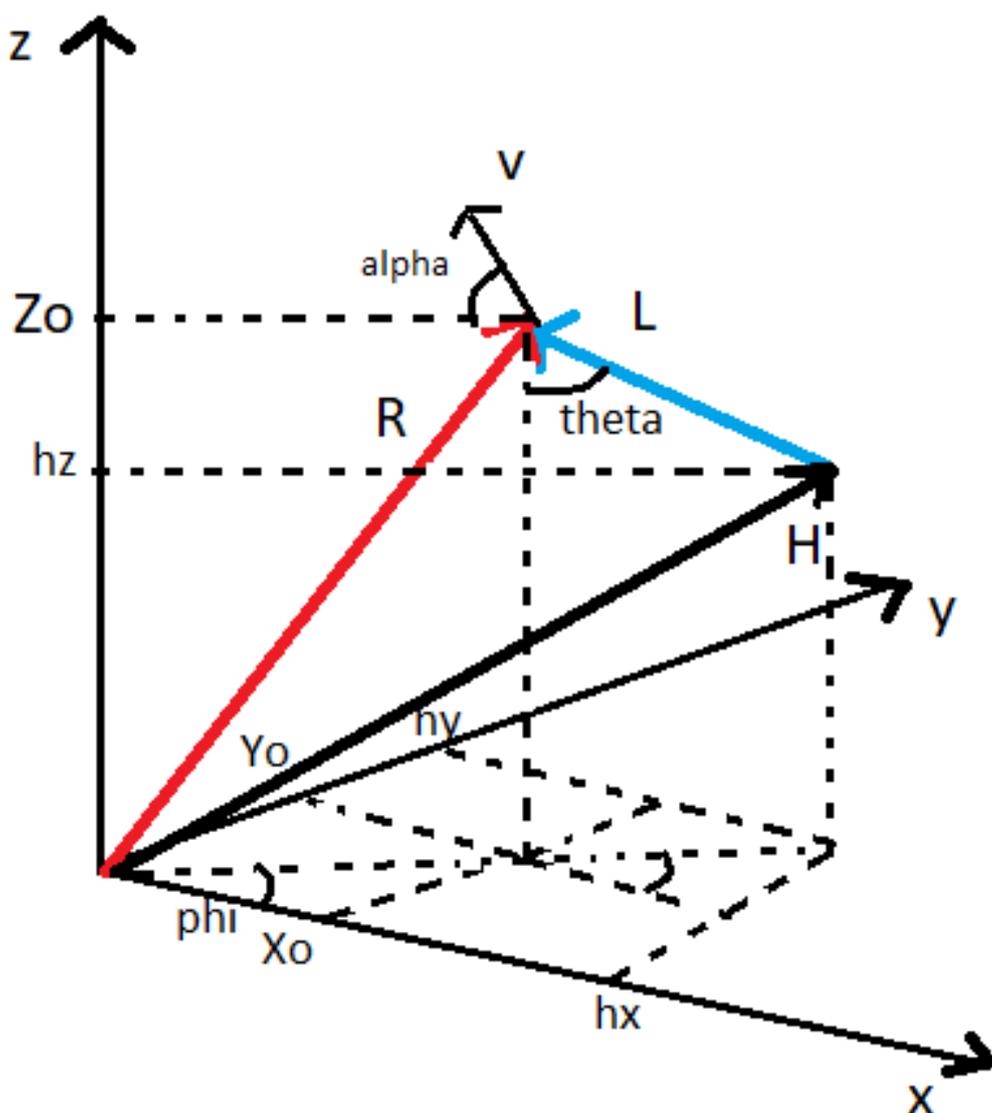


Рисунок 8: Рассматриваемая система

Далее представлен фрагмент программы:

```
for i=1:Nsteps-1
    dr(i,:) = [V(i,1) V(i,2) V(i,3)]*dt;

    r(i+1,:) = r(i,:)+dr(i,:);
    l(i+1,:) = r(i+1,:)-h(1,:);
    dP(i,:)=[F(i,1) F(i,2) F(i,3)]*dt;
    V(i+1,:)=V(i,:)+dP(i,:)./Malpha;

    R(i+1)=norm(r(i+1,:));
    L(i+1)=norm(l(i+1,:));
    alpha(i+1)=atand(V(i+1,3)./sqrt(V(i+1,1)^2+V(i+1,2)^2));

    if H(1)==0
        theta(i+1)=atan2d(sqrt(r(i+1,1)^2+r(i+1,2)^2),r(i+1,3));
        phi(i+1)=atan2d(r(i+1,2),r(i+1,1))+360*(GetQuarter(r(i,:))>2);
    else
        theta(i+1)=atan2d(sqrt(L(i+1)^2-(r(i+1,3)-h(1,3))^2),(r(i+1,3)-h(1,3)));
        phi(i+1)=atan2d(l(i+1,2),l(i+1,1))+360*(GetQuarter(l(i+1,:))>2);
    end

    if H(1)==0
        Fr(i+1)=(Zb*Zt*Qelem^2)/R(i+1)^2;
    else
        Fr(i+1)=(Zb*Zt*Qelem^2)/L(i+1)^2;
    end

    F(i+1,:)=[Fr(i+1)*sind(theta(i+1))*cosd(phi(i+1)) Fr(i+1)*sind(theta(i+1))*sind(phi(i+1))
```

Далее представлена траектория альфа-частицы для случая, когда ядро-мишень расположено не в начале координат:

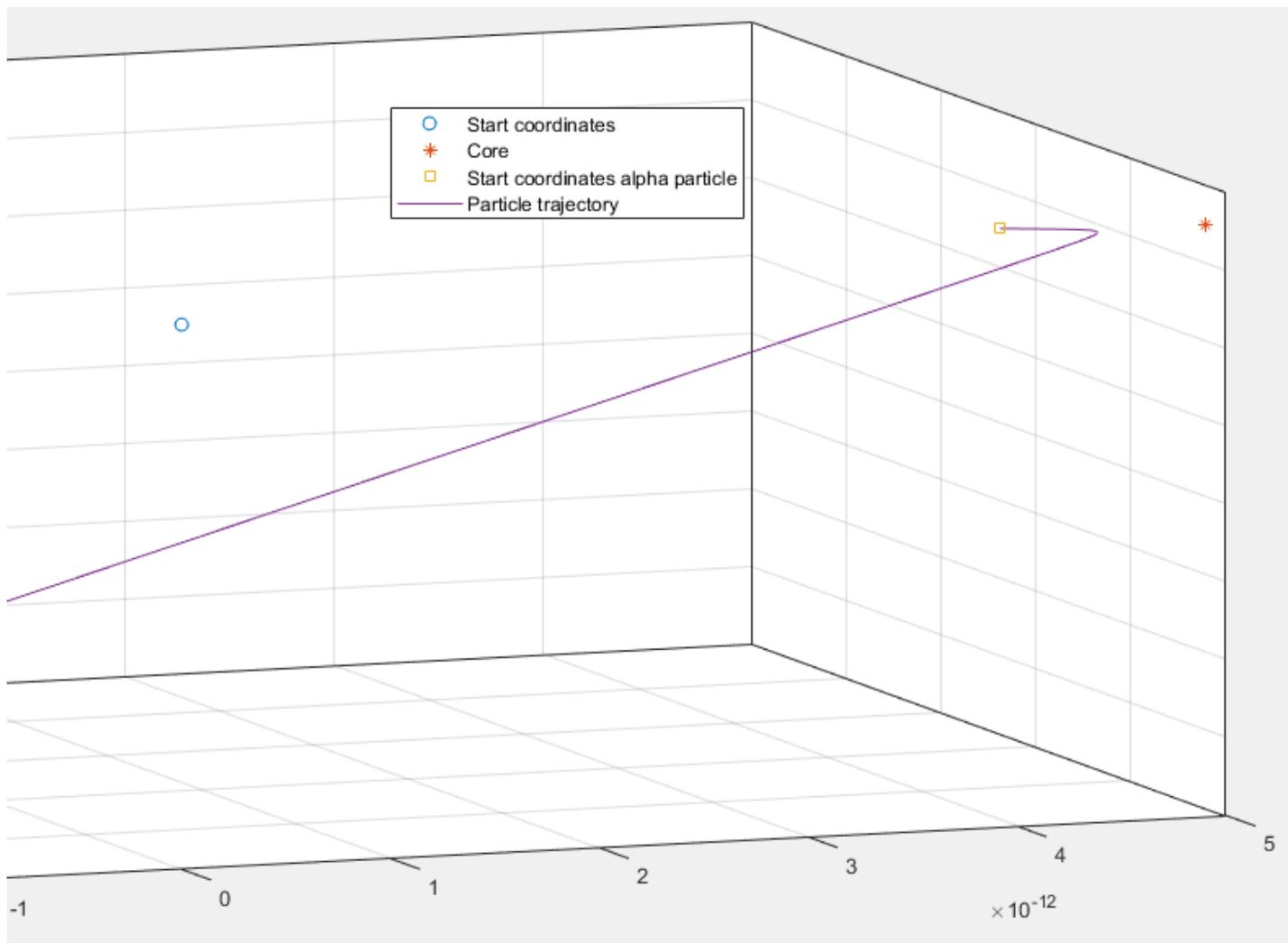


Рисунок 9: Траектории альфа-частицы

3. Пятый этап. Система OHe.

На этом этапе была написана отдельная программа для моделирования системы O-гелия. Задачей данного этапа являлось описать движение альфа-частицы вокруг O^{--} , расположенной в начале координат, по боровскому радиусу, в каждый момент времени.

Как и на предыдущих этапах задавались все необходимые константы, но на этом этапе также являлись постоянными величинами радиус вектор ядра He, то бишь боровский радиус, скорость альфа-частицы и сила Кулоновского взаимодействия между альфа-частицей и O^{--} . Также инициализировались все необходимые матрицы. Изменяются только полярный и азимутальный углы альфа-частицы, через которые выражаются её декартовые координаты.

Таким образом задаются начальные углы, через них вычисляются начальные

декартовы координаты, далее с помощью цикла, через выведенные соотношения, определяются изменения полярного и азимутального углов, которые прибавляясь к начальным углам дают их новые значения и соответственно новые декартовы координаты альфа-частицы.

Важным условием является то, что вводился угол ϵ - это угол между широтой, на которой находится альфа-частица, и новым направлением её скорости. При каждой новой итерации этот угол задаётся рандомно, с помощью встроенной в пакет Matlab функции, и изменяется от 0 до 360, тем самым обеспечивая неопределённое направление движения альфа-частицы по поверхности сферы с радиусом равным боровскому.

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

$$d\phi = 2 \arcsin \left(\sin \left(\frac{V_\alpha dt}{2R_b} \right) \sin \epsilon \right) \quad (2)$$

$$d\theta = 2 \arcsin \left(\sin \left(\frac{V_\alpha dt}{2R_b} \right) \frac{\cos \epsilon}{\cos \theta} \right) \quad (3)$$

где V_α это скорость альфа-частицы, R_b - боровский радиус, а dt это длительность одной итерации. Далее приводится фрагмент программы и результат её работы:

```

dt = 1e-15;
Nsteps=1e4;

% Arrays initialization
[r]=deal(zeros(Nsteps,3));
[theta,dtheta,phi,dphi]=deal(zeros(Nsteps,1));

% Initial kinematic
theta(1)=45;
phi(1)=45;
r(1,:) = [cosd(theta(1))*cosd(phi(1)) cosd(theta(1))*sind(phi(1)) sind(theta(1))]*Rb;

for i=1:Nsteps-1
    epsilon = 360*rand;
    dtheta(i)= 2*asind(sin(Valpha*dt/2/Rb)*sind(epsilon)); %Rb*2*sind((Valpha*dt)/(Rb*2))*sind(epsilon)
    dphi(i)= 2*asind( sin(Valpha*dt/2/Rb)*(cosd(epsilon)/cosd(theta(i))) ); %Rb*2*sind((Valpha*dt)/(Rb*2))*cosd(theta(i))*sind(epsilon)

    theta(i+1) = theta(i)+dtheta(i);
    phi(i+1) = phi(i)+dphi(i);

    r(i+1,:) = [cosd(theta(i+1))*cosd(phi(i+1)) cosd(theta(i+1))*sind(phi(i+1)) sind(theta(i+1))]*Rb;
end

```

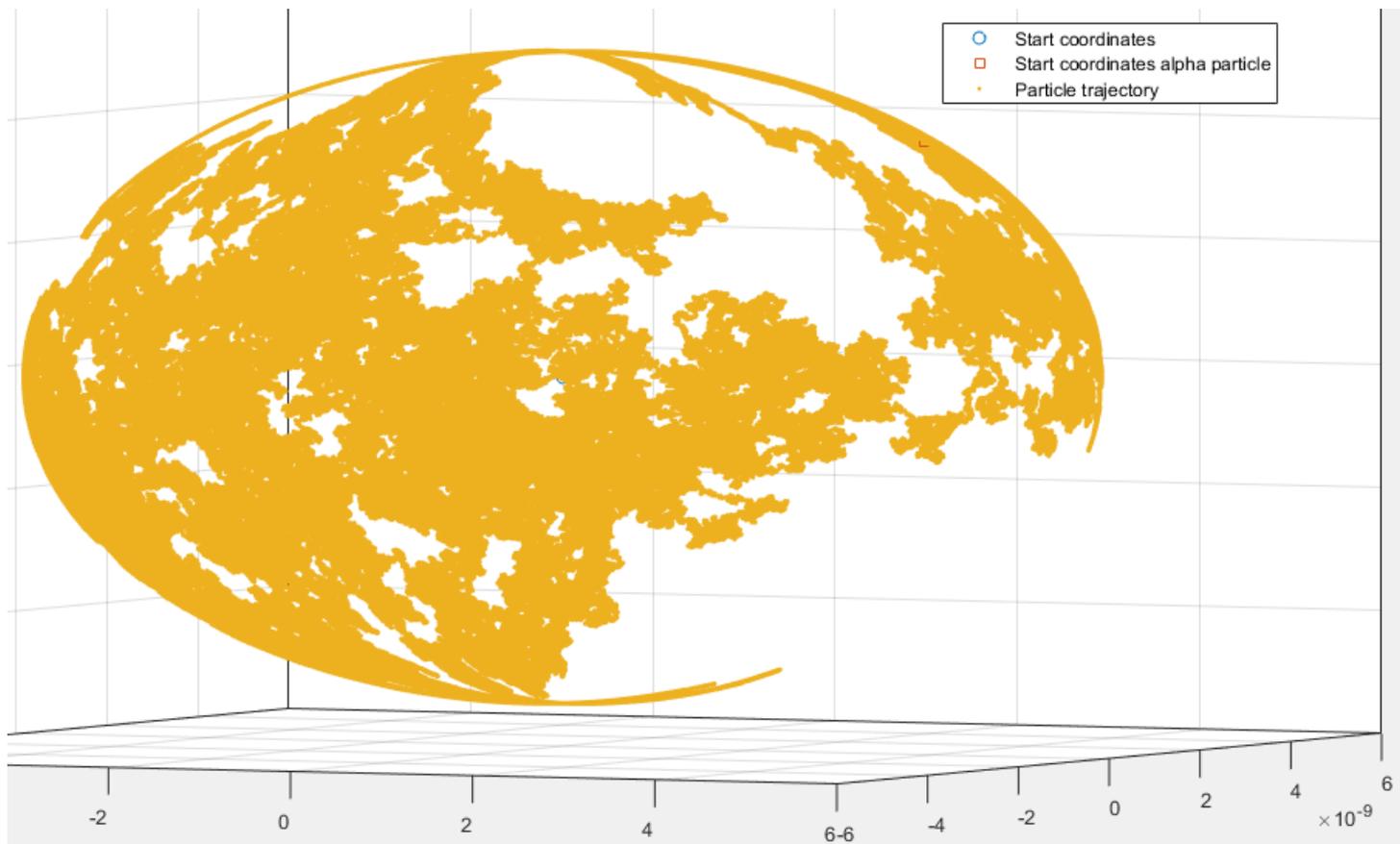


Рисунок 10: Траектория движения альфа-частицы в системе ОHe

4. Шестой этап. 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 были написаны отдельные 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 дефекта ядра β_2 , значения которых берутся из базы данных, и расстояние от центра ядра r . В самой функции, используя полученные данные, вычисляется 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.

Далее представлен фрагмент программы:

```
function [P] = DensityP(A, Z, Po, b2, r)
N=A-Z;

a =( 0.449 + 0.071*(Z/N) )*e-13; %[sm]
Ro=( 1.322*Z^(1/3)+0.007*N+0.022 )*e-13; %[sm]

R=sqrt( 3/5*Ro^2+(7*(pi^2)/5)*a^2 )*sqrt( 1+(5*b2^2)/(4*pi) )*e-13; %[sm]

P=Po/(1+exp( (r-R)/a ) ); %[nuclon/sm^3]

end
```

```
function [P] = DensityN(A, Z, Po, b2, r)
N=A-Z;

a =( 0.446 + 0.072*(Z/N) )*e-13; %[sm]
Ro=( 0.953*N^(1/3)+0.015*Z+0.774 )*e-13; %[sm]

R=sqrt( 3/5*Ro^2+(7*(pi^2)/5)*a^2 )*sqrt( 1+(5*b2^2)/(4*pi) )*e-13; %[sm]

P=Po/(1+exp( (r-R)/a ) ); %[nuclon/sm^3]

end
```

5. Седьмой этап. Система трёх тел.

На этом этапе были объединены в единую программу четвёртый и пятый этапы с некоторыми корректировками. На данной стадии, для удобства, в начало координат было помещено ядро-мишень. Между ядром-мишенью и частицей O^{--} действует кулоновское взаимодействие. В свою очередь вокруг частицы O^{--} вращается по боровскому радиусу альфа-частица, то есть на данном этапе система OHe движется к началу координат, где расположено положительно заряженное ядро-мишень.

С помощью итерационного цикла все необходимые и ранее инициализированные матрицы описывающие параметры рассматриваемой системы были заполнены соответствующими данными, как и на предыдущих этапах. По полученным данным можно построить траекторию альфа-частицы в рассматриваемой лабораторной системе, а не только в системе OHe , как в пятом этапе.

Далее представлены фрагмент написанной программы и результат её работы.

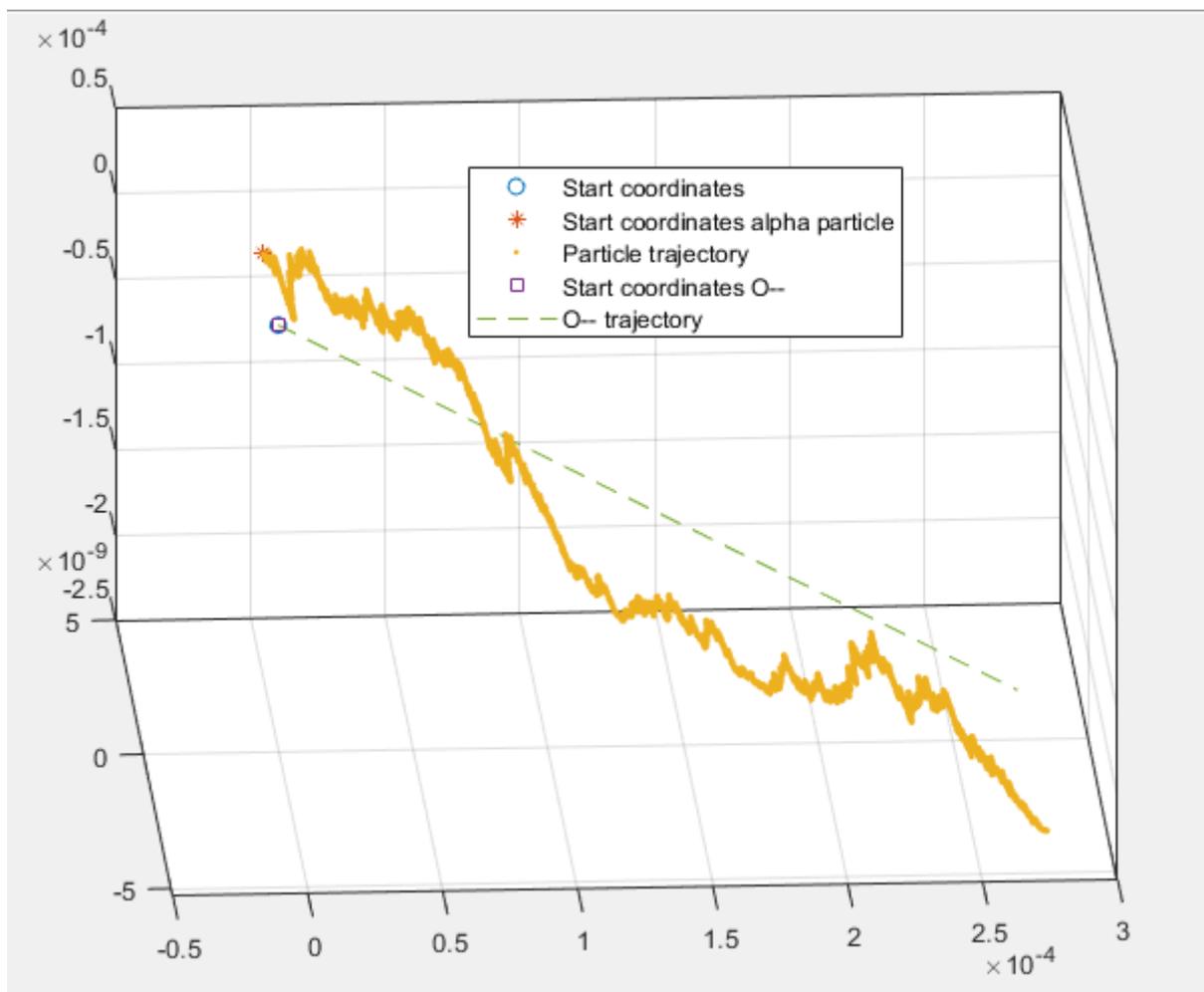


Рисунок 11: Траектория движения альфа-частицы в лабораторной системе

```

64 - for i=1:Nsteps-1
65 -     u=0;
66 -     epsilon = 360*rand;
67 -     dthetaAlpha(i)= 2*asin( sin( Valpha*dt/(2*Rb) ) *sin(epsilon*deg2rad) ); %Rb*2*sind((Valpha*dt)/(Rb*2)) *
68 -     dphiAlpha(i) = 2*asin( sin( Valpha*dt/(2*Rb) ) *cos(epsilon*deg2rad)/cos(thetaAlpha(i)*deg2rad) ); %Rb*
69 -     thetaAlpha(i+1) = thetaAlpha(i)+dthetaAlpha(i)*rad2deg;
70 -     phiAlpha(i+1) = phiAlpha(i)+dphiAlpha(i)*rad2deg;
71 -     %dO=dO+cos(thetaAlpha(i))*rad2deg*dthetaAlpha(i)*dphiAlpha(i);
72 -
73 -     dr(i,:) = [V(i,1) V(i,2) V(i,3)]*dt;
74 -     r(i+1,:) = r(i,:)+dr(i,:);
75 -     l(i+1,:) = r(i+1,:)-h(l,:);
76 -
77 -     dP(i,:)=[F(i,1) F(i,2) F(i,3)]*dt;
78 -     V(i+1,:)=V(i,:)+dP(i,:)./M_O_minusminusGramm;
79 -     ralpha(i+1,:) = [cosd(thetaAlpha(i+1))*cosd(phiAlpha(i+1)) cosd(thetaAlpha(i+1))*sind(phiAlpha(i+1)) si
80 -     rAlpha(i+1,:)=[cos(thetaAlpha(i+1)*deg2rad)*cos(phiAlpha(i+1)*deg2rad) cos(thetaAlpha(i+1)*deg2rad)*sin
81 -     R(i+1)=norm(r(i+1,:));
82 -     L(i+1)=norm(l(i+1,:));
83 -     alpha(i+1)=atand(V(i+1,3)./sqrt(V(i+1,1)^2+V(i+1,2)^2));
84 -
85 -     if H(l)==0
86 -         theta(i+1)=atan2d(sqrt(r(i+1,1)^2+r(i+1,2)^2),r(i+1,3));
87 -         phi(i+1)=atan2d(r(i+1,2),r(i+1,1))+360*(GetQuarter(r(i,:))>2);
88 -     else
89 -         theta(i+1)=atan2d( sqrt(L(i+1)^2-(r(i+1,3)-h(l,3))^2), (r(i+1,3)-h(l,3)) );
90 -         phi(i+1)=atan2d(l(i+1,2),l(i+1,1))+360*(GetQuarter(l(i+1,:))>2);
91 -     end
92 -
93 -     if H(l)==0
94 -         Fr(i+1)=(Zo*Zt*Qelem^2)/R(i+1)^2;

```

6. Заключение

Преимущества модели составной скрытой массы 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 .

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, что может повлечь за собой создание дипольного кулоновского барьера, но это происходит, когда теория возмущений больше не может быть применена и решить уравнение Шрёдингера довольно проблематично, поэтому целью данной НИР предполагалось численное моделирование задачи с целью выявления условий существования низкоэнергетического связанного состояния внешнего ядра с ONe . 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. Добавить ядерные силы и силы Кулоновского взаимодействия между каждой из частиц системы 3-х тел.
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].