

Моделирование взаимодействия «тёмных» атомов О-гелия с ядрами вещества.

Студент:

Бикбаев Т.Э.

Научный руководитель, д.ф.-м.н., проф.:

Хлопов М.Ю.

Научный консультант, к.ф.-м.н., доц.:

Майоров А.Г.

Проблема скрытой массы



Сценарии гипотетических, стабильных, электрически заряженных частиц.

В данной работе рассматривается сценарий составной скрытой массы, в которой гипотетические стабильные частицы O^{--} избегают экспериментального открытия, потому что они формируют с первичным гелием нейтральные атомоподобные состояния OHe , взаимодействующие с окружающим веществом и называемые "тёмными" атомами.

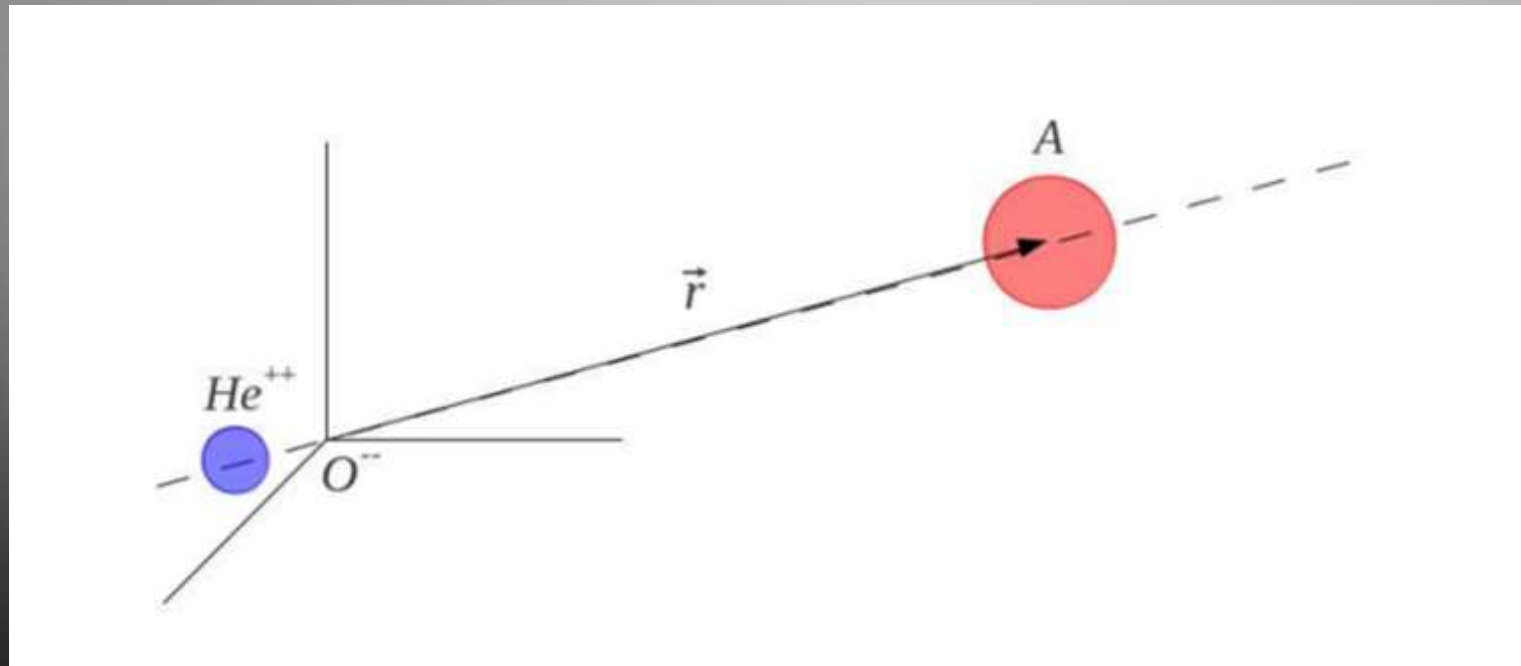


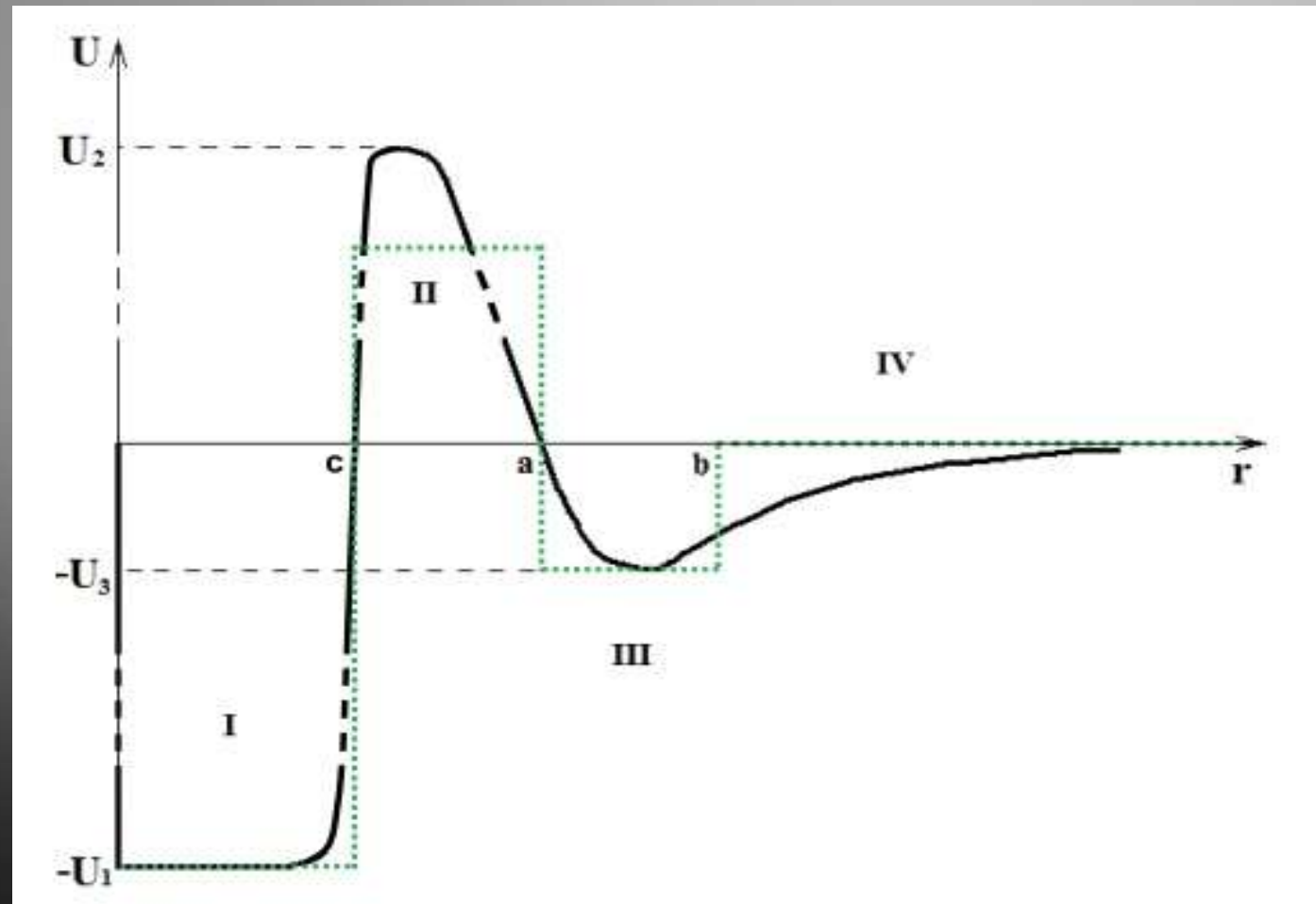
Иллюстрация "тёмного" атома OHe и внешнего ядра вещества A

Модель OHe и решение проблемы прямых поисков частиц скрытой массы

- Модель OHe предполагает существование реликтовых стабильных лептоноподобных массивных частиц с зарядом -2 , связанных кулоновским взаимодействием с ядрами первичного гелия в “темные” атомы скрытой массы.
- Результаты экспериментов DAMA/NaI и DAMA/LIBRA можно объяснить годовыми модуляциями энерговыделения при формировании низкоэнергетического связанного состояния OHe с ядрами.

| Детектор | Ядра | A | Z | Температура | Обнаружение |
|---------------------------|---------------|------------------|----------------|-------------|--------------|
| DAMA (/NaI +/LIBRA) | Na I TI | 23 127 205 | 11 53 81 | 300 К | 8.9 σ |
| CoGeNT | Ge | 70-74 | 32 | 70 К | 2.8 σ |
| CDMS | Ge (Si) | 70-74 (28-30) | 32 (14) | Криогенный | – |
| XENON100 | Xe | 124-134 | 54 | Криогенный | – |

Существование низкоэнергетического связанного состояния OHe с ядрами и доминантность упругих процессов в сценарии OHe основывается на гипотезе о наличии потенциального барьера в процессах взаимодействия OHe с ядрами, требующей корректного квантово-механического обоснования.



Эффективный потенциал взаимодействия между OHe и ядром барионного вещества

Гипотеза OHe не может работать, если на некотором расстоянии между O-гелием и ядром не возникнет отталкивающего взаимодействия, и решение данной проблемы является жизненно важным для дальнейшего существования модели атома OHe скрытой массы. Поэтому, перед нами стояла задача построить численную модель взаимодействия “тёмного” атома OHe с ядром вещества.

В рамках предложенного подхода к такому моделированию, для выявления сущности процессов взаимодействия OHe с ядрами, используется классическая модель, в которую последовательно добавляются эффекты квантовой физики.

Моделирование OHe

Схема численного моделирования динамической системы OHe

1) α -частица в связанной системе OHe имеет только две независимые степени свободы, в качестве которых принимаются полярный и азимутальный углы. θ_0 и ϕ_0 - начальные значения углов, через которые вычисляются начальные компоненты радиус-вектора α -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:

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

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

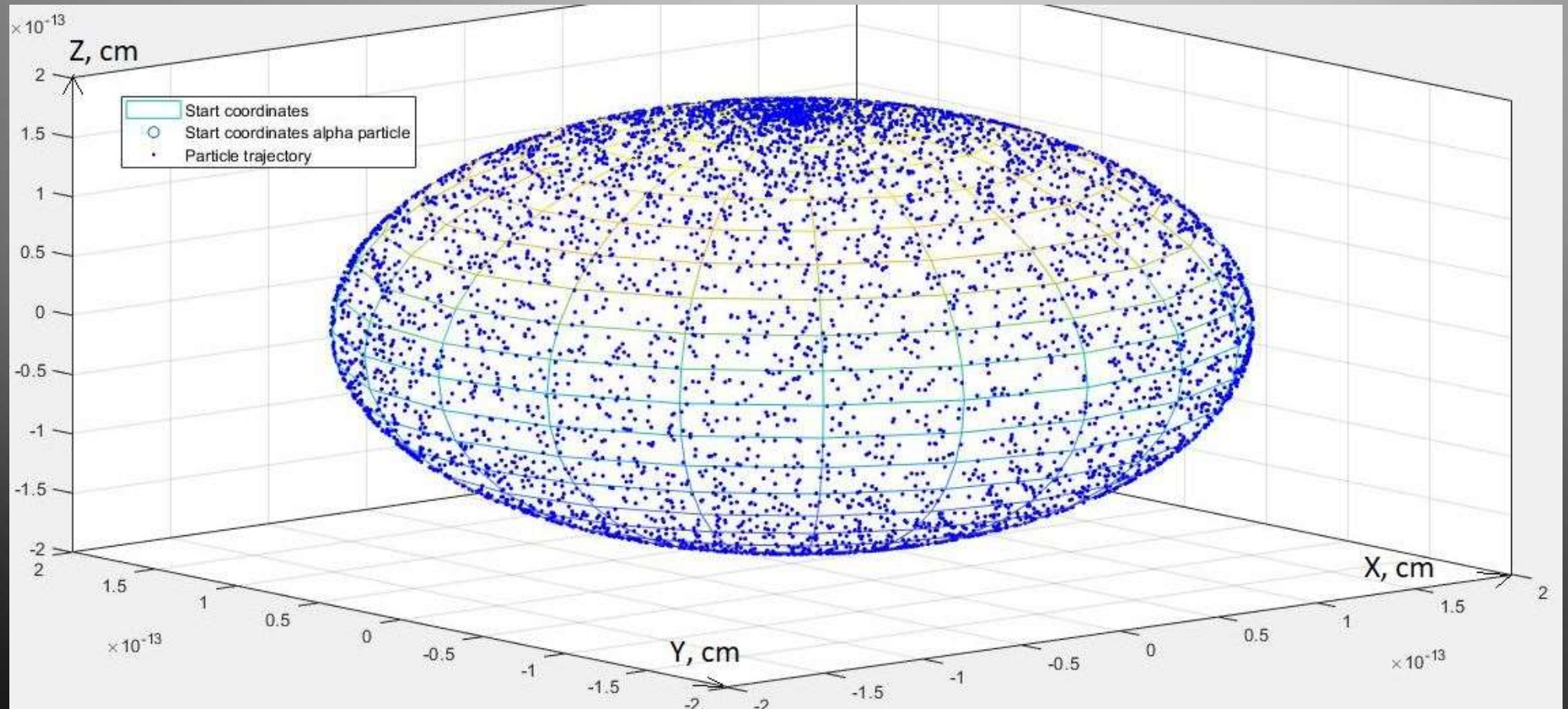
где n - это случайная величина с равномерным распределением на отрезке от 0 до 1.

3) Проверяем условие для приращения углов:

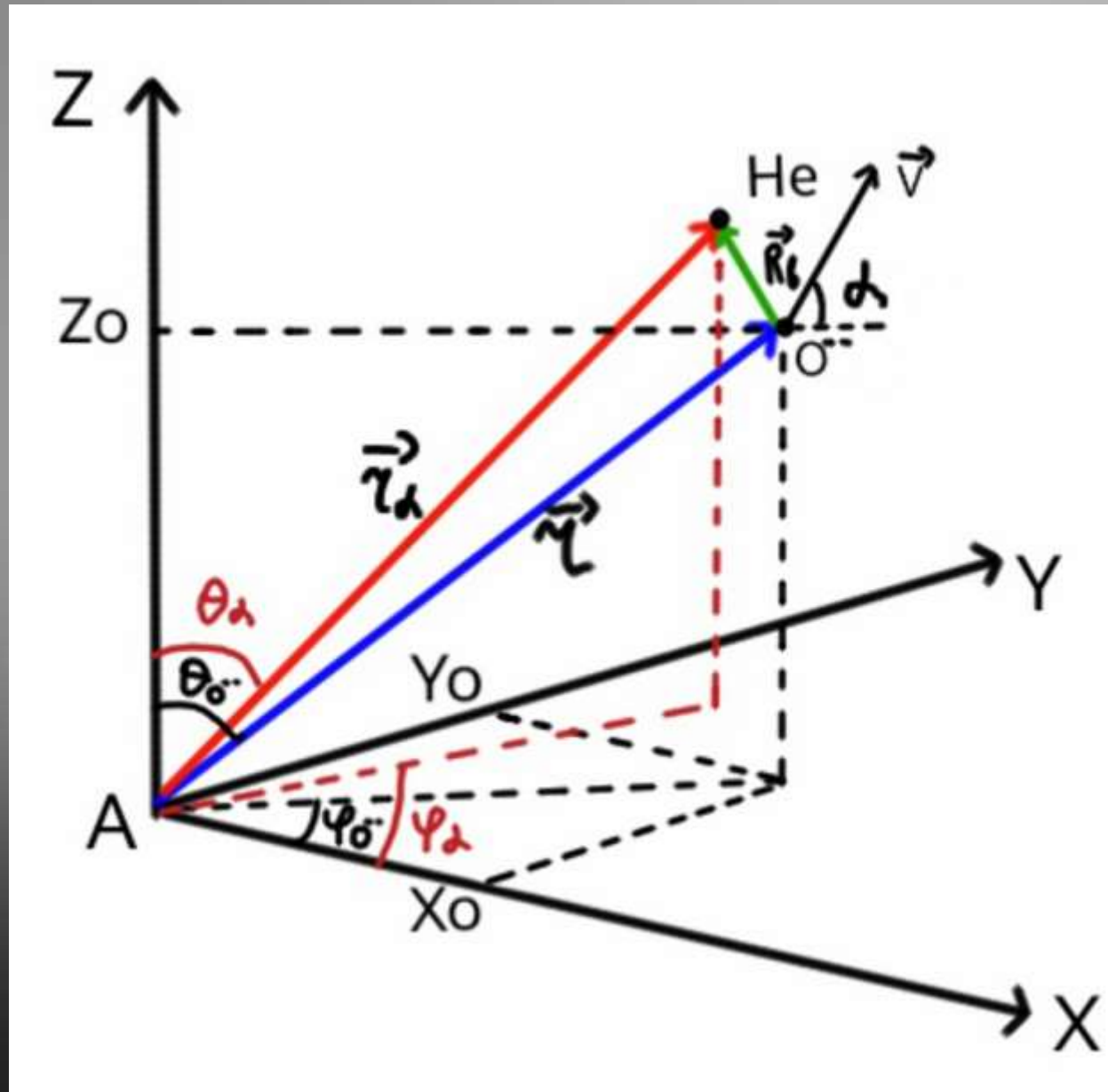
$$\left(d\theta\right)^2 + \left(\cos\theta d\phi\right)^2 \leq \left(\frac{V_\alpha dt}{R_b}\right)^2$$

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 .

Плотность распределения координат α -частицы на орбите, соответствующей основному состоянию системы



Система координат OHe-ядро



Кулоновское взаимодействие в системе OHe–ядро

$$\vec{r}_\alpha = \vec{r} + \vec{R}_b$$

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

$$\vec{F}_{ZO}^e = \vec{F}_{ZO}^e(\vec{r}) = \frac{ZZ_0 e^2 \vec{r}}{r^3},$$

Численная схема расчета сил в зависимости от расстояния между объектами

1) Мы используем следующие начальные условия: начальные координаты $O^- [x_0, y_0, z_0]$ (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 α -частицы $d\vec{P}_{\alpha_i}$:

$$d\vec{P}_{\alpha_i} = \vec{F}_{\alpha_i}^e dt.$$

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

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

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

$$\vec{F}_{i\text{sum}} = \vec{F}_{iZO}^e + \vec{F}_{i\alpha}^e.$$

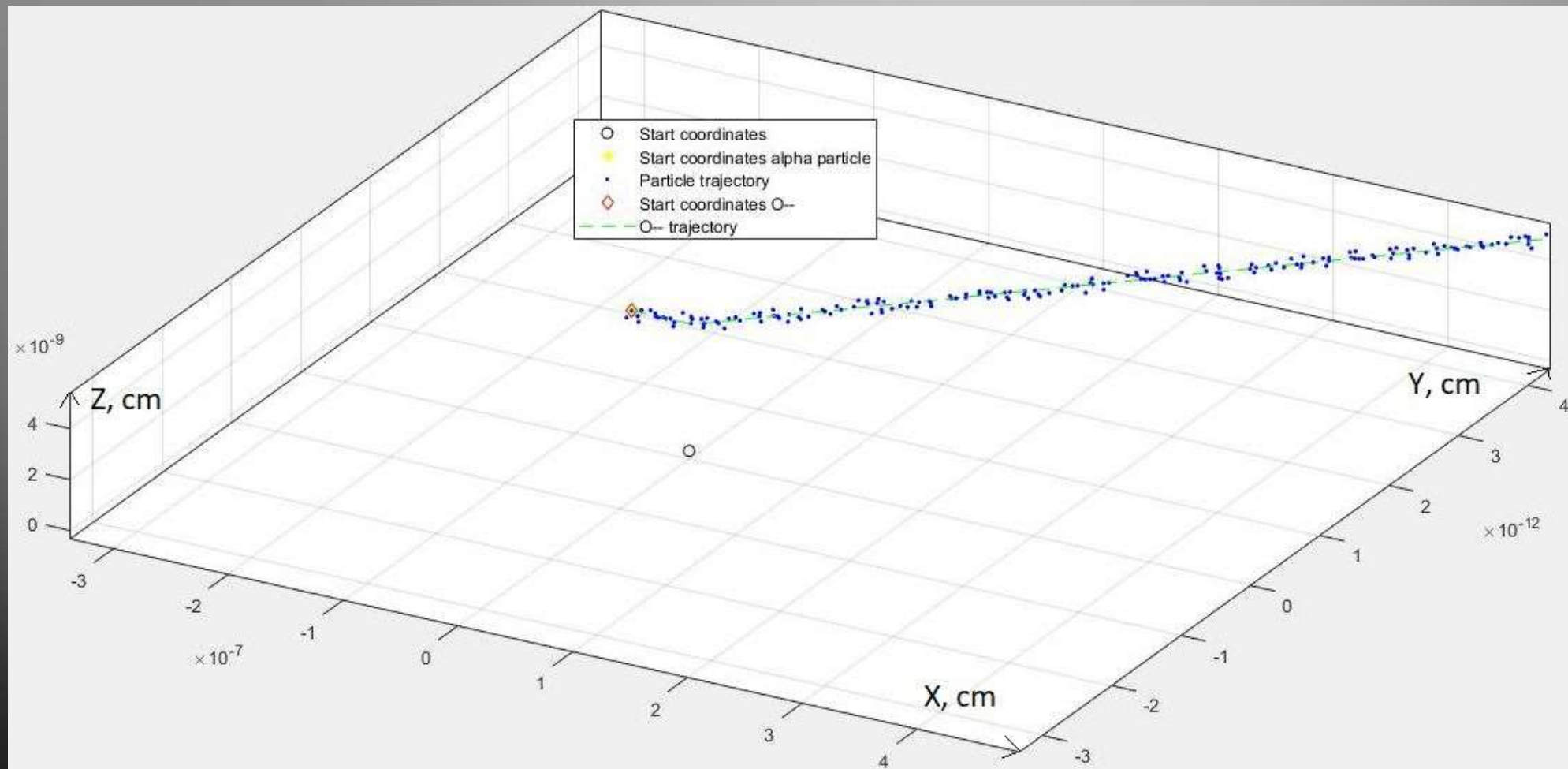
5) Вычисляется приращение импульса $d\vec{P}_i$ системы OHe , которое в совокупности является приращением импульса частицы O^{--} :

$$d\vec{P}_i = \vec{F}_{i\text{sum}} dt.$$

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:

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

Траектории альфа-частицы и частицы O^{--}



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 $\vec{F}_{i\alpha}^N$:

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

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

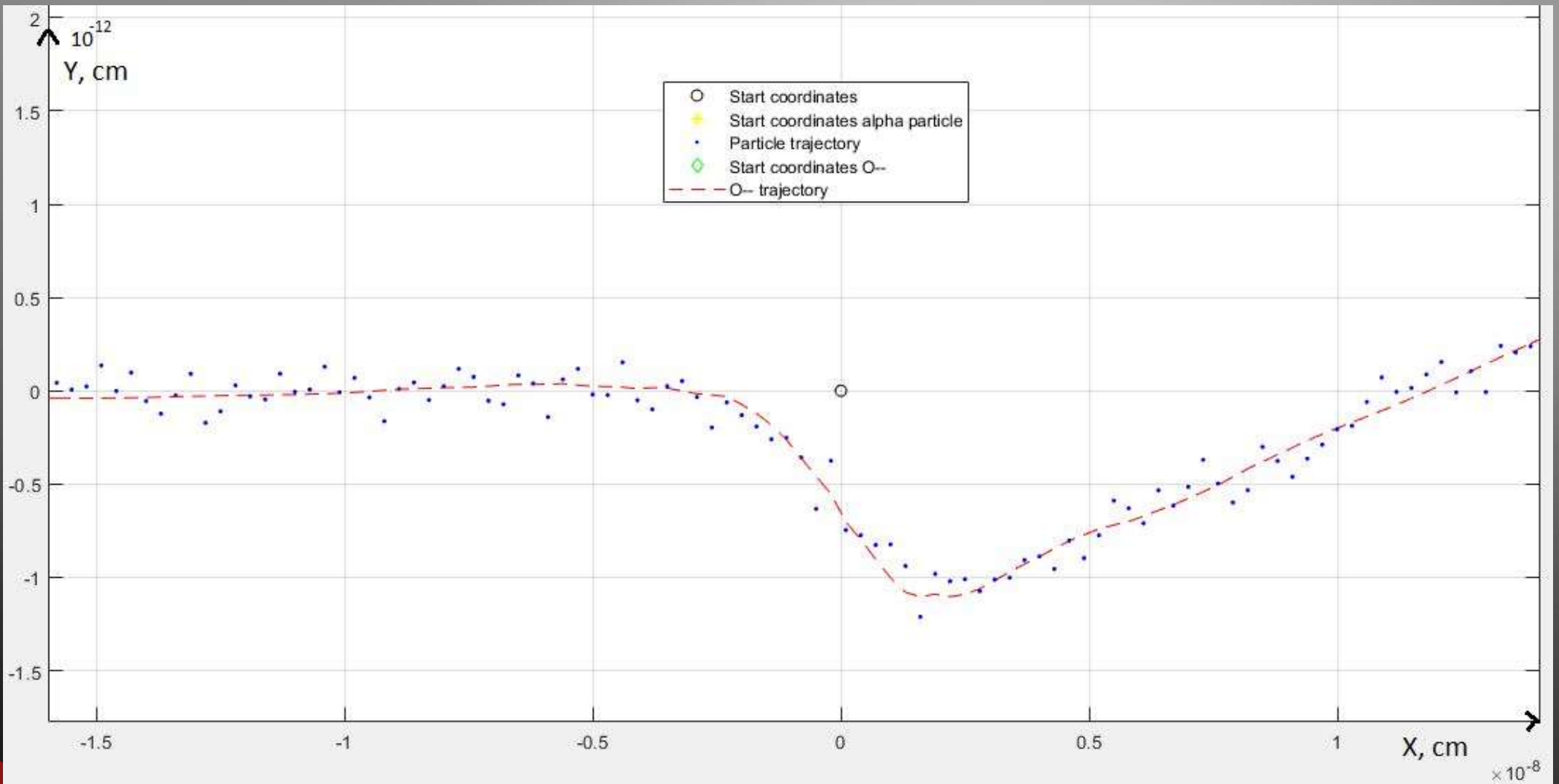
Полная сила, действующая на систему OHe , \vec{F}_{iSum} , вычисляется следующим образом:

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

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

$$\vec{F}_{i\alpha} = \vec{F}_{i\alpha}^e + \vec{F}_{i\alpha}^N.$$

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



Квантово-механический эффект туннелирования и условие прекращения работы алгоритма программы

$$B_k = \frac{Zze^2}{R}$$

1) В каждой итерации цикла вычисляется скорость α -частицы в системе координат OHe-ядро

$$\vec{V}_{i\alpha_{sum}} = \vec{V}_{i\alpha} + \vec{V}_i.$$

2) С помощью скорости α -частицы, вычисляется её кинетическая энергия T в системе координат OHe-ядро и соответствующее ей значение r_2

$$r_2 = \frac{Zze^2}{T}$$

3) Определяется вероятность туннельного перехода

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

4) Рассматривается отрезок от 0 до 1 и генерируется случайное число, равномерно распределённое на этом отрезке - n

5) 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

Заключение

Перед нами стояла задача построить численную модель взаимодействия OHe с ядром-мишенью. Такая численная модель построена в данной 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 α -частицей и ядром-мишенью и траектория O^{--} испытывает биения в окрестности ядра из-за действия ядерного взаимодействия между α -частицей и ядром-мишенью.

В дальнейшем планируется исследовать построенную численную модель, варьируя различные свободные параметры, например, прицельный параметр системы, энергию налетающей частицы и т. д.

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

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

$$a_p = 0.449 + 0.071 \frac{Z}{N}$$

$$a_n = 0.446 + 0.072 \frac{N}{Z}$$

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

где R_{o_p} и R_{o_n} также вычисляются используя формулы:

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

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

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

$$I_0 = \frac{Z_{O^{--}}^2 Z_{He}^2 \alpha^2 m_{He}}{2} \approx 1.6 \text{ МэВ}$$

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

$$V_\alpha = \frac{\hbar c^2}{m_{He} R_b} \approx 3.02 \cdot 10^4 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$