

Моделирование взаимодействия «тёмных» атомов OHe с ядрами барионного вещества

Студент:

Бикбаев Т.Э.

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

Хлопов М.Ю.

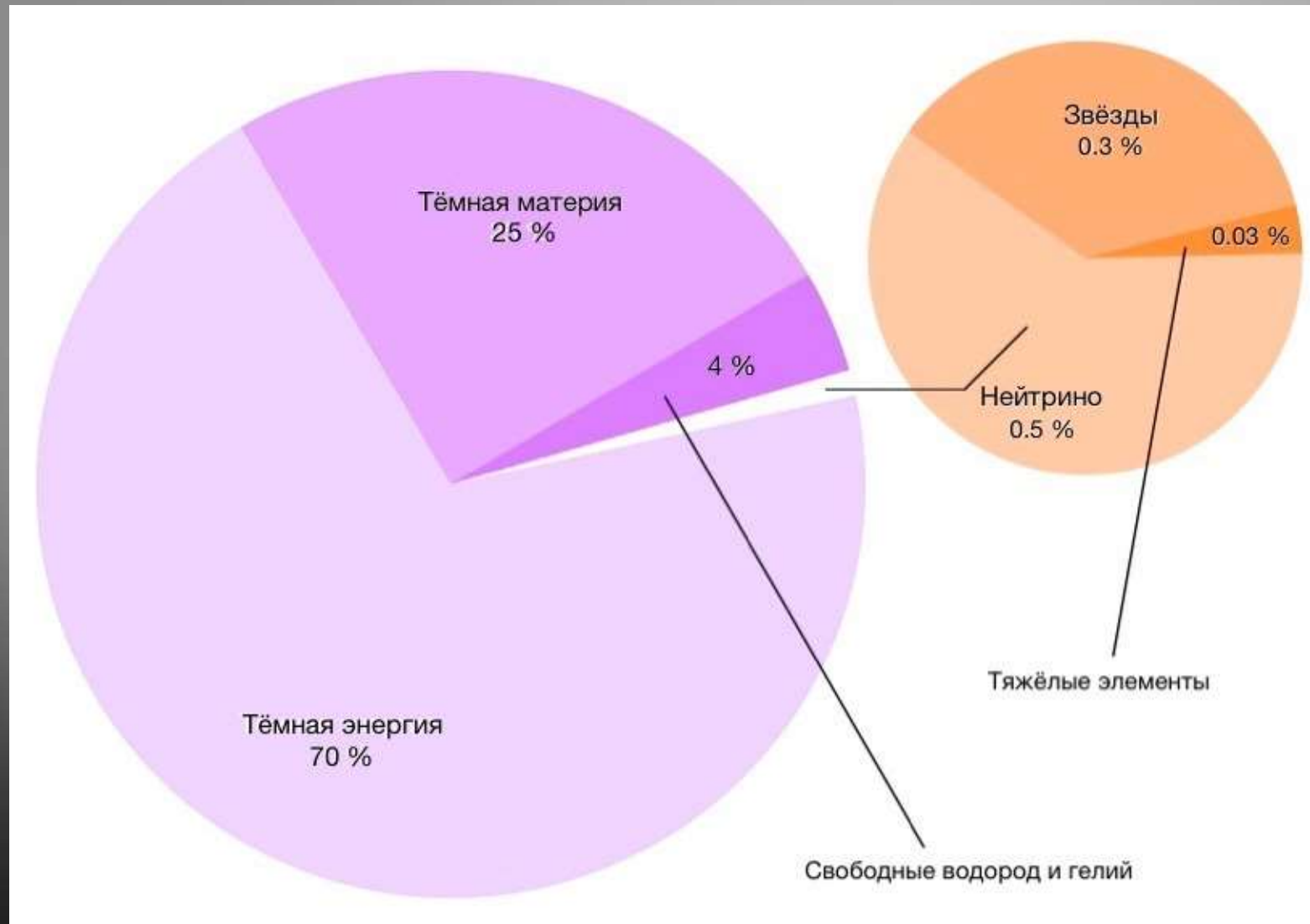
Научный консультант, к.ф.-м.н., доц.:

Майоров А.Г.

Рецензент, к.ф.-м.н., доц.:

Гани В.А.

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.

Модель OHe предполагает существование реликтовых, стабильных, лептоноподобных, массивных(1.25 ТэВ) частиц с зарядом -2, связанных кулоновским взаимодействием с ядрами первичного гелия в "темные атомы" скрытой массы.

Гипотеза OHe включает в себя один параметр «новой» физики

“Тёмные” атомы OHe, обеспечивают современную плотность нерелятивистского вещества и играют роль нетривиальной формы сильно взаимодействующей скрытой массы.

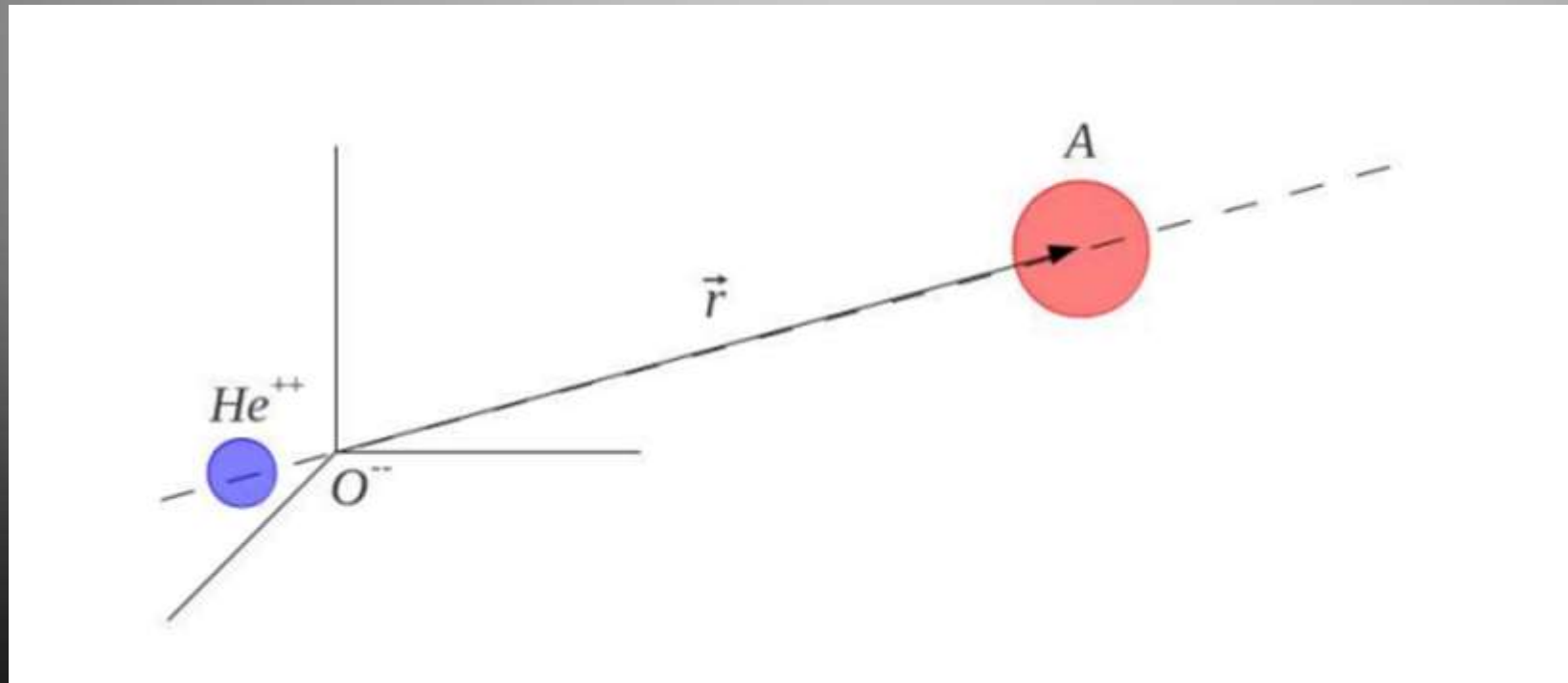


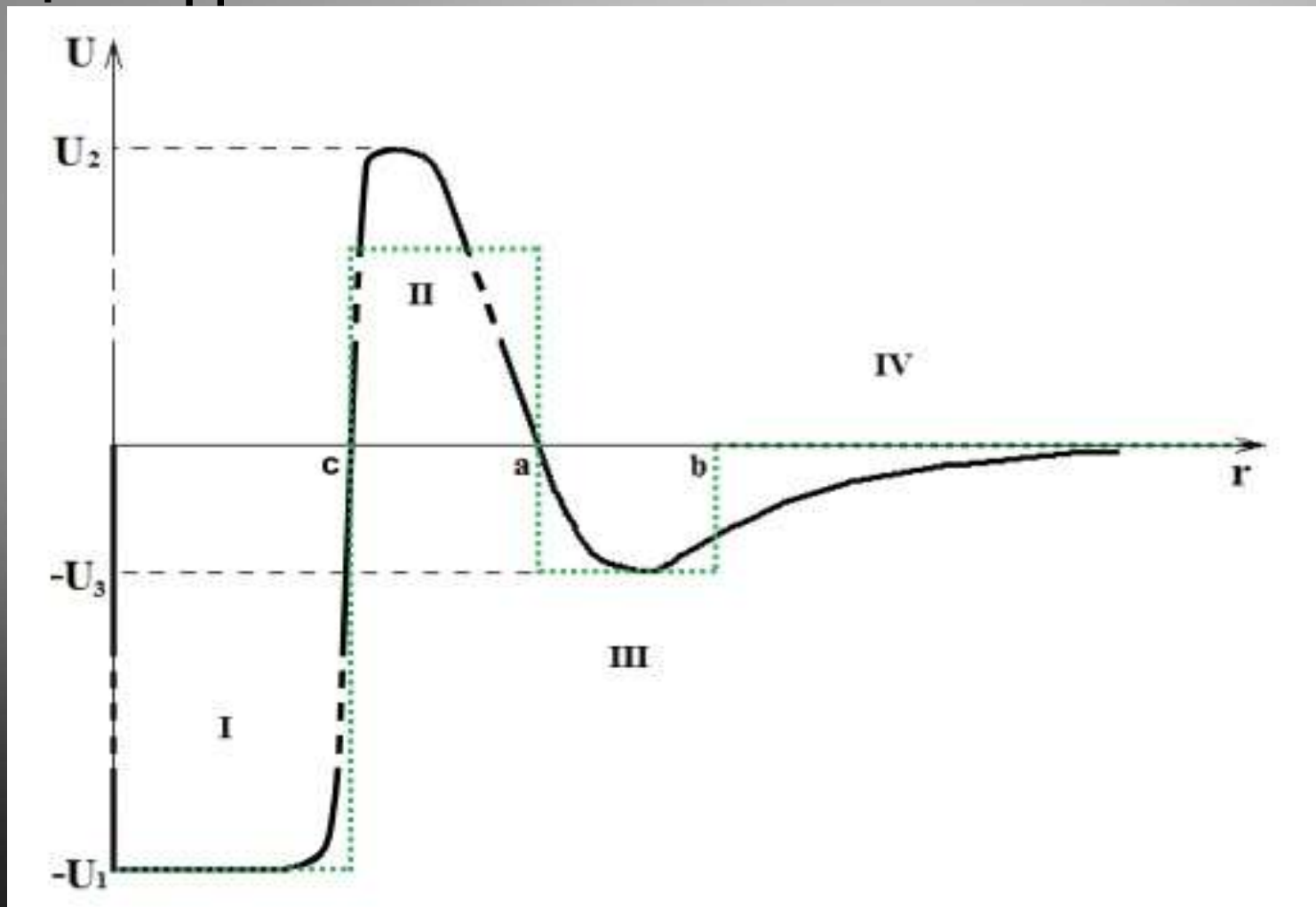
Иллюстрация "тёмного" атома OHe и внешнего ядра вещества A

Результаты поисков «тёмной» материи

Результаты экспериментов DAMA/NaI и DAMA/LIBRA можно объяснить годовыми модуляциями энерговыведения 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	–

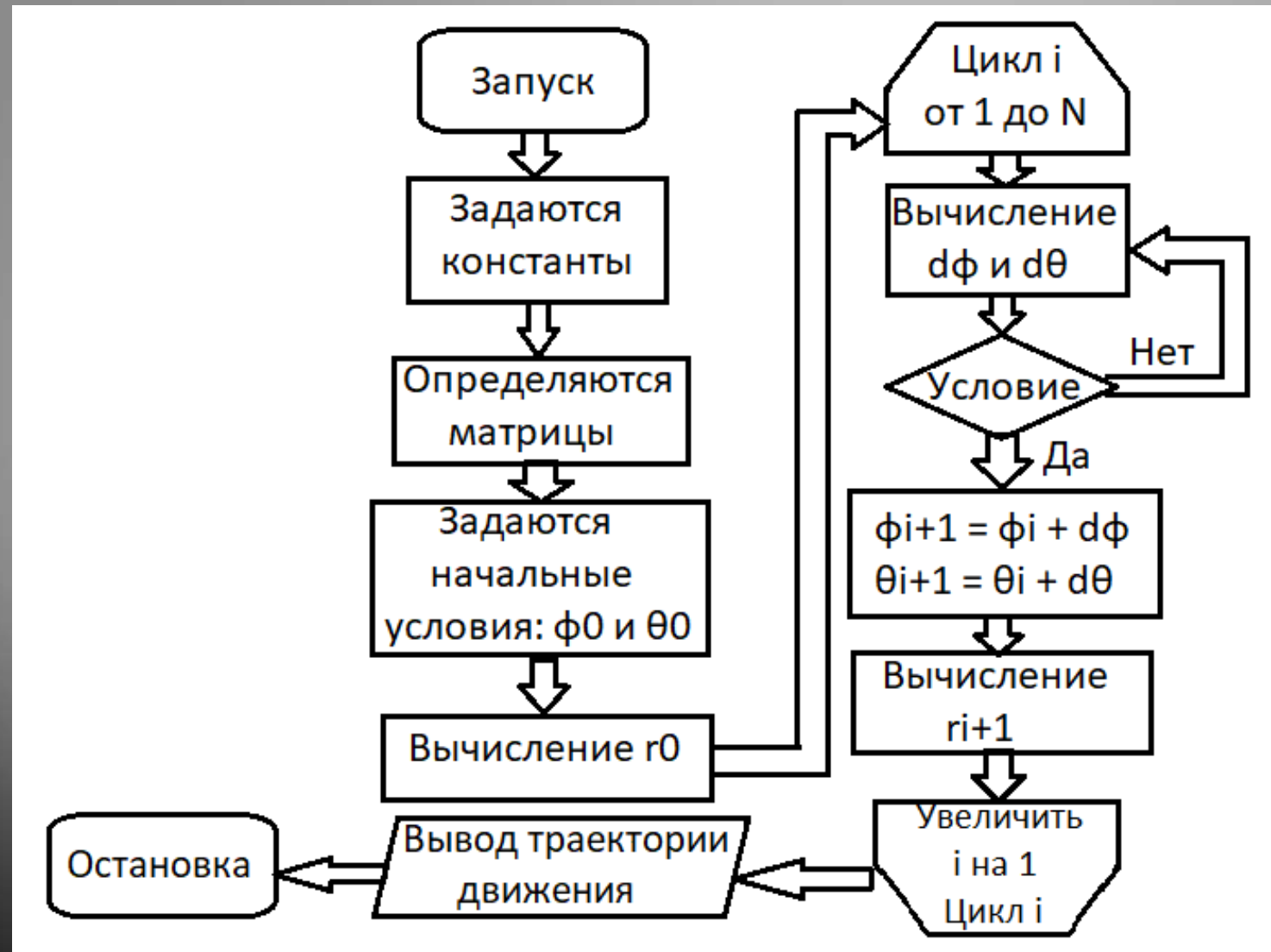
Существование низкоэнергетического связанного состояния OHe с ядрами и доминантность упругих процессов в сценарии OHe основывается на гипотезе о наличии дипольного потенциального барьера в процессах взаимодействия OHe с ядрами, требующей корректного квантовомеханического обоснования



Эффективный потенциал взаимодействия между OHe и ядром барионного вещества

Целью работы является построение численной модели взаимодействия "тёмного" атома $O\text{Ne}$ с ядрами вещества. В рамках предложенного подхода к такому моделированию, для выявления сущности процессов взаимодействия $O\text{Ne}$ с ядрами, используется классическая модель, в которую последовательно добавляются эффекты квантовой физики.

Моделирование ОНе

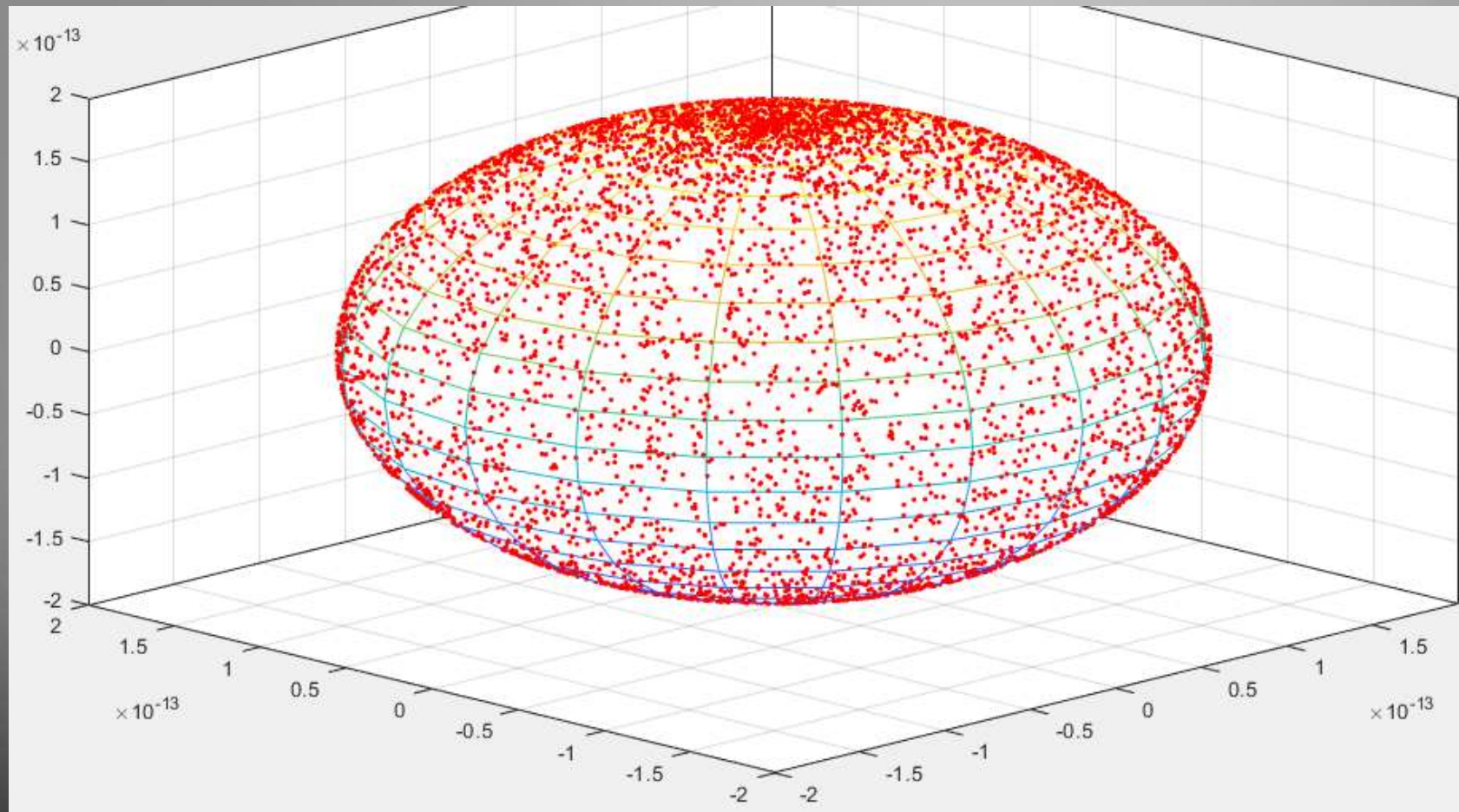


Блок-схема моделирования системы ОНе

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

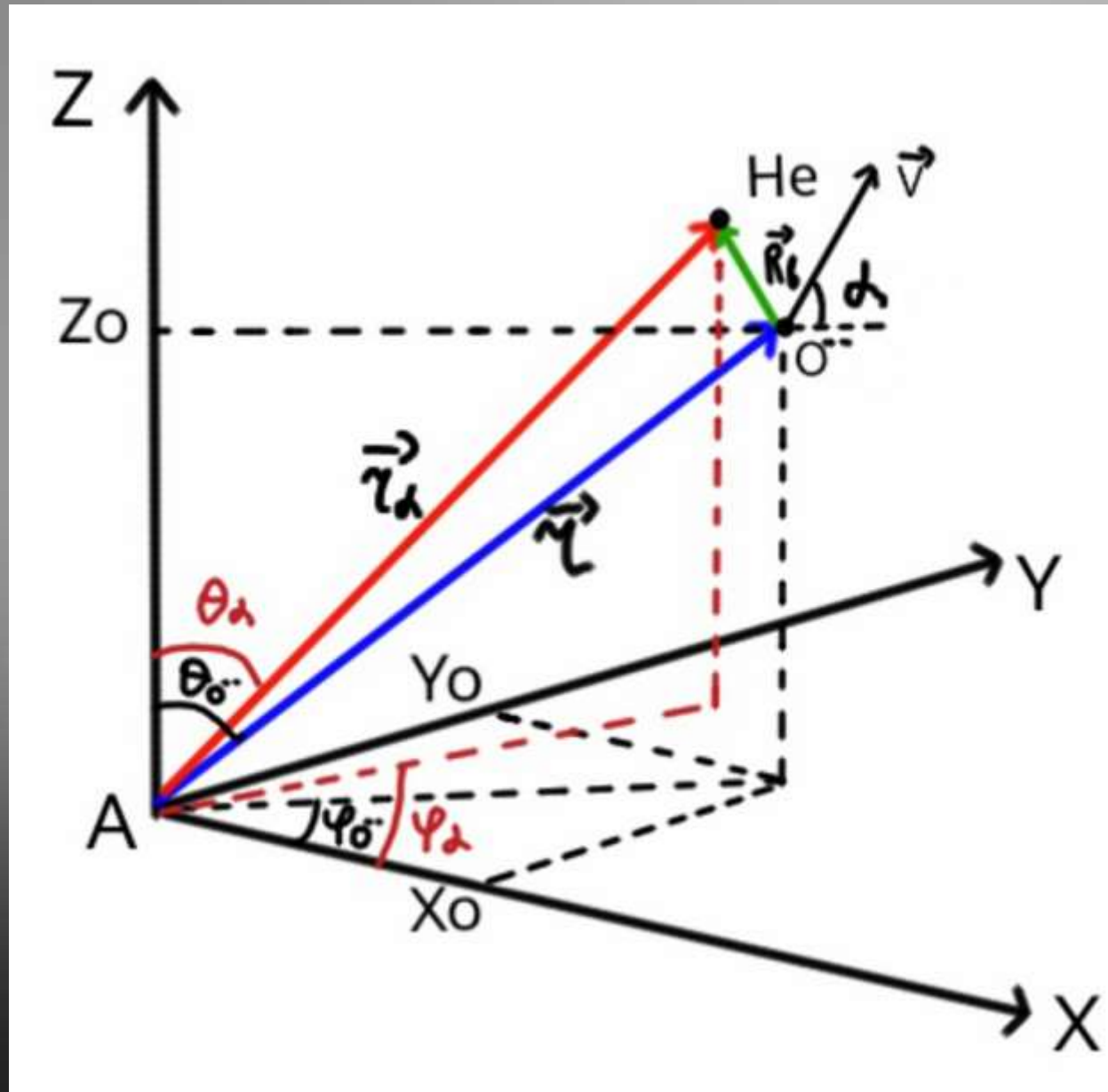
$$d\phi = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_\alpha dt}{R_b} \right)^2 - (d\theta)^2}}{\cos(\theta)} (2rand - 1)$$

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



Плотность распределения координат альфа-частицы на поверхности сферы боровского радиуса R_b

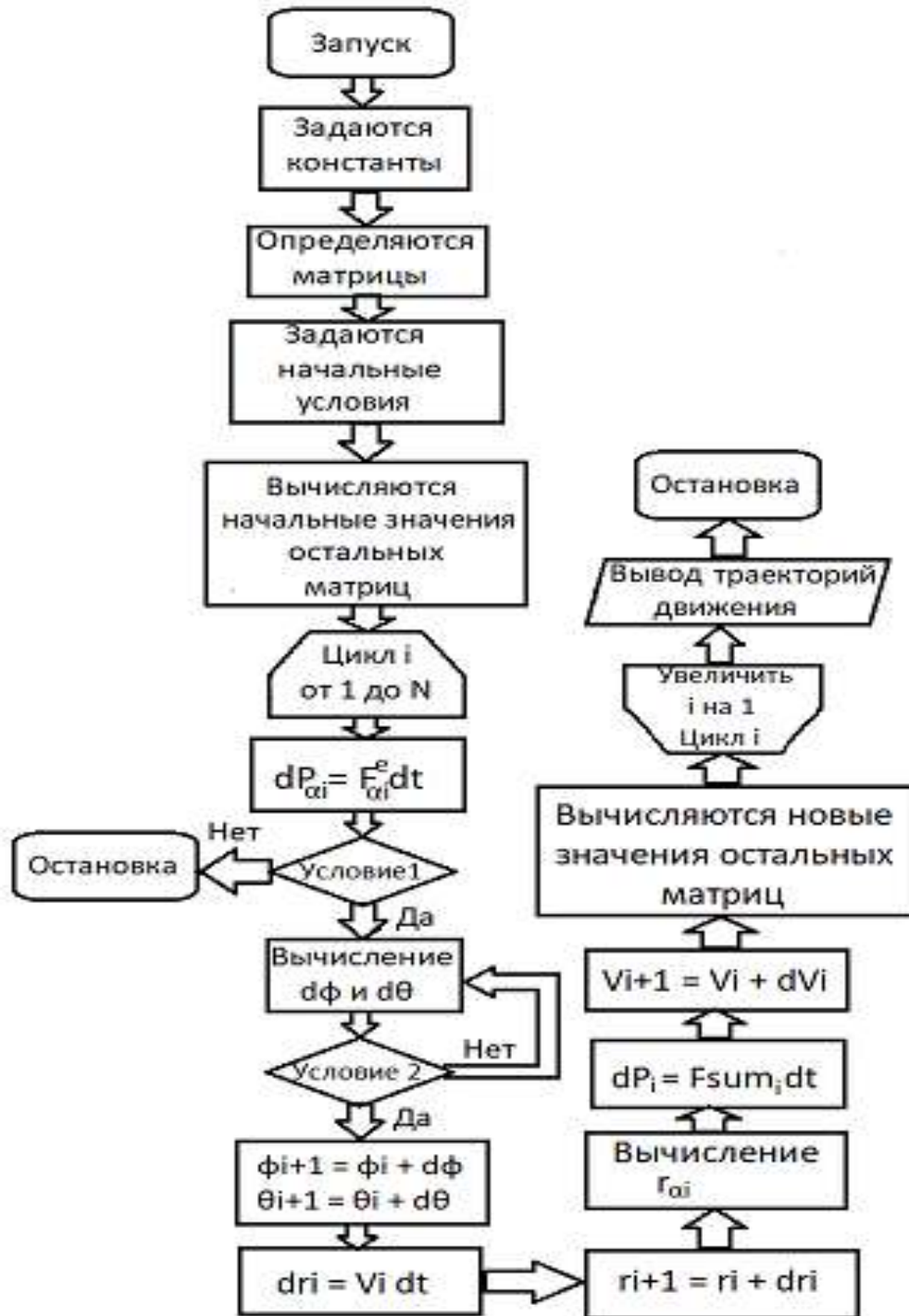
Система координат OHe-ядро



Кулоновское взаимодействие в системе ОНе– ядро

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

$$\vec{F}_{ZO}^e = \vec{F}_{ZO}^e(\vec{r}) = \frac{ZZ_0e^2\vec{r}}{r^3}$$

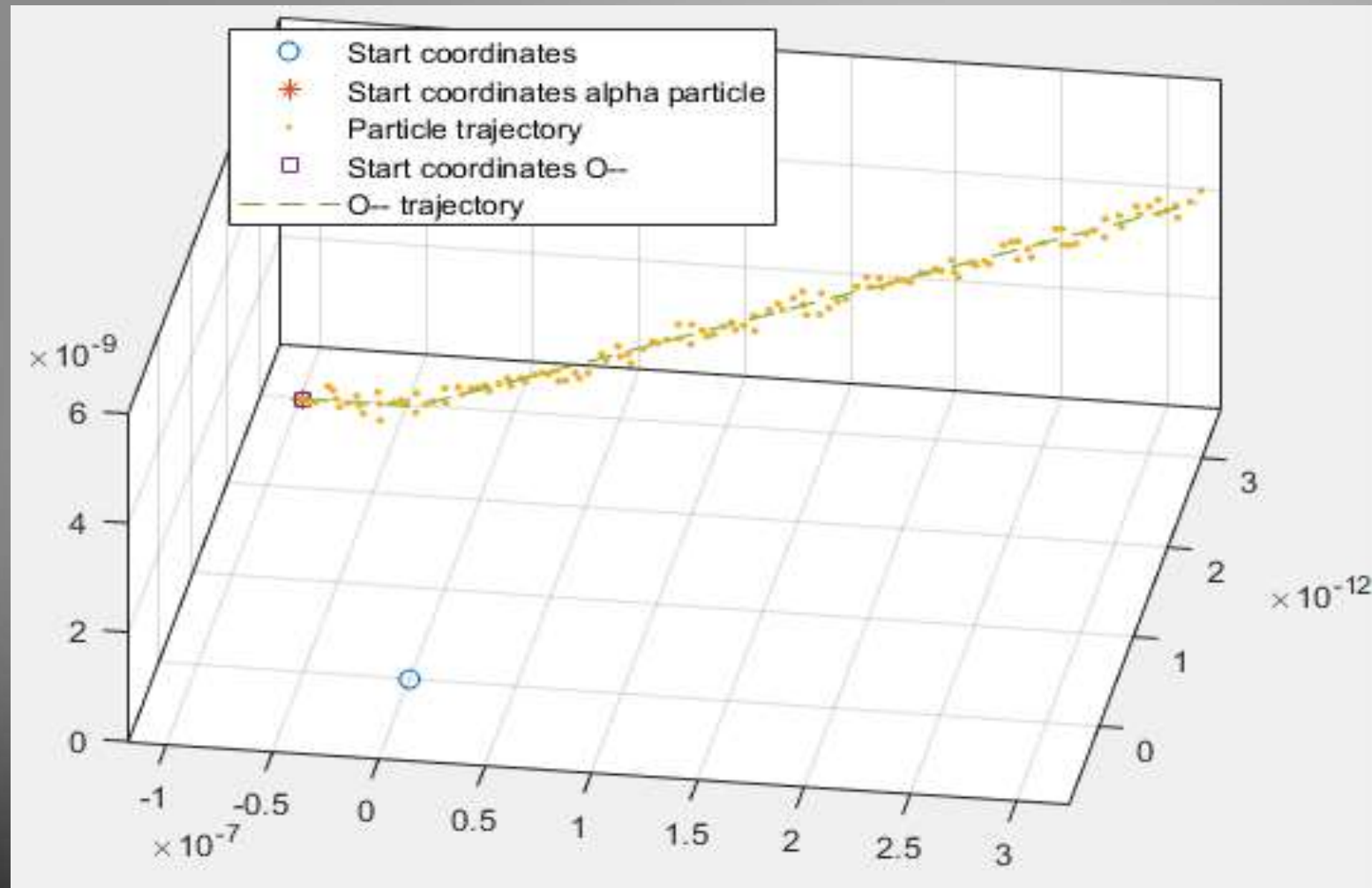


← Блок-схема моделирования кулоновского взаимодействия в системе Оне–ядро

$$dT < I \approx 1.6 \text{ MeV}$$

$$dT = \frac{dP_{\alpha i}^2}{2m_{\alpha}}$$

Условие 1



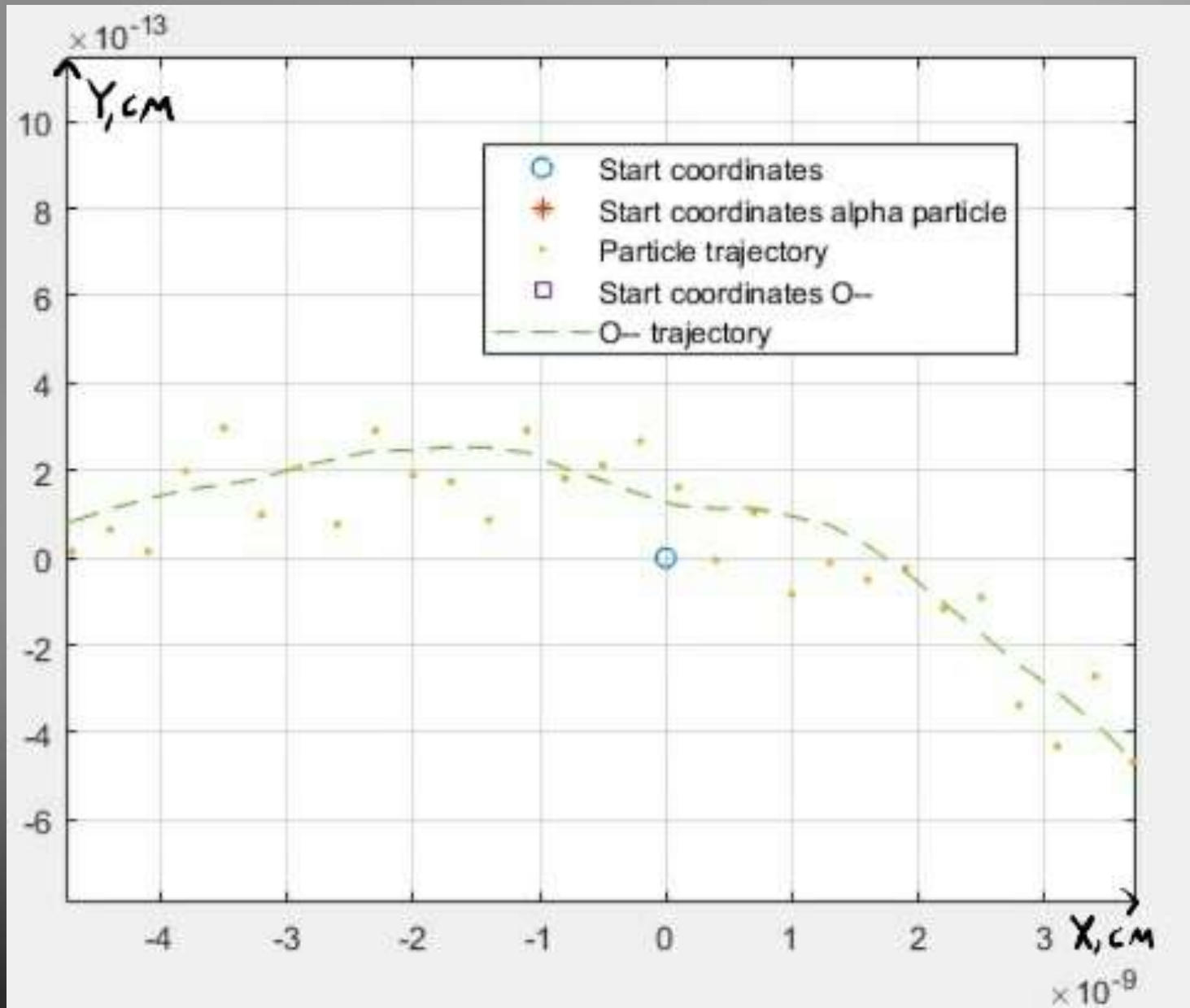
Траектории альфа-частицы и частицы O^{--}

Ядерное взаимодействие в системе OHe–ядро

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

$$\vec{F}_{Sum} = \vec{F}_{ZO}^e + \vec{F}_\alpha$$

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



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

Дальнейшие перспективы моделирования.

- 1) Учёт конечного размера ядер.
- 2) Квантово-механический эффект туннелирования

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

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

$$V = \frac{Zze^2}{r}$$

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

Заключение

Результатом работы является численная модель, описывающая систему OHe-ядро с самосогласованным учётом ядерного и электромагнитного взаимодействий. Полученная модель в перспективе может быть использована для интерпретации результатов экспериментов по прямому поиску частиц скрытой массы.

Однако, процесс численного моделирования ещё не полностью завершен и в будущем планируется его усовершенствование, путём введения конечных размеров ядер, через учёт распределения плотности нуклонов и плотности протонов, и введения квантово-механического эффекта туннелирования ядра He внутрь ядра барионного вещества.

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

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.

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

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

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