

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

Студент группы М20-115:

Бикбаев Т.Э.

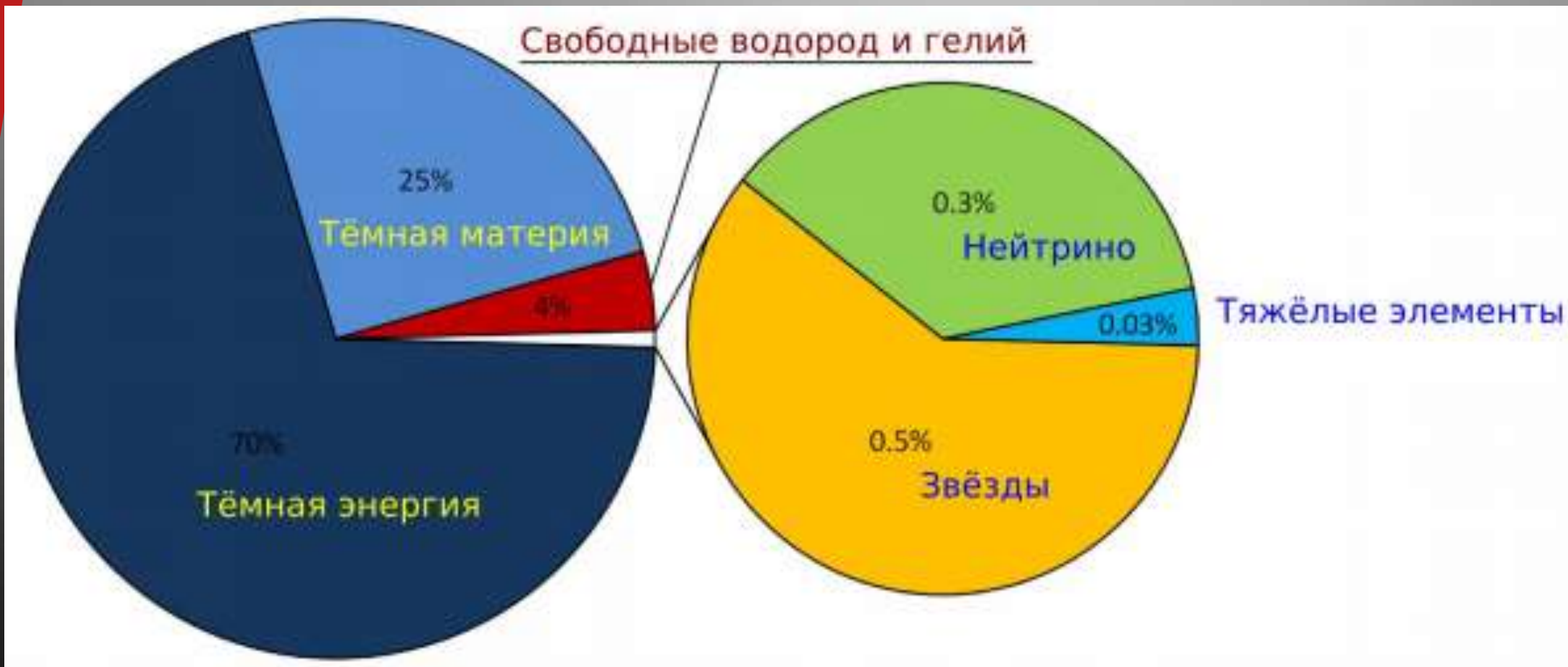
Научный руководитель, д.ф.-м.н., проф.:

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 мы рассматриваем сценарий составной скрытой массы, в которой гипотетические стабильные частицы O^{--} (X) избегают экспериментального открытия, потому что они формируют с первичным гелием нейтральные атомоподобные состояния OHe (X-гелия), называемые "тёмными" атомами.

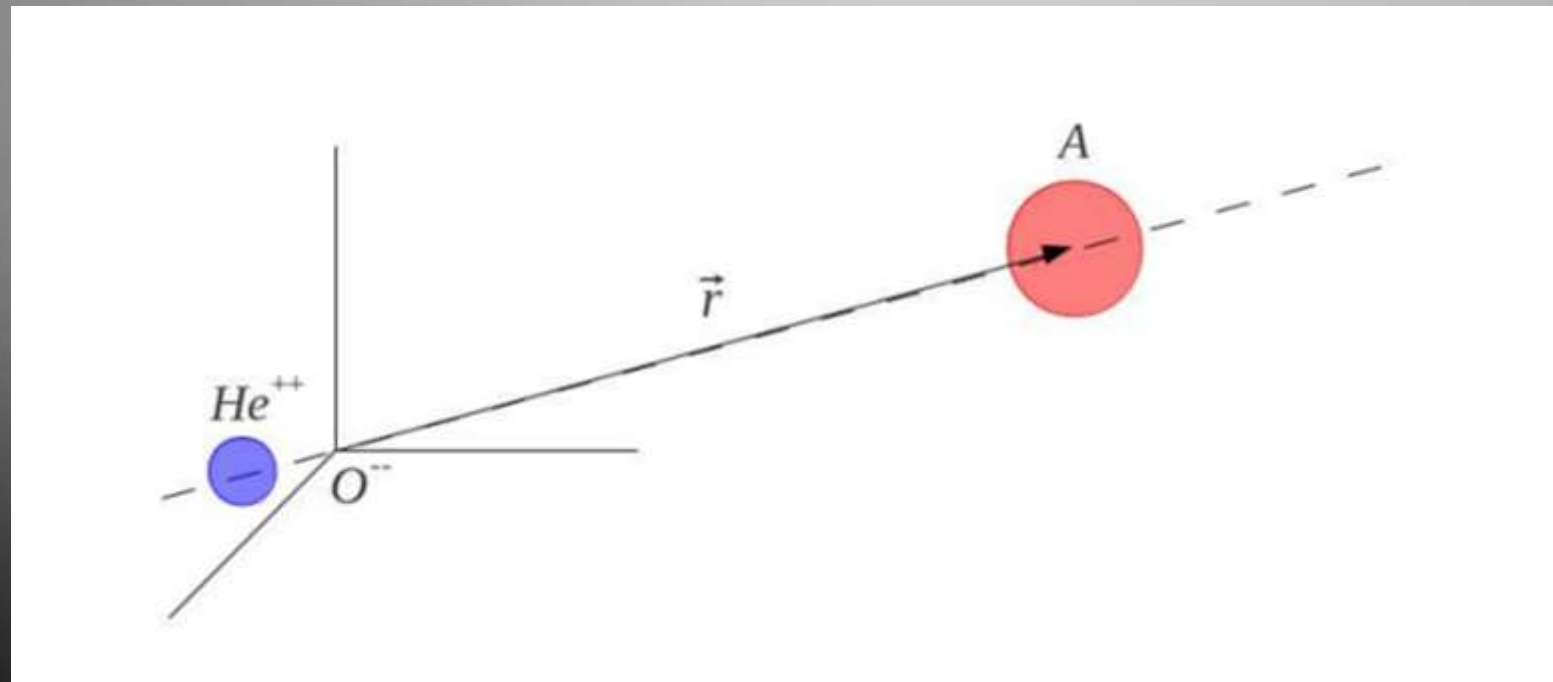


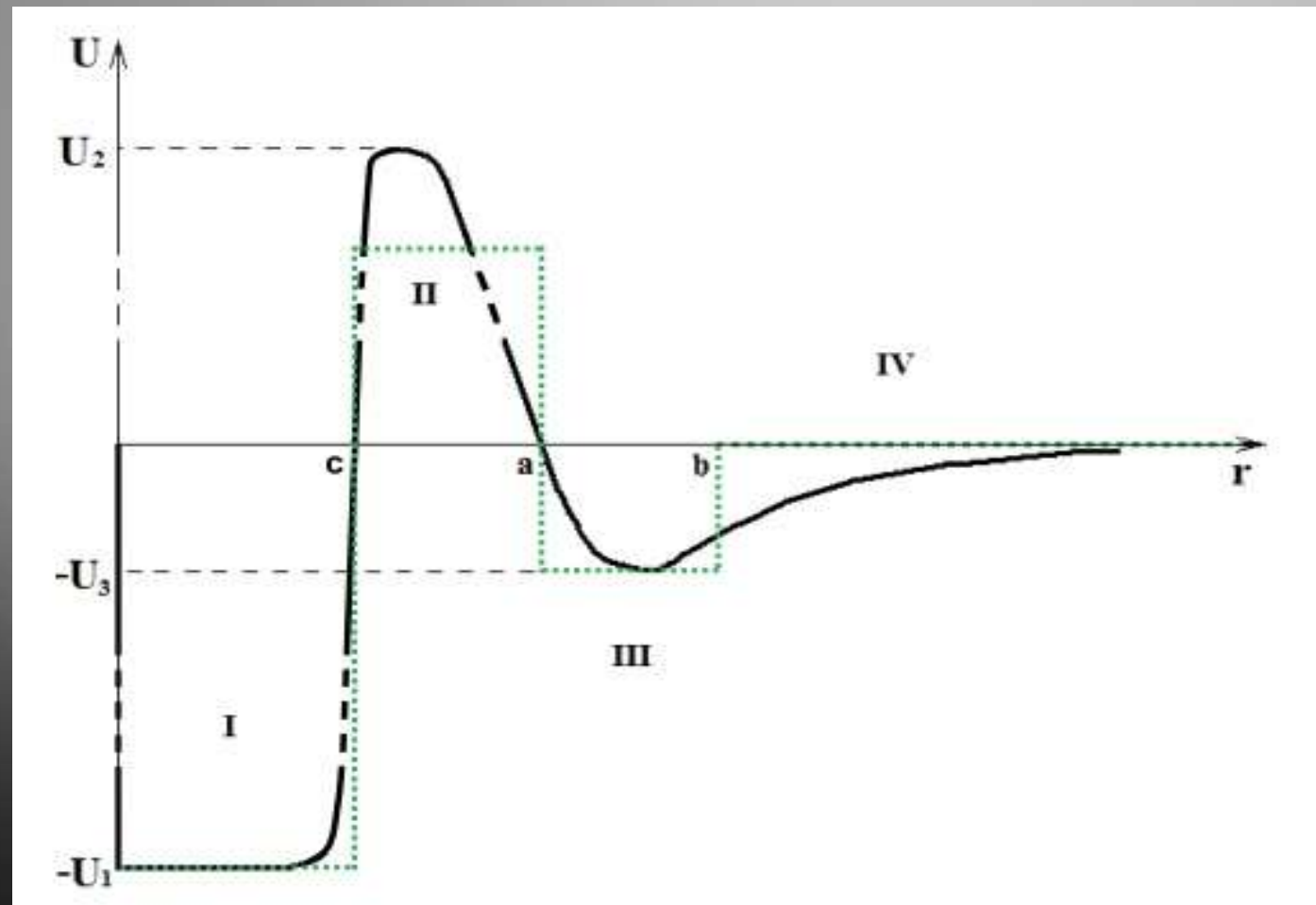
Иллюстрация "тёмного" атома OHe и внешнего ядра вещества A

Модель ХНе и решение проблемы прямых поисков частиц скрытой массы

- Модель ХНе предполагает существование реликтовых стабильных лептоноподобных массивных частиц с зарядом $-2n$, 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 ХНе с ядрами.

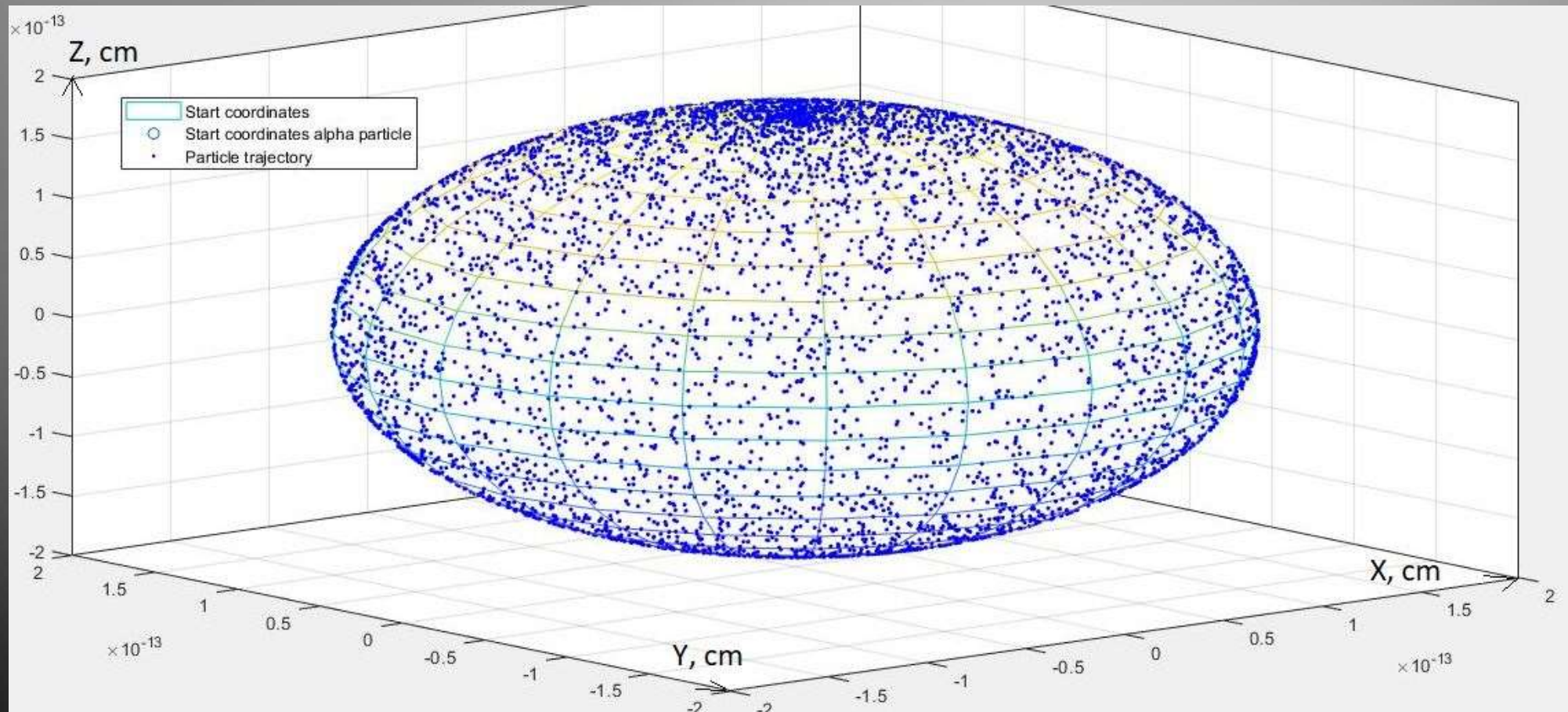
Детектор	Ядра	A	Z	Температура	Обнаружение
DAMA (/NaI +/LIBRA)	Na I TI	23 127 205	11 53 81	300 К	8.9 σ
CoGeNT	Ge	70-74	32	70 К	2.8 σ
CDMS	Ge (Si)	70-74 (28-30)	32 (14)	Криогенный	–
XENON100	Xe	124-134	54	Криогенный	–

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.



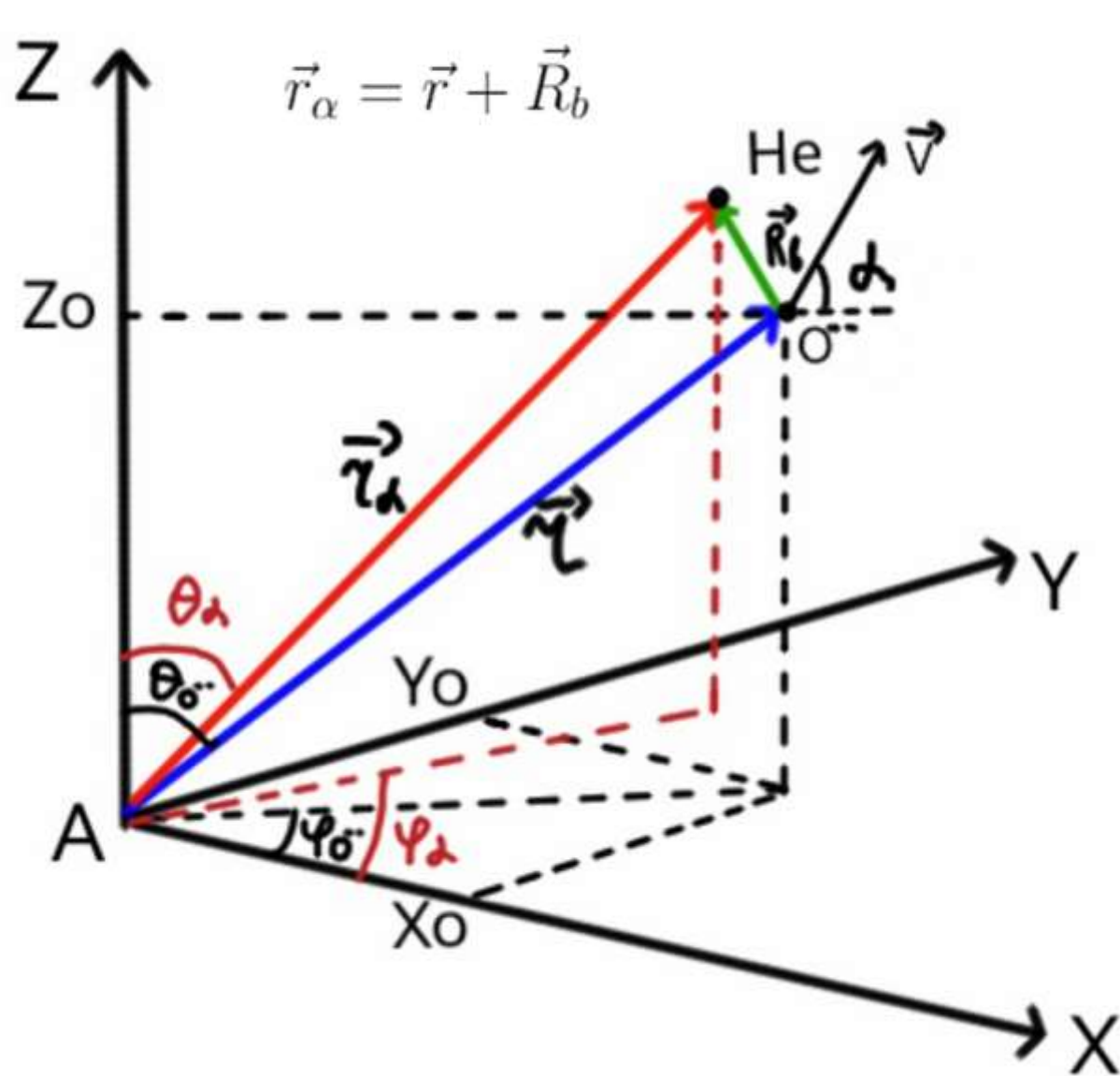
Эффективный потенциал взаимодействия XHe с ядром вещества

МОДЕЛЬ АТОМА БОРА



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

Система координат OHe-ядро



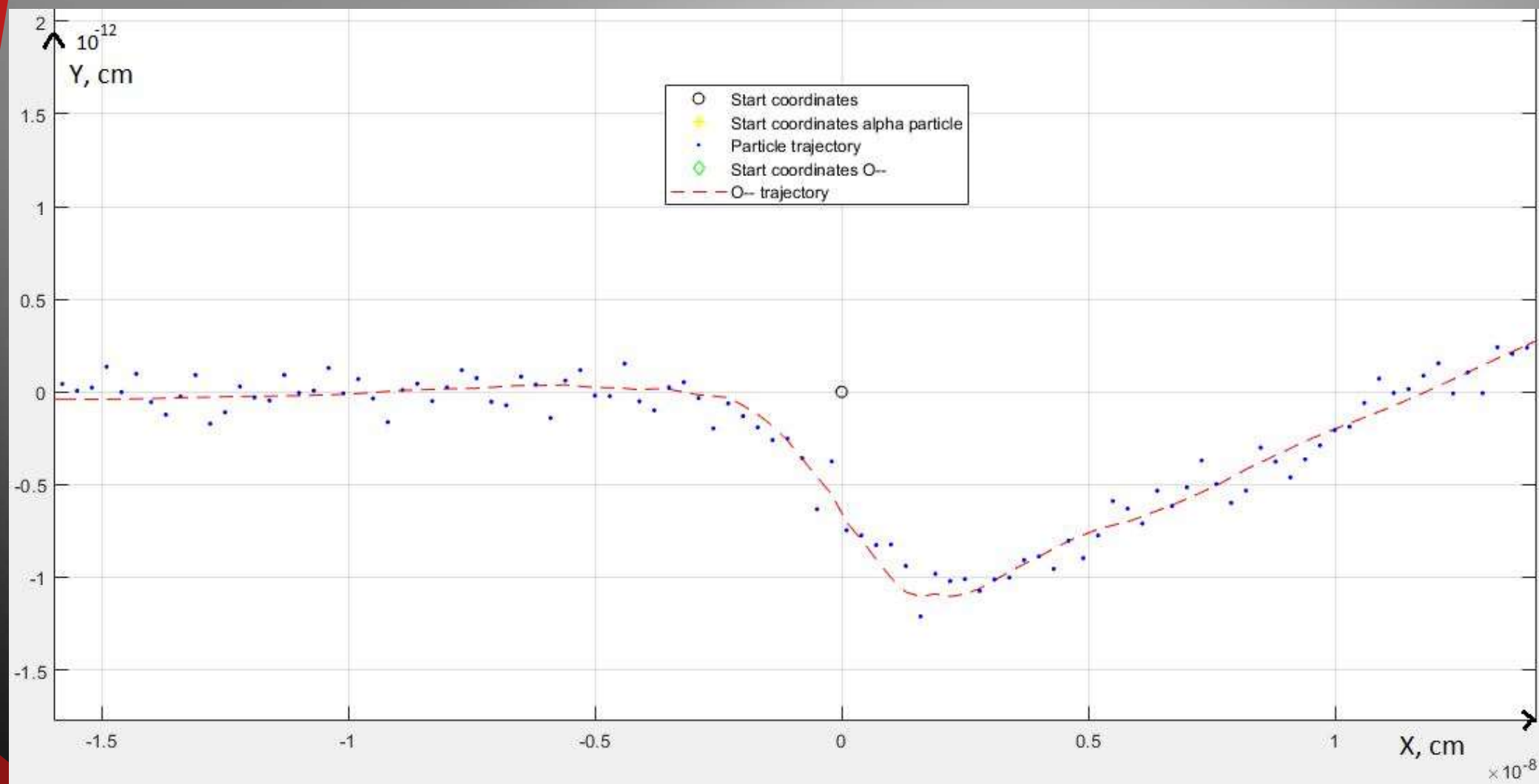
$$\vec{r}_\alpha = \vec{r} + \vec{R}_b$$

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

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

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

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

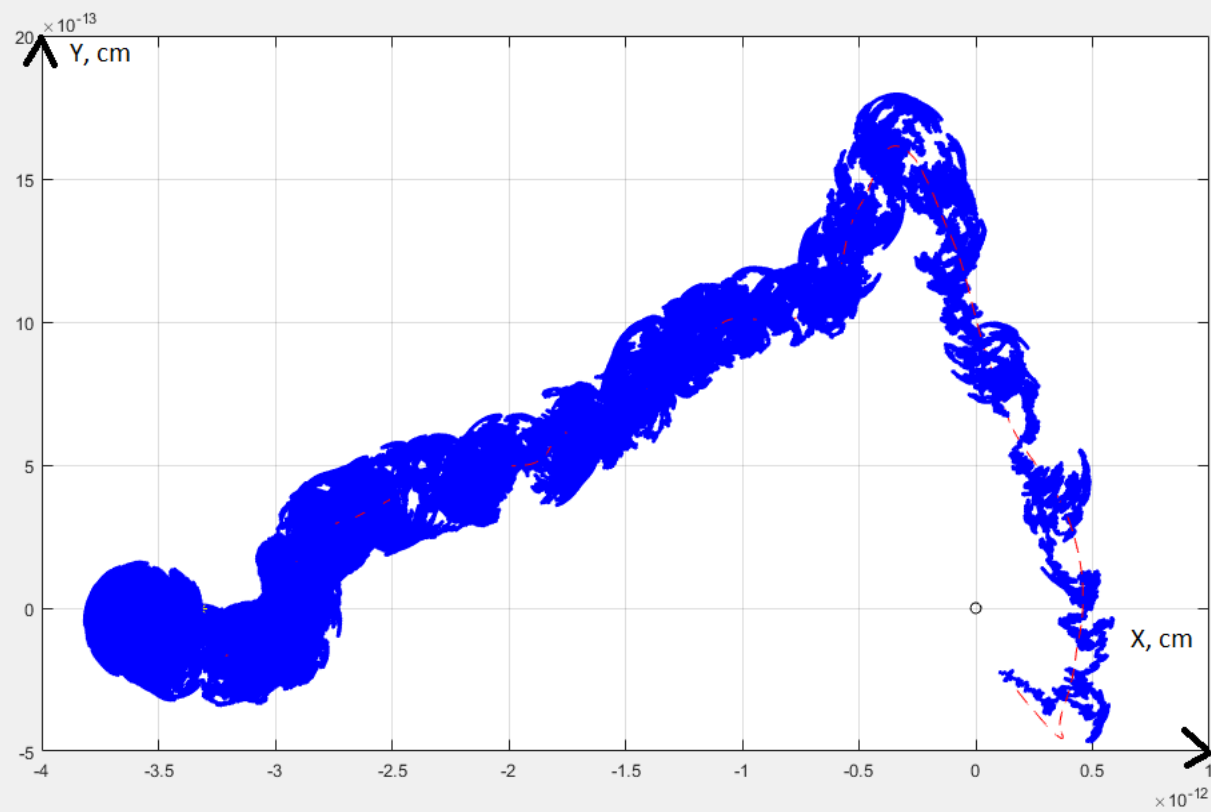
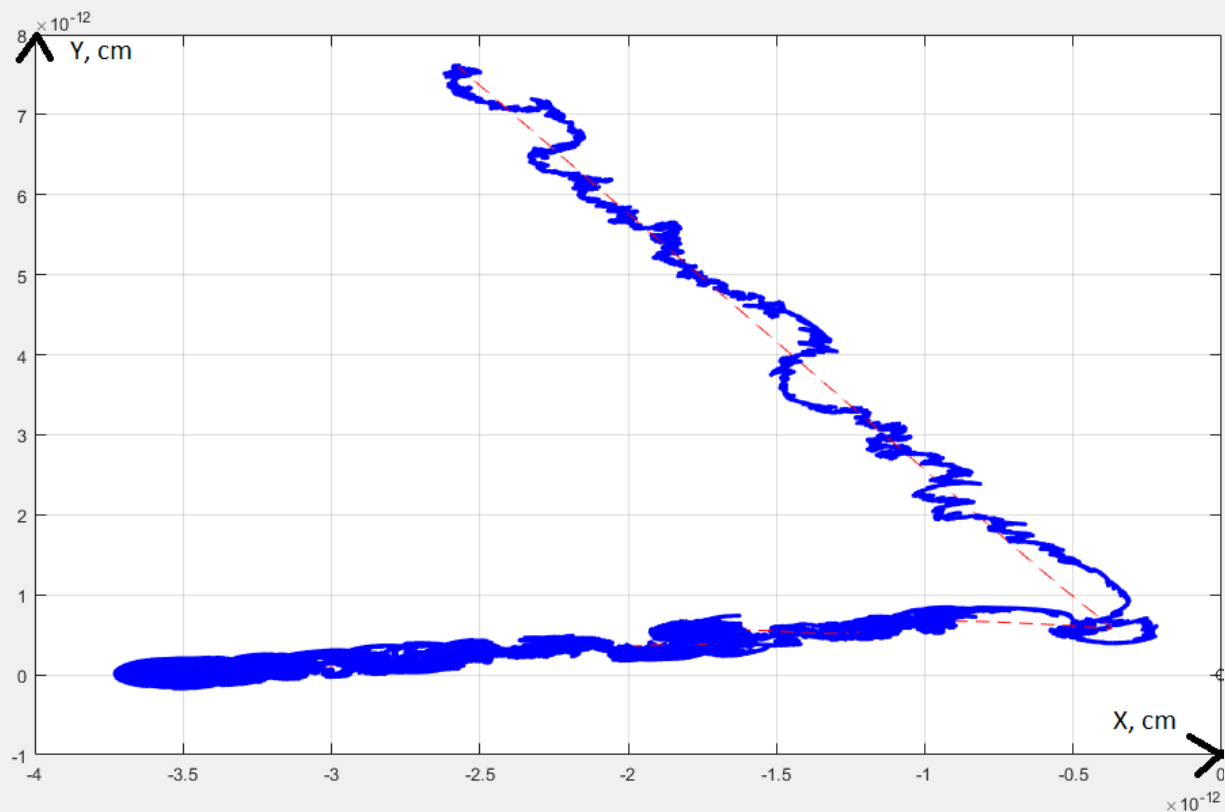


Эффект Штарка

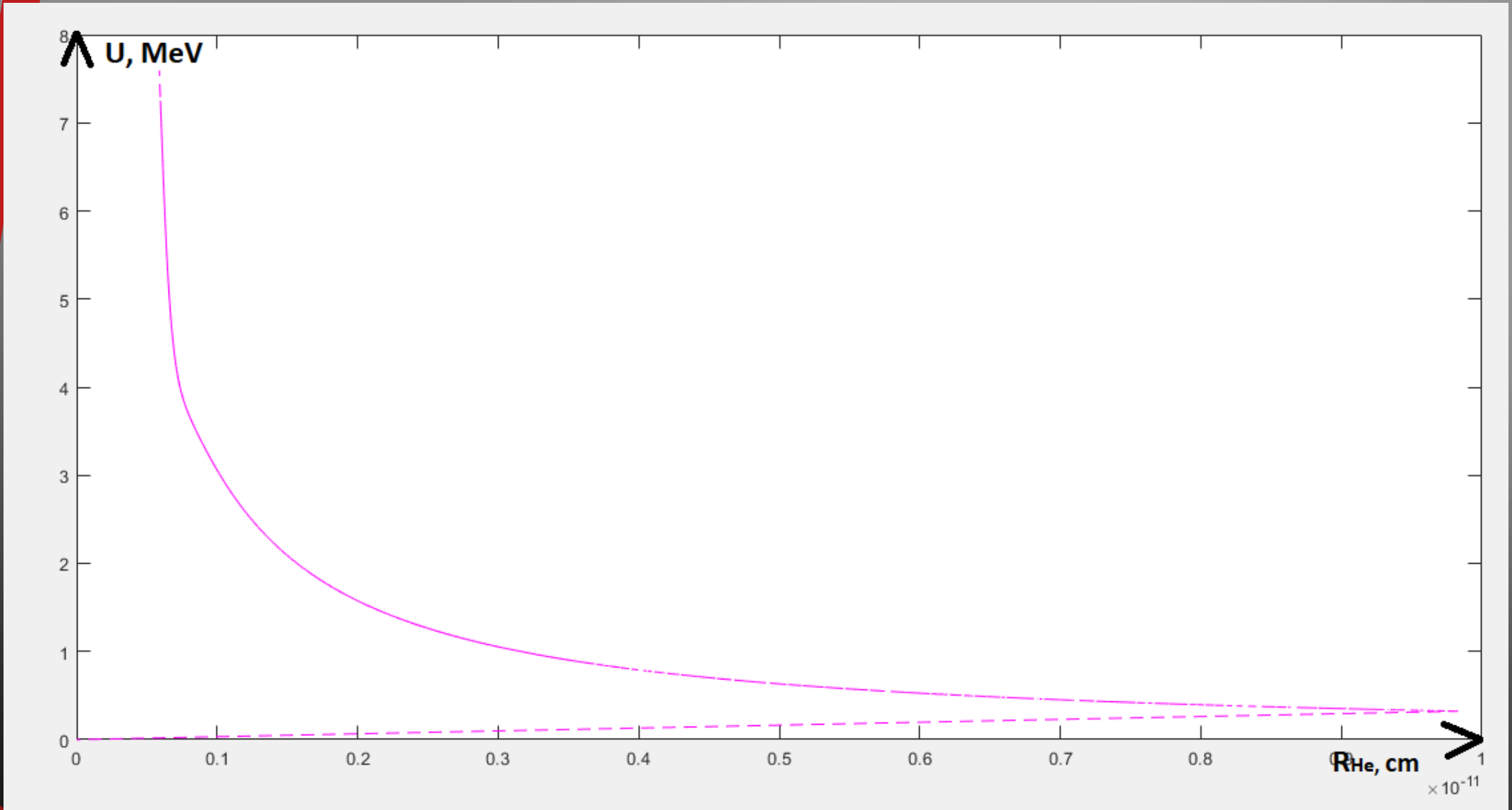
$$\delta = \frac{Z_\alpha E}{Z_0 \rho} + \frac{\vec{F}_{i\alpha}^N}{e\rho Z_0}, \quad \rho = \frac{Z_\alpha e}{R_b^3}$$

$$U_{St} = eZ_\alpha E \delta$$

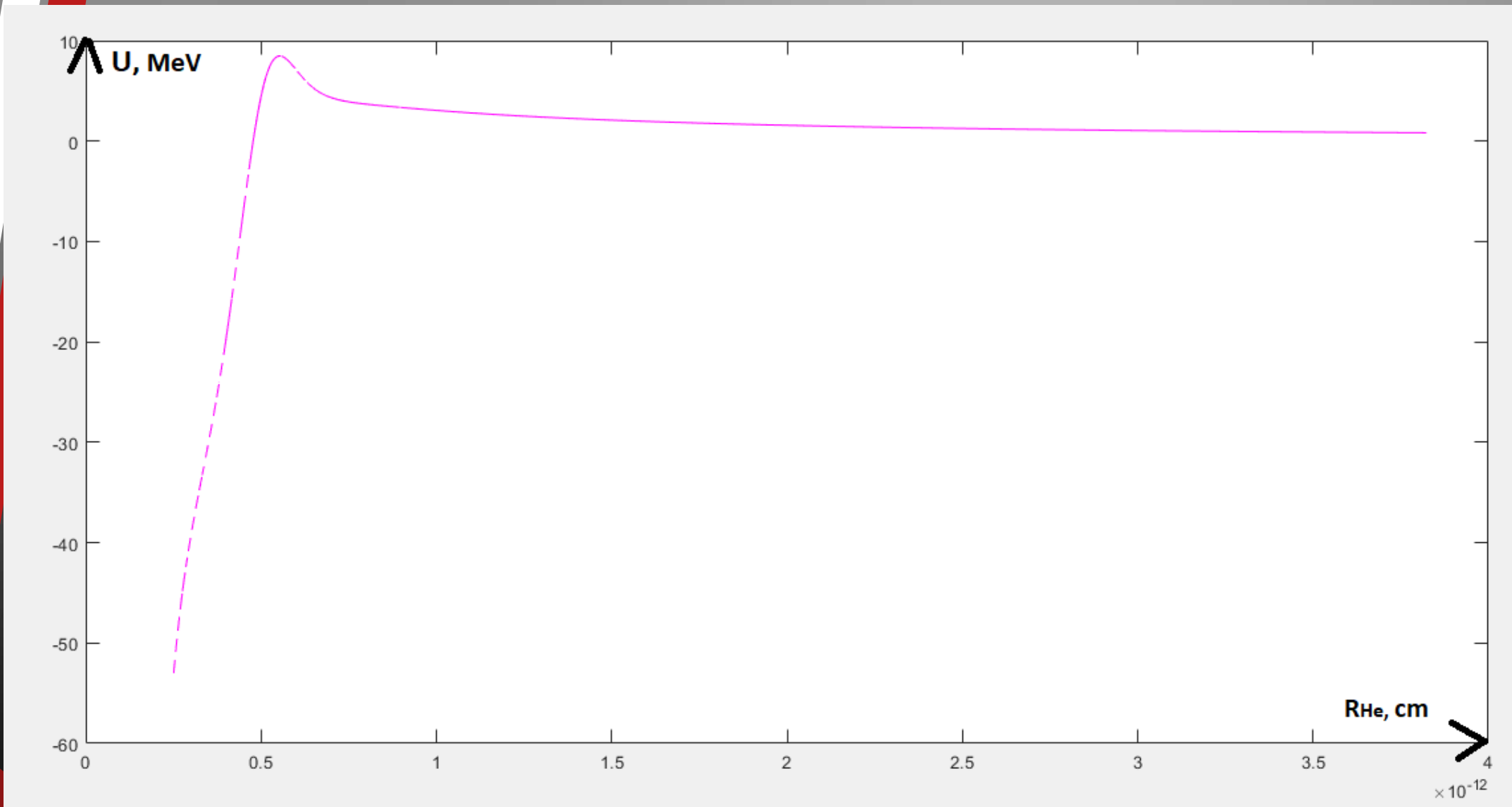
$$\vec{F}_{St} = -\text{grad } U_{St}$$



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



Суммарный потенциал взаимодействия между He и ядром-мишенью



Суммарный потенциал взаимодействия между He и ядром-мишенью

Модель атома Томсона. МОДЕЛИРОВАНИЕ Х-ГЕЛИЯ.

$$U_{XHe}(R_{XHe}) = \begin{cases} -\frac{4e^2n^2}{R_{XHe}} & \text{для } R_{XHe} > R_{He}, \\ -\frac{4e^2n^2}{2R_{He}} \left(3 - \frac{R_{XHe}^2}{R_{He}^2} \right) & \text{для } R_{XHe} < R_{He}, \end{cases}$$

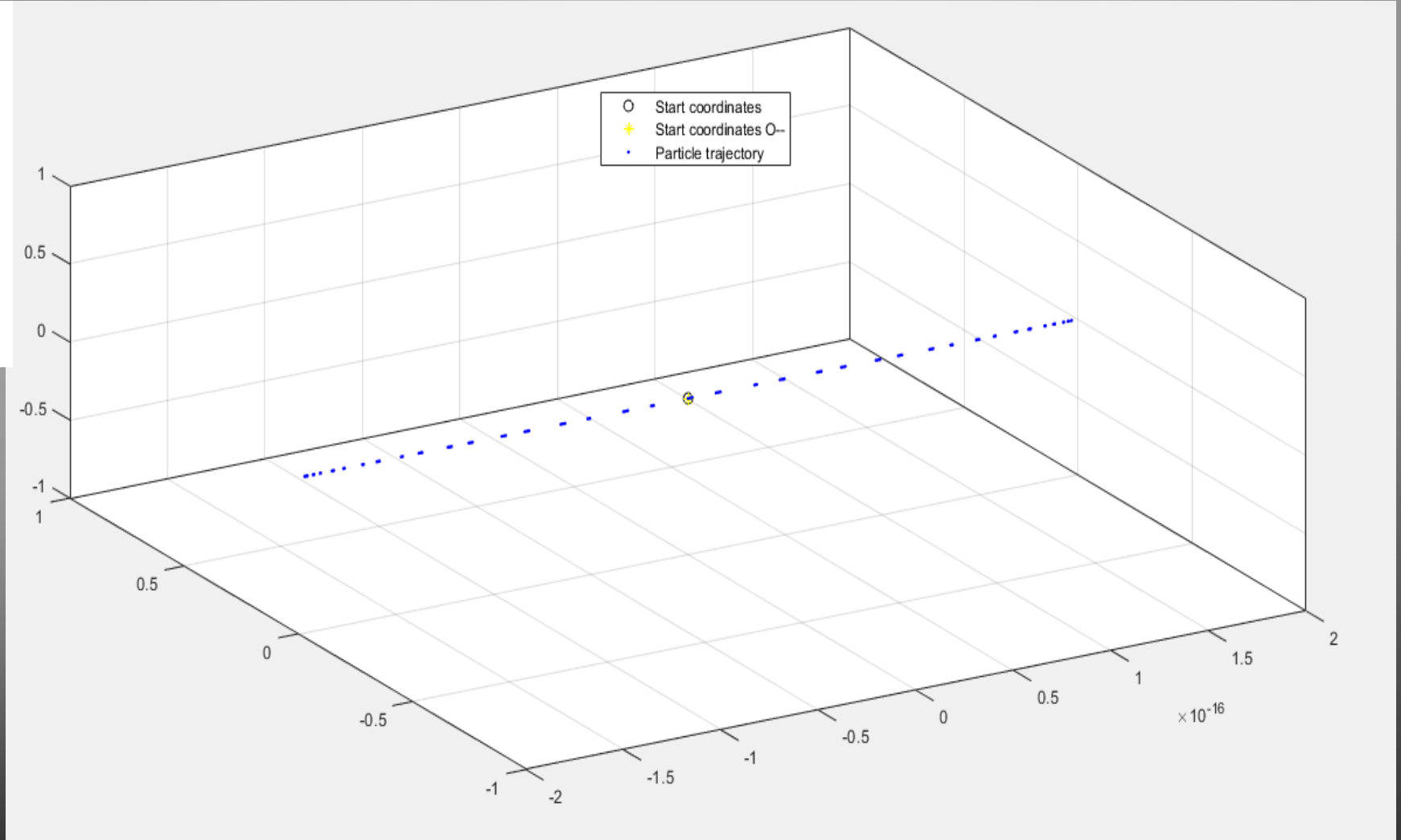
$$\vec{F}_{XHe}(R_{XHe}) = \begin{cases} -\frac{4e^2n^2}{R_{XHe}^3} \vec{R}_{XHe} & \text{для } R_{XHe} > R_{He}, \\ -\frac{4e^2n^2}{R_{He}^3} \vec{R}_{XHe} & \text{для } R_{XHe} < R_{He}, \end{cases}$$

Потенциал кулоновского взаимодействия и соответствующая ему сила между n-гелием и X

Система XHe(начало координат в центре nHe)

$$\vec{R}_{0O} = 0$$

$$V_{0O} = \left(\frac{3kT}{M_{nuc}} \right)^{\frac{1}{2}}$$



Траектория частицы X

Система XHe-ядро

$$\vec{R}_{0He} = \vec{R}_{0O^{--}}$$

$$V_{0O^{--}} = V_{0He} = \left(\frac{3kT}{M_{nuc}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\vec{F}_{iX}^{XHe} = -\vec{F}_{i\alpha}^{XHe}$$

$$\vec{r}_{XHe} = \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}$$

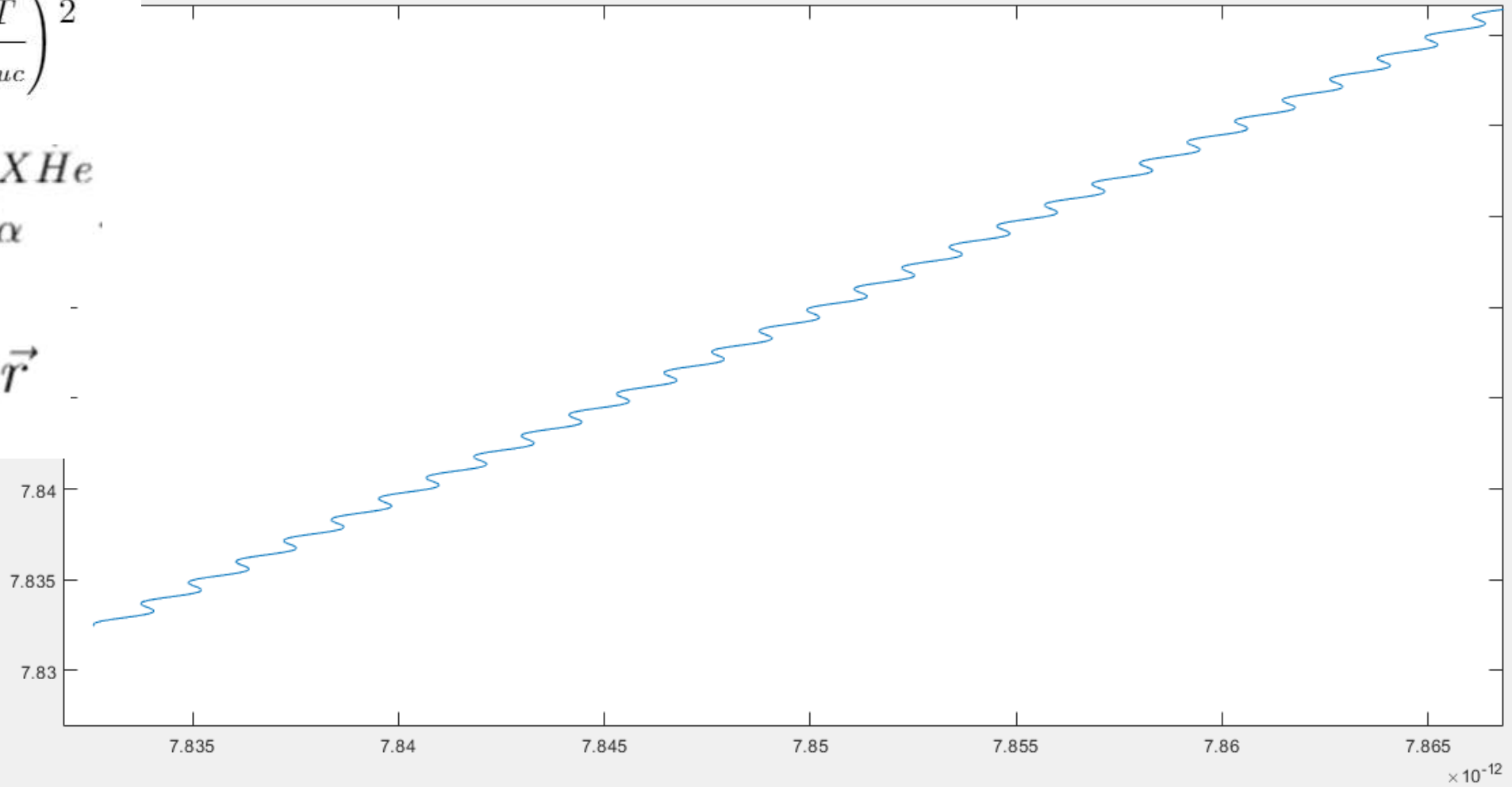


График зависимости r от r_{α}

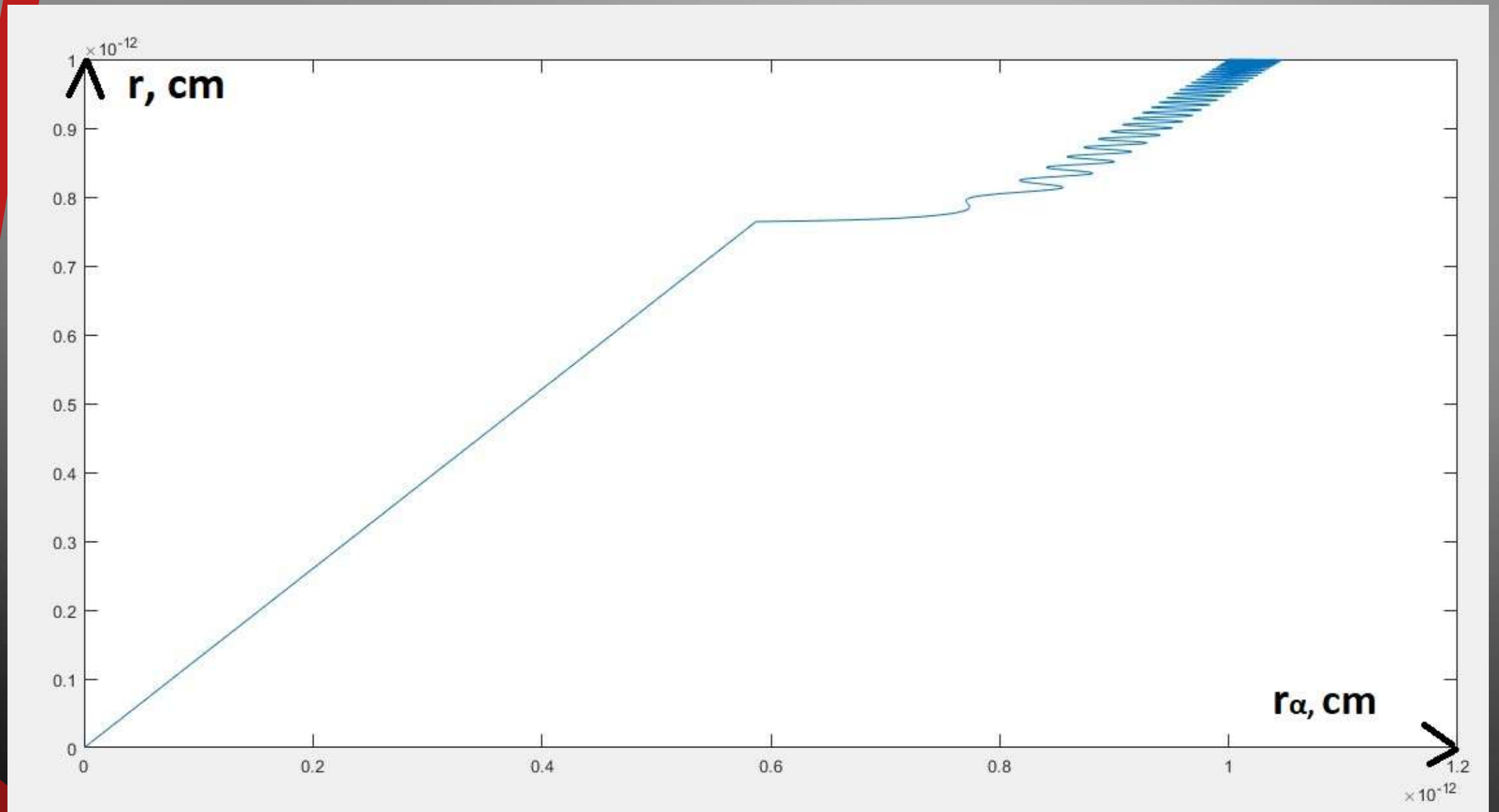
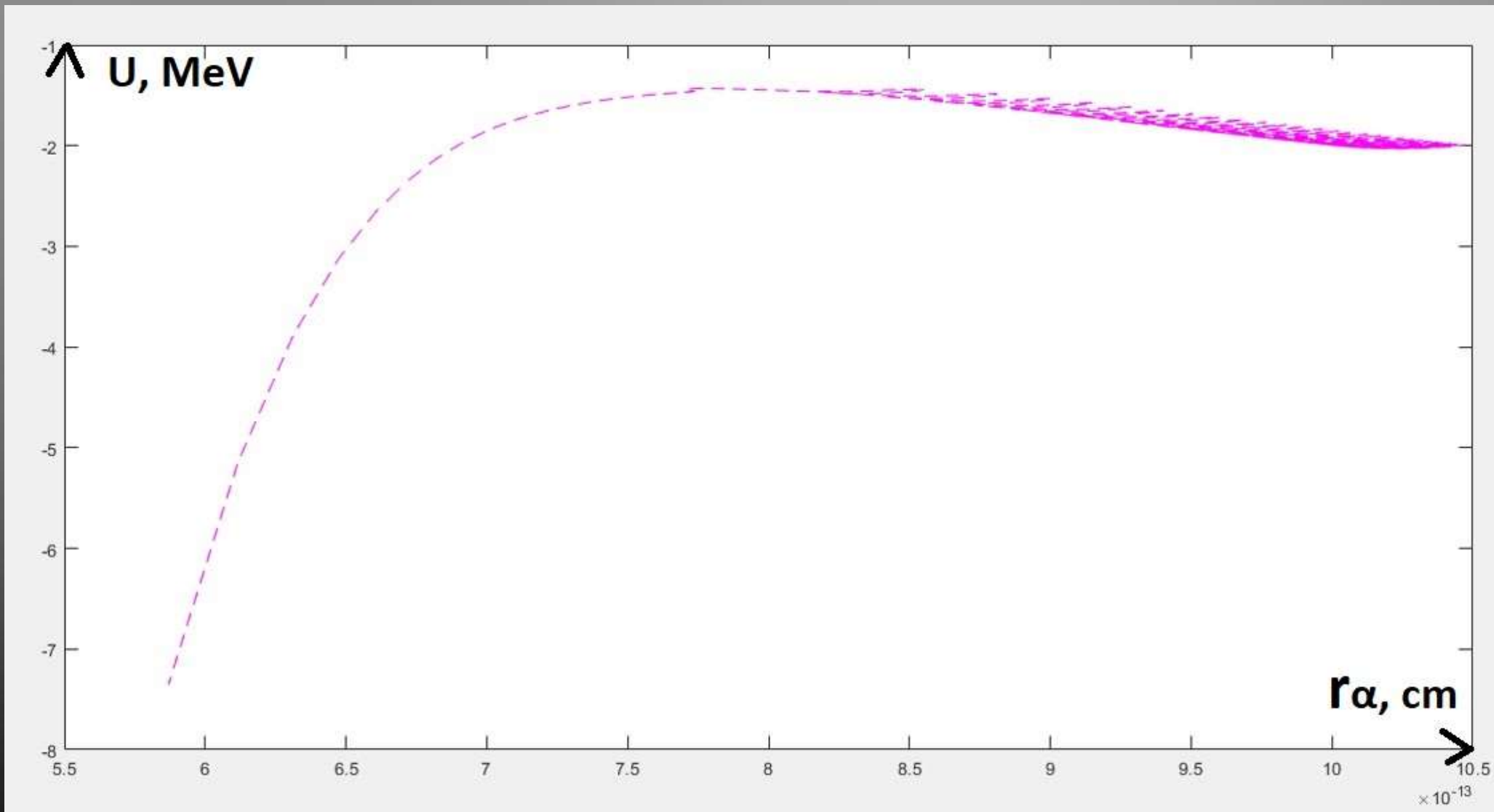
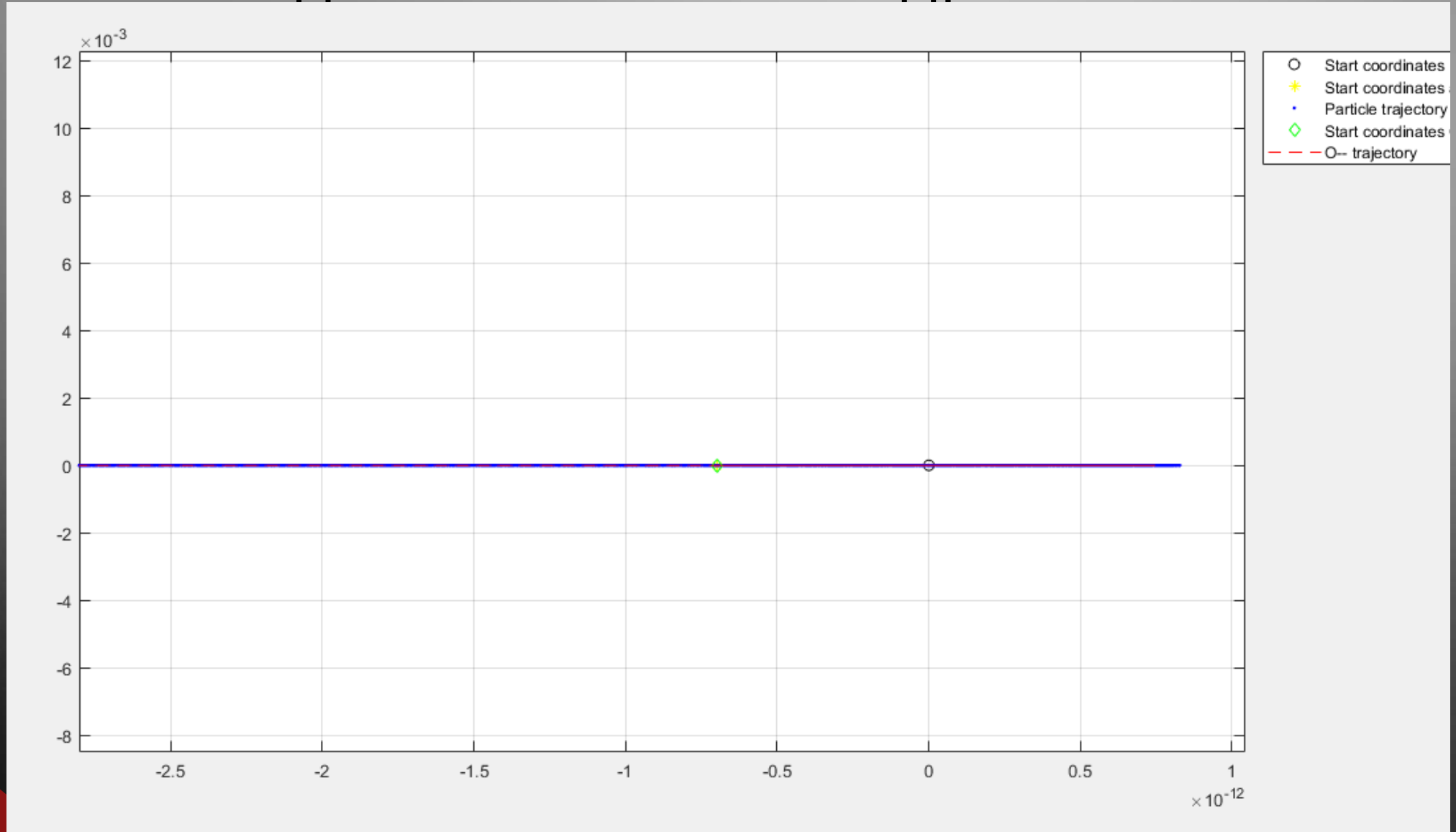


График зависимости r от r_α

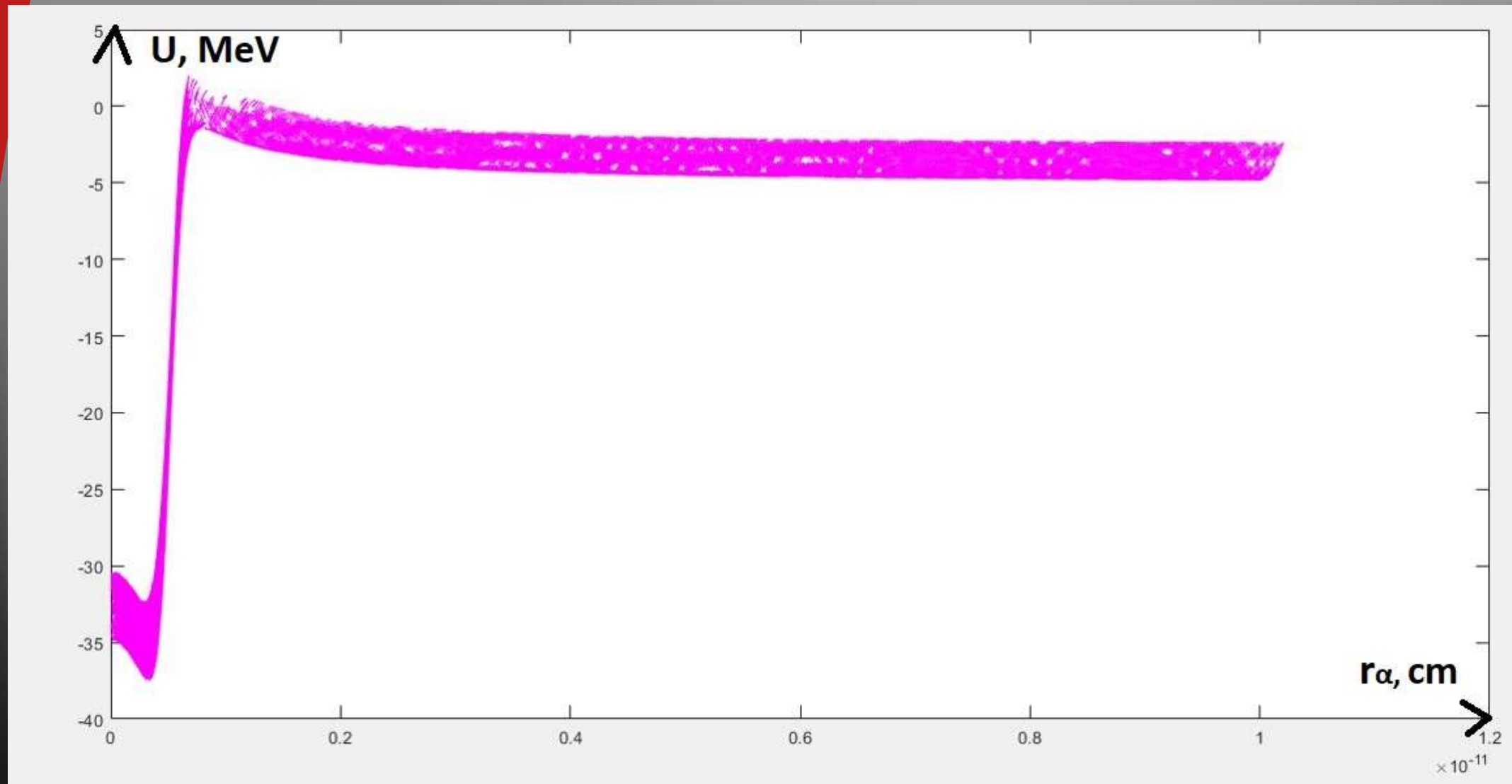


Суммарный потенциал взаимодействия nHe с ядром в зависимости от расстояния между ядром и nHe

Изменение кулоновского потенциала взаимодействия $n\text{He}$ и X с ядром мишенью.

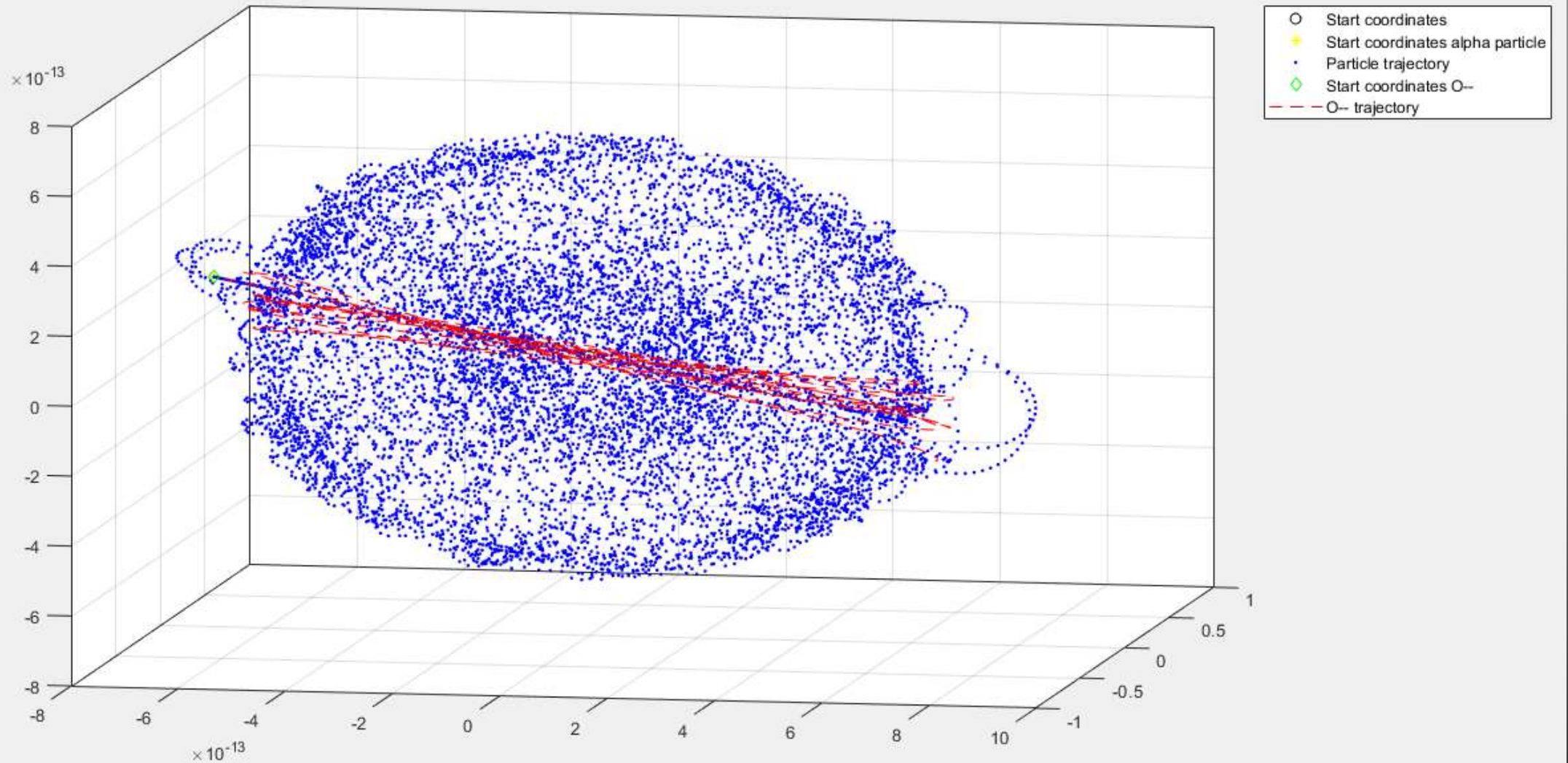


Траектории движения $n\text{He}$ и частицы X в плоскости XY

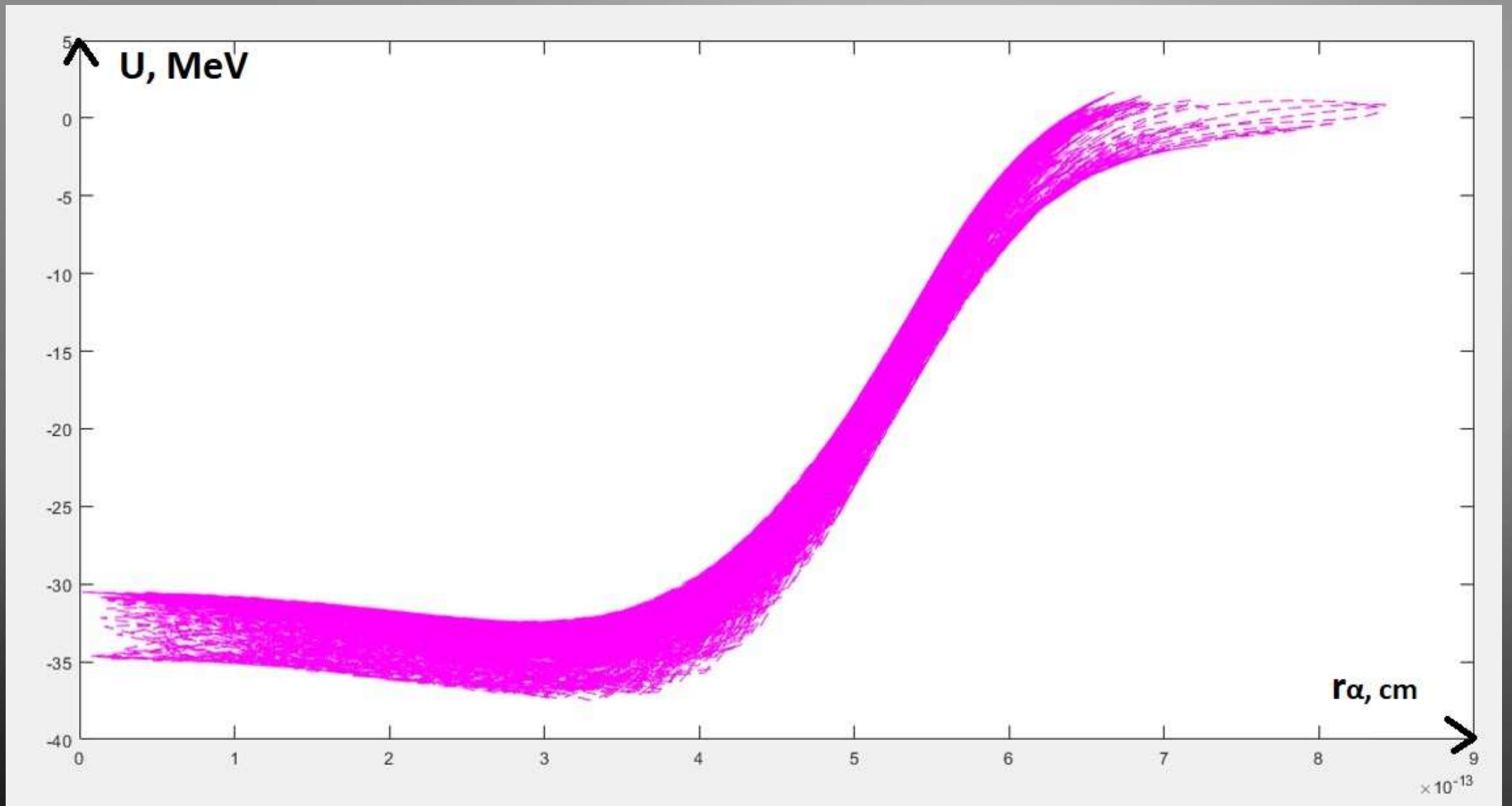


Суммарный потенциал взаимодействия nHe с ядром в зависимости от расстояния между ядром и nHe

Ненулевой прицельный параметр.



Траектории движения nHe и частицы X



Суммарный потенциал взаимодействия nHe с ядром в зависимости от расстояния между ядром и nHe

Итоги Модели атома Бора

При моделировании в приближении атома Бора 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. При этом преобладает упругое взаимодействие.

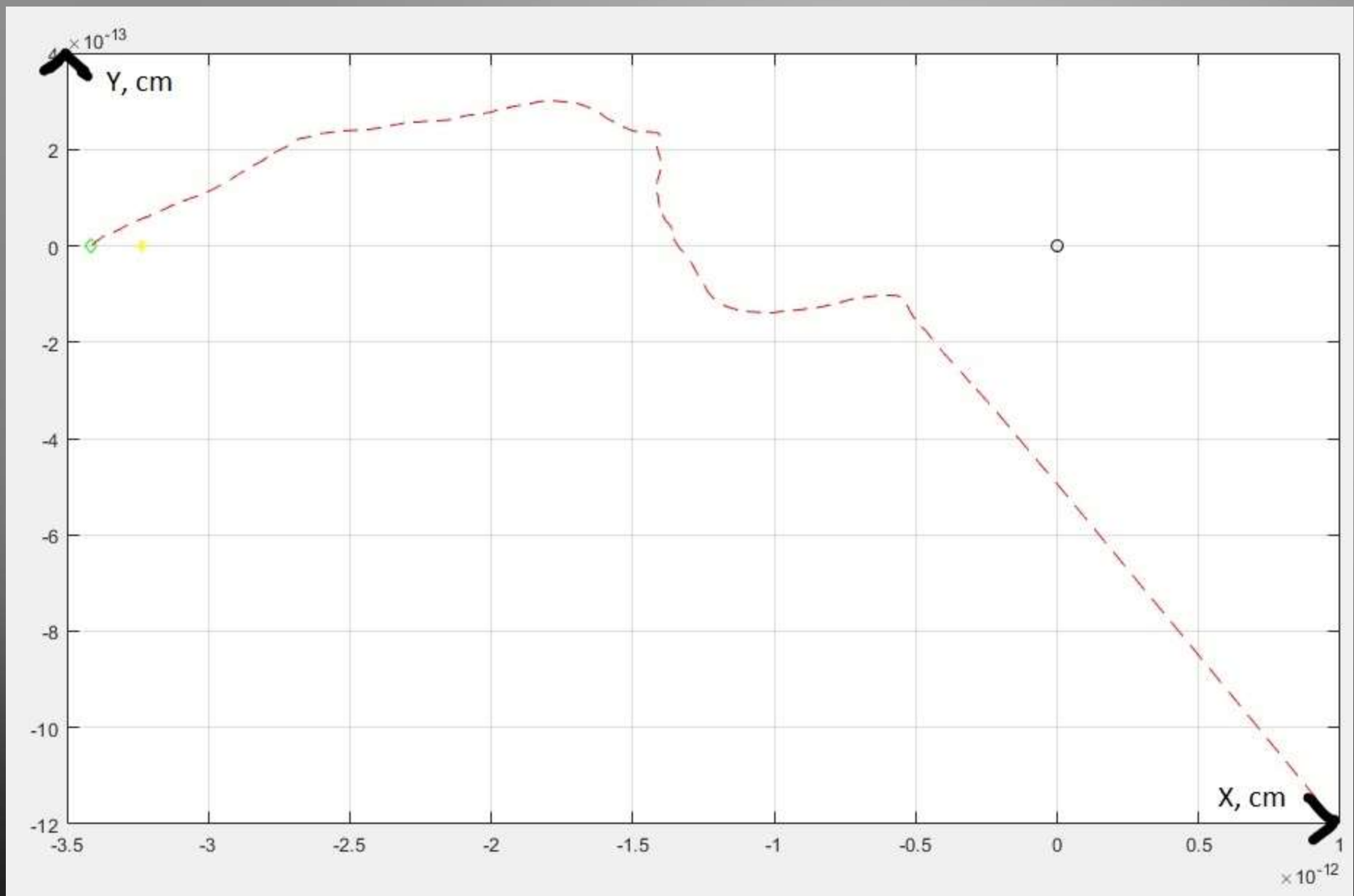
Введённый искусственно эффект Штарка оказывает сильное влияние на траектории движения частиц, что отражается в виде довольно разнообразных результатов взаимодействия между частицами, что видно из построения суммарных потенциалов взаимодействия. И требует подробного изучения в виде анализа траекторий движения при вариации начальных значений координат и скоростей и параметров ядра-мишени.

Итоги Модели атома Томсона

При моделировании в приближении атома Томсона наблюдались следующие эффекты:

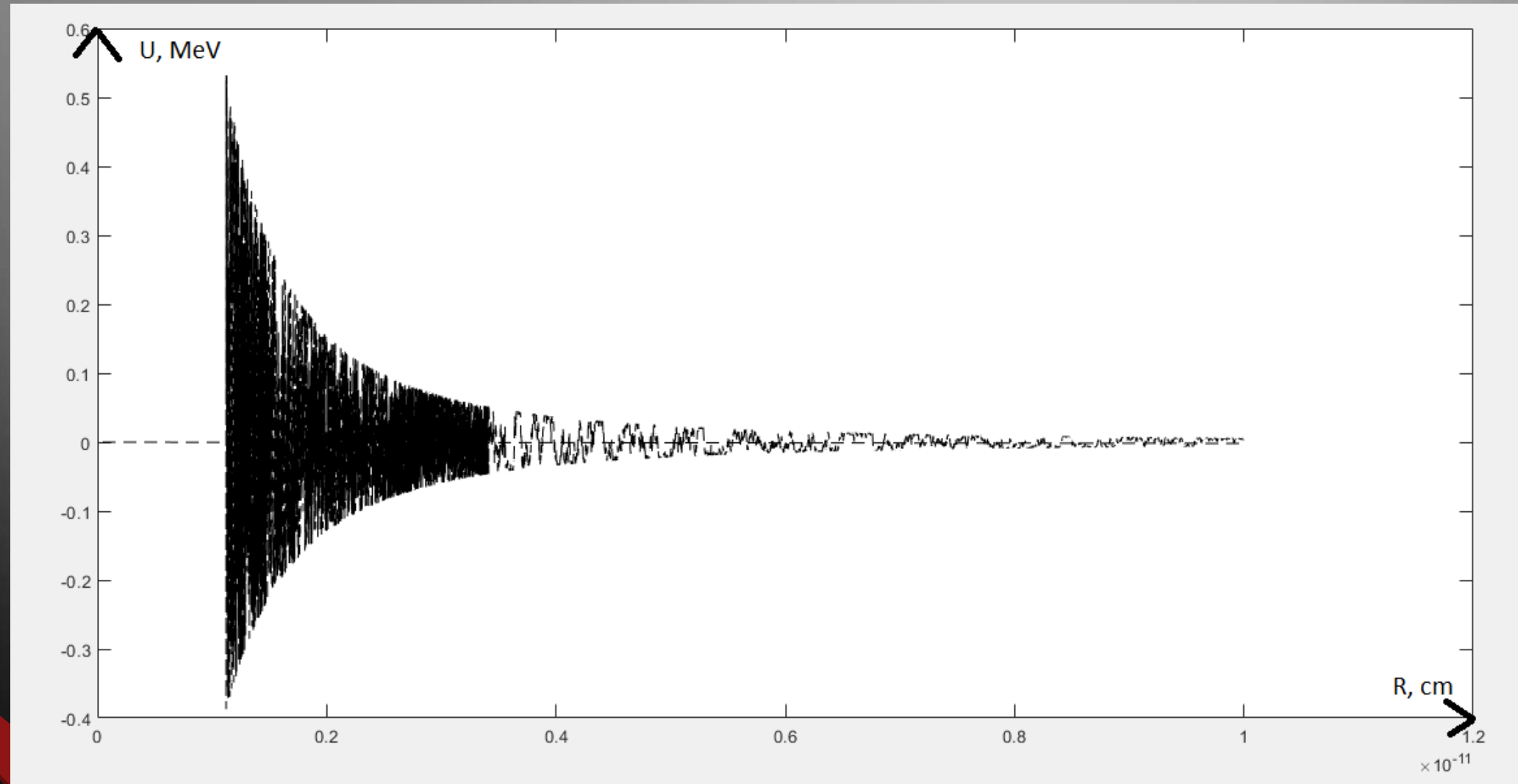
При нулевом прицельном параметре атом XHe пролетает сквозь ядро-мишень, после возвращается обратно и летит в противоположенную сторону, при ненулевом прицельном параметре атом XHe попадает в ядро-мишень, при этом образуется некая колебательная система трёх тел, это является тем, что ожидается видеть при образовании низкоэнергетического связанного состояния при взаимодействии медленных атомов X -гелия с ядрами вещества. Однако, недостатком этого является то, что осцилляции частиц происходят внутри ядра-мишени. Таким образом, в текущей версии численной модели nHe может легко проникнуть в ядро-мишень и не учитывается упругое столкновение ядер.

В Томсоновском приближении гелий всегда оказывается внутри ядра, упругое рассеяние не наблюдается. В Боровском приближении было наоборот. Следовательно в будущем следует учесть, что ядерная материя несжимаема, непрозрачна и взаимное проникновение nHe и ядра невозможно. Иными словами, нам нужно придумать, как учесть реальные свойства ядерной материи.

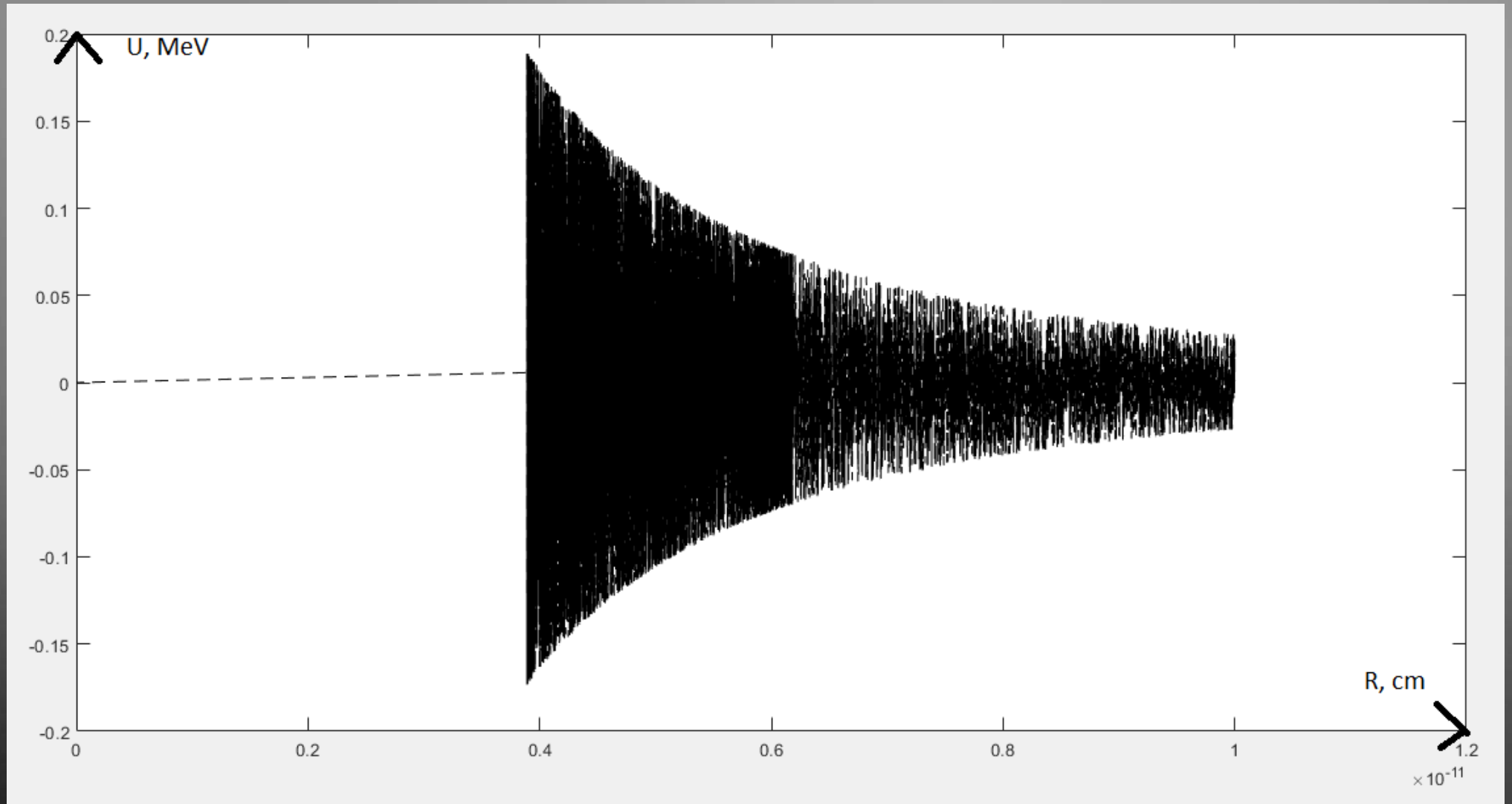


Траектория движения альфа-частицы и частицы O^{2-} в плоскости XY

В пределах неопределенности параметров ядерной физики существует диапазон, в котором энергия связи в системе OHe–Na находится в интервале 2-4 КэВ



Суммарный потенциал взаимодействия между OHe и ядром-мишенью Na



Суммарный потенциал взаимодействия между OHe и ядром-мишенью I

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

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.

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

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

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