

# Взаимодействие «тёмных» атомов Х-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.

# Сценарии гипотетических, стабильных, электрически заряженных частиц.

*В данной работе мы рассматриваем сценарий составной скрытой массы, в которой гипотетические, стабильные, реликтовые, лептоноподобные, массивные частицы с зарядом  $-2n$  (где  $n$  это натуральное число) избегают экспериментального открытия, потому что они связаны кулоновским взаимодействием с ядрами первичного гелия в нейтральные атомоподобные состояния  $OHe$  ( $X$ -гелия), называемые "тёмными" атомами.*

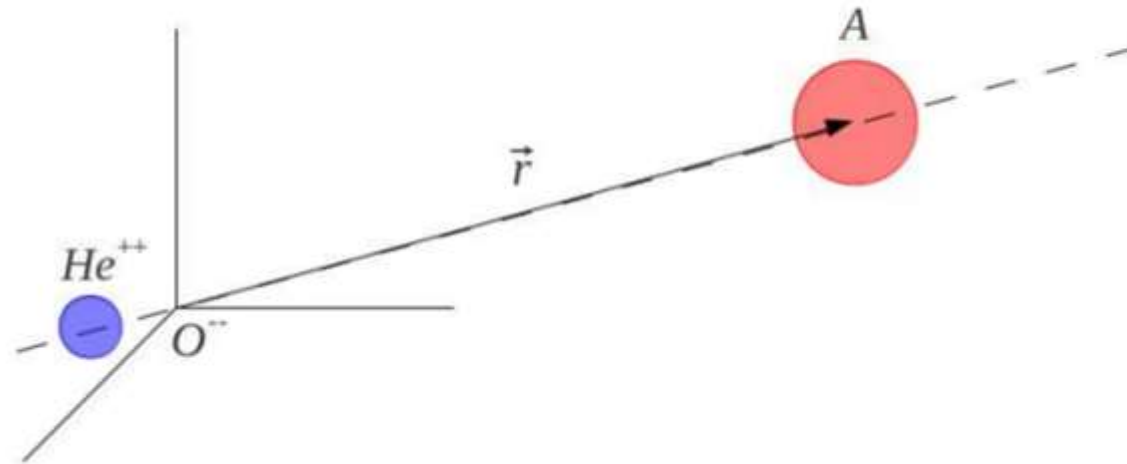
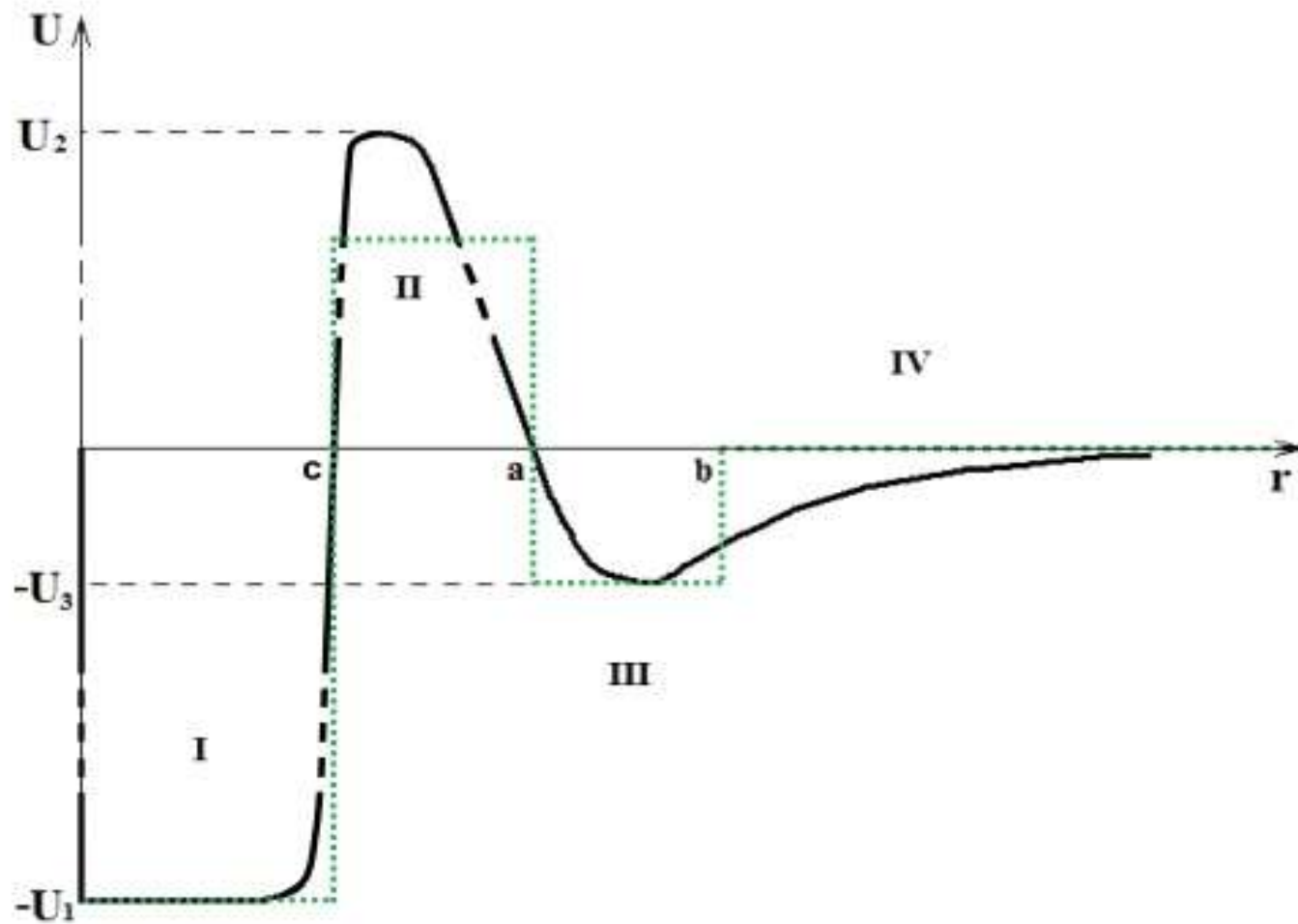


Иллюстрация "тёмного" атома  $OHe$  и внешнего ядра вещества A

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



Эффективный потенциал взаимодействия XHe с ядром вещества

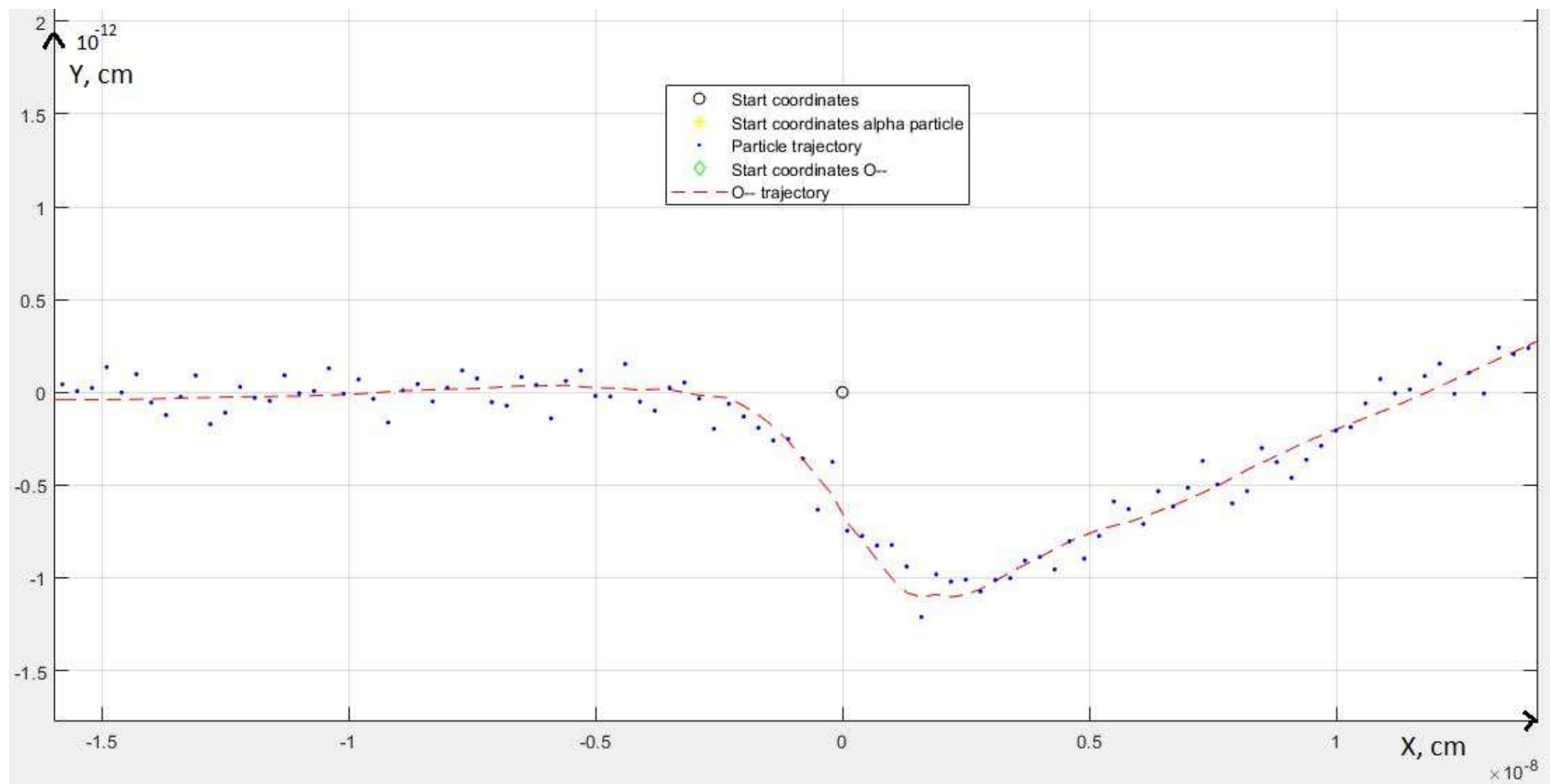
# Структура связанного состояния.

Структура связанного состояния зависит от значения параметра:

$$a = Z_{\alpha} Z_X \alpha A m_p R_{nHe}$$

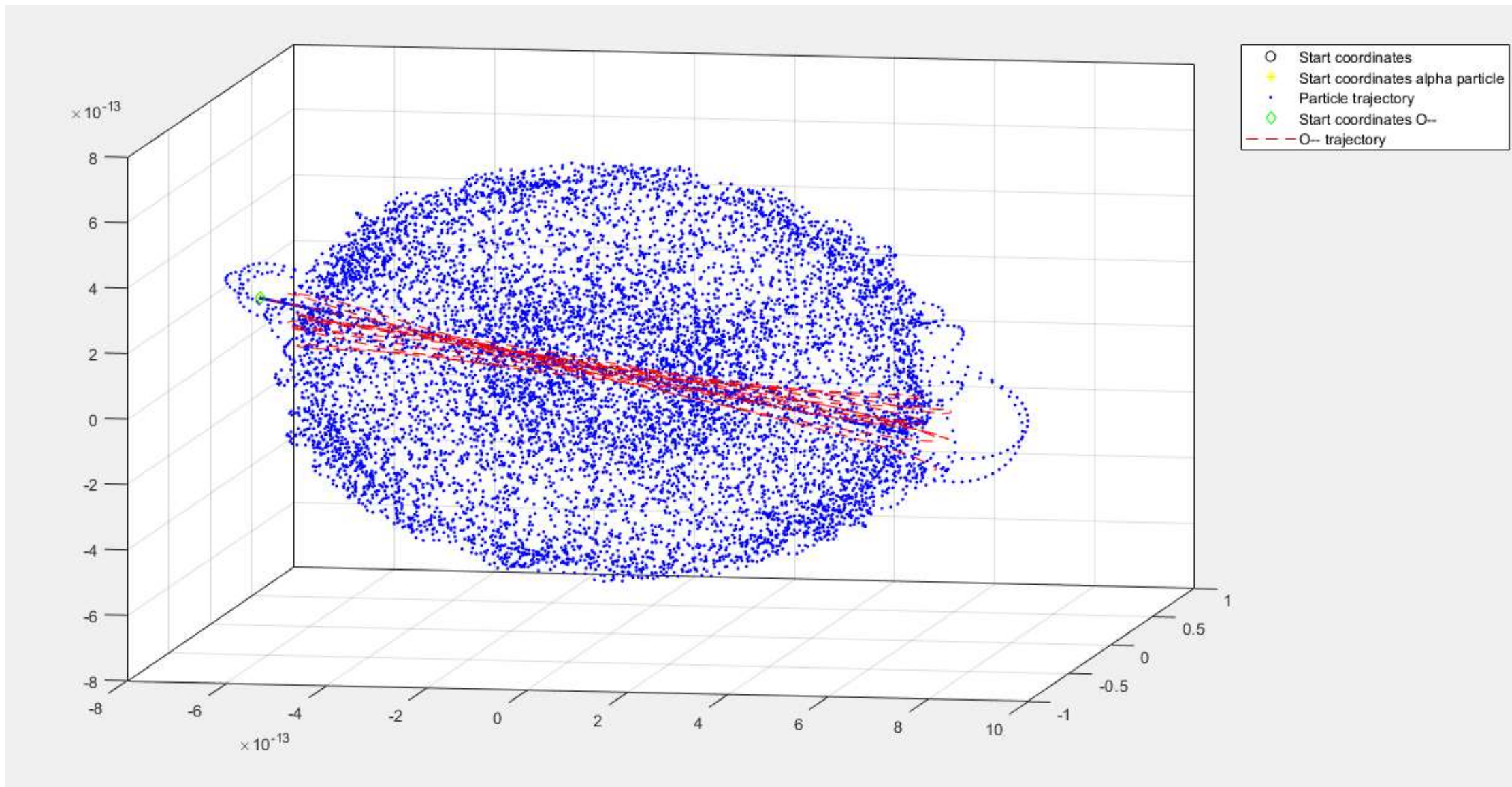
- При  $0 < a < 1$  связанное состояние выглядит как атом Бора с отрицательно заряженной частицей в осто́ве и ядром, движущимся по боровской орбите.
- При  $1 < a < \infty$  связанные состояния выглядят как атомы Томсона, в которых тело ядра колеблется вокруг тяжелой отрицательно заряженной частицы.

# Модель атома Бора

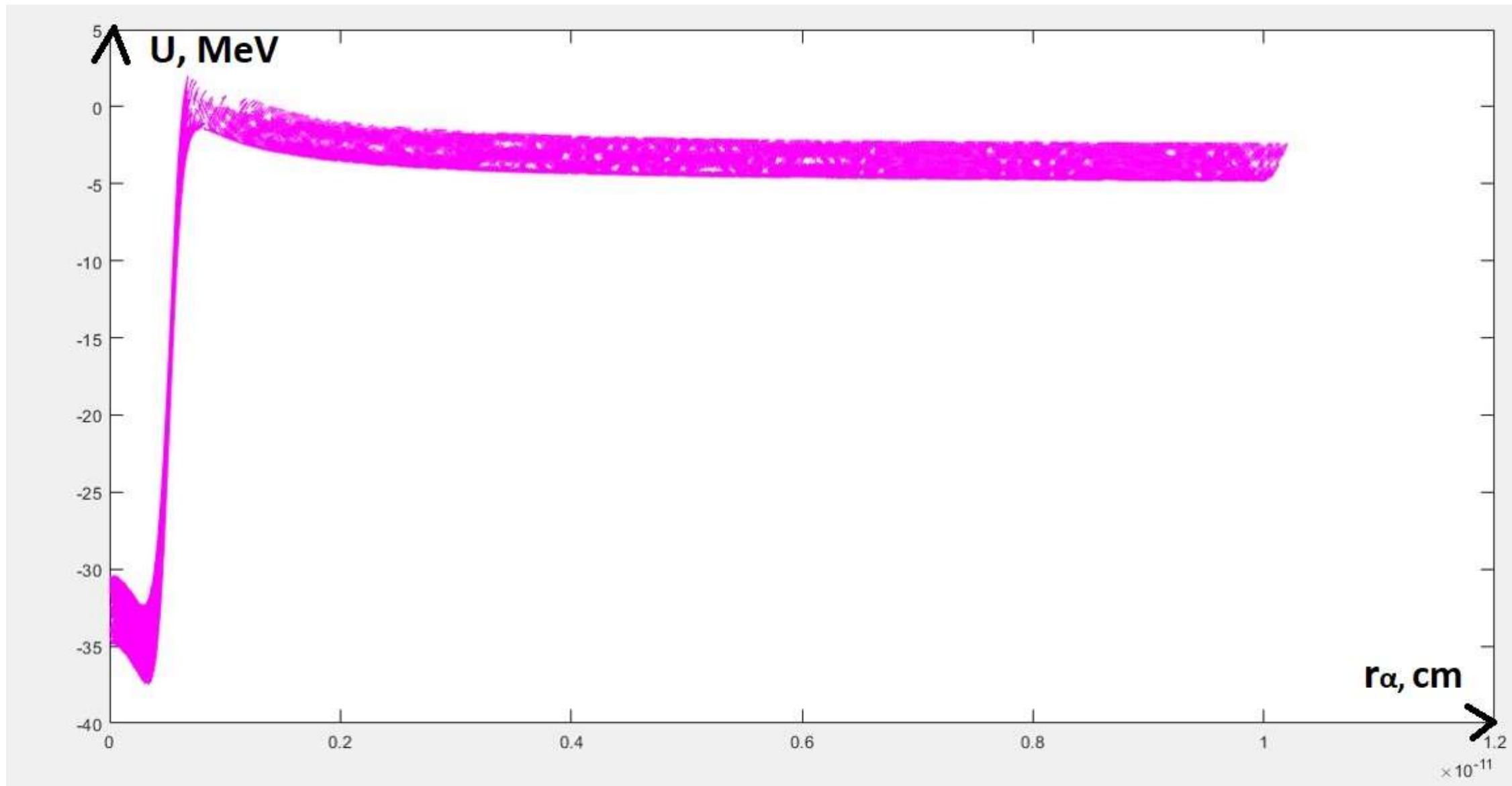


Траектория движения альфа-частицы и частицы  $O^{-}$  в плоскости XY

# Модель атома Томсона



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



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

# Электрический потенциал X-гелия.

$$\psi = \frac{e^{-r/r_0}}{\sqrt{\pi}r_0^{3/2}}$$

$$en_p = \begin{cases} \frac{eZ_\alpha}{4} & \text{для } r < R_{n\text{He}}, \\ \frac{4}{3}\pi R_{n\text{He}}^3 & \\ 0 & \text{для } r > R_{n\text{He}}. \end{cases}$$

$$U_{X\text{He}}^e = eZ_A\phi$$

$$\frac{1}{r}(\phi r)'' = -4\pi e \left( n_p + \frac{Z_X e^{-2r/r_0}}{\pi r_0^3} \right)$$

$$\phi = \begin{cases} -eZ_X e^{-2r/r_0} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r} \right) & \text{для } r > R_{n\text{He}}, \\ -eZ_X e^{-2r/r_0} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r} \right) + \frac{eZ_X}{r} + \frac{eZ_\alpha}{R_{n\text{He}}} \left( \frac{3}{2} - \frac{r^2}{2R_{n\text{He}}^2} \right) & \text{для } r < R_{n\text{He}}. \end{cases}$$

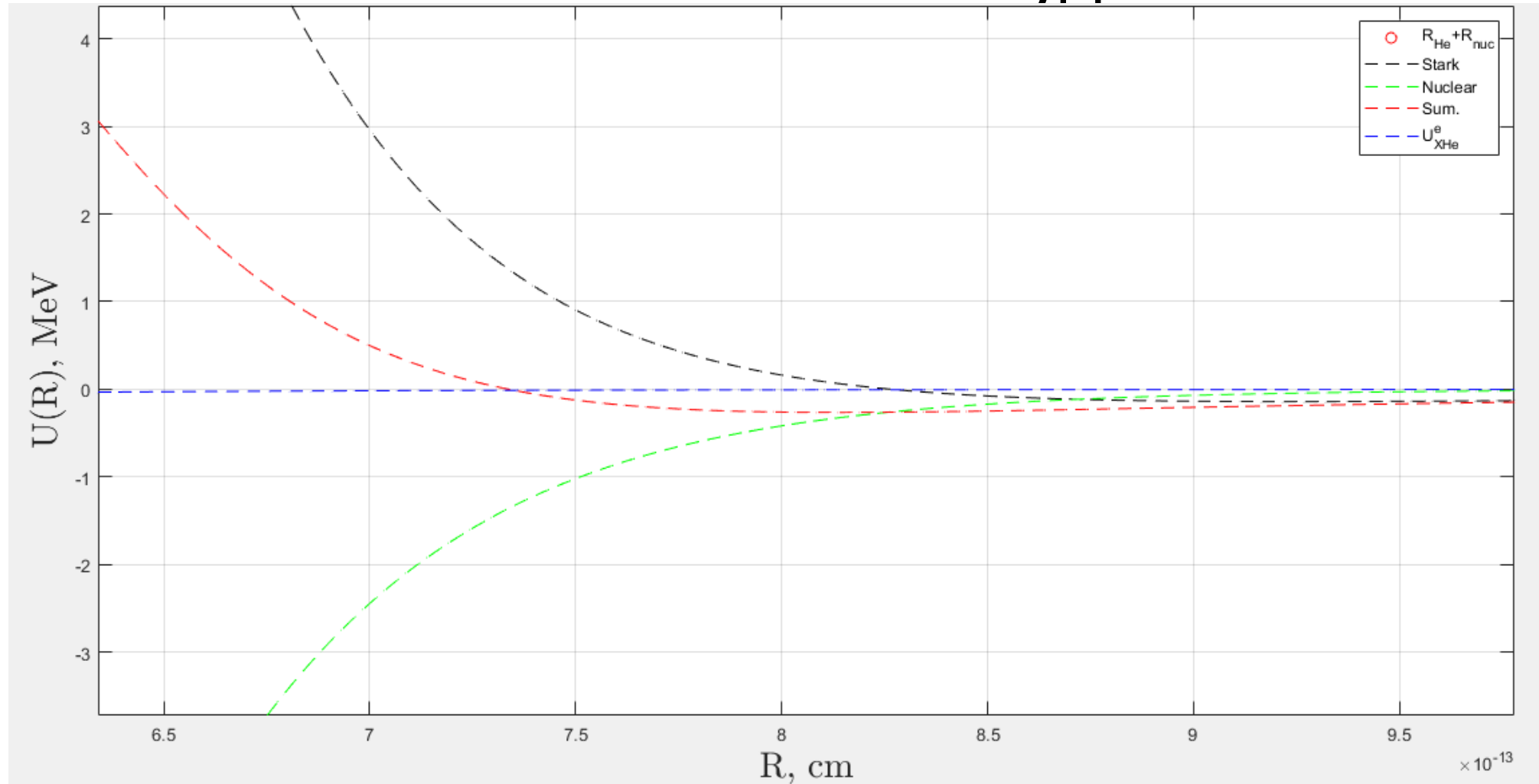


# Эффект Штарка.

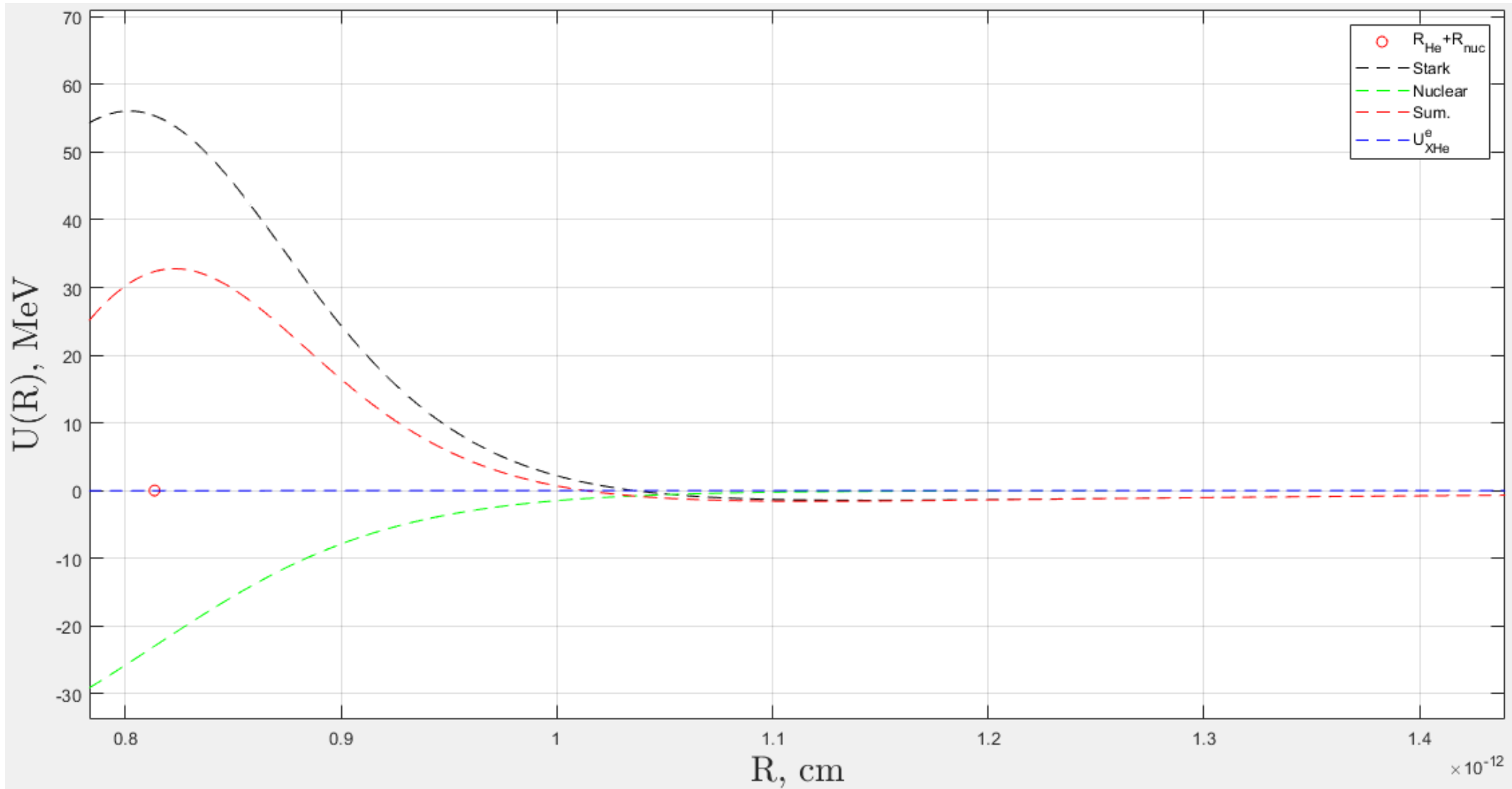
$$\vec{\delta} = \frac{Z_\alpha \vec{E}}{Z_X 4/3\pi\rho} + \frac{\vec{F}_\alpha^N}{e Z_X 4/3\pi\rho} \quad \rho = \frac{Z_\alpha e}{4/3\pi R_{nHe}^3}$$

$$\vec{F}_\alpha^N = -\frac{\frac{U_0}{p} \exp\left(\frac{r_{A\alpha} - R_A - R_{nHe}}{p}\right) \frac{\vec{r}_{A\alpha}}{r_{A\alpha}}}{\left(1 + \exp\left(\frac{r_{A\alpha} - R_A - R_{nHe}}{p}\right)\right)^2} \quad U_{St} = e Z_\alpha E \delta$$

# Результаты полуклассического подхода с ядерной силой типа Саксона-Вудса.



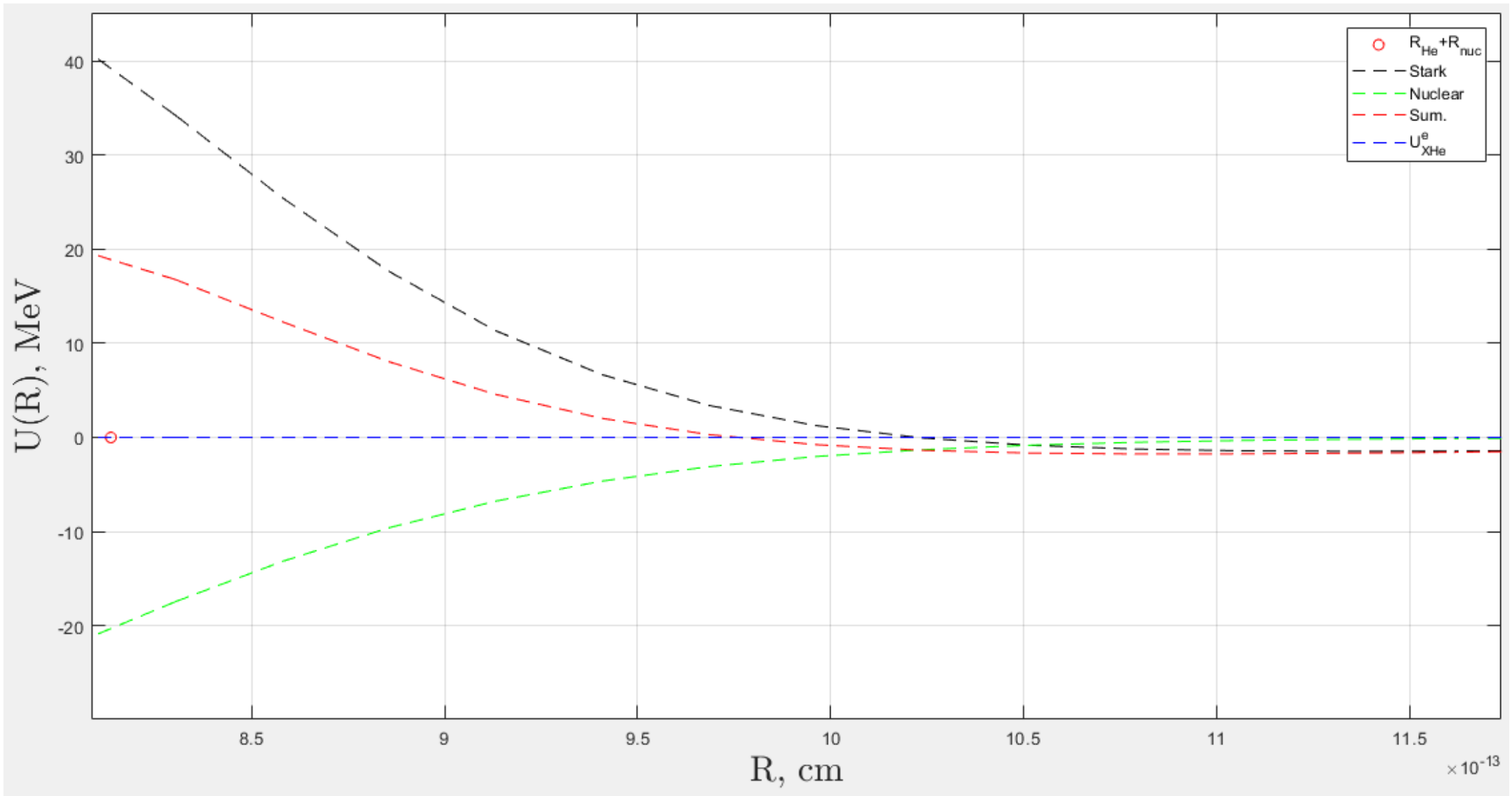
Графики зависимости ядерного потенциала типа Саксона-Вудса,  $U_{XHe}^e$ , потенциала Штарка и суммарного потенциала в зависимости от расстояния между He и ядром Na



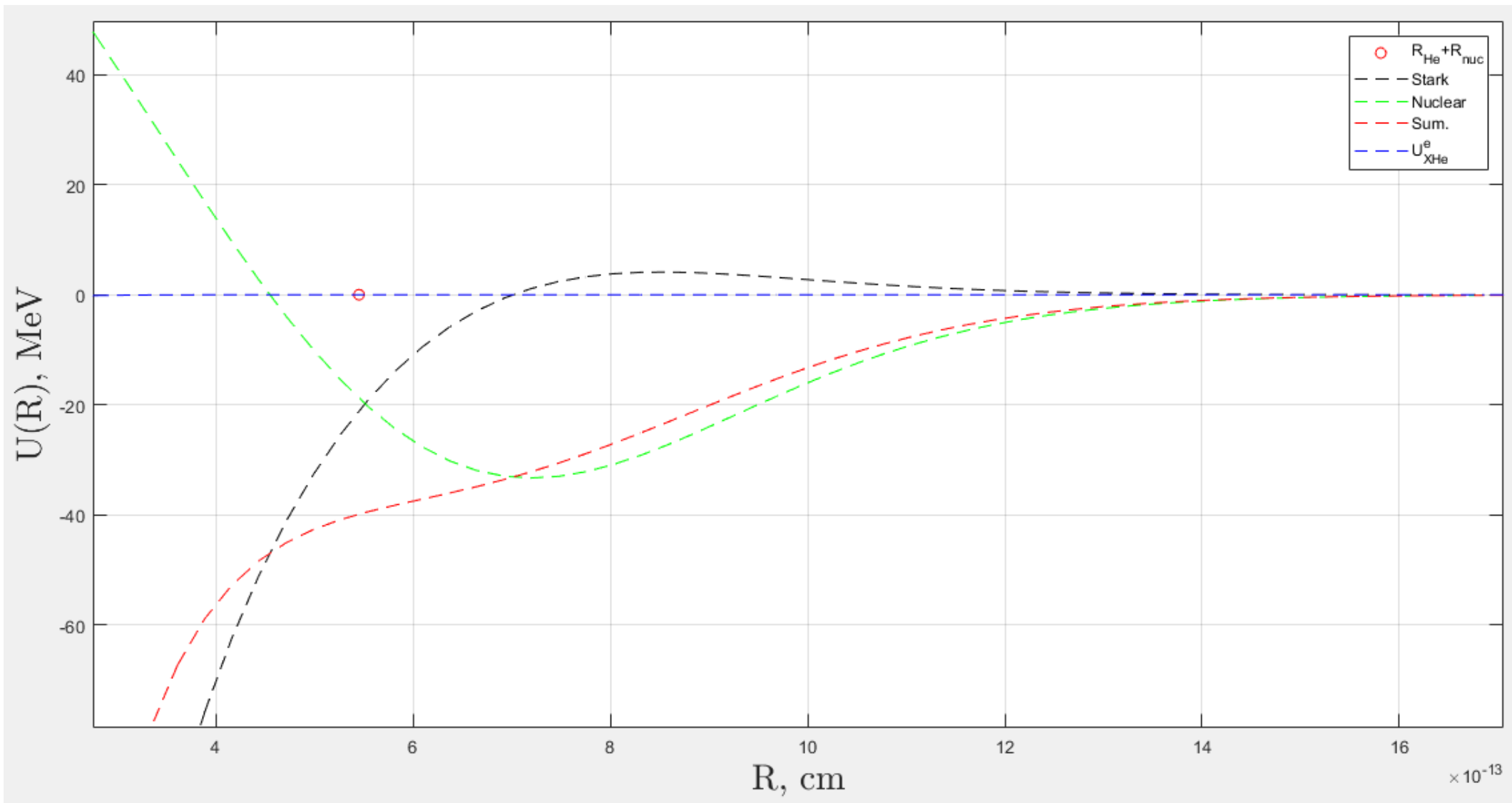
Графики зависимости ядерного потенциала типа Саксона-Вудса,  $U_{XHe}^e$ , потенциала Штарка и суммарного потенциала в зависимости от расстояния между He и ядром I

## Ядерная сила с учётом неточечности взаимодействующих ядер.

$$U_N(R) = 2C_0 A_1 \left( \frac{\gamma^2}{\pi} \right)^{1/2} e^{-\gamma^2 R^2} \frac{1}{R} \int_0^\infty e^{-\gamma^2 r^2} \frac{\rho_2(r)}{\rho_{00}} \left[ (F_{\text{in}} - F_{\text{ex}}) \left( \rho_2(r) \sinh(2\gamma^2 Rr) \right) + \frac{A_1}{4} \left( \frac{\gamma^2}{\pi} \right)^{3/2} e^{-\gamma^2 (r^2 + R^2)} \sinh(4\gamma^2 Rr) + \rho_{00} F_{\text{ex}} \sinh(2\gamma^2 Rr) \right] r dr .$$



Графики зависимости неточечного ядерного потенциала,  $U_{\text{xHe}}^e$ , потенциала Штарка и суммарного потенциала в зависимости от расстояния между He и ядром I



Графики зависимости неточечного ядерного потенциала,  $U_{\text{XHe}}^e$ , потенциала Штарка и суммарного потенциала в зависимости от расстояния между He и ядром Na

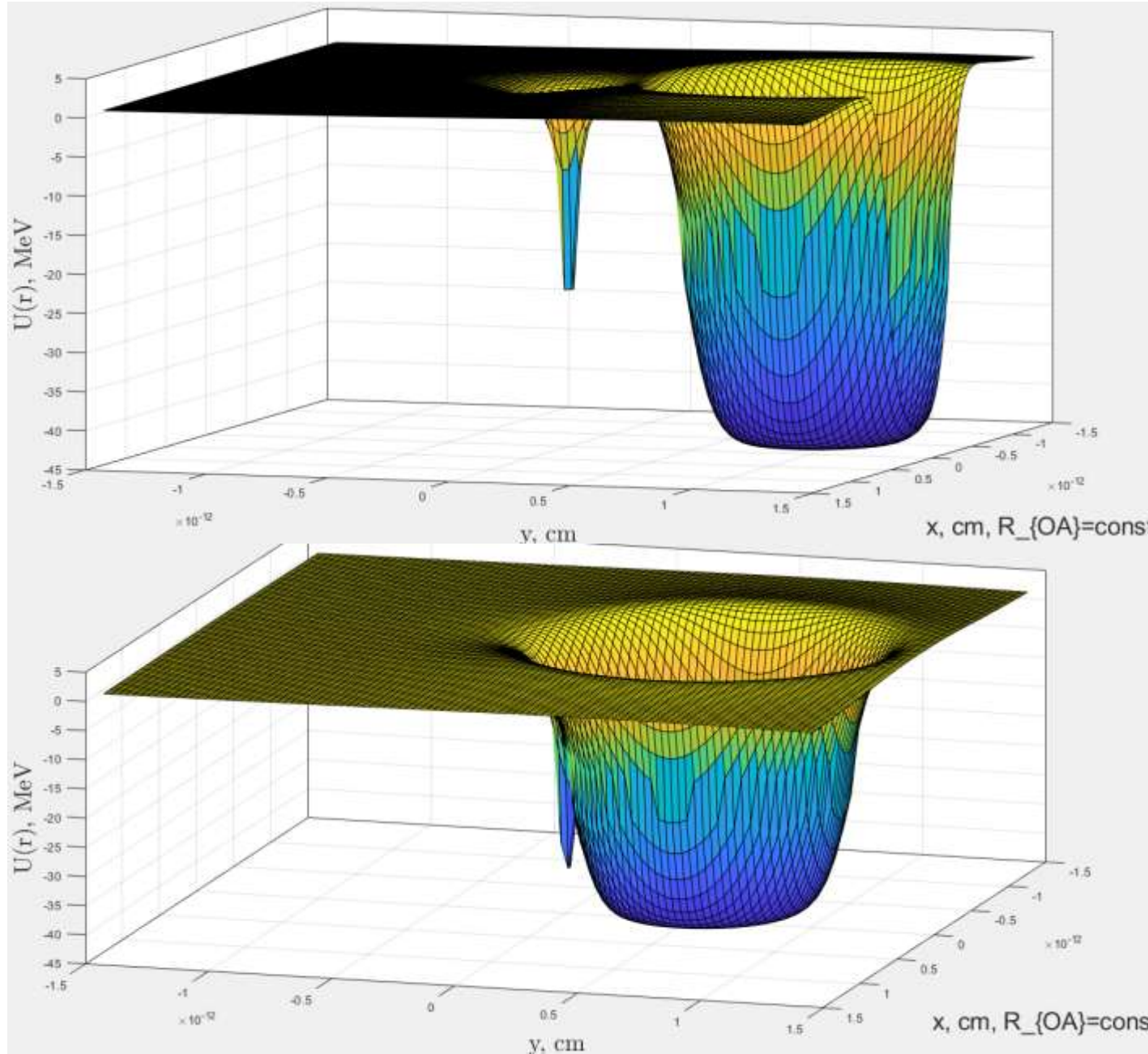
# Уравнение Шрёдингера для ядра гелия.

$$\vec{R}_{HeA} = \vec{R}_{OA} - \vec{r} \quad \hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{U} \quad \hat{H}\Psi = E\Psi$$

$$\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m_{He}}\Delta_{r,\phi} - \frac{4e^2}{r} \quad \hat{U} = \frac{2e^2 Z_A}{|\vec{R}_{OA} - \vec{r}|} + U_N(|\vec{R}_{OA} - \vec{r}|)$$

$$\Delta_{r,\phi}\Psi + \frac{2m_{He}}{\hbar^2} \left( E + \frac{4e^2}{r} - \frac{2e^2 Z_A}{|\vec{R}_{OA} - \vec{r}|} - U_N(|\vec{R}_{OA} - \vec{r}|) \right) \Psi = 0$$

# Потенциал взаимодействия гелия в системе OHe – ядро.

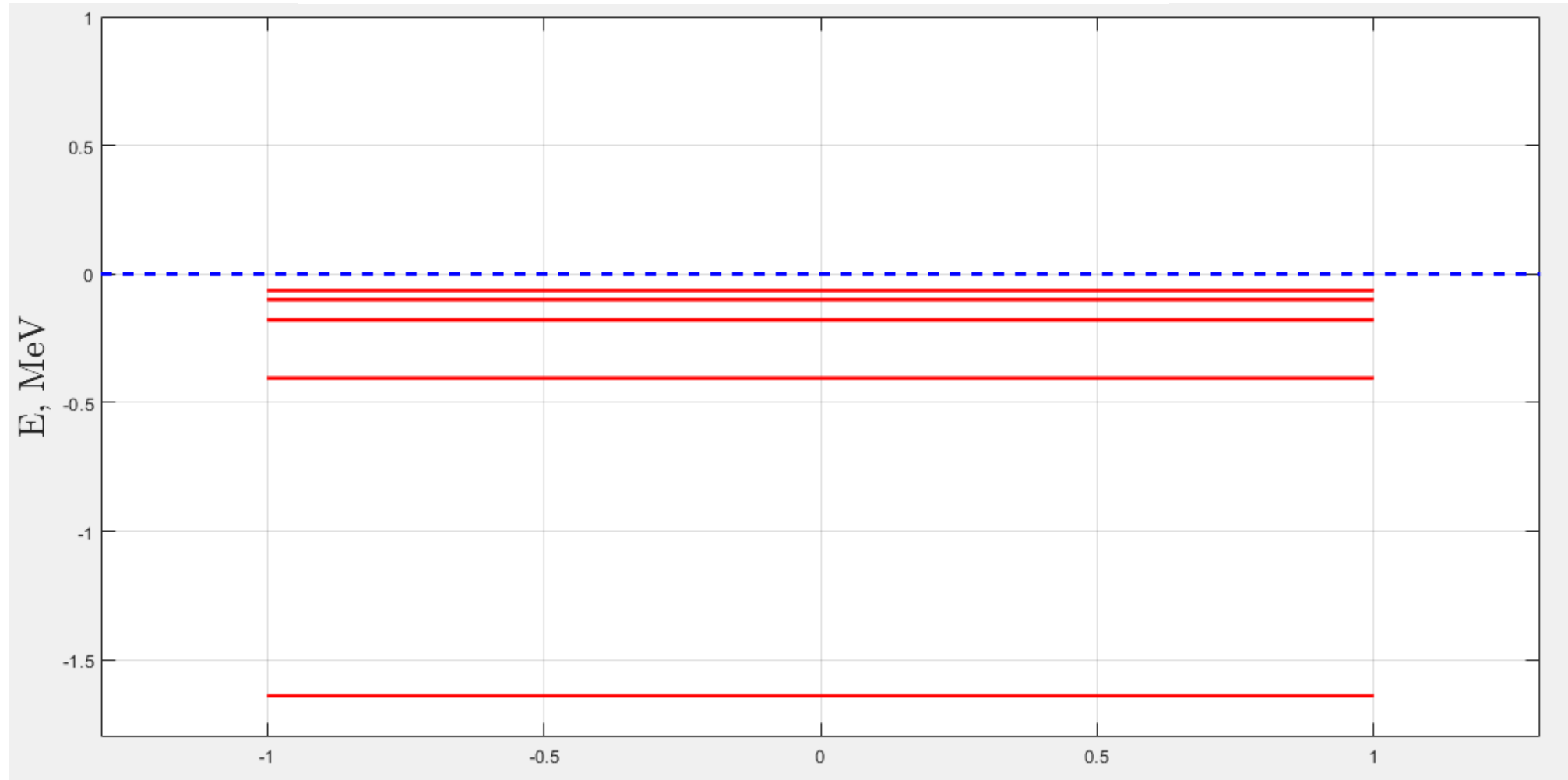


$$U_{He} = -\frac{4e^2}{r} + \frac{2e^2 Z_A}{|\vec{R}_{OA} - \vec{r}|} + U_N(|\vec{R}_{OA} - \vec{r}|)$$

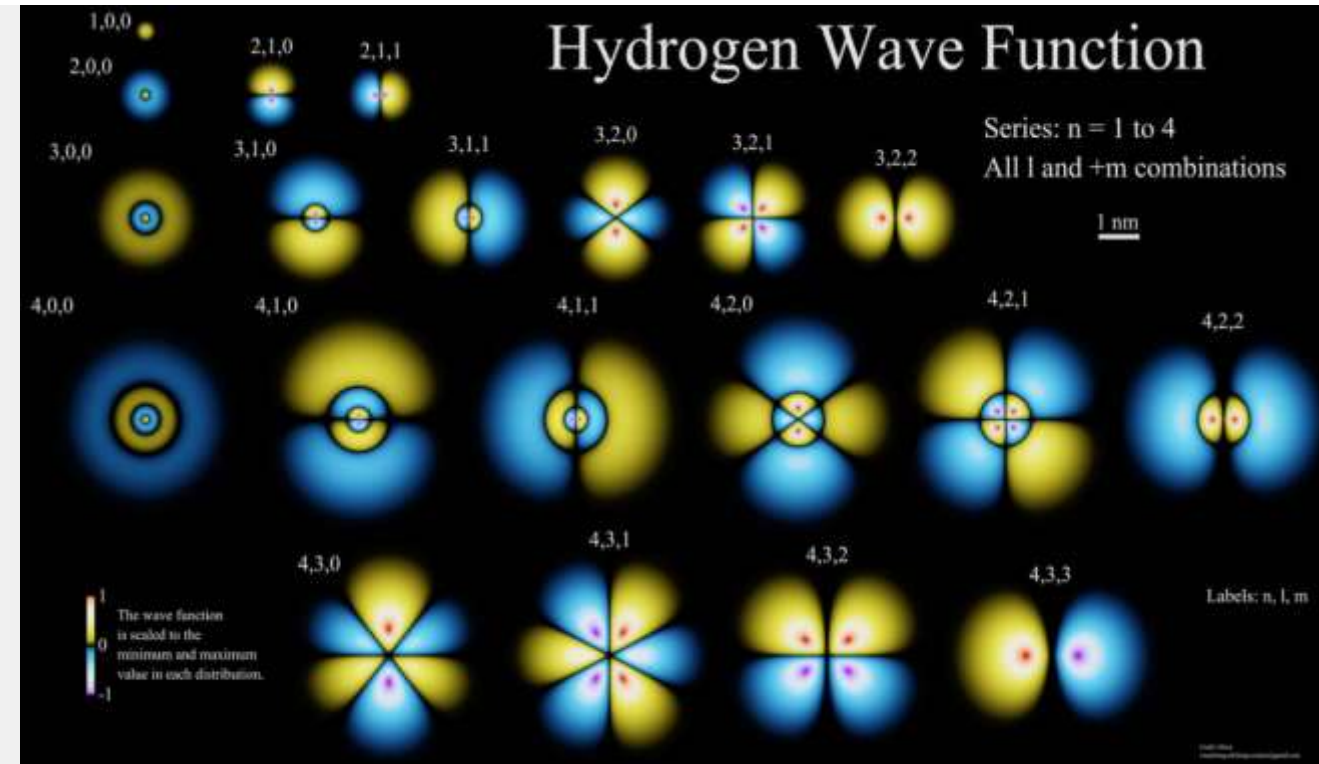
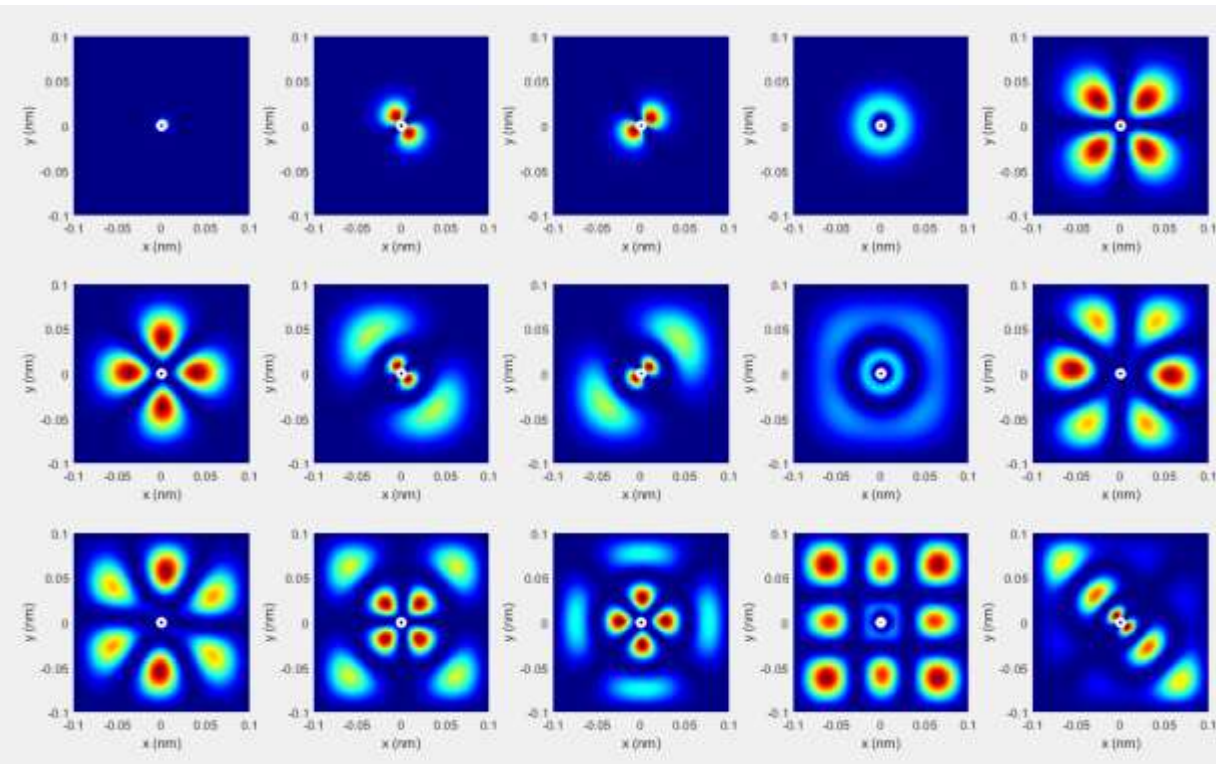


# Одномерное уравнение Шрёдингера для атома О-гелия.

$$\Delta_r \Psi + \frac{2m_{He}}{\hbar^2} \left( E + \frac{4e^2}{r} \right) \Psi = 0$$



# Двумерное уравнение Шрёдингера для атома водорода.



Численный расчёт распределения квадрата модуля волновой функции электрона в атоме водорода в зависимости от квантовых чисел

# Заключение

*Квантово-механический подход ещё не доведён до конца и в будущем планируется применить алгоритм для расчёта двумерного уравнения Шрёдингера в системе OHe-ядро, используя восстановленный потенциал взаимодействия, после чего необходимо будет рассчитать поляризацию атома OHe и вычислив потенциал Штарка построить суммарный потенциал взаимодействия, в котором помимо потенциала Штарка также учитываются ядерный и электромагнитный потенциалы.*

Спасибо за внимание!