

Ежегодная научная конференция «Ломоносовские чтения-2022»
Подсекция «Ядерная физика»



ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ НУКЛОННЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ЯДРО-ЯДЕРНОГО ПОТЕНЦИАЛА В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

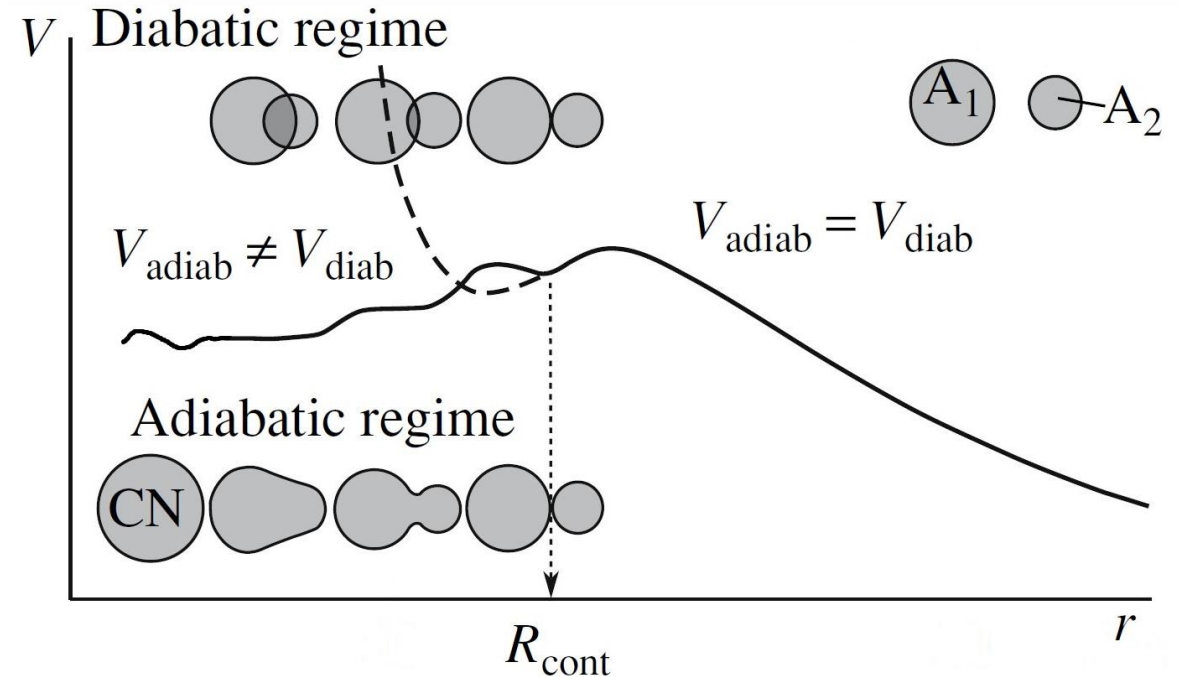
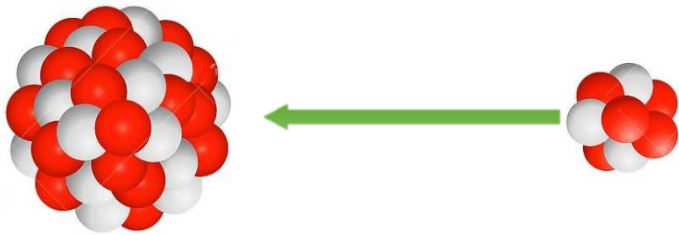
Симонов М.В.,
Третьякова Т.Ю.,
Карпов А.В. (ОИЯИ)

МГУ, физический факультет,
кафедра общей ядерной физики

Реакции с тяжелыми ионами

Реакции с тяжелыми ионами:

- Режим столкновения: **диабатический**
- Быстрые столкновения: область двойной плотности



Адаптировано из: Zagrebaev V. et al.// Phys. Part. Nucl., 2007. 38, 4, 469–491

Цели:

1. Оценить влияние распределения плотностей на межъядерное взаимодействие
2. Провести расчет потенциала для оценки положения барьера слияния

$$V_{diab}(r) = V_{NN}(r) + V_{coulomb}(r)$$

Процедура расчета

1. Фолдинг-потенциал:

$$V_{NN}(r) = \int_{V_1} \rho_1(\mathbf{r}_1) \int_{V_2} \rho_2(\mathbf{r}_2) v_{NN}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) d^3r_2 d^3r_1$$

2. Потенциал Мигдала:

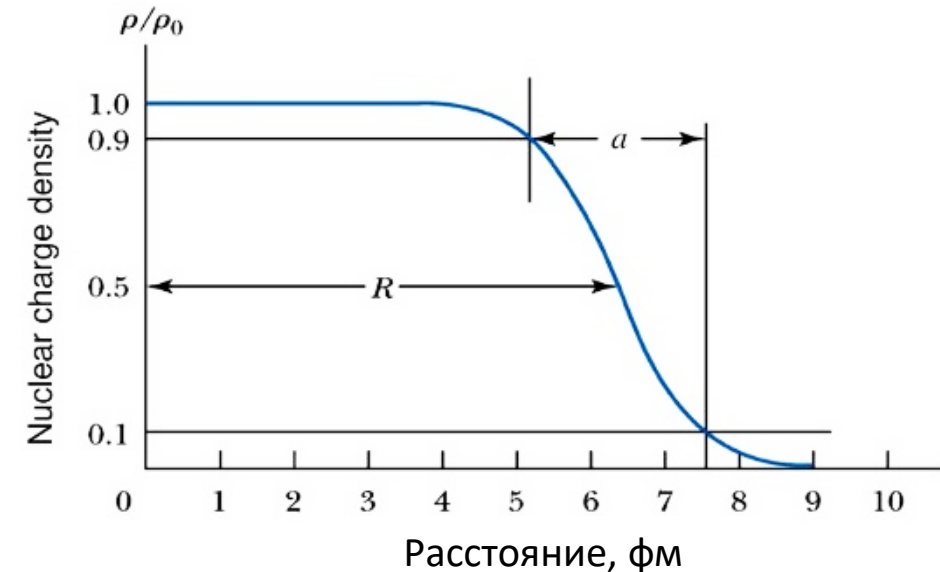
$$v_{NN}(\mathbf{r}_{12}) = C \left[F_{\text{ex}} + 2(F_{\text{in}} - F_{\text{ex}}) \frac{\rho_1(\mathbf{r}_1) + \rho_2(\mathbf{r}_2)}{\rho_2(0) + \rho_2(0)} \right] \delta(\mathbf{r}_{12})$$

3. Форма нуклонных плотностей:

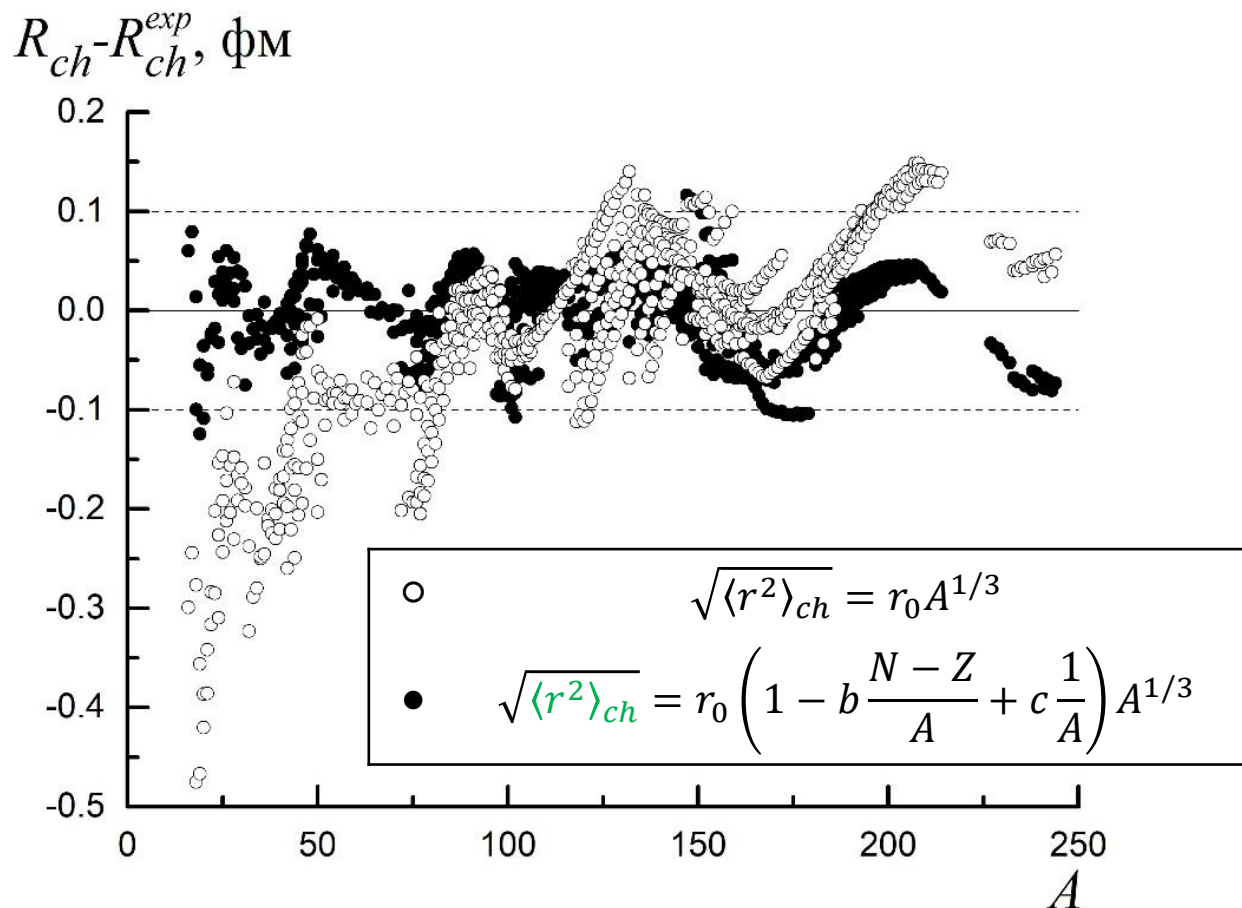
$$\rho_{1,2}(r) = \rho_{1,2}^p(r) + \rho_{1,2}^n(r),$$

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{a}\right)} \text{ for } p, n$$

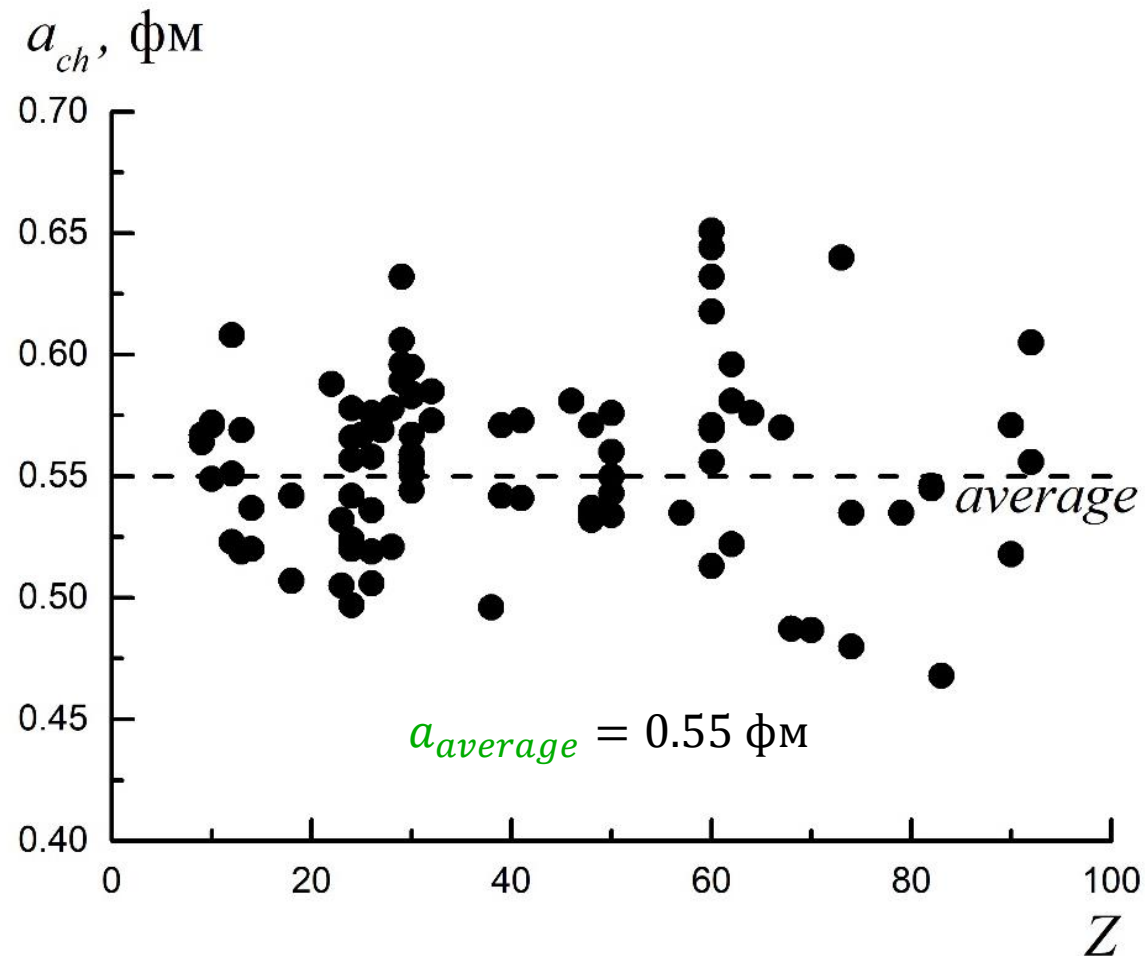
4. Сферические четно-четные ядра $Z \geq 8, N \geq 8$,
центральные столкновения



Эксперимент: данные по распределению заряда



Эксп. данные: I. Angeli et al. ADNDT 99, 69 (2013).
 Аппрокс. формула: B. Nerlo-Pomorska et al. Zeitschrift für Phys.
 A Hadron. Nucl. 348 (1994).



Эксп. данные : H. de Vries et al. ADNDT 36, 495–536 (1987).

Эксперимент: нейтронная шуба

Нейтронная плотность: $\rho_n(r) = \frac{\rho_{0n}}{1 + \exp\left(\frac{r - R_{0n}}{a_n}\right)}$

Толщина нейтронной «шубы»:

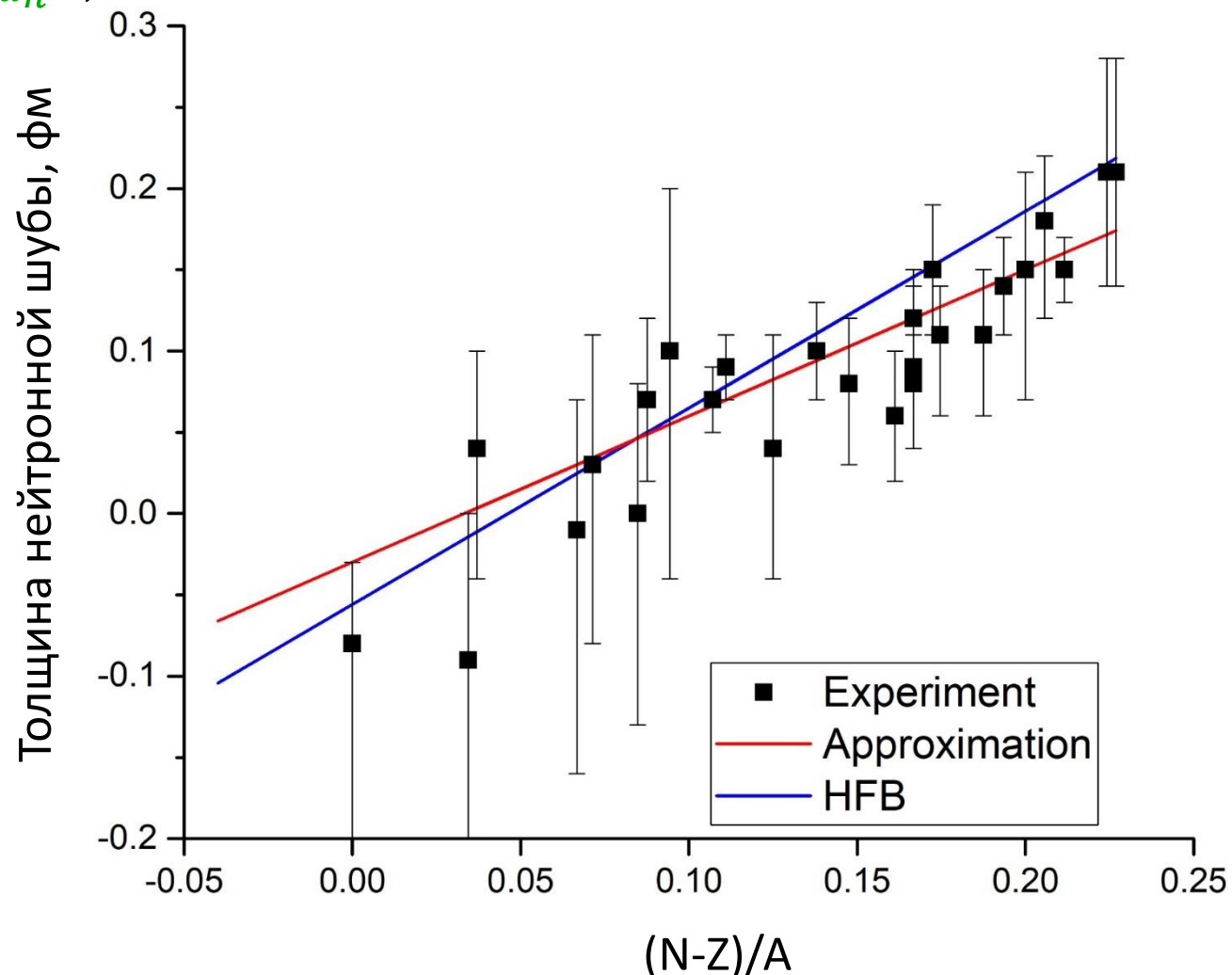
$$\Delta R_{np} = \sqrt{\langle r^2 \rangle_n} - \sqrt{\langle r^2 \rangle_p}$$

Аппроксимация для данные по рассеянию антипротонов на ядрах:

$$\Delta R_{np} = a \frac{N - Z}{A} - b$$

J. Jastrzebski et al. IJMP E, vol. 13. (2004)

$$\langle r^2 \rangle_{ch} \rightarrow \langle r^2 \rangle_p \rightarrow \Delta R_{np} \rightarrow \langle r^2 \rangle_n \rightarrow R_{0n}$$



Преобразование параметров плотностей

Радиусы

Эксперимент:

$$\langle r^2 \rangle_{ch}$$

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle_{ch}} = r_0 \left(1 - b \frac{N - Z}{A} + c \frac{1}{A} \right) A^{1/3}$$

Аппроксимация:

$$\langle r^2 \rangle_{ch}$$

$$\langle r^2 \rangle_{ch} = \langle r^2 \rangle_p + \langle r^2 \rangle_{ch_p} + \frac{N}{Z} \langle r^2 \rangle_{ch_n}$$

$$\langle r^2 \rangle_p$$

$$R_{0p} = \sqrt{\frac{5}{3} \langle r^2 \rangle_p - \frac{7}{3} (\pi a_p)^2}$$

$$R_{0p}$$

$$\Delta R_{np} = a \frac{N - Z}{A} - b$$

$$\langle r^2 \rangle_n$$

$$R_{0n} = \sqrt{\frac{5}{3} \langle r^2 \rangle_n - \frac{7}{3} (\pi a_n)^2}$$

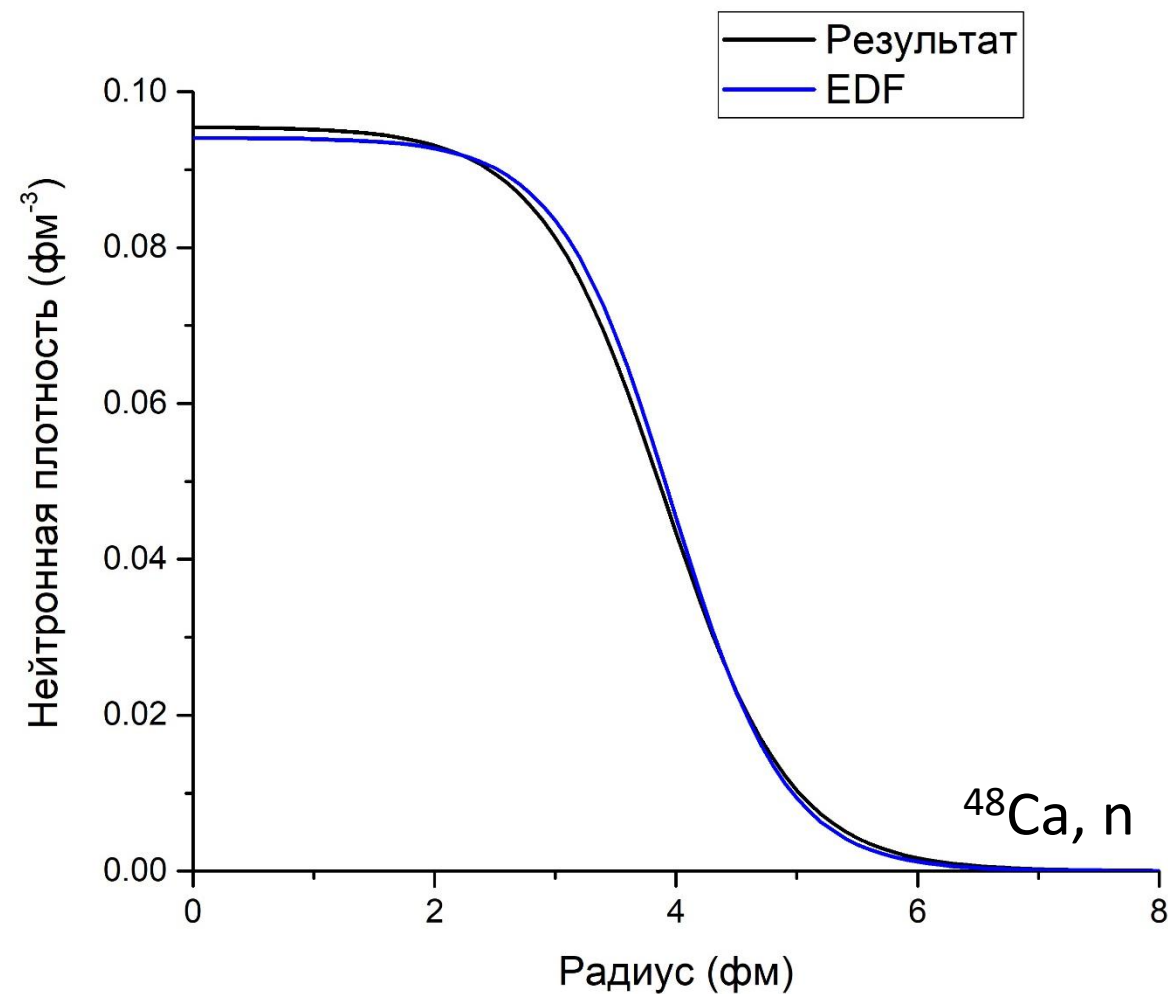
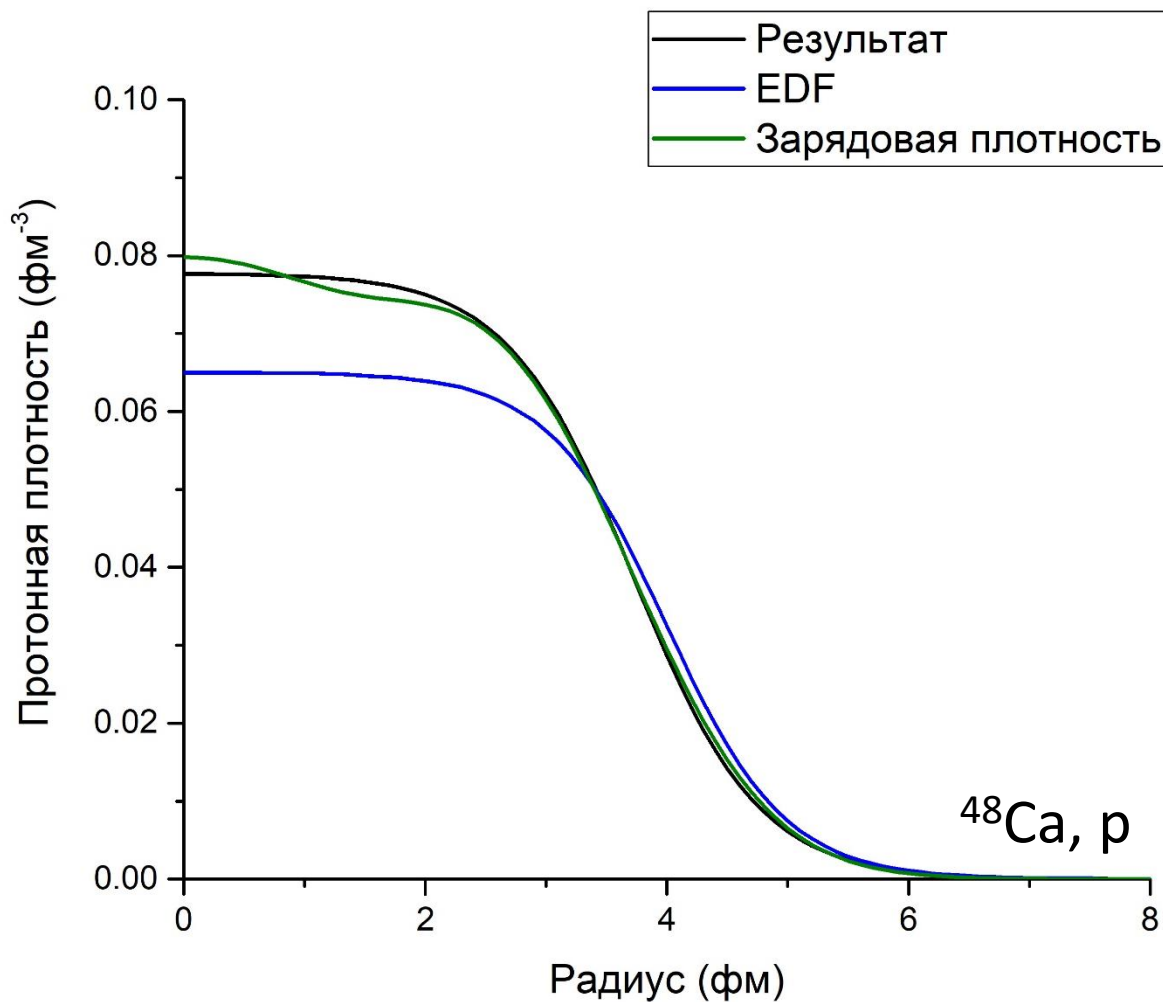
$$R_{0n}$$

Диффузности

$$a_p = a_{ch} - 0.03$$

Предположение: $a_p \approx a_n$

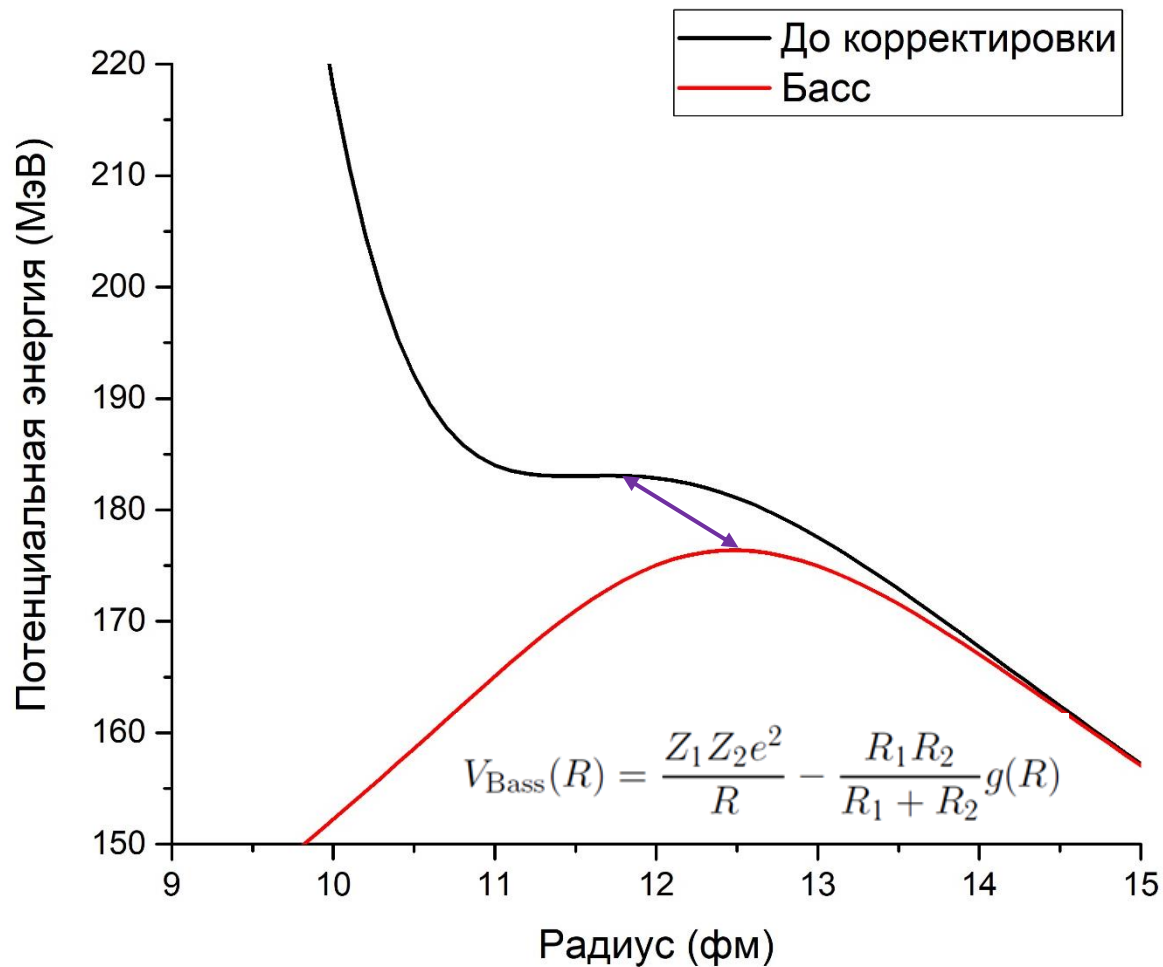
Пример расчета плотностей



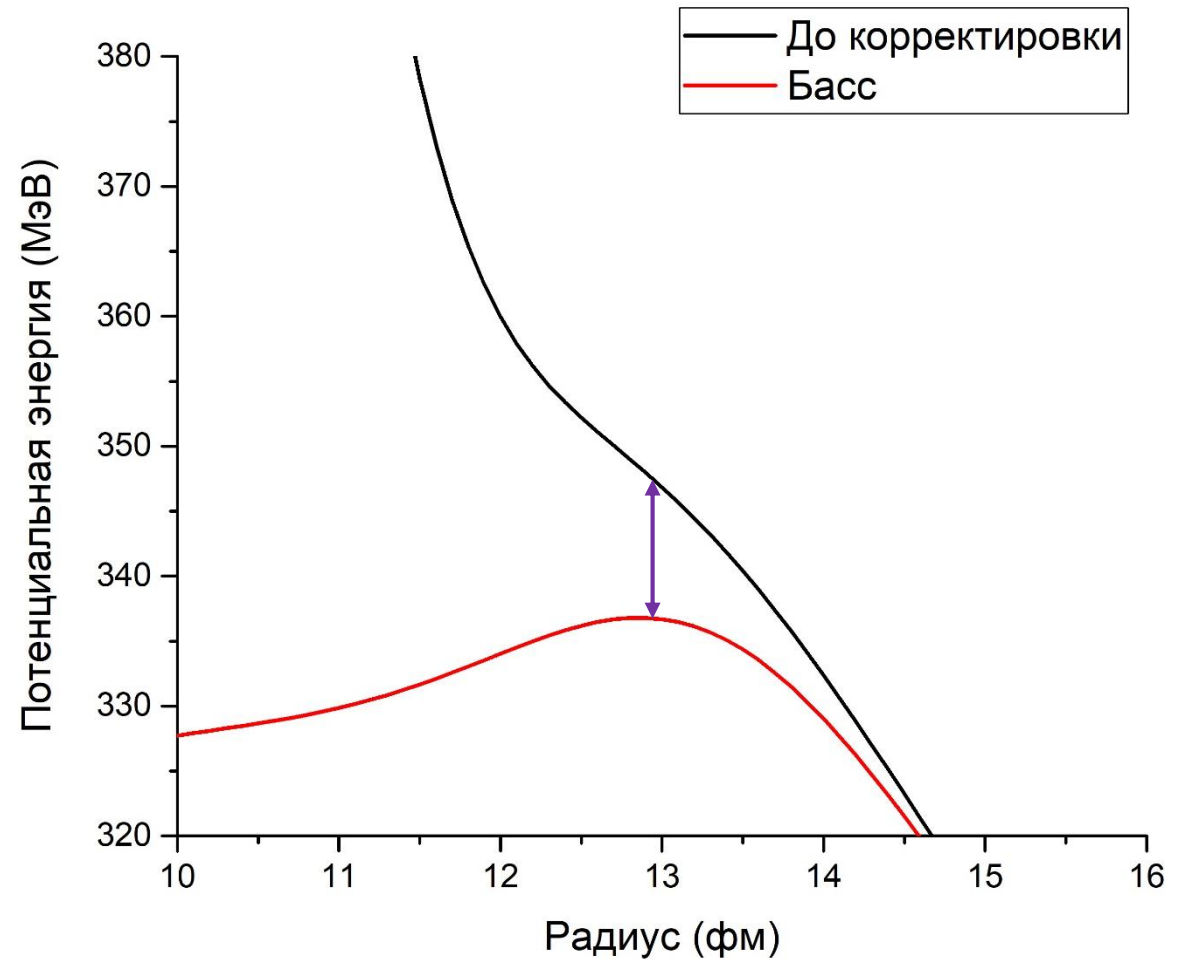
Эксп. данные: I. Sick, Nucl. Phys. A 218, 509 (1974)

Теор. расчеты (EDF): G. G. Adamian et al. Phys. Rev. C 94, 1 (2016).

Результат расчета потенциала



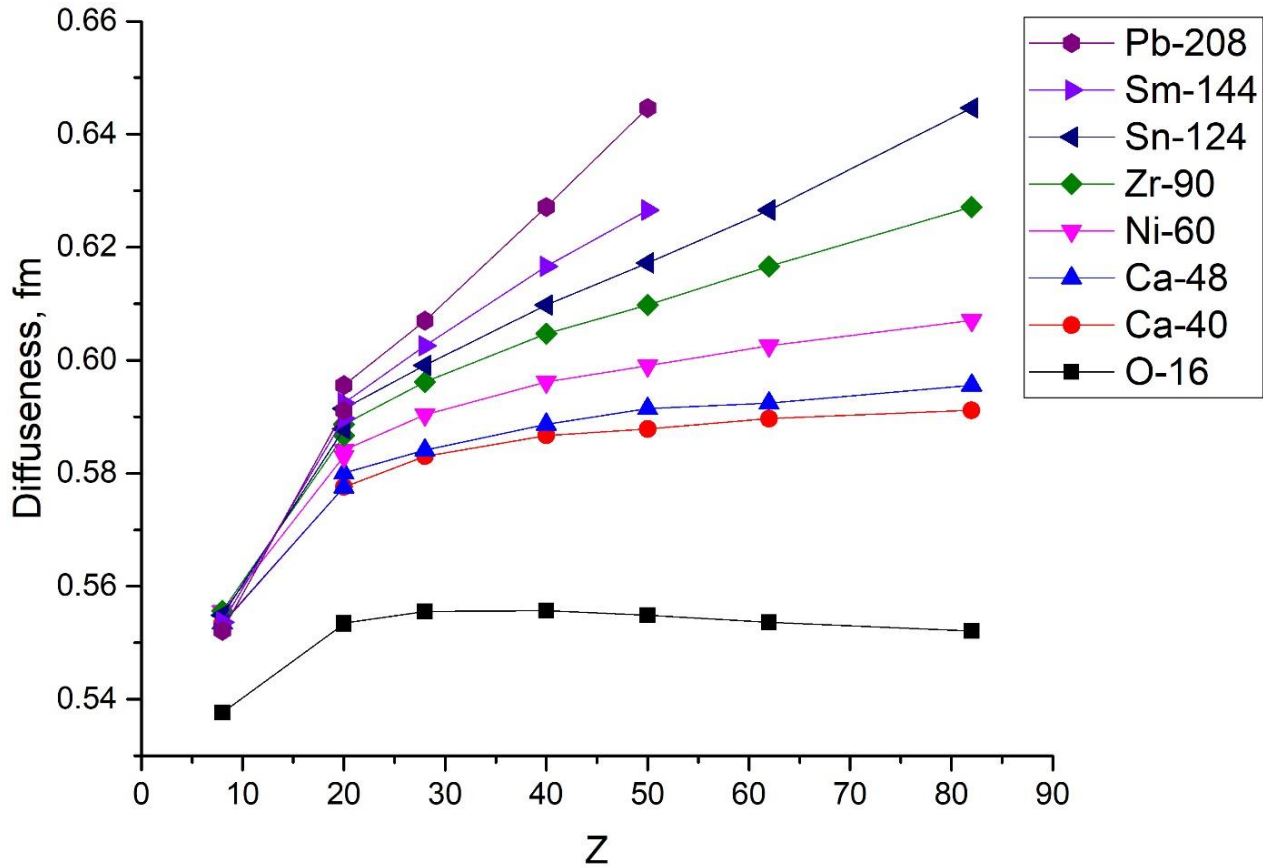
Система $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$



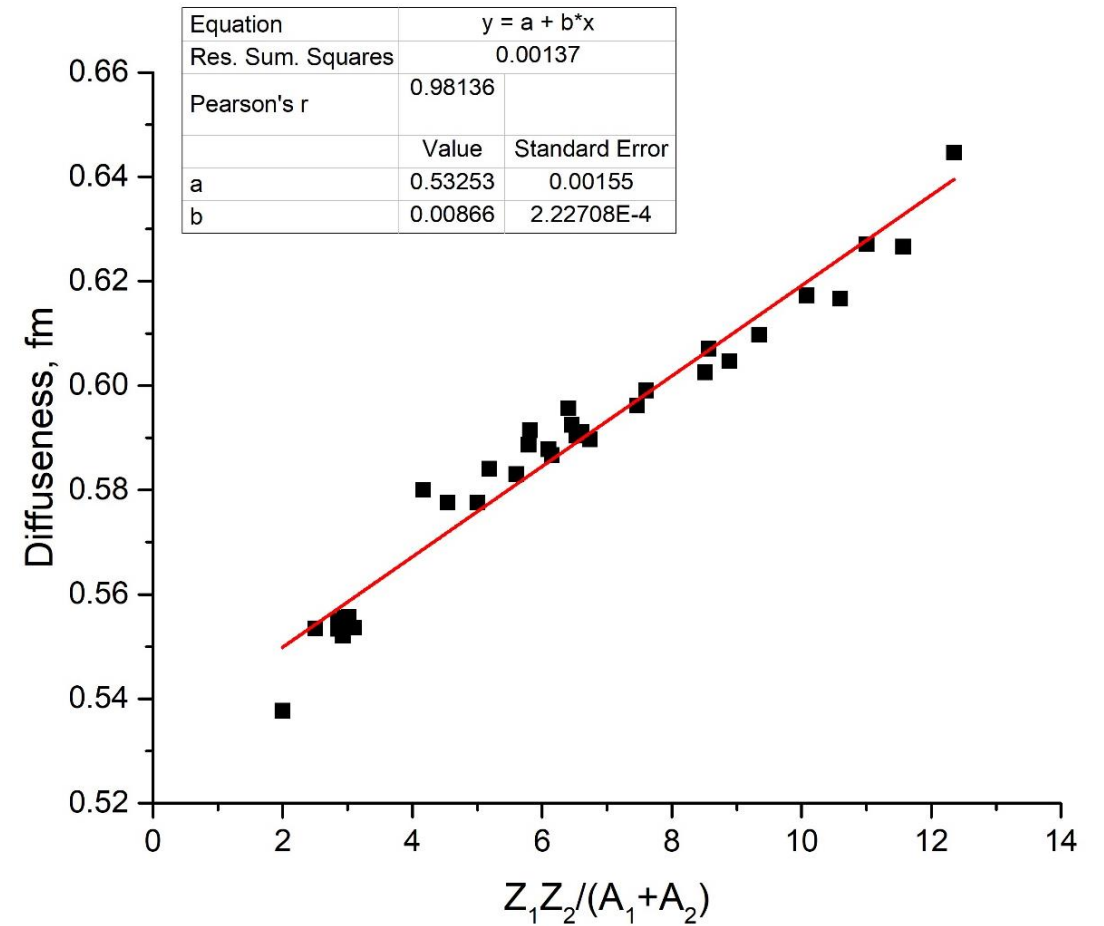
Система $^{90}\text{Zr} + ^{208}\text{Pb}$

Потенциал Басса: R. Bass. Nucl. Reactions with Heavy Ions. Springer,

Корректировка диффузностей

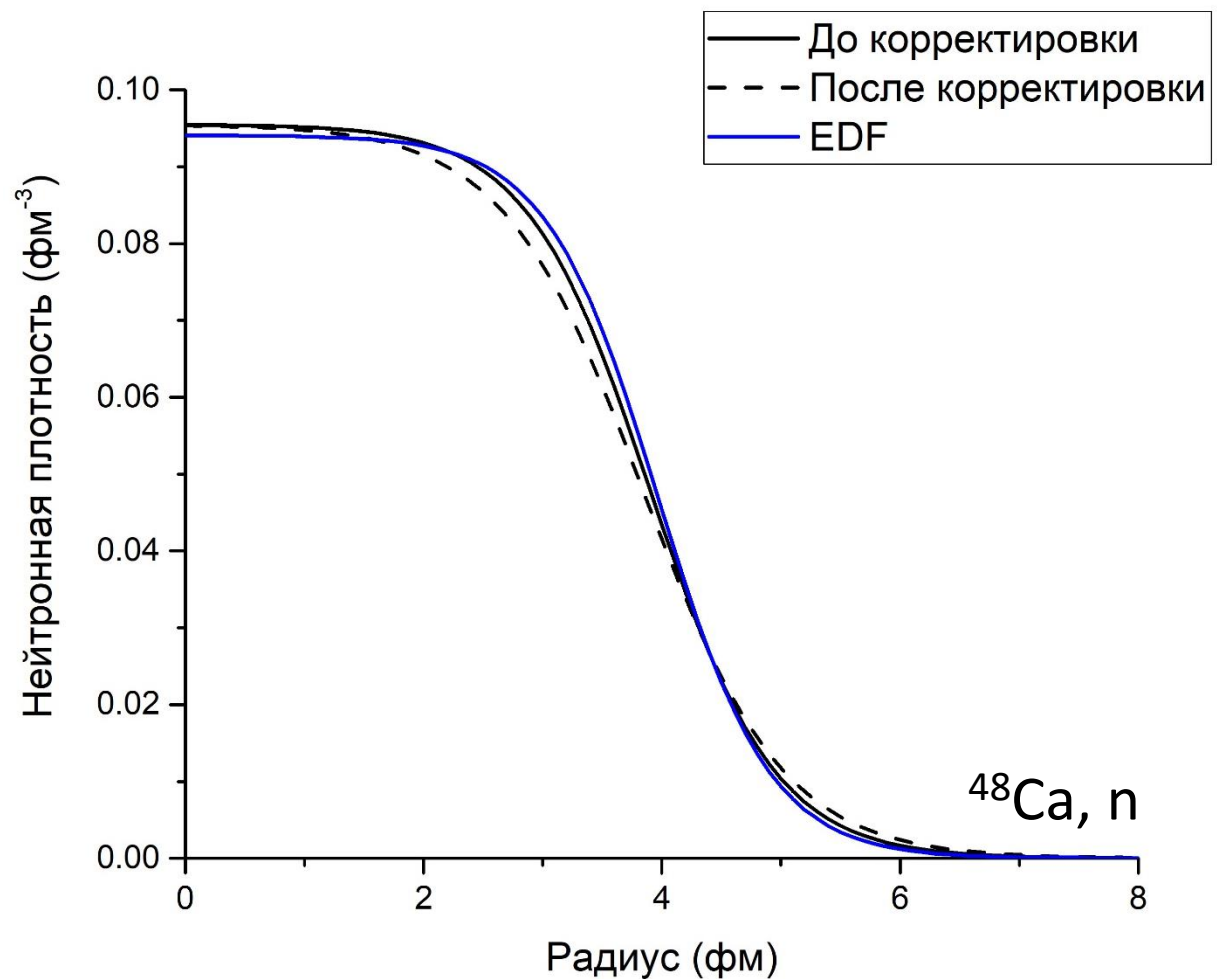
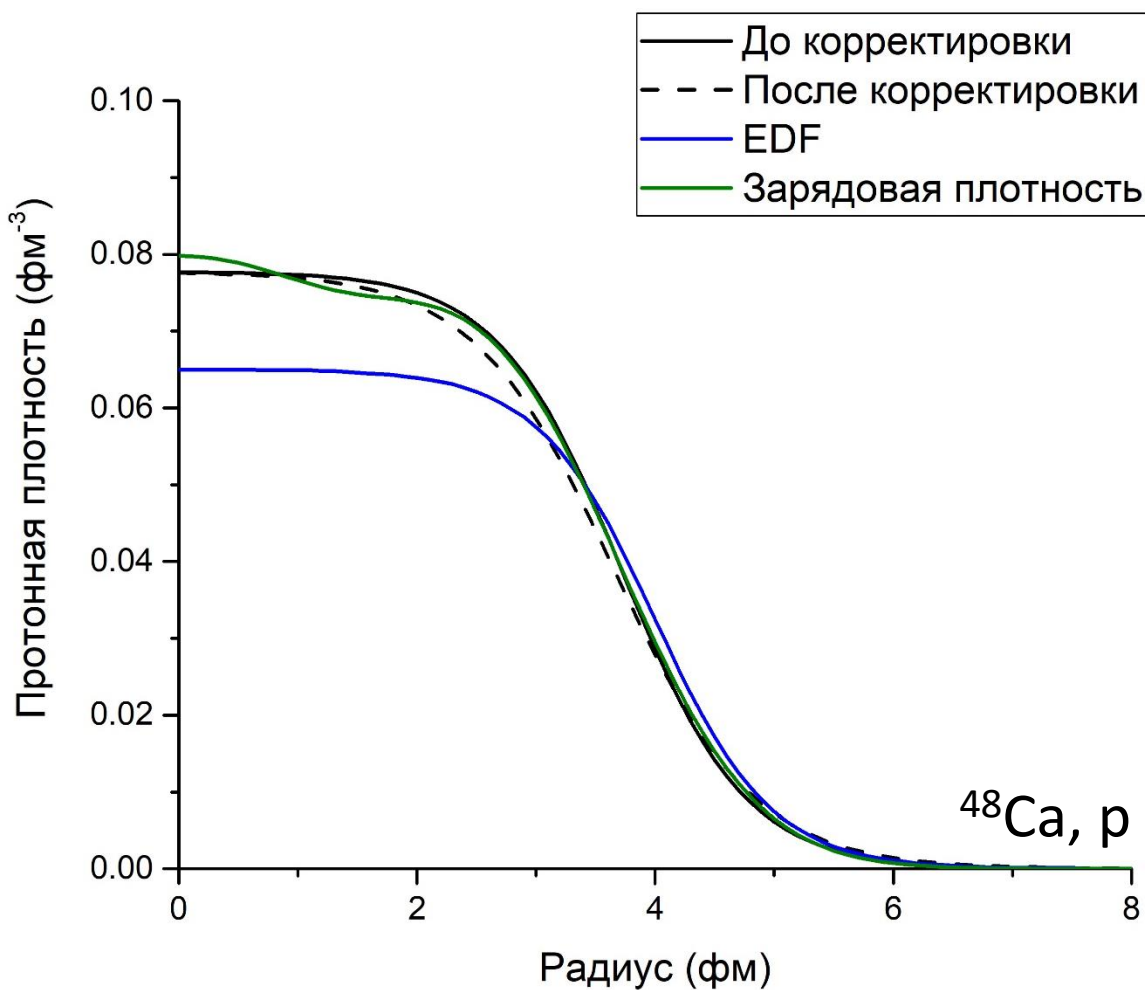


Диффузности для разных ядер



Аппроксимация

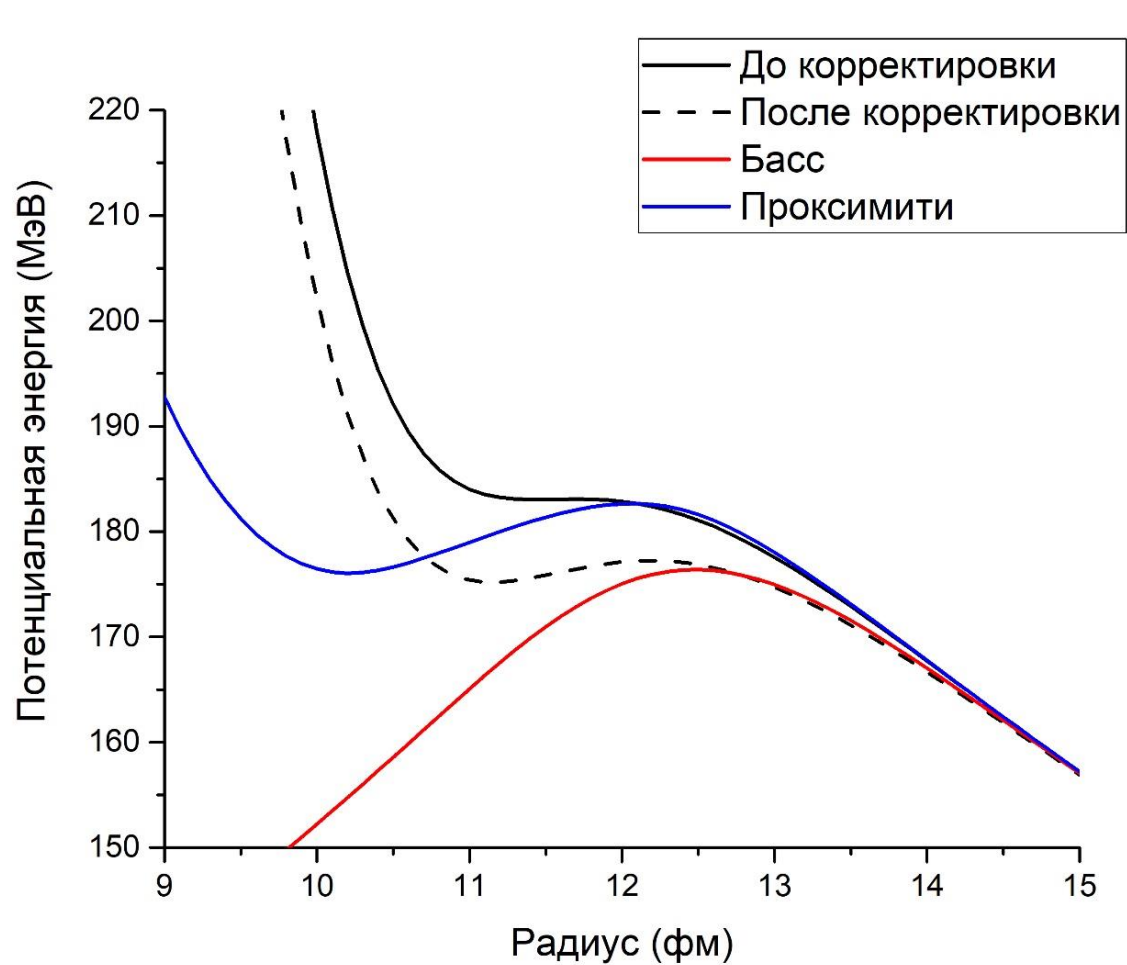
Пример расчета плотностей



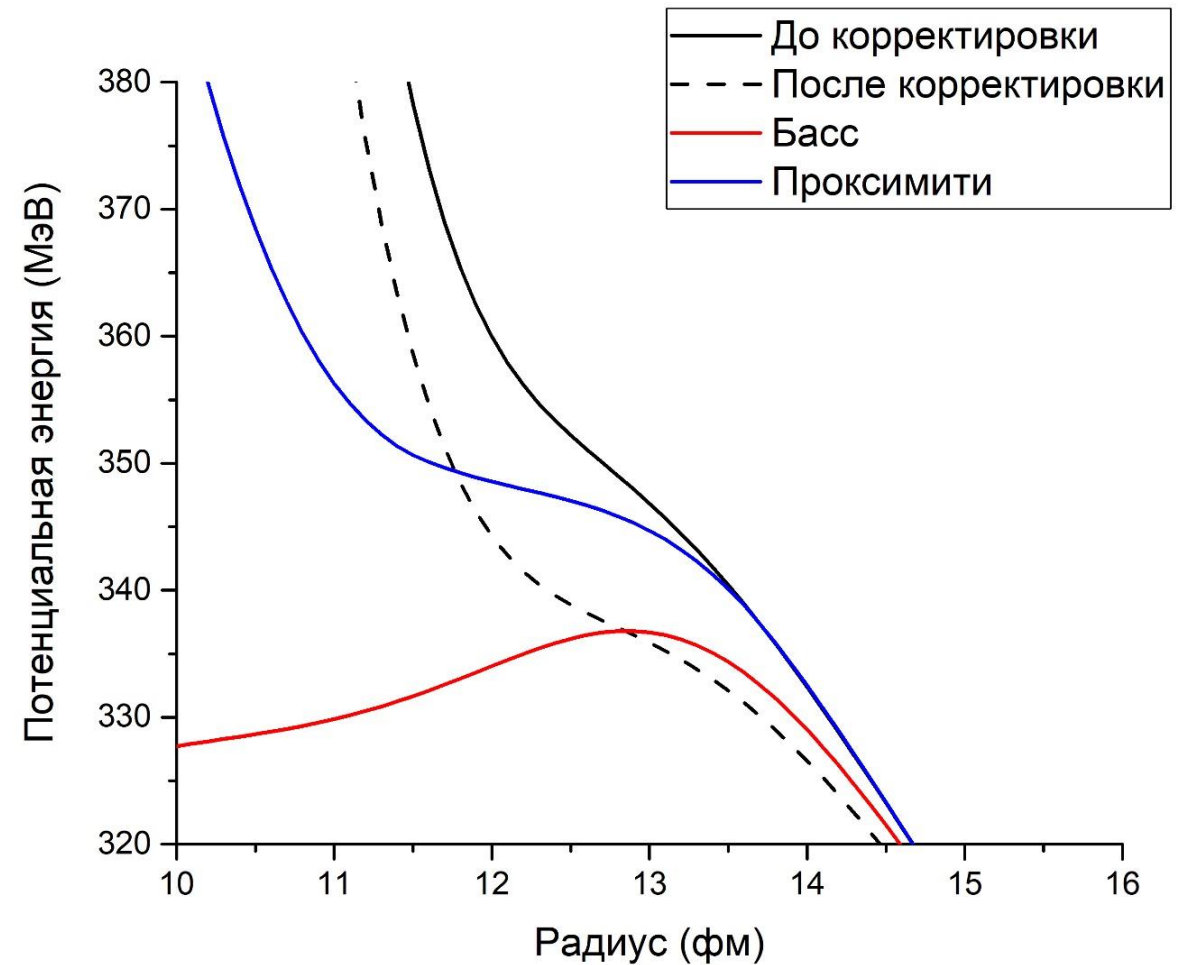
Эксп. данные: I. Sick, Nucl. Phys. A 218, 509 (1974)

Теор. расчеты (EDF): G. G. Adamian et al. Phys. Rev. C 94, 1 (2016).

Результат расчета потенциала



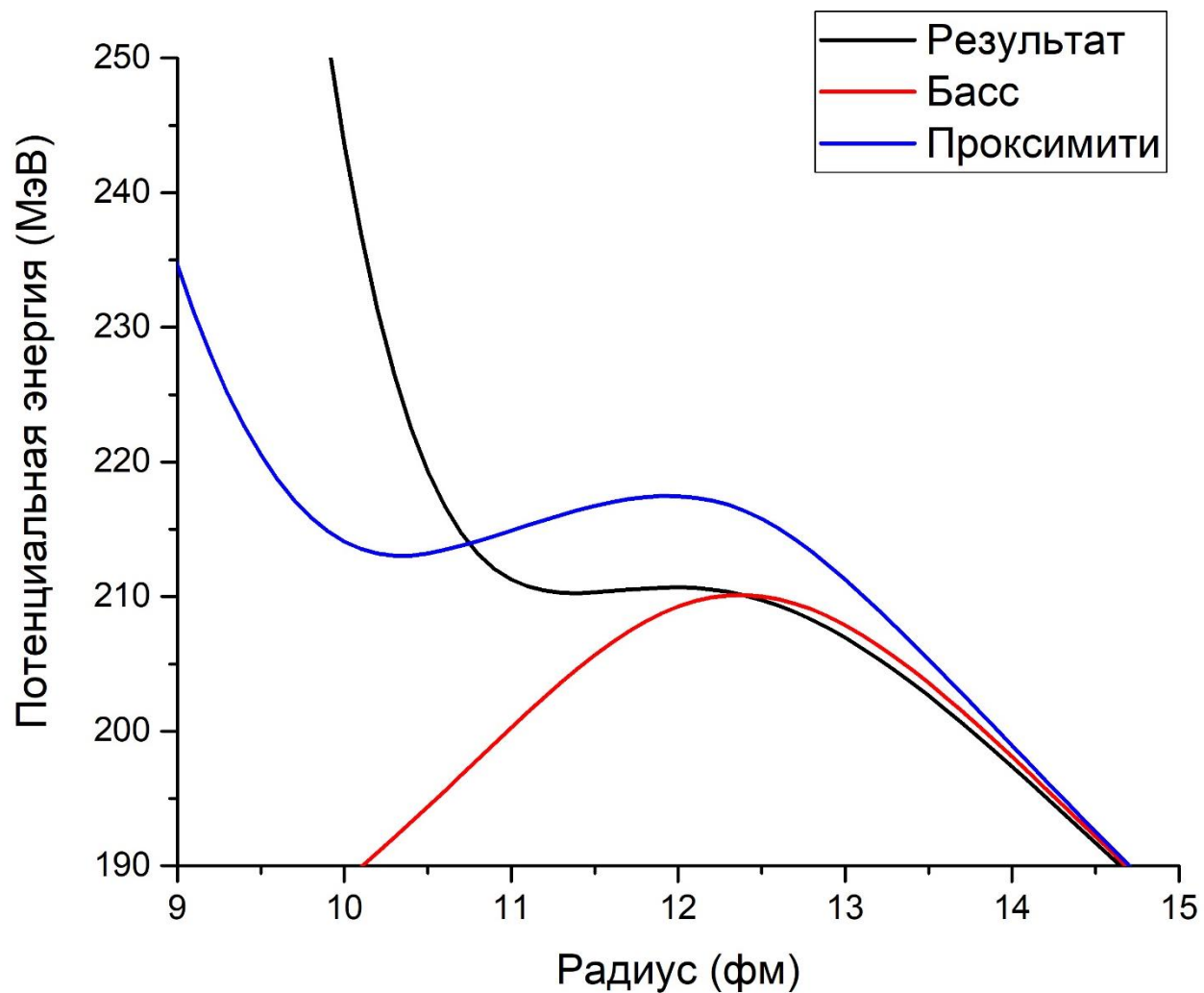
Система $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$



Система $^{90}\text{Zr}+^{208}\text{Pb}$

Потенциал Басса : R. Bass. Nucl. Reactions with Heavy Ions. Springer,

Результат расчета потенциала для Хе-136+Kr-86

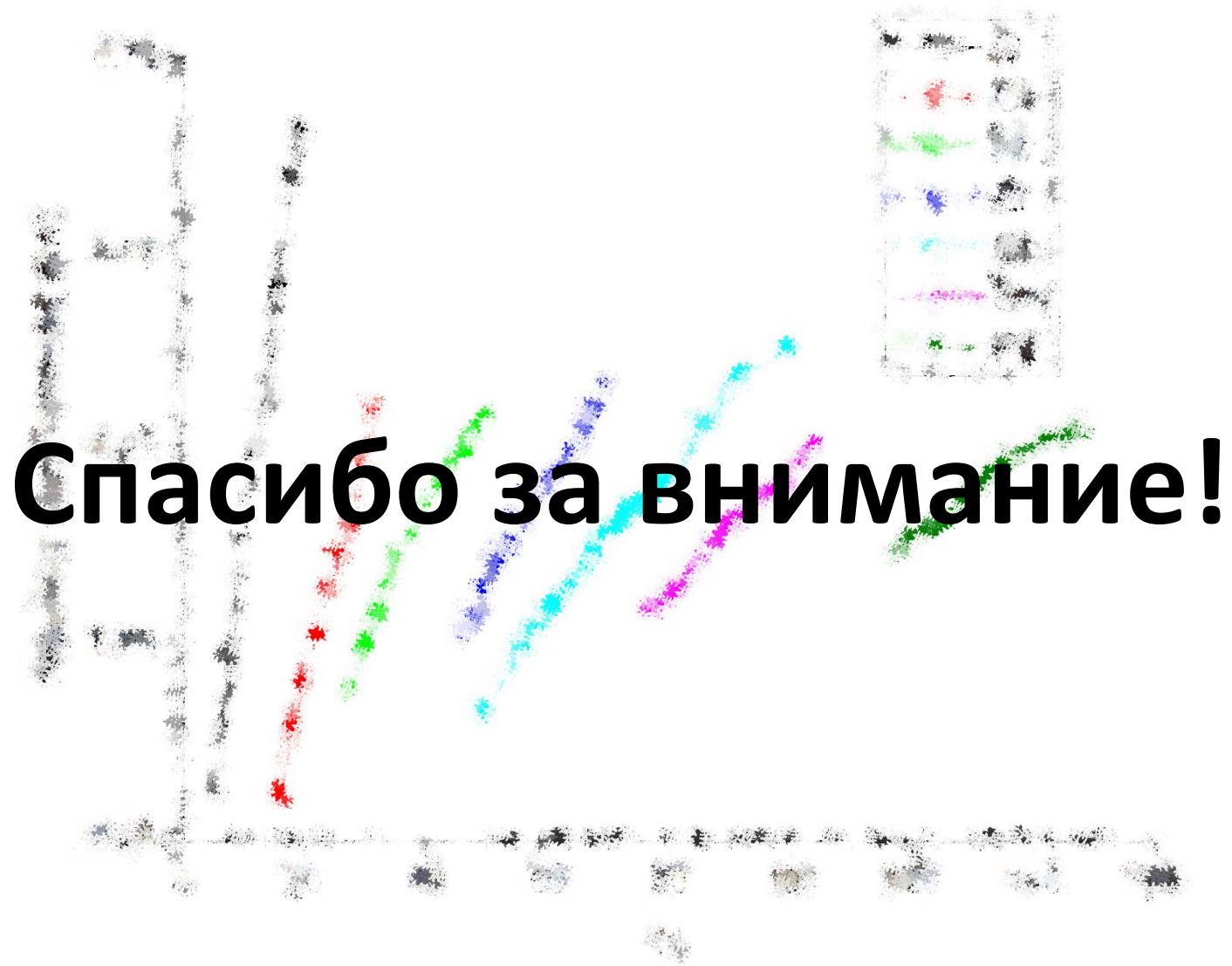


Потенциал Басса: R. Bass. Nucl. Reactions with Heavy Ions. Springer, 1980.

Потенциал «проксимити»: Blocki J. et al. Ann. Phys. 1977. V. 105. P. 427.

Выводы

1. Изучены экспериментальные данные по параметрам нуклонных плотностей: R – радиус половинной плотности, a – диффузность.
2. Параметры нуклонных плотностей скорректированы на основе сравнения рассчитываемых барьеров слияния с барьером Басса.
3. Рассчитан потенциал взаимодействия в системе $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$, $^{124}\text{Sn} + ^{90}\text{Zr}$, $^{136}\text{Xe} + ^{36}\text{Kr}$. Показана особая чувствительность потенциала к диффузностям нуклонных распределений.



Спасибо за внимание!

Потенциалы Мигдала и Басса

Effective nucleon-nucleon Migdal potential:

$$v_{NN}(\mathbf{r}_{12}) = C \left[F_{\text{ex}} + (F_{\text{in}} - F_{\text{ex}}) \frac{\rho_1(\mathbf{r}_1) + \rho_2(\mathbf{r}_2)}{\rho_2(0) + \rho_2(0)} \right] \delta(\mathbf{r}_{12}), \quad F_{\text{ex(in)}} = f_{\text{ex(in)}} \pm f'_{\text{ex(in)}}$$

$C, \text{MeV}\cdot\text{fm}^{-3}$	f_{in}	f_{ex}	f'_{in}	f'_{ex}
300	0.09	-2.59	0.42	0.54

A. B. Migdal. The Theory of Finite Fermi-Systems and Properties of Atomic Nuclei, 2-nd ed. (Nauka, Moscow, 1983) [in Russian].

Bass potential:

$$V_{\text{Bass}}(R) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} g(\xi)$$

$$g(\xi) = \left[A \exp\left(\frac{\xi}{d_1}\right) + B \exp\left(\frac{\xi}{d_2}\right) \right]^{-1}$$

$$\xi = R - (R_1 + R_2)$$

$A, \text{MeV}^{-1}\cdot\text{fm}$	$B, \text{MeV}^{-1}\cdot\text{fm}$	d_1, fm	d_2, fm
0.03	0.0061	3.3	0.65

R. Bass. Nuclear Reactions with Heavy Ions. Berlin: Springer, 1980.

Потенциал «проксимити»

$$V_{prox}(r) = 4\pi b P_{sph}^{-1}(R_1, R_2) F\left(\frac{\xi}{b}\right), \quad (13)$$

где $b = 1$ фм – параметр толщины поверхностного слоя, $P_{sph} = 1/\bar{R}_1 + 1/\bar{R}_2$ – фактор, учитывающий кривизну поверхностей ядер и $\bar{R}_i = R_i(1 + (b/R_i)^2)$. $F(x)$ – универсальная функция «проксимити». Под радиусами R_i понимаются материальные радиусы половинной плотности ядер R_{i_0} , как в формуле (11).

Параметры аппроксимаций

1. Радиальные характеристики:

- This work: charge rms. radius (exp)
- Rms. and half-density radius
- Rms. neutron radius
- Neutron skin thickness from antiprotons-nuclei scattering data (exp)
J. Jastrzebski et al. IJMP E, vol. 13. (2004)
- Proton rms. radius correction

$$R_{ch_{rms}} = 0.956 \left(1 - 0.153 \frac{N - Z}{A} + 2.326 \frac{1}{A} \right) A^{1/3}$$

$$R_i = R_{i_{rms}} \sqrt{\frac{5}{3} - \frac{7}{3} \left[\frac{\pi a_i}{R_{i_{rms}}} \right]^2}$$

$$R_{n_{rms}} = R_{p_{rms}} + \Delta R_{np}$$

$$\Delta R_{np} = (0.90 \pm 0.15) \frac{N - Z}{A} - (0.03 \pm 0.02)$$

$$R_{p_{rms}} = \sqrt{R_{ch_{rms}}^2 - r_{proton}^2 - \frac{N}{Z} r_{neutron}^2}$$

2. Диффузность:

- This work:

$$a_{ch} = 0.52 \text{ fm}$$

Переход от зарядовой плотности к протонной

$$\rho_{ch}(r) = \int \rho_p(\vec{r}') \rho_{chp}(\vec{r} - \vec{r}') d\vec{r}'$$

Обратный переход: $\rho_p \xrightarrow{?} \rho_{ch}$

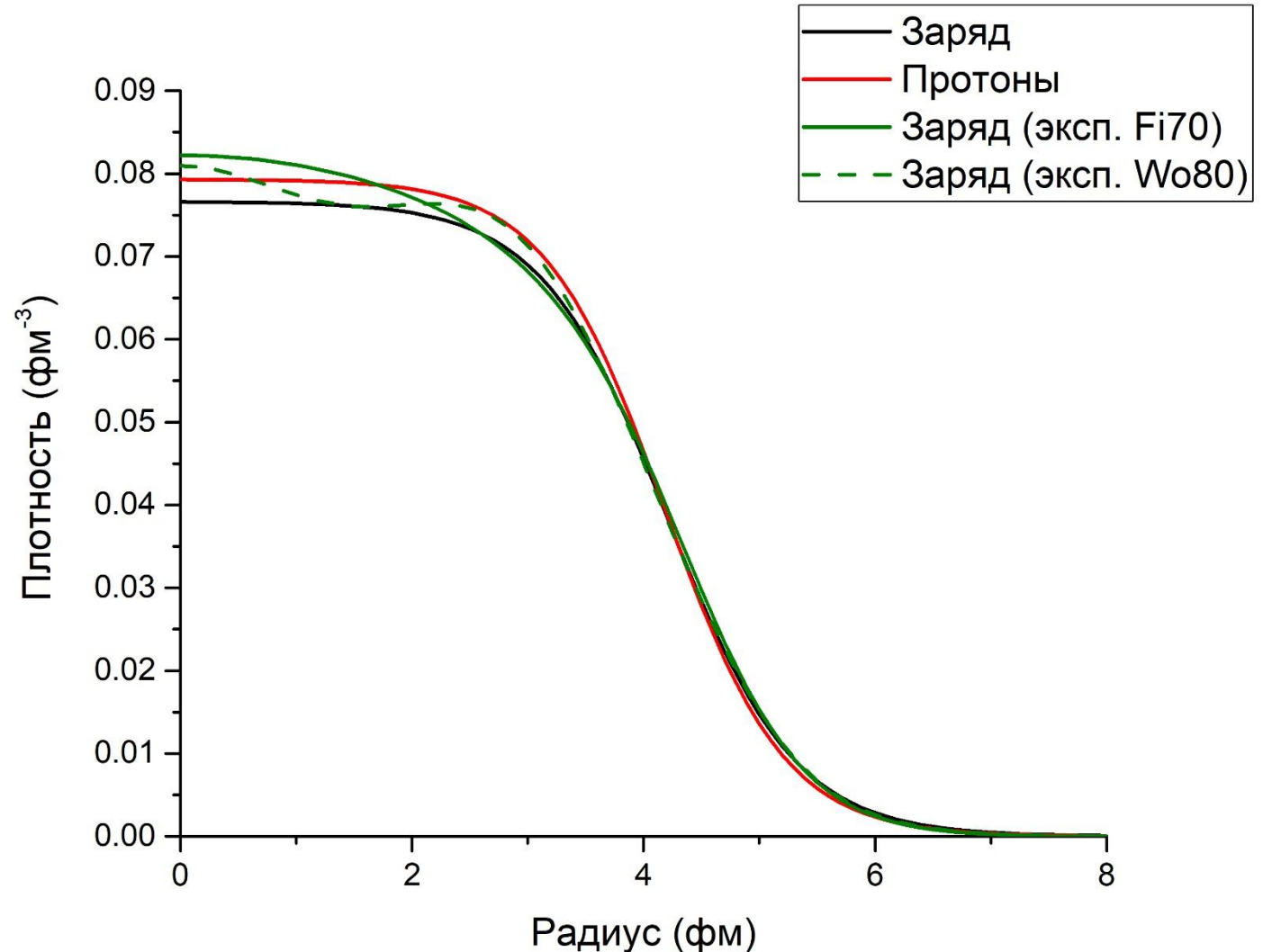
Эффективный способ:

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle_{ch}} = r_0 \left(1 - b \frac{N - Z}{A} + c \frac{1}{A} \right) A^{1/3}$$

$$\langle r^2 \rangle_p = \langle r^2 \rangle_{ch} - \langle r^2 \rangle_{ch_p} - \frac{N}{Z} \langle r^2 \rangle_{ch_n}$$

$$R_{0p} = \sqrt{\frac{5}{3} \langle r^2 \rangle_p - \frac{7}{3} (\pi a_p)^2}$$

$$a_p = a_{ch} - 0.03$$



Переход между радиусами

Коэффициенты аппроксимаций для расчета
среднеквадратичного радиуса R_{ch_rms} для изотопов $Z > 8$ и $A > 16$,
найденные на основе экспериментальных данных

	Формула	Параметры	Станд. откл. σ , фм
Z	$R = r_A A^{1/3}$	$r_A = 0.9524(7)$	0.095
	$R = r_f Z^f$	$r_f = 1.357(7), f = 0.3168(12)$	0.067
	$R = r_f A^f$	$r_f = 1.1446(56), f = 0.2957(10)$	0.059
	$R_{rms} = (a + \frac{b}{c^2 + Z^2}) A^{1/3}$	$a = 0.938(10), b = 36(3), c^2 = 223(5)$	0.059
	$R_s = \left(r_{0,s} + \frac{r_{1,s}}{A^{2/3}} + \frac{r_{2,s}}{A^{4/3}} \right) \cdot A^{1/3}$	$r_{0,s} = 0.9207(25), r_{1,s} = 0.613(9),$ $r_{2,s} = 3.59(67)$	0.051
D	$R_{\alpha,\alpha^2} = a + bA^{1/3} + c\alpha + dA^{1/3}\alpha^2$	$a = 0.484(10), b = 0.880(2),$ $c = -1.098(56), d = 0.338(42)$	0.041
NP	$R_{\alpha,A} = r_A \left(1 - b\alpha + c\frac{1}{A} \right) A^{1/3}$	$r_A = 0.9560(14) \text{ фм}, b = 0.1527(67), c = 2.326(63)$	0.041

Нейтронный избыток $\alpha = (N - Z)/A$:

Эксп. данные: I. Angeli et al. *At. Data Nucl. Data Tables* 99, 69 (2013).

Аппроксимация D: J. Duflo. *Nuclear Physics A* 576 (1994).

Аппроксимация NP: B. Nerlo-Pomorska et al. *Zeitschrift für Physik A* 348 (1994).

Параметры потенциала Мигдала

Z	A	rho0_p	rho0_n	rho_tot	a_p (+Pb-208)		R0_p		R0_n		R_p_rms		R_n_rms		R_ch_rms
					Old	New	Old	New	Old	New	Old	New			
8	16	0.1002	0.1061	0.2063	0.52	0.558	2.340	2.290	2.283	2.232	2.650	2.729	2.620	2.700	2.759
20	40	0.0869	0.0900	0.1769	0.52	0.590	3.568	3.502	3.521	3.454	3.373	3.488	3.343	3.459	3.459
20	48	0.0777	0.0955	0.1732	0.52	0.588	3.720	3.658	3.905	3.846	3.470	3.578	3.590	3.695	3.554
28	60	0.0793	0.0880	0.1674	0.52	0.607	4.181	4.108	4.227	4.154	3.772	3.900	3.802	3.929	3.849
40	90	0.0734	0.0867	0.1601	0.52	0.628	4.891	4.811	4.992	4.914	4.253	4.397	4.323	4.465	4.322
50	124	0.0672	0.0896	0.1568	0.52	0.639	5.463	5.382	5.667	5.589	4.652	4.799	4.797	4.939	4.716
62	144	0.0686	0.0851	0.1537	0.52	0.658	5.849	5.760	5.982	5.895	4.926	5.088	5.021	5.179	4.985
82	208	0.0632	0.0883	0.1515	0.52	0.673	6.635	6.547	6.856	6.770	5.491	5.654	5.651	5.809	5.544
36	86	0.0716	0.0902	0.1617	0.52	0.608	4.753	4.687	4.922	4.858	4.158	4.277	4.275	4.390	4.229
54	136	0.0660	0.0899	0.1559	0.52		5.650		5.868		4.784		4.940		4.846

Переход между радиусами

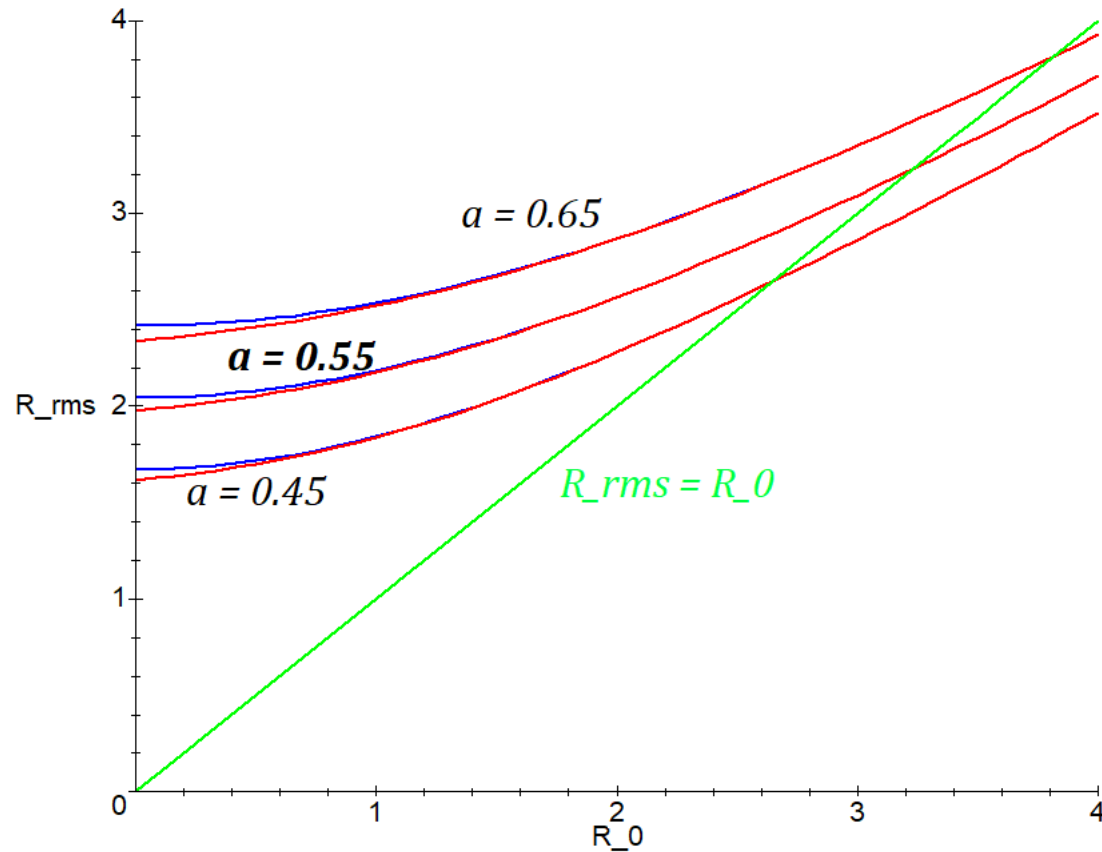


Рис. 3: График зависимости среднеквадратичного радиуса R_{rms} (в фм) от радиуса половинной плотности R_0 (в фм) при $a = 0.75, 0.65$ фм: **точное значение**, приближенное значение.