

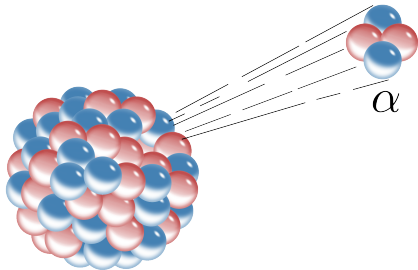


Joint Institute for Nuclear Research
Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics
Nuclear Theory and Astrophysical Applications

Cluster approach to spontaneous fission

И. С. Рогов

Дубна, 2024



Э. Резерфорд, 1899 год; Г. А. Гамов, 1930 год

предсказано Бором и Уиллером в 1939 году;
Г. Н. Флёрв и К. А. Петржак, 1940 год

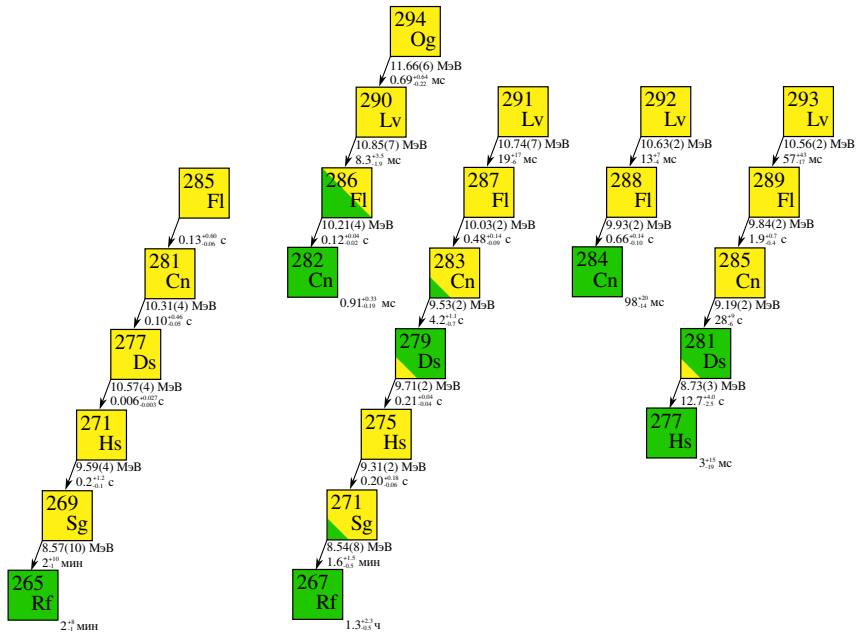
$^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{209}\text{Pb}$ Розе и Джонсон, Оксфордский университет
Группа института атомной энергии им. Курчатова, 1984 г.

Spontaneous Fission of Uranium

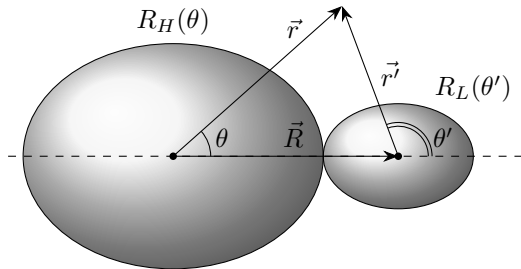
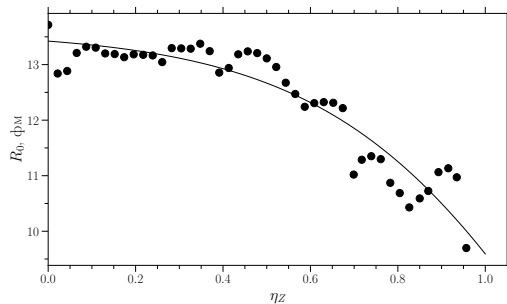
With 15 plates ionization chambers adjusted for detection of uranium fission products we observed 6 pulses per hour which we ascribe to spontaneous fission of uranium. A series of control experiments seem to exclude other possible explanations. Energy of pulses and absorption properties coincide with fission products of uranium bombarded by neutrons. No pulses were found with UX and Th. Mean lifetime of uranium follows ten to sixteen or seventeen years.

FLEROV
PETRJAK

Physico Technical Institute (F),
Radium Institute (P),
Leningrad, U. S. S. R.,
June 14, 1940 (by cable).



Двойная ядерная система (ДЯС)



Зарядовая асимметрия:

$$\eta Z = \frac{Z_H - Z_L}{Z_H + Z_L}, \quad Z_{H,L} - \text{зарядовые числа}$$

Формирование ДЯС

- Движение по координате η_Z
- Спектроскопический фактор (вероятность формирования) S_L

Распад ДЯС

- Движение по координате R
- Вероятность туннелирования P_L

Система описывается стационарной волновой функцией $\Psi(\eta_Z)$:

$$\hat{H}\Psi_n(\eta_Z) = E_n\Psi_n(\eta_Z),$$

где

$$\hat{H} = \hat{T}_{\eta_Z} + U(\eta_Z)$$

Кинетическая энергия

$$\hat{T}_{\eta_Z} = \frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial \eta_Z} B_{\eta_Z}^{-1} \frac{\partial}{\partial \eta_Z}$$

Потенциальная энергия

[G. Adamian et al. Int. J. Mod. Phys. A, 1996]

$$U(R, \eta_Z, \Omega) = V(R, \eta_Z, \Omega) - (B - B_L - B_H)$$

$$V(R, \eta_Z, \Omega) = V_C(R, \eta_Z) + V_N(R, \eta_Z) + V_r(R, \eta_Z, \Omega)$$

Кулоновский потенциал

[C.Y. Wong, Phys. Rev. Lett., 1973]

$$V_C = \frac{e^2 Z_L Z_H}{R} \left(1 + \frac{3}{5R^2} \sum_{i=L,H} R_i^2 \beta_{2i} Y_{20}(\theta_i) + \frac{12}{35R^2} \sum_{i=L,H} (R_i \beta_{2i} Y_{20}(\theta_i))^2 \right)$$

Форма ядра

$$R_i(\theta) = r_{0i} A_i^{1/3} (1 + \beta_{2i} Y_{20}(\theta))$$

Центробежный потенциал

[Dudek J. 1992, T. M. Shneidman 2000]

$$V_r = \hbar^2 \Omega(\Omega + 1) / (2\mathfrak{S}), \quad \mathfrak{S} = 0.85(j_L + j_H + \mu R^2)$$

Ядерное взаимодействие

[Мигдал А.Б. Теория конечных фермисистем и свойства атомных ядер, 1983]

$$V_N = \int \rho_H(\mathbf{r}_H) \rho_L(\mathbf{R} - \mathbf{r}_L) F(\mathbf{r}_H - \mathbf{r}_L) d\mathbf{r}_L d\mathbf{r}_H$$

$$F(\mathbf{r}_H - \mathbf{r}_L) = C_0 \left[F_{in} \frac{\rho(\mathbf{r}_H)}{\rho_0} + F_{ex} \left(1 - \frac{\rho(\mathbf{r}_H)}{\rho_0} \right) \right] \delta(\mathbf{r}_H - \mathbf{r}_L)$$

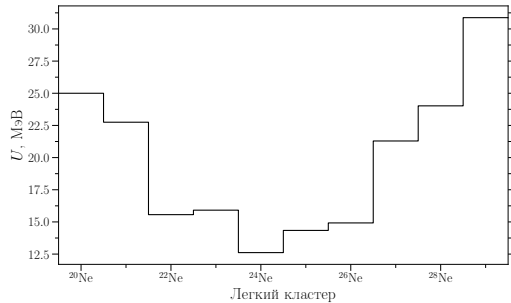
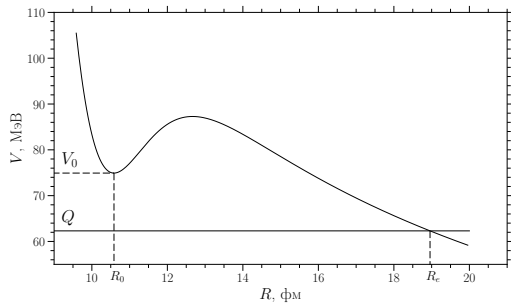
$$F_{in,ex} = \xi_{in,ex} + \xi'_{in,ex} \frac{A_L - 2Z_L}{A_L} \frac{A_H - 2Z_H}{A_H}$$

$$\rho(\mathbf{r}_H) = \rho_H(\mathbf{r}_H) + \rho_L(\mathbf{R} - \mathbf{r}_L)$$

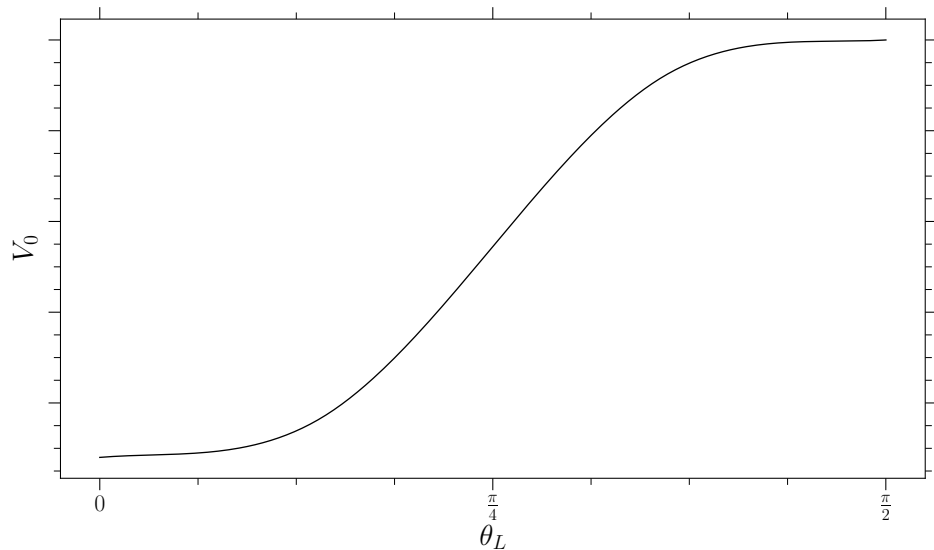
Константы $\xi_{in} = 0,09$, $\xi_{ex} = -2,59$, $\xi'_{in} = 0,42$, $\xi'_{ex} = 0,54$, $C_0 = 300 \text{ МэВ} \cdot \text{фм}^3$

$$\rho_i(\mathbf{r}) = \frac{\rho_0}{1 + \exp(|\mathbf{r} - \mathbf{R}_i|/a_{0i})}$$

Управляющий потенциал



$$a_0 = 0.47 - 0.56 \text{ фм}; \quad r_0 = 1.00 - 1.16 \text{ фм}$$

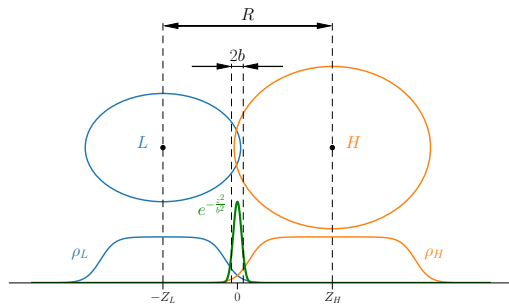


Массовый параметр:

[G. Adamian et al. Nucl. Phys. A. 1995]

$$B_{\eta z}^{-1} = \frac{1}{2m_0} \frac{A_{neck}}{2\sqrt{2\pi}b^2 A^2}$$

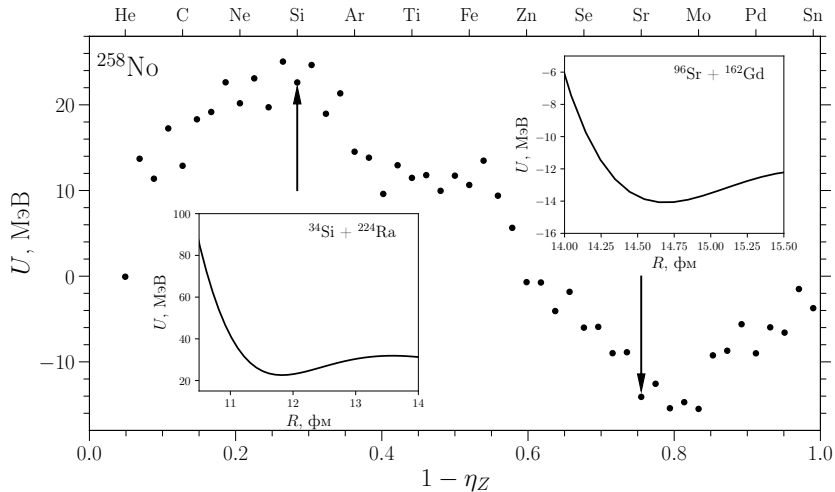
где b – параметр, характеризующий размер шейки ДЯС



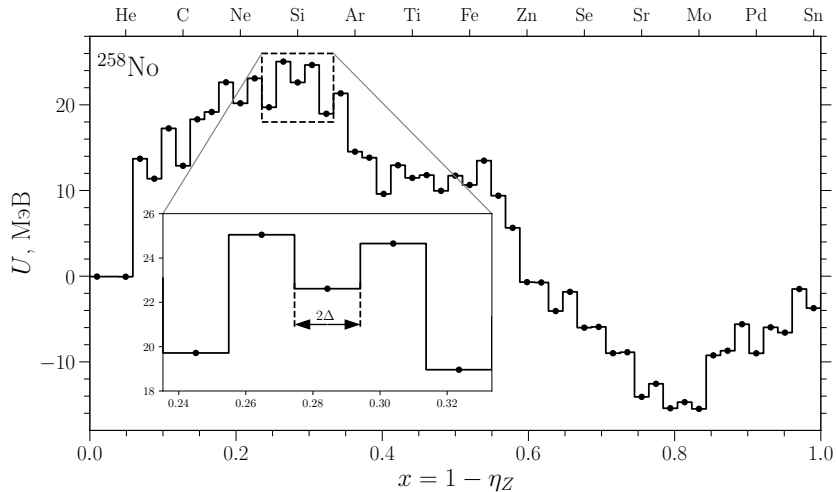
A_{neck} – число нуклонов шейки ДЯС:

$$A_{neck} = \int [\rho_L(\mathbf{r}) + \rho_H(\mathbf{R} - \mathbf{r})] \exp\left(-\frac{z^2}{b^2}\right) d\mathbf{r}$$

Построение управляющего потенциала

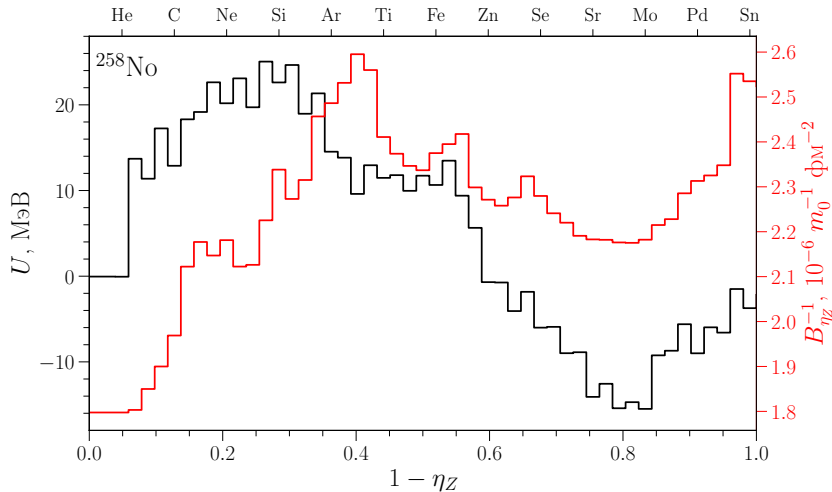


Построение управляющего потенциала



$$\eta_Z \rightarrow x = 1 - \eta_Z; \quad \Delta = 1/Z;$$

Построение управляющего потенциала



$$\eta_Z \rightarrow x = 1 - \eta_Z; \quad \Delta = 1/Z; \quad \Psi_n = \sum_i \psi_{ni}$$

$$\hat{H} \sum_i \psi_{ni}(x) = E_n \sum_i \psi_{ni}(x)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2} B_{\eta z j}^{-1} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi_j(x) + U_j \psi_j(x) = E_n \psi_j(x)$$

Решение уравнения Шредингера

$$\hat{H} \sum_i \psi_{ni}(x) = E_n \sum_i \psi_{ni}(x)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2} B_{\eta z j}^{-1} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi_j(x) + U_j \psi_j(x) = E_n \psi_j(x)$$

$$\psi_j(x) = a_j e^{ik_j x} + b_j e^{-ik_j x}; \quad k_j = \sqrt{\frac{2}{\hbar^2 B_{\eta z j}^{-1}} (E_n - U_j)}$$

Решение уравнения Шредингера

$$\hat{H} \sum_i \psi_{ni}(x) = E_n \sum_i \psi_{ni}(x)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2} B_{\eta z j}^{-1} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi_j(x) + U_j \psi_j(x) = E_n \psi_j(x)$$

$$\psi_j(x) = a_j e^{ik_j x} + b_j e^{-ik_j x}; \quad k_j = \sqrt{\frac{2}{\hbar^2 B_{\eta z j}^{-1}} (E_n - U_j)}$$

Условия сшивки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_j(x_j) = \psi_{j+1}(x_j) \\ \frac{\partial \psi_j(x_j)}{\partial x} = \frac{\partial \psi_{j+1}(x_j)}{\partial x} \end{array} \right\}_{j=0 \dots (N-1)}$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial \psi_0(0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \psi_N(1)}{\partial x} = 0$$

$$\begin{aligned} & a_0 k_0 - b_0 k_0 = 0 \\ & \left\{ \begin{array}{l} a_j e^{ik_j x_j} + b_j e^{-ik_j x_j} - a_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} - b_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j} = 0 \\ a_j k_j e^{ik_j x_j} - b_j k_j e^{-ik_j x_j} - a_{j+1} k_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} + b_{j+1} k_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j} = 0 \end{array} \right\}_{j=0..(N-1)} \\ & a_N k_N e^{ik_N} - b_N k_N e^{-ik_N} = 0 \end{aligned}$$

$$D_e = \begin{bmatrix} k_0 & -k_0 & 0 & \dots & 0 \\ e^{ik_0 4\Delta} & e^{-ik_0 4\Delta} & -e^{ik_1 4\Delta} & \dots & 0 \\ k_0 e^{ik_0 4\Delta} & -k_0 e^{-ik_0 4\Delta} & -k_1 e^{ik_1 4\Delta} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & e^{ik_1 5\Delta} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & k_1 e^{ik_1 5\Delta} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_N b_N e^{-ik_N} \end{bmatrix}$$

$$C = [a_0 \ b_0 \ a_1 \ b_1 \ \dots \ a_N \ b_N]^T, \quad \Delta = 1/Z$$

$$D_e \cdot C = 0$$

$$k_0 = \sqrt{\frac{2}{\hbar^2 B_{\eta z 0}^{-1}} (E_n - U_0)}$$

$$\det [D_e(U_0, E_0 = 0)] = 0 \Rightarrow U_0$$

$$D_e(U_0) \cdot C = 0 \Rightarrow \{a_j\}, \{b_j\}$$

Волновая функция должна быть нормализована:

$$\int_0^1 |\Psi(\eta_z)|^2 d\eta_z = 1$$

$$\begin{aligned}a_j e^{ik_j x_j} + b_j e^{-ik_j x_j} &= a_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} + b_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j} \\ a_j k_j e^{ik_j x_j} - b_j k_j e^{-ik_j x_j} &= a_{j+1} k_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} - b_{j+1} k_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j}\end{aligned}$$

$$a_j e^{ik_j x_j} + b_j e^{-ik_j x_j} = a_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} + b_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j}$$

$$a_j k_j e^{ik_j x_j} - b_j k_j e^{-ik_j x_j} = a_{j+1} k_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} - b_{j+1} k_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j}$$

$$\begin{pmatrix} e^{ik_j x_j} & e^{-ik_j x_j} \\ k_j e^{ik_j x_j} & -k_j e^{-ik_j x_j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_j \\ b_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{ik_{j+1} x_j} & e^{-ik_{j+1} x_j} \\ k_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} & -k_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{j+1} \\ b_{j+1} \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix} \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ L_j & & L_{j+1} & & C_{j+1} \end{matrix}$$

$$a_j e^{ik_j x_j} + b_j e^{-ik_j x_j} = a_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} + b_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j}$$

$$a_j k_j e^{ik_j x_j} - b_j k_j e^{-ik_j x_j} = a_{j+1} k_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} - b_{j+1} k_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j}$$

$$\begin{pmatrix} e^{ik_j x_j} & e^{-ik_j x_j} \\ k_j e^{ik_j x_j} & -k_j e^{-ik_j x_j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_j \\ b_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{ik_{j+1} x_j} & e^{-ik_{j+1} x_j} \\ k_{j+1} e^{ik_{j+1} x_j} & -k_{j+1} e^{-ik_{j+1} x_j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{j+1} \\ b_{j+1} \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix} \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ L_j & & C_j & & L_{j+1} & & C_{j+1} \end{matrix}$$

$$C_j = L_j^{-1} L_{j+1} C_{j+1}$$

$$T_j^{j+1} = L_j^{-1} L_{j+1} \Rightarrow C_j = T_j^{j+1} C_{j+1}$$

$$\left. \frac{\partial \Psi_n}{\partial x} \right|_{x=1} = 0 \Rightarrow a_n k_n e^{ik_n} - b_n k_n e^{-ik_n} = 0$$

$$b_n = a_n e^{2ik_n}$$

$$k_n (E = 0) = i \sqrt{\frac{2}{\hbar^2 B_n^{-1}} U_n}$$

$$b_n = \exp \left[-\sqrt{\frac{8U_n}{\hbar^2 B_n^{-1}}} \right] a_n \Rightarrow C_n = \gamma \left(\exp \left[-\sqrt{\frac{8U_n}{\hbar^2 B_n^{-1}}} \right] \right)$$

$$C_{n-1} = T_{n-1}^n C_n,$$

...

$$C_1 = T_1^2 C_2$$

$$C_0 = T_0^1(U_0) C_1$$

$$\left. \begin{array}{l} C_0 = T_0^1(U_0, E = 0) C_1 \\ \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \Rightarrow a_0 = b_0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} a_0 \\ a_0 \end{pmatrix} = T_0^1(U_0, E = 0) C_1$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} a_1(-k_0 - k_1)e^{-ik_0x_0}e^{ik_1x_1} + b_1(k_1 - k_0)e^{-ik_0x_0}e^{-ik_1x_1} \\ a_1(k_1 - k_0)e^{ik_0x_0}e^{ik_1x_1} + b_1(-k_0 - k_1)e^{ik_0x_0}e^{-ik_1x_1} \end{pmatrix}$$

Решая уравнение

$$\frac{(k_0 + k_1)e^{-2ik_0x_0} - k_0 + k_1}{k_0 + k_1 - (k_0 - k_1)e^{-2ik_0x_0}} = \frac{b_1}{a_1}e^{-2ik_1x_1}$$

относительно k_0 получим энергию U_0 моноядра

$$U_0 = -\frac{\hbar^2 (B_0^{-1})_{\eta z}}{2} k_0^2.$$

Коэффициенты a_j , b_j должны быть нормализованы:

$$\int_0^1 |\Psi(\eta_Z)|^2 d\eta_Z = 1 \rightarrow \gamma$$

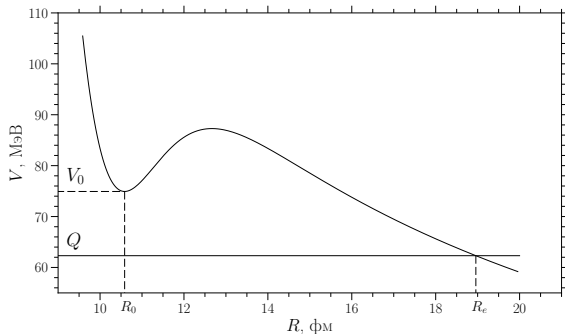
Спектроскопический фактор:

$$S_L = \int_{\eta_Z(Z_L)-\Delta}^{\eta_Z(Z_L)+\Delta} |\Psi(\eta_Z)|^2 d\eta_Z$$
$$\Delta = 1/Z$$

$$S_L = \int_{\eta_Z(Z_L) - \Delta}^{\eta_Z(Z_L) + \Delta} |\Psi(\eta_Z)|^2 d\eta_Z$$

$$\Gamma_L = \frac{\hbar\omega_0}{\pi} S_L P_L, \quad T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma_L}$$

$$T_{1/2} = \frac{\pi \ln 2}{\omega_0 S_L P_L}$$



$$P_L = \left(1 + \exp \left[\frac{2}{\hbar} \int_{R_0}^{R_e} \sqrt{2\mu(V(R, \eta_Z) - Q)} dR \right] \right)^{-1}$$

Спектроскопический фактор спонтанного деления

Ширина распада по каналу спонтанного деления определяется как сумма ширин для каждой из конфигурации Γ_L из области спонтанного деления:

$$\Gamma_{SF} = \sum_L \Gamma_L = \frac{\hbar\omega_0}{\pi} \sum_L S_L P_L$$

Принимая допущение, что проницаемости $P_L = 1$:

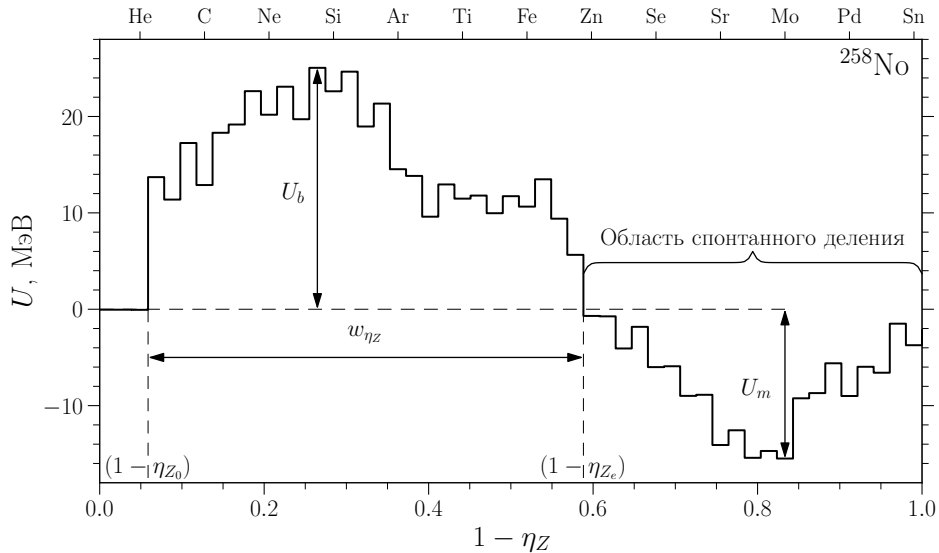
$$\Gamma_{SF} = \frac{\hbar\omega_0}{\pi} \sum_L S_L = \frac{\hbar\omega_0}{\pi} S_{SF},$$

Спектроскопический фактор S_{SF} для спонтанного деления:

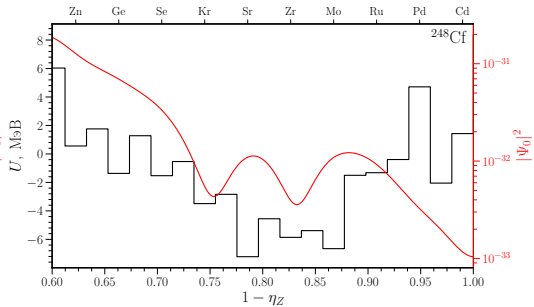
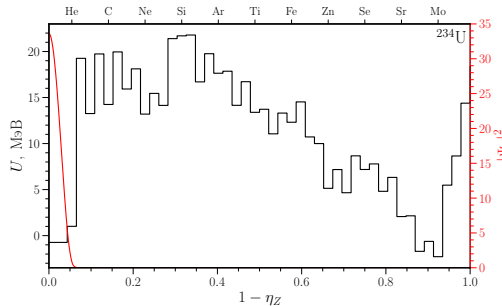
$$S_{SF} = \sum_L S_L,$$

где S_L – спектроскопические факторы для каждой ДЯС, находящихся в области, отвечающей спонтанному делению.

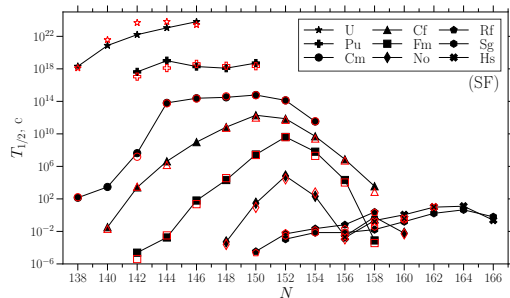
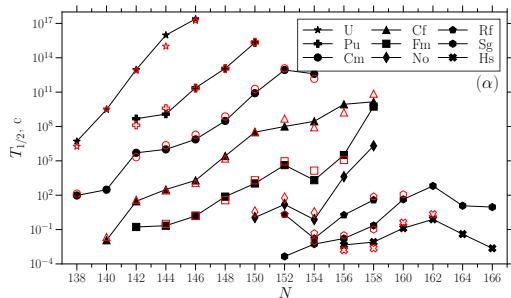
Характеристики управляющего потенциала



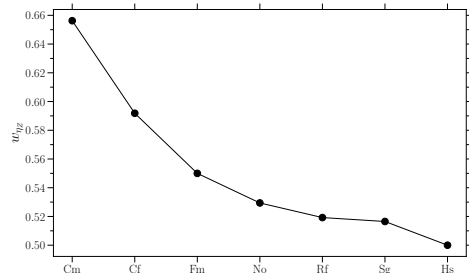
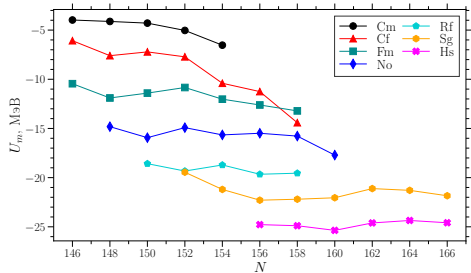
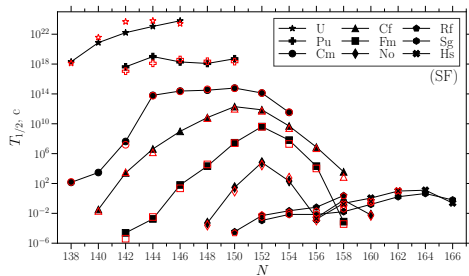
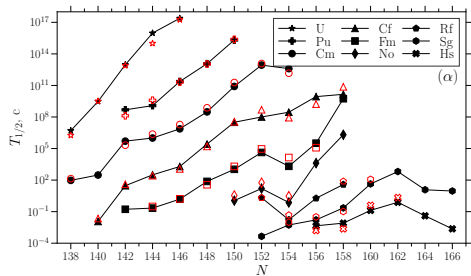
Волновая функция

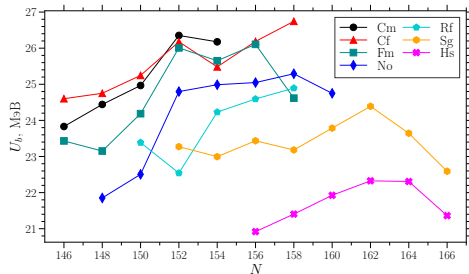
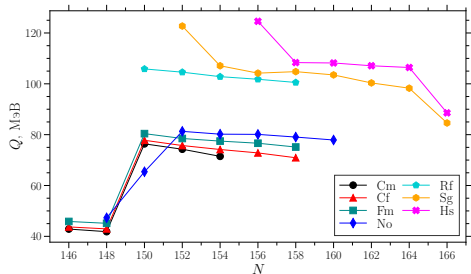
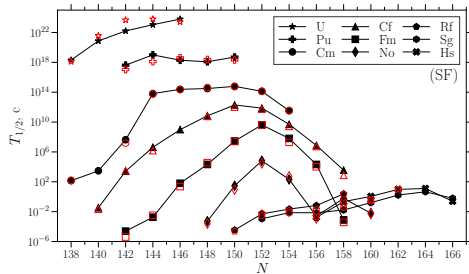
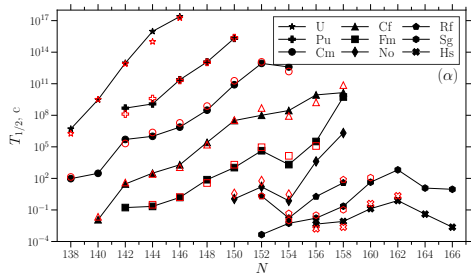


Периоды полураспада четно-четных ядер

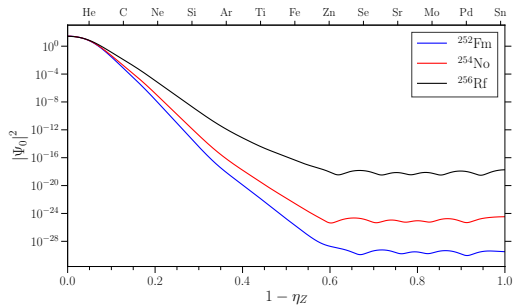
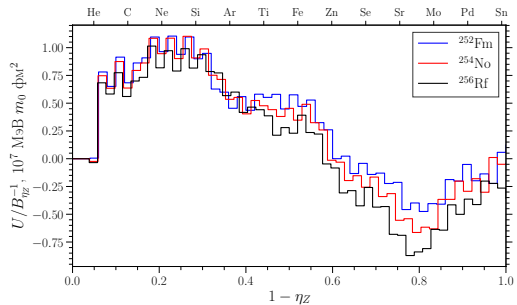
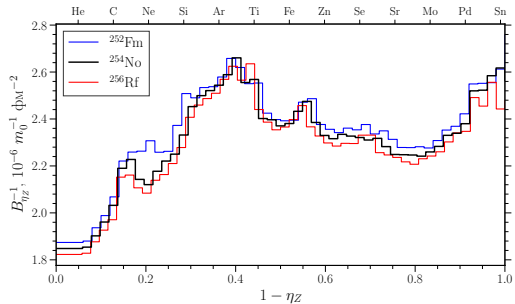
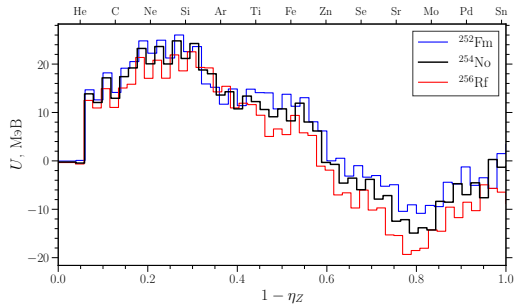


	$^{232}\text{U} \rightarrow ^{24}\text{Ne}$	$^{234}\text{U} \rightarrow ^{26}\text{Ne}$	$^{234}\text{U} \rightarrow ^{28}\text{Mg}$	$^{236}\text{U} \rightarrow ^{30}\text{Mg}$
$T_{1/2}^{theor}$ (c)	4.07×10^{21}	1.29×10^{25}	4.33×10^{25}	1.85×10^{26}
$T_{1/2}^{exp}$ (c)	1.89×10^{21}	1.20×10^{25}	3.47×10^{25}	1.89×10^{26}
	$^{236}\text{Pu} \rightarrow ^{28}\text{Mg}$	$^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{30}\text{Mg}$	$^{242}\text{Cm} \rightarrow ^{34}\text{Si}$	$^{248}\text{Cf} \rightarrow ^{40}\text{S}$
$T_{1/2}^{theor}$ (c)	2.06×10^{21}	2.79×10^{25}	4.64×10^{23}	9.86×10^{25}
$T_{1/2}^{exp}$ (c)	4.67×10^{21}	5.01×10^{25}	1.41×10^{23}	





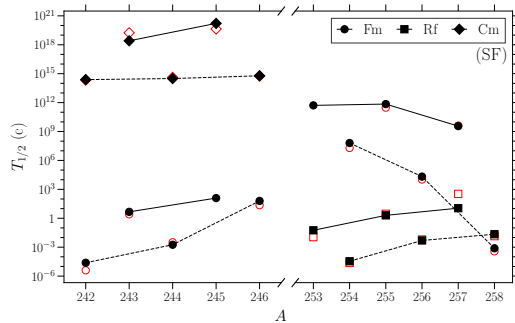
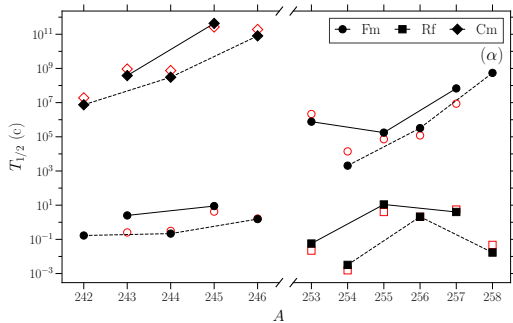
$$Q = (B - B_L - B_H), \text{ для } \eta_Z \text{ при } U_b$$



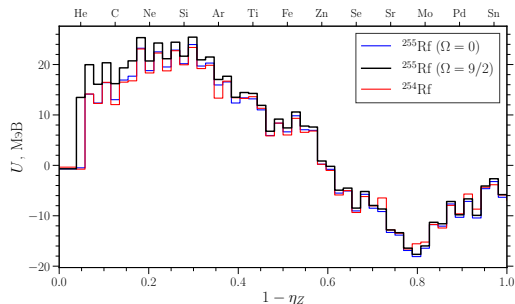
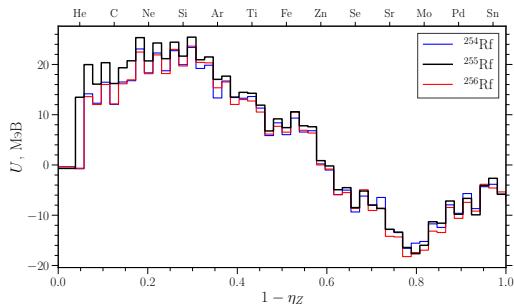
Периоды полураспада четно-нечетных ядер

Ядро	Ω	$T_{1/2}(\alpha)$ (с)	$T_{1/2}^{\text{exp}}(\alpha)$ (с)	$T_{1/2}(\text{SF})$ (с)	$T_{1/2}^{\text{exp}}(\text{SF})$ (с)
^{235}U	7/2	6.49×10^{16}	2.23×10^{16}	1.65×10^{26}	3.19×10^{26}
^{239}Pu	5/2	2.73×10^{11}	7.61×10^{11}	5.39×10^{23}	2.54×10^{23}
^{241}Pu	5/2	2.60×10^{13}	4.52×10^{13}	3.04×10^{24}	1.89×10^{24}
^{265}Rf	1/2	8.91×10^4	—	96.8	60
^{267}Rf	3/2	2.79×10^5	—	7.12×10^2	2.9×10^3
^{271}Sg	1/2	1.4×10^2	2.88×10^2	4.24×10^2	2.88×10^2
^{275}Hs	1/2	1.35×10^{-1}	1.5×10^{-1}	1.22	> 4
^{277}Hs	3/2	98.7	—	1.57×10^{-3}	3×10^{-3}
^{279}Ds	1/2	2.96	1.8	1.1×10^{-1}	2×10^{-1}
^{281}Ds	3/2	3.97×10^2	73.8	5.62	9.6
^{283}Cn	1/2	9.07	4.44	19	40

Фактор запрета спонтанного деления



Влияние управляющего потенциала



	Ω	S_{α}	S_{α}^*	$T_{1/2}, \text{ s}$	$T_{1/2}^*, \text{ s}$	$T_{1/2}^{\text{test}}, \text{ s}$
^{243}Cm	5/2	0.0526	0.0707	2.57×10^{18}	1.02×10^{14}	2.75×10^{14}
^{245}Cm	7/2	0.0428	0.0947	1.65×10^{20}	7.34×10^{14}	4.35×10^{14}
^{243}Fm	7/2	0.0712	0.0904	3.51	3.14×10^{-4}	2.08×10^{-4}
^{255}Fm	7/2	0.0527	0.0816	3.01×10^{11}	1.62×10^6	1.16×10^6
^{257}Fm	9/2	0.0481	0.0888	4.13×10^9	1.19	4.02
^{255}Rf	9/2	0.0691	0.0930	2.00	2.95×10^{-3}	4.14×10^{-4}
^{257}Rf	1/2	0.0893	0.0918	1.11×10^1	3.99×10^{-2}	1.05×10^{-2}

Приближенный расчет периодов полураспада

$$T_{1/2} = F \cdot T_{1/2}(\Omega = 0), \quad F = \exp \left[\frac{c_0 \cdot \Omega(\Omega+1)}{\sqrt{B_{\eta Z \alpha}^{-1}}} \right], \quad c = 0.086 \text{ МэВ}^{-1/2} \text{ с}^{-1}$$

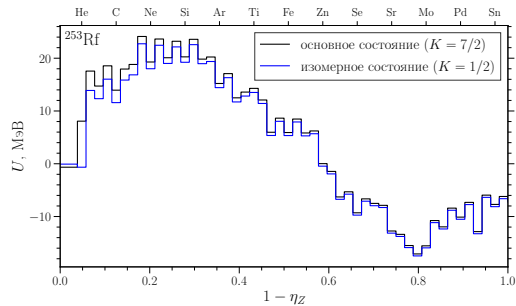
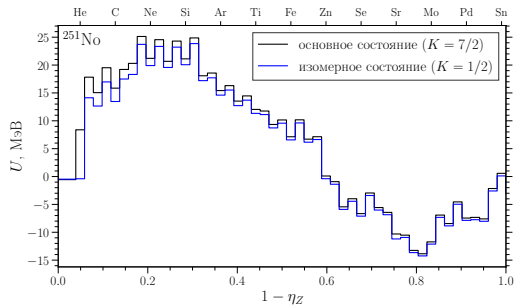
Ядро	Ω	$T_{1/2}(\Omega = 0)$ (с)	F	$T_{1/2}^{\text{fit}}$ (с)	$T_{1/2}^{\text{exp}}$ (с)
^{243}Cm	5/2	1.02×10^{14}	3.47×10^3	3.54×10^{17}	2.57×10^{18}
^{243}Fm	7/2	3.14×10^{-4}	1.20×10^4	3.77	4.64
^{245}Cm	7/2	7.34×10^{14}	2.63×10^6	1.93×10^{21}	1.65×10^{20}
^{253}Rf	1/2	2.21×10^{-5}	1.54	3.40×10^{-5}	5.64×10^{-2}
^{255}Fm	7/2	1.62×10^6	7.72×10^5	1.25×10^{12}	7.04×10^{11}
^{255}Rf	9/2	2.95×10^{-3}	3.17×10^4	9.38×10^1	2.00
^{257}Fm	9/2	1.19	3.33×10^8	3.96×10^8	3.64×10^9
^{257}Rf	1/2	2.02×10^{-2}	1.59	3.21×10^{-2}	1.15×10^1

Периоды полураспада K -изомерных состояний тяжелых и сверхтяжелых ядер

Ядро	K^π	E_0 (МэВ)	S_α	$T_{1/2}^\alpha$ (th.) (с)	$T_{1/2}^\alpha$ (exp.) (с)	$T_{1/2}^{\text{sf}}$ (th.) (с)	$T_{1/2}^{\text{sf}}$ (exp.) (с)
^{243}Cm	$\frac{5}{2}^+$	0	5.26×10^{-2}	3.81×10^8	9.21×10^8	2.57×10^{18}	1.73×10^{19}
^{243}Cm	$\frac{1}{2}^+$	0.087	7.42×10^{-2}	1.30×10^6		2.27×10^{12}	
^{249}No	$\left(\frac{7}{2}^+\right)$	0	8.50×10^{-2}	1.94×10^{-3}		5.42×10^2	> 19
^{249}No	$\left(\frac{1}{2}^-\right)$	0.100	8.60×10^{-2}	9.84×10^{-4}		45.1	
^{251}No	$\left(\frac{7}{2}^+\right)$	0	7.14×10^{-2}	7.59		3.46×10^2	
^{251}No	$\left(\frac{1}{2}^+\right)$	0.106	8.81×10^{-2}	1.31×10^{-1}		6.60	1.7
^{253}Rf	$\left(\frac{7}{2}^+\right)$	0	7.77×10^{-2}	5.70×10^{-2}	2.20×10^{-2}	5.64×10^{-2}	1.46×10^{-2}
^{253}Rf	$\left(\frac{1}{2}^+\right)$	0.200	4.31×10^{-2}	4.34×10^{-3}	6.00×10^{-3}	8.32×10^{-5}	4.4×10^{-5}
^{255}Rf	$\left(\frac{7}{2}^+\right)$	0	6.91×10^{-2}	11	4	2	2.9
^{255}Rf	$\left(\frac{1}{2}^+\right)$	0.100	4.07×10^{-2}	2.94×10^{-2}		2.44×10^{-2}	$> 3 \times 10^{-5}$

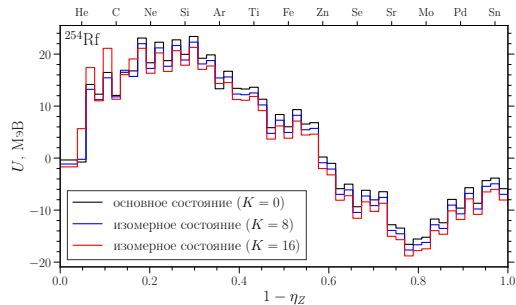
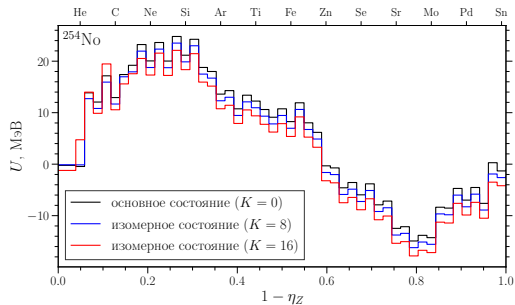
Ядро	K^π	E_0 (МэВ)	S_α	$T_{1/2}^\alpha$ (th.) (с)	$T_{1/2}^\alpha$ (exp.) (с)	$T_{1/2}^{\text{sf}}$ (th.) (с)	$T_{1/2}^{\text{sf}}$ (exp.) (с)
^{257}Rf	$\left(\frac{1}{2}^+\right)$	0	8.93×10^{-2}	4.00	5.55	11.1	338
^{257}Rf	$\left(\frac{7}{2}^+\right)$	0.073	1.59×10^{-2}	21.90		1.07×10^3	> 490
^{261}Rf	$\left(\frac{3}{2}^+\right)$	0	9.17×10^{-2}	9.84×10^{-2}		3.22×10^{-2}	
^{261}Rf	$\left(\frac{11}{2}^+\right)$	0.070	8.91×10^{-2}	3.44		6.10	3.17
^{259}Sg	$\left(\frac{1}{2}^+\right)$	0	9.26×10^{-2}	2.25×10^{-4}		8.45×10^{-3}	$> 1.4 \times 10^{-3}$
^{259}Sg	$\left(\frac{9}{2}^+\right)$	0.100	6.83×10^{-2}	2.28×10^{-1}		9.72	8
^{265}Sg	$\left(\frac{9}{2}^+\right)$	0	8.71×10^{-2}	1.39		7.72×10^2	≥ 17
^{265}Sg	$\left(\frac{3}{2}^+\right)$	0.070	8.33×10^{-2}	4.85		42	≥ 28

Управляющие потенциалы



Ядро	K^π	E_0 (МэВ)	S_α	$T_{1/2}^\alpha$ (th.) (с)	$T_{1/2}^\alpha$ (exp.) (с)	$T_{1/2}^{\text{sf}}$ (th.) (с)	$T_{1/2}^{\text{sf}}$ (exp.) (с)
^{250}Fm	0^+	0	5.99×10^{-2}	1.06×10^3	2.00×10^3	2.86×10^7	2.52×10^7
^{250}Fm	(8^-)	1.199	3.89×10^{-2}	3.39×10^5		2.63×10^4	
^{256}Fm	0^+	0	6.56×10^{-2}	3.23×10^5	1.20×10^5	2.10×10^4	1.04×10^4
^{256}Fm	7^-	1.425	3.95×10^{-3}	6.23×10^6		3.6×10^{-1}	
^{250}No	0^+	0	7.60×10^{-2}	1.85×10^{-3}	$> 2.1 \times 10^{-4}$	7.02×10^{-5}	4.7×10^{-6}
^{250}No	(6^+)	1.050	6.14×10^{-3}	1.20×10^1		2.20×10^{-5}	$4.50_{-1.5}^{+2.2} \times 10^{-5}$
^{252}No	0^+	0	7.07×10^{-2}	15.8	56.7	29.4	9
^{252}No	(8^-)	1.255	5.30×10^{-2}	2.18×10^3		2.05×10^{-1}	
^{254}No	0^+	0	6.50×10^{-2}	7.39×10^{-1}	2.93	6.55×10^4	2.88×10^4
^{254}No	(8^-)	1.297	3.10×10^{-3}	7.84×10^3	2.80×10^3	1.41×10^3	1.40×10^3
^{254}No	(16^+)	2.917	1.99×10^{-2}	1.47×10^6		8.36×10^3	≥ 1.65
^{254}Rf	0^+	0	8.07×10^{-2}	3.22×10^{-2}	$> 1.55 \times 10^{-3}$	3.45×10^{-5}	2.30×10^{-5}
^{254}Rf	(8^-)	1.100	5.77×10^{-2}	2.19×10^2		1.14×10^{-4}	$> 4.70 \times 10^{-5}$
^{254}Rf	(16^+)	2.250	2.63×10^{-2}	5.38×10^4		1.36×10^{-1}	$> 6.02 \times 10^{-4}$
^{256}Rf	0^+	0	7.76×10^{-2}	2.11	2.08	4.98×10^{-3}	6.20×10^{-3}
^{256}Rf	(8^-)	1.400	6.01×10^{-2}	1.27×10^2		5.37×10^{-4}	$1.4_{-0.4}^{+0.6} \times 10^{-5}$

Управляющие потенциалы



Спасибо за внимание!