

# Кластерные степени свободы в двойном и тройном делении

Ф.О. Отахонов,

Научный руководитель: проф. д.ф.-м.н. Ю.В. Пятков,

Научный консультант: ст.н.с. ЛТФ ОИЯИ, к.ф.-м.н. Ш.А. Каландаров

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

2026

- 1 Введение и актуальность
- 2 Теоретическая модель: TNS и DNS
- 3 Влияние кулоновского поля фольги
- 4 Дополнительное возбуждение от коллективных колебаний
- 5 Выводы и Заключение
- 6 Апробация результатов

- Эксперименты на установке VEGA (ОИЯИ) обнаружили, что при прохождении осколков деления  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{235,238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  через тонкие фольги (C, Al, Ti, Cu) у  $\sim 10^{-3}$  осколков наблюдается вторичный распад в том числе с вылетом легких заряженных частиц (ЛЗЧ).
- Временные задержки между первичным и вторичным распадом достигают 400 нс, что указывает на существование долгоживущих изомерных (кластерных) состояний.
- Понимание механизма ускорения распада под действием внешнего кулоновского поля важно для ядерной физики (тройное деление).
- **Научная новизна:** впервые предложена модель, объединяющая статическое понижение барьера и динамическое возбуждение двойной ядерной системы (DNS) при пролёте через фольгу.

**Цель:** Создать теоретическую модель каталитического распада кластерных состояний осколков деления в кулоновском поле ядер фольги.

**Задачи:**

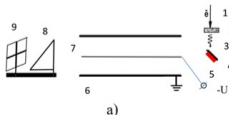
- 1 Разработать формализм потенциальной энергии для тройной (TNS) и двойной (DNS) ядерных систем с учётом деформаций.
- 2 Вычислить периоды полураспада асимметричных DNS ( $^{14}\text{C}+^{108}\text{Mo}$ ,  $^{20}\text{O}+^{102}\text{Zr}$ ,  $^4\text{He}+^{100}\text{Zr}$ ) при сближении с ядрами Cu и Ti.
- 3 Учесть диссипацию энергии радиальных колебаний DNS, возникающих из-за неоднородности кулоновского поля.
- 4 Сопоставить теоретические предсказания с измеренными выходами LCP.

## Установка VEGA (ОИЯИ):

- Источник: микротрон МТ-25 ( $e^- \rightarrow \gamma$ )
- Мишень:  $^{242}\text{Pu}$  на Ti подложке ( $1.5 \mu\text{m}$ )
- ЭСН: фокусировка  $\pm 1.5^\circ$
- МКП (старт), PIN-диоды (стоп + энергия)

## Кинематика двухстадийного распада:

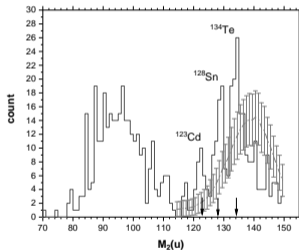
- 1 Бинарное деление:  $M_2 + M_b$  (в фольгу)
- 2  $M_b$  распадается в Ti фольге  $\rightarrow$  LCP ( $M_1$ ) +  $M_3$
- 3 LCP ( $M_1$ ) испускается **назад** и регистрируется



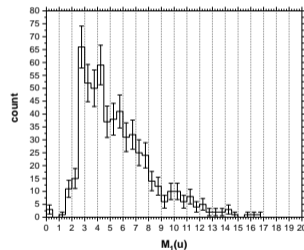
(НИЯУ МИФИ)

## Результаты:

- Избыток  $M_2$  при  $^{128}\text{Sn}$ ,  $^{134}\text{Te}$  (магические ядра)
- Массы LCP 3–16 а.е.м.
- Выход:  $10^{-3}$  на одно бинарное деление



Масс-спектр  $M_2$

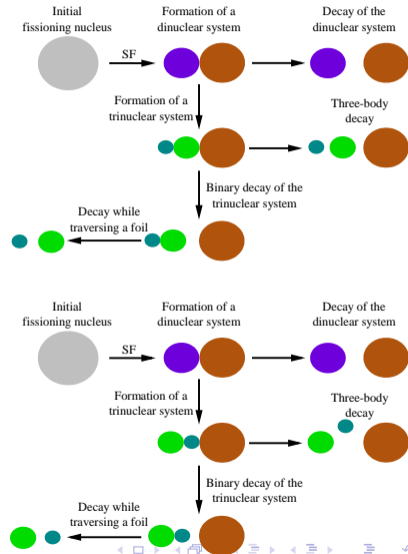


Масс-спектр LCP  $M_1$

# Образование кластерных состояний в осколках деления

- При делении может образоваться **тройная ядерная система (TNS)<sup>a</sup>**.
- После первого бинарного распада TNS остаётся **двойная ядерная система (DNS)** – изомер формы / кластерное состояние.
- Пример:  $^{252}\text{Cf} \rightarrow ^{122}\text{Cd} + ^{130}\text{Sn} \rightarrow ^{20}\text{O} + ^{102}\text{Zr} + ^{130}\text{Sn}$ ; оставшаяся DNS –  $^{20}\text{O} + ^{102}\text{Zr}$ .
- $^{235}\text{U} \rightarrow ^{104}\text{Mo} + ^{131}\text{Sn} \rightarrow ^{100}\text{Zr} + ^4\text{He} + ^{131}\text{Sn}$ ; оставшаяся DNS –  $^{100}\text{Zr} + ^4\text{He}$ .

<sup>a</sup>Sh.A. Kalandarov et al., Phys. Lett. B **850**, 138522 (2024)



# Потенциальная энергия DNS

- Полная потенциальная энергия DNS:

$$U_{\text{DNS}} = V_{12} + Q_{\text{DNS}}, \quad Q_{\text{DNS}} = B_1 + B_2 - B_{\text{CN}}.$$

где  $B_i$  – избытки масс,  $B_{\text{CN}}$  – составного ядра.

- Потенциал взаимодействия  $V_{12} = V_N + V_C$ <sup>1</sup>:

$$V_C(R_{12}, Z_1, Z_2) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_{12}} + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_{12}^3} \sqrt{\frac{20}{9\pi}} \left( R_{01}^2 \beta_1 + R_{02}^2 \beta_2 \right) + \frac{7 Z_1 Z_2 e^2}{3\pi R_{12}^3} \left( R_{01}^2 \beta_1^2 + R_{02}^2 \beta_2^2 \right).$$

где  $R_{12}$  – расстояние между центрами фрагментов,  $R_{0i} = r_{0i} A_i^{1/3}$ ,  $\beta_i$  – квадрупольные деформации.

- Ядерная часть (двойное свёртывание)

$$V_N(R_{12}) = \int \rho_1(r) F_{\text{eff}}(r, R_{12}) \rho_2(r - R_{12}) dr :$$

$$F_{\text{eff}}(r, R_{12})^2 = C_0 \left[ F_{\text{in}} + (F_{\text{ex}} - F_{\text{in}}) \frac{\rho_0 - \rho(r, R_{12})}{\rho_0} \right]; \quad \rho(r, R_{12}) = \rho_1(r) + \rho_2(r - R_{12})$$

с  $C_0 = 300 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^3$ ,  $F_{\text{in}} = 0.09$ ,  $F_{\text{ex}} = -2.59$ ,  $\rho_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ ;

- Плотности – двухпараметрическое распределение Ферми.:

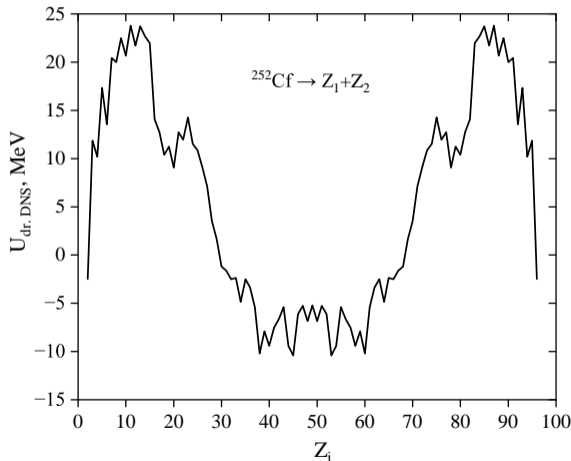
$$\rho_i(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - R_i(\theta_i))/a_{0i}]}, \quad R_i(\theta_i) = R_{0i} (1 + \beta_i Y_{20}(\cos \theta_i));$$

где  $r_{0i}$  и  $a_{0i}$  зависят от массы фрагмента (легкие кластеры:  $r_{0i} = 1.02$ – $1.16$  фм,  $a_{0i} = 0.49$ – $0.56$  фм; тяжелые ядра:  $r_{0i} = 1.16$  фм,  $a_{0i} = 0.56$  фм) и многочлен Лежандра  $Y_{20}$

<sup>1</sup>C. Y. Wong, Phys. Rev. Lett. 31, 766 (1973)

<sup>2</sup>A.B. Migdal, Theory of Finite Fermi Systems (Interscience, 1967):

- Драйвинг-потенциал для  $^{252}\text{Cf}$  показывает минимумы при  $Z_1 = 38\text{--}48$  (лёгкая группа) и  $Z_2 = 50\text{--}60$  (тяжёлая группа) – согласуется с асимметричным делением.



# Драйвинг-потенциал TNS

- Полная потенциальная энергия TNS:

$$U_{\text{TNS}} = V_{12} + V_{23} + V_{13} + Q_{\text{TNS}}, \quad Q_{\text{TNS}} = B_1 + B_2 + B_3 - B_{\text{CN}}$$

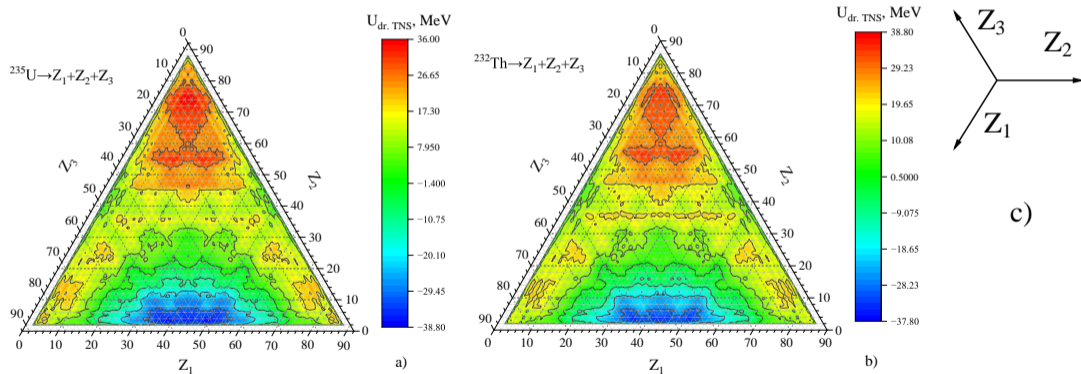


Рис.: Драйвинг-потенциал TNS (диаграмма Далица).

# Распределение кинетической энергии и расстояние

После распада TNS на DNS и третий фрагмент (например, Sn) разделяются. Из закона сохранения импульса и энергии:

$$\begin{cases} V_{\text{TNS}}(R_{12}^m, R_{23}^b) = V_{12}(R_{12}^m) + E_{\text{kin}}^{\text{DNS}} + E_{\text{kin}}^3 \\ m_{\text{DNS}} v_{\text{DNS}} = -m_3 v_3, \end{cases}$$

где  $R_{12}^m$  - минимальное расстояние в DNS,  $R_{23}^b$  - верхняя граница барьера между DNS и фрагментом 3.

Наименьшее расстояние сближения  $R_{\text{app}}$  между DNS и ядром фольги при лобовом столкновении определяется исходя из сохранения импульса и энергии:

$$\begin{cases} E_{\text{kin}}^{\text{DNS}} = V_{\text{C}_1\text{-foil}}(R_{\text{app}}) + V_{\text{C}_2\text{-foil}}(R_{12}^m + R_{\text{app}}) + E_{\text{kin}}^{\text{DNS}*} + E_{\text{kin}}^{\text{foil}}, \\ (m_1 + m_2)v_{\text{DNS}} = (m_1 + m_2)v_{\text{DNS}}^* + m_{\text{foil}}v_{\text{foil}}. \end{cases}$$

Для изучаемых систем:

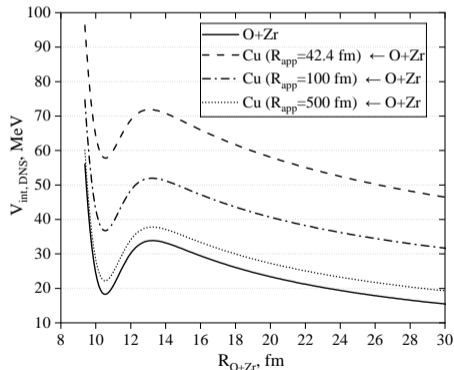
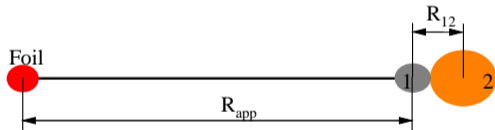
$$R_{\text{app}}(\text{Cu} \leftarrow \text{C} + \text{Mo}) = 41.4 \text{ fm}, \quad R_{\text{app}}(\text{Cu} \leftarrow \text{O} + \text{Zr}) = 42.4 \text{ fm}.$$

# Взаимодействие DNS с ядром фольги

- Полный потенциал, действующий на DNS в поле ядра фольги на расстоянии  $R_{app}$ :

$$V_{полн}(R_{12}, R_{app}) = V_{12}(R_{12}) + V_{C_{1-фол}}(R_{app}) + V_{C_{2-фол}}(R_{12} + R_{app}).$$

- DNS (например,  $^{20}\text{O} + ^{102}\text{Zr}$ ) проходит вблизи ядра фольги (Cu, Ti)<sup>3</sup>.
- В точке максимального сближения  $R_{app}$  кулоновское поле изменяет потенциал взаимодействия DNS.
- Барьер распада DNS понижается.



# Понижение высоты барьера

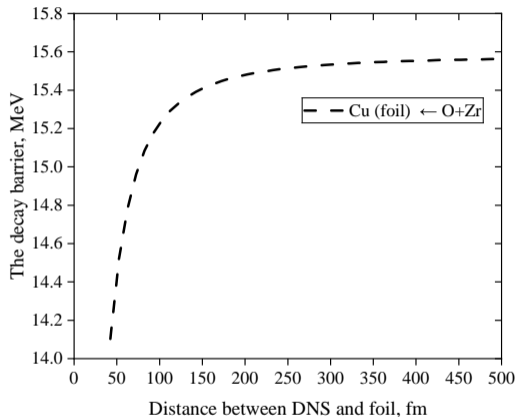
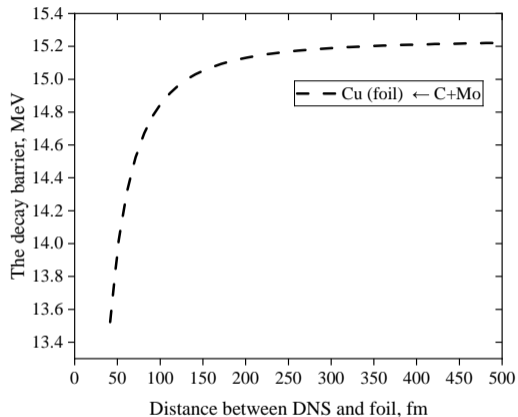


Рис.: Изменение барьера распада DNS (C+Mo и O+Zr) в зависимости от расстояния до ядра Cu.

# Расчёт периода полураспада (метод ВКБ)

Усредненная вероятность туннелирования, зависящая от энергии возбуждения  $E_x$ :

$$P_{av}(E_x) = \int_0^{E_x} W(E)P(E)dE$$

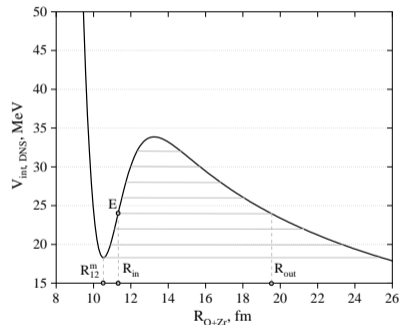
где:

- Вероятность того, что DNS обладает определенной внутренней энергией  $E$  ( $0 \leq E \leq E_x$ ), описывается нормализованным распределением Больцмана  $W(E) = \frac{\exp(-E/T_{DNS})}{T_{DNS}(1 - \exp(-E_x/T_{DNS}))}$  а температура задается моделью ферми-газа  $T_{DNS} = \sqrt{E_x/a}$ , с параметром плотности уровня  $a = (A_1 + A_2)/8$ .

- Для фиксированной энергии  $E$  вероятность туннелирования через барьер определяется приближением WKB

$$P = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{2}{\hbar} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \sqrt{2\mu(V_{12}(R) - V_{12}(R_{12}^m) - E)} dR\right)}$$
 где  $R_{in}$  и  $R_{out}$  - классические поворотные точки (зависят от  $E$ ).

- Период полураспада определяется по частоте колебаний  $\omega_0$  в потенциальном кармане  $T_{1/2} = \frac{\pi \ln 2}{\omega_0 P_{av}}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{V''_{12}(R_{12}^m)}{\mu}}$ .



# Изменение периода полураспада под действием Cu

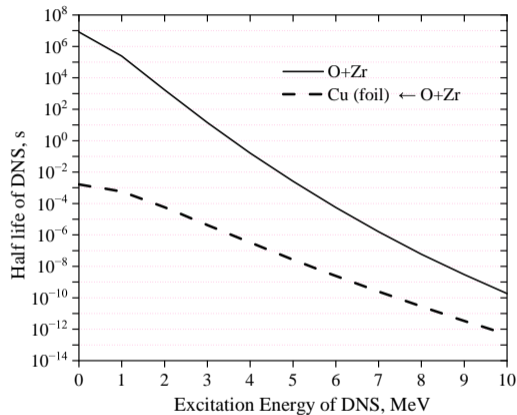
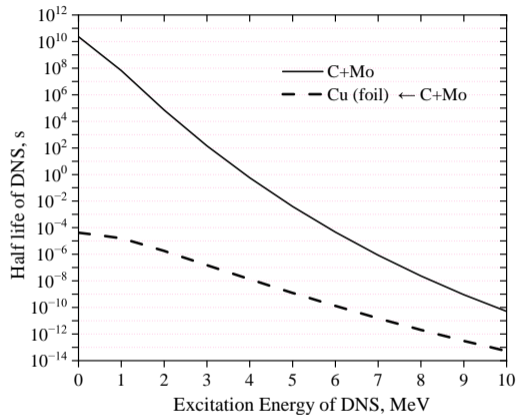
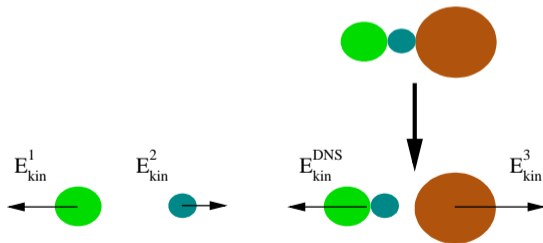


Рис.: Период полураспада с (пунктир) и без (сплошная линия) кулоновского поля Cu. Факторы ускорения:  $10^{15}$ – $10^3$  (C+Mo) и  $10^{10}$ – $10^2$  (O+Zr) при  $E_x = 0$ –10 МэВ.

# Экспериментальное наблюдение низкоэнергетического LCP из осколков деления

**Легкие заряженные частицы с низкой энергией (LCP)**, обнаруженные с массами около  $M \approx 3-16$  у, в основном альфа-частицы.



Период полураспада составляет  $^{100}\text{Zr} + \alpha$  с фольгой Ti

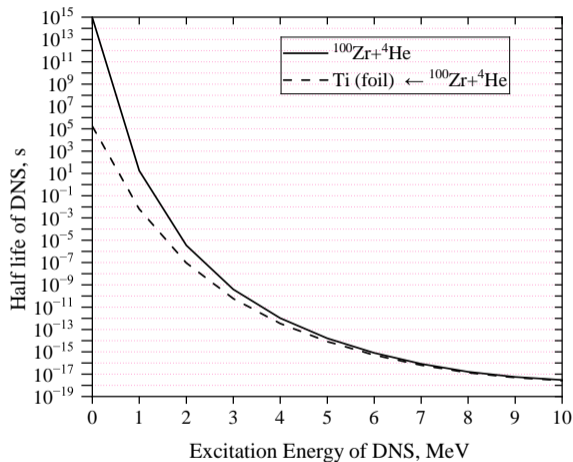


Рис.: Период полураспада с (пунктирной линией) и без (сплошной линией) Кулоновское поле Ti.

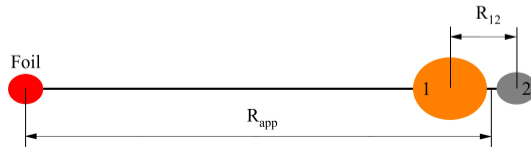
$$\hbar\lambda = 1\text{MeV (сила трения)}, \quad \mu_{12} = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}, \quad \mu_{12\text{Foil}} = \frac{(A_1 + A_2)A_{\text{foil}}}{A_1 + A_2 + A_{\text{foil}}}.$$

Энергия столкновения:  $E_{\text{cm}} = \frac{A_{\text{foil}}}{A_1 + A_2 + A_{\text{foil}}} E_{\text{kDNS}}, \quad v_{\text{CM}} = \sqrt{2E_{\text{cm}}/(\mu_{12\text{Foil}})}$ .

Уравнения движения (коллинеарные):

$$\mu_{12}\ddot{R}_{12} = -\lambda\mu_{12}\dot{R}_{12} - \frac{A_2}{A_1 + A_2} \frac{Z_1 Z_{\text{foil}} e^2 (R_{\text{app}} + \frac{A_2}{A_1 + A_2} R_{12})}{|R_{\text{app}} + \frac{A_2}{A_1 + A_2} R_{12}|^3} + \frac{A_1}{A_1 + A_2} \frac{Z_2 Z_{\text{foil}} e^2 (R_{\text{app}} - \frac{A_1}{A_1 + A_2} R_{12})}{|R_{\text{app}} - \frac{A_1}{A_1 + A_2} R_{12}|^3} - \frac{dV_{\text{DNS}}}{dR_{12}},$$

$$\mu_{12\text{Foil}}\ddot{R}_{\text{app}} = \frac{Z_1 Z_{\text{foil}} e^2 (R_{\text{app}} + \frac{A_2}{A_1 + A_2} R_{12})}{|R_{\text{app}} + \frac{A_2}{A_1 + A_2} R_{12}|^3} + \frac{Z_2 Z_{\text{foil}} e^2 (R_{\text{app}} - \frac{A_1}{A_1 + A_2} R_{12})}{|R_{\text{app}} - \frac{A_1}{A_1 + A_2} R_{12}|^3}.$$



# Диссипация энергии при пролёте через фольгу

- В эксперименте с Ti фольгой DNS  $^{100}\text{Zr} + ^4\text{He}$  испытывает разные кулоновские силы со стороны ядра Ti на Zr и  $^4\text{He}$ .
- Это приводит к **коллективным колебаниям** DNS.
- Колебания затухают, преобразуя энергию во внутреннее возбуждение.
- Сила трения  $-\lambda\mu_{12}\dot{R}_{12}$  переводит относительное движение во внутреннюю энергию.
- Энергия, диссипированная за одно столкновение с ядром фольги:

$$\Delta E_{\text{столк}} = \int \lambda\mu_{12}|\dot{R}_{12}|^2 dt \approx \lambda\mu_{12} \sum_i (\Delta R_{12i})^2.$$

- Для системы  $^{100}\text{Zr} + ^4\text{He}$  и Ti фольги:  $\Delta E_{\text{столк}} = 0.00016$  МэВ на одно ядро.
- Толщина фольги соответствует примерно 10 000 ядер Ti на пути.
- Полный прирост энергии:  $E_{\text{дисс,полн}} \approx 10\,000 \times 0.00016 = 1.6$  МэВ.

# Период полураспада $^{100}\text{Zr} + \alpha$ с Ti фольгой

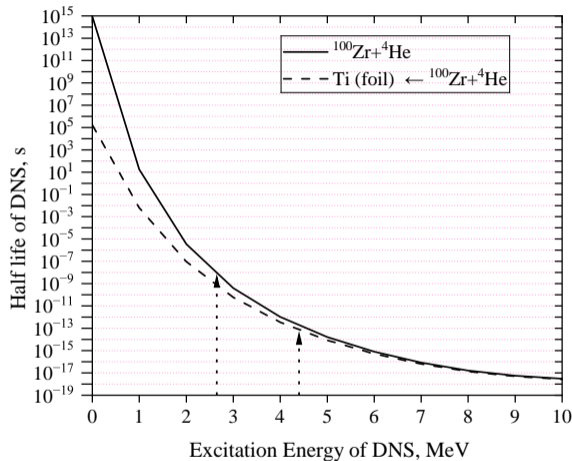


Рис.: Период полураспада DNS  $^{100}\text{Zr} + ^4\text{He}$  в зависимости от  $E_x$ . Без фольги  $T_{1/2} = 10^{-8}$  с при  $E_x \approx 2.8$  МэВ. С фольгой при  $E_x \approx 4.4$  МэВ  $T_{1/2} < 10^{-13}$  с (время пролёта).

- Кулоновское поле фольги (Ti) **понижает барьер распада** (прямой эффект).
- Дополнительно оно индуцирует **коллективные колебания**, которые увеличивают энергию возбуждения DNS на  $\approx 1.6$  МэВ.
- Совместное действие этих эффектов приводит к тому, что период полураспада DNS становится меньше времени пролёта через фольгу ( $\sim 10^{-13}$  с), что объясняет наблюдаемый вторичный распад.
- Разработана модель каталитического распада кластерных состояний в кулоновском поле ядер фольги, объединяющая статическое понижение барьера и динамический нагрев за счёт диссипации колебаний.

## Публикации в рецензируемых журналах:

- F.O. Otakhonov, et al. Influence of the Coulomb field of foil nuclei on half-lives of cluster states in fission fragments. *Physics Letters B*, Vol. 872, 140088 (2026) (Q1).
- F.O. Otakhonov, Sh.A. Kalandarov. Decay of Spontaneous Fission Isomers in the Coulomb Field of a Third Nucleus. *International Journal of Modern Physics E*, Vol. 35, No. 6, 2641017 (2026) (Q3).
- F.O. Otakhonov, et al. Catalysis of Fission Isomer Decay in the Coulomb Field of a Foil Nucleus for Ternary System of  $^{252}\text{Cf}$ . *PEPAN Letters*, принята к печати (2026) (Q4).
- Yu.V. Pyatkov, F.O. Otakhonov, et al. First observation of the induced low energy polar emission of the light charged particles from fission fragments while traversing the foil material. *Physical Review C*, на рассмотрении (Q2).

## Доклады на конференциях:

- 1 LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025» (Санкт-Петербург, 2025).
- 2 29th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2025) (Дубна, 2025).
- 3 32nd International Seminar ISINN-32 (Дубна, 2026).

# Спасибо!

Вопросы и комментарии приветствуются.