

# Деление ядер нейтронами: современные подходы и результаты моделирования сечения реакции $^{237}\text{Np}(n,f)$ .

Ененко К.М.

Б23-102

Научный руководитель: Барабанов А.Л.

Москва, 2026

## Задача:

Изучение механизма деления ядра Np-237 нейтронами в диапазоне энергий от 0.1 до 30 МэВ.

## Цели работы:

- моделирование зависимости сечения деления ядра Np-237 от энергии падающих нейтронов;
- анализ полученной зависимости, сравнение её с экспериментальными данными и объяснение хода кривой с упором на ключевые параметры реакции на каждом интервале энергий

## Актуальность

- поиск параметров, описывающих энергетическую зависимость полного сечения деления, для последующего расчёта дифференциального сечения деления в реакции  $\text{Np}237(n,f)$ ;
- получение новой информации о барьерах деления, характеристиках ядер на барьерах, энергиях переходных состояний;
- получение новой информации о плотности возбужденных энергетических состояний на барьерах деления.

## Моделирование и источники:

Программа: TALYS версии 2.2:

- До 200 МэВ
- Настройка моделей и параметров реакции

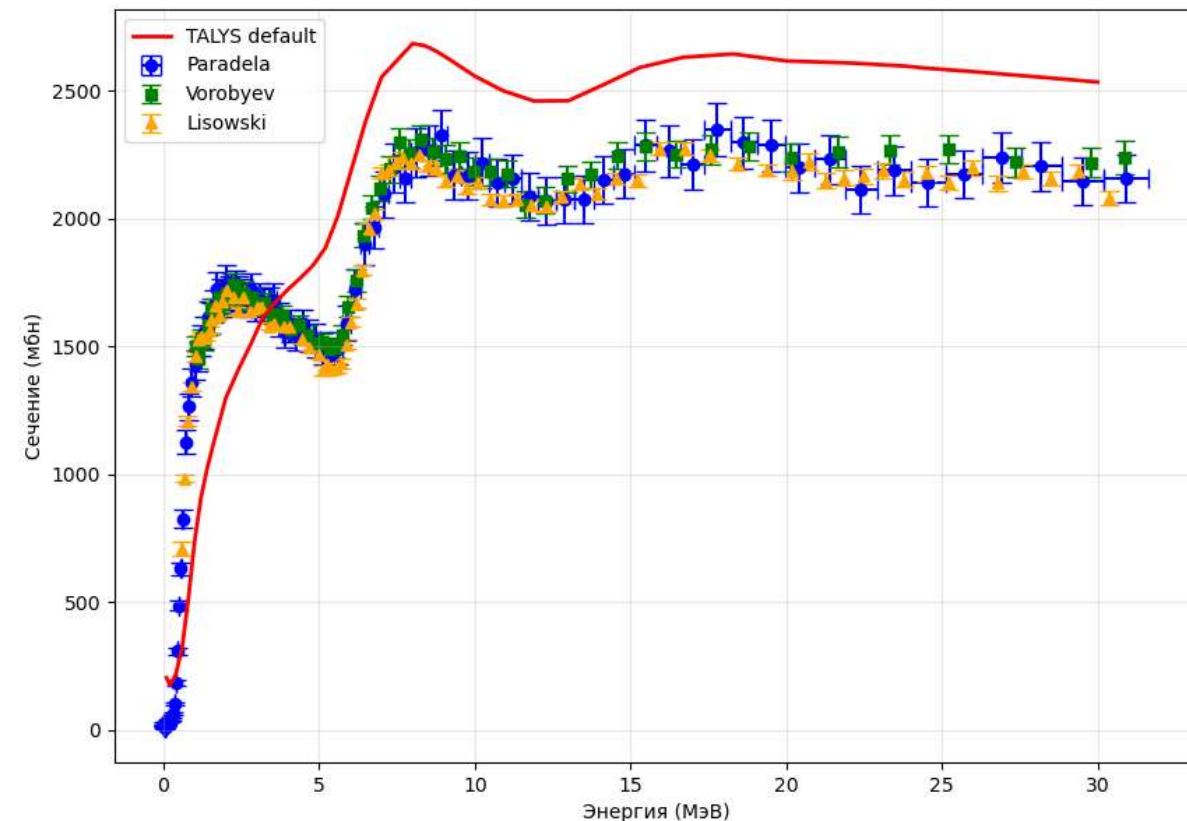
Экспериментальные данные из библиотеки EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data):

- Vorobyev et al. (2025)
- Paradela et al. (2010)
- Shcherbakov et al. (2002)

# Стандартные параметры

Сечение деления в реакции  $n + \text{Np-237}$ , рассчитанное со стандартными моделями и значениями плотности уровней и барьеров деления ядер, заметно отличается от результатов измерений во всей области от 0.1 до 30 МэВ:

- в районе 0.1 МэВ наблюдается расхождение на порядок;
- для 8-30 МэВ общий вид кривой соответствует экспериментальному, однако сечение завышено на ~20% на всём интервале;
- при ~5 МэВ не воспроизводится уменьшение сечения перед открытием канала деления второго шанса.



# Используемые модели

## Модель двугорбого барьера:

- Задаются высоты и ширины барьеров
- Формула Хилла-Уиллера

Использовалась модель экспериментальных барьеров деления (fismodel 1)

## Модель плотности уровней:

Модель Гильберта - Камерона - комбинация модели постоянной температуры и модели ферми-газа (Constant Temperature + Fermi Gas), которые соединяются в районе 1-5 МэВ.

Для низких энергий используется модель постоянной температуры, в которой предполагается, что на начальном этапе возбуждения плотность уровней экспоненциально растет с температурой ядра:

$$\rho_T(E_x) = \frac{1}{T} \exp\left(\frac{E_x - E_0}{T}\right)$$

Для высоких энергий используется модель ферми-газа, которая описывает возбужденное ядро как газ из квазичастиц (протонов и нейтронов), подчиняющихся квантовой статистике Ферми:

$$\rho_E(E_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{\sqrt{\pi} \exp(2\sqrt{aU})}{12 \frac{1}{a^4} \frac{5}{U^4}}$$

# Параметры реакции

## Изменяемые параметры:

- Высоты  $V_i$  и ширины  $\hbar\omega_i$  барьеров для ядер (238-235)-Np;
- Коэффициенты вращательного усиления плотности уровней:

$$\rho_F(E_x, J, \Pi) = K_{\text{rot}}(E_x) \cdot K_{\text{vib}}(E_x) \cdot \rho_\Sigma(E_x, J, \Pi)$$

## Типы симметрии для ядра 237-Np:

- для первого барьера была выбрана лево-правая асимметрия (Left-right asymmetry: axtype = 2);
- для второго - триаксиальная и лево-правая асимметрия (Triaxial and left-right asymmetry: axtype = 3)

# Таблицы значений

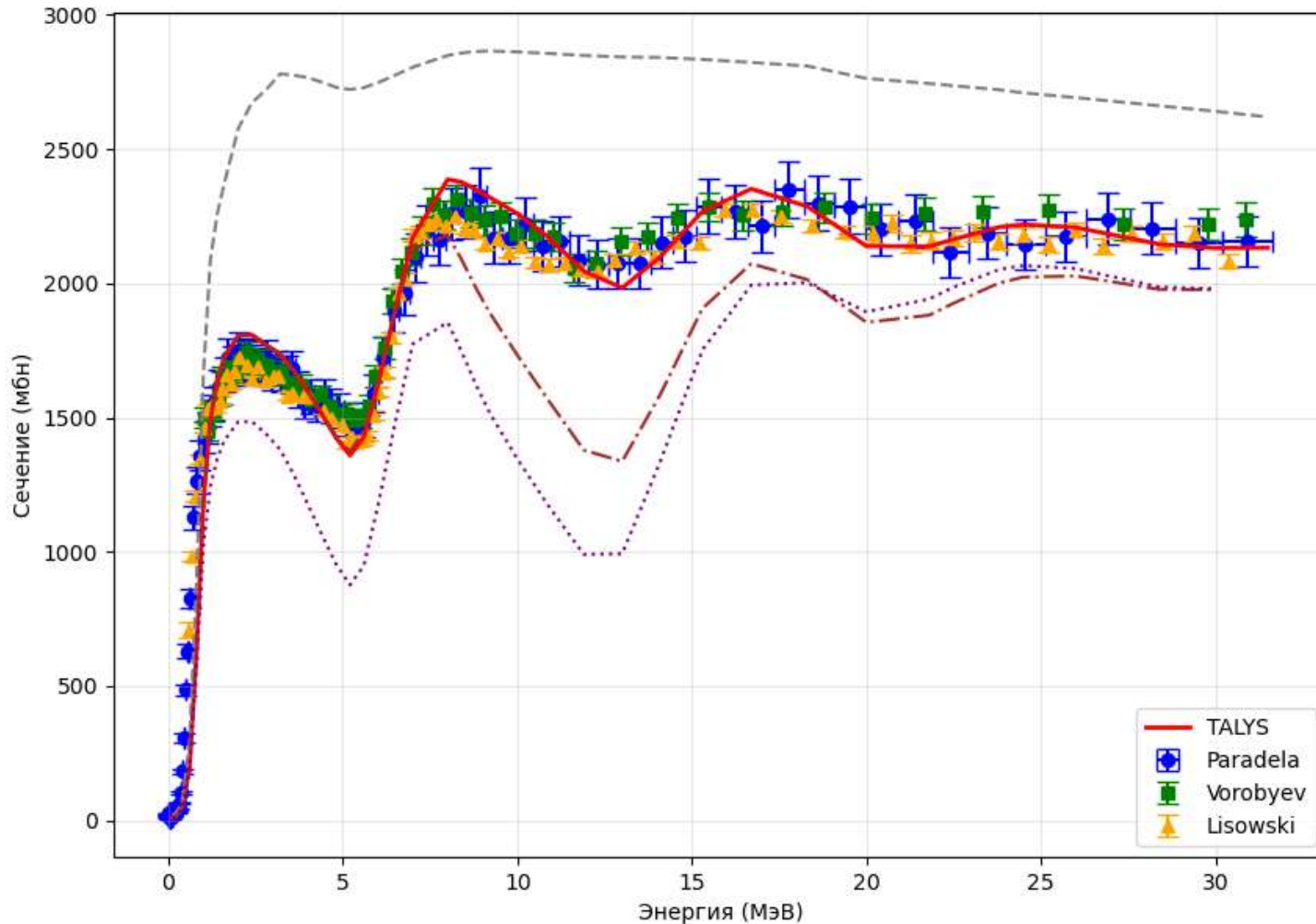


Ядро	$B_1$	$\hbar\omega_1$	$B_2$	$\hbar\omega_2$
238-Np	6.35 (6.50)	0.60	5.45 (5.75)	0.40
237-Np	5.30 (6.00)	0.70 (1.00)	5.30 (5.4)	0.50
236-Np	5.20 (5.90)	0.70 (0.60)	5.20 (5.40)	0.50 (0.40)
235-Np	5.95 (5.70)	-	-	-

Параметр	Ядро	Барьер	Значение
Krotconstant	238-Np	2	4.0 (1.0)
Krotconstant	237-Np	2	3.0 (1.0)
axtype	237-Np	1	2 (3)
axtype	237-Np	2	3 (2)

Параметр	Значение
fullhf	y (n)
fismodel	1 (6)
ldmodel	1

# Итоговое сечение



Сечение деления  $^{237}\text{Np}$  в зависимости от энергии падающих нейтронов:

- экспериментальные данные [1-3], сплошная линия - итоговое сечение деления;
- штриховая линия - сечение, рассчитанное с использованием стандартной модели плотности уровней;
- пунктирная линия - сечения, рассчитанные без учета вращательных степеней свободы;
- штрих-пунктирная линия - сечения для стандартных форм ядер.

## Заключение

- В ходе работы была смоделирована зависимость сечения деления ядра  $\text{Np-237}$  от энергий падающих нейтронов на интервале энергий от 0.1 до 30 МэВ с использованием программы TALYS (версия 2.2).
- Использована модель двугорбого барьера, и подобраны значения высот и ширин барьеров для ядер  $(238-235)\text{-Np}$ , вносящих вклад в полное сечение деления ядра  $237\text{-Np}$ .
- Подобрана наиболее удачно описывающая сечение модель плотности уровней Гильберта-Камерона.
- Изменены значения коэффициентов усиления вращения ядер  $237,238\text{-Np}$  и типы симметрии формы ядра  $237\text{-Np}$ .

Подобранные характеристики позволяют с достаточной точностью воспроизвести ход экспериментальной зависимости сечения деления  $237\text{-Np}$  от энергии падающих нейтронов.

# Источники



1. Воробьев А.С. и др. Neutron-induced fission cross section of  $^{237}\text{Np}$  up to 500 MeV. Bulletin of the Russian Academy of Sciences - Physics, Том 89, стр. 1329 (2025).
2. Paradela C. и др. Neutron-induced fission cross section of  $^{234}\text{U}$  and  $^{237}\text{Np}$  measured at the CERN Neutron Time-of-Flight (nTOF) facility. Physical Review C, Том 82, стр. 034601 (2010).
3. Щербаков О. и др. Neutron-induced fission of  $^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , natPb and  $^{209}\text{Bi}$  relative to  $^{235}\text{U}$  in the energy range 1-200 MeV. Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement, Том 2, стр. 230 (2002).
4. Capote R. и др. RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. Nuclear Data Sheets, Том 110, стр. 3107 (2009).
5. Koning A.J., Hilaire S., Goriely S. TALYS: modeling of nuclear reactions. European Physical Journal A, Том 59, стр. 131 (2023). DOI: 10.1140/epja/s10050-023-01034-3
6. Воробьев А.С., Гагарский А.М., Щербаков О.А., Вайшнине Л.А., Барабанов А.Л. Угловые распределения и анизотропия осколков деления  $^{237}\text{Np}$  нейтронами с энергиями 1-200 МэВ: данные измерений и модельные расчёты. Письма в ЖЭТФ, том 110, выпуск 4, стр. 222-229 (2019).
7. Барабанов А.Л., Воробьев А.С., Гагарский А.М., Щербаков О.А., Вайшнине Л.А. Теоретический анализ экспериментальных данных по угловой анизотропии осколков деления ядер нейтронами при энергиях до 200 МэВ. Известия РАН. Серия физическая, том 84, № 4, стр. 515-520 (2020).



**Спасибо за внимание!**