

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

# Плотность ядерных уровней и проблемы физики ядерных реакций

Студент

Л. Е. Трофимов

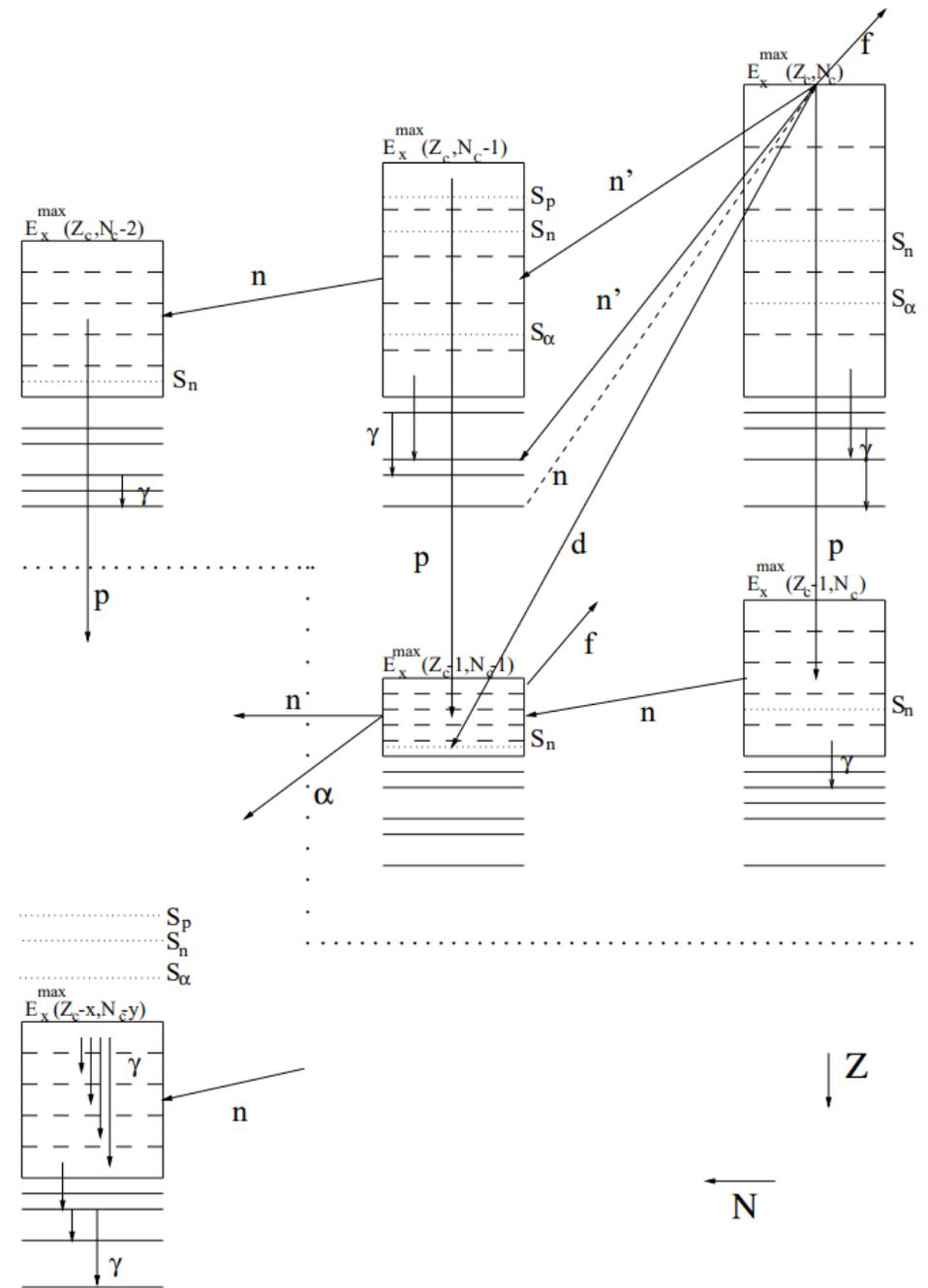
Научный руководитель  
д.ф-м.н., проф.

А. Л. Барабанов

17 июня 2024

# Цель работы

- Моделирование ядерных реакций
- Плотность ядерных уровней



# Модели плотности ядерных уровней. Модель ферми-газа.

Плотность уровней в зависимости от энергии возбуждения задаётся формулой

$$\rho_F(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{\sqrt{\pi}}{12} \frac{\exp\left(2\sqrt{aU}\right)}{a^{1/4}U^{5/4}},$$

$$U = E - \Delta, \quad \Delta = n \frac{12}{\sqrt{A}}, \quad n = \begin{cases} 2, & \text{чётно-чётные ядра} \\ 1, & \text{чётно-нечётные ядра} \\ 0, & \text{нечётно-нечётные ядра} \end{cases}$$

$$\sigma^2 = \langle m^2 \rangle \frac{6}{\pi^2} at,$$

где  $a$  — параметр плотности ядерных уровней,  $\langle m^2 \rangle$  — среднеквадратичная проекция углового момента,  $t$  — температура ядра.

# Модели плотности ядерных уровней. Модель Гильберта-Камерона.

Модификация модели ферми-газа:

$$\rho(E) = \begin{cases} \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{E-E_0}{T}\right), & U < U_M \\ \rho_F(E), & U > U_M \end{cases}$$

Параметры модели могут быть найдены из условий сшивки:

$$\begin{cases} \left. \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{E-E_0}{T}\right) \right|_{E_M} = \rho_F(E_M), \\ \left. \frac{d}{dE} \left( \exp\left[-\frac{E-E_0}{T}\right] \right) \right|_{E_M} = \left. \frac{d\rho_F(E)}{dE} \right|_{E_M}, \end{cases}$$

$$\int_{E_L}^{E_U} \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{E-E_0}{T}\right) dE = N_U - N_L.$$

# Модели плотности ядерных уровней. Модель ферми-газа с обратным смещением.

Поправка в энергии возбуждения:

$$\Delta = n\Delta_0 + \delta, \quad \Delta_0 = \frac{12}{\sqrt{A}}.$$

Модификация плотности уровней:

$$\rho_{BSFM}(E) = \left[ \frac{1}{\rho_F(E)} + \frac{1}{\rho_0(U)} \right]^{-1},$$

$$\rho_0(U) = \frac{ea}{12\sigma} e^{aU},$$

$$U = at^2 - t.$$

# Модели плотности ядерных уровней. Сверхтекучая модель ядра.

Плотность ядерных уровней в сверхтекучей модели:

$$\rho(E, J) = \frac{2J + 1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{eff}^3\sqrt{D}} \exp\left(\frac{S - (J + \frac{1}{2})^2}{2\sigma_{eff}^2}\right),$$

$$\sigma_{eff}^2 = I_{eff}t, \quad I_{eff} = \begin{cases} I_{\parallel} & \text{для сферического ядра,} \\ (I_{\parallel})^{1/3}(I_{\perp})^{2/3} & \text{для деформированного ядра,} \end{cases}$$

$$D = D_c \frac{U}{U_c} \left(2 - \frac{U}{U_c}\right)^2,$$

$$S = S_c \frac{t_c}{t} \frac{U}{U_c}.$$

# Исследуемые параметры.

Можно определить параметры модели путём фитирования кривой под экспериментальные данные:

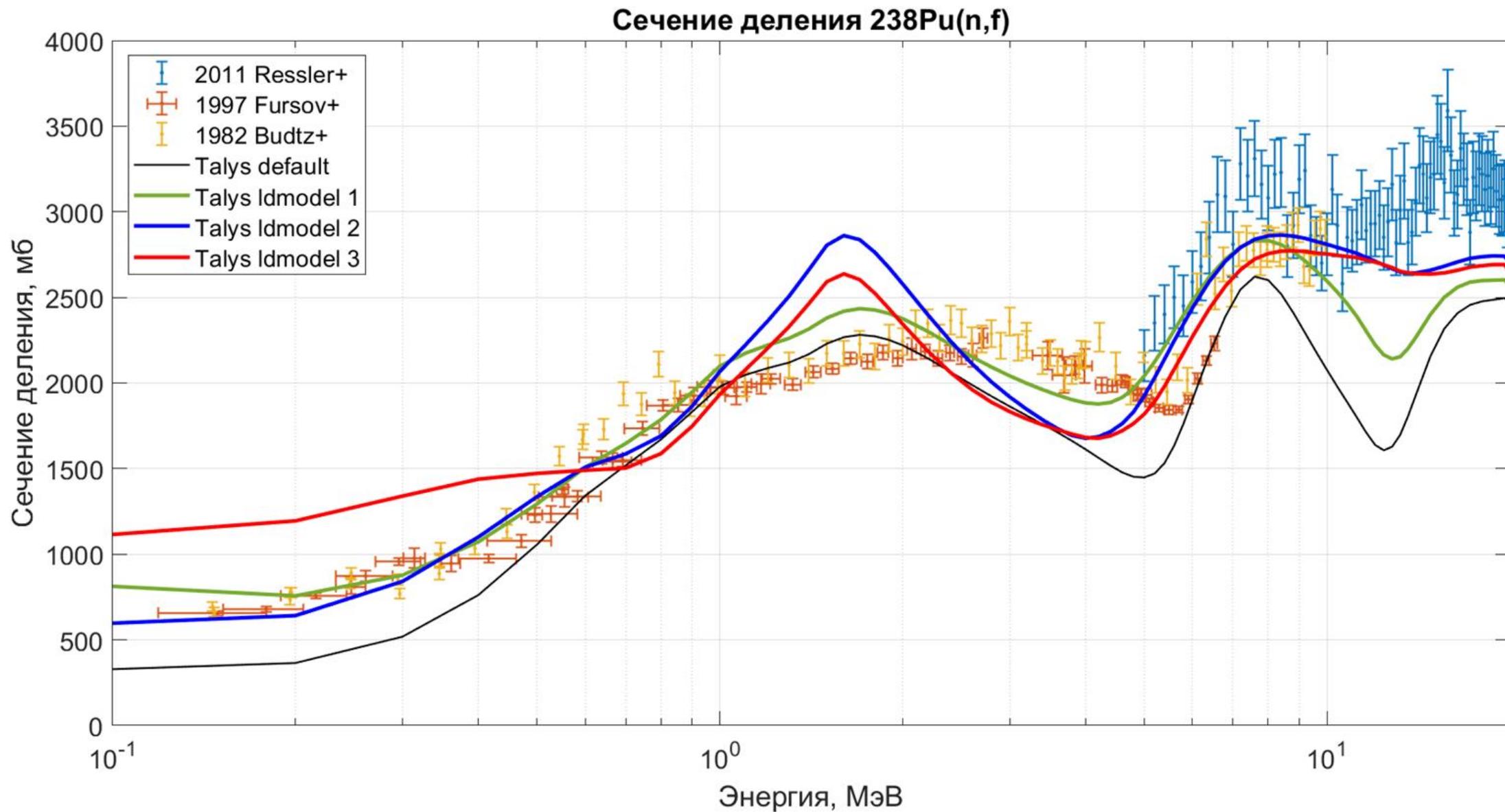
$B$  — параметр высоты барьера деления;

$\hbar\omega$  — параметр ширина барьера деления;

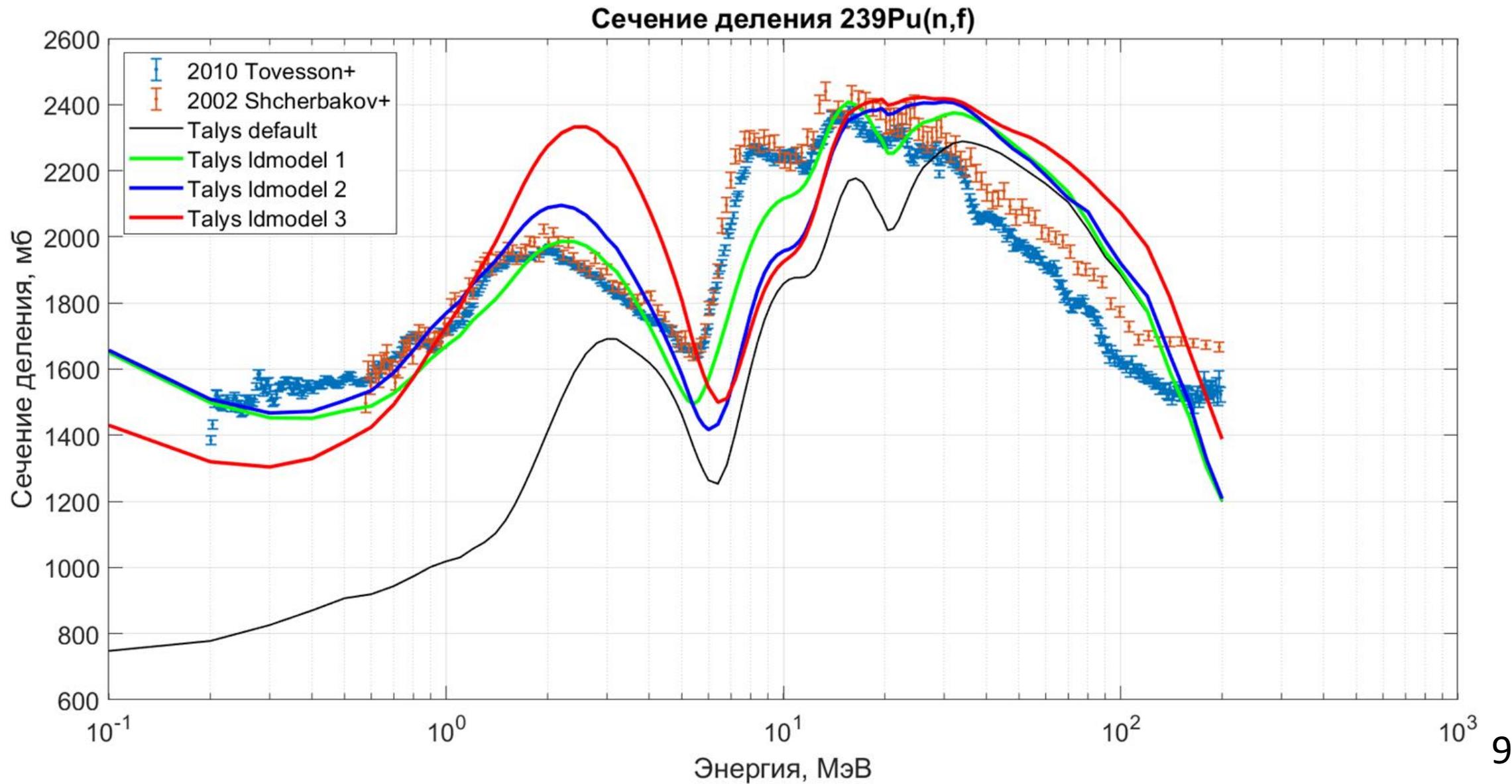
$R_{tm}$  и  $K_{rc}$  — нормировочные константы для момента инерции и коллективных уровней.

Данные параметры используются в RIPL – Reference Input Parameter Library.

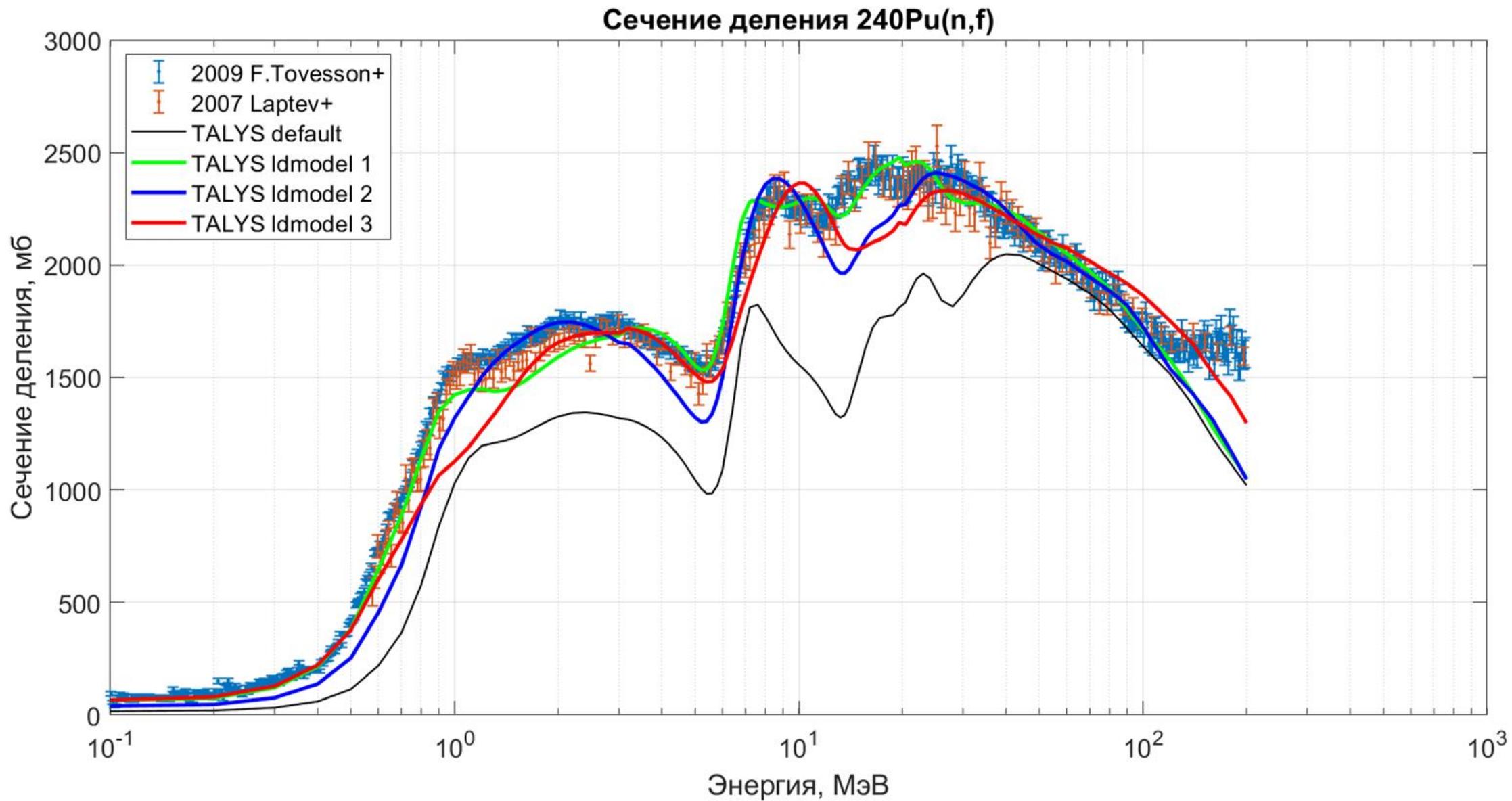
# Результаты моделирования TALYS для $^{238}\text{Pu}$



# Результаты моделирования TALYS для $^{239}\text{Pu}$



# Результаты моделирования TALYS для $^{240}\text{Pu}$



# Заключение

- Вычислены сечения деления деления изотопов  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  нейтронами с энергиями от 1 до 200 МэВ с использованием трёх моделей плотности уровней возбуждённых ядер.
- Показано, что сечения деления, вычисленные с параметрами по умолчанию, не согласуются с экспериментальными данными.
- Произведён подбор параметров для модели Гильберта-Камерона, ферми-газа с обратным смещением и свертекучей модели. Набор параметров для определённой модели одинаков для трёх реакций.
- Показано, что сечения деления с подобранными параметрами слабо согласуются с экспериментом.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бор О., Моттельсон Б. Структура атомного ядра. Том 1. Одночастичное движение. — Мир, 1971.
2. Бор О., Моттельсон Б. Структура атомного ядра. Том 2. Деформация ядер. — Мир, 1977.
3. Vautherin D., Brink D. M. Hartree-Fock Calculations with Skyrme's Interaction. I. Spherical Nuclei // *Phys. Rev. C*. — 1972. — Т. 5, вып. 3. — С. 626—647.
4. Koning A. J., Rochman D. A. Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System // *Nuclear Data Sheets*. — 2012. — Т. 113. — С. 2841—2934.
5. Capote R., Herman M., Oblovzinsk'y P., Young P., Goriely S., Belgya T., Ignatyuk A., Koning A., Hilaire S., Plujko V. RIPL—reference input parameter library for calculation of nuclear reactions and nuclear data evaluations // *Nuclear Data Sheets*. — 2009. — Т. 110. — С. 3107—3214.
6. Bethe H. A. An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus // *Phys. Rev.* — 1936. — Т. 50, вып. 4. — С. 332—341.
7. Соколов Ю. Плотность уровней атомных ядер. — Москва : Энергоатом, 1990.
8. Gilbert A., Cameron A. G. W. A composite nuclear-level density formula with shell corrections // *Canadian Journal of Physics*. — 1965. — Т. 43. — С. 1446—1496.
9. Dilg W., Schantl W., Vonach H., Uhl M. Level density parameters for the back-shifted fermi gas model in the mass range  $40 < A < 250$  // *Nuclear Physics*. — 1973. — Т. 217. — С. 269—298.
10. Ignatyuk A. V., Weil J. L., Raman S., Kahane S. Density of discrete levels in  $^{116}\text{Sn}$  // *Phys. Rev. C*. — 1993. — Т. 47, вып. 4. — С. 1504—1513.
11. Bardeen J., Cooper L. N., Schrieffer J. R. Microscopic Theory of Superconductivity // *Phys. Rev.* — 1957. — Т. 106, вып. 1. — С. 162—164.
12. Vorobyev A., Gagarski A., Shcherbakov O., Vaishnene L., Kuz'mina T., Barabanov A. Angular distributions and anisotropy of fission fragments from neutron-induced fission of  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , and nat Pb in energy range 1–200 MeV // *EPJ Web of Conferences*. — 2020. — Т. 239. — С. 05007.
13. Воробьев А. С., Гагарский А. М., Щербakov О. А., Вайшнене Л. А., Барабанов А. Л. Измерение угловых распределений осколков деления  $^{240}\text{Pu}$  нейтронами с энергиями 1–200 мэв и их модельный анализ // *Письма В Журнал Экспериментальной И Теоретической Физики*. — 2020. — Т. 112, 5—6(9). — С. 343—351.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

14. Vorobyev A. S., Gagarski A. M., Shcherbakov O. A., Vaishnene L. A., Barabanov A. L., Kuz'mina T. E. Measurement of the  $^{236}\text{U}$  fission cross section and angular distributions of fragments from fission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{236}\text{U}$  in the neutron-energy range of 0.3–500 MeV // Phys. Rev. C. — 2023. — Т. 108, вып. 1. — С. 014621.
15. Ressler J. J., Harke J. T., Escher J. E., Angell C. T., Basunia M. S., Beausang C. W., Bernstein L. A., Bleuel D. L., Casperson R. J., Goldblum B. L., Gostic J., Hatarik R., Henderson R., Hughes R. O., Munson J., Phair L. W., Ross T. J., Scielzo N. D., Swanberg E., Thompson I. J., Wiedeking M. Surrogate measurement of the  $^{238}\text{Pu}(n,f)$  cross section // Phys. Rev. C. — 2011. — Т. 83, вып. 5. — С. 054610.
16. Fast Neutron Induced Fission Cross Sections of Some Minor Actinides. — Trieste, Italy, 1997. — С. 488. — (International Conference on Nuclear Data for Science and Technology).
17. Neutron induced fission cross section of Pu-238 in the energy range from 5 eV to 10 MeV.— Antwerp, Belgium, 1982. — С. 206. — (International Conference on Nuclear Data for Science and Technology).
18. Tovesson F., Hill T. S. Cross Sections for  $^{239}\text{Pu}(n, f)$  and  $^{241}\text{Pu}(n, f)$  in the Range  $E_n = 0.01$  eV to 200 MeV // Nuclear Science and Engineering. — 2010. — Т. 165, № 2. — С. 224—231.
19. Shcherbakov O., Donets A., Evdokimov A., Fomichev A., Fukahori T., Hasegawa A., Laptev A., Maslov V., Petrov G., Soloviev S., Tuboltsev Y., Vorobyev A. NeutronInduced 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. — 2002. — Т. 39, sup2. — С. 230—233.
20. Tovesson F., Hill T. S., Mocko M., Baker J. D., McGrath C. A. Neutron induced fission of  $^{240,242}\text{Pu}$  from 1 eV to 200 MeV // Phys. Rev. C. — 2009. — Т. 79, вып. 1. — С. 014613.
21. Fast Neutron-Induced Fission of Some Actinides and Sub-Actinides. — Sanibel, Island, 2007. — С. 462. — (Fission and properties of neutron-rich nuclei).

# Доп. слайды. Параметры для 1 модели.

| <i>A</i> | Барьер 1   |               |          |          | Барьер 2   |               |          |          |
|----------|------------|---------------|----------|----------|------------|---------------|----------|----------|
|          | <i>B</i>   | $\hbar\omega$ | $R_{tm}$ | $K_{rc}$ | <i>B</i>   | $\hbar\omega$ | $R_{tm}$ | $K_{rc}$ |
| 241      | 6.00(6.15) | 0.70          | 0.8(0.6) | 1.0      | 5.10(5.50) | 0.50          | 1.0      | 1.0      |
| 240      | 5.90(6.05) | 0.90          | 6.0(0.6) | 1.0      | 4.95(5.15) | 0.60          | 5.0(1.0) | 1.0      |
| 239      | 5.80(6.20) | 0.90(0.70)    | 0.6      | 1.0      | 5.70       | (2.00)0.50    | 1.0      | 1.0      |
| 238      | 5.30(5.60) | 0.90          | 5.0(0.6) | 1.0      | 4.10(5.10) | 0.60          | 1.0      | 1.0      |

## Доп. слайды. Параметры для 2 модели.

| <i>A</i> | Барьер 1   |               |          |          | Барьер 2   |               |          |          |
|----------|------------|---------------|----------|----------|------------|---------------|----------|----------|
|          | <i>B</i>   | $\hbar\omega$ | $R_{tm}$ | $K_{rc}$ | <i>B</i>   | $\hbar\omega$ | $R_{tm}$ | $K_{rc}$ |
| 241      | 6.05(6.15) | 0.70          | 0.6      | 1.3(1.0) | 5.10(5.50) | 0.50          | 1.0      | (2.0)1.0 |
| 240      | 5.80(6.05) | 0.90          | 0.6      | 1.0      | 5.00(5.15) | 0.60          | 1.0      | (2.0)1.0 |
| 239      | 6.10(6.20) | 0.70          | (5.0)0.6 | 1.0      | 5.30(5.70) | (5.00)0.50    | 1.0      | (2.0)1.0 |
| 238      | 4.60(5.60) | 0.90          | 5.0(0.6) | (4.0)1.0 | 4.60(5.10) | 0.60          | (5.0)1.0 | (5.0)1.0 |

## Доп. слайды. Параметры для 3 модели.

| <i>A</i> | Барьер 1   |               |          |          | Барьер 2   |               |          |          |
|----------|------------|---------------|----------|----------|------------|---------------|----------|----------|
|          | <i>B</i>   | $\hbar\omega$ | $R_{tm}$ | $K_{rc}$ | <i>B</i>   | $\hbar\omega$ | $R_{tm}$ | $K_{rc}$ |
| 241      | 5.95(6.15) | 0.70          | 0.6      | 1.3(1.0) | 5.00(5.50) | 0.50          | 1.0      | (2.0)1.0 |
| 240      | 5.70(6.05) | 0.90          | 0.6      | 1.0      | 5.20(5.15) | 0.60          | 1.0      | (2.0)1.0 |
| 239      | 5.95(6.20) | 0.70          | 0.6      | 1.0      | 5.00(5.70) | 0.50          | 1.0      | (5.0)1.0 |
| 238      | 4.60(5.60) | 0.90          | 0.6      | (8.0)1.0 | 4.60(5.10) | 0.60          | 1.0      | 1.0      |