

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Методы моделирования плотности возбужденных состояний атомных ядер

Студент

Л. Е. Трофимов

Научный руководитель
д.ф-м.н., проф.

А. Л. Барабанов

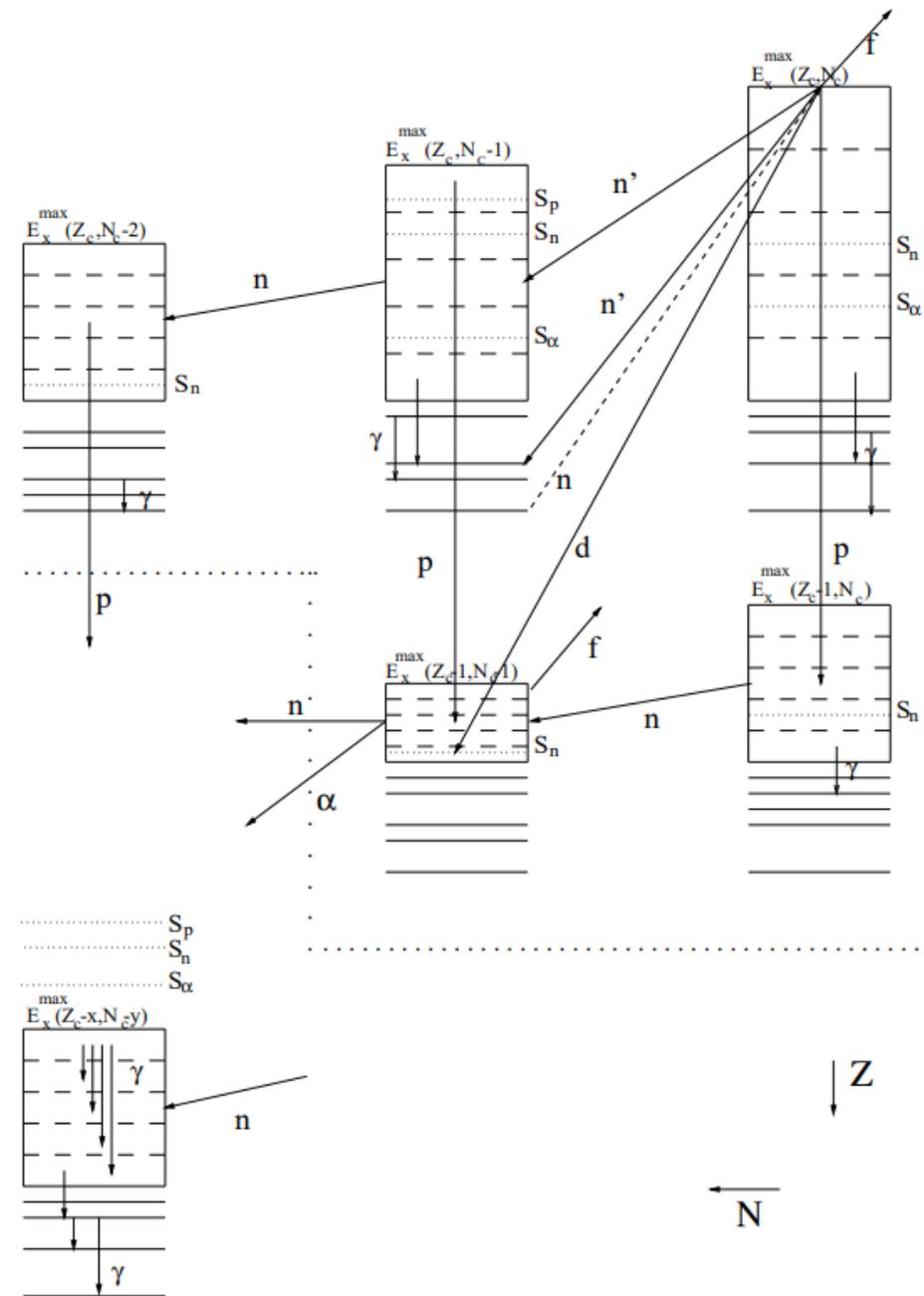
Подходы к вычислению плотности состояний:

1. Метод ферми-газа.

Bethe H. An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus // Physical Review. — 1936. — Vol. 50. — P. 332–341.

2. Комбинаторный расчёт.

Uhrenholt H., Aberg S., Möller P. et al. Combinatorial nuclear level-density model // Nuclear Physics A. — 2013. — Vol. 913. — P. 127.



Метод ферми-газа . Плотность многочастичных состояний

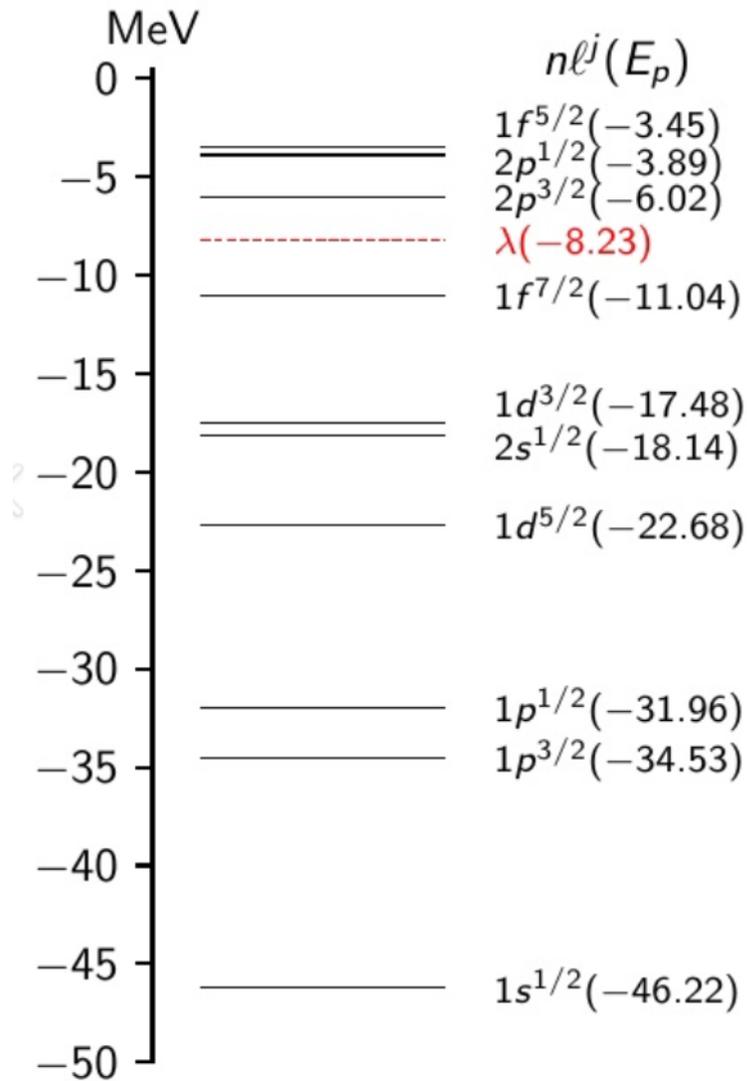
$$\omega(U) = \frac{\sqrt{\pi}}{12} \frac{e^{2\sqrt{aU}}}{a^{1/4}U^{5/4}},$$

где a – параметр плотности уровней

$$a = \frac{\pi^2}{6} g.$$

g – плотность одночастичных состояний вблизи энергии Ферми.

Комбинаторный расчёт. Одночастичные уровни ^{58}Ni



Набор одночастичных состояний получен методом Хартри-Фока с учётом теории Бардина-Купера-Шриффера

$$\{n, l, j, j_z, \varepsilon\}$$

Уровни

$$\{n, l, j, \varepsilon\}$$

Комбинаторный расчёт

Одночастичные состояния

$$\{n, l, j, j_z, \varepsilon\}$$



Многочастичные состояния

$$\underbrace{\{1, 1, \dots, 1, 1, 1, 0, 0, 0, \dots\}}$$

Основное состояние

$$\{1, 1, \dots, 1, 1, 0, 1, 0, 0, \dots\}$$

$$\{1, 1, \dots, 1, 0, 1, 1, 0, 0, \dots\}$$

$$\{1, 1, \dots, 0, 1, 1, 1, 0, 0, \dots\}$$

⋮

$$\{0, 1, \dots, 1, 1, 1, 1, 0, 0, \dots\}$$

$$\{1, 1, \dots, 1, 1, 0, 0, 1, 0, \dots\}$$

⋮

$$\{0, 1, \dots, 1, 1, 1, 0, 1, 0, \dots\}$$

$$\{1, 1, \dots, 1, 0, 0, 1, 1, 0, \dots\}$$

$$\{1, 1, \dots, 0, 1, 0, 1, 1, 0, \dots\}$$

⋮

$$\{1, 0, \dots, 1, 1, 0, 1, 1, 0, \dots\}$$

$$\{0, 1, \dots, 1, 1, 0, 1, 1, 0, \dots\}$$

$$\{1, 1, \dots, 0, 0, 1, 1, 1, 0, \dots\}$$

⋮

Комбинаторный расчёт

$$n(i) = \{1, 1, \dots, 1, 0, 0, 1, 1, 0, \dots\}$$

$$U_i = \sum_{j=1}^N (\varepsilon_F - \varepsilon_j(i))(1 - n_j(i)) + \sum_{j=N+1} (\varepsilon_j(i) - \varepsilon_F)n_j(i)$$

$$M_i = \sum_j m_j(i)n_j(i)$$

$$P_i = \prod_j p_j(i)n_j(i)$$

$$\omega(U, M, P) = \frac{\Delta N(P)}{\Delta U \Delta M}$$

Плотность уровней

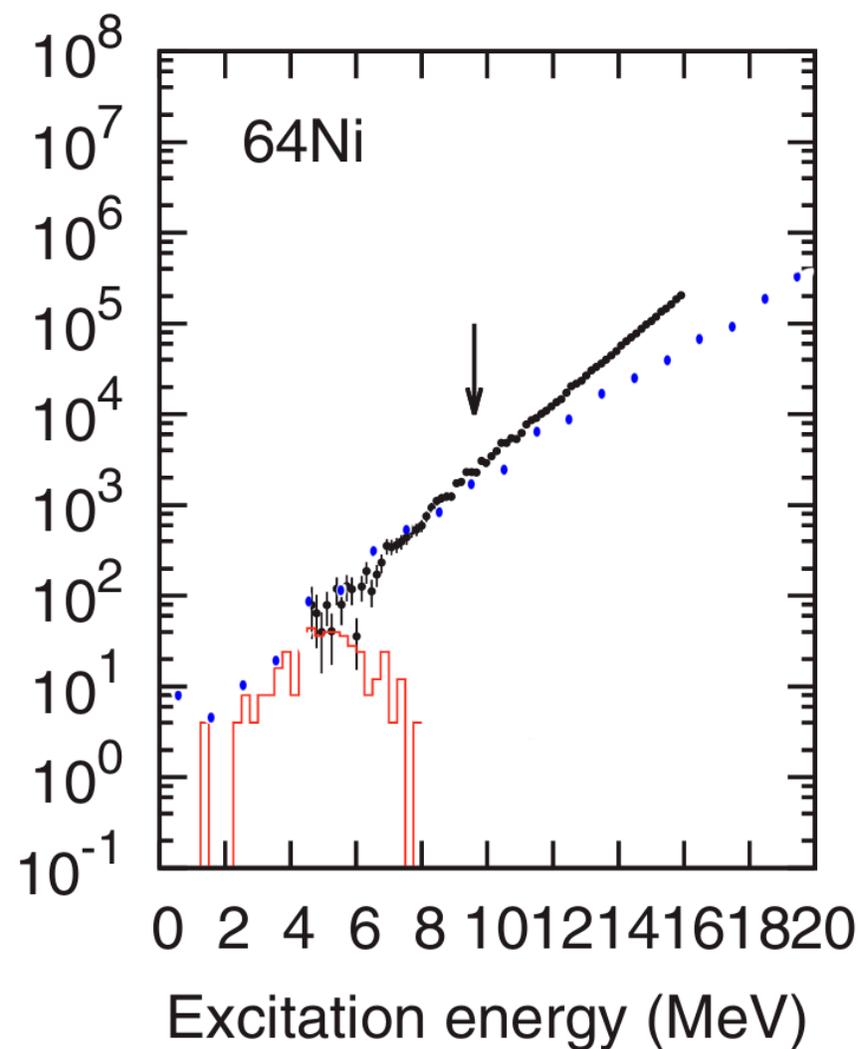
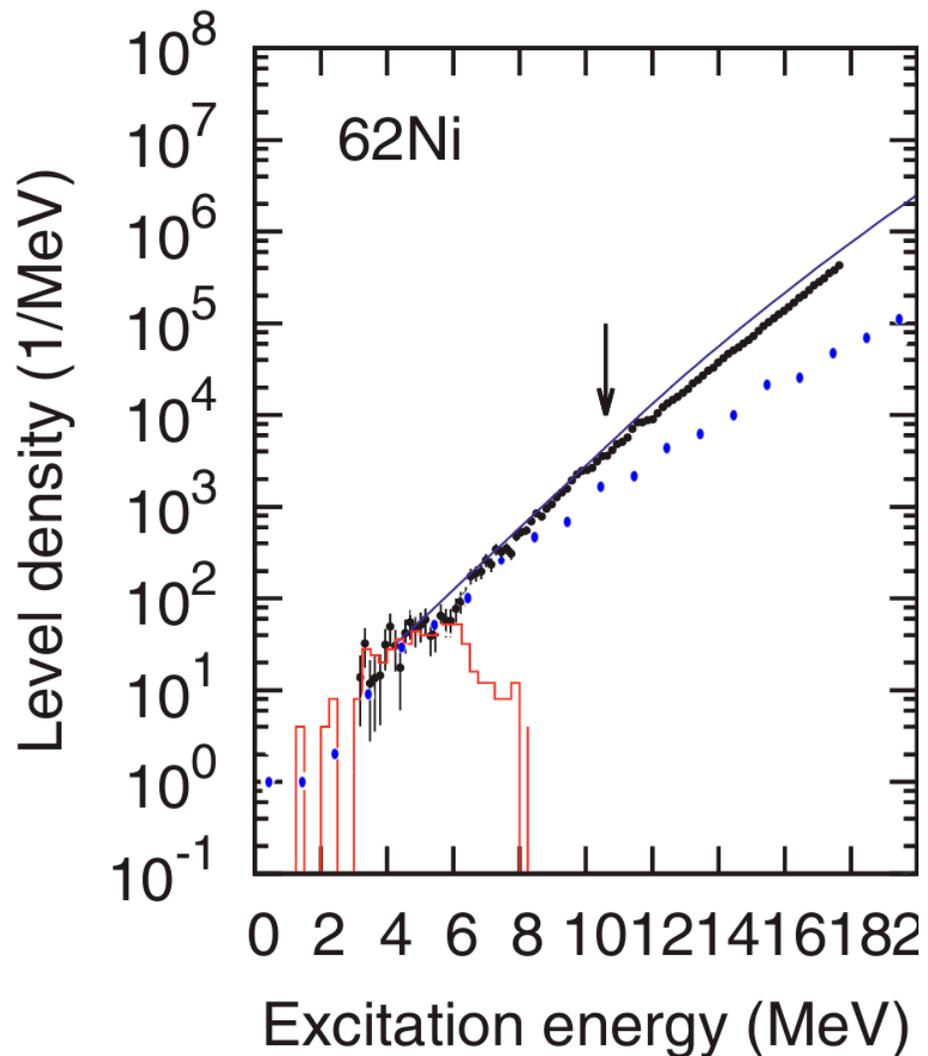
$$\rho(U, I, P) = \omega(U, M = I, P) - \omega(U, M = I + 1, P)$$

$$\rho(U, I, P) = \frac{\Delta N(P)}{\Delta U \Delta I}$$

$$\rho(U, P) = \sum_I \rho(U, I, P)$$

$$\rho(U) = \rho(U, P = +1) + \rho(U, P = -1)$$

Плотность уровней. Сравнение с экспериментом



Voinov A., Grimes S.,
Brune C. Recent
experimental results on
level densities for
compound reaction
calculations // EPJ Web of
Conferences. — 2012. —
Vol. 21. — P. 05001.

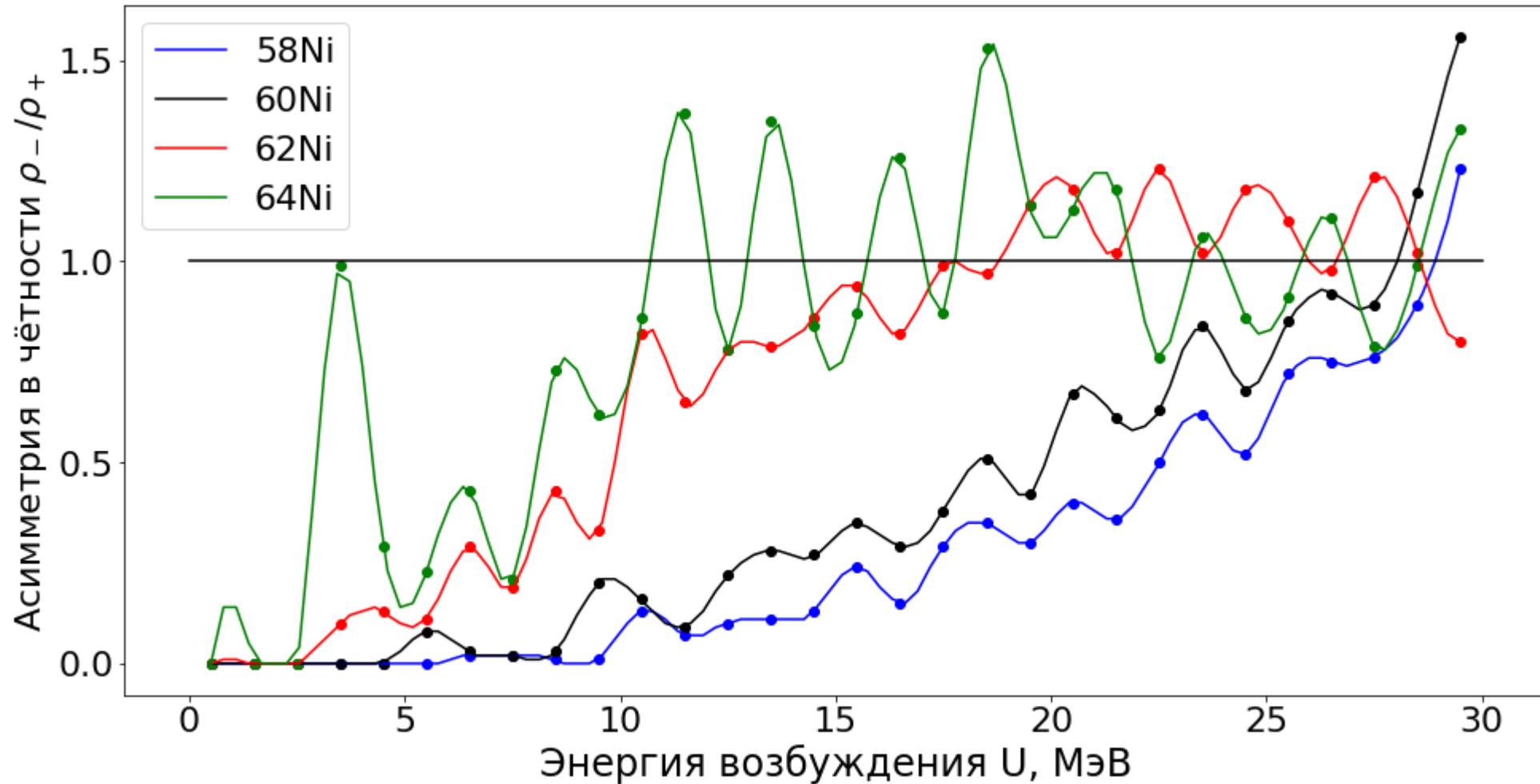
Асимметрия в чётности

$$\rho(U, I, P) = \frac{\Delta N(P)}{\Delta U \Delta I} \quad \rho(U, P) = \sum_I \rho(U, I, P)$$

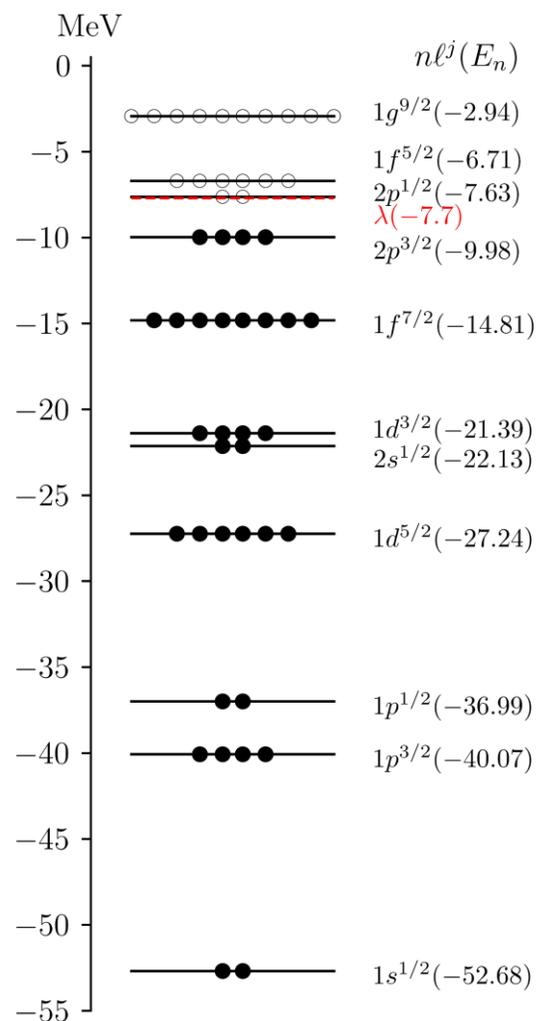
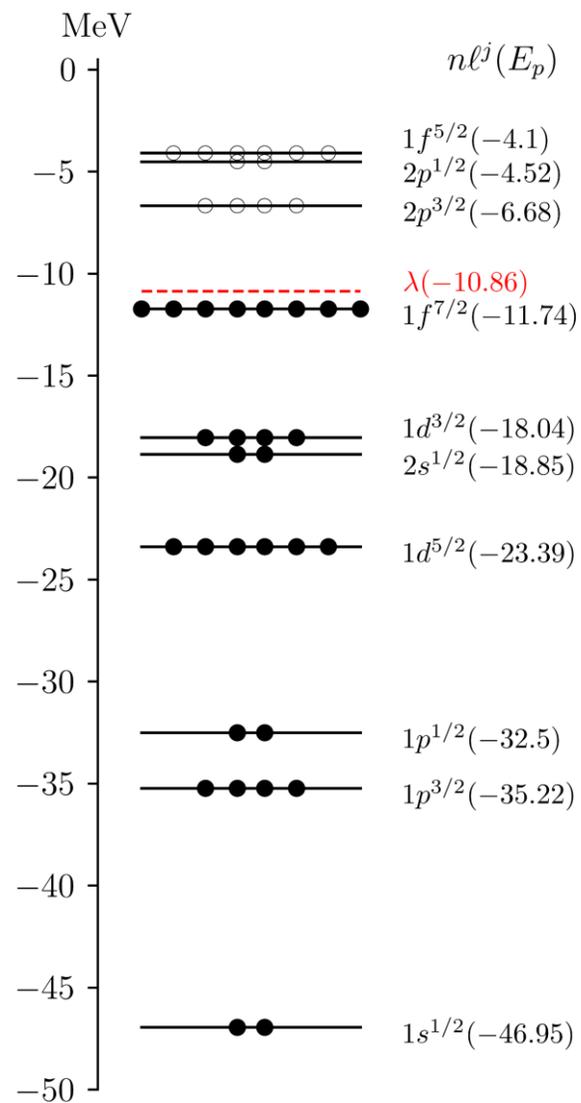
$$\rho(U) = \rho(U, P = +1) + \rho(U, P = -1)$$

$$A(U) = \frac{\rho(U, P = -1)}{\rho(U, P = +1)}$$

Асимметрия в чётности цепочки изотопов никеля

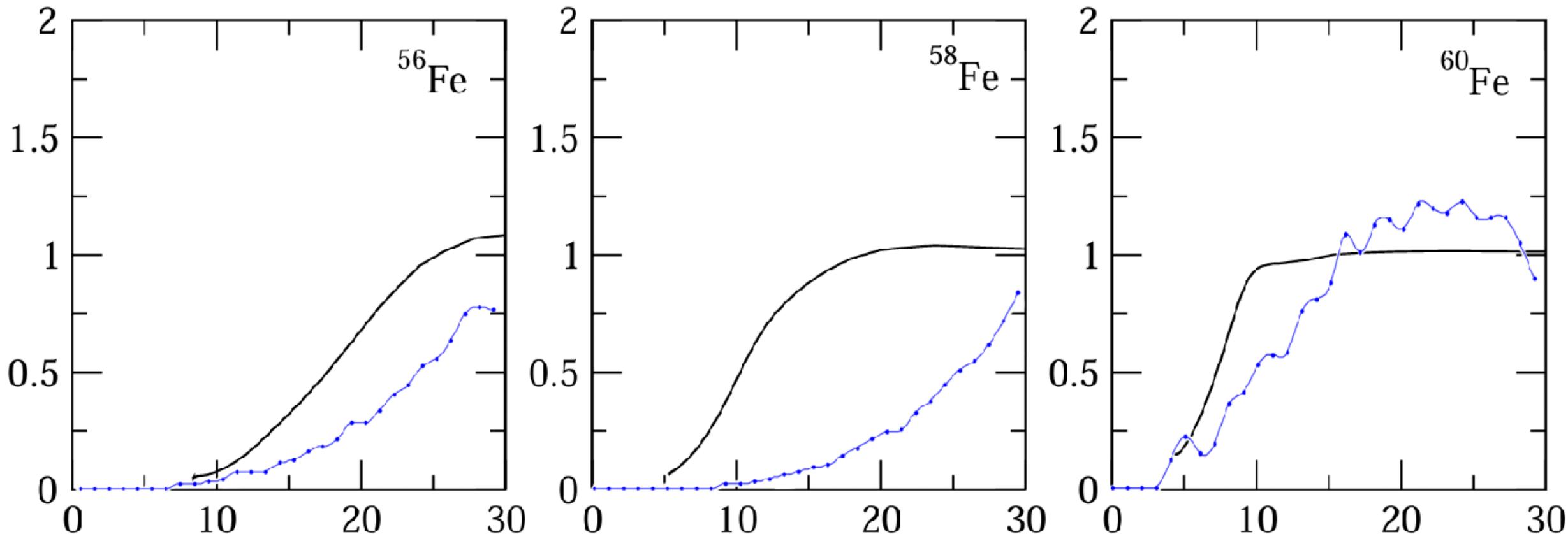


Одночастичные уровни ^{60}Fe



$$A(U) = \frac{\rho(U, P = -1)}{\rho(U, P = +1)}$$

Сравнение моделей. Асимметрия в чётности

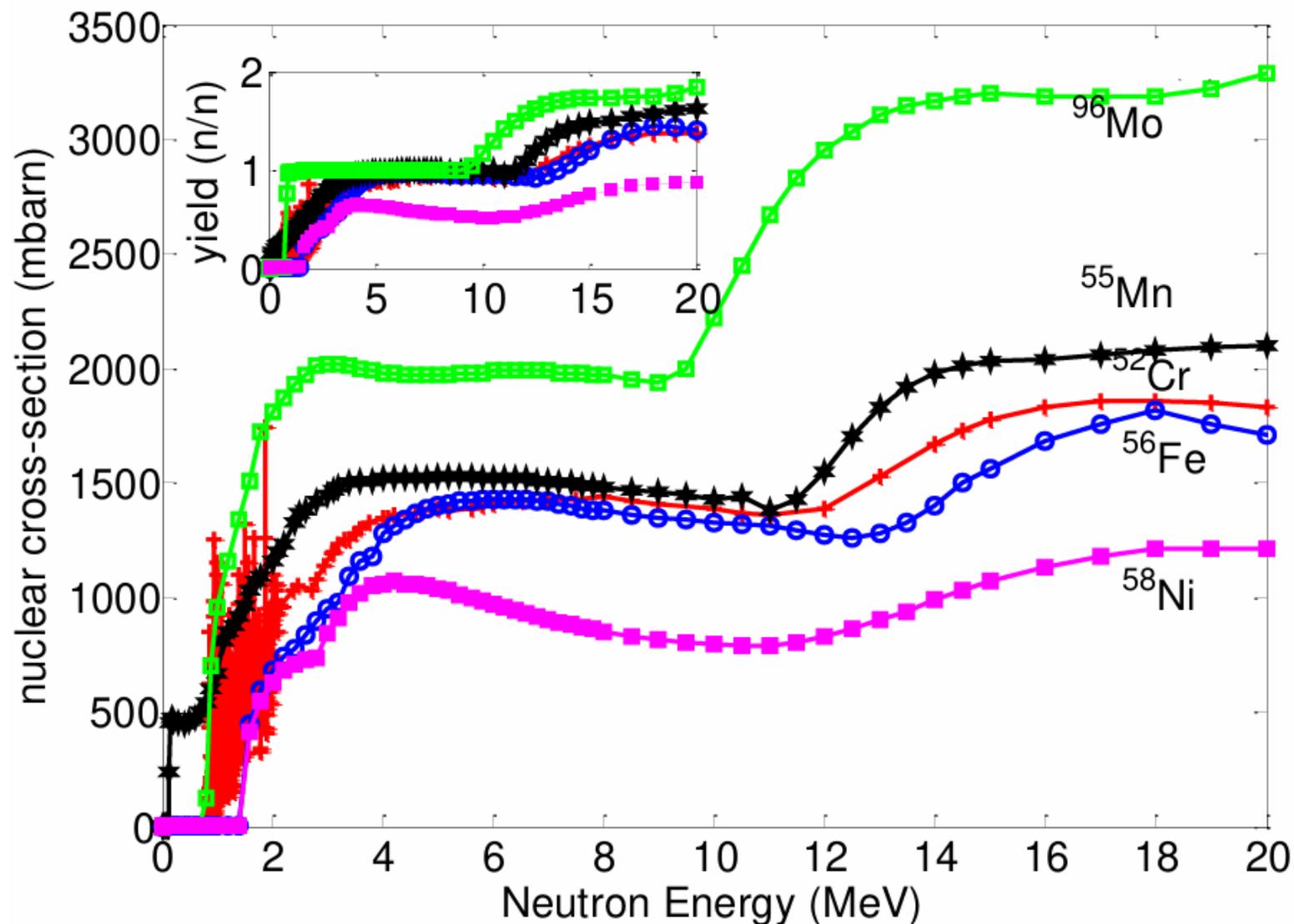


D. Mocalj [et al.]. Large-scale prediction of the parity distribution in the nuclear level density and application to astrophysical reaction rates // Phys. Rev. C. — 2007.— Vol. 75, Iss. 4. — P. 045805.

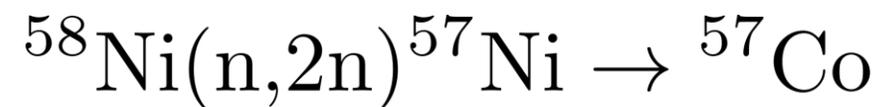
Заключение

- Произведено моделирование плотности уровней в комбинаторном подходе для изотопов Ni и Fe на новом одночастичном базисе, полученном в рамках метода Хартри-Фока с учётом эффекта спаривания нуклонов.
- Получены распределения плотности уровней в зависимости от энергии возбуждения. Проведено сравнение с экспериментальными данными для изотопов Ni. Наблюдается отклонение при энергии более 15 МэВ.
- Рассчитаны асимметрии чётности в зависимости от энергии возбуждения для цепочек изотопов Ni и Fe. Наблюдается разумное согласие с модельными данными других авторов.
- Эта методика может быть использована для моделирования плотности уровней деформированных ядер.

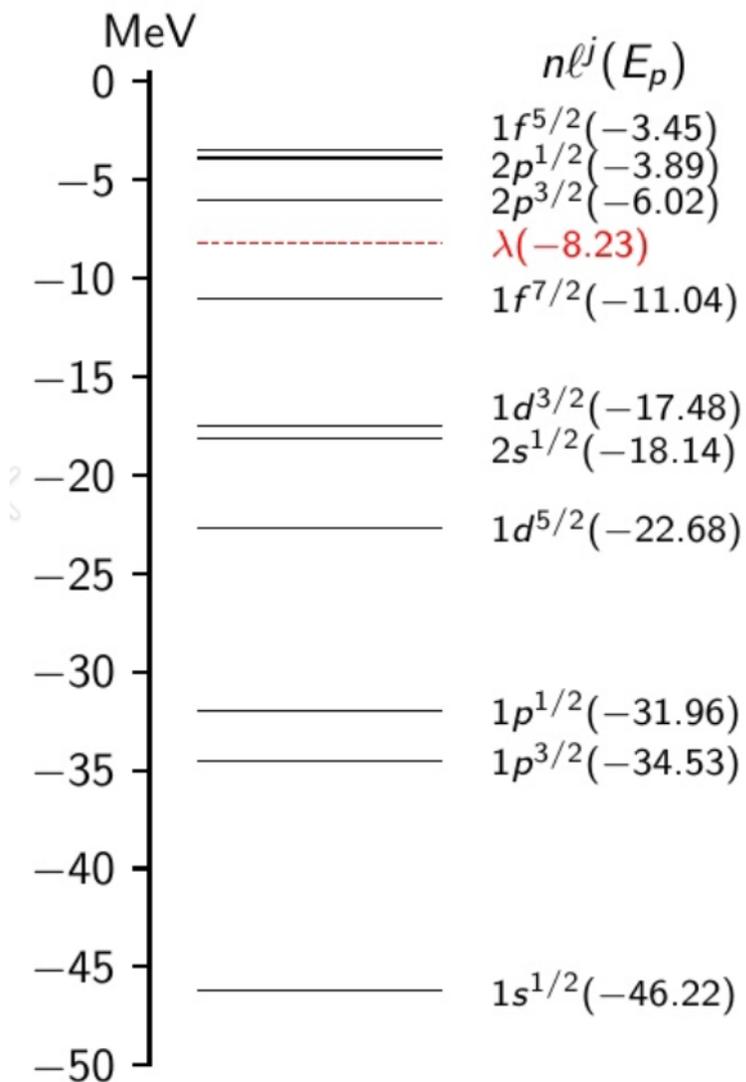
Дополнительные слайды.



Suryanto H., Kambali I. A Novel Method for ^{57}Ni and ^{57}Co Production using Cyclotron-Generated Secondary Neutrons // Atom Indonesia. 2018. V. 44(2), P. 81—87.



Расчёт в методе Хартри-Фока

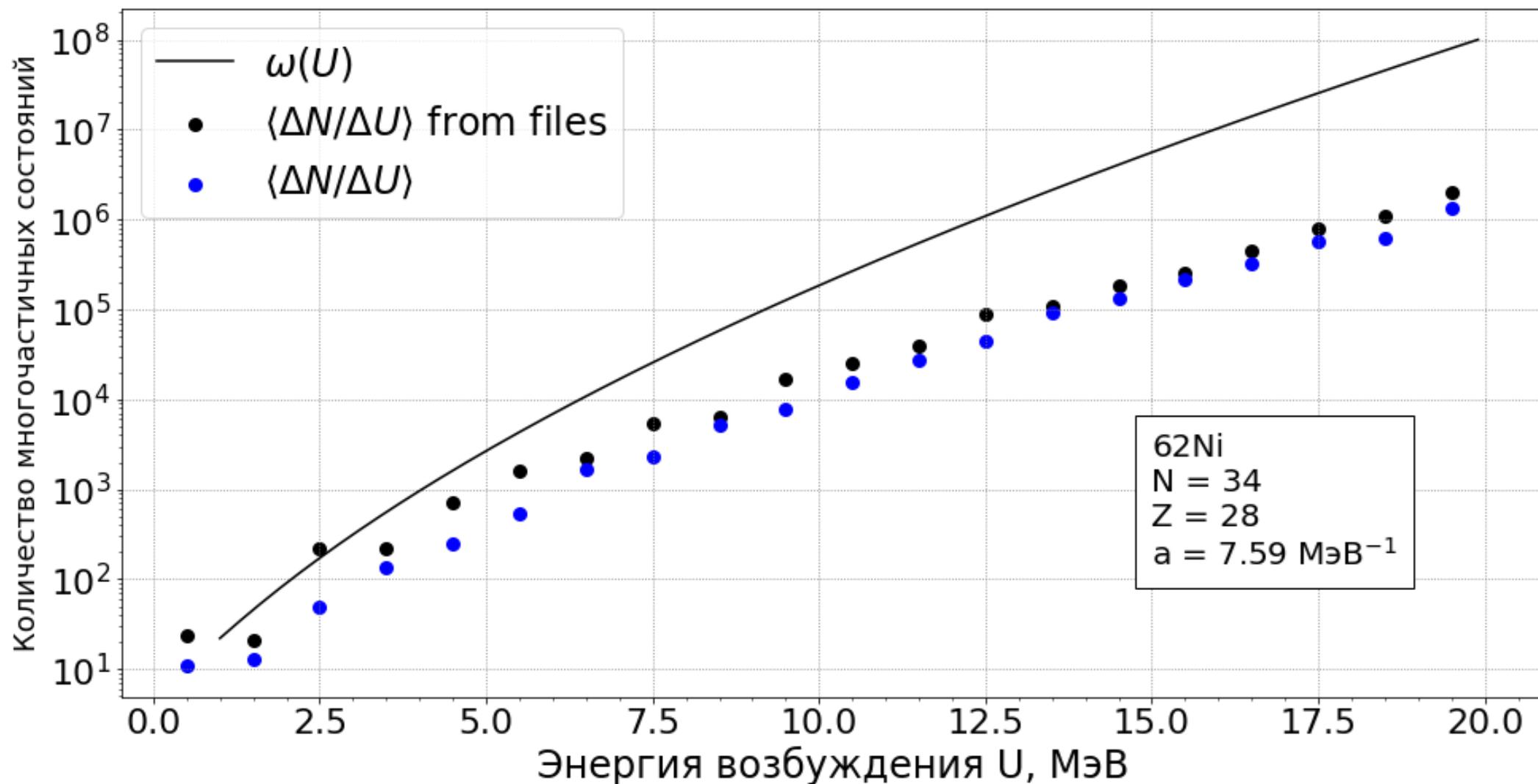


Набор одночастичных состояний зависит от энергии возбуждения ядра

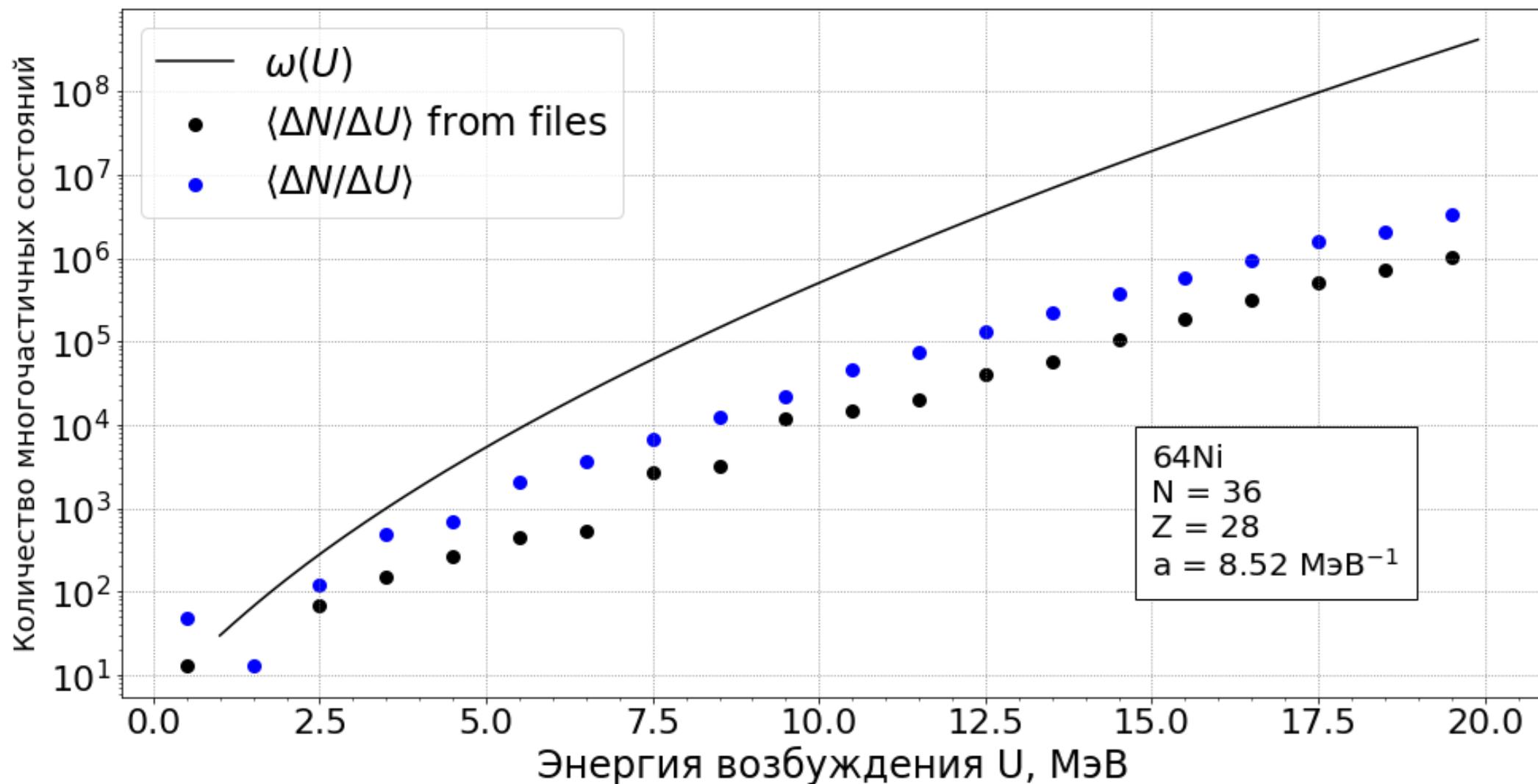
$$\{n, l, j, j_z, \varepsilon\}$$

Уровни
 $\{n, l, j, \varepsilon\}$

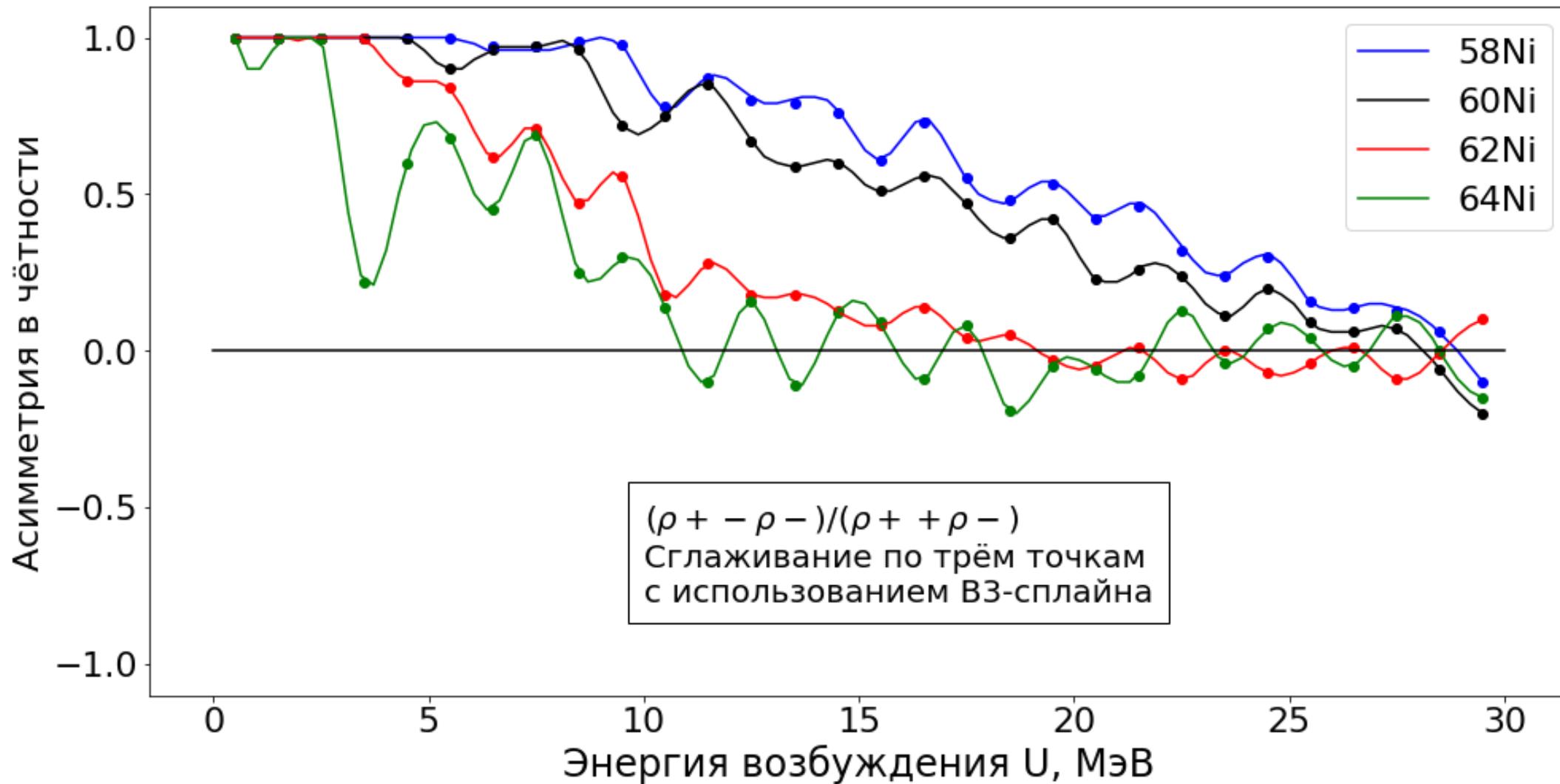
Сравнение моделей. Плотность многочастичных состояний



Сравнение моделей. Плотность многочастичных состояний



Сравнение моделей. Асимметрия в чётности



Список литературы

1. 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.
2. Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. Том 1. Одночастичное движение. — Мир, 1971.
3. Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. Том 2. Деформация ядер. — Мир, 1977.
4. 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.
5. Uhrenholt H., Aberg S., Moller P., Ichikawa T. Combinatorial nuclear level-density model // *Nuclear Physics A.* — 2013. — Т. 913. — С. 127.
6. Dobrowolski A., Pomorski K., Bartel J. Solving the eigenvalue problem of the nuclear Yukawa-folded mean-field Hamiltonian // *Computer Physics Communications.* — 2015. — Т. 199.
7. Bardeen J., Cooper L. N., Schrieffer J. R. Theory of Superconductivity // *Phys. Rev.* — 1957. — Т. 108, вып. 5. — С. 1175—1204. 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.
8. Соколов Ю. Плотность уровней атомных ядер. — Москва : Энергоатом, 1990.
9. Ring P., Shuck P. *The Nuclear Many-Body Problem.* — New York : Springer-Verlag, 1980. — 717 с.