



НИИЯФ МГУ имени Д.В. Скобельцына и физический
факультет МГУ имени М.В. Ломоносова



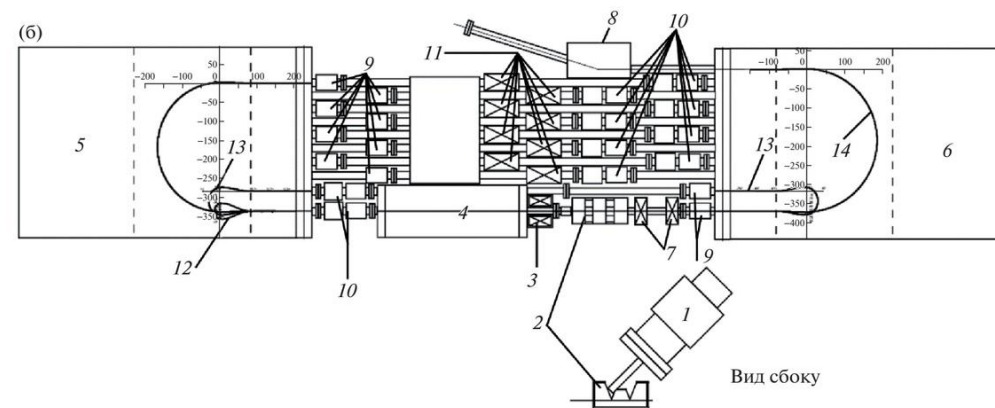
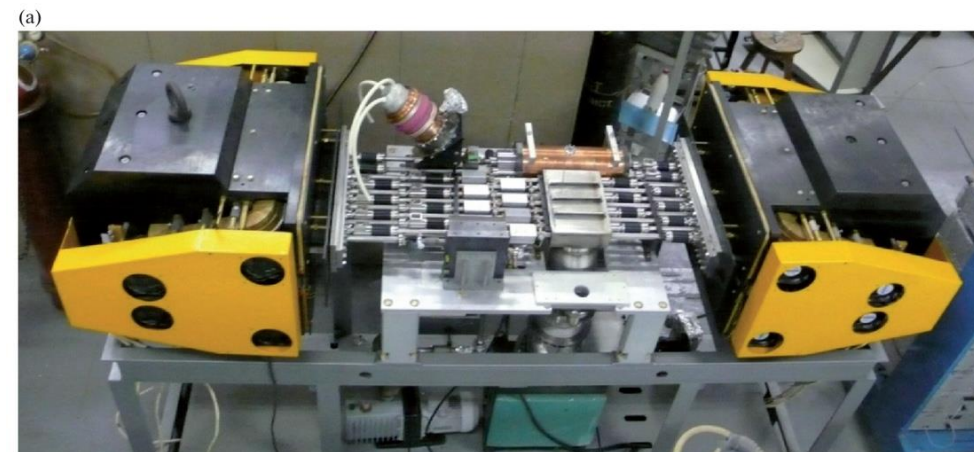
Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова
Фотоядерные исследования. Состояние и перспективы

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЕЗНОМ МИКРОТРОНЕ РМ-55 НИИЯФ МГУ

Докладчик: Н.Ю. Фурсова

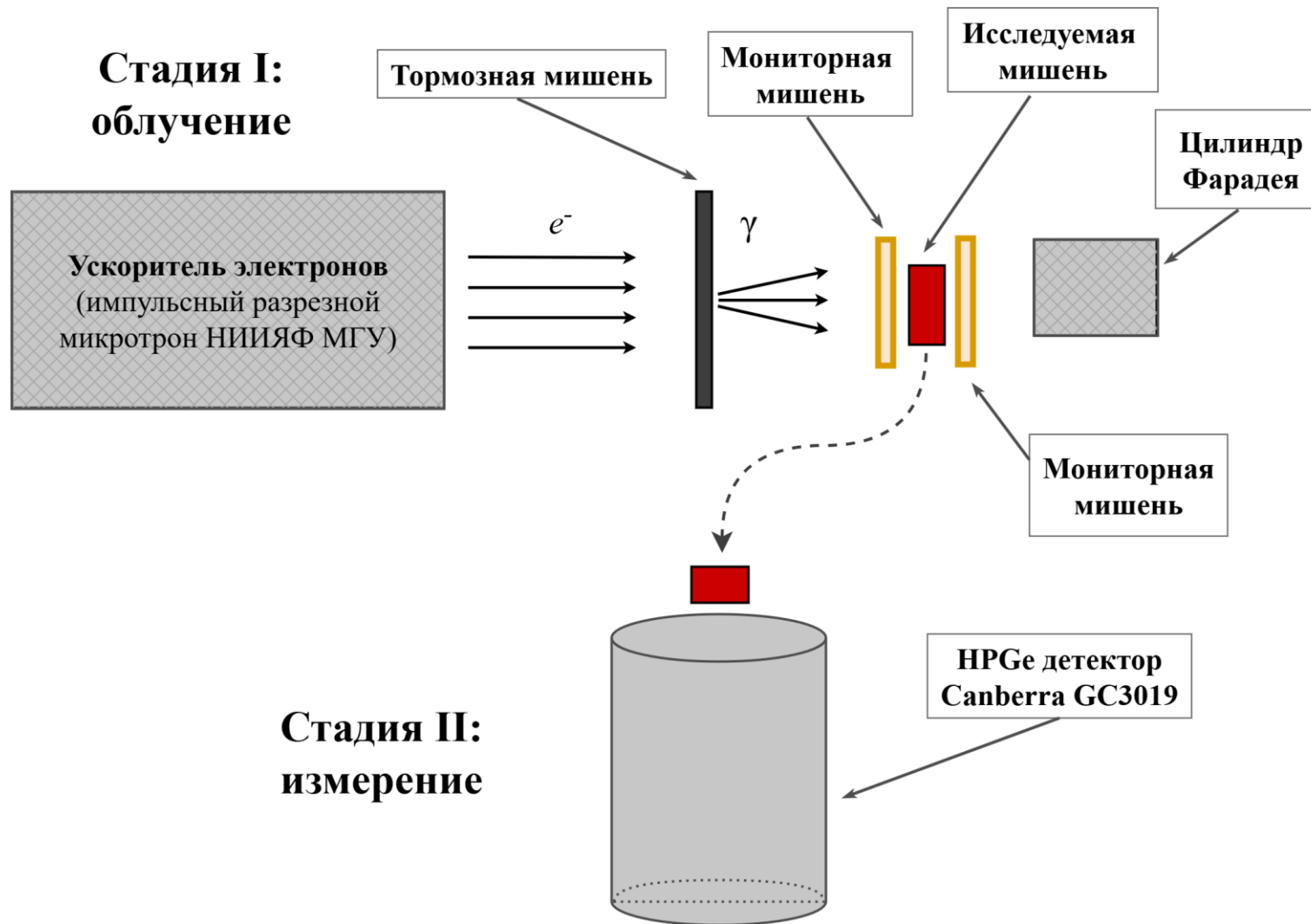
Преимуществами гамма-активационного метода изучения фотоядерных реакций являются:

- высокая чувствительность, позволяющая регистрировать реакции с малыми сечениями (фотопротонные, многонуклонные и т.д.);
- возможность идентификации реакции по конечному ядру, что, в отличие от методов прямой регистрации, позволяет эффективно разделять реакции различной множественности;
- возможность использования не только обогащенных, но и мишеней естественного изотопного состава, что позволяет в одном эксперименте проследить влияние массового числа на характеристики фотоядерных реакций;
- возможность изучения как короткоживущих, так и долгоживущих радиоактивных продуктов при соответствующем выборе условий облучения и измерения спектров.

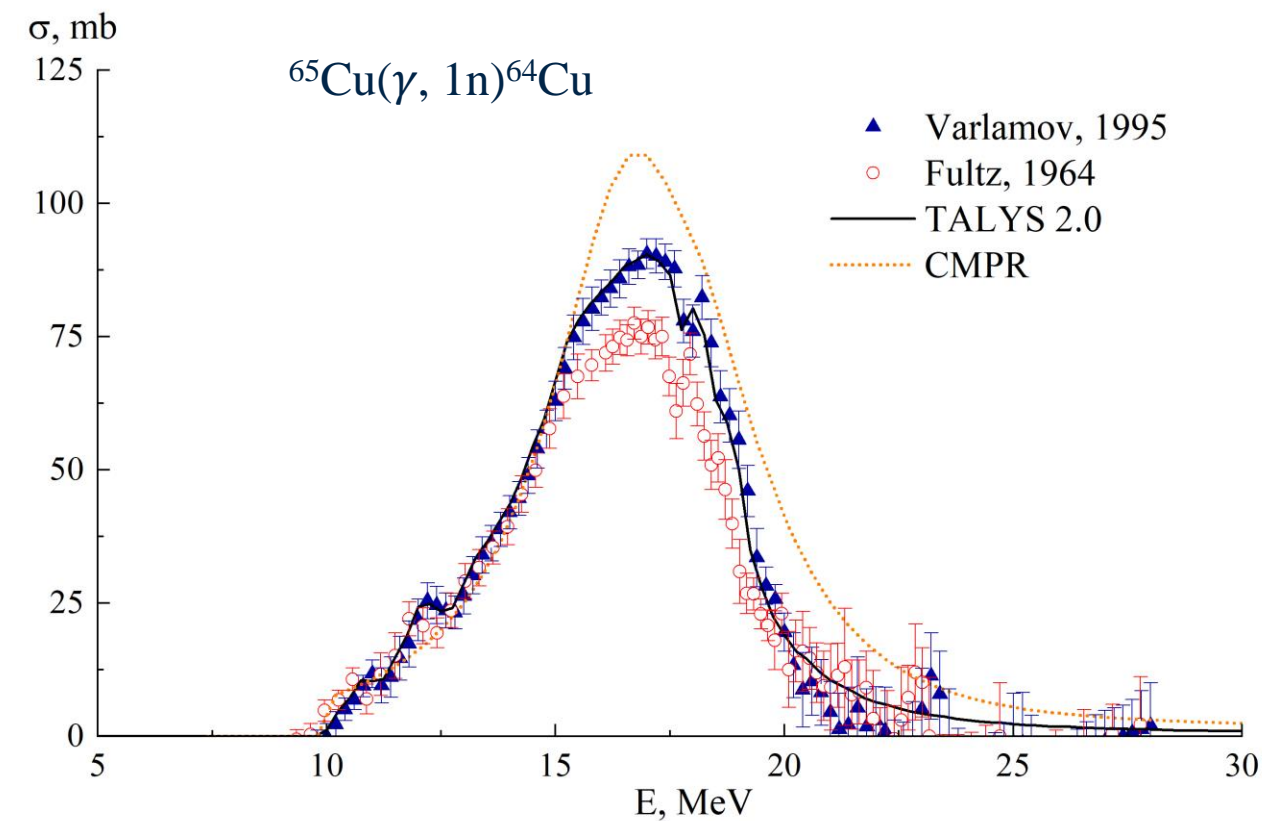


Общий вид и схема импульсного разрезного микротрона НИИЯФ МГУ с максимальной энергией 55 МэВ

Схема экспериментов, проводимых в НИИЯФ МГУ на ускорителе РМ-55

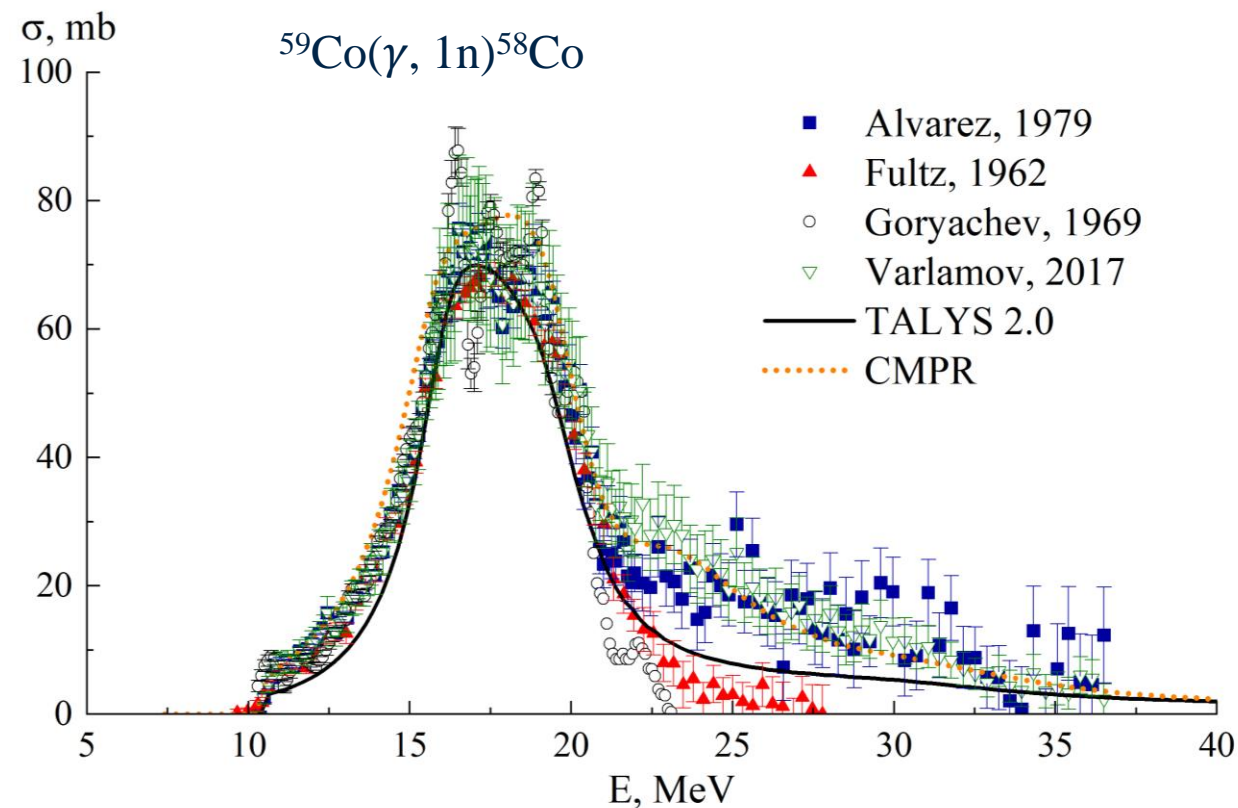


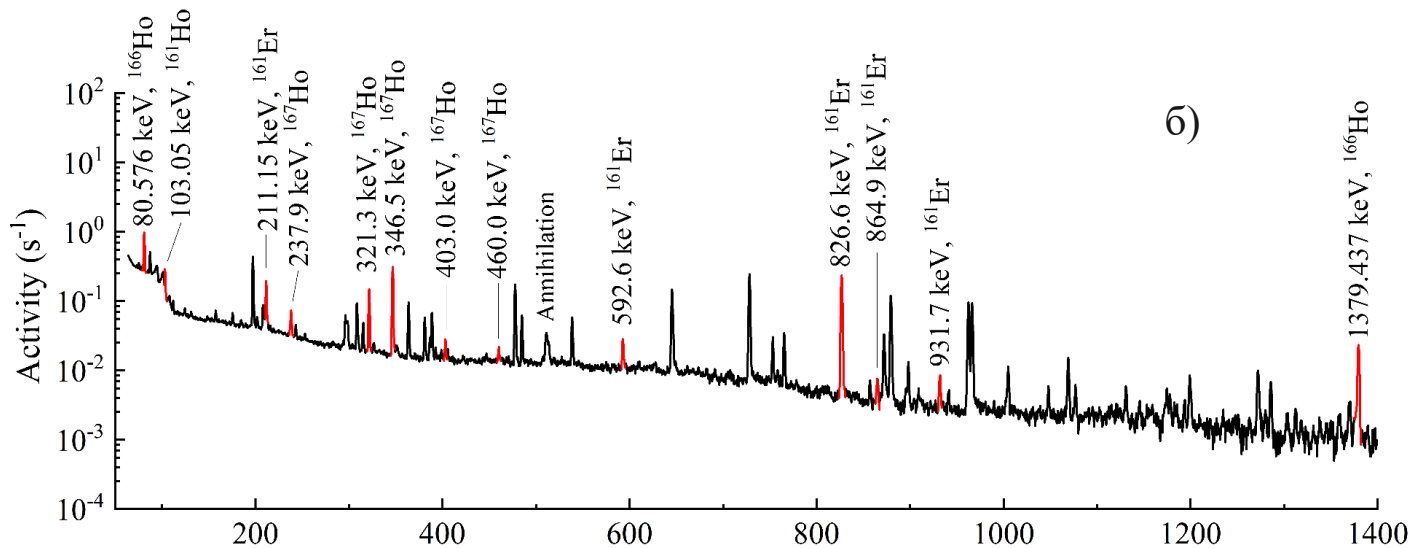
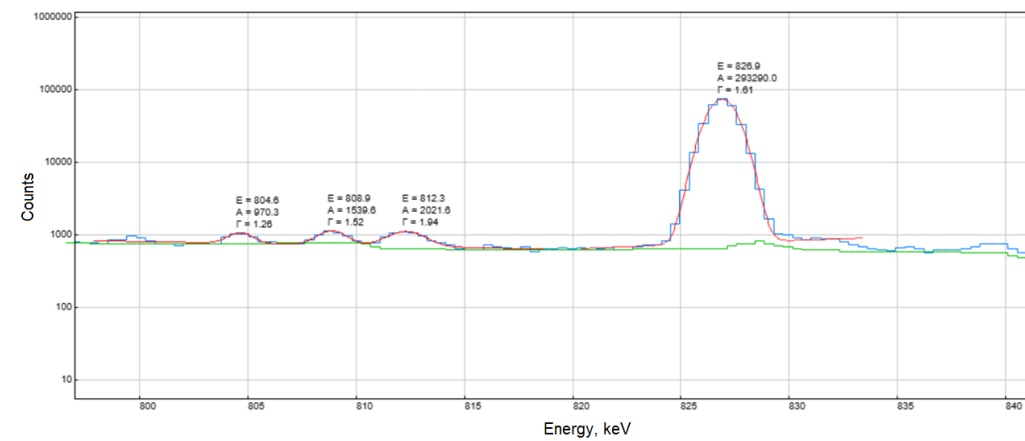
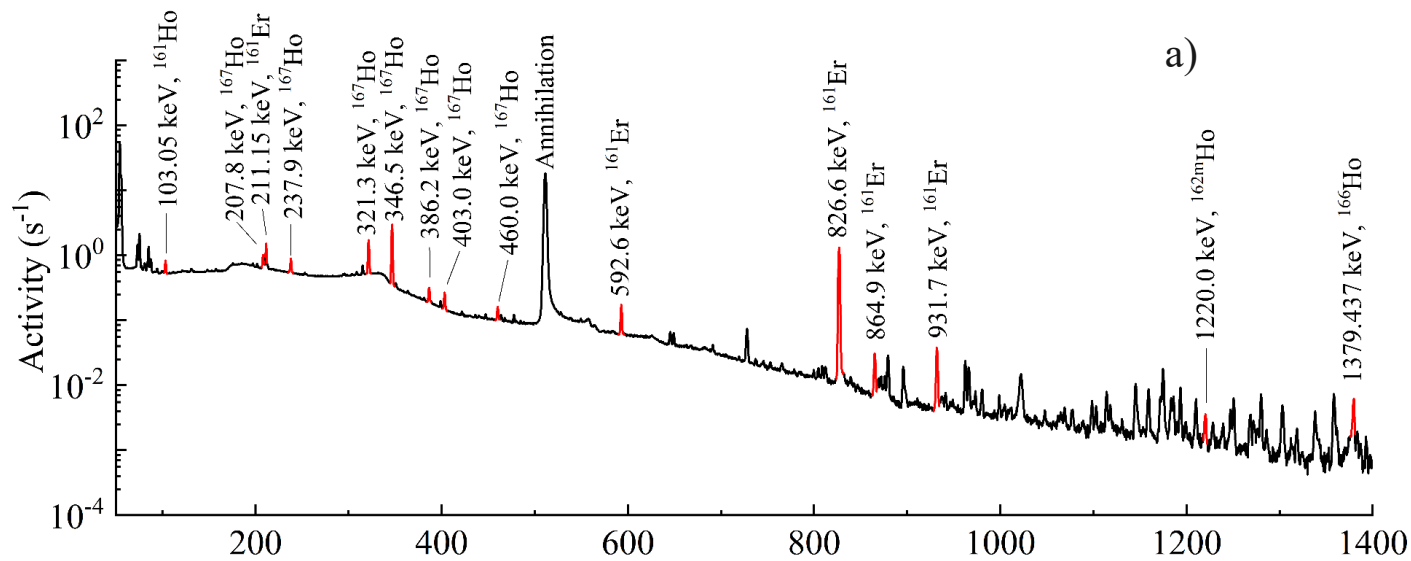
- Исследуемые мишени естественного изотопного состава.
- Тормозные вольфрамовые мишени толщиной 1 мм и 2.1 мм.
- Энергетическое разрешение детектора составляло 0.8 кэВ при энергии $E_\gamma=150$ кэВ и 1.9 кэВ при энергии $E_\gamma=1332$ кэВ.



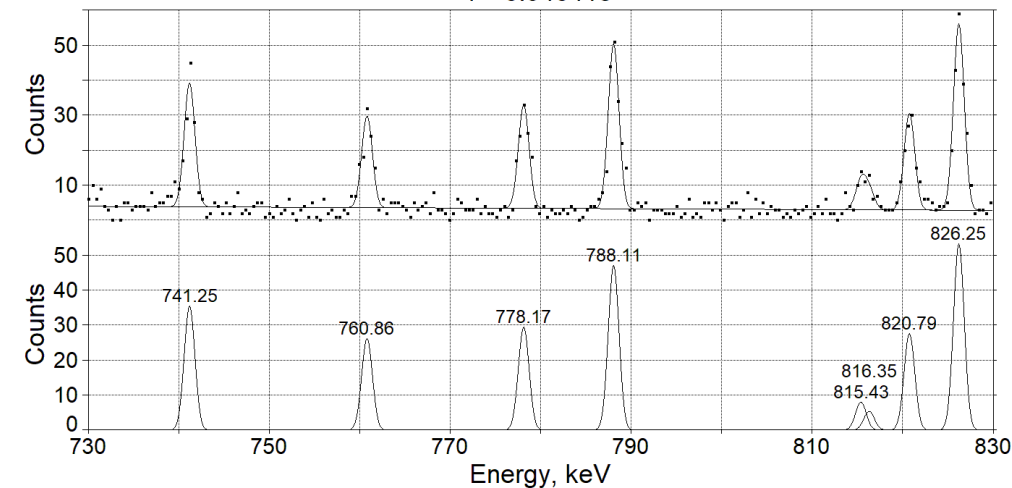
Сечения фотонейтронных реакций реакции $^{65}\text{Cu}(\gamma, 1n)^{64}\text{Cu}$ и $^{59}\text{Co}(\gamma, 1n)^{58}\text{Co}$, полученные в различных работах и рассчитанные на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Абсолютное значение тока вычислялось сравнением экспериментально измеренного и теоретического значений выходов на мониторе. В качестве мониторов использовались фольги из меди и кобальта.



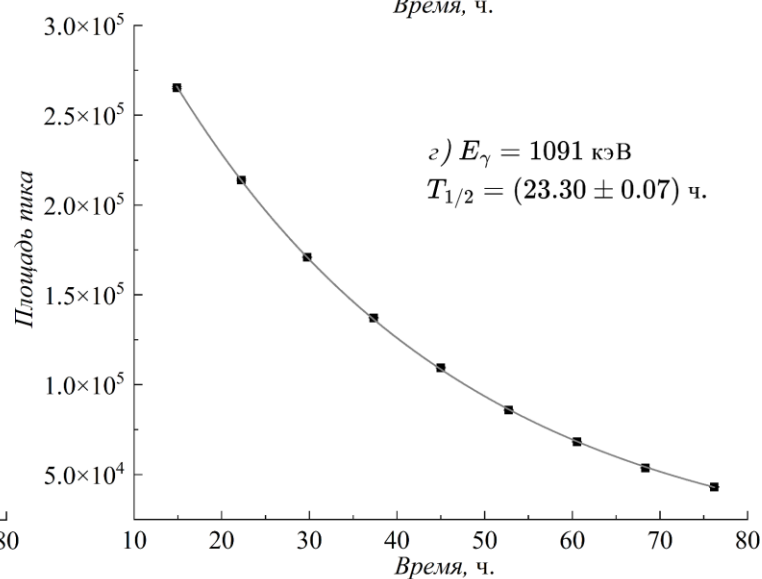
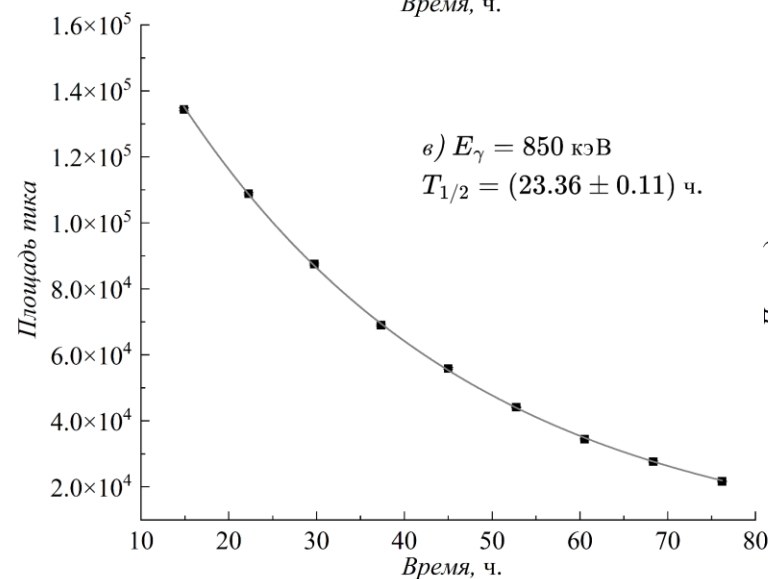
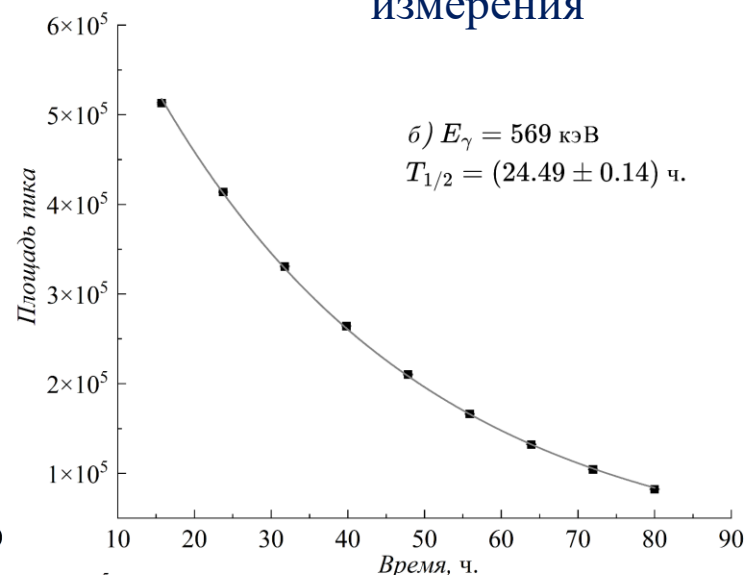
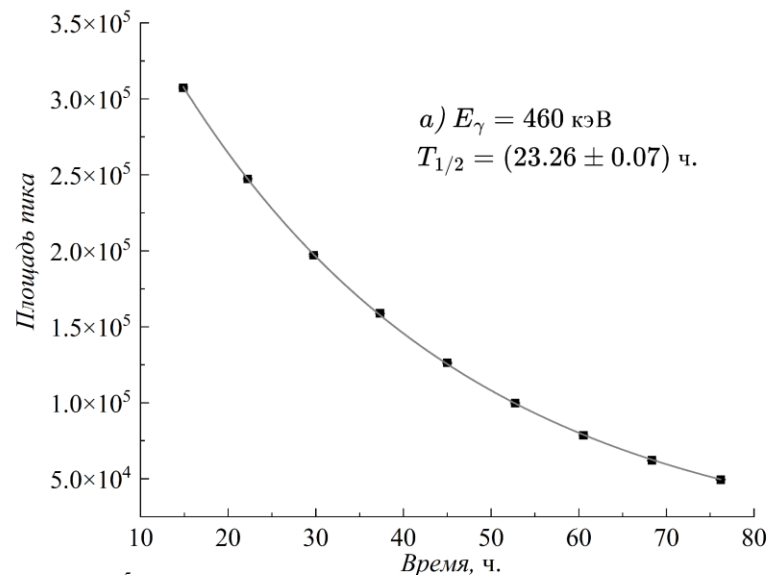


Peak type: Gauss Area, Baseline: Linear
r²=0.940415



Спектры остаточной активности облученного образца из природной смеси изотопов эрбия через 1 час и 1 день после окончания облучения. Время измерения спектров составляло 16 и 7 часов соответственно.

Методика определения периода полураспада изотопа по изменению площади пика с течением времени измерения



^{96}Nb ($T_{1/2} = 23.35$ h)

E_γ , кэВ	I_γ , %	$T_{1/2}$, ч
460	26.62	23.26 ± 0.07
569	58	24.49 ± 0.14
850	20.45	23.36 ± 0.11
1091	48.5	23.30 ± 0.07

Пики с энергиями 460, 569, 850 и 1091 кэВ соответствуют распаду изотопа ^{96}Nb .

Экспериментальные выходы реакций рассчитывались по площадям фотопиков (S_1, S_2) в спектрах остаточной активности:

Один канал
образования
изотопа

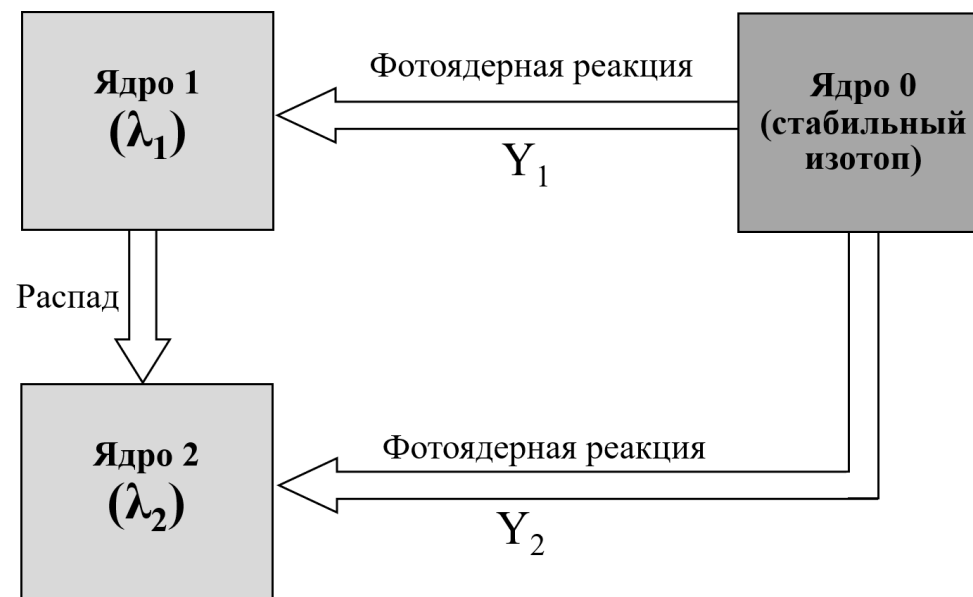
$$Y_1 = \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{I \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t_1})}$$

$$N_{10} = \frac{S_1}{\varepsilon_{\gamma 1} I_{\gamma 1} (e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}$$

Два канала
образования
изотопа

$$Y_2 = \frac{\lambda_2 \cdot N_{20}}{I(1 - e^{-\lambda_2 t_1})} - \chi Y_1 \frac{\lambda_2 \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t_1}) - \lambda_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t_1})}{(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_2 t_1})}$$

$$N_{20} = \frac{S_2}{\varepsilon_{\gamma 2} I_{\gamma 2} (e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)})} + \frac{\chi N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\lambda_1 - \lambda_2 \frac{e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)}}{e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)}} \right)$$



Y_1 и Y_2 - выходы образования ядер 1 и 2, χ - коэффициент распада родительского изотопа на дочерний, N_{10} и N_{20} - число ядер 1 и 2 на момент окончания облучения, $\varepsilon_{\gamma 1,2}$ - эффективности регистрации гамма-квантов определенной энергии, $I_{\gamma 1,2}$ - квантовые выходы, $\lambda_{1,2}$ - постоянные распада изотопов 1 и 2, I - средний ток ускорителя, t_1 - время облучения, t_2 - время начала измерения спектров, t_3 - время окончания измерения спектров.

Чтобы сравнить результаты разных экспериментов, необходимо предположить, что формы спектров тормозного излучения в сравниваемых экспериментах не различаются, и разница наблюдается только в общем количестве фотонов.

1. Среднее сечение, взвешенное по тормозному спектру:

Моноизотоп

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int_{E_{thr}}^{E^m} \sigma(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\int_{E_{thr}}^{E^m} W(E, E^m) dE}$$

Естественная смесь

$$\langle \sigma \rangle = \sum_i \eta_i \frac{\int_{E_{i thr}}^{E^m} \sigma_i(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\int_{E_{i thr}}^{E^m} W(E, E^m) dE}$$

2. Сечение на эквивалентный квант:

Моноизотоп

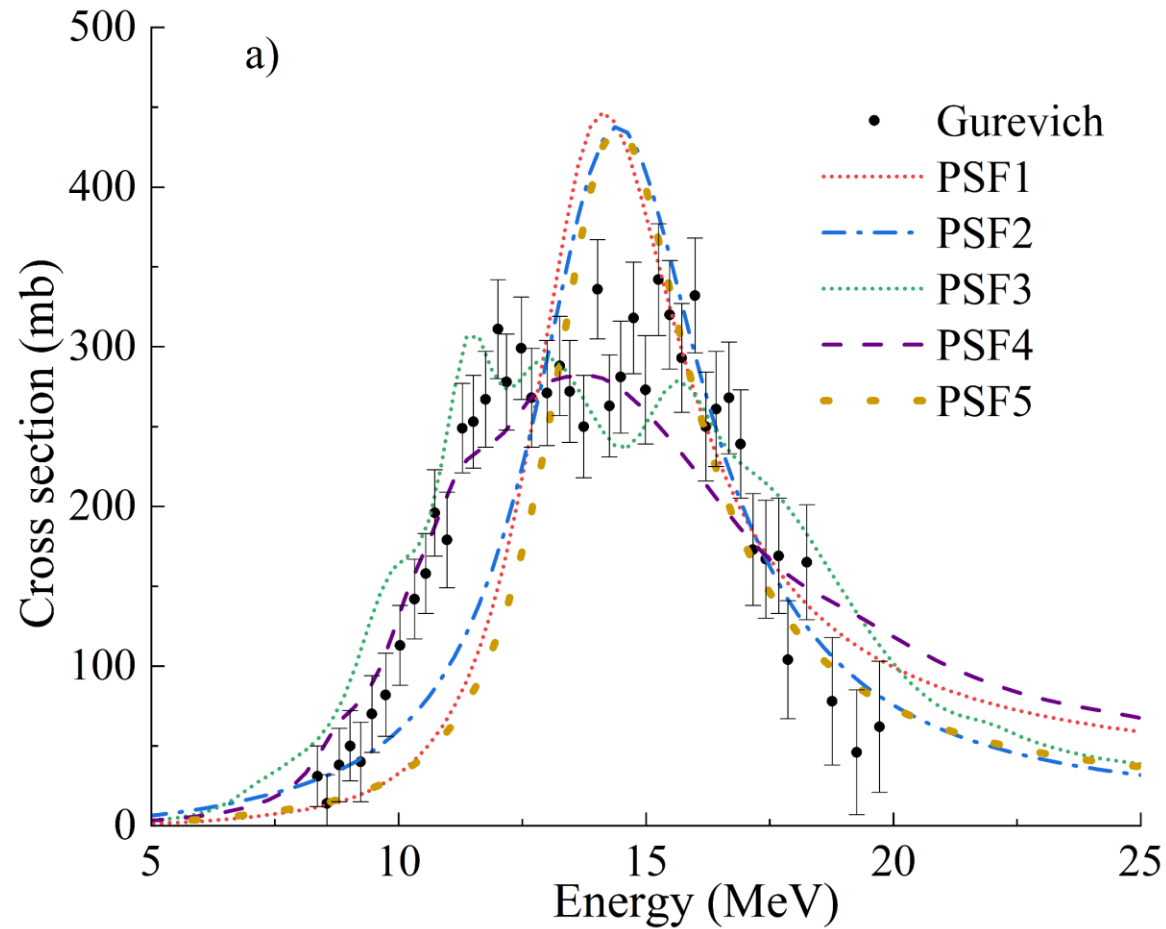
$$\sigma_q = \frac{\int_{E_{thr}}^{E^m} \sigma(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \cdot W(E, E^m) dE}$$

Естественная смесь

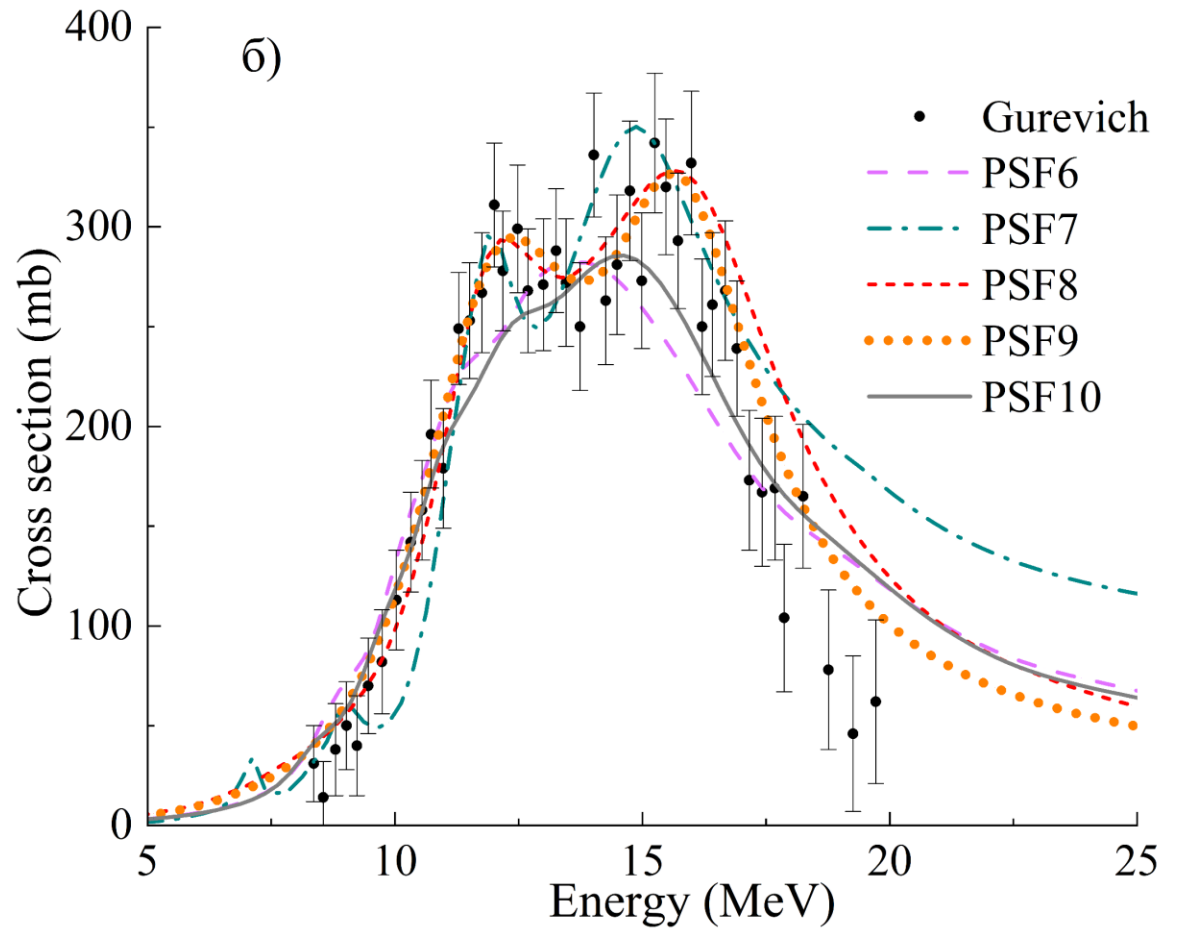
$$\sigma_q^{prod} = \frac{\sum_i \eta_i \int_{E_{i thr}}^{E^m} \sigma_i(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \cdot W(E, E^m) dE}$$

$E^m = 55$ МэВ - кинетическая энергия электронов, падающих на вольфрамовую мишень-конвертор, E - энергия тормозных гамма-квантов, E_{thr} - порог исследуемой фотоядерной реакции, $\sigma(E)$ - сечение исследуемой фотоядерной реакции, $W(E, E^m)$ – спектр тормозного излучения.

Сравнение экспериментальных данных для реакции $^{168}\text{Er}(\gamma, \text{abs})$ с расчетами по программе TALYS 2.0
с использованием различных фотонных силовых функций



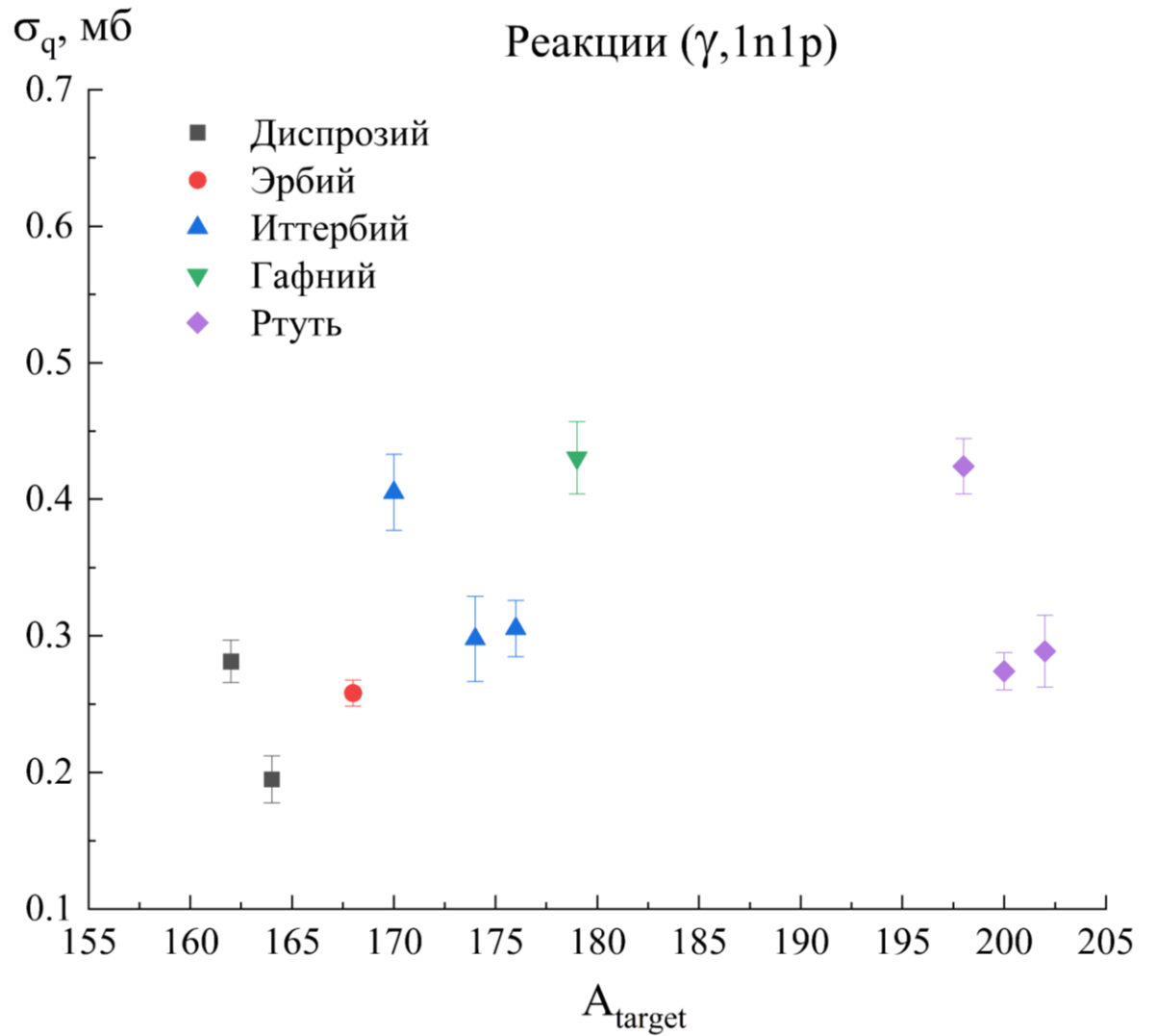
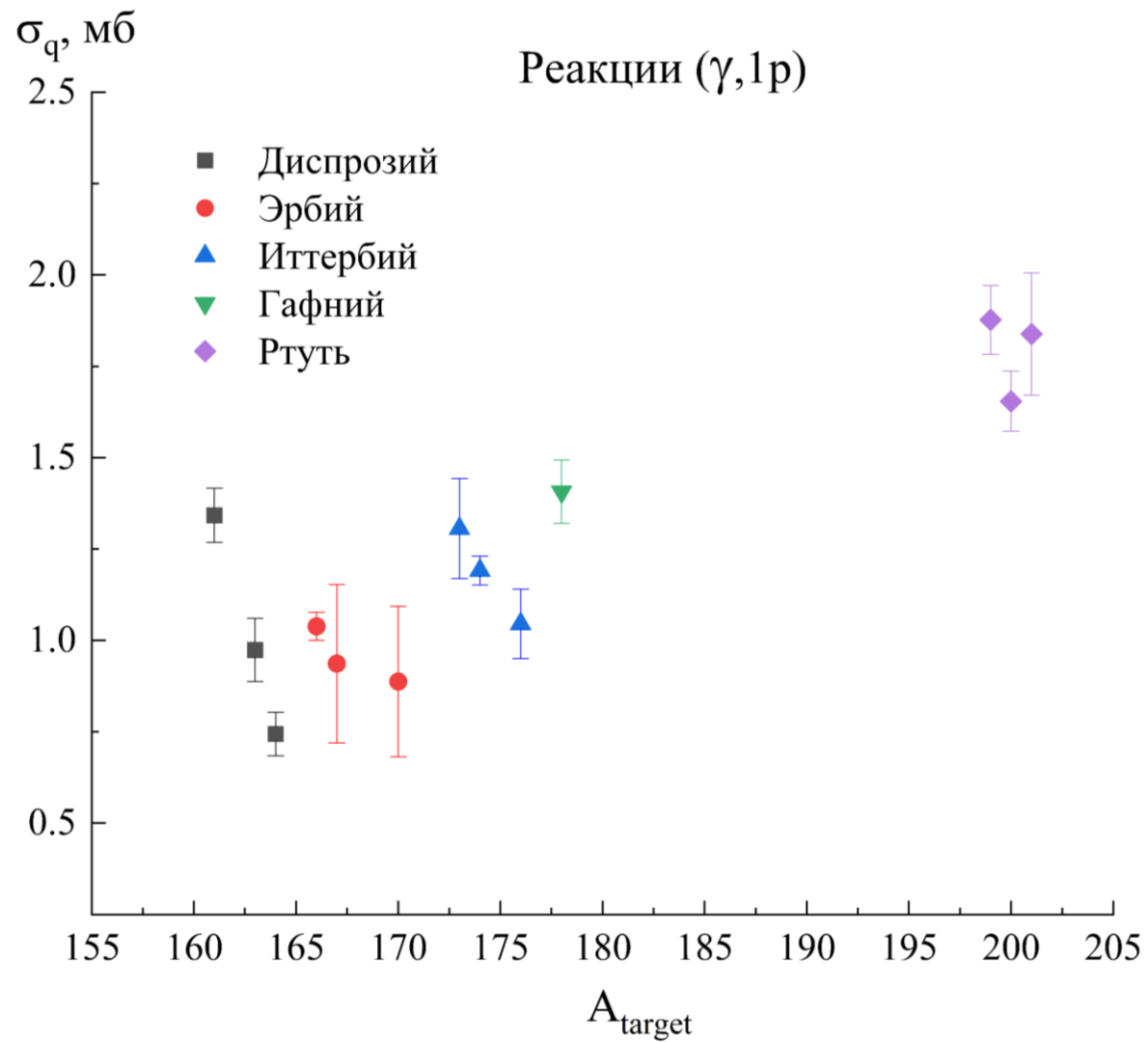
PSF 1. Kopecky-Uhl generalized Lorentzian;
 PSF 3. Hartree-Fock Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) tables;
 PSF 5. Goriely's hybrid model;
 PSF 7. Temperature-dependent Relativistic Mean Field (RMF);
 PSF 9. Simplified Modified Lorentzian (SMLO);



PSF 2. Brink-Axel Lorentzian;
 PSF 4. Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) tables;
 PSF 6. Goriely temperature-dependent HFB;
 PSF 8. Gogny D1M HFB+QRPA;
 PSF 10. Skyrme HFB+QRPA.

Сравнение сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на легких изотопах с Z=66, 68, 70, 72, 80

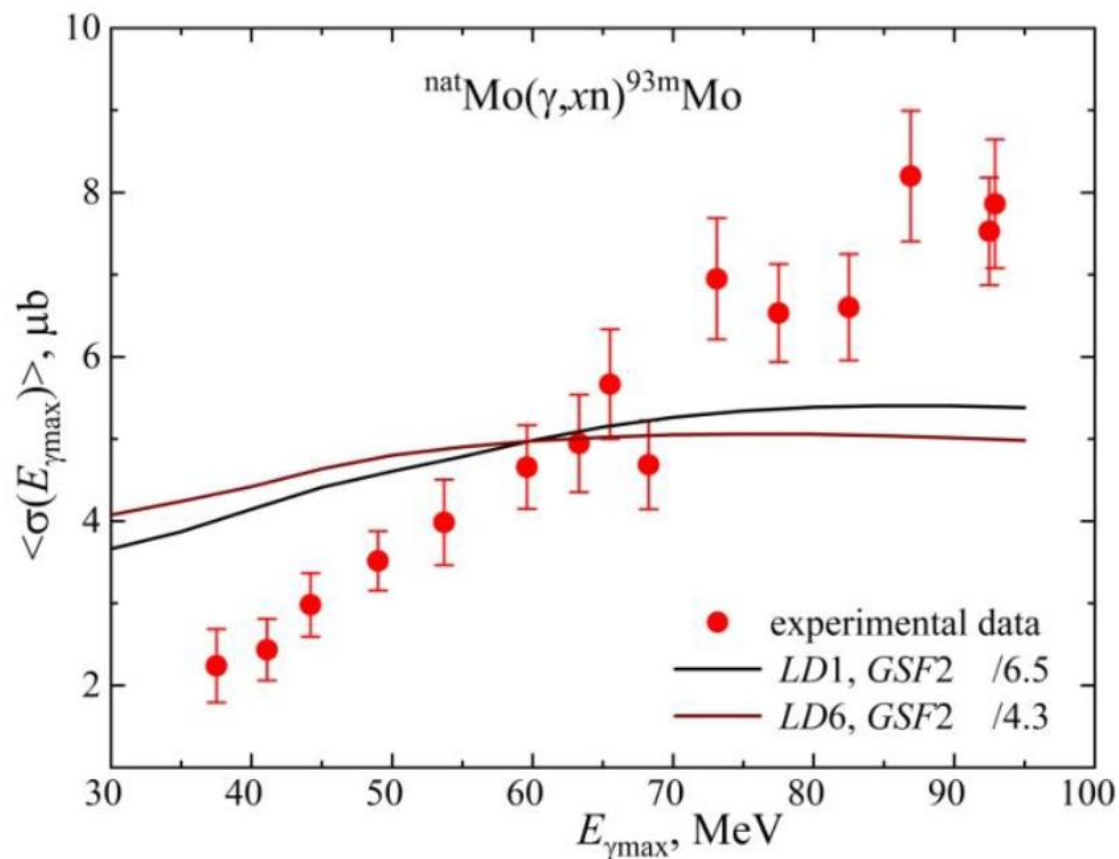
Изотоп	Реакция образования изотопа	E_{thr} , МэВ	$\sigma_{q\ exp}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\ CMPR}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\ TALYS}^{prod}$, мб
^{157}Dy	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, xn) =$ 0.00095 · $^{158}\text{Dy}(\gamma, 1n) +$ 0.02329 · $^{160}\text{Dy}(\gamma, 3n) +$ 0.18889 · $^{161}\text{Dy}(\gamma, 4n)$	9.05 24.46 30.92	0.465 ± 0.042	0.786 0.170 0.122 0.363	1.164 0.162 0.196 0.611
^{161}Er	$^{nat}\text{Er}(\gamma, xn) =$ 0.00139 · $^{162}\text{Er}(\gamma, 1n) +$ 0.01601 · $^{164}\text{Er}(\gamma, 3n) +$ 0.33503 · $^{166}\text{Er}(\gamma, 5n)$	9.20 24.96 40.08	0.308 ± 0.026	0.459 0.283 0.074 0.100	0.539 0.266 0.122 0.145
^{166}Yb	$^{nat}\text{Yb}(\gamma, xn) =$ 0.00123 · $^{168}\text{Yb}(\gamma, 2n) +$ 0.02982 · $^{170}\text{Yb}(\gamma, 4n) +$ 0.14086 · $^{171}\text{Yb}(\gamma, 5n)$	16.13 31.45 38.07	0.143 ± 0.017	0.303 0.047 0.090 0.166	0.339 0.052 0.105 0.170
^{167}Yb	$^{nat}\text{Yb}(\gamma, xn) =$ 0.00123 · $^{168}\text{Yb}(\gamma, 1n) +$ 0.02982 · $^{170}\text{Yb}(\gamma, 3n) +$ 0.14086 · $^{171}\text{Yb}(\gamma, 4n)$	9.06 24.39 31.00	0.688 ± 0.052	0.931 0.231 0.177 0.320	1.288 0.216 0.276 0.554
^{173}Hf	$^{nat}\text{Hf}(\gamma, xn) =$ 0.0016 · $^{174}\text{Hf}(\gamma, 1n) +$ 0.0526 · $^{176}\text{Hf}(\gamma, 3n) +$ 0.1860 · $^{177}\text{Hf}(\gamma, 4n)$	8.51 23.28 29.76	1.01 ± 0.06	1.48 0.31 0.35 0.46	2.08 0.29 0.53 0.77
^{195}Hg	$^{nat}\text{Hg}(\gamma, in) =$ 0.0015 · $^{196}\text{Hg}(\gamma, 1n) +$ 0.0997 · $^{198}\text{Hg}(\gamma, 3n) +$ 0.1687 · $^{199}\text{Hg}(\gamma, 4n)$	8.90 24.17 30.83	1.37 ± 0.08	1.411 0.386 0.563 0.376	1.952 0.348 0.915 0.545



Сравнение сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах с $Z=66, 68, 70, 72, 80$

Фотоядерные реакции на ^{92}Mo

Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	$\sigma_{q \text{ exp}}^{\text{prod}}$, мб	$\sigma_{q \text{ CMPR}}^{\text{prod}}$, мб	$\sigma_{q \text{ TALYS}}^{\text{prod}}$, мб
$^{91\text{m}+\text{g}}\text{Mo}$	g: 15.49 мин. ($9/2^+$) m: 65 с. ($1/2^-$)	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in})=$ $0.14649 \cdot ^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\text{n})+$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 3\text{n})+$ $0.15873 \cdot ^{95}\text{Mo}(\gamma, 4\text{n})$	12.67 30.42 37.79	7.44 ± 0.39	7.25 7.23 0.02 $3.4 \cdot 10^{-3}$	7.83 7.76 0.06 0.01
^{90}Mo	5.56 ч.	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in})=$ $0.14649 \cdot ^{92}\text{Mo}(\gamma, 2\text{n})+$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 4\text{n})$	22.78 40.53	0.282 ± 0.015	0.283 0.281 0.002	0.537 0.534 0.003
^{90}Nb	g: 14.6 ч. (8^+) m: 18.91 с. (4^-)	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in}1\text{p})=$ $0.14649 \cdot ^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\text{n}1\text{p})+$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 3\text{n}1\text{p})$	19.51 37.25	0.375 ± 0.022	0.360 0.357 0.003	0.739 0.731 0.008
$^{89\text{m}+\text{g}}\text{Nb}$	g: 2.03 ч. ($9/2^+$) m: 66.0 мин. ($1/2^-$)	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in}1\text{p})=$ $0.14649 \cdot ^{92}\text{Mo}(\gamma, 2\text{n}1\text{p})+$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 4\text{n}1\text{p})$	29.61 47.36	0.111 ± 0.010	0.058 0.058 $1.03 \cdot 10^{-6}$	0.130 0.130 $1.46 \cdot 10^{-5}$
$^{91\text{m}}\text{Nb}$	60.86 дн.	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in}1\text{p})=$ $0.14649 \cdot ^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\text{p})+$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 2\text{n}1\text{p})+$ $0.15873 \cdot ^{95}\text{Mo}(\gamma, 3\text{n}1\text{p})$	7.56 25.31 32.67	4.08 ± 0.29	5.95 (m+g) 5.81 0.10 0.03	6.71 6.59 0.09 0.02



Усредненное по потоку сечение $\langle \sigma(E_{\gamma \max}) \rangle_m$ для образования ядра ^{93m}Mo на ^{nat}Mo . Черная линия - расчет для вариантов LD1, GSF2, деленных на 6.5, коричневая линия – расчет LD6, GSF2, деленных на 4.3. Красные точки - экспериментальные данные [1].

[1] На природной смеси изотопов молибдена с помощью электронного пучка ускорителя ЛУЭ-40 были измерены усредненные по потоку сечения реакции $^{nat}\text{Mo}(\gamma, xn)^{93m}\text{Mo}$ при энергиях от 38 до 93 МэВ.

[2] Измерены выходы фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов молибдена при энергии 55.6 МэВ (НИИЯФ МГУ).

$$Y_{\text{exp}}(^{93m}\text{Mo}) = (2.40 \pm 0.10) \cdot 10^{-9} \text{ e}^{-1}$$

$$Y_{\text{talys}}(^{93m}\text{Mo}) = 4.17 \cdot 10^{-8} \text{ e}^{-1}$$

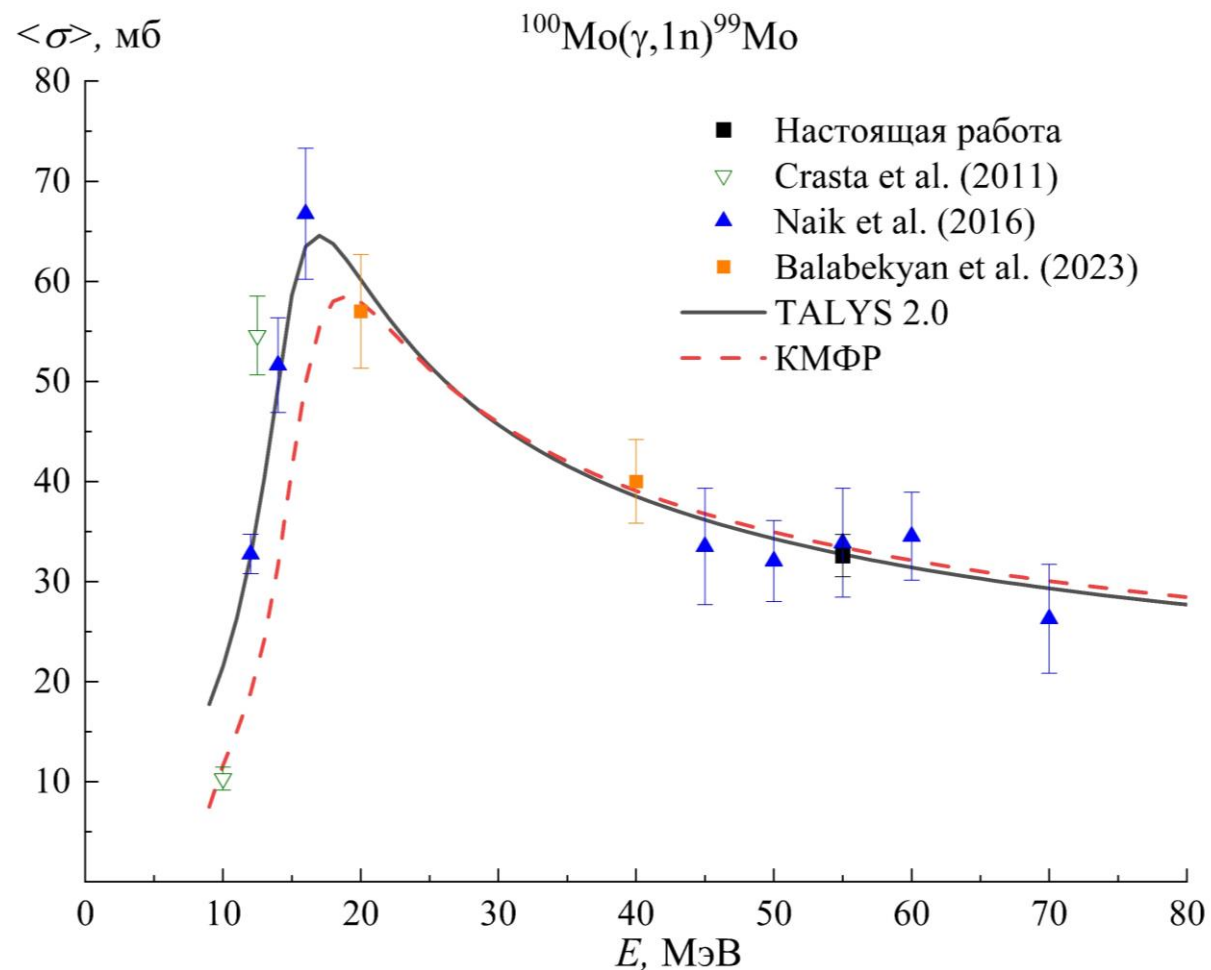
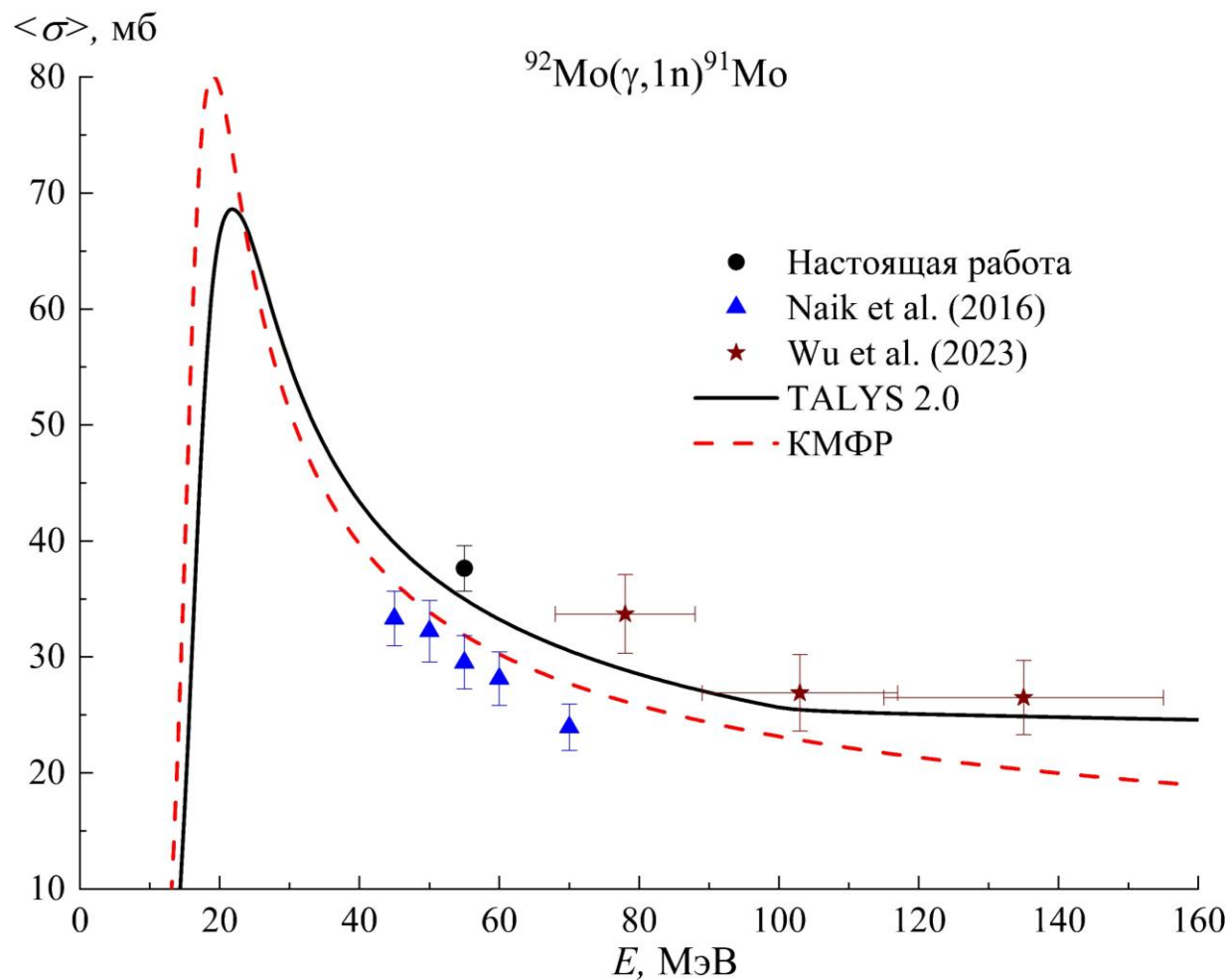
Наблюдается различие теоретических и экспериментальных данных в 17.4 раза.

Данная работа (55 МэВ):

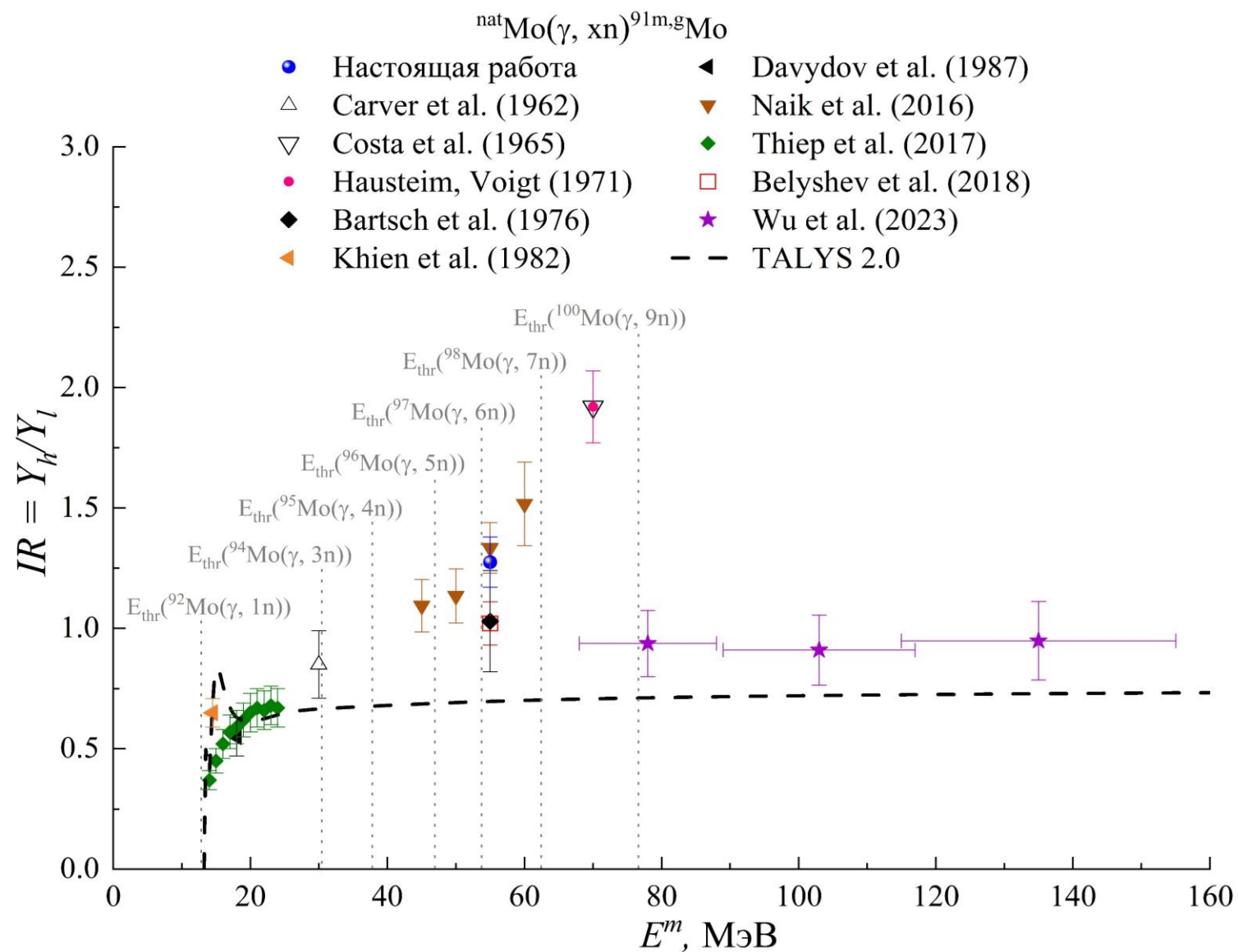
$$\sigma_{q \text{ exp}}^{\text{prod}} = (3.58 \pm 0.10) \cdot 10^{-3} \text{ мб}$$

$$\sigma_{q \text{ TALYS}}^{\text{prod}} = 60.95 \cdot 10^{-3} \text{ мб}$$

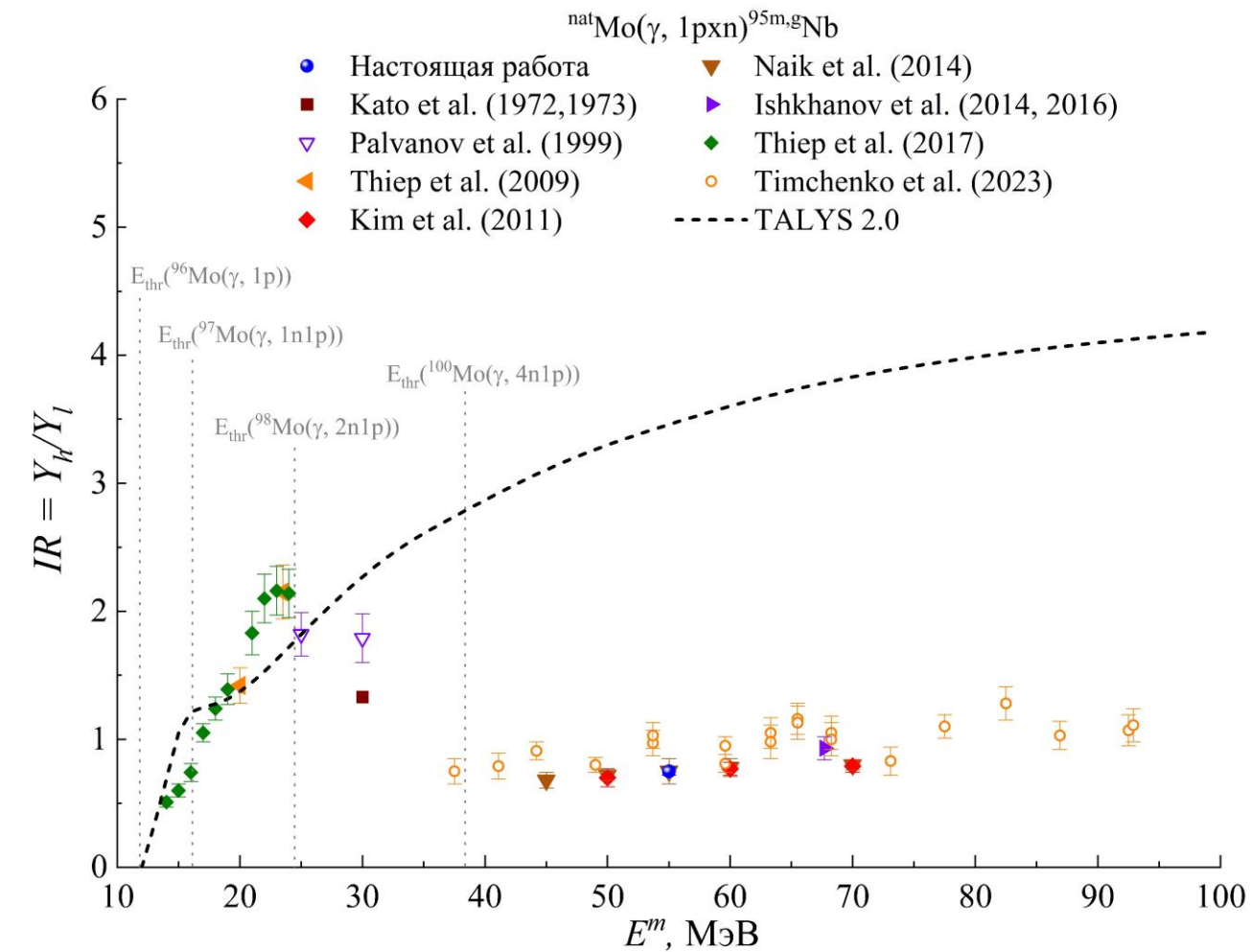
Экспериментальное сечение на эквивалентный квант в 17 раз меньше расчетов по программе TALYS 2.0.



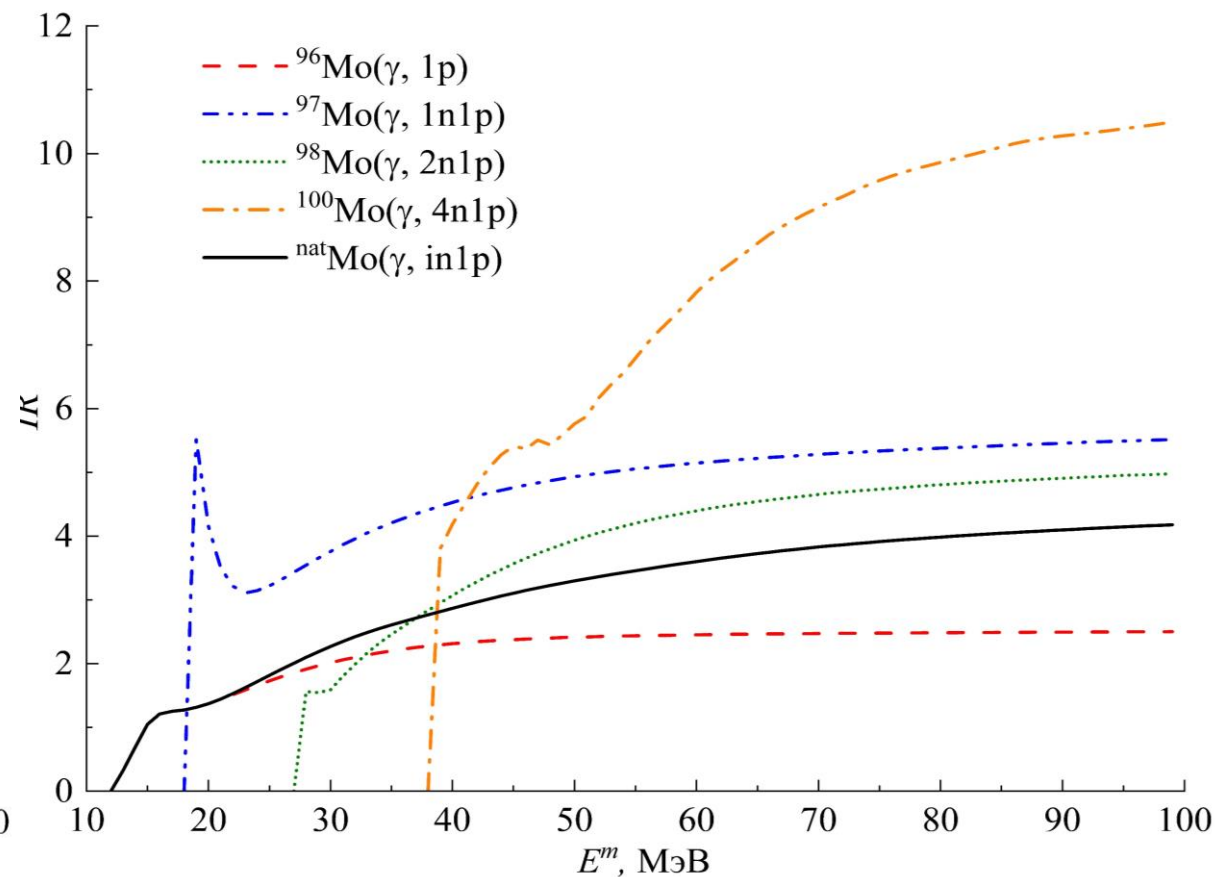
Сравнение экспериментальных средних сечений, взвешенных по тормозному спектру, для реакций $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91m+g}\text{Mo}$ и $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{99}\text{Mo}$ с результатами расчетов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0



Сравнение экспериментально измеренных изомерных отношений для ^{91}Mo с расчетами по программе TALYS 2.0

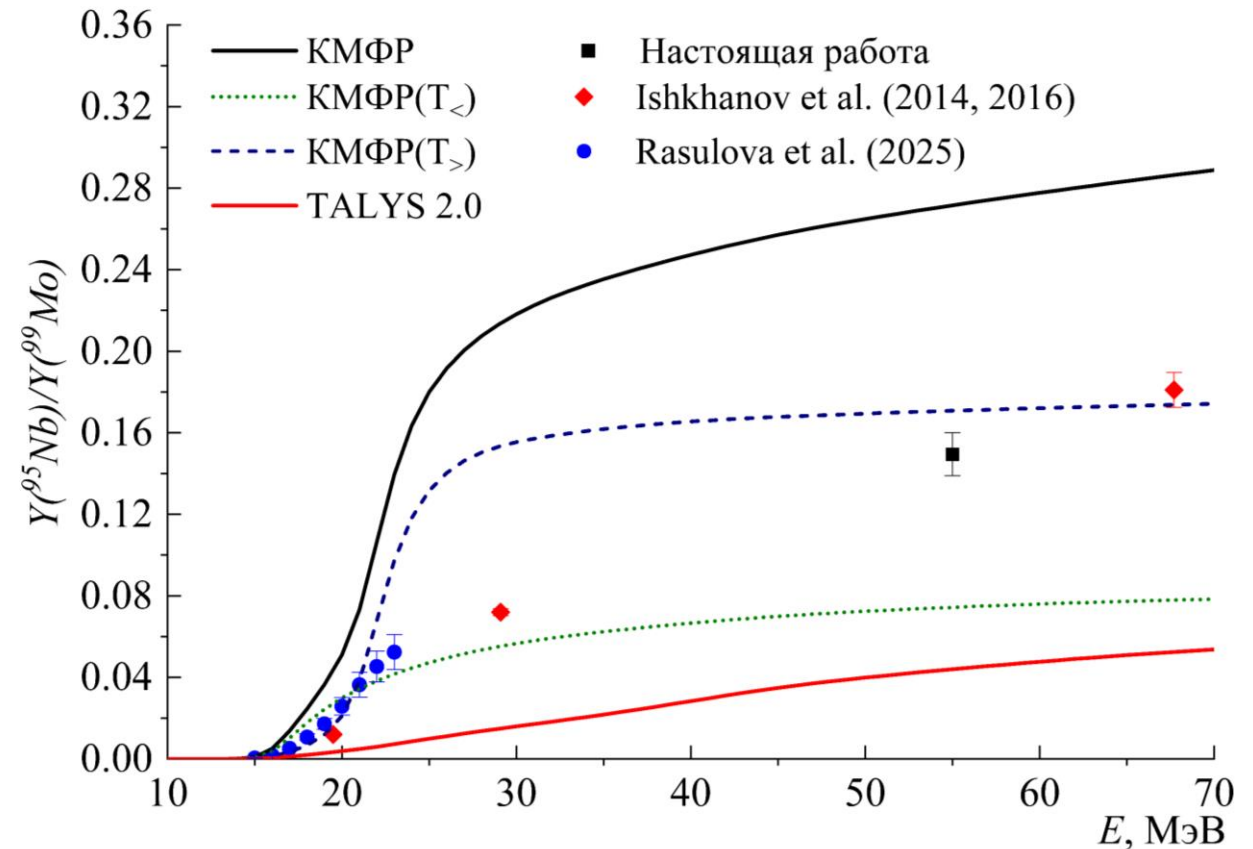
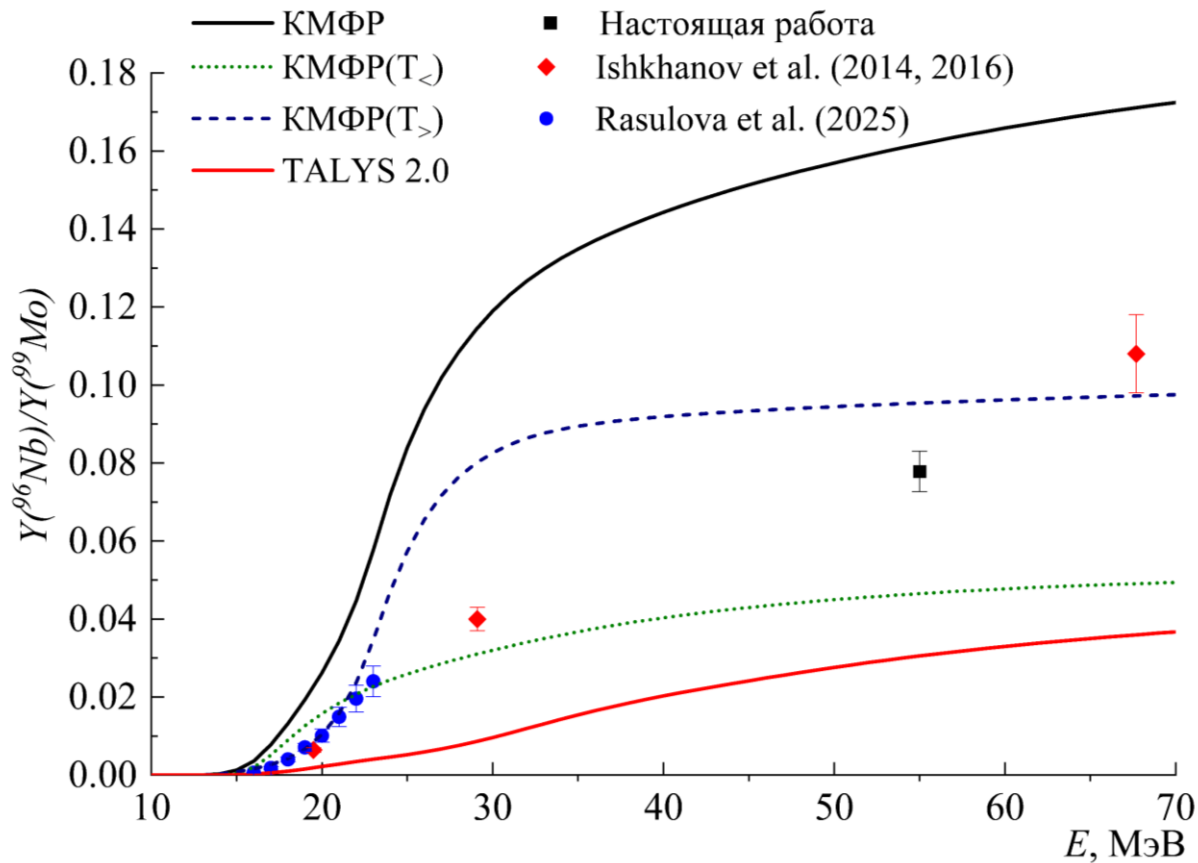


Сравнение экспериментально измеренных изомерных отношений для ^{95}Nb с расчетами по программе TALYS 2.0



Теоретические изомерные отношения для образования ^{95}Nb на различных изотопах молибдена и ^{nat}Mo , рассчитанные по программе TALYS 2.0

Сравнение экспериментальных относительных выходов ^{96}Nb и ^{95}Nb с расчетами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

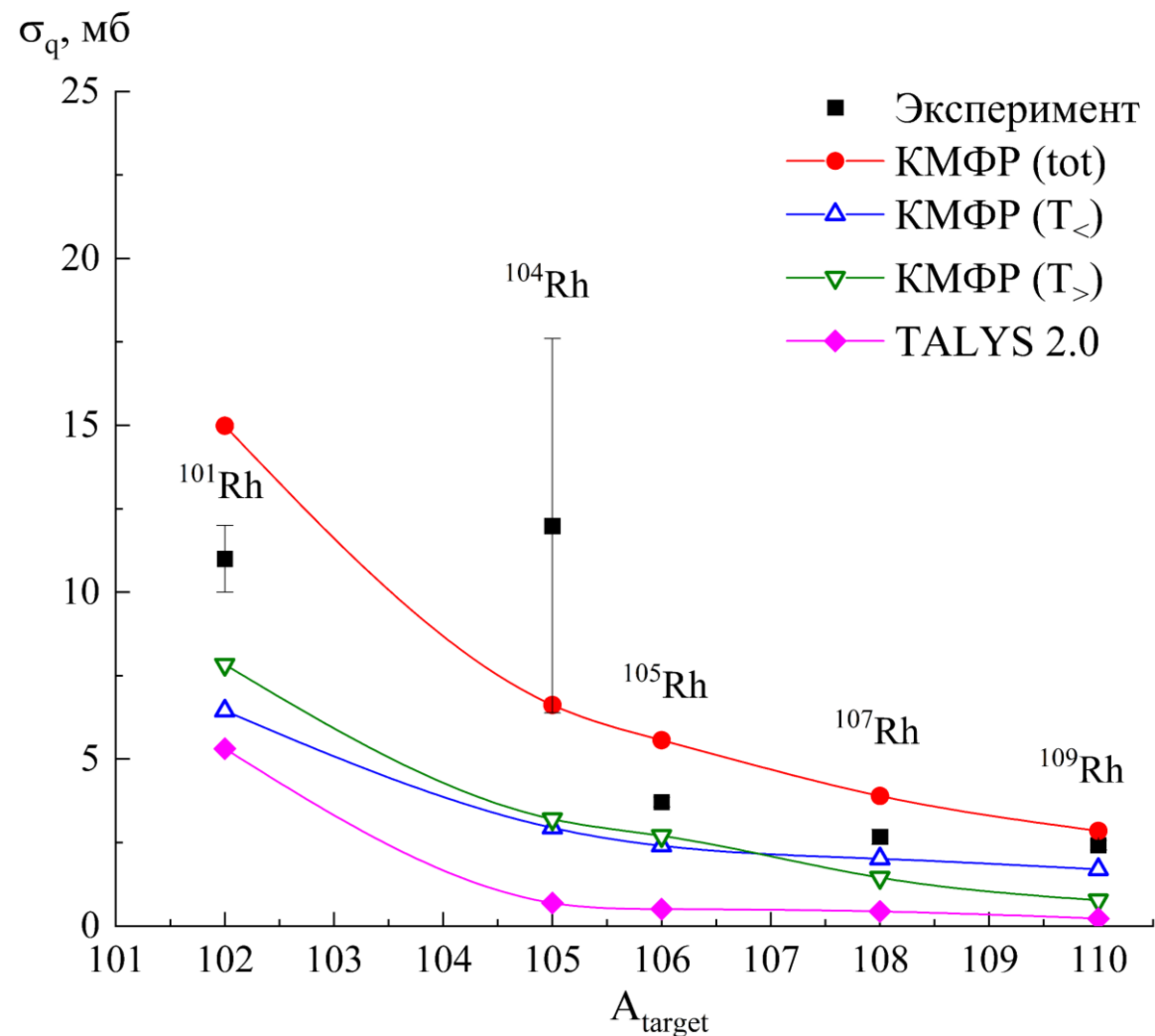
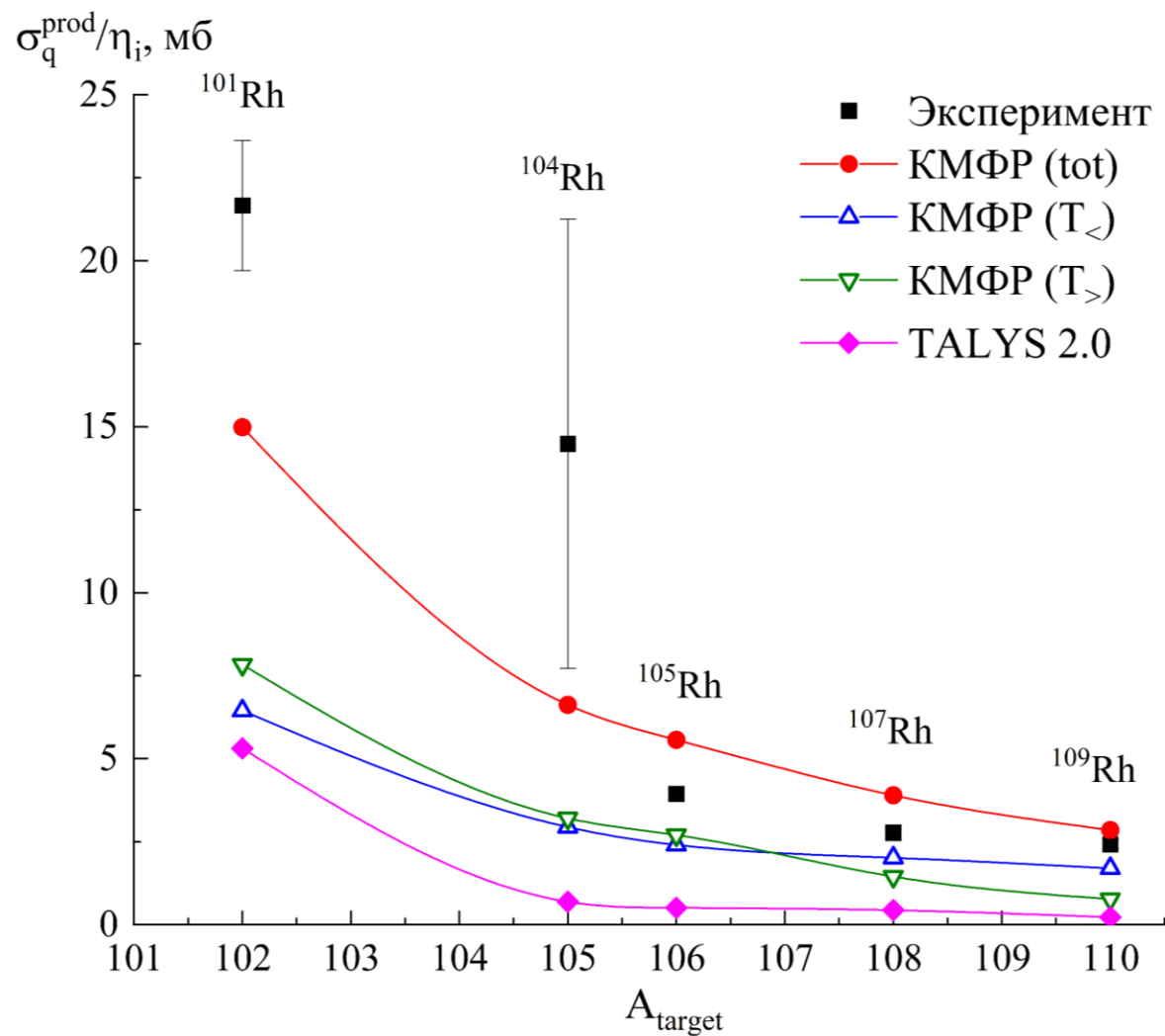


Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А // Ядерная физика 77, № 11, 1427–1435 (2014)

Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., № 1, 35-43 (2014).

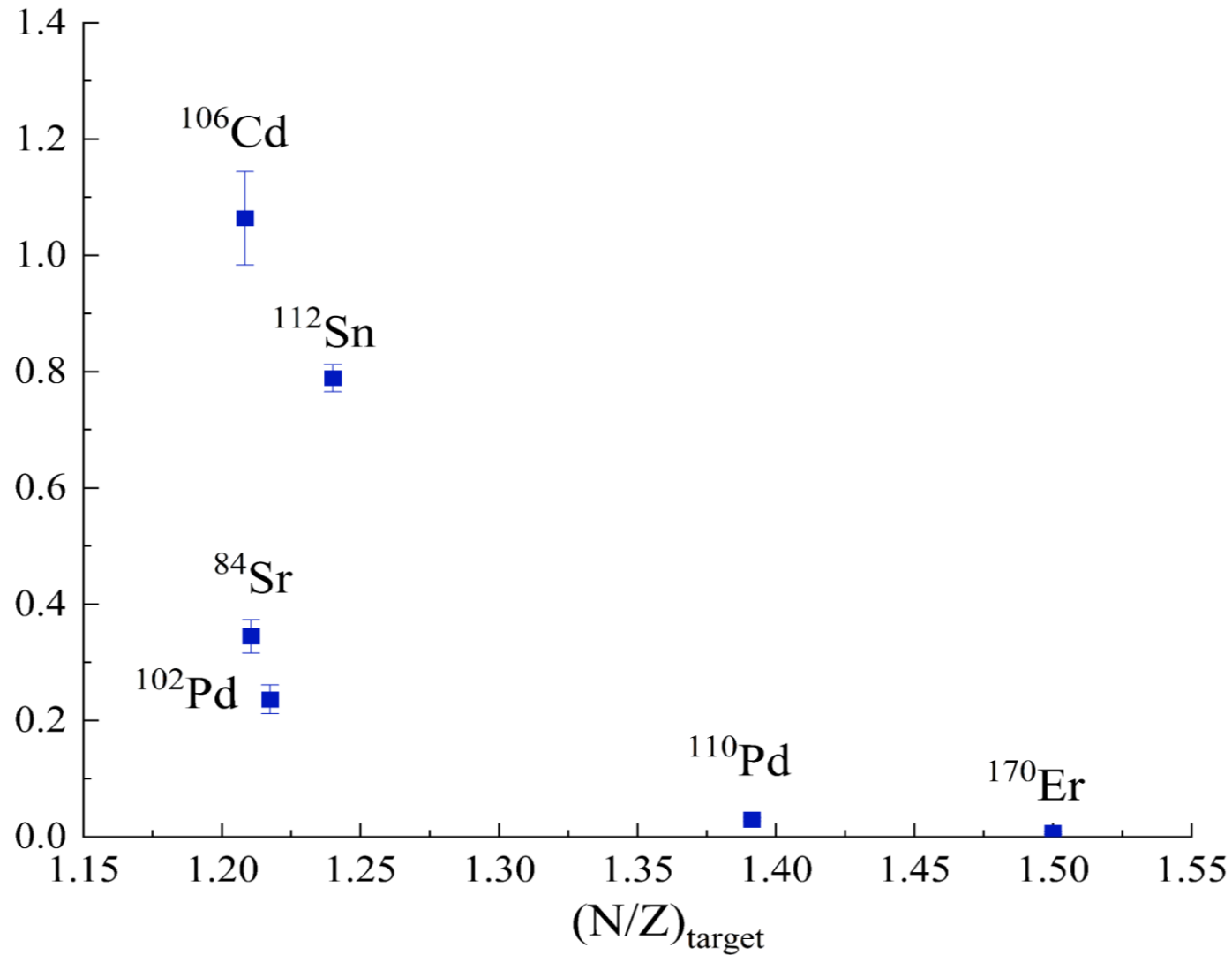
Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., № 1, 3–34 (2016).

Rasulova F., Aksenov N., Alekseev S. // Physical Review C 111 (2025).



Сравнение сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах палладия

$$\sigma_q(\gamma,1p)/\sigma_q(\gamma,1n)$$



Список используемых изотопов:

^{84}Sr ($Z = 38$, $N = 46$)

^{102}Pd ($Z = 46$, $N = 56$)

^{110}Pd ($Z = 46$, $N = 64$)

^{106}Cd ($Z = 48$, $N = 58$)

^{112}Sn ($Z = 50$, $N = 62$)

^{170}Er ($Z = 68$, $N = 102$)

^{83}Sr 32.41 h $\epsilon+\beta+=100\%$	^{84}Sr STABLE 0.56%	^{85}Sr 64.849 d $\epsilon=100\%$	^{86}Sr STABLE 9.86%	^{87}Sr STABLE 7%
^{82}Rb 1.26 min $\epsilon+\beta+=100\%$	^{83}Rb 86.2 d $\epsilon=100\%$	^{84}Rb 32.82 d $\epsilon+\beta+=96.1\%$ $\beta^-=3.9\%$	^{85}Rb STABLE 72.17%	^{86}Rb 18.671 d $\beta^-=99.994\%$ $\epsilon=5.2e-3\%$

^{101}Pd 8.47 h $\epsilon+\beta+=100\%$	^{102}Pd STABLE 1.02%	^{103}Pd 17 d $\epsilon=100\%$	^{104}Pd STABLE 11.14%	^{105}Pd STABLE 22.33%
^{100}Rh 20.5 h $\epsilon+\beta+=100\%$	^{101}Rh 4.07 y $\epsilon=100\%$	^{102}Rh 207.3 d $\epsilon+\beta+=78\%$ $\beta^-=22\%$	^{103}Rh STABLE 100%	^{104}Rh 42.3 s $\beta^-=99.55\%$ $\epsilon+\beta+=0.45\%$

Сравнение отношений выходов фотопротонных и фотонейтронных реакций

Спасибо за внимание!