



НИИЯФ МГУ имени Д.В. Скobel'цына и физический
факультет МГУ имени М.В. Ломоносова



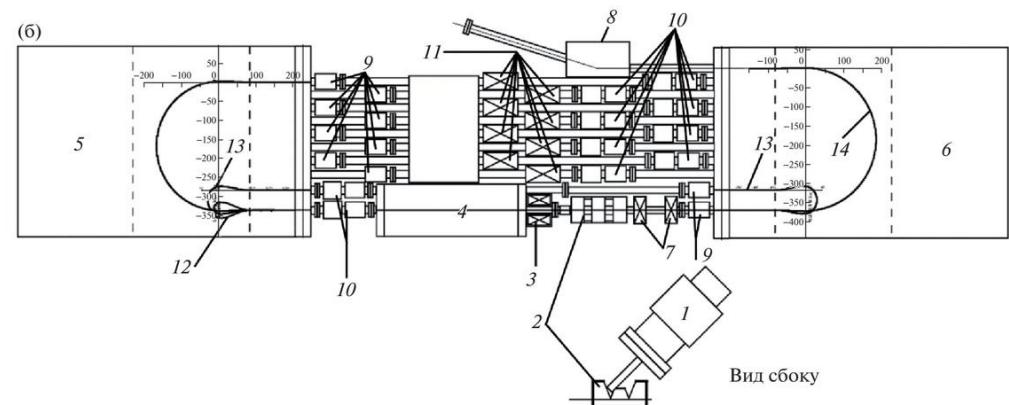
Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова
Фотоядерные исследования. Состояние и перспективы

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

Докладчик: Н.Ю. Фурсова

Преимуществами гамма-активационного метода изучения фотоядерных реакций являются:

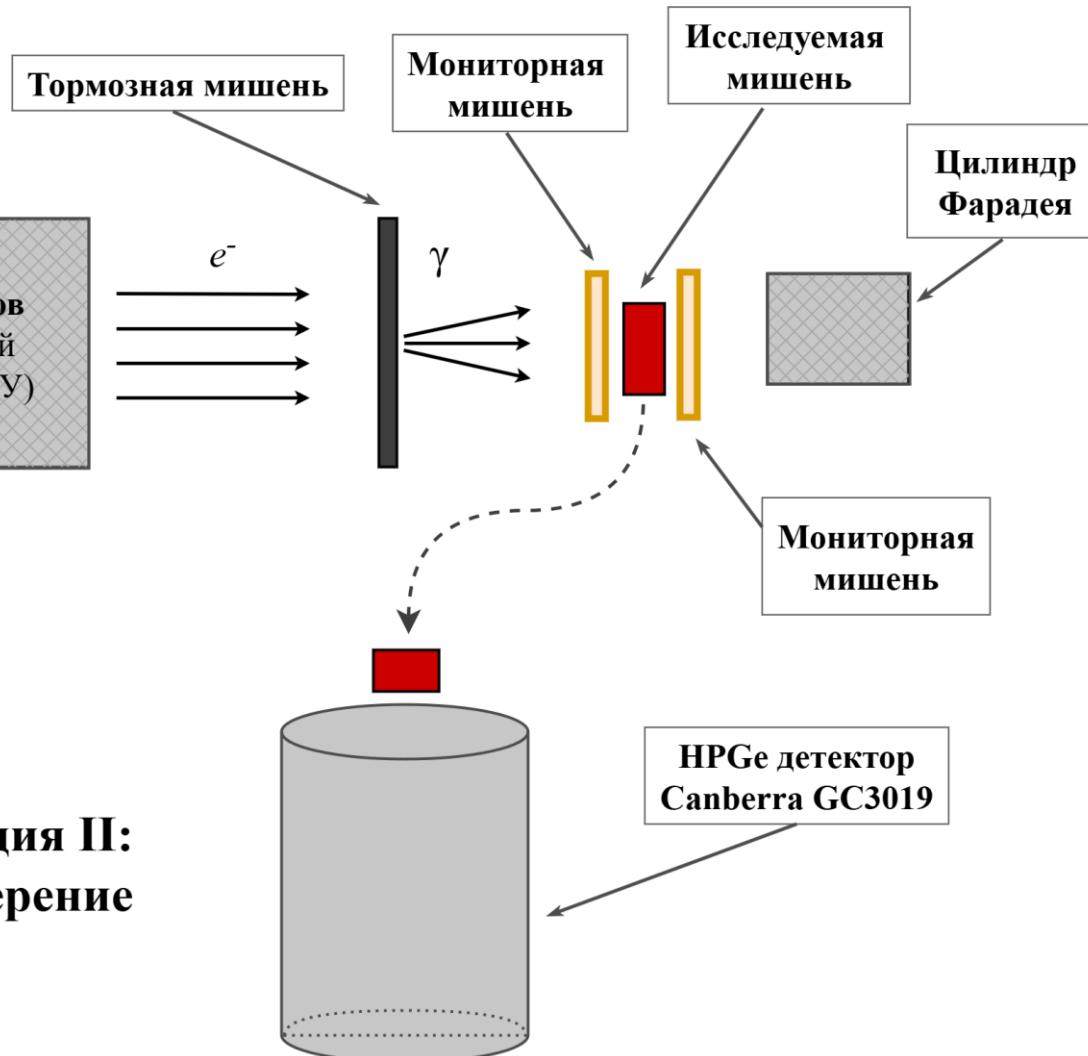
- высокая чувствительность, позволяющая регистрировать реакции с малыми сечениями (фотопротонные, многонуклонные и т.д.);
- возможность идентификации реакции по конечному ядру, что, в отличие от методов прямой регистрации, позволяет эффективно разделять реакции различной множественности;
- возможность 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

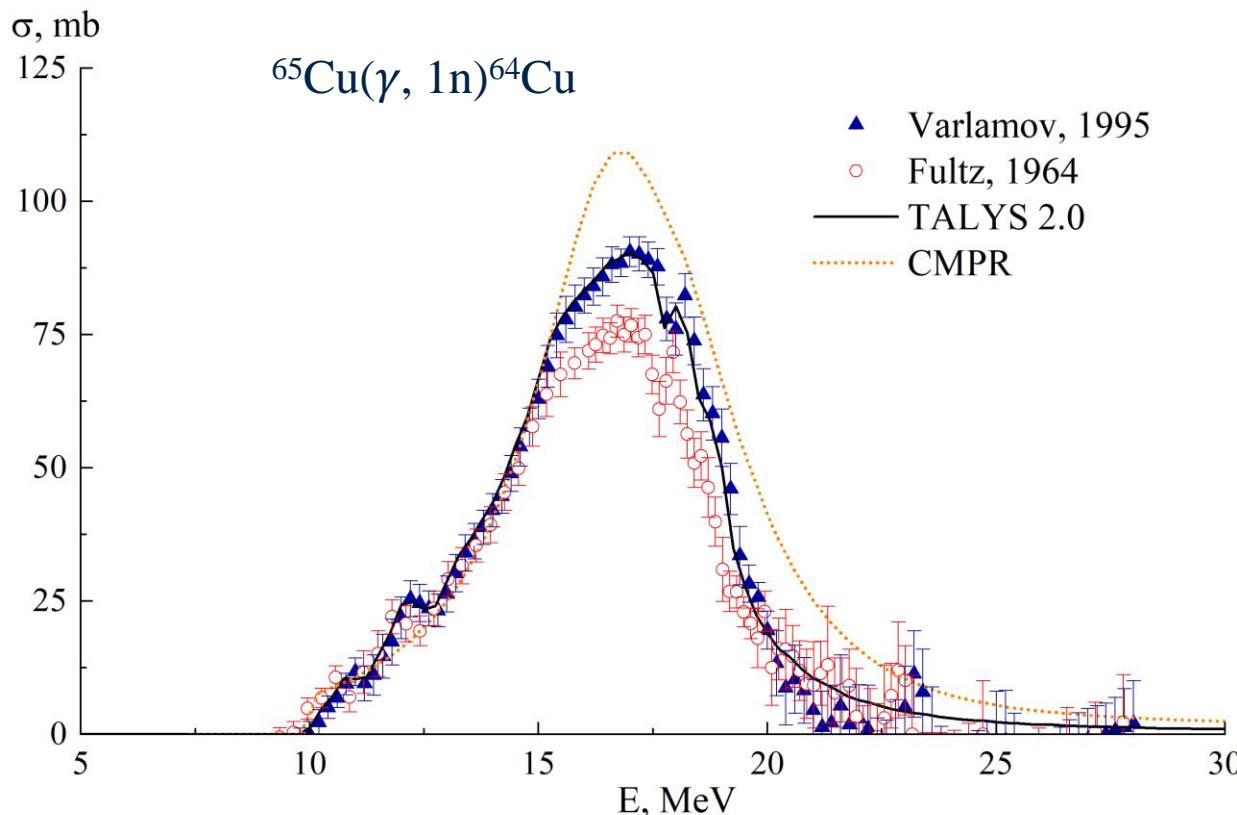
Схема экспериментов, проводимых в НИИЯФ МГУ на ускорителе РМ-55

Стадия I: облучение



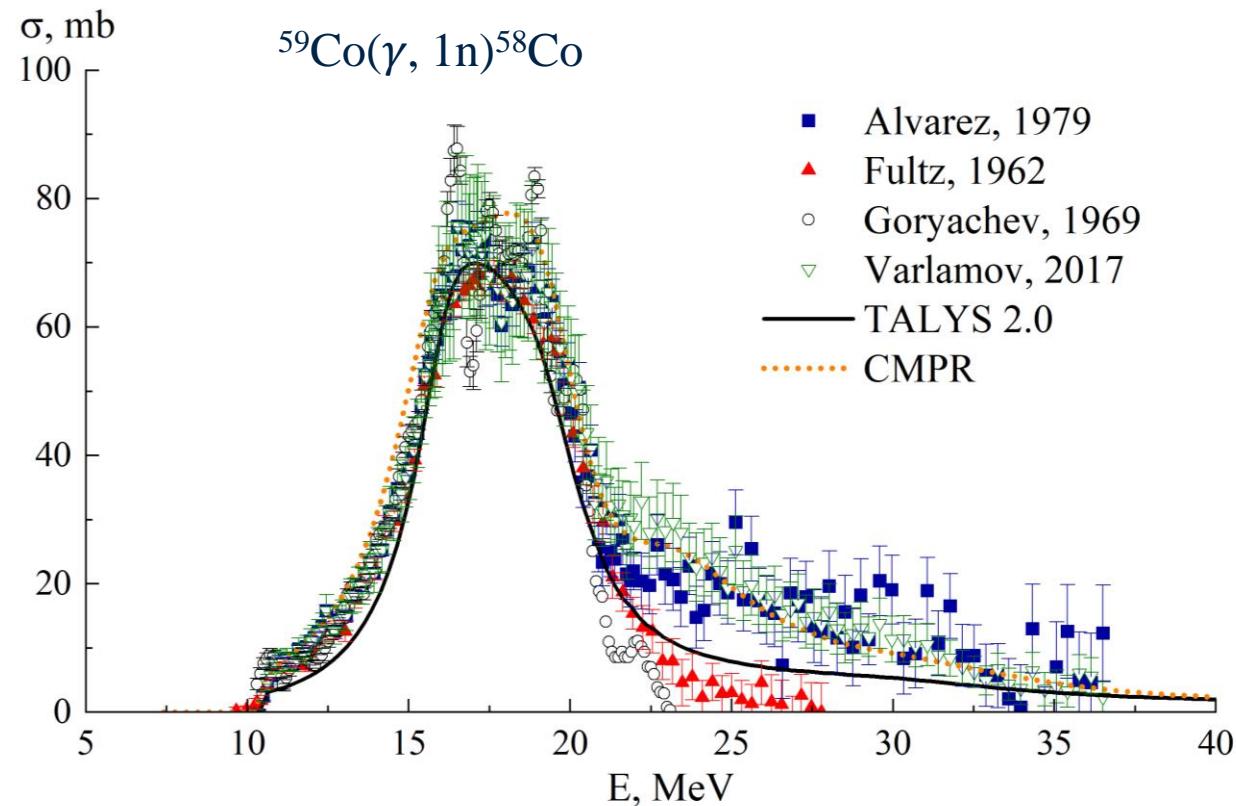
Стадия II: измерение

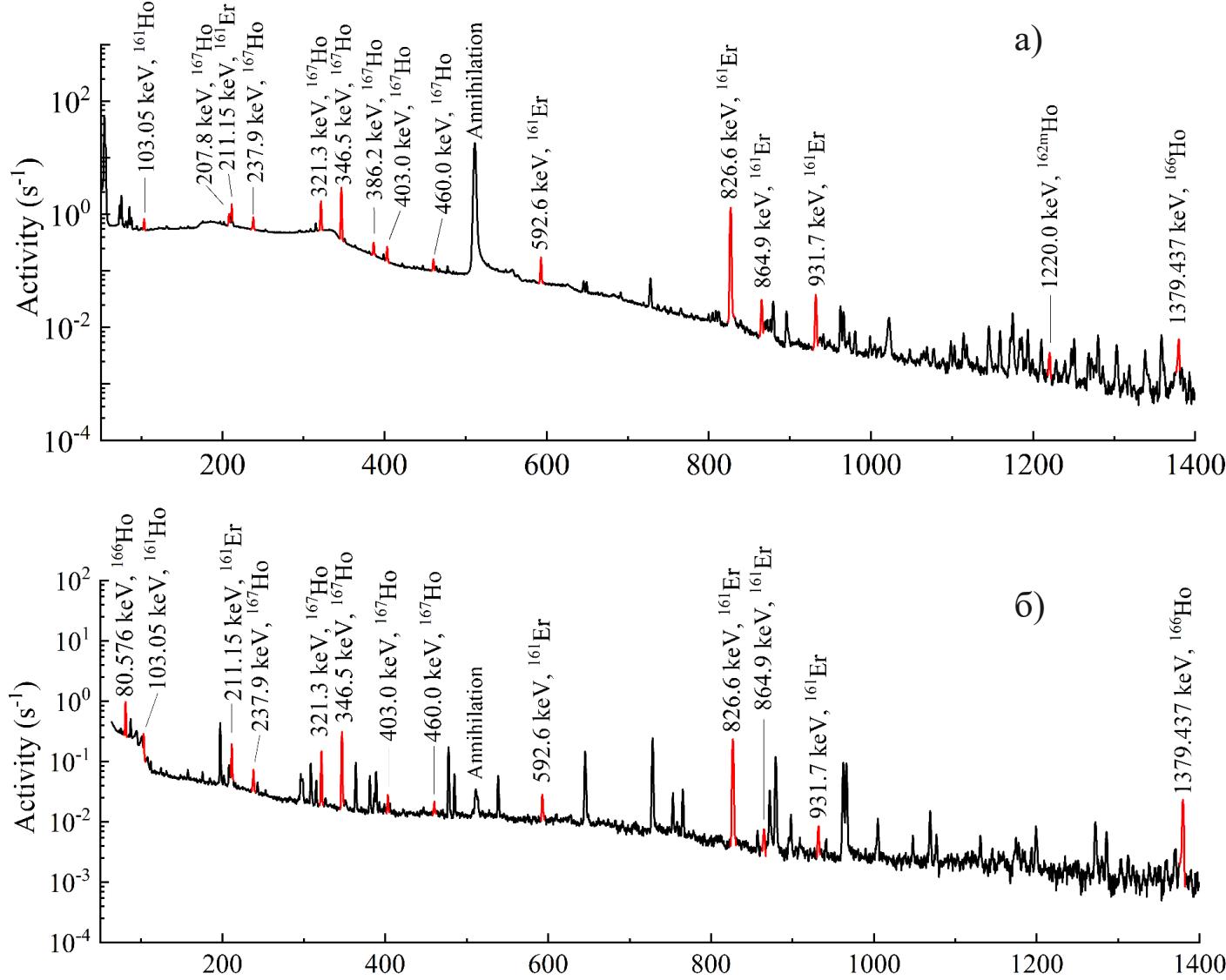
- Исследуемые мишени естественного изотопного состава.
- Тормозные вольфрамовые мишени толщиной 1 мм и 2.1 мм.
- Энергетическое разрешение детектора составляло 0.8 кэВ при энергии $E_\gamma=150$ кэВ и 1.9 кэВ при энергии $E_\gamma=1332$ кэВ.



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

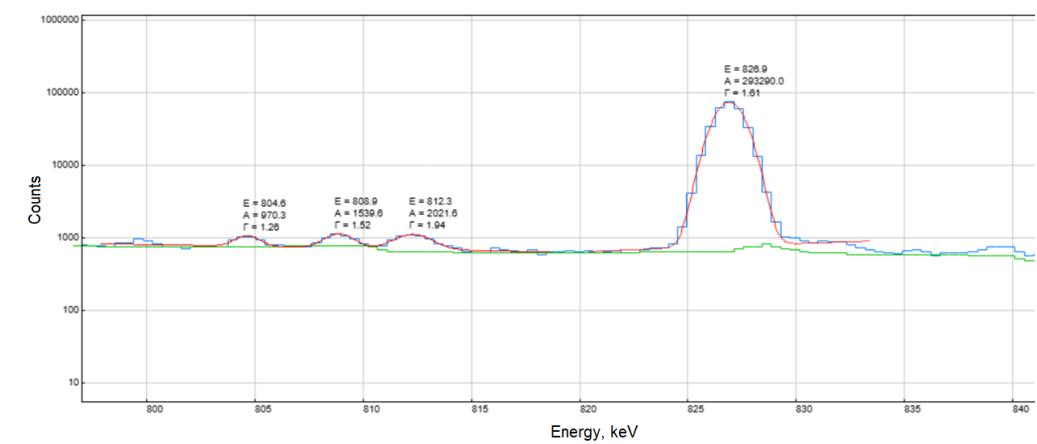
Абсолютное значение тока вычислялось сравнением экспериментально измеренного и теоретического значений выходов на мониторе. В качестве мониторов использовались фольги из меди и кобальта.



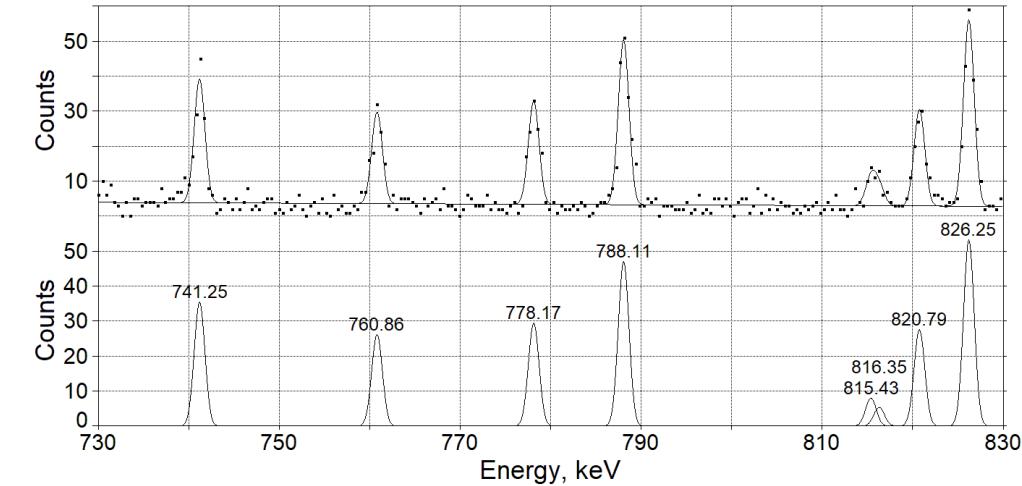


a)

b)

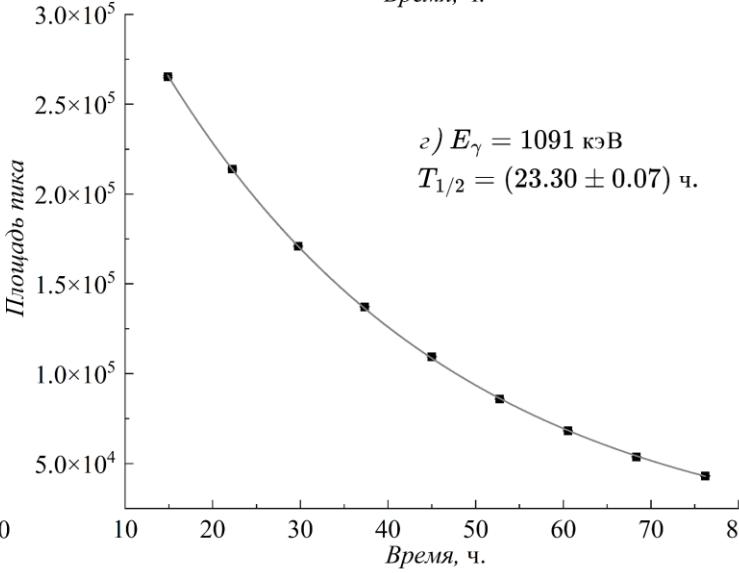
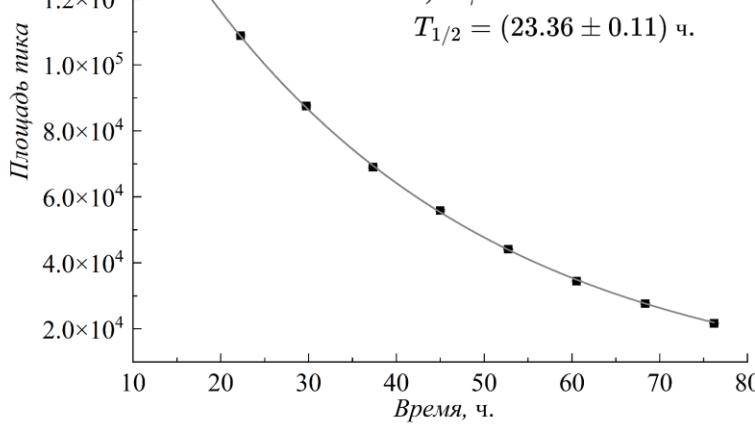
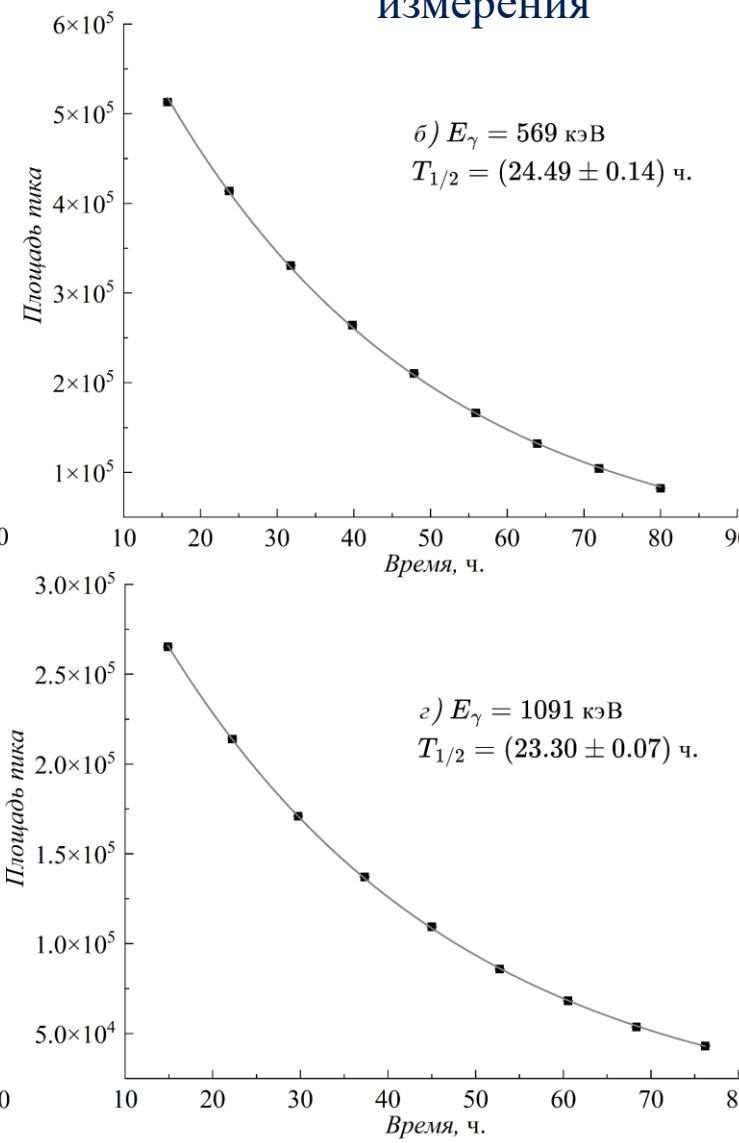
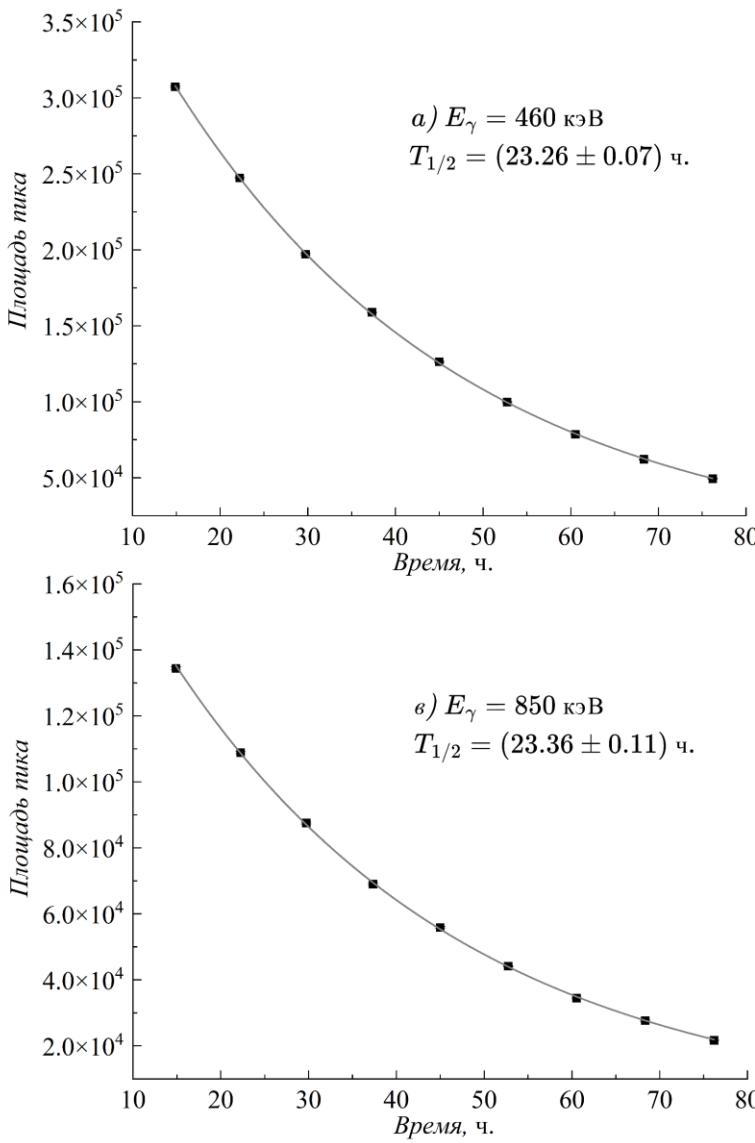


Peak type: Gauss Area, Baseline: Linear
 $r^2=0.940415$



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

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

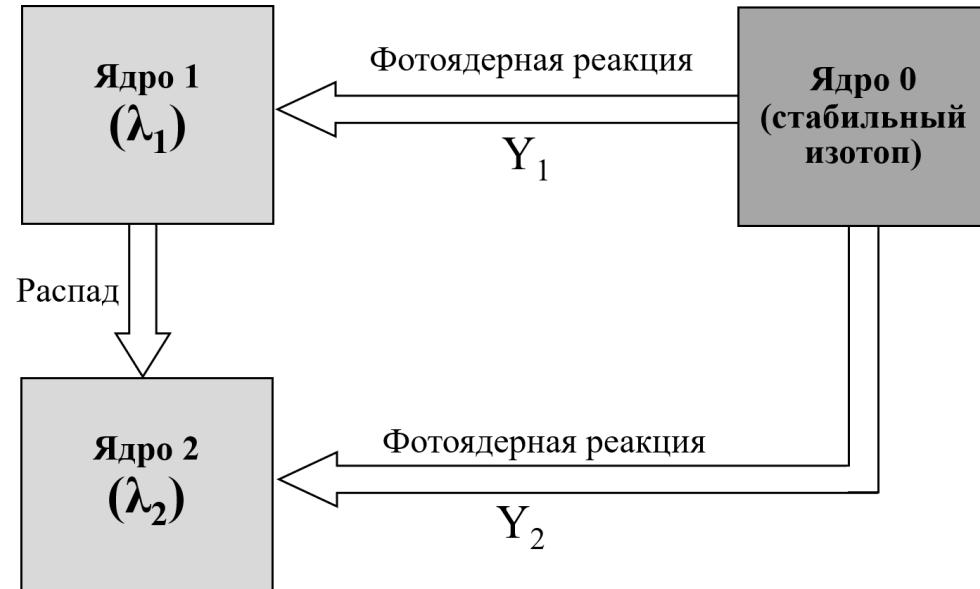
$$N_{10} = \frac{S_1}{\varepsilon_{\gamma 1} I_{\gamma 1} (e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}$$

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

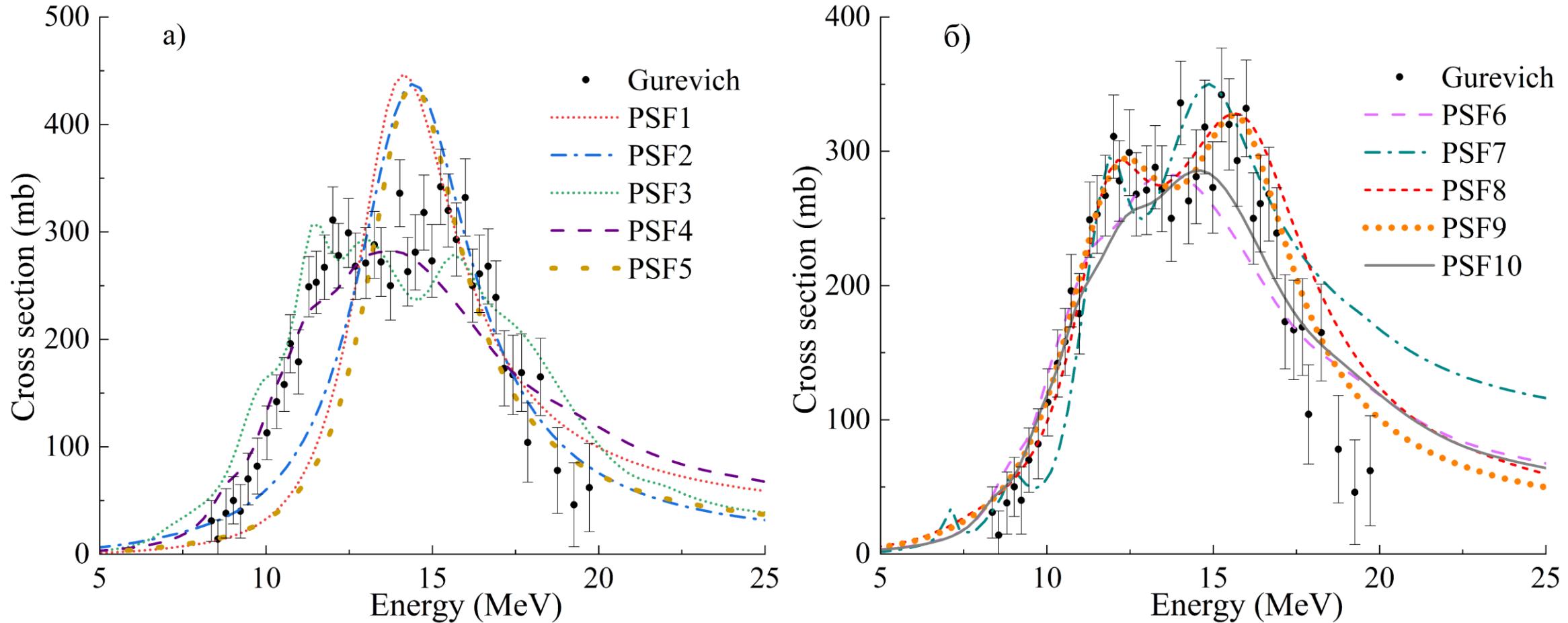
$$\sigma_q = \frac{\int_{E_{thr}}^{E^m} \sigma(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \cdot W(E, E^m) dE}$$

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

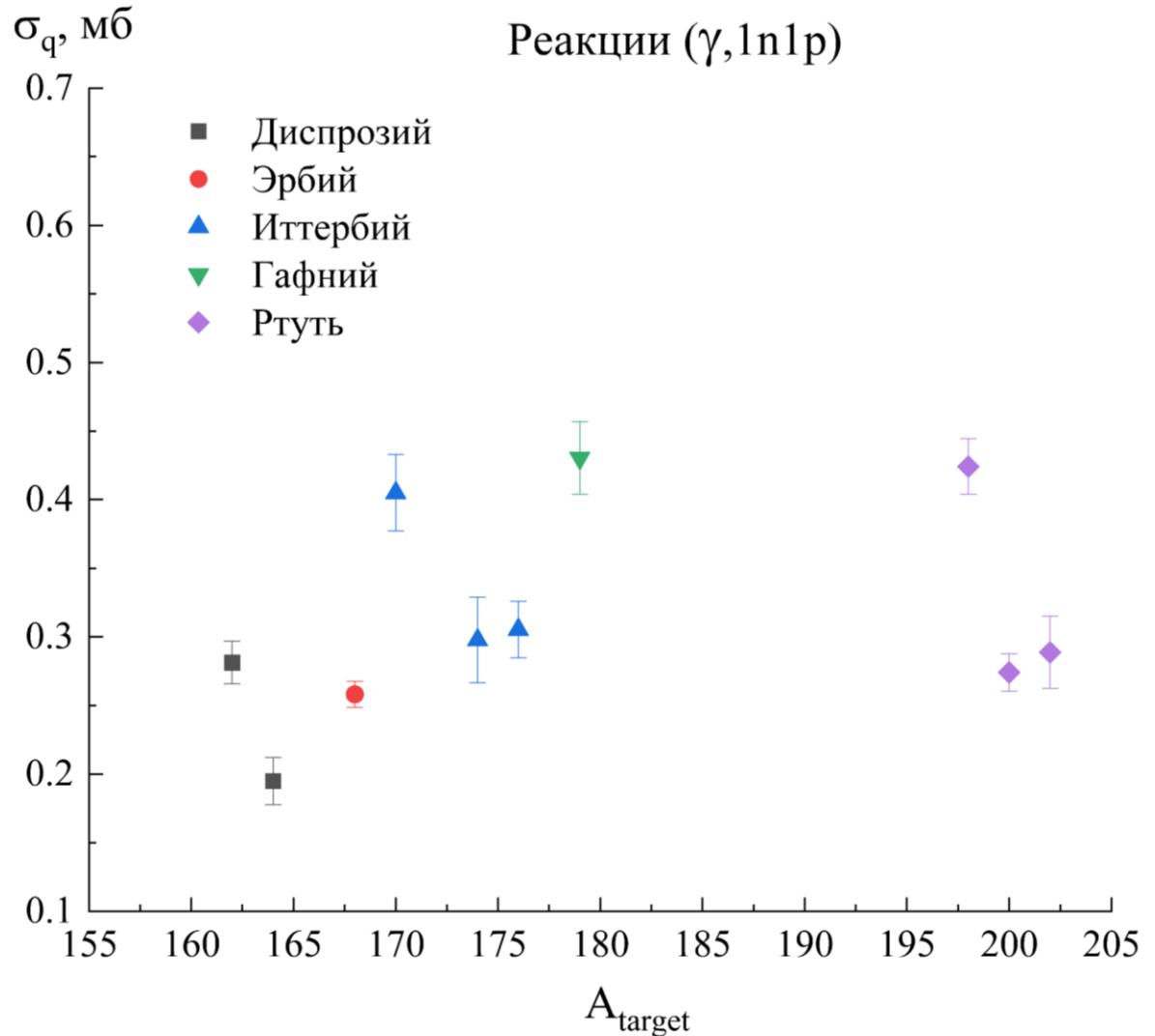
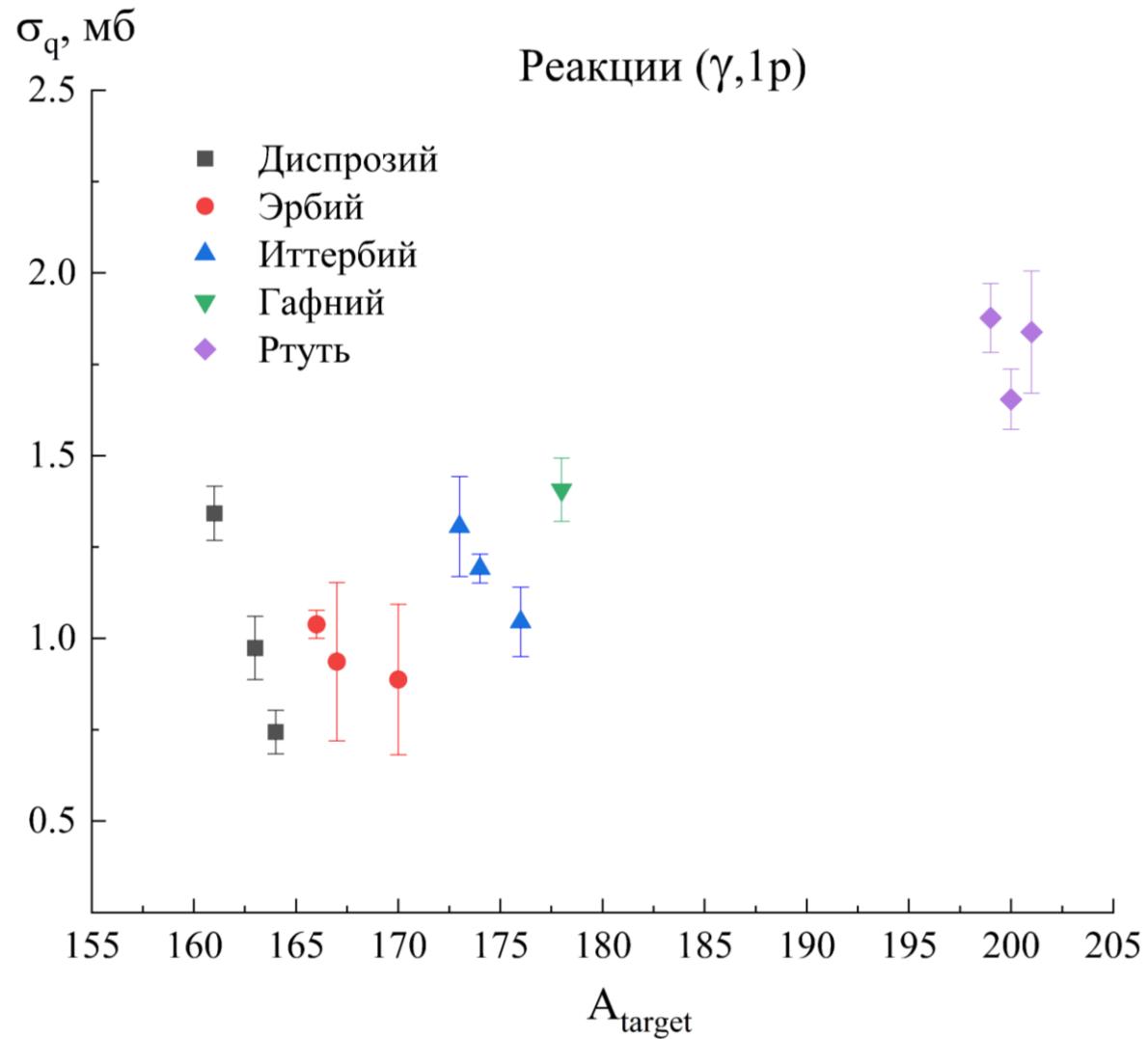


PSF 1. Kopecky-Uhl generalized Lorentzian;
 PSF 3. Hartree-Fock Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) tables;
 PSF 5. Goriely's hybrid model;
 PSF 7. Temperature-dependent Relativistic Mean Field (RMF);
 PSF 9. Simplified Modified Lorentzian (SMLO);

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

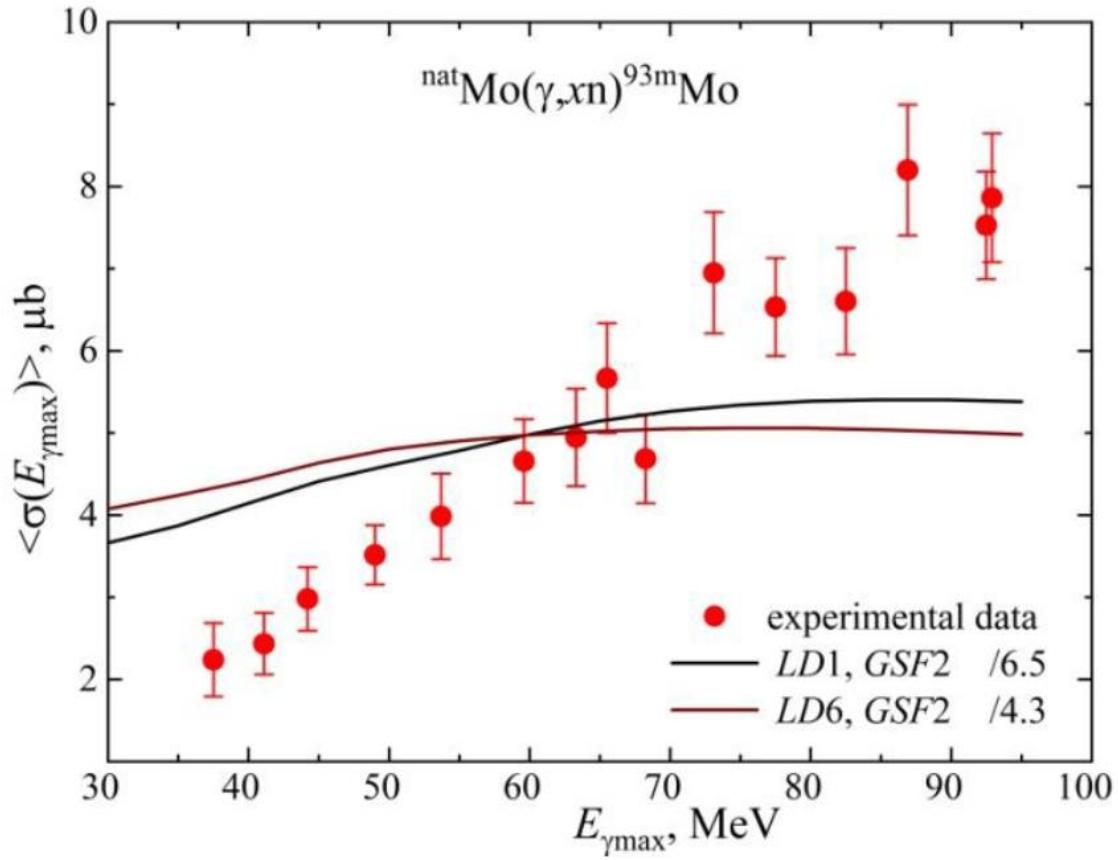
Изотоп	Реакция образования изотопа	E _{thr} , МэВ	σ _{q exp} ^{prod} , мб	σ _{q CMPR} ^{prod} , мб	σ _{q TALYS} ^{prod} , мб
¹⁵⁷ Dy	^{nat} Dy(γ,xn) = 0.00095· ¹⁵⁸ Dy(γ,1n) + 0.02329· ¹⁶⁰ Dy(γ,3n) + 0.18889· ¹⁶¹ Dy(γ,4n)	9.05	0.465 ± 0.042	0.786	1.164
		24.46		0.170	0.162
		30.92		0.122	0.196
				0.363	0.611
¹⁶¹ Er	^{nat} Er(γ,xn) = 0.00139· ¹⁶² Er(γ,1n) + 0.01601· ¹⁶⁴ Er(γ,3n) + 0.33503· ¹⁶⁶ Er(γ,5n)	9.20	0.308 ± 0.026	0.459	0.539
		24.96		0.283	0.266
		40.08		0.074	0.122
				0.100	0.145
¹⁶⁶ Yb	^{nat} Yb(γ,xn) = 0.00123· ¹⁶⁸ Yb(γ,2n) + 0.02982· ¹⁷⁰ Yb(γ,4n) + 0.14086· ¹⁷¹ Yb(γ,5n)	16.13	0.143 ± 0.017	0.303	0.339
		31.45		0.047	0.052
		38.07		0.090	0.105
				0.166	0.170
¹⁶⁷ Yb	^{nat} Yb(γ,xn) = 0.00123· ¹⁶⁸ Yb(γ,1n) + 0.02982· ¹⁷⁰ Yb(γ,3n) + 0.14086· ¹⁷¹ Yb(γ,4n)	9.06	0.688 ± 0.052	0.931	1.288
		24.39		0.231	0.216
		31.00		0.177	0.276
				0.320	0.554
¹⁷³ Hf	^{nat} Hf(γ,xn) = 0.0016· ¹⁷⁴ Hf(γ,1n) + 0.0526· ¹⁷⁶ Hf(γ,3n) + 0.1860· ¹⁷⁷ Hf(γ,4n)	8.51	1.01 ± 0.06	1.48	2.08
		23.28		0.31	0.29
		29.76		0.35	0.53
				0.46	0.77
¹⁹⁵ Hg	^{nat} Hg(γ, in) = 0.0015· ¹⁹⁶ Hg(γ, 1n) + 0.0997· ¹⁹⁸ Hg(γ, 3n) + 0.1687· ¹⁹⁹ Hg(γ, 4n)	8.90	1.37 ± 0.08	1.411	1.952
		24.17		0.386	0.348
		30.83		0.563	0.915
				0.376	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	$\sigma_{\text{q exp}}^{\text{prod}}$, мб	$\sigma_{\text{q CMPR}}^{\text{prod}}$, мб	$\sigma_{\text{q TALYS}}^{\text{prod}}$, мб
$^{91}\text{m+gMo}$	g: 15.49 мин. ($9/2^+$) m: 65 с. ($1/2^-$)	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in}) =$ 0.14649 · $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n) +$ 0.09187· $^{94}\text{Mo}(\gamma, 3n) +$ 0.15873· $^{95}\text{Mo}(\gamma, 4n)$	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 · $^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n) +$ 0.09187· $^{94}\text{Mo}(\gamma, 4n)$	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^-)	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in1p}) =$ 0.14649 · $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n1p) +$ 0.09187· $^{94}\text{Mo}(\gamma, 3n1p)$	19.51 37.25	0.375 ± 0.022	0.360 0.357 0.003	0.739 0.731 0.008
$^{89}\text{m+gNb}$	g: 2.03 ч. ($9/2^+$) m: 66.0 мин. ($1/2^-$)	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in1p}) =$ 0.14649 · $^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n1p) +$ 0.09187· $^{94}\text{Mo}(\gamma, 4n1p)$	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}mNb	60.86 дн.	$^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{in1p}) =$ 0.14649 · $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p) +$ 0.09187· $^{94}\text{Mo}(\gamma, 2n1p) +$ 0.15873· $^{95}\text{Mo}(\gamma, 3n1p)$	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 $\langle\sigma(E_{\gamma\text{max}})\rangle_m$ для образования ядра $^{93\text{m}}\text{Mo}$ на $^{\text{nat}}\text{Mo}$. Чёрная 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 $^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, \text{xn})^{93\text{m}}\text{Mo}$ при энергиях от 38 до 93 МэВ.

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

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

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

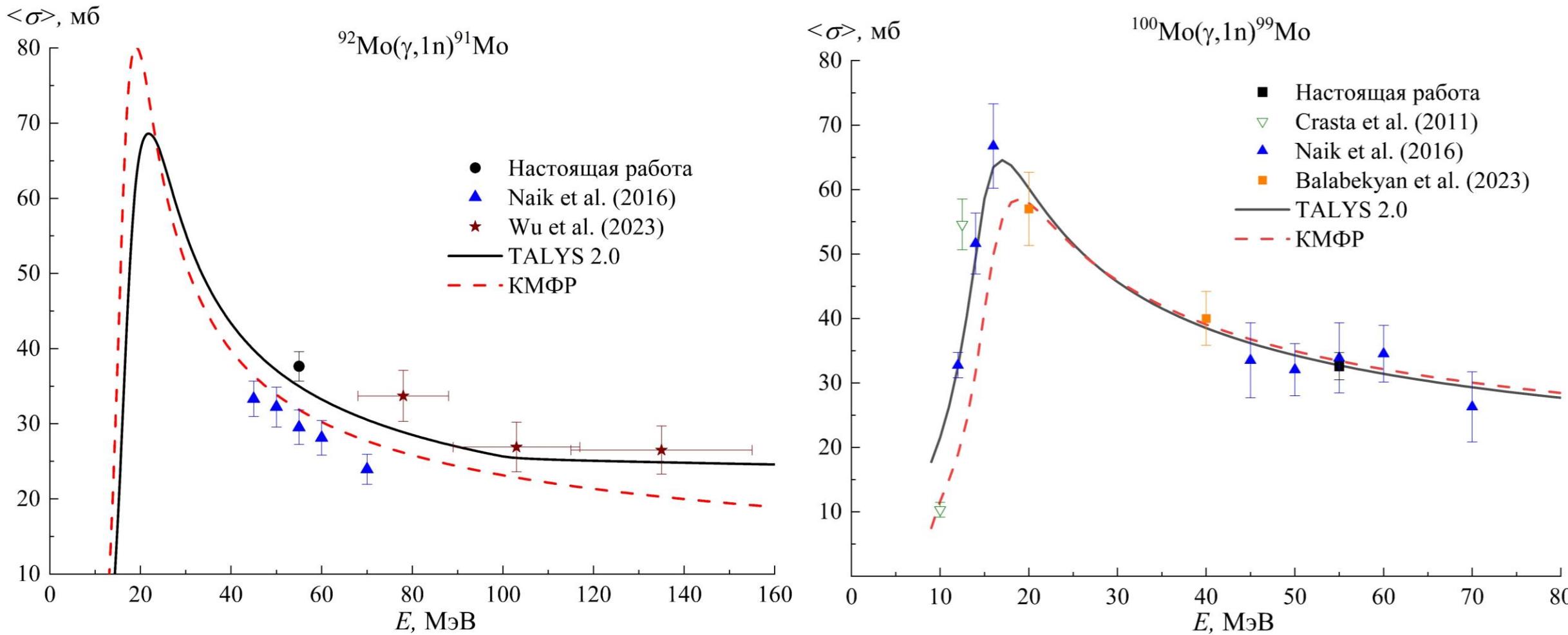
Наблюдается различие теоретических и экспериментальных данных в 17.4 раза.

Данная работа (55 МэВ):

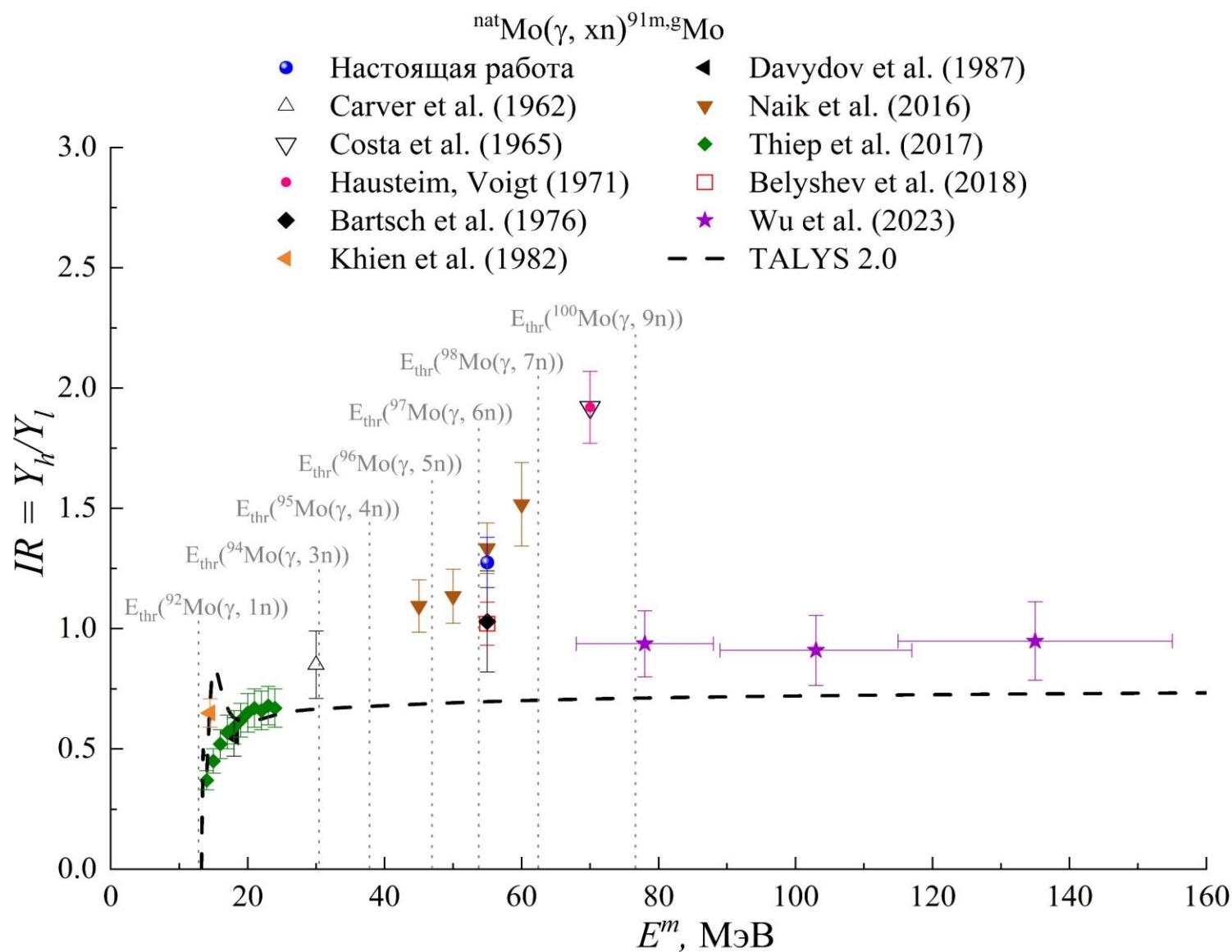
$$\sigma_{q \text{ exp}}^{\text{prod}} = (3.58 \pm 0.10) \cdot 10^{-3} \text{ мб}$$

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

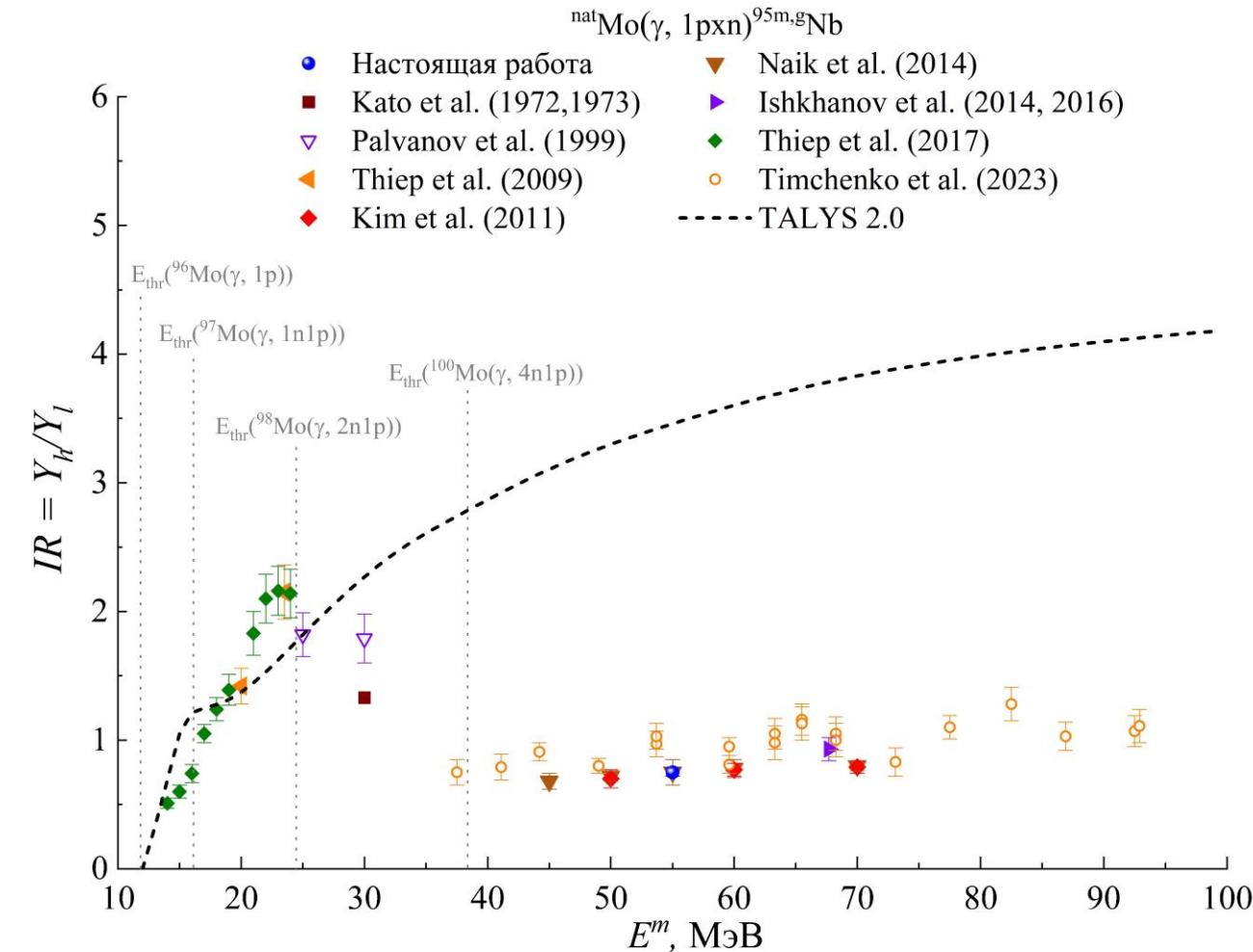
Экспериментальное сечение на эквивалентный квант в 17 раз меньше расчетов по программе TALYS 2.0.



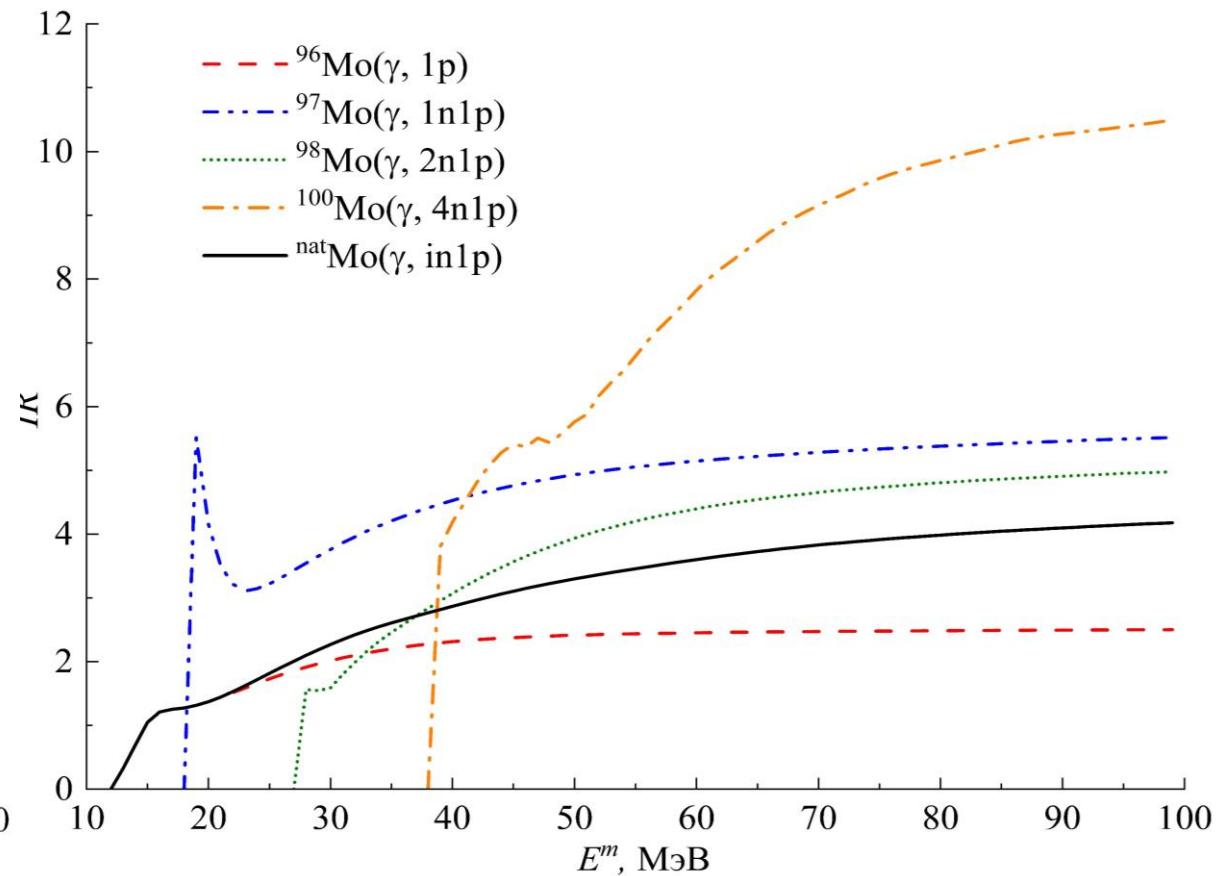
Сравнение экспериментальных средних сечений, взвешенных по тормозному спектру, для реакций $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91m+g}\text{Mo}$ и $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{99}\text{Mo}$ с результатами расчетов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0



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

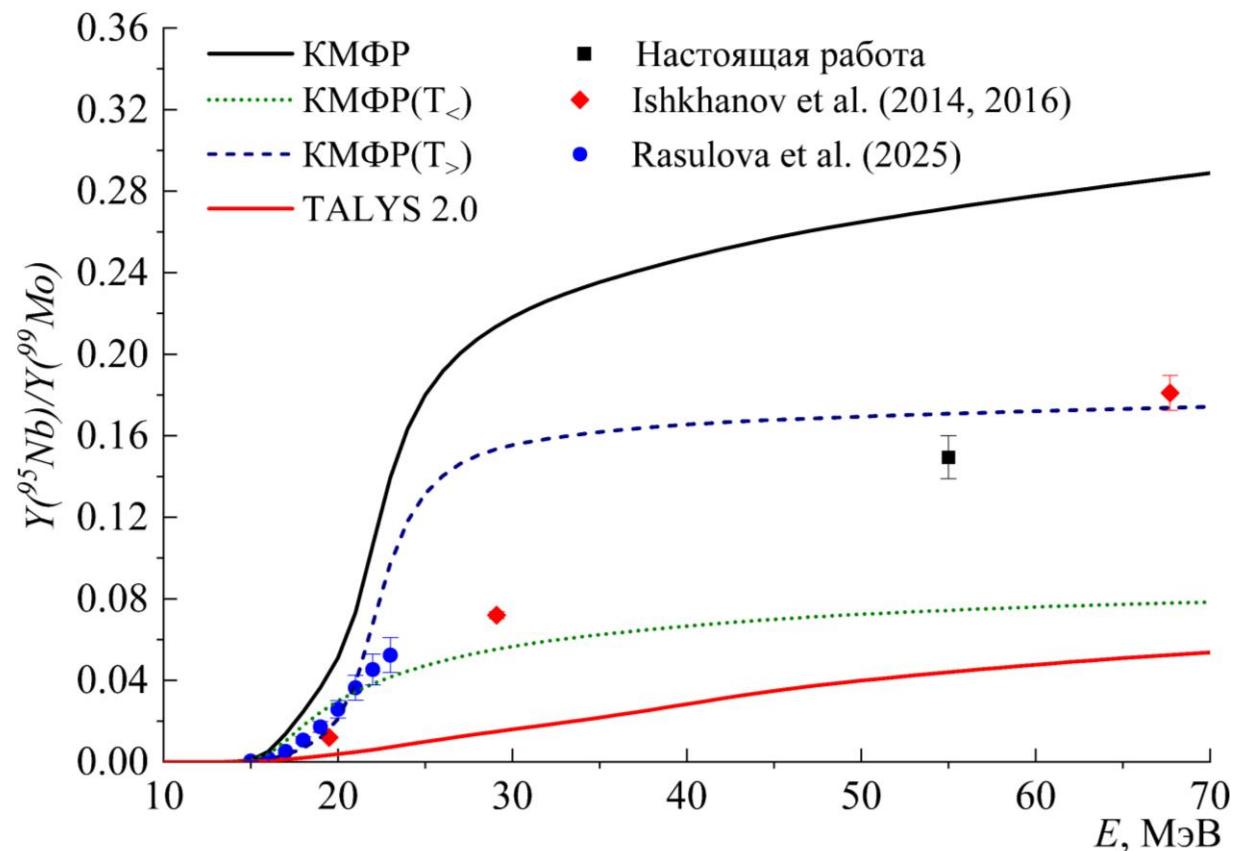
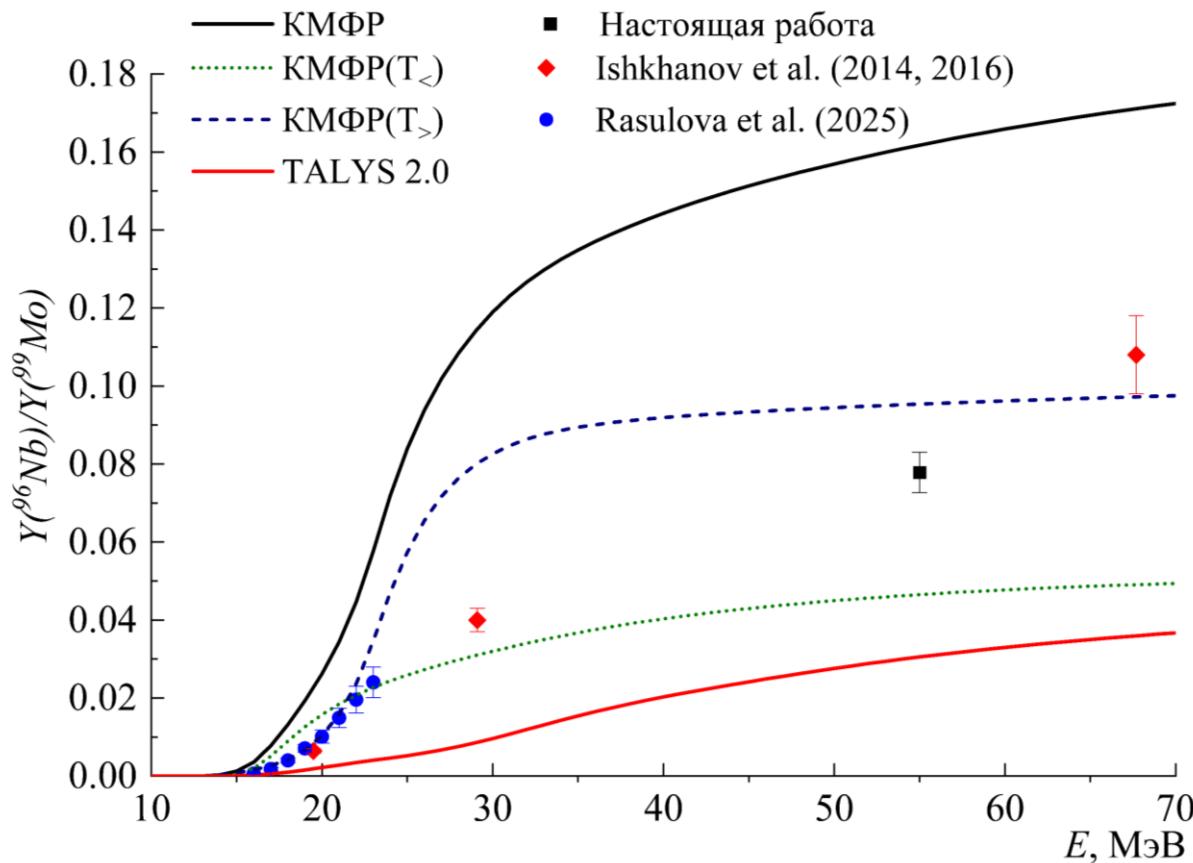


Сравнение экспериментально измеренных изомерных отношений для ${}^{95}\text{Nb}$ с расчетами по программе TALYS 2.0



Теоретические изомерные отношения для образования ${}^{95}\text{Nb}$ на различных изотопах молибдена и ${}^{nat}\text{Mo}$, 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

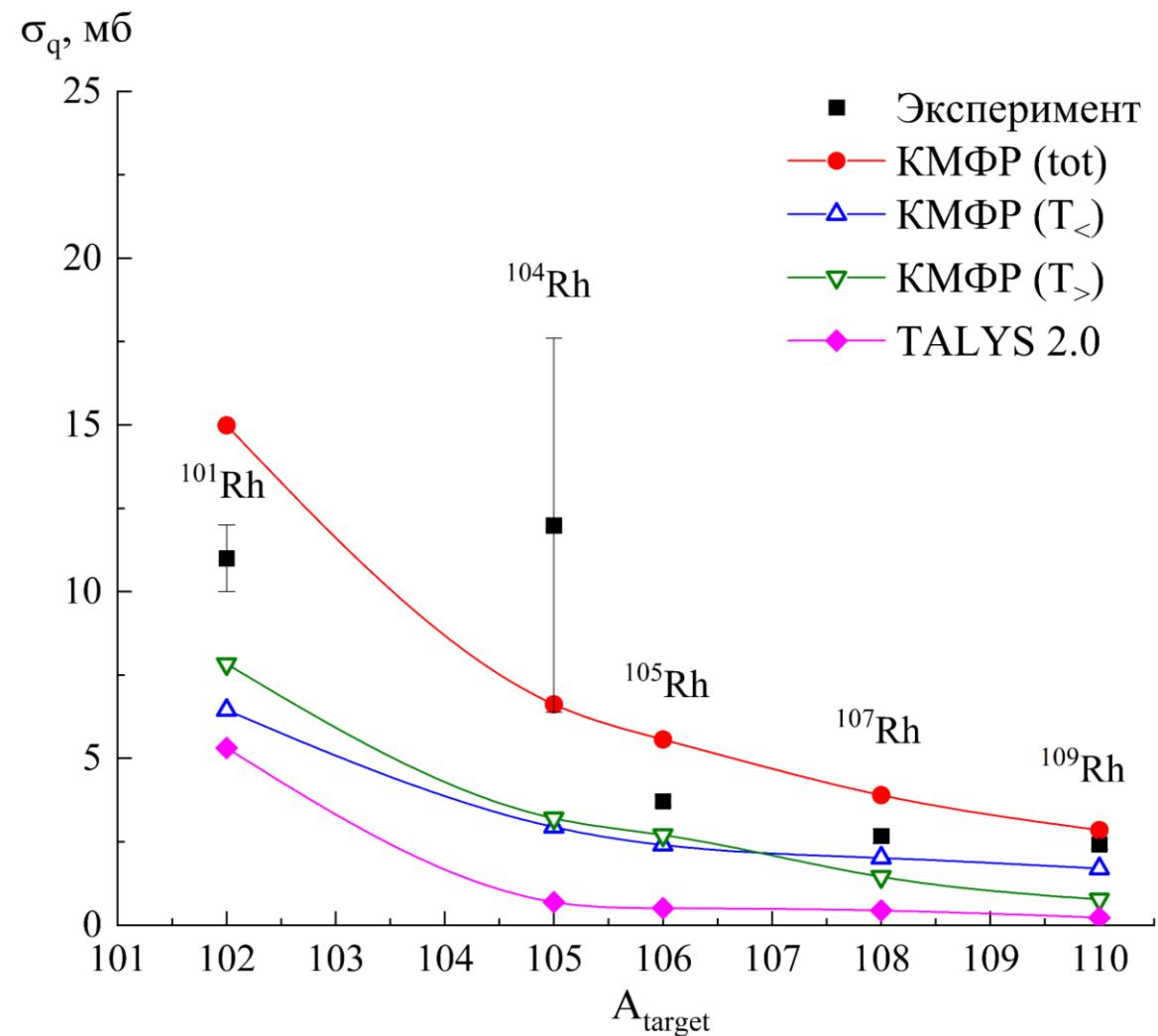
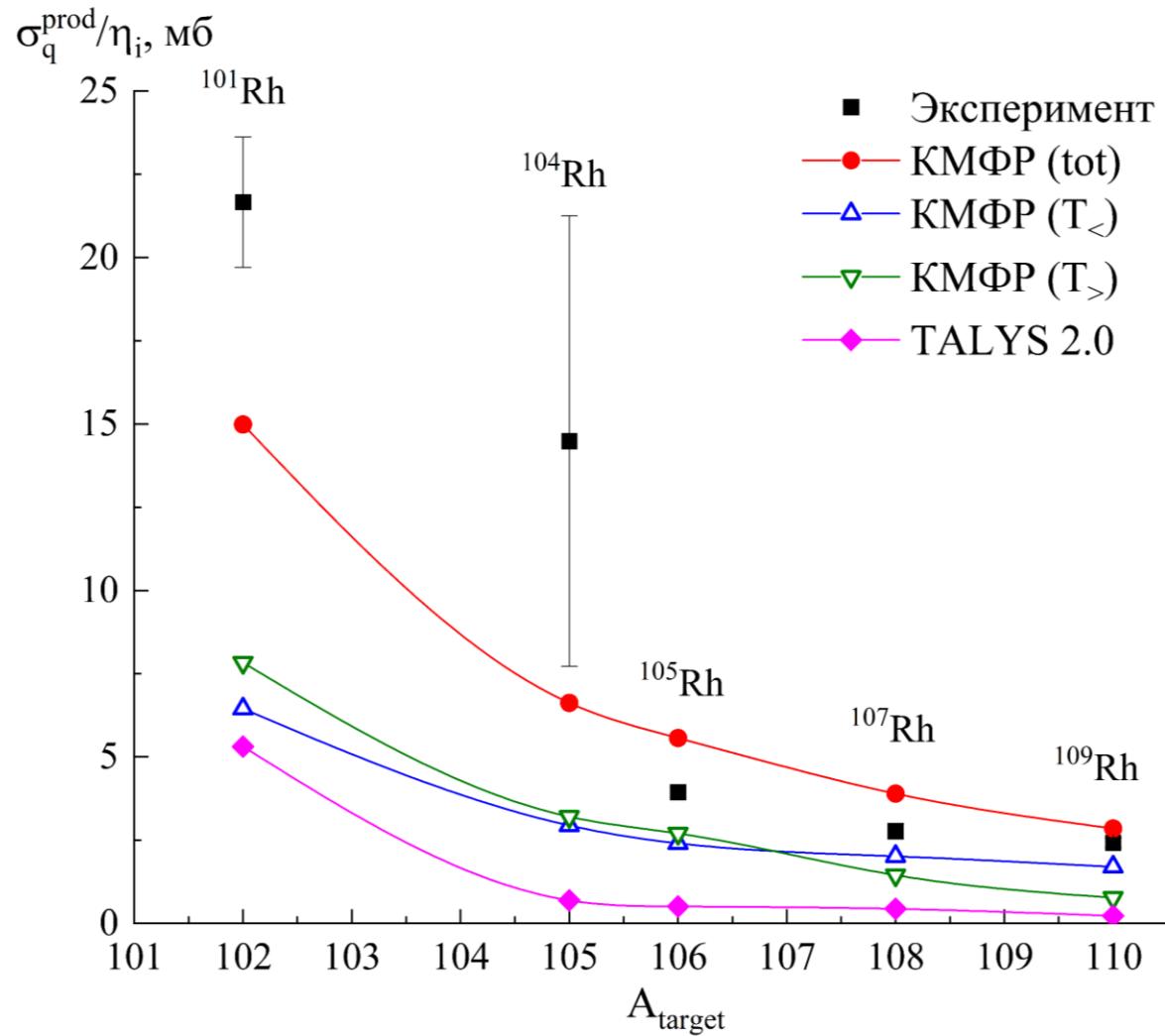


Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А // Ядерная физика 77, № 11, 1427–1435 (2014)

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

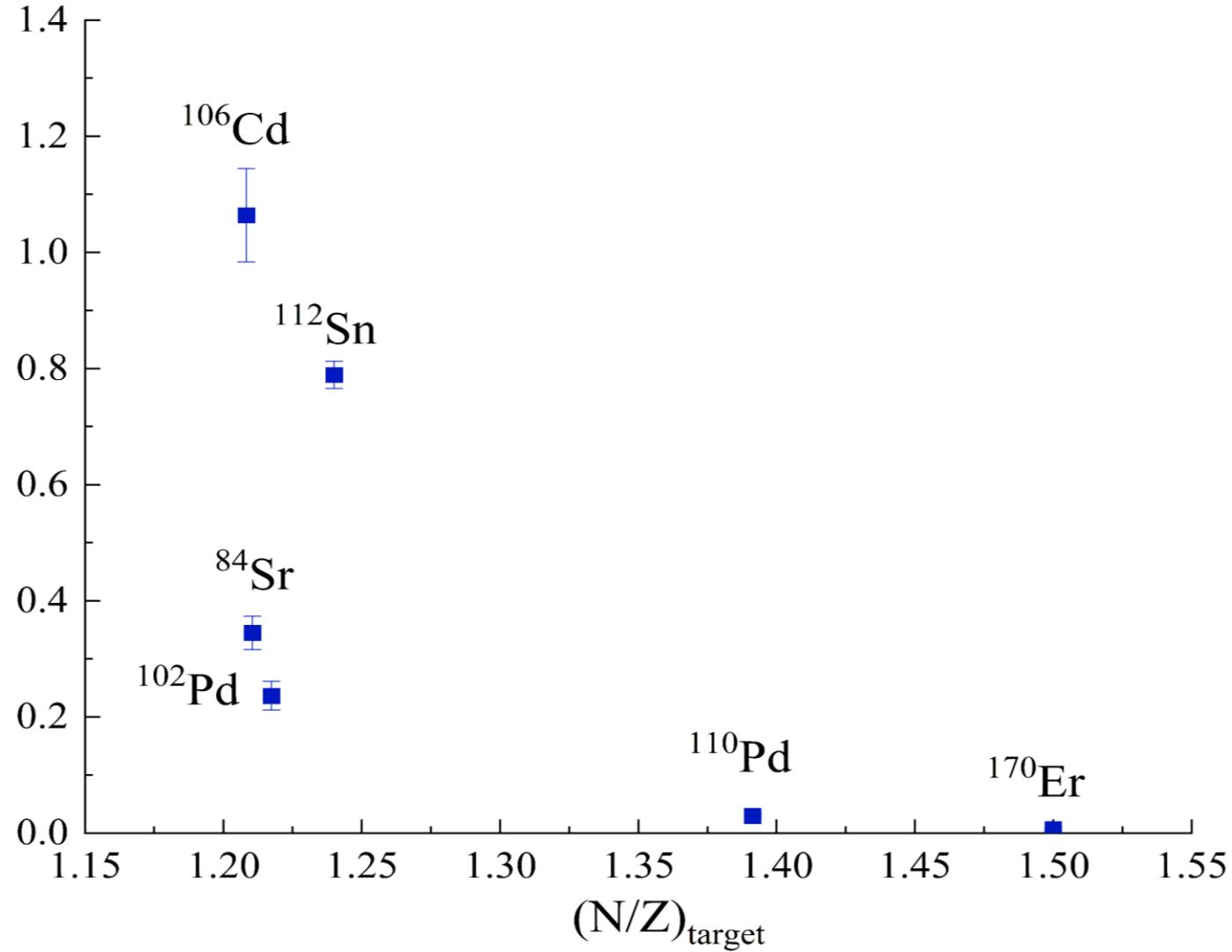
Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., № 1, 3–34 (2016).

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 $\varepsilon + \beta^+ = 100\%$	^{84}Sr STABLE 0.56% $\varepsilon = 100\%$	^{85}Sr 64.849 d $\varepsilon = 100\%$	^{86}Sr STABLE 9.86% $\varepsilon = 100\%$	^{87}Sr STABLE 7% $\beta^- = 99.994\%$ $\varepsilon = 5.2 \times 10^{-3}\%$
^{82}Rb 1.26 min $\varepsilon + \beta^+ = 100\%$	^{83}Rb 86.2 d $\varepsilon = 100\%$	^{84}Rb 32.82 d $\varepsilon + \beta^+ = 96.1\%$ $\beta^- = 3.9\%$	^{85}Rb STABLE 72.17% $\varepsilon = 100\%$	^{86}Rb 18.671 d $\beta^- = 99.994\%$ $\varepsilon = 5.2 \times 10^{-3}\%$
^{101}Pd 8.47 h $\varepsilon + \beta^+ = 100\%$	^{102}Pd STABLE 1.02% $\varepsilon = 100\%$	^{103}Pd 17 d $\varepsilon = 100\%$	^{104}Pd STABLE 11.14% $\varepsilon = 100\%$	^{105}Pd STABLE 22.33% $\varepsilon = 100\%$
^{100}Rh 20.5 h $\varepsilon + \beta^+ = 100\%$	^{101}Rh 4.07 y $\varepsilon = 100\%$	^{102}Rh 207.3 d $\varepsilon + \beta^+ = 78\%$ $\beta^- = 22\%$	^{103}Rh STABLE 100% $\varepsilon = 100\%$	^{104}Rh 42.3 s $\beta^- = 99.55\%$ $\varepsilon + \beta^+ = 0.45\%$

Сравнение отношений выходов фотопротонных и фотонейтронных реакций

Спасибо за внимание!