



ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова и кафедра  
Общей ядерной физики физического факультета МГУ



# *Многонуکلонные фотоядерные реакции на средних и тяжелых ядрах*

Докладчик: Фурсова Н.Ю.

# Актуальность работы

## 1. Описание процессов образования и распада обойденных ядер

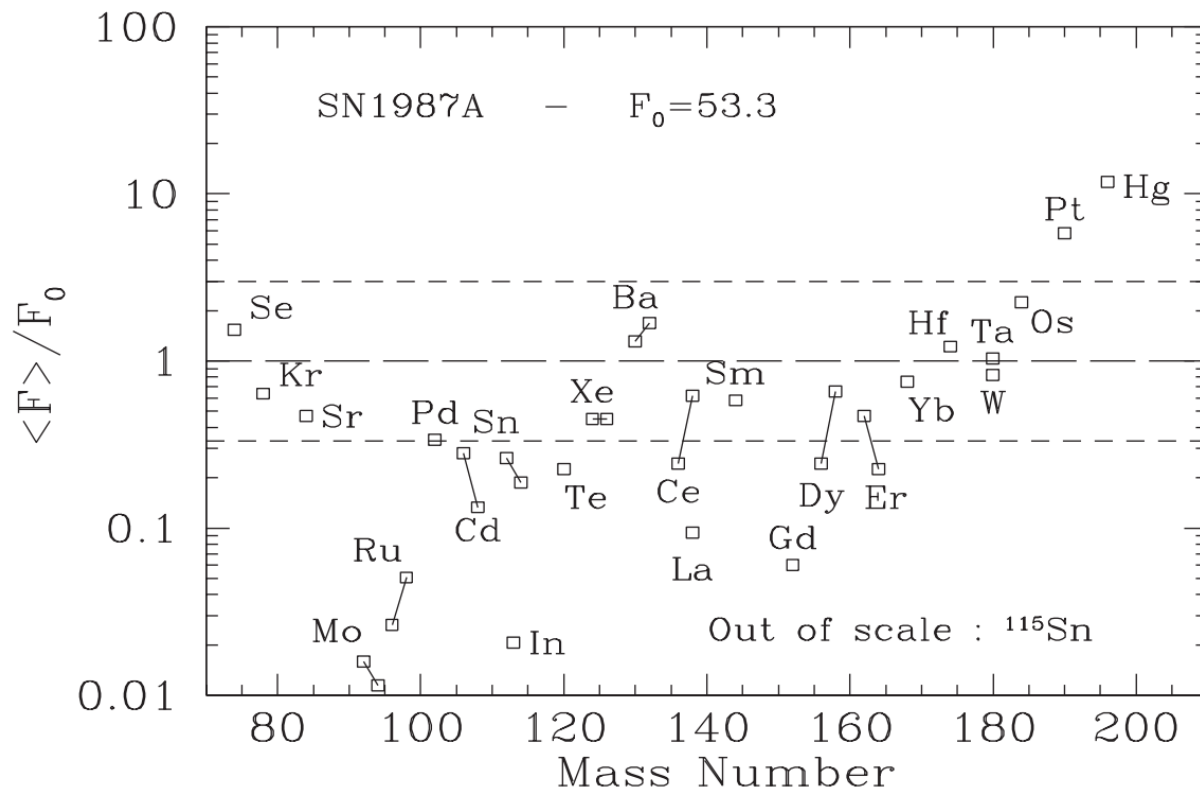
Обойденные ядра - это группа из 35 стабильных ядер от  $^{74}\text{Se}$  до  $^{196}\text{Hg}$ , находящихся в стороне от траекторий s- и r-процессов образования ядер. Природное содержание таких ядер в солнечной системе невозможно объяснить с помощью обычных моделей формирования тяжелых ядер за счет реакций захвата нейтронов.

<b>Tc92</b> 4.25 м (8)+ m	<b>Tc93</b> 2.75 ч 9/2+ m	<b>Tc94</b> 293 м 7+ m	<b>Tc95</b> 20.0 ч 9/2+ m	<b>Tc96</b> 4.28 дн 7+ m	<b>Tc97</b> 4.21E6 л 9/2+ m	<b>Tc98</b> 4.2E6 л (6)+ m	<b>Tc99</b> 2.111E5 л 9/2+ m	<b>Tc100</b> 15.46 с 1+ m	<b>Tc101</b> 14.22 м 9/2+ m	<b>Tc102</b> 5.28 с 1+ m	<b>Tc103</b> 54.2 с 5/2+ m
<b>Mo91</b> 15.49 м 9/2+ m	<b>Mo92</b> 14.84 0+ m	<b>Mo93</b> 4.0E3 л 5/2+ m	<b>Mo94</b> 9.25 0+ m	<b>Mo95</b> 15.92 5/2+ m	<b>Mo96</b> 16.68 0+ m	<b>Mo97</b> 9.55 5/2+ m	<b>Mo98</b> 24.13 0+ m	<b>Mo99</b> 65.94 ч 1/2+ m	<b>Mo100</b> 9.63 7.3E18 л 0+ m	<b>Mo101</b> 14.61 м 1/2+ m	<b>Mo102</b> 11.3 м 0+ m
<b>Nb90</b> 14.60 ч 8+ m	<b>Nb91</b> 6.8E2 л 9/2+ m	<b>Nb92</b> 3.47E7 л (7)+ m	<b>Nb93</b> 100 9/2+ m	<b>Nb94</b> 2.03E4 л 6+ m	<b>Nb95</b> 34.991 дн 9/2+ m	<b>Nb96</b> 23.35 ч 6+ m	<b>Nb97</b> 72.1 м 5/2+ m	<b>Nb98</b> 2.86 с 1+ m	<b>Nb99</b> 15.0 с 9/2+ m	<b>Nb100</b> 1.5 с + m	<b>Nb101</b> 7.1 с (5/2)+ m
<b>Zr89</b> 78.41 ч 9/2+ m	<b>Zr90</b> 51.45 0+ m	<b>Zr91</b> 11.22 5/2+ m	<b>Zr92</b> 17.15 0+ m	<b>Zr93</b> 53E6 л 5/2+ m	<b>Zr94</b> 17.38 0+ m	<b>Zr95</b> 64.032 дн 5/2+ m	<b>Zr96</b> 2.80 2.0E19 л 0+ m	<b>Zr97</b> 16.744 ч 1/2+ m	<b>Zr98</b> 30.7 с 0+ m	<b>Zr99</b> 2.1 с (1/2)+ m	<b>Zr100</b> 7.1 с 0+ m

В современных расчетных моделях учитывается образование обойденных ядер в результате протекания других реакций, прежде всего фотоядерных реакций ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, p$ ).

Траектории s- и r-процессов образования изотопов молибдена

# 1. Описание процессов образования и распада обойденных ядер



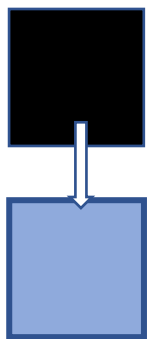
Наблюдаются значительные расхождения между расчетом и наблюдаемым содержанием обойденных ядер, причем недооценка в некоторых случаях ( $^{92,94}\text{Mo}$ ) достигает двух порядков. Одним из основных факторов, затрудняющих расчет образования обойденных ядер, является отсутствие или недостаточная точность экспериментальных сечений фотонуклонных реакций.

Рассчитанные на основе статистической модели распространенности обойденных ядер, образовавшихся в результате взрыва сверхновой с массой равной 20-ти солнечным массам, нормированные на распространенность обойденных ядер в солнечной системе

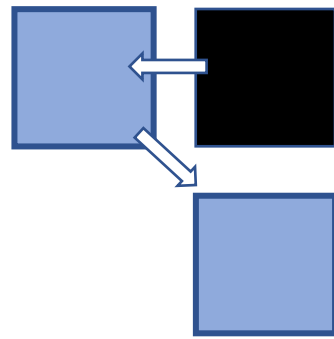
# Актуальность работы

## 2. Альтернативный метод производства медицинских изотопов на ускорителях электронов

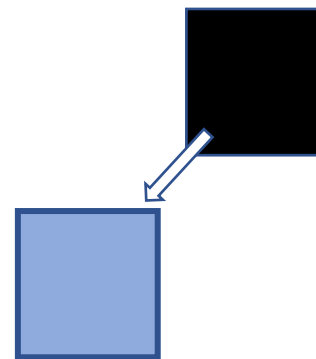
- Относительная безопасность линейных ускорителей по сравнению с реакторами, более низкие эксплуатационные расходы, отсутствие большого количества радиоактивных отходов и трудностей, связанных с ними при выводе установок из эксплуатации;
- Возможность использования компактных ускорителей электронов в непосредственной близости от медицинских центров;
- В ряде случаев, простая химия разделения макроколичеств мишени и микроколичеств целевого нуклида;
- Альтернатива при производстве тех радионуклидов, которые находятся далеко от линии стабильности на N-Z диаграмме и не могут быть получены простыми путями.



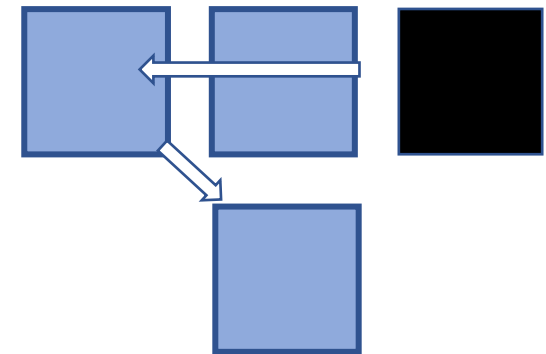
$(\gamma, p)$



$(\gamma, n)\beta^+$



$(\gamma, pn)$



$(\gamma, 2n)\beta^+$

# Актуальность работы

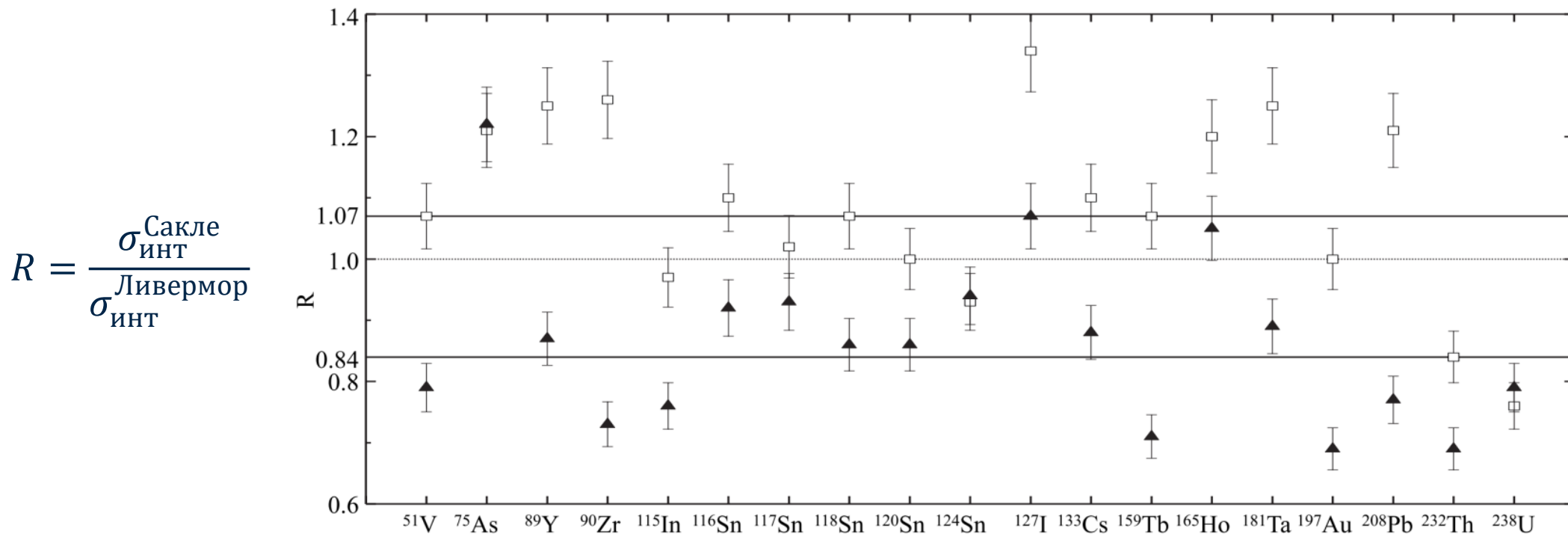
## 3. Планирование и разработка первых экспериментов на ИКИ НЦФМ



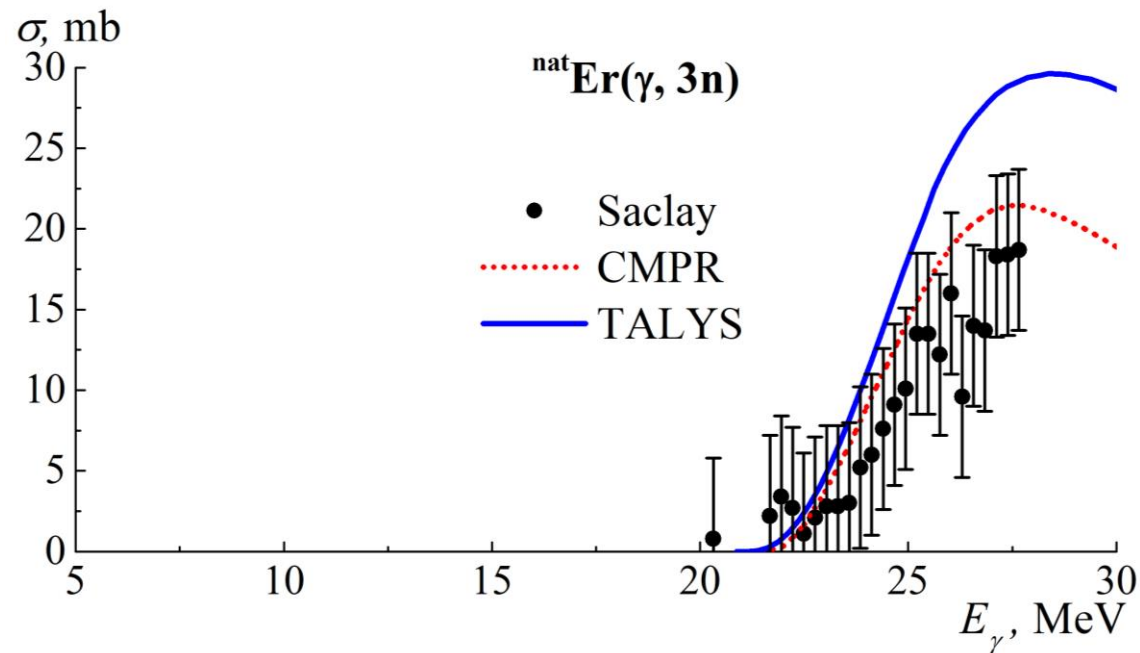
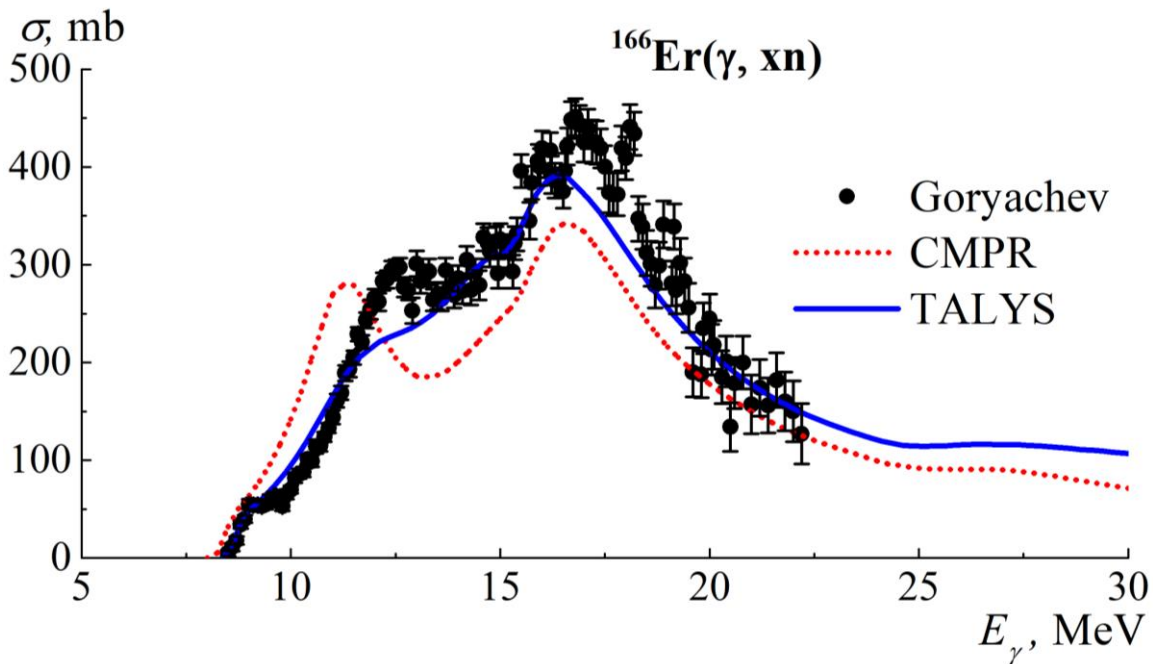
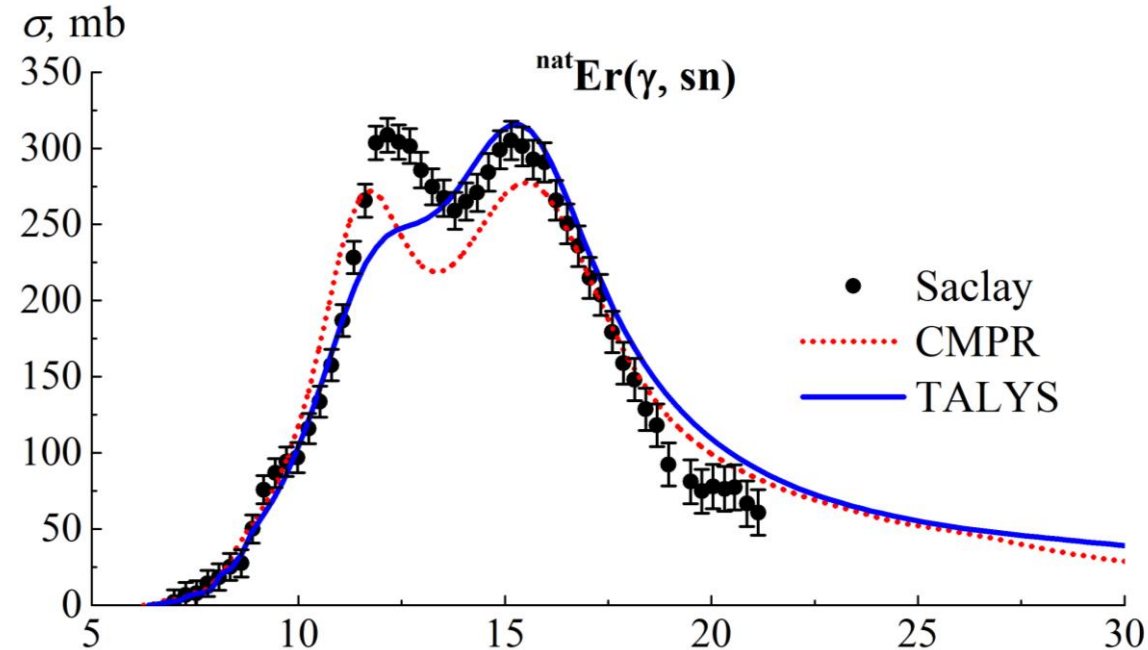
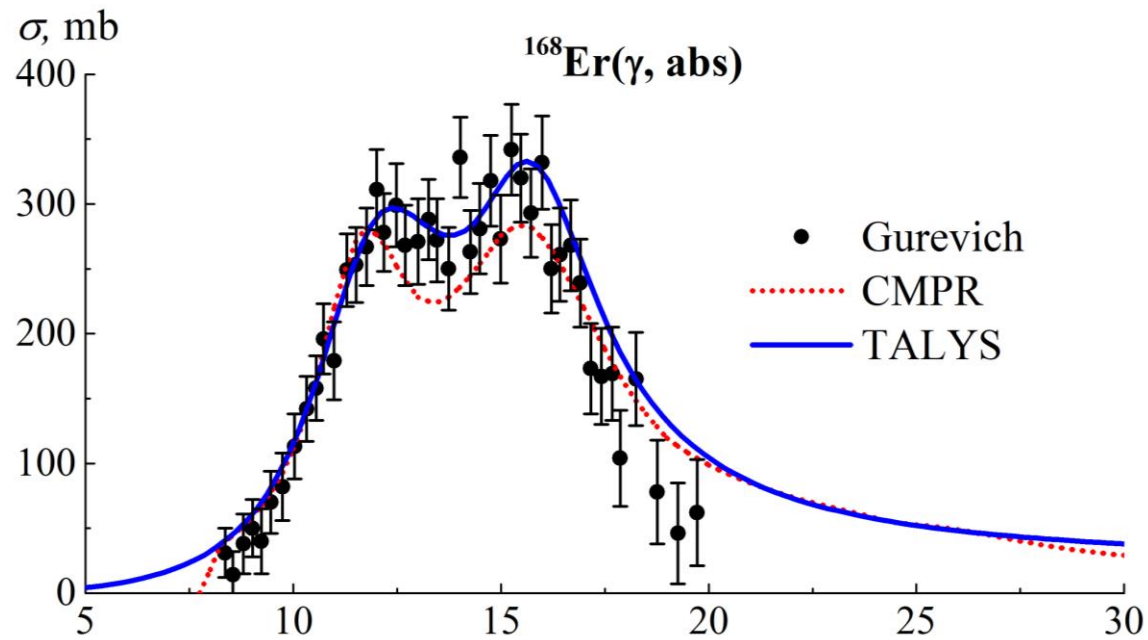
# Актуальность работы

## 4. Описание фотоядерных реакций с помощью теоретических моделей

Установлено, что в экспериментах одного типа - на пучках аннигиляционных фотонов, выполненных в двух лабораториях (Ливермор (США) и Сакле (Франция)), определенные сечения парциальных реакций ( $\gamma, 1n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ) для 19 ядер существенно (до 100% величины) различаются между собой.



Полная систематика отношений интегральных сечений парциальных реакций, полученных в Сакле и Ливерморе:  
квадраты - данные для реакции ( $\gamma, 1n$ ), треугольники - ( $\gamma, 2n$ )



# Комбинированная модель фотонуклонных реакций

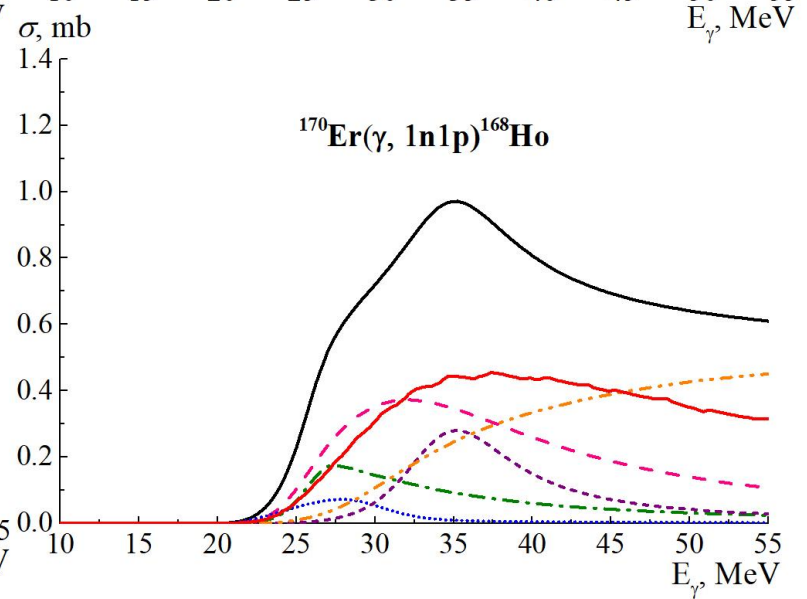
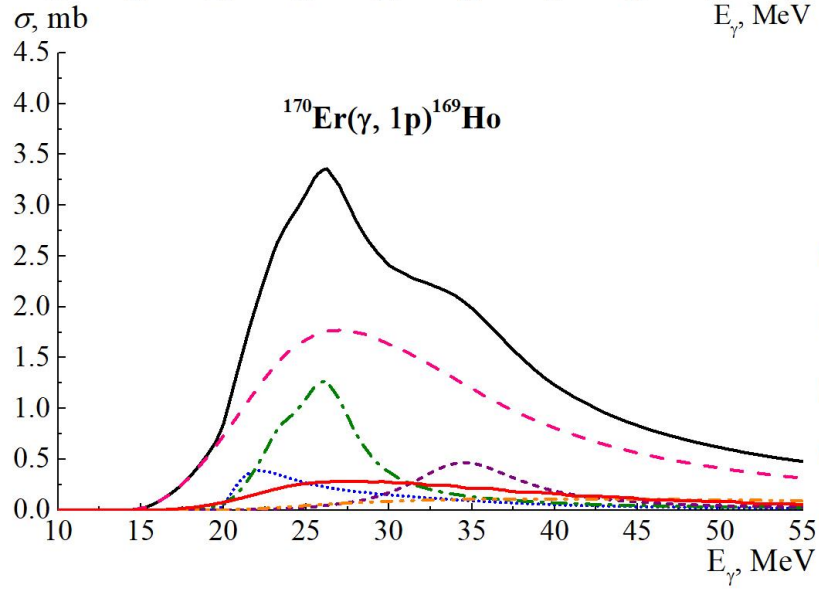
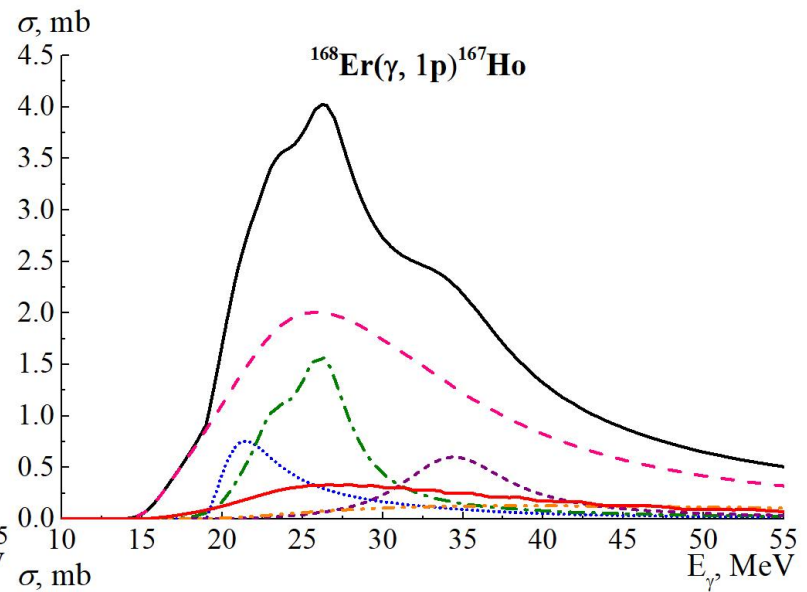
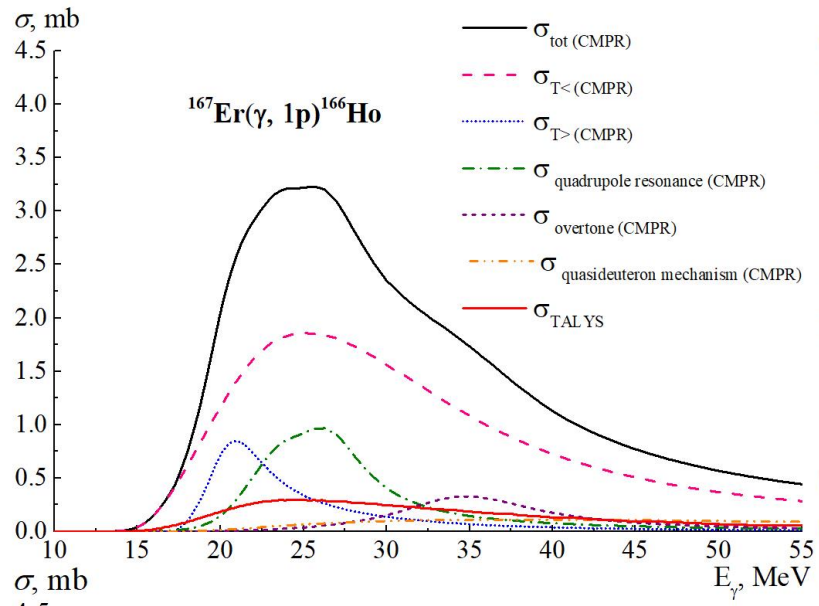
Комбинированная модель фотонуклонных реакций (КМФР) - вычислительная модель для описания сечений парциальных реакций и энергетических спектров вылетающих частиц в фотоядерных реакциях в области энергий ГДР. Автор модели: В.Н. Орлин (НИИЯФ МГУ).



В рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций предполагается разделение ядерной реакции на две независимые стадии: образование составной системы и распад этой системы на продукты реакции.

Первая стадия описывается с помощью полумикроскопической модели колебаний (ПМК) и квазидейтронной модели фотопоглощения (КДМ), вторая - с помощью экситонной (ЭМ) и испарительной моделей (ИМ).



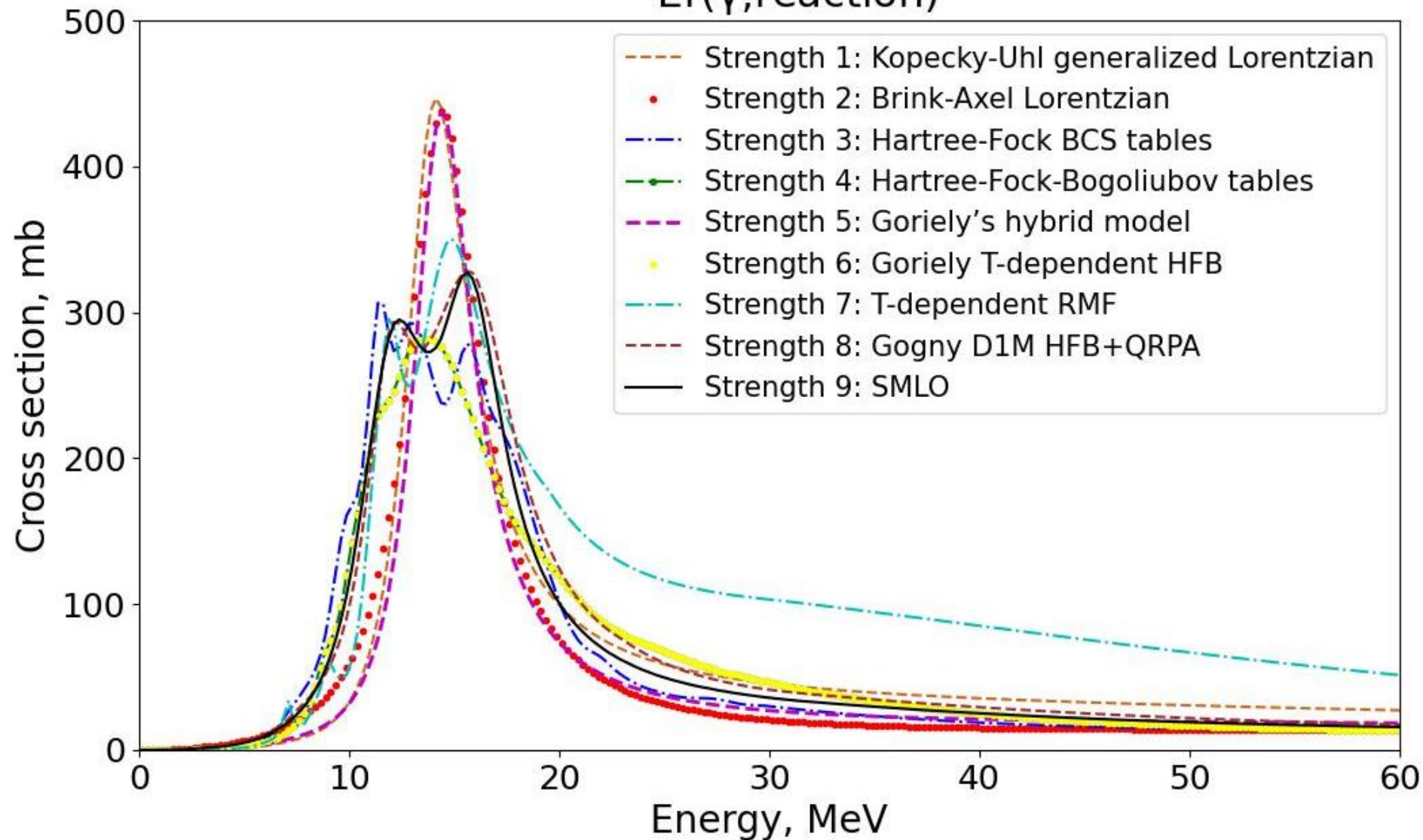


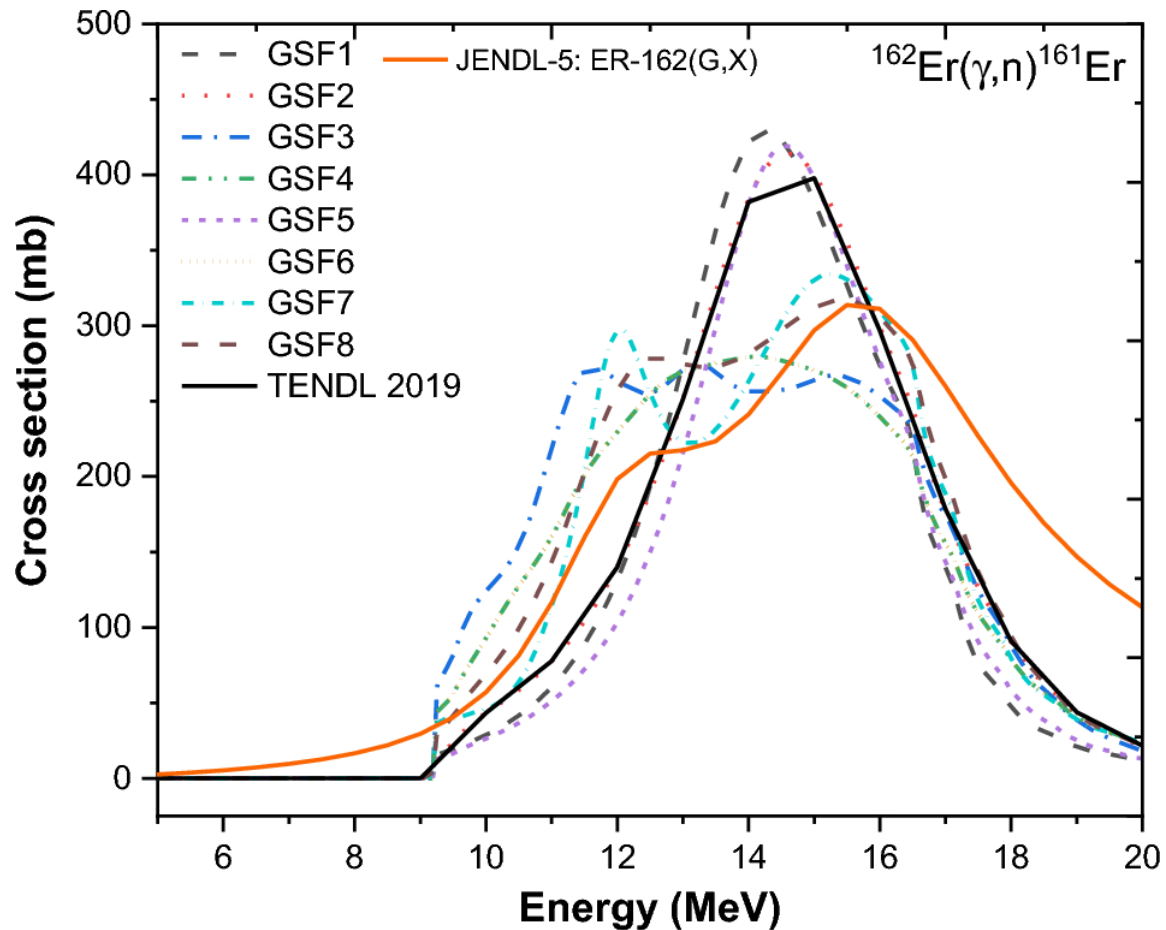
Главное отличие комбинированной модели фотонуклонных реакций от других моделей заключается в учете:

- влияния изоспиновых эффектов на эволюцию возбужденного состояния ядра, возникшего после поглощения фотона;
- изовекторного гигантского квадрупольного резонанса (ГКР)
- обертона ГДР (ГДР2).

# TALYS

$^{168}\text{Er}(\gamma, \text{reaction})$





Сечение реакции  $^{162}\text{Er}(\gamma, n) ^{161}\text{Er}$ , рассчитанное с помощью TALYS 1.95 для восьми различных силовых функций, и библиотек данных TENDL-2019 и JENDL-5

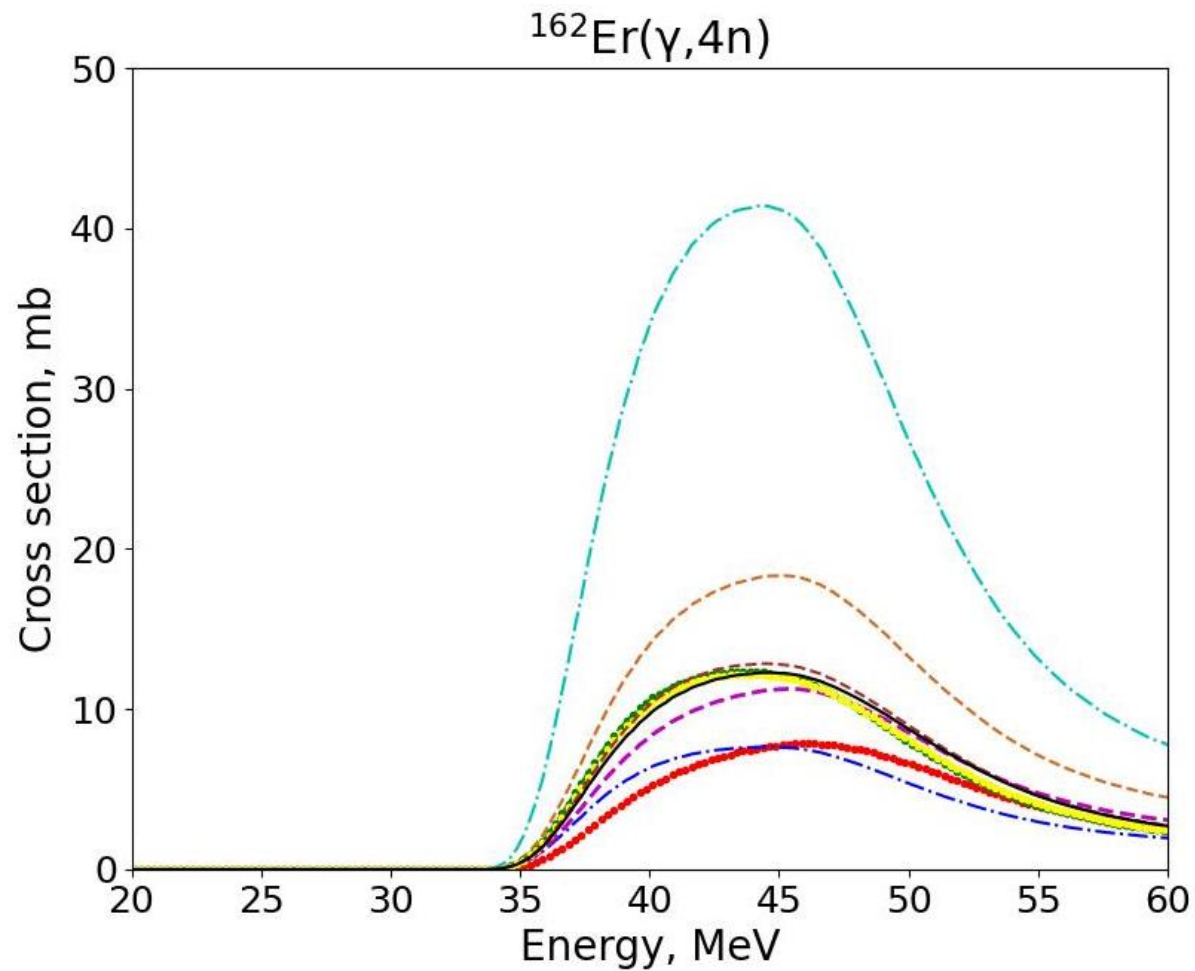
Теоретические эффективные сечения, рассчитанные с помощью TALYS 1.95 при энергии 15 МэВ для восьми силовых функций (GSF1-GSF8), составили 125.59, 128.68, 197.1, 170.7, 106.13, 170.7, 149.98 и 165.35 мб соответственно.

Образец из  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (99.99%) в виде порошка с естественным содержанием изотопов облучался на медицинском ускорителе (Dr. Vikhe Patil Memorial Hospital, Ahmednagar, India) с энергией 15 МэВ в течение 1500 с. Мощность дозы поддерживалась постоянной и составляла  $680 \pm 10$  сГр/мин.

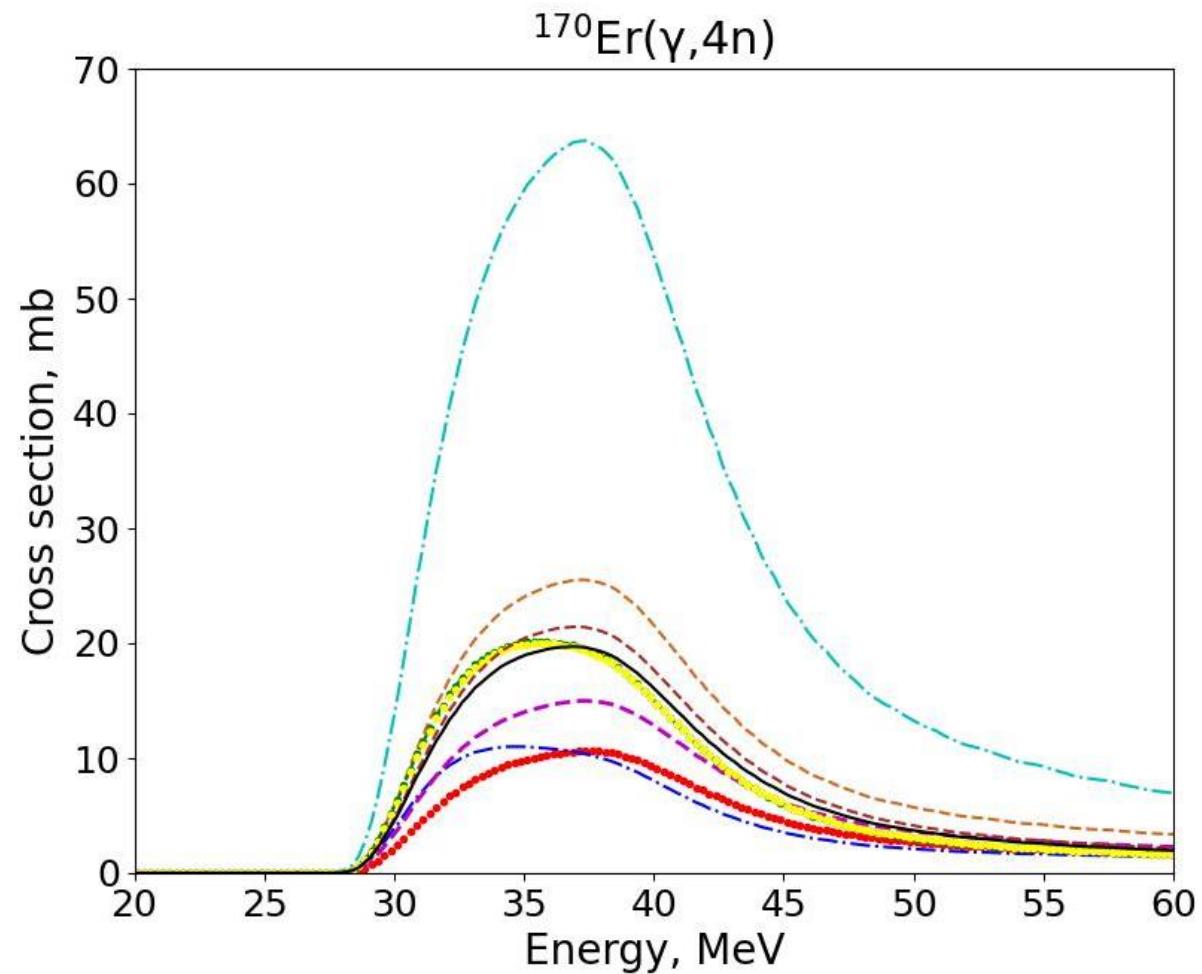
Измеренное сечение для реакции  $^{162}\text{Er}(\gamma, n) ^{161}\text{Er}$  составило  $126.26 \pm 15.02$  мб при конечной энергии тормозного излучения 15 МэВ.

Bholane G.T., Ganesapandy T.S., Patil S.H. et al. Eur. Phys. J. A **59**, 127 (2023).

<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-01042-3>



- Strength 1: Kopecky-Uhl generalized Lorentzian
- Strength 2: Brink-Axel Lorentzian
- .- Strength 3: Hartree-Fock BCS tables
- Strength 4: Hartree-Fock-Bogoliubov tables
- .- Strength 5: Goriely's hybrid model



- Strength 6: Goriely T-dependent HFB
- .- Strength 7: T-dependent RMF
- Strength 8: Gogny D1M HFB+QRPA
- Strength 9: SMLO

## Квазидейтронный механизм фотопоглощения

Квазидейтронную модель фоторасщепления впервые предложил Левинджер. Левинджер предположил, что сечение ядерного фоторасщепления выше ГДР  $\sigma_{qd}(E)$  может быть описано в терминах сечения фоторасщепления свободного дейтрона  $\sigma_d(E)$ :

$$\sigma_{qd}(E) = L \frac{NZ}{A} \sigma_d(E) f(E)$$

где  $E$  означает энергию падающего фотона,  $L$  - параметр Левинджера,  $A$  - массовое число,  $N$ - число нейтронов,  $Z$  - число протонов,  $f(E)$  - Паули-блокинг функция.

Параметризация сечения фоторасщепления свободного дейтрона:

$$\sigma_d(E) = 61.2 \frac{(E-2.224)^{3/2}}{E^3} \text{ мб}$$

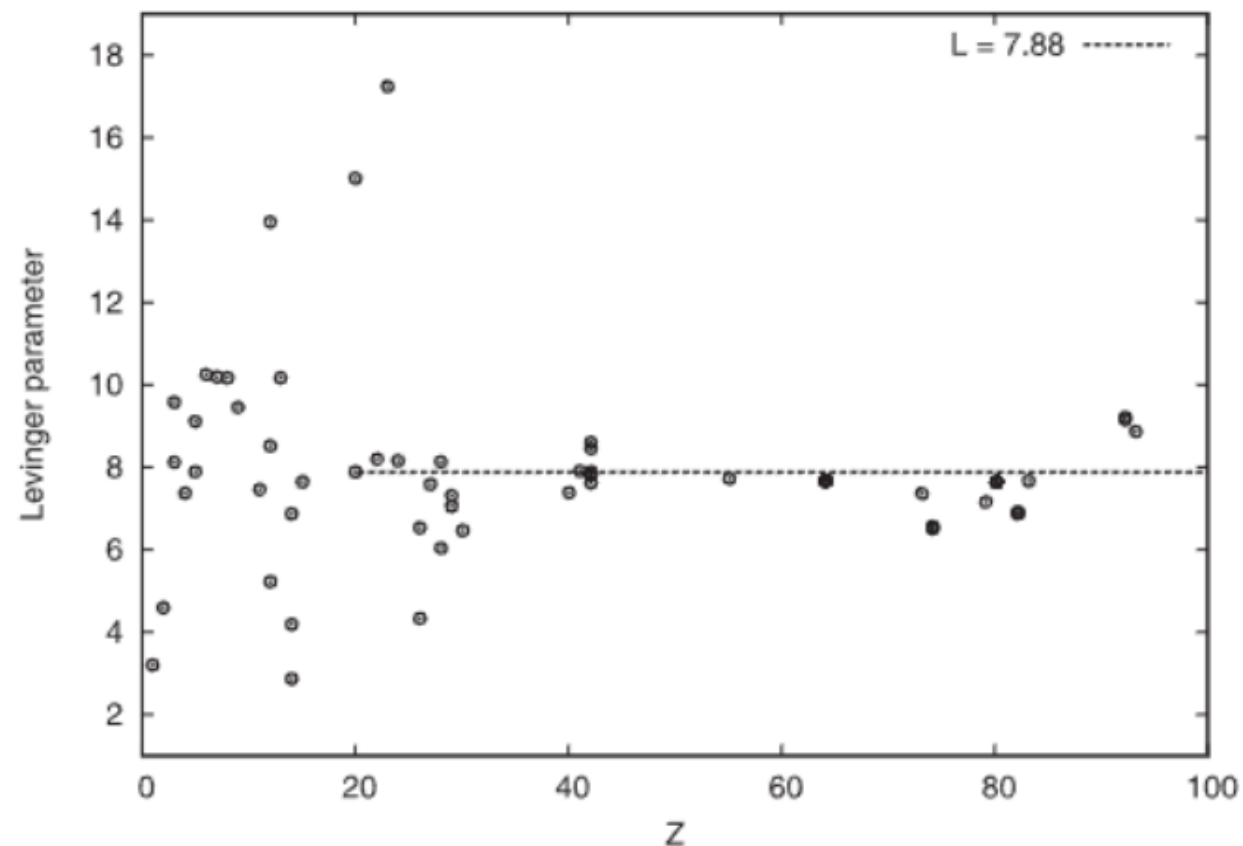
где  $E$  выражается в МэВ, а энергия связи свободного дейтрона равна 2.224 МэВ.

Паули-блокинг функция имеет следующий вид:

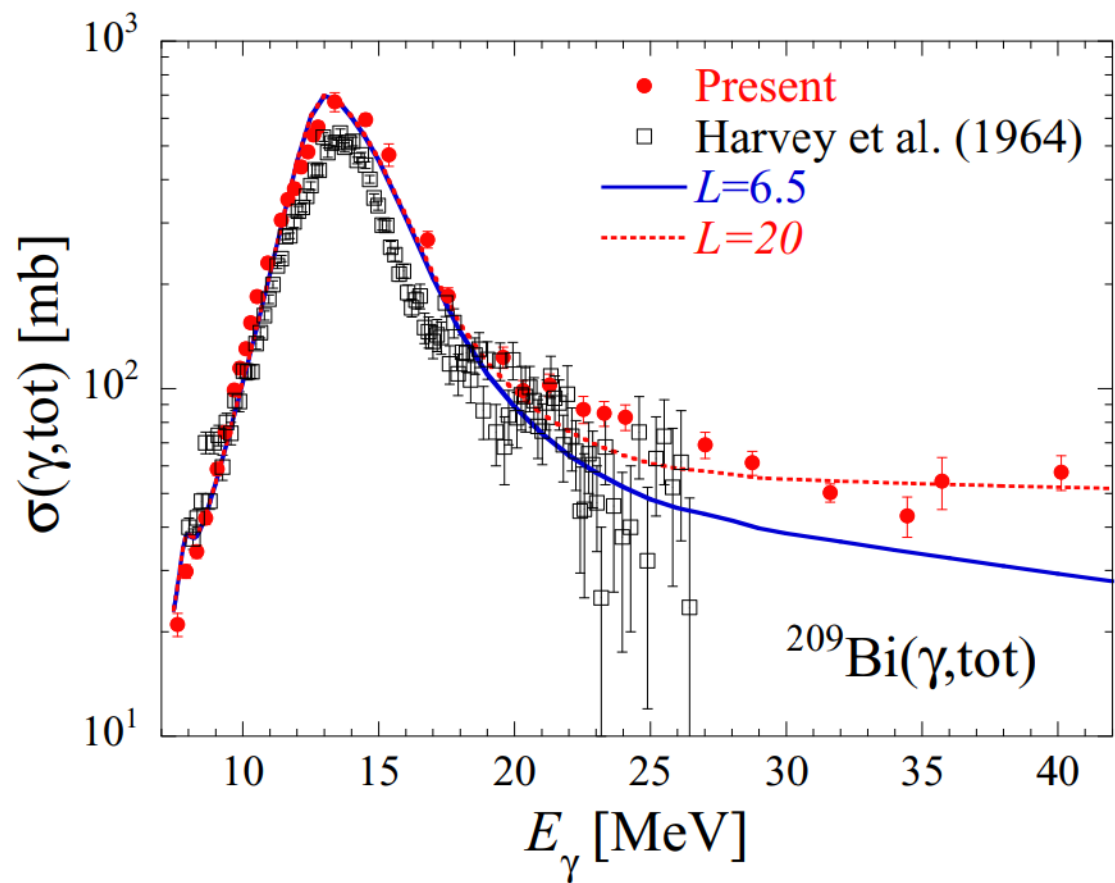
$$f(E) = 8.3714 \cdot 10^{-2} - 9.8343 \cdot 10^{-3} E + 4.1222 \cdot 10^{-4} E^2 - 3.4762 \cdot 10^{-6} E^3 + 9.3537 \cdot 10^{-9} E^4$$

Параметры Левинджера для 68 ядер, данные о сечении которых включены в JENDL/PD-2004, были определены методом наименьших квадратов из суммарных сечений, предполагая, что вклад гигантского резонанса выше 100 МэВ отсутствует.

Значения для ядер с  $Z > 20$  оказались примерно равными 8. Для легких ядер параметр Левинджера сильно различается и не подчиняется единой закономерности. В статье принято постоянное значение 7.88 для ядер, сечения которых не включены в JENDL/PD-2004.



Параметры Левинджера, полученные методом наименьших квадратов. Пунктирная линия показывает усредненное значение для  $Z > 20$ , то есть  $L = 7.88$



Сравнение экспериментального сечения  $\sigma(\gamma, tot) = \sum_{x=1}^4 \sigma(\gamma, xn)$  с предыдущими измерениями [1] и расчетами по программе TALYS для двух значений параметра Левинджера:  $L = 6.5$  (сплошная линия) и  $L = 20$  (пунктирная линия)

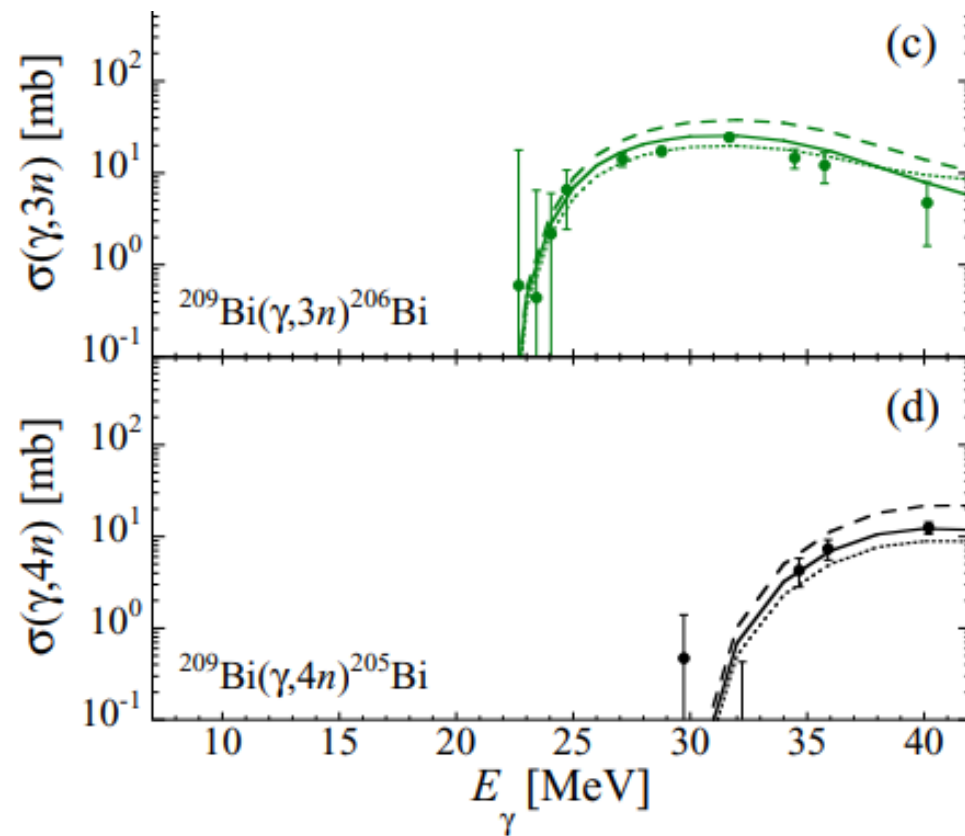
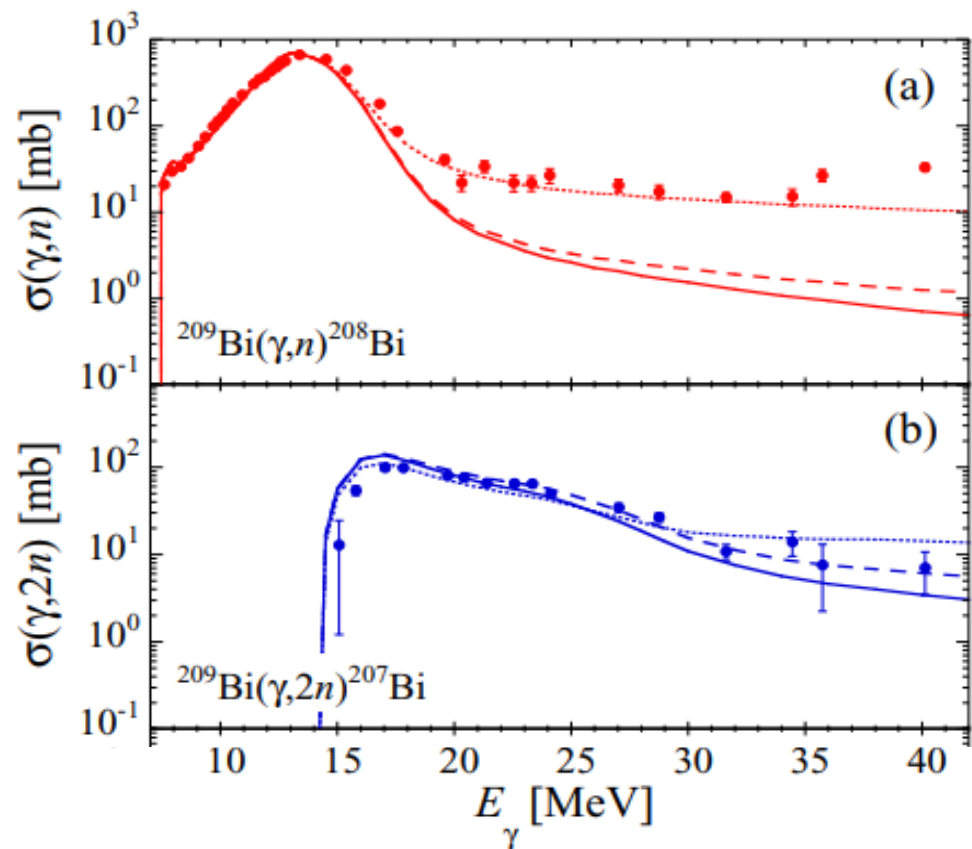
При энергиях выше 20 МэВ расчет по программе TALYS, в котором преобладает вклад квазидейтронов со стандартным значением  $L \approx 6.5$  по умолчанию, недооценивает измеренное сечение. Используя то же выражение для Паули-блокинг функции, для воспроизведения полного сечения при энергиях от 20 до 40 МэВ требуется значение параметра Левинджера примерно в три раза большее.

Эксперимент [1] 1964 года проводился на монохроматических фотонах с переменной энергией, полученных в результате аннигиляции на лету быстрых позитронов.

Другие измерения [2] сечения фотонейтронов были выполнены в реакциях  $^{209}\text{Bi}(\gamma, xn)$ , где  $x = 1-4$ , с использованием пучков гамма-излучения LCS на установке NewSUBARU.

1. Gheorghe I., Utsunomiya H., Katayama S., Filipescu D., Belyshev S., Stopani K., Orlin V., Varlamov V., Shima T., Amano S., Miyamoto S., Lui Y.-W., Kawano T., Goriely S., Phys. Rev. C **96** (2017).
2. Harvey R., Caldwell J., Bramblett R., Fultz S., Phys. Rev. **136** (1964).

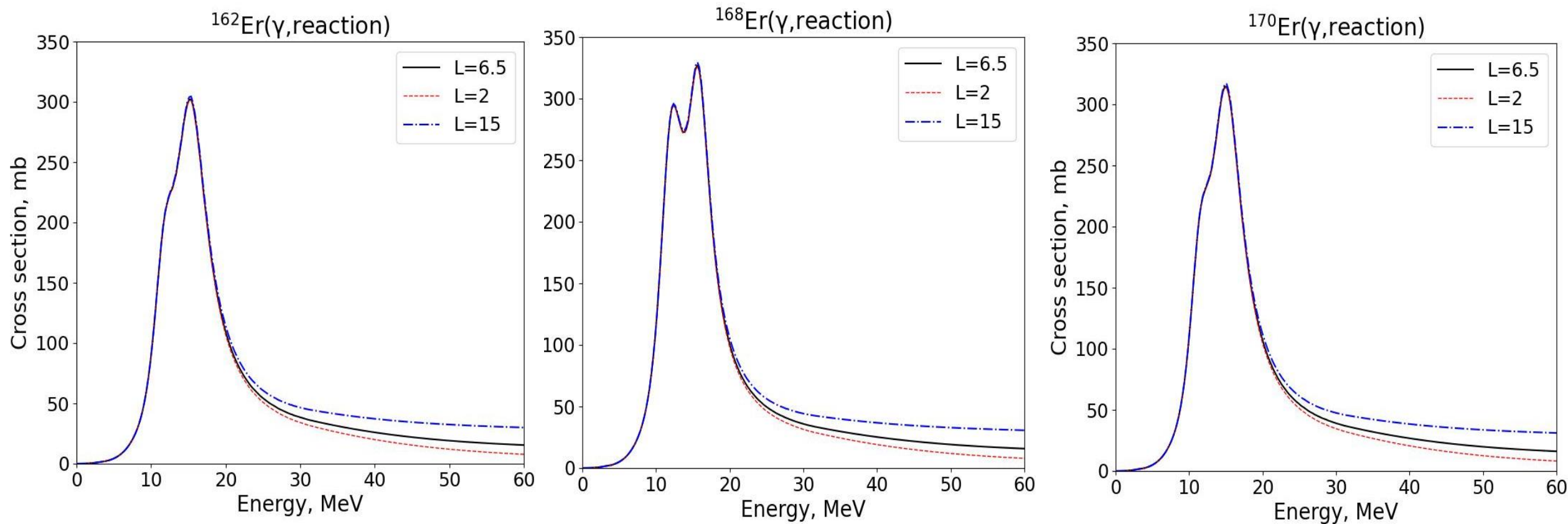
Экспериментальное парциальное сечение ( $\gamma, n$ ) остается выше теоретического даже при увеличении параметра Левинджера.



Сравнение экспериментальных парциальных сечений  $\sigma(\gamma, xn)$  ( $x = 1-4$ ) с расчетами по программе TALYS, полученными с использованием предравновесной параметризации по умолчанию (сплошные линии), модифицированного параметра  $L = 20$  без учета поверхностных эффектов (пунктирные линии) и  $L = 20$  с поверхностными эффектами ( $E_{\text{surf}} = 1$  МэВ) (мелкие пунктирные линии)

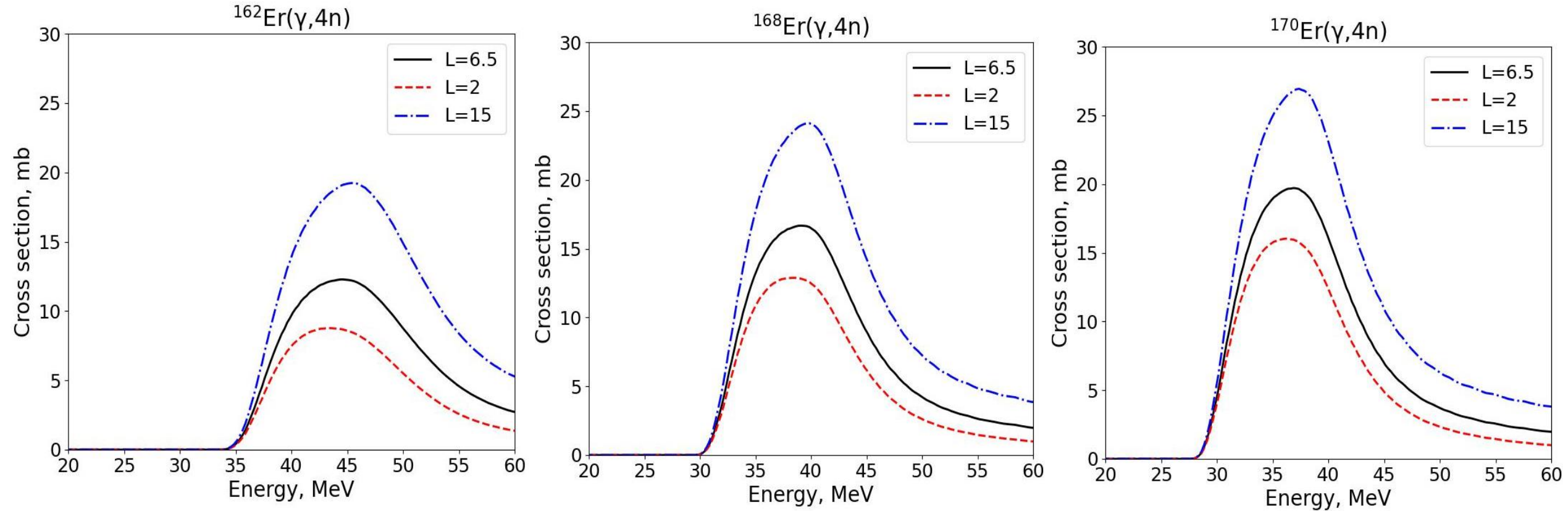


Увеличение параметра Левинджера приводит к повышению сечения фотопоглощения в области энергий выше 20 МэВ. Уменьшение параметра Левинджера приводит к незначительному снижению сечения фотопоглощения в данной области энергий.



Сечения фотопоглощения на изотопах  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{168}\text{Er}$  и  $^{170}\text{Er}$ , рассчитанные с помощью программы TALYS для значений параметра Левинджера по умолчанию  $L = 6.5$  (сплошные линии),  $L = 2$  (красные линии) и  $L = 15$  (синие линии)

Увеличение параметра Левинджера приводит к увеличению сечений многонуклонных реакций.



Сечения реакций  $^{162}\text{Er}(\gamma,4n)$ ,  $^{168}\text{Er}(\gamma,4n)$  и  $^{170}\text{Er}(\gamma,4n)$ , рассчитанные с помощью программы TALYS для значений параметра Левинджера по умолчанию  $L = 6.5$  (сплошные линии),  $L = 2$  (красные линии) и  $L = 15$  (синие линии)

# Эксперимент

- эксперимент проводился на тормозном пучке импульсного разрезного микротрона НИИЯФ МГУ с максимальной энергией электронов 55 МэВ;
- тормозная мишень из сделана вольфрама;
- исследуемые мишени были изготовлены из природной смеси изотопов эрбия, ртути, диспрозия и гафния.

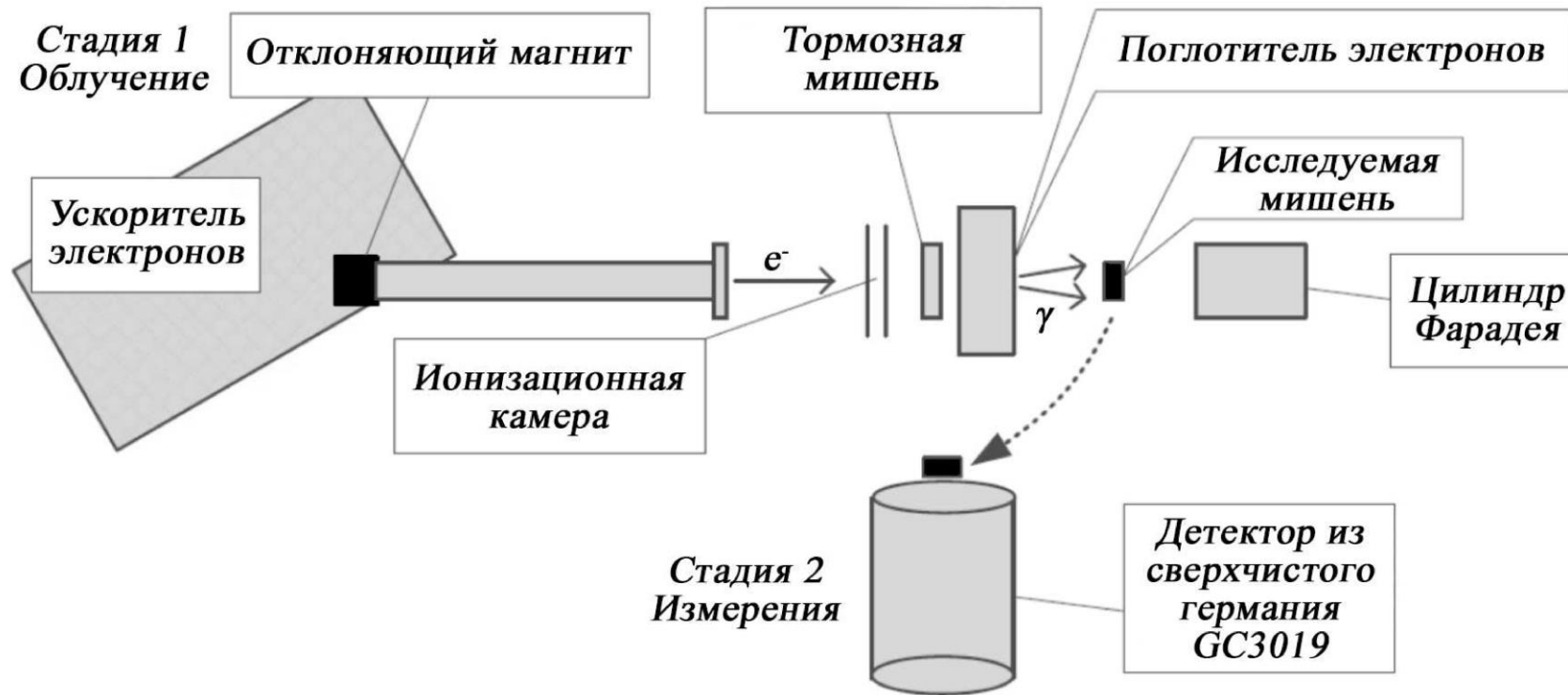
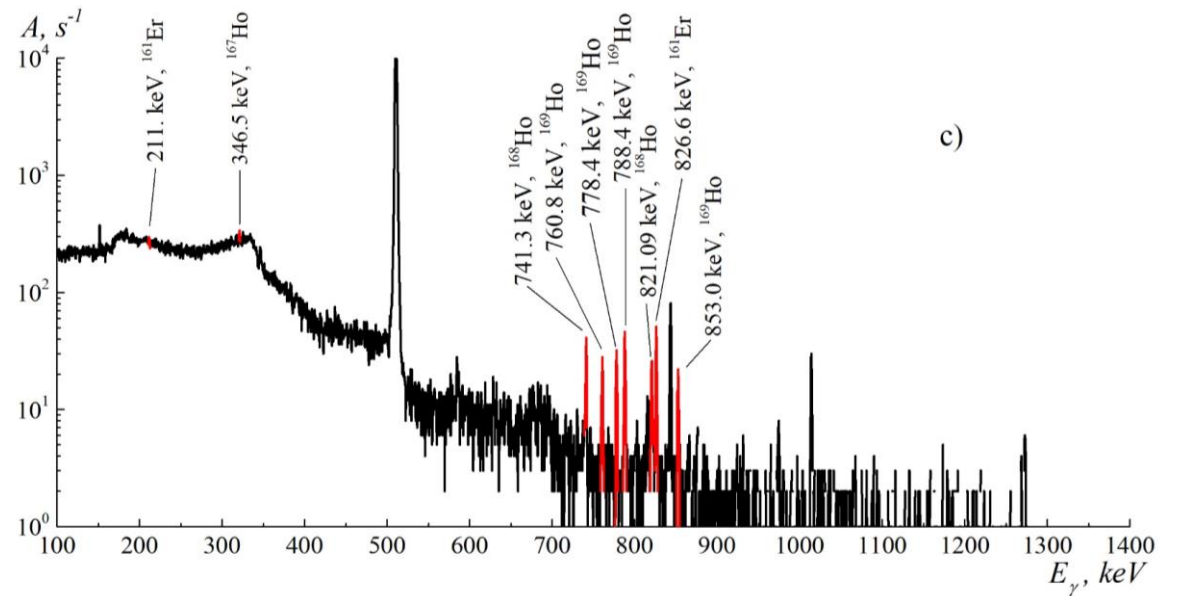
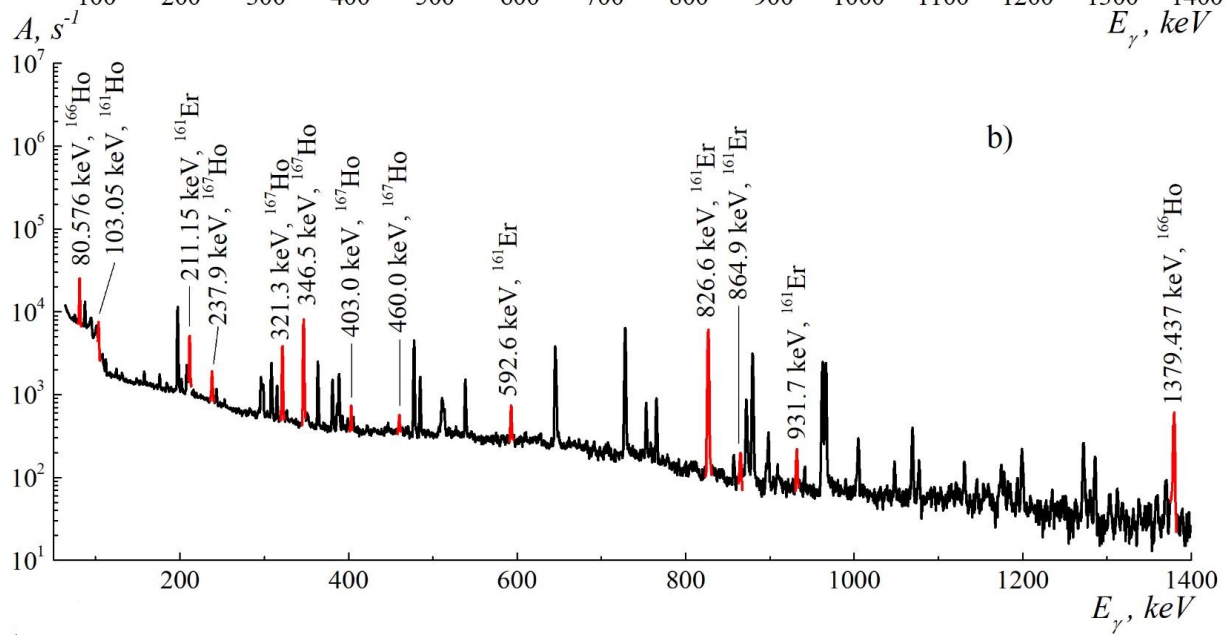
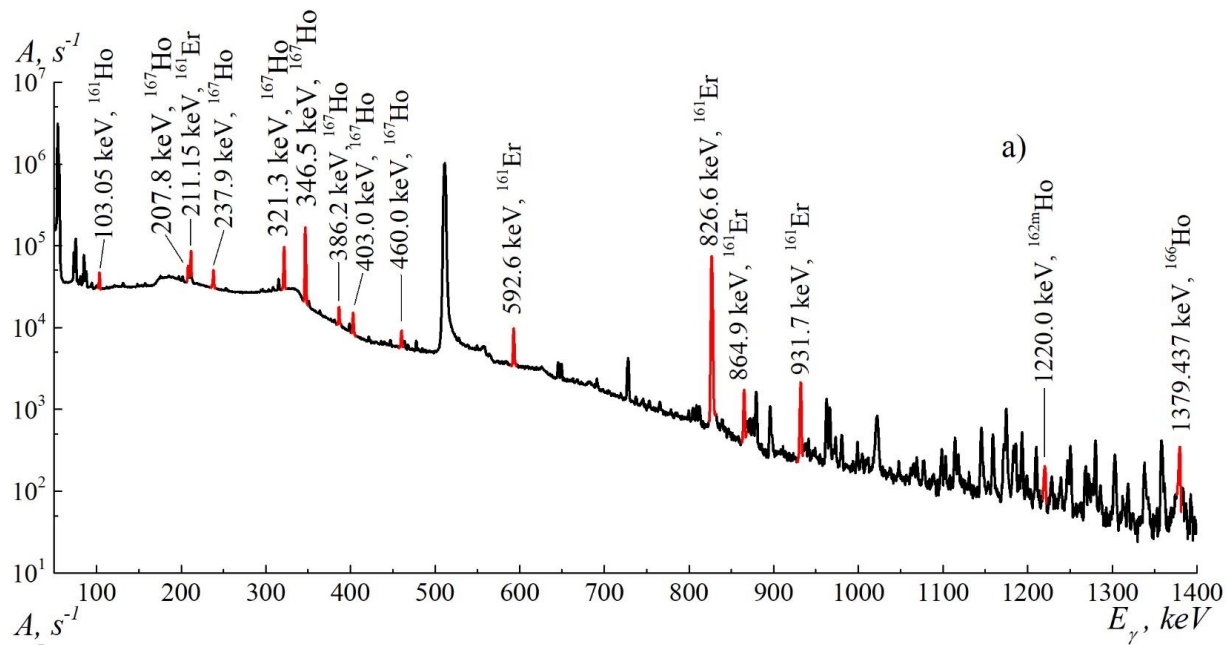


Схема гамма-активационного эксперимента

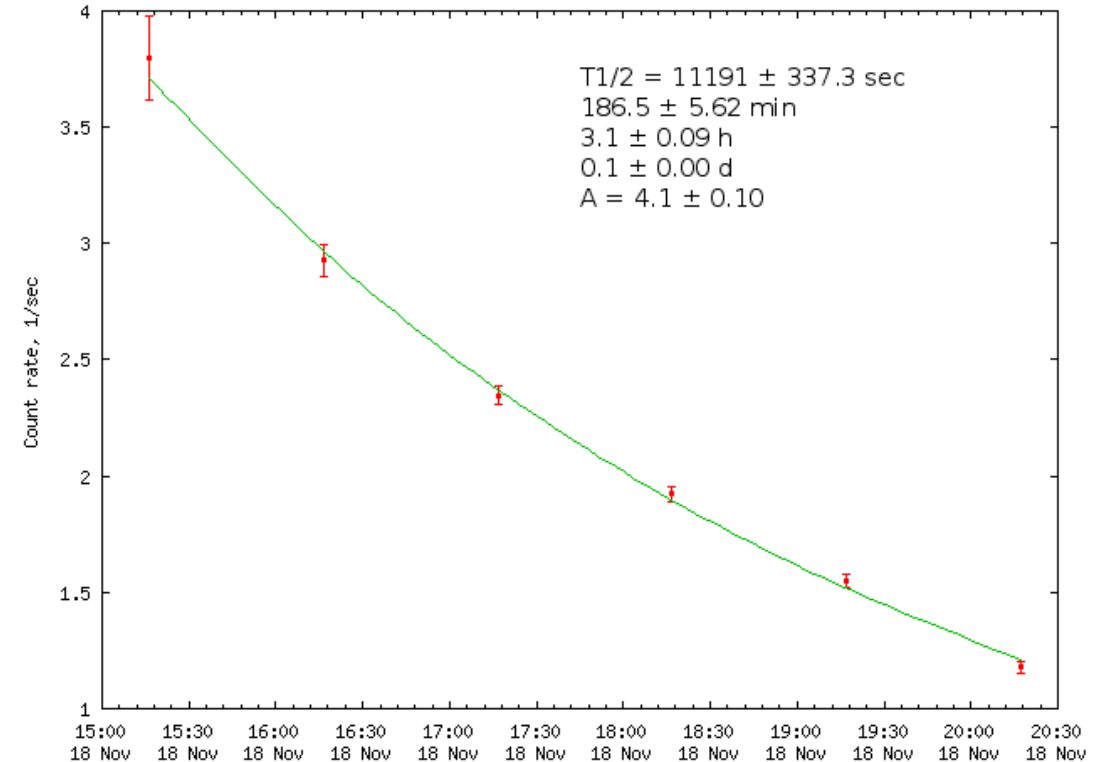


Спектры остаточной активности облученного образца из природной смеси изотопов эрбия через 1 час (а), 1 сутки (б) после первого облучения и 2 минуты (с) после второго облучения

## Обработка результатов эксперимента

Образовавшиеся в результате фотоядерных реакций изотопы идентифицировались по энергии  $\gamma$ -квантов и периоду полураспада образовавшихся изотопов.

Изотоп	$T_{1/2}$	$E_\gamma$ , кэВ ( $I_\gamma$ , %)
$^{161}\text{Er}$	3.21 h	201.47 (1.12), 211.15 (12.2), 592.6 (3.7), 826.6 (64), 864.9 (1.29), 931.7 (1.954)
$^{163}\text{Er}$	75 min	436.1 (0.0285)
$^{169}\text{Er}$	9.4 d	109.78 (0.0013)
$^{162\text{m}}\text{Ho}$	67 min	1220.0 (22.5)
$^{166}\text{Ho}$	26.83 h	90.574 (6.71), 1379.4 (0.93)
$^{167}\text{Ho}$	3.1 h	237.87 (5), 321.2 (23.5)
$^{168}\text{Ho}$	2.99 min	741.356 (36.6), 821.16 (34.5)
$^{169}\text{Ho}$	4.7 min	760.8 (10), 778.4 (10.1), 788.4 (21.2), 853.0 (11.2)



Период полураспада  $^{167}\text{Ho}$ , определенный аппроксимацией

# Обработка результатов эксперимента

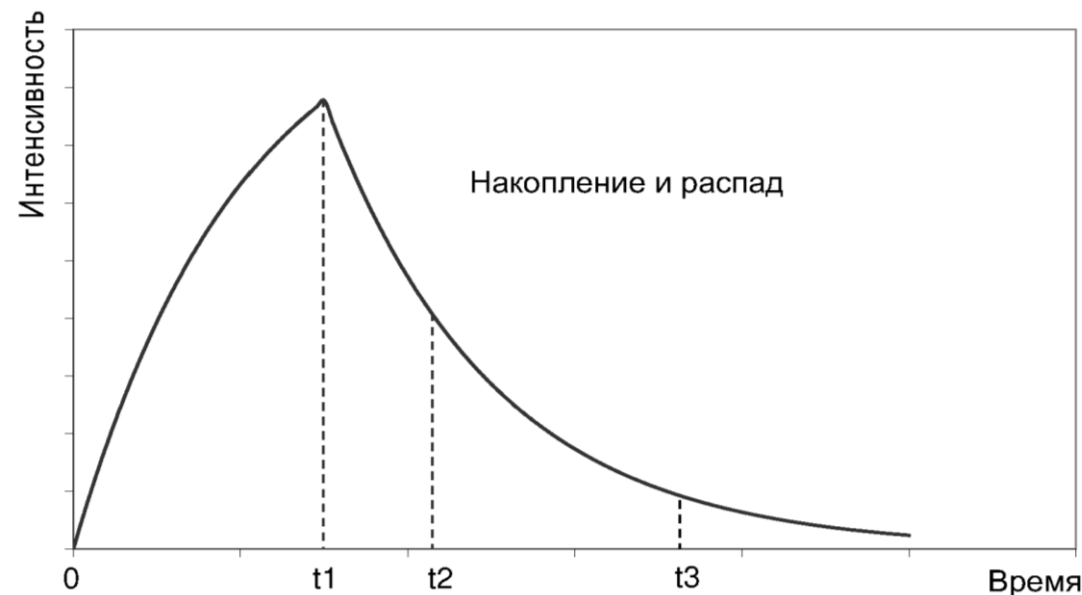
Экспериментальные выходы реакций рассчитывались по площадям фотопиков  $S$  в спектрах остаточной активности:

$$Y_1 = \frac{N_{10}}{e^{-\lambda_1 t_1} \int_0^{t_1} I(t) \cdot e^{\lambda_1 t_1} dt}$$

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

$$N_{20} = \frac{S}{\varepsilon_\gamma I_\gamma (e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)})} + \frac{n_{12} N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left( \lambda_1 - \lambda_2 \frac{e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)}}{e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)}} \right)$$

$$Y_2 = \frac{\lambda_2}{I(1 - e^{-\lambda_2 t_1})} \left( N_{20} - \frac{\lambda_1 n_{12} N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t_1} - e^{-\lambda_2 t_1}) \right)$$



$N_{10}$  - число ядер исследуемого изотопа на момент окончания облучения,  $\lambda$  - постоянная распада изотопа,  $I(t)$  - ток ускорителя,  $t_1$  - время облучения,  $t_2$  - время начала измерения спектров,  $t_3$  - время окончания измерения спектров.

## Обработка результатов эксперимента

Абсолютные выходы фотоядерных реакций с использованием пучков тормозного излучения в экспериментах с различной геометрией отличаются друг от друга из-за разницы в потоках фотонов тормозного излучения. 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:

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

2. Сечение на эквивалентный квант:

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

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

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на изотопах эрбия с расчетами в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS

Разница между экспериментальными и теоретическими значениями сечений на эквивалентный квант для образования  $^{161}\text{Er}$  может быть обусловлена двумя причинами:

- выбор параметра деформации исходного ядра оказывает существенное влияние на теоретический расчет полного сечения фотопоглощения;
- из-за низкого процентного содержания  $^{162}\text{Er}$  в природной смеси изотопов большой вклад в образование  $^{161}\text{Er}$  вносят многонуклонные реакции  $^{164}\text{Er}(\gamma, 3n)$  и  $^{166}\text{Er}(\gamma, 5n)$ , для которых отсутствуют экспериментальные данные, а применимость теоретических моделей требует дополнительных исследований.

Изотоп	Реакция получения изотопа	$E_{\text{thr}}$ , MeV	$\sigma_{\text{q exp}}^{\text{prod}}$ , Мб	$\sigma_{\text{q CMPR}}^{\text{prod}}$ , Мб	$\sigma_{\text{q TALYS}}^{\text{prod}}$ , Мб
$^{161}\text{Er}$	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, \text{in}) =$		$0.292 \pm 0.026$	0.459	0.539
	$0.00139 \cdot ^{162}\text{Er}(\gamma, 1n) +$	9.20		0.283	0.266
	$0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 3n) +$	24.96		0.074	0.122
	$0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 5n) +$	40.08		0.100	0.145
	$0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 6n)$	46.52		0.002	0.006
$^{163}\text{Er}$	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, \text{in}) =$		$4.928 \pm 0.96$	5.765	6.913
	$0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 1n) +$	8.85		3.304	3.10
	$0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 3n) +$	23.97		1.870	2.918
	$0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 4n) +$	30.41		0.455	0.722
	$0.26978 \cdot ^{168}\text{Er}(\gamma, 5n)$	38.18		0.136	0.205
$^{169}\text{Er}$	$0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1n)$	7.26	$18.801 \pm 4.355$	26.982	23.036



Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах эрбия с расчетами в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS

Изотоп	Реакция получения изотопа	$E_{thr}$ , MeV	$\sigma_q^{prod}$ , мб	$\sigma_q^{prod}$ , мб	$\sigma_q^{prod}$ , мб
<b><math>^{161}\text{Ho}</math></b>	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1p_{in}) =$		$(7.36 \pm 13.48) \cdot 10^{-3}$	$10.27 \cdot 10^{-3}$	$5.88 \cdot 10^{-3}$
	$0.00139 \cdot ^{162}\text{Er}(\gamma, 1p) +$	6.43			
	$0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 1p2n) +$	22.18			
	$0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 1p4n) +$	37.30			
	$0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 1p5n)$	43.74		$1.55 \cdot 10^{-6}$	$3.90 \cdot 10^{-5}$
<b><math>^{162m}\text{Ho}</math></b>	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1p_{in}) =$		$(5.543 \pm 0.628) \cdot 10^{-3}$		$7.92 \cdot 10^{-3}$
	$0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 1p1n) +$	15.366			
	$0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 1p3n) +$	30.496			
	$0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 1p4n)$	36.926			
<b><math>^{166}\text{Ho}</math></b>	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1p_{in}) =$		$0.262 \pm 0.011$	$0.594$	$0.101$
	$0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 1p) +$	7.51			
	$0.26978 \cdot ^{168}\text{Er}(\gamma, 1p1n) +$	15.28			
	$0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1p3n)$	28.54			
<b><math>^{167}\text{Ho}</math></b>	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1p_{in}) =$		$0.257 \pm 0.029$	$0.617$	$0.078$
	$0.26978 \cdot ^{168}\text{Er}(\gamma, 1p) +$	8.00			
	$0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1p2n)$	21.26			
<b><math>^{168}\text{Ho}</math></b>	$0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, p1n)$	15.41	$0.040 \pm 0.007$	$0.064$	$0.043$
<b><math>^{169}\text{Ho}</math></b>	$0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1p)$	8.60	$0.100 \pm 0.017$	$0.255$	$0.024$

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на изотопах ртути с расчетами в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS

Изотоп	Реакция получения изотопа	$E_{thr}$ , MeV	$\sigma_{q\ exp}^{prod}$ , Мб	$\sigma_{q\ CMPR}^{prod}$ , Мб	$\sigma_{q\ TALYS}^{prod}$ , Мб
$^{195g+m}Hg$	$^{nat}Hg(\gamma, in) =$		$1.37 \pm 0.08$	1.411	1.952
	$0.0015 \cdot ^{196}Hg(\gamma, 1n) +$	8.90		0.386	0.348
	$0.1004 \cdot ^{198}Hg(\gamma, 3n) +$	24.17		0.563	0.915
	$0.1694 \cdot ^{199}Hg(\gamma, 4n) +$	30.83		0.376	0.545
	$0.2314 \cdot ^{200}Hg(\gamma, 5n)$	38.86		0.087	0.144
$^{197g+m}Hg$	$^{nat}Hg(\gamma, in) =$		$36 \pm 3$	34.808	36.346
	$0.1004 \cdot ^{198}Hg(\gamma, 1n) +$	8.48		25.399	23.736
	$0.1694 \cdot ^{199}Hg(\gamma, 2n) +$	15.15		7.368	9.276
	$0.2314 \cdot ^{200}Hg(\gamma, 3n) +$	23.18		1.479	2.457
	$0.1317 \cdot ^{201}Hg(\gamma, 4n) +$	29.41		0.313	0.558
$0.2974 \cdot ^{202}Hg(\gamma, 5n)$	37.16		0.249	0.319	
$^{199m}Hg$	$^{nat}Hg(\gamma, in) =$		$5.6 \pm 0.3$	-	3.020
	$0.2314 \cdot ^{200}Hg(\gamma, 1n) +$	8.56			1.422
	$0.1317 \cdot ^{201}Hg(\gamma, 2n) +$	14.79			0.885
$0.2974 \cdot ^{202}Hg(\gamma, 5n)$	22.54			0.712	
$^{203}Hg$	$0.0682 \cdot ^{204}Hg(\gamma, 1n)$	7.49	$17.8 \pm 0.9$	16.719	14.879

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах ртути с расчетами в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS

Изотоп	Реакция получения изотопа	$E_{thr}$ , MeV	$\sigma_{q\ exp}^{prod}$ , Мб	$\sigma_{q\ CMPR}^{prod}$ , Мб	$\sigma_{q\ TALYS}^{prod}$ , Мб
<b><math>^{196}\text{Au}</math></b>	$^{nat}\text{Hg}(\gamma, in1p) =$		$0.084 \pm 0.004$	0.071	0.056
	$0.1004 \cdot ^{198}\text{Hg}(\gamma, 1n1p) +$	15.18		0.036	0.030
	$0.1694 \cdot ^{199}\text{Hg}(\gamma, 2n1p) +$	21.84		0.030	0.021
	$0.2314 \cdot ^{200}\text{Hg}(\gamma, 3n1p)$	29.87		0.005	0.006
<b><math>^{198g+m}\text{Au}</math></b>	$^{nat}\text{Hg}(\gamma, in1p) =$		$0.400 \pm 0.004$	0.473	0.124
	$0.1694 \cdot ^{199}\text{Hg}(\gamma, 1p) +$	7.25		0.376	0.035
	$0.2314 \cdot ^{200}\text{Hg}(\gamma, 1n1p) +$	5.28		0.075	0.064
	$0.1317 \cdot ^{201}\text{Hg}(\gamma, 2n1p)$	21.51		0.022	0.016
<b><math>^{199}\text{Au}</math></b>	$^{nat}\text{Hg}(\gamma, in1p) =$		$0.481 \pm 0.024$	0.495	0.122
	$0.2314 \cdot ^{200}\text{Hg}(\gamma, 1p) +$	7.70		0.394	0.043
	$0.1317 \cdot ^{201}\text{Hg}(\gamma, 1n1p) +$	13.93		0.055	0.042
	$0.2974 \cdot ^{202}\text{Hg}(\gamma, 2n1p)$	21.68		0.047	0.037
<b><math>^{200g+m}\text{Au}</math></b>	$^{nat}\text{Hg}(\gamma, in1p) =$		$0.33 \pm 0.03$	0.319	0.099
	$0.1317 \cdot ^{201}\text{Hg}(\gamma, 1p) +$	7.58		0.234	0.022
	$0.2974 \cdot ^{202}\text{Hg}(\gamma, 1n1p)$	15.44		0.083	0.076

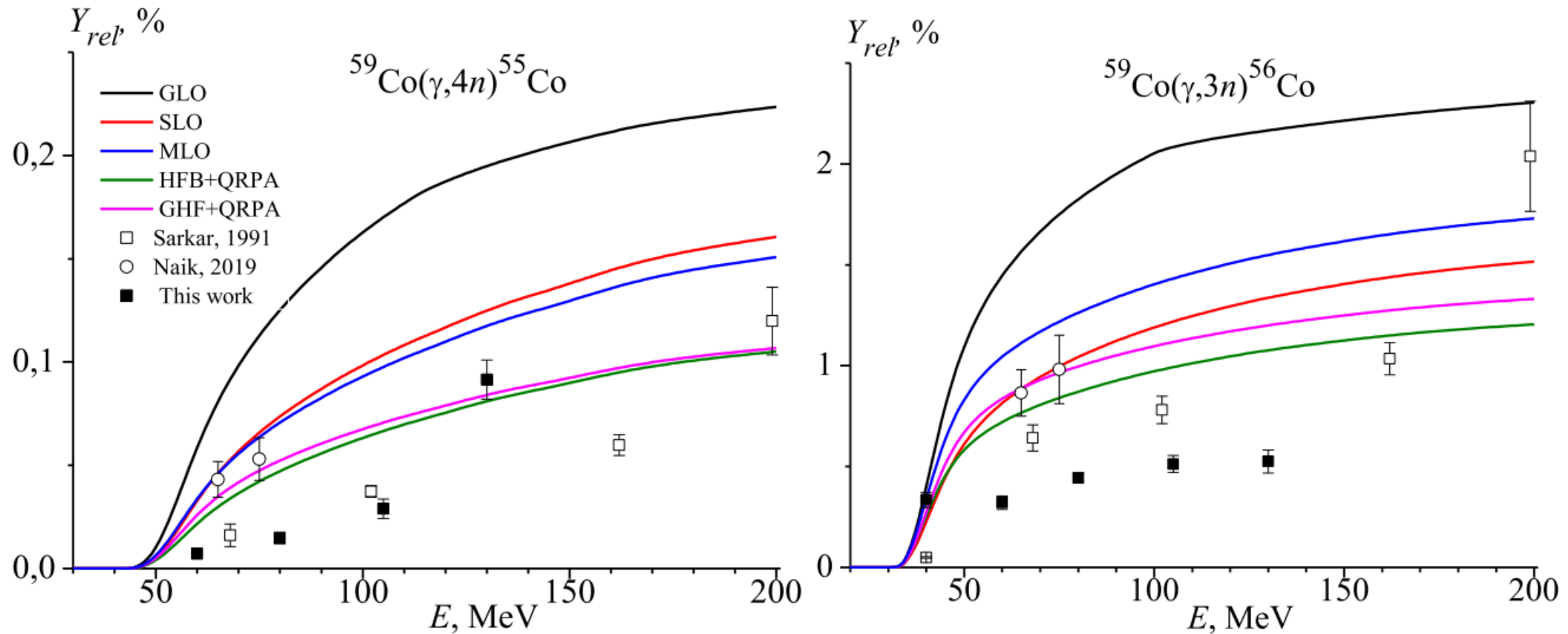
Сравнение экспериментальных относительных выходов фотоядерных реакций (нормированных на реакции образования  $^{155}\text{Dy}$ ) на изотопах диспрозия с расчетами в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций + TALYS

Изотоп	Реакция получения изотопа	$E_{\text{thr}}$ , MeV	$Y_{\text{exp}}$ , 1/e	$Y_{\text{theor}}$ , 1/e
$^{157}\text{Dy}$	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\gamma, \text{in}) =$		$8.059 \pm 1.528$	7.462
	$0.00095 \cdot ^{158}\text{Dy}(\gamma, 1\text{n}) +$	9.05		1.151
	$0.002329 \cdot ^{160}\text{Dy}(\gamma, 3\text{n}) +$	24.46		0.917
	$0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 4\text{n}) +$	30.92		3.116
	$0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 5\text{n})$	39.11		1.797
$^{160}\text{Tb}$	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\gamma, 1\text{pin}) =$		$7.186 \pm 1.383$	5.422
	$0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p}) +$	7.51		3.618
	$0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p}1\text{n}) +$	15.70		1.103
	$0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p}2\text{n})$	21.98		0.527
$^{161}\text{Tb}$	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\gamma, 1\text{pin}) =$		$9.565 \pm 1.743$	6.556
	$0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p}) +$	8.01		4.520
	$0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p}1\text{n}) +$	14.28		1.436
	$0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p}2\text{n})$	21.94		0.600
$^{163}\text{Tb}$	$0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p})$	8.66	$2.84 \pm 0.63$	4.007

Сравнение выходов фотоядерных реакций на изотопах гафния с расчетами в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS

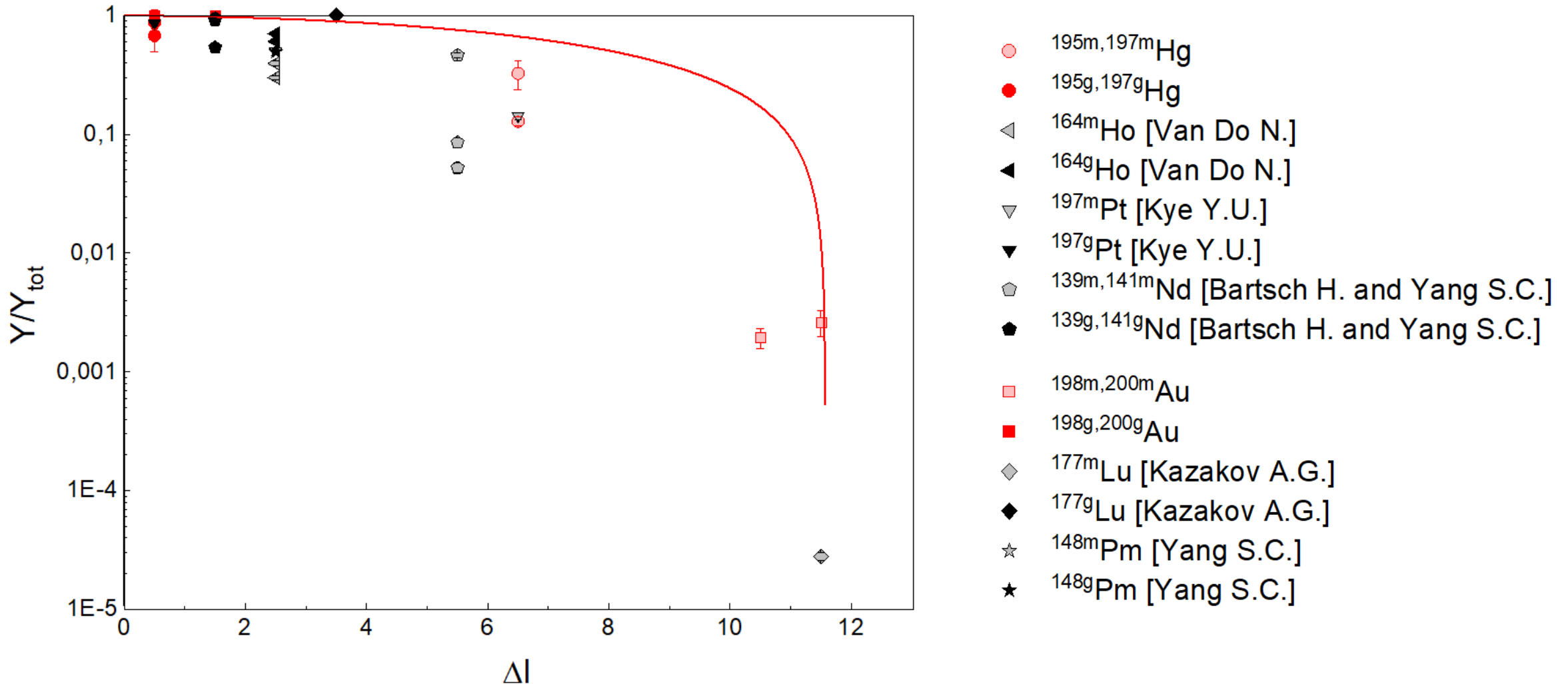
Изотоп	Реакция получения изотопа	$E_{thr}$ , MeV	$Y_{exp}$ , 1/e	$Y_{CMPR}$ , 1/e	$Y_{TALYS}$ , 1/e
<b><math>^{173}\text{Hf}</math></b>	$^{nat}\text{Hf}(\gamma, xn) =$		$(2.54 \pm 0.15) \cdot 10^{-7}$	$3.50 \cdot 10^{-7}$	$4.21 \cdot 10^{-7}$
	$0.0016 \cdot ^{174}\text{Hf}(\gamma, n) +$	14.9		$7.44 \cdot 10^{-8}$	$7.00 \cdot 10^{-8}$
	$0.00526 \cdot ^{176}\text{Hf}(\gamma, 3n) +$	23.4		$8.33 \cdot 10^{-8}$	$1.08 \cdot 10^{-7}$
	$0.186 \cdot ^{177}\text{Hf}(\gamma, 4n) +$	29.8		$1.09 \cdot 10^{-7}$	$1.37 \cdot 10^{-7}$
	$0.2728 \cdot ^{178}\text{Hf}(\gamma, 5n)$	37.4		$8.35 \cdot 10^{-8}$	$1.06 \cdot 10^{-7}$
<b><math>^{175}\text{Hf}</math></b>	$^{nat}\text{Hf}(\gamma, xn) =$		$(4.39 \pm 0.13) \cdot 10^{-6}$	$5.39 \cdot 10^{-6}$	$6.10 \cdot 10^{-6}$
	$0.0526 \cdot ^{176}\text{Hf}(\gamma, n) +$	8.2		$2.38 \cdot 10^{-6}$	$2.36 \cdot 10^{-7}$
	$0.186 \cdot ^{177}\text{Hf}(\gamma, 2n) +$	14.6		$2.48 \cdot 10^{-6}$	$2.81 \cdot 10^{-6}$
	$0.2728 \cdot ^{178}\text{Hf}(\gamma, 3n)$	22.2		$5.29 \cdot 10^{-7}$	$9.28 \cdot 10^{-7}$
<b><math>^{177}\text{Lu}</math></b>	$^{nat}\text{Hf}(\gamma, 1pxn) =$		$(11.7 \pm 0.72) \cdot 10^{-8}$	$1.95 \cdot 10^{-7}$	$4.52 \cdot 10^{-8}$
	$0.2728 \cdot ^{178}\text{Hf}(\gamma, 1p) +$	7.3		$1.50 \cdot 10^{-7}$	$1.82 \cdot 10^{-8}$
	$0.1362 \cdot ^{179}\text{Hf}(\gamma, 1p1n) +$	11.2		$2.28 \cdot 10^{-8}$	$1.32 \cdot 10^{-8}$
	$0.3508 \cdot ^{180}\text{Hf}(\gamma, 1p2n)$	12.3		$2.27 \cdot 10^{-8}$	$1.38 \cdot 10^{-8}$
<b><math>^{178}\text{Lu}</math></b>	$^{nat}\text{Hf}(\gamma, 1pxn) =$		$(1.88 \pm 0.20) \cdot 10^{-8}$	$1.12 \cdot 10^{-7}$	$3.50 \cdot 10^{-8}$
	$0.1362 \cdot ^{179}\text{Hf}(\gamma, 1p) +$	7.4		$7.32 \cdot 10^{-8}$	$7.33 \cdot 10^{-9}$
	$0.3508 \cdot ^{180}\text{Hf}(\gamma, 1p1n)$	12.6		$3.93 \cdot 10^{-8}$	$2.76 \cdot 10^{-8}$
<b><math>^{179}\text{Lu}</math></b>	$0.3508 \cdot ^{180}\text{Hf}(\gamma, 1p)$	8.0	$(2.09 \pm 0.21) \cdot 10^{-7}$	$1.63 \cdot 10^{-7}$	$1.58 \cdot 10^{-8}$

Исследование выходов и сечений многонуклонных фотоядерных реакций при различных энергиях тормозного излучения (совместная работа с ОИЯИ)



Относительные выходы реакций  $^{59}\text{Co}(\gamma, 4n)^{55}\text{Co}$  и  $^{59}\text{Co}(\gamma, 3n)^{56}\text{Co}$ , полученные в совместной работе с ОИЯИ (закрашенные квадраты) и в других экспериментах (незакрашенные квадраты и круги), а также теоретически рассчитанные значения с использованием различных моделей для силовых функций в программе TALYS

## Изомерные отношения для средних и тяжелых ядер



Зависимость выходов метастабильного (светлые точки) и основного (полностью закрашенные точки) состояний от модуля разности спинов продукта реакции и мишени  $\Delta I = |I_p - I_t|$

# *Будущие работы*

- В НИИЯФ МГУ разработан проект линейного ускорителя электронов на энергию 35 МэВ с высоким средним током от 100 мкА до 1 мА. Благодаря шагу по энергии 1 МэВ станет возможным изучение роли изоспинового расщепления при распаде гигантского дипольного резонанса. Использование такого ускорителя позволит исследовать и нарабатывать медицинские изотопы в количествах, необходимых для доклинических исследований.
- В Национальном центре физики и математики в г. Саров планируется создание установки, основанной на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах (ИКИ НЦФМ). Для того, чтобы в полной мере использовать преимущества ИКИ НЦФМ разрабатываются новые методики измерений. В частности, одни из первых экспериментов планируется проводить с использованием активационного анализа. Для оценки возможностей проведения активационных экспериментов на пучке ИКИ НЦФМ по измерению сечений фотоядерных реакций необходимо, прежде всего, провести оценку возможных сечений этих реакций и оптимизировать мишени с учетом углового разброса пучка гамма-квантов и возможной интенсивности пучка.
- Продолжение совместной работы с ОИЯИ по изучению фотоядерных реакций при различной энергии тормозного излучения.



# Результаты работы

*Результаты работ по исследованию фотоядерных реакций представлены в 7 статьях в рецензируемых научных журналах:*

1. С.С. Бельшев, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, А.А. Просняков, А.Д. Федорова, В.В. Ханкин В.В., **Н.Ю. Фурсова**. Фотоядерные реакции на изотопе иттрия  $^{89}\text{Y}$ . Ученые Записки Физического Факультета МГУ, № 3, 2019.
2. С.С. Бельшев, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, А.А. Просняков, **Н.Ю. Фурсова**, В.В. Ханкин. Исследование фотонейтронных реакций, приводящих к образованию и распаду изотопа  $^{102}\text{Pd}$ . Ядерная физика, 83(6):474–481, 2020.  
(переводная версия: S.S. Belyshev, B.S. Ishkhanov, A.A. Kuznetsov, A.A. Prosnyakov, **N.J. Fursova**, V.V. Khankin. Investigation of photoneutron reactions leading to the production and decay of the isotope  $^{102}\text{Pd}$ . Physics of Atomic Nuclei, 83(6):786–794, 2020.)
3. С.С. Бельшев, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, В.Н. Орлин, А.А. Просняков, **Н.Ю. Фурсова**, В.В. Ханкин. Фоторасщепление изотопов палладия. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, (6): 3–27, 2020.  
(переводная версия: S. S. Belyshev, B. S. Ishkhanov, 3, A. A. Kuznetsov, V. N. Orlin, A. A. Prosnyakov, **N.J. Fursova**, V.V. Khankin. Photodisintegration of Palladium Isotopes. Moscow University Physics Bulletin, 75(6): 513–539, 2020)

4. F.A. Rasulova, R.A. Aliev, S.S. Belyshev, M.A. Demichev, D.L. Demin, S.A. Evseev, **N.J. Fursova**, M.I. Gostkin, J.H. Khushvaktov, V.V. Kobets, A.A. Kuznetsov, S.V. Rozov, E.T. Ruziev, T.N. Tran, E.A. Yakushev, B.S. Yuldashev. Multiparticle  $^{nat}\text{Se}(\gamma, xnyp)$  reactions induced with bremsstrahlung end-point energies of 20–80 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 1054, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168428>

5. F. A. Rasulova, R. A. Aliev, S.S. Belyshev, A.A. Kuznetsov, V.V. Khankin, **N.Yu. Fursova**, A.A. Shemukhin. Photonuclear Reactions on Natural Mixture of Selenium. Phys. Atom. Nuclei **86**, 725–735 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778823050356>

6. F.A. Rasulova, N.V. Aksenov, S.I. Alekseev, R.A. Aliev, S.S. Belyshev, I. Chuprakov, **N.Yu. Fursova**, A.S. Madumarov, J.H. Khushvaktov, A.A. Kuznetsov. Photonuclear reactions on stable isotopes of selenium at bremsstrahlung end-point energies of 10–23 MeV. Chinese Physics C, 48(2), 2024. 10.1088/1674-1137/ad11e4

7. F.A. Rasulova, S.S. Belyshev, M.A. Demichev, D.L. Demin, S.A. Evseev, **N.Yu. Fursova**, M.I. Gostkin, J.H. Khushvaktov, V.V. Kobets, A.A. Kuznetsov. Photonuclear reactions on  $^{59}\text{Co}$  at bremsstrahlung end-point energies of 40-130 MeV. Chinese Physics C 48 (11), 2024. 10.1088/1674-1137/ad6d41

Результаты исследований были представлены на международных («NUCLEUS», «XXIV Харитоновские тематические научные чтения по проблемам ускорительной техники и физики высоких энергий») и всероссийских конференциях («Ломоносовские чтения», «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине), III Всероссийской школе-семинаре НЦФМ по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике.

***Спасибо за внимание!***