



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

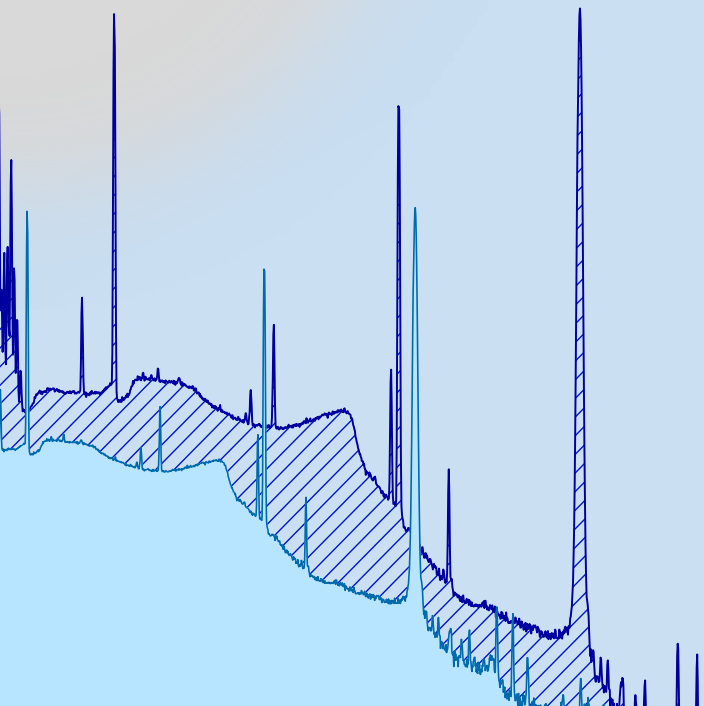


«Возбуждение ядерных изомеров на квазимонохроматическом пучке комптоновского источника»

О.В. Порядина¹, С.С. Бельшев^{1,2}, А.А. Кузнецов^{1,2},
Н.Ю. Фурсова^{1,2}, В.В. Ханкин²

¹Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, физический факультет

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова



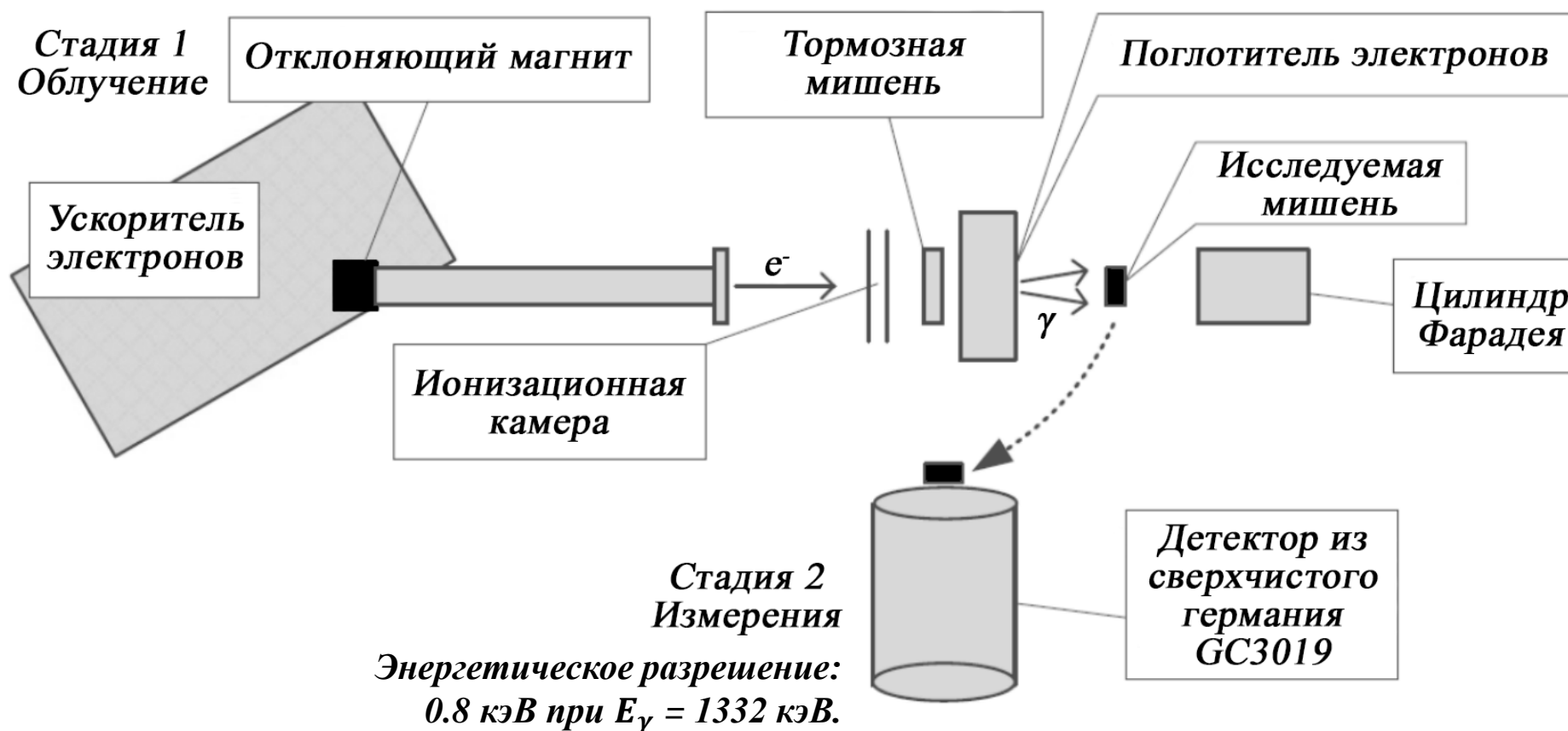
Москва - 2025

Методика облучения образца **естественной смеси изотопов Hg** тормозным излучением с $E^m = 55 \text{ МэВ}$

Толщина мишени-конвертера: 0.2 мм

Время облучения: 670 секунд

Толщина облучаемой мишени: 2.8 мм



На основании полученных выходов были рассчитаны **изомерные соотношения IR** фотоядерных реакций для исследуемых изотопов $^{195,197}\text{Hg}$ и $^{198,200}\text{Au}$ при энергии 55 МэВ

$$IR = Y_h/Y_l \quad \text{или} \quad IR = \sigma_h/\sigma_l,$$

где Y_h , Y_l и σ_h , σ_l – выходы и сечения возбуждения высокоспинового и низкоспинового состояний

Изомерия атомных ядер обусловлена **большой разницей спинов** или **деформаций изомерного состояния относительно основного**.

Вероятность заселения изомера в результате фотоядерных реакций **зависит от:**

1. Энергии реакции
2. Орбитального момента вылетевших частиц (в свою очередь, зависит от их энергии и структуры оболочек в возбужденном ядре)
3. Моментa и четности конечного состояния
4. Вероятностей каскадных переходов с вышележащих состояний

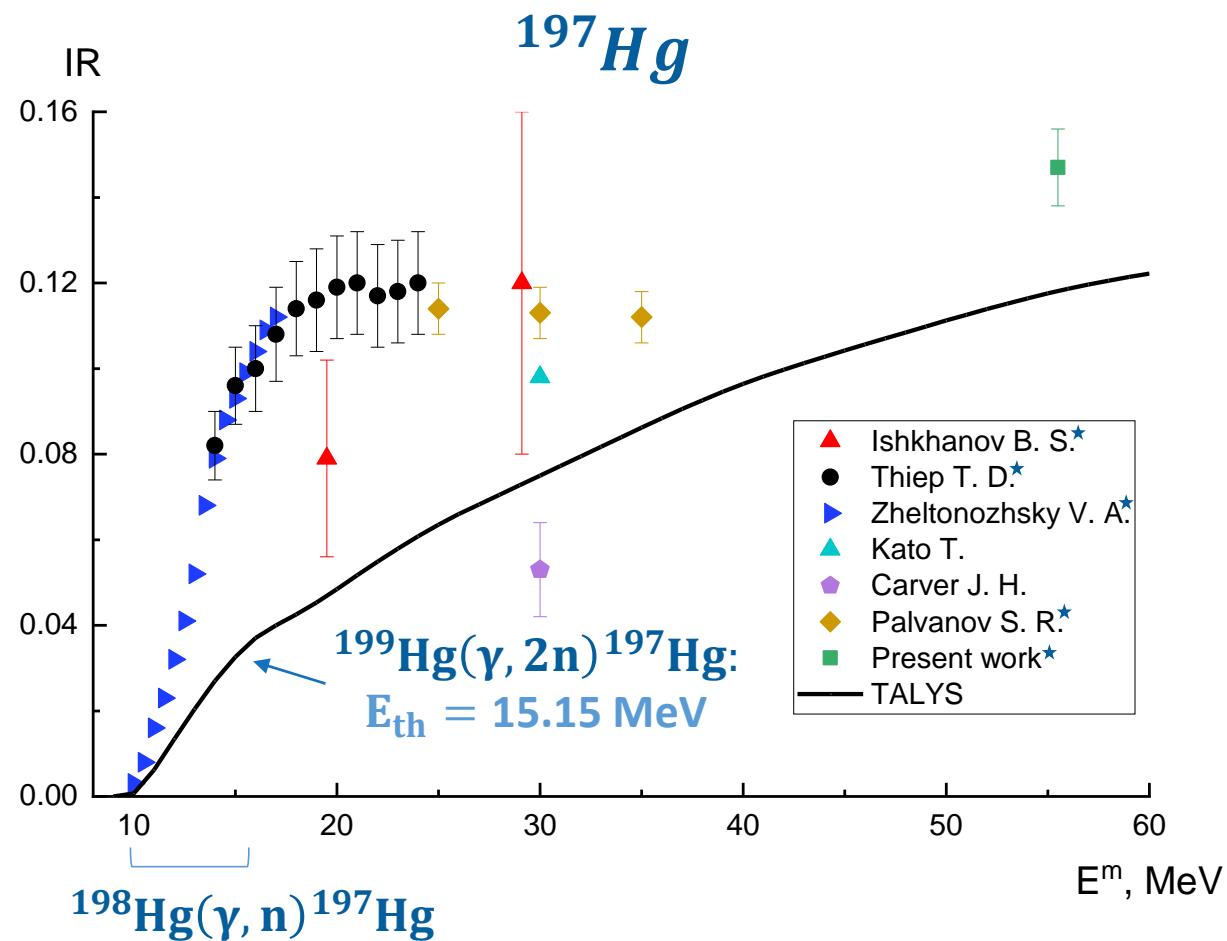
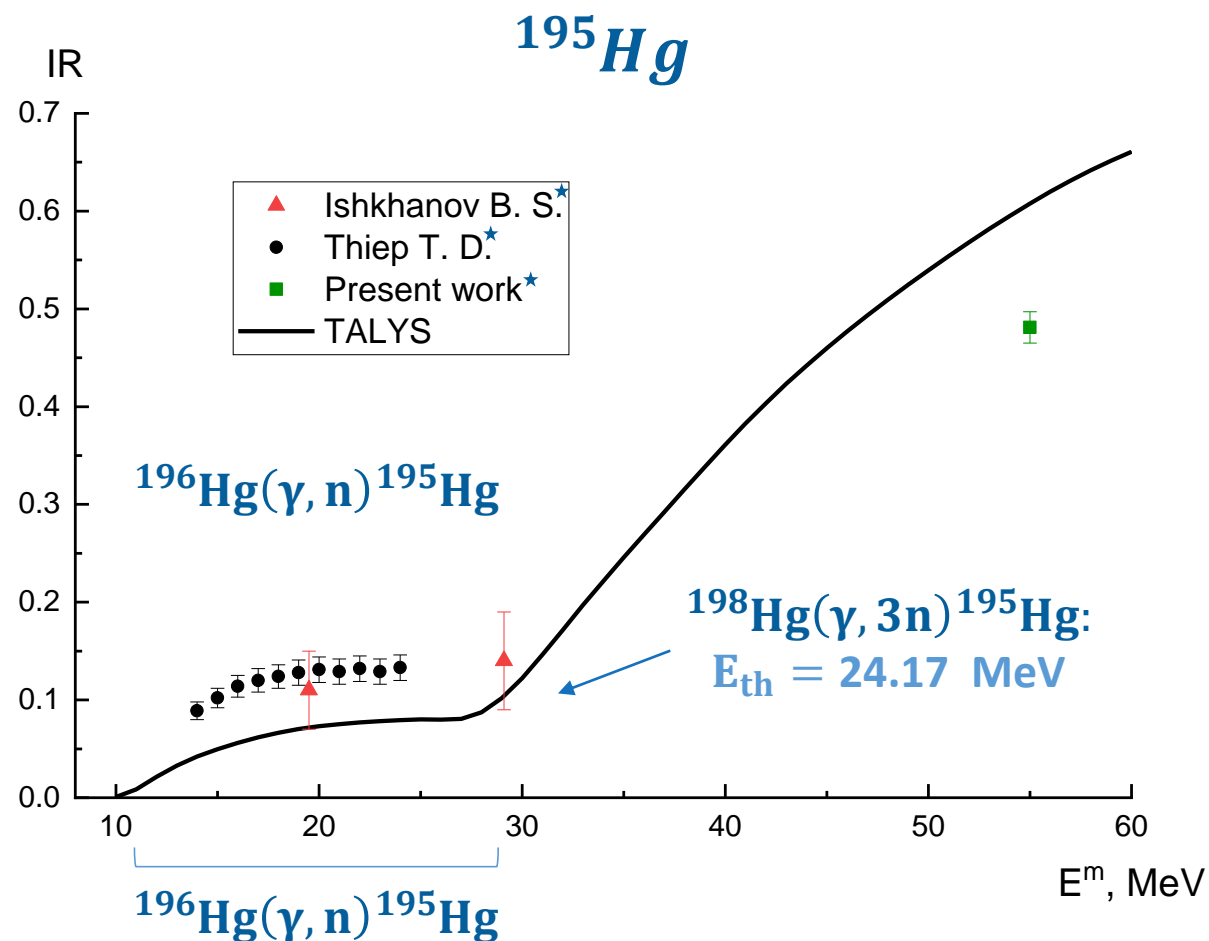
На основании полученных выходов были рассчитаны изомерные соотношения IR фотоядерных реакций для исследуемых изотопов $^{195,197}\text{Hg}$ и $^{198,200}\text{Au}$ при энергии 55 МэВ

$$IR = Y_h/Y_l \quad \text{или} \quad IR = \sigma_h/\sigma_l,$$

где Y_h , Y_l и σ_h , σ_l – выходы и сечения возбуждения высокоспинового и низкоспинового состояний

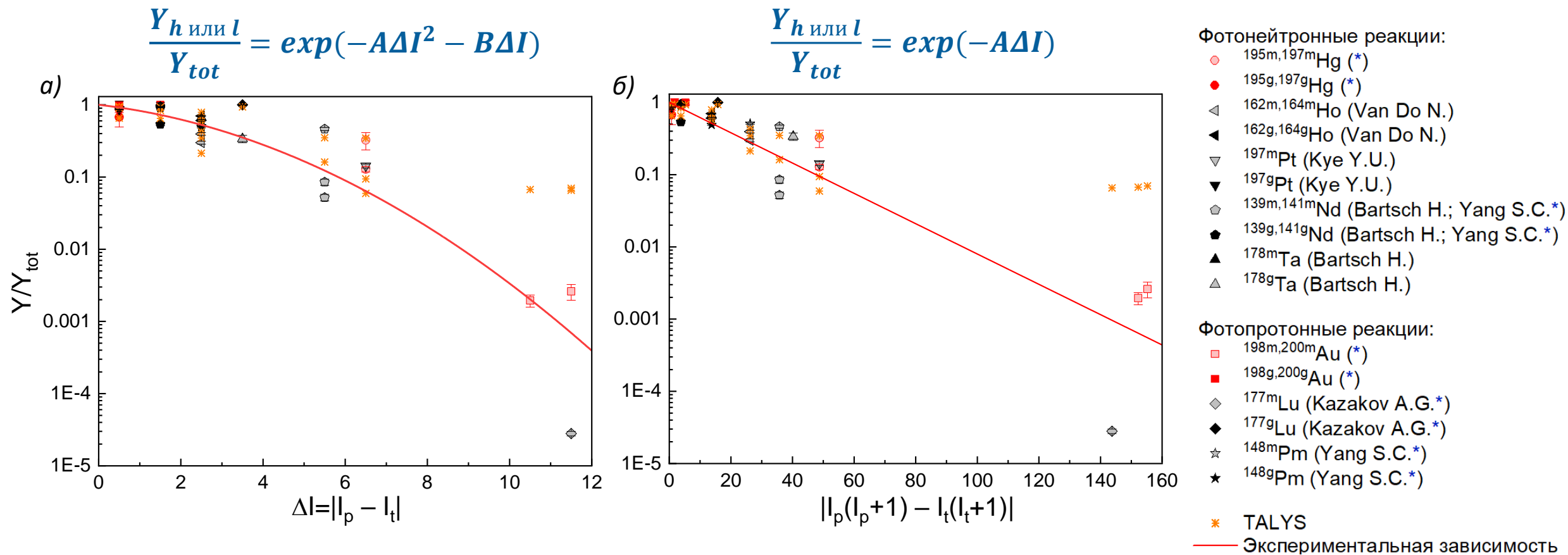
Изотоп	Основные реакции получения изотопа	J_m^P	J_g^P	IR_{exp}	IR_{TALYS} (реальный тормозной спектр)
^{195}Hg	$^{196}\text{Hg}(0^+)(\gamma, 1n)^{195m,g}\text{Hg}$ $^{198}\text{Hg}(0^+)(\gamma, 3n)^{195m,g}\text{Hg}$ $^{199}\text{Hg}(1/2^-)(\gamma, 4n)^{195m,g}\text{Hg}$	$13/2^+$	$1/2^-$	0.481 ± 0.016	0.527
^{197}Hg	$^{198}\text{Hg}(0^+)(\gamma, 1n)^{197m,g}\text{Hg}$ $^{199}\text{Hg}(1/2^-)(\gamma, 2n)^{197m,g}\text{Hg}$	$13/2^+$	$1/2^-$	0.147 ± 0.009	0.104
^{198}Au	$^{199}\text{Hg}(1/2^-)(\gamma, 1p)^{198m,g}\text{Au}$ $^{200}\text{Hg}(0^+)(\gamma, 1n1p)^{198m,g}\text{Au}$	12^-	2^-	0.0026 ± 0.0006	0.0749
^{200}Au	$^{201}\text{Hg}(3/2^-)(\gamma, 1p)^{200m,g}\text{Au}$ $^{202}\text{Hg}(0^+)(\gamma, 1n1p)^{200m,g}\text{Au}$	12^-	1^-	0.0019 ± 0.0003	0.0720

Проведено сравнение экспериментальных **изомерных отношений** для ^{195}Hg , ^{197}Hg с теоретическими расчетами по программе **TALYS**, а также с работами, найденными в литературе, на всем диапазоне энергий облучения E^m



Зависимость изомерных отношений $IR(^{195}\text{Hg})$ (левый график) и $IR(^{197}\text{Hg})$ (правый) от энергии облучения

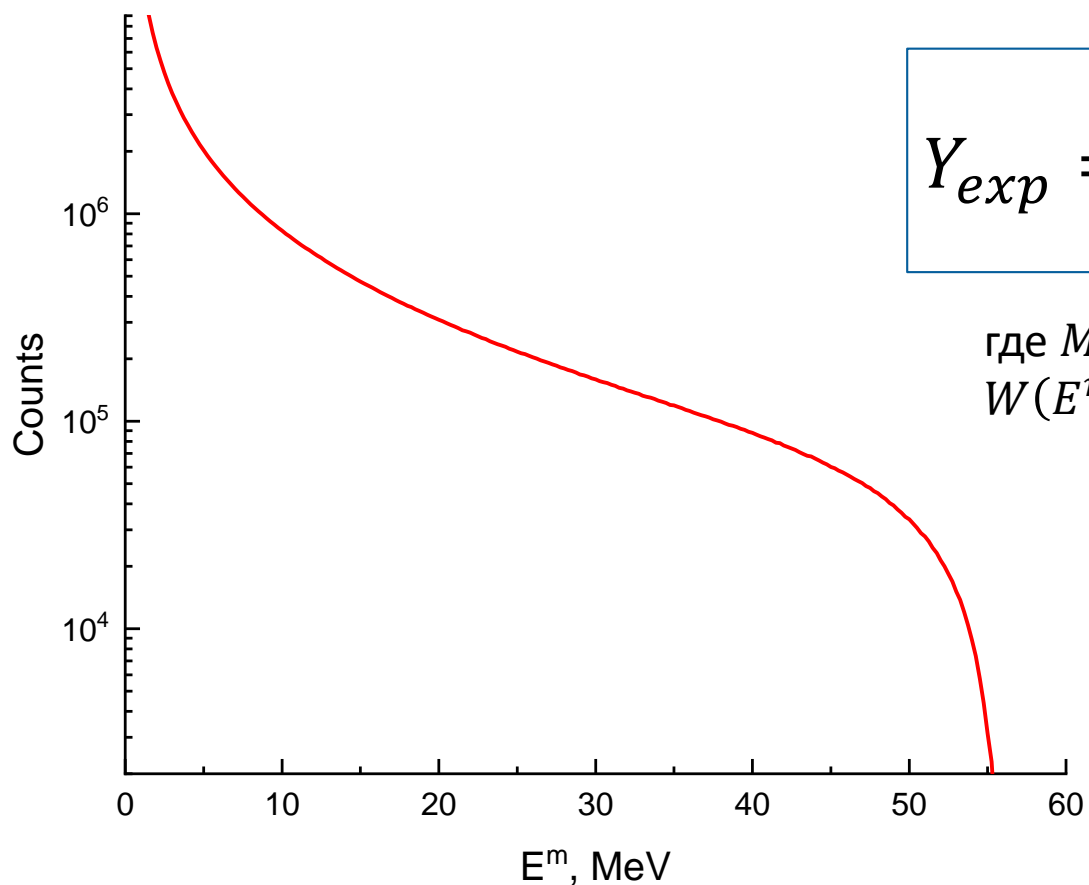
Наблюдается явное убывание парциальных выходов с ростом ΔI . На основе экспериментальных данных были построены две аппроксимации вида экспоненты квадратичной (а) и линейной (б) функций



Зависимость парциальных выходов высокоспиновых Y_h/Y_{tot} (слабо закрашенные точки) и низкоспиновых Y_l/Y_{tot} (полностью закрашенные точки) состояний при энергии электронов 55 МэВ от:

а) модуля разности спинов продукта и мишени $\Delta I = |I_p - I_t|$; б) модуля $\Delta I = |I_p(I_p + 1) - I_t(I_t + 1)|$

Окончательный вывод об общей для всех тяжелых ядер зависимости **можно сделать только после дополнительных исследований одноканальных реакций либо на обогащенных мишенях, либо при более низких энергиях облучения**



Тормозной спектр с верхней граничной энергией $E^m = 55 \text{ MeV}$

$$Y_{exp} = k_{norm} M \int_{E_{th}}^{E^m} W(E^m, E) \sigma(E) dE ,$$

где M - поверхностная концентрация ядер мишени
 $W(E^m, E)$ - тормозной спектр γ -излучения

\Rightarrow **Для восстановления сечения реакции $\sigma(E)$ необходимо решить сложную обратную задачу** (используя подходы Пенфолда-Лейсса, метод наименьшей структуры Кука, регуляризацию Тихонова и другие).

Оценка общего количества зарегистрированных γ -квантов от источника комптоновского излучения ИКИ НЦФМ демонстрирует эффективность предложенной методики измерений (оффлайн-спектрометрии)

$$N_{det} = I_{\gamma} \cdot M \cdot d \cdot \sigma(E_{\gamma}) \cdot (1 - e^{-\lambda t_{обл}}) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t_{изм}}) \cdot I_{в\text{ых}} \cdot k,$$

где $I_{\gamma} \sim 5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ – интенсивность гамма-квантов, $d = 1 \text{ см}$ – толщина мишени, $\sigma(E_{\gamma})$ – сечение реакции при E_{γ} (рассчитано с помощью TALYS), $t_{обл} = 1 \text{ час}$ – время облучения, $t_{изм} = T_{1/2}$ – время измерения

Параметры		Реакция			
		$^{165}\text{Ho}(\gamma, 3n)^{162m}\text{Ho}$	$^{165}\text{Ho}(\gamma, 3n)^{162g}\text{Ho}$	$^{165}\text{Ho}(\gamma, 1n)^{164m}\text{Ho}$	$^{165}\text{Ho}(\gamma, 1n)^{164g}\text{Ho}$
E_{th} , МэВ		23.18	23.07	8.13	7.99
$\sigma(E_{\gamma})$, мб (TALYS)	$E_{\gamma} = 10 \text{ МэВ}$	0	0	$\cong 13.5$	$\cong 51.3$
	$E_{\gamma} = 20 \text{ МэВ}$	0	0	$\cong 1.8$	$\cong 5.9$
	$E_{\gamma} = 30 \text{ МэВ}$	$\cong 8.1$	$\cong 11.5$	$\cong 0.3$	$\cong 0.9$
E_{γ} , кэВ ($I_{в\text{ых}}$, %)		282.86 (11.3%)	1319.3 (3.8%)	56.64 (6.5%)	91.40 (2.2%)
Эфф-ть детектора k (5 см)		0.012	0.006	0.0007	0.0014
$T_{1/2}$		67.1 мин	15.0 мин	36.6 мин	28.8 мин
N_{det} ($t = T_{1/2}$)	$E_{\gamma} = 10 \text{ МэВ}$	0	0	$\sim 10\,600$	$\sim 24\,200$
	$E_{\gamma} = 20 \text{ МэВ}$	0	0	$\sim 1\,400$	$\sim 2\,800$
	$E_{\gamma} = 30 \text{ МэВ}$	$\sim 236\,800$	$\sim 25\,650$	~ 220	~ 430
Фон N_f		~ 16	~ 0.4	~ 15	~ 14

Оценки наводимой активности A и скорости счета сверхчистого германиевого детектора N_{HPGe} к моменту окончания облучения **демонстрируют перспективность активационных исследований** на ИКИ НЦФМ

$$A = I_{\gamma} \cdot \sigma(E_{\gamma}) \cdot \eta \cdot \frac{\rho}{M_r} \cdot N_A \cdot d \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{1/2}}\right)\right),$$

где $I_{\gamma} \sim 5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ – **интенсивность гамма-квантов**, $d = 1 \text{ см}$ – толщина мишени, $\sigma(E_{\gamma})$ – сечение реакции при энергии падающих γ -квантов E_{γ} (рассчитано с помощью TALYS), $t_{\text{обл}} = 1 \text{ час}$ – время облучения

$$N_{HPGe} = k(E_{\gamma \text{ втор}}, l) \cdot A \cdot I_{\text{вых}}(E_{\gamma \text{ втор}}),$$

где $k(E_{\gamma \text{ втор}}, l)$ – эффективность спектрометра при заданном расстоянии между торцевой стенкой HPGe-детектора и мишенью l , A – оцененная наведенная активность, $I_{\text{вых}}$ – вероятность испускания вторичного γ -кванта с энергией $E_{\gamma \text{ втор}}$

Реакция	$^{199}\text{Hg}(\gamma, \gamma')^{199m}\text{Hg} (E_{\text{level}} = 532.5 \text{ кэВ})$									
Параметры	$T_{1/2}, \text{ч}$	$\sigma(E_{\gamma}), \text{мб}$ (TALYS)	η	$\rho, \text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	$M_r, \text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$	$E_{\gamma \text{ втор}}, \text{кэВ}$ ($I_{\text{вых}}, \%$)	$A, \text{с}^{-1}$	Эфф-ть детектора $k(E_{\gamma \text{ втор}}, l)$		$N_{HPGe}, \text{с}^{-1}$
$E_{\gamma} = 6.5 \text{ МэВ}$	0.71	~ 0.059	0.1694	13.534	198.97	374.1 (13.8%)	~ 128	$k(l = 5 \text{ см})$	0.012	~ 0.212
								$k(l = 10 \text{ см})$	0.0043	~ 0.076
$E_{\gamma} = 12.5 \text{ МэВ}$	0.71	~ 0.105	0.1694	13.534	198.97	374.1 (13.8%)	~ 226	$k(l = 5 \text{ см})$	0.012	~ 0.374
								$k(l = 10 \text{ см})$	0.0043	~ 0.134

Пороговые и спиновые факторы сильно влияют на выходы фотоядерных реакций на тяжелых изотопах

1. Были получены **экспериментальные изомерные отношения выходов** для $^{195,197}\text{Hg}$ и $^{198,200}\text{Au}$ при $E^m = 55$ МэВ. Сравнение результатов с расчетами **программы TALYS** показывает **удовлетворительное согласие** для **фотонейтронных** реакций и **плохое согласие** для **фотопротонных** реакций.
2. К возможным **причинам расхождений** между экспериментальными и теоретическими значениями относятся использование **теоретических параметров**, а также – **тормозного спектра, рассчитанного на основе таблиц Зельцера-Бергера**, вместо реального тормозного спектра в толстых мишенях.
3. **Теоретические** изомерные отношения, рассчитанные с использованием программы TALYS, достигают **насыщения**.
4. Для многих мишеней **тяжелых** ядер **построена систематическая зависимость выхода от спинowego фактора**.
5. Проведенные оценки демонстрируют принципиально новую возможность проведения активационных экспериментов и исследования изомерных состояний на базе **ИКИ НЦФМ**.