

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

Исследование фотоядерных реакций на изотопах диспрозия

«Ломоносовские чтения 2025»

Доклад асп. Фурсовой Н.Ю., нач.лаб. Алиева Р.А., ассистента
Бельшева С.С., доцента Кузнецова А.А., ст.науч.сотр. Ханкина В.В

Москва, 2025 год

Цель: получение новых экспериментальных данных для фотоядерных реакций на природной смеси изотопов диспрозия.

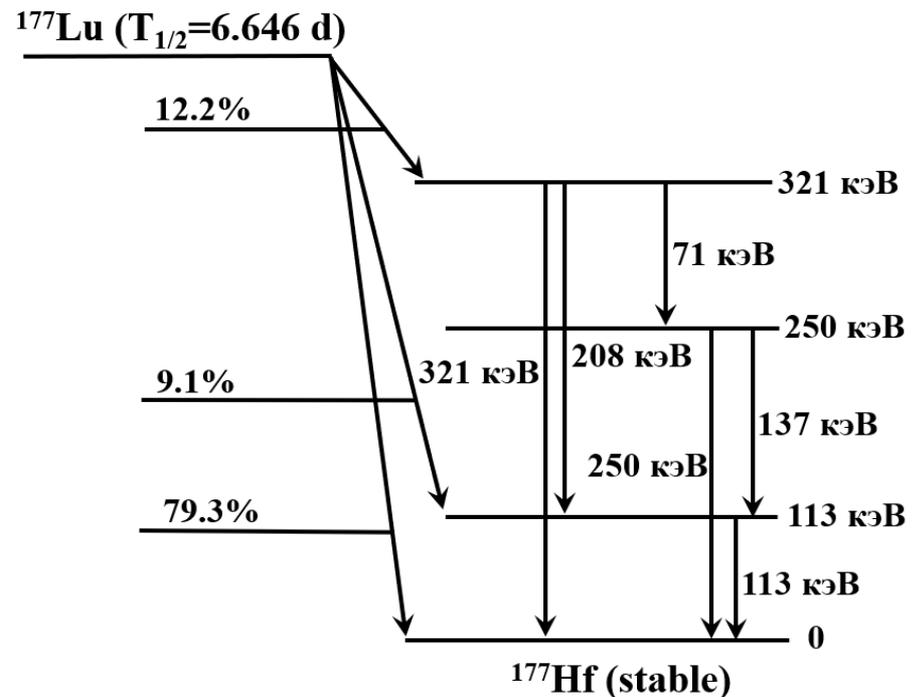
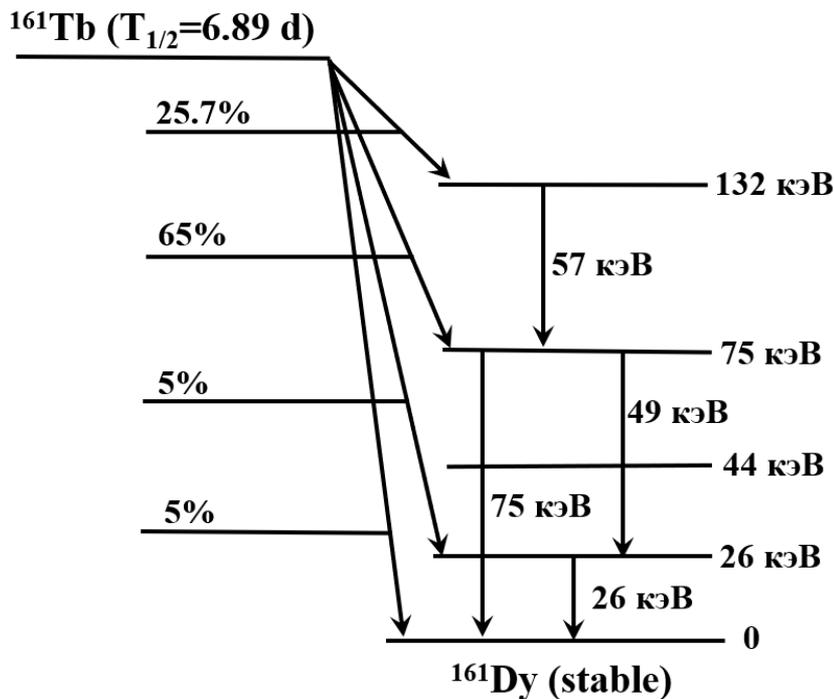
Задачи:

- подготовка и проведение экспериментов по облучению мишеней из диспрозия натурального изотопного состава на импульсном разрезном микротроне НИИЯФ МГУ с энергией 55 МэВ;
- измерение и обработка спектров остаточной активности, получение экспериментальных выходов фотонейтронных и фотопротонных реакций;
- сравнение экспериментальных выходов фотоядерных реакций с расчетами, выполненными на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS.

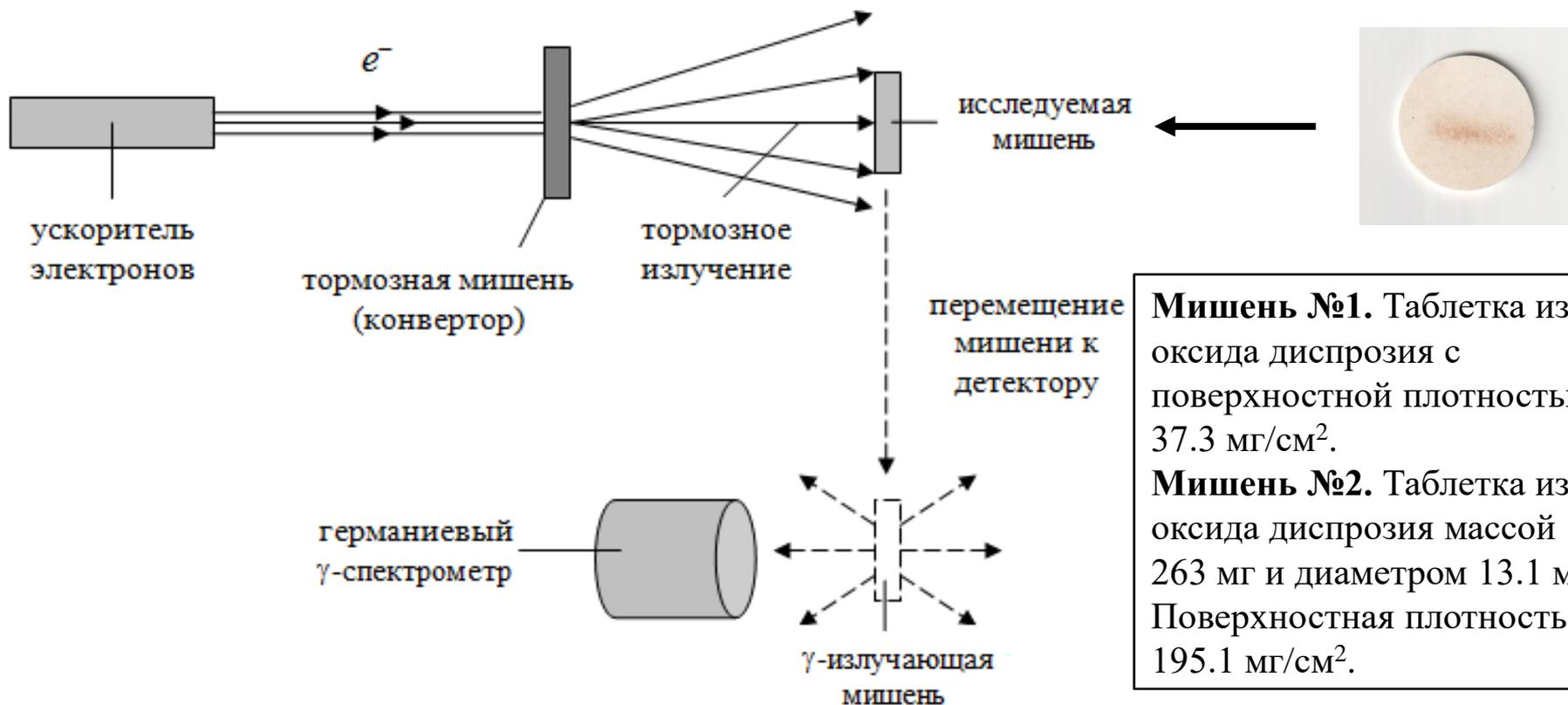
155Dy 9.92 h $\epsilon+\beta+=100\%$	156Dy STABLE 0.056%	157Dy 8.14 h $\epsilon+\beta+=100\%$	158Dy STABLE 0.095%	159Dy 145.3 d $\epsilon=100\%$	160Dy STABLE 2.329%	161Dy STABLE 18.889%	162Dy STABLE 25.475%	163Dy STABLE 24.896%	164Dy STABLE 28.26%
154Tb 21.5 h $\epsilon+\beta+=100\%$	155Tb 5.32 d $\epsilon=100\%$	156Tb 5.35 d $\epsilon+\beta+=100\%$	157Tb 71 y $\epsilon=100\%$	158Tb 180 y $\epsilon+\beta+=83.4\%$ $\beta^-=16.6\%$	159Tb STABLE 100%	160Tb 72.3 d $\beta^-=100\%$	161Tb 6.96 d $\beta^-=100\%$	162Tb 7.6 min $\beta^-=100\%$	163Tb 19.5 min $\beta^-=100\%$
153Gd 240.41 d $\epsilon=100\%$	154Gd STABLE 2.18%	155Gd STABLE 14.8%	156Gd STABLE 20.47%	157Gd STABLE 15.65%	158Gd STABLE 24.84%	159Gd 18.479 h $\beta^-=100\%$	160Gd STABLE 21.86%	161Gd 3.66 min $\beta^-=100\%$	162Gd 8.39 min $\beta^-=100\%$

В современной медицине изотоп ^{161}Tb рассматривается как возможная альтернатива ^{177}Lu , благодаря схожим физическим и химическим свойствам.

- Электроны с энергией 154 кэВ, испускаемые при распаде ^{161}Tb , подходят для терапии.
- γ -излучение с энергиями 25.7 кэВ (23%), 48.9 кэВ (17%) и 74.6 кэВ (10%) можно применять для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ).
- Особенностью распада ^{161}Tb является дополнительное испускание значительного числа конверсионных и оже-электронов с энергиями ≤ 40 кэВ, что увеличивает терапевтическую эффективность данного нуклида по сравнению с ^{177}Lu .



Методика проведения эксперимента



Мишень №1. Таблетка из оксида диспрозия с поверхностной плотностью 37.3 мг/см^2 .

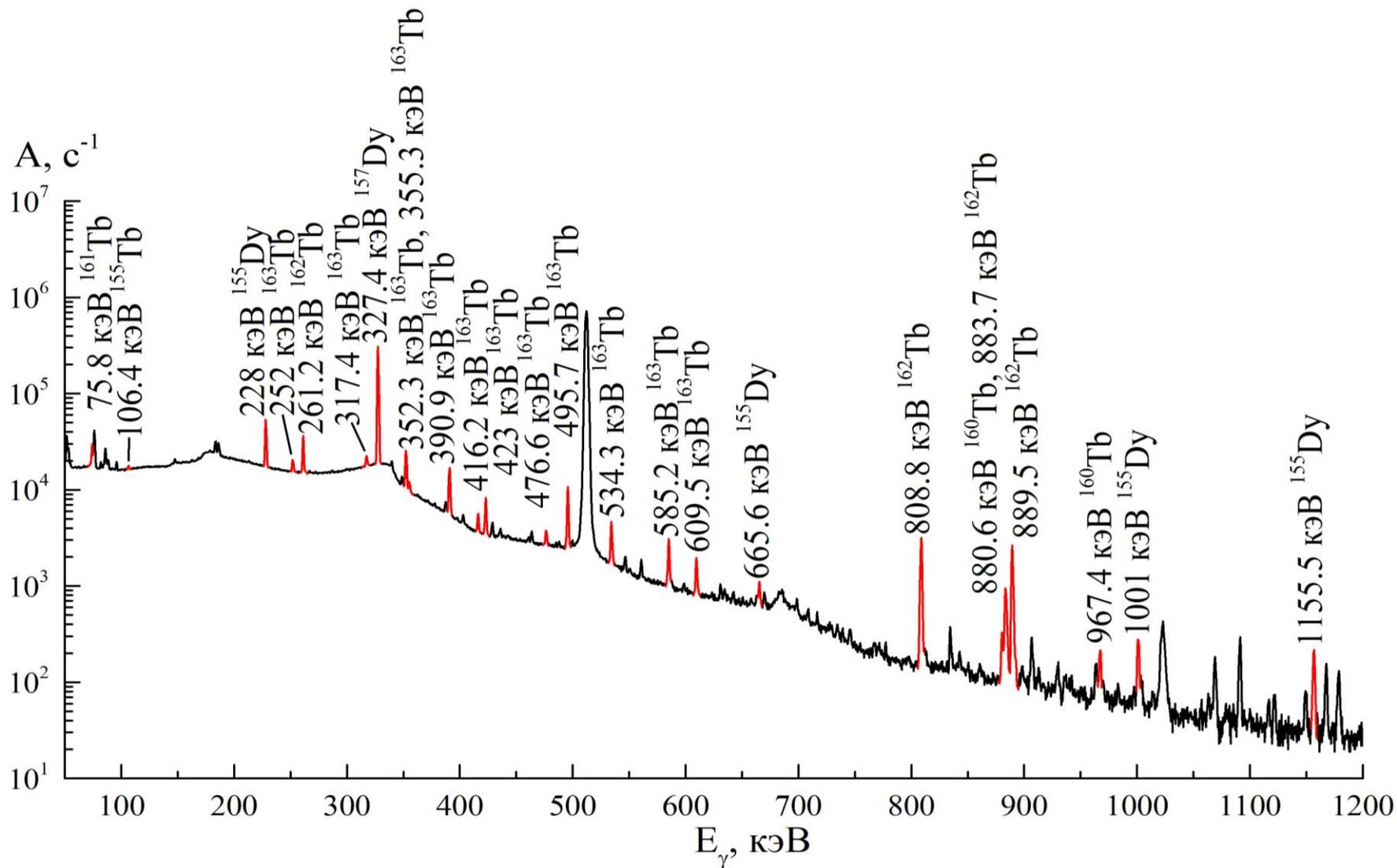
Мишень №2. Таблетка из оксида диспрозия массой 263 мг и диаметром 13.1 мм . Поверхностная плотность 195.1 мг/см^2 .

- эксперимент проводился на тормозном пучке импульсного разрезного микротрона НИИЯФ МГУ с максимальной энергией электронов 55 МэВ ;
- тормозная мишень из вольфрама толщиной 1 мм ;
- для контроля параметров облучения использовался монитор из кобальта;
- время облучения составляло 3359 с , средний ток – 103 нА .

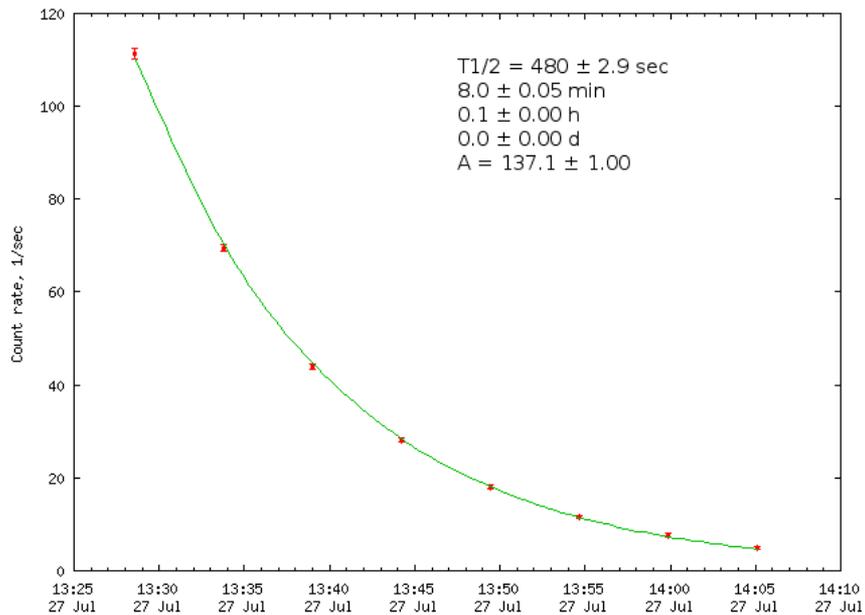
Спектры γ -квантов измерялись в диапазоне энергий от 35 кэВ до 3.7 МэВ на детекторе из сверхчистого германия Canberra GC3019 с цифровым многоканальным анализатором InSpector 1250.

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

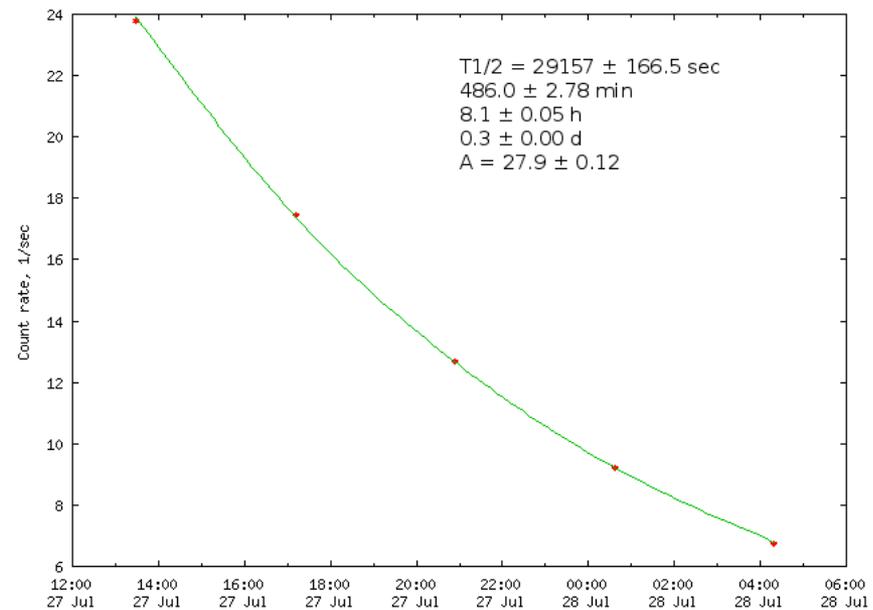
Изотоп	$T_{1/2}$	E_γ , кэВ (I_γ , %)
^{155}Dy	9.92 ч	184.56 (3.39), 226.92 (68.7), 664.17 (2.25), 999.68 (2.45), 1155.47 (2.1)
^{157}Dy	8.14 ч	182.42 (1.33), 326.34 (93)
^{159}Dy	145.3 дн	58.0 (2.27)
^{155}Tb	5.32 дн	86.55 (32.0), 105.32 (25.1)
^{160}Tb	72.3 дн	298.58 (26.1), 879.38 (30.1), 962.31 (9.81), 966.17 (25.1), 1177.96 (14.9), 1271.87 (7.44)
^{161}Tb	6.9584 дн	74.57 (10.2)
^{162}Tb	7.6 мин	260.05 (80.0), 807.53 (42.8), 882.32 (13.4), 888.20 (38.7)
^{163}Tb	19.5 мин	250.8 (6.7), 316.4 (8.3), 347.8 (6.2), 351.2 (26.0), 354.3 (4.6), 386.3 (4.5), 389.8 (24.0), 401.9 (2.5), 415.0 (5.4), 421.9 (11.5), 427.6 (3.5), 475.4 (2.9), 494.5 (22.5), 507.5 (4.6), 533.0 (9.5), 559.5 (2.0), 583.9 (7.0), 608.3 (3.7)



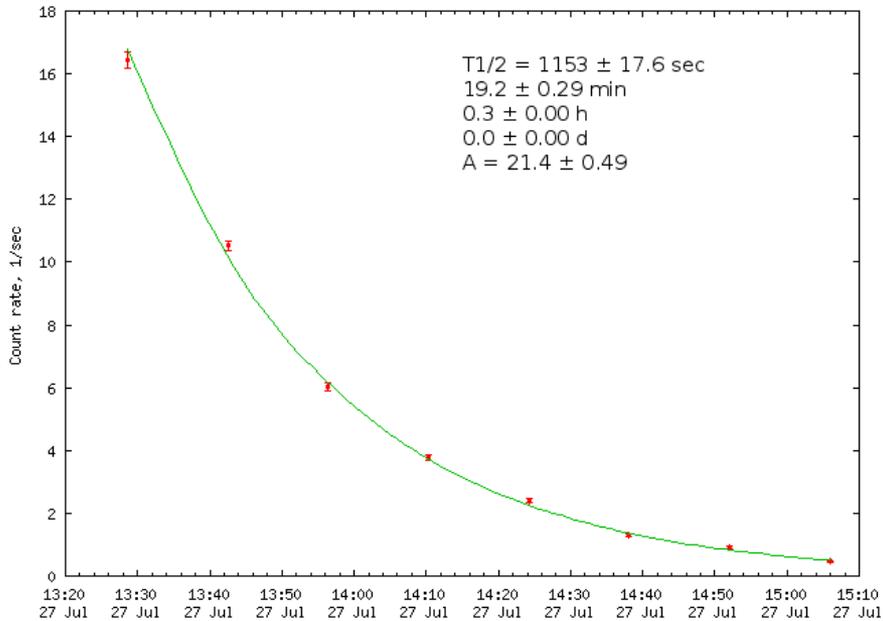
Спектр остаточной активности облученного образца из природной смеси изотопов диспрозия через 7 минут после облучения. Продолжительность измерения спектра составляла 18 часов.



$E_\gamma = 260 \text{ кэВ}$



$E_\gamma = 326 \text{ кэВ}$



$E_\gamma = 495 \text{ кэВ}$

Зависимости интенсивностей максимумов при энергиях 260, 326 и 495 кэВ в спектре остаточной активности образца Ду от времени

E_γ , кэВ	Изотоп	$T_{1/2}$ эксп	$T_{1/2}$ теор
260	^{162}Tb	$8.00 \pm 0.05 \text{ мин}$	7.6 мин
326	^{157}Dy	$8.1 \pm 0.05 \text{ ч}$	8.14 ч
495	^{163}Tb	$19.2 \pm 0.29 \text{ мин}$	19.5 мин

Методика расчета выходов одноканальных фотоядерных реакций



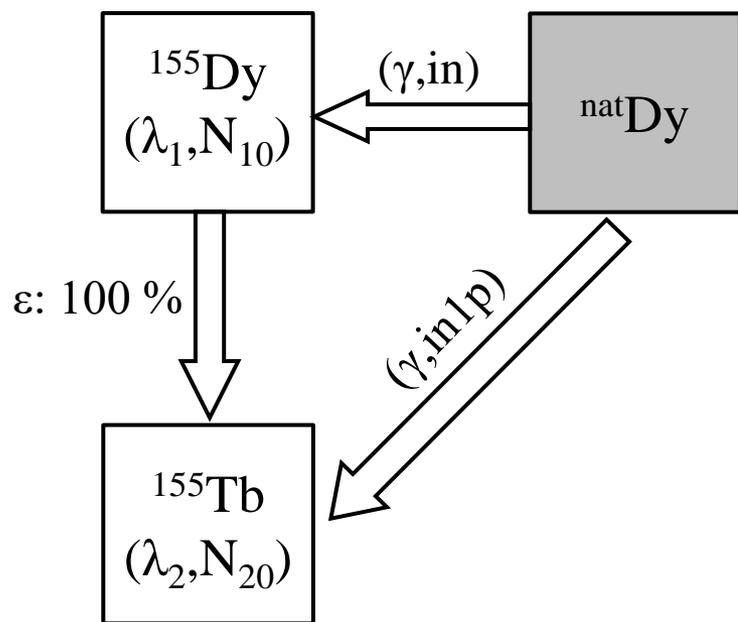
Экспериментальные выходы реакций рассчитывались по площадям фотопиков S в спектрах остаточной активности с учетом мертвого времени детектора, тока ускорителя во время облучения и нескольких каналов распада, приводящих к образованию исследуемых изотопов:

$$Y_1(E^m) = \frac{N_{10}}{e^{-\lambda_1 t} \int_0^{t_1} I(t) e^{\lambda_1 t} dt} = \frac{\lambda_1 N_{10}}{I_{\text{cp}} (1 - e^{-\lambda_1 t_1})},$$

где $N_{10} = \frac{S}{I_\gamma \varepsilon_\gamma (e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}$ - число ядер исследуемого изотопа на момент

окончания облучения, λ_1 - постоянная распада изотопа, I_γ - квантовый выход, ε_γ - эффективность детектора, $I(t)$ - ток ускорителя, t_1 - время облучения, t_2 - время начала измерения спектров, t_3 - время окончания измерения спектров.

Методика расчета выходов двухканальных фотоядерных реакций



Часть ядер образуются не только в ходе фотоядерной реакции на стабильном изотопе, но и в результате распада других ядер на изучаемый изотоп.

Примером может служить образование ^{155}Tb в результате фотоядерных реакций $\text{natDy}(\gamma, \text{in1p})^{155}\text{Tb}$ и распада родительского изотопа ^{155}Dy . В таком случае выход ^{155}Dy рассчитывается по одноканальной формуле, а выход ^{155}Tb по двухканальной:

$$Y_2 = \frac{\lambda_2}{I_{\text{cp}}(1 - e^{-\lambda_2 t_1})} \left(N_{20} - \frac{\chi \lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t_1} - e^{-\lambda_2 t_1}) \right)$$

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

число ядер ^{155}Tb на момент окончания облучения, λ_1 и λ_2 - постоянные распада изотопов ^{155}Dy и ^{155}Tb , χ - коэффициент распада ^{155}Dy на ^{155}Tb .

Выходы фотоядерных реакций на стабильных изотопах диспрозия

Изотоп	$T_{1/2}$	Мишень 1	Мишень 2
		$Y_{\text{exp}}, 1/e$	$Y_{\text{exp}}, 1/e$
^{155}Dy	9.92 ч	$(3.97 \pm 0.35) 10^{-9}$	$(8.26 \pm 0.74) 10^{-9}$
^{157}Dy	8.14 ч	$(3.02 \pm 0.26) 10^{-8}$	$(6.48 \pm 0.56) 10^{-8}$
^{159}Dy	145.3 дн	-	$(1.69 \pm 0.29) 10^{-6}$
^{155}Tb	5.32 дн	$(5.55 \pm 2.64) 10^{-10}$	$(1.14 \pm 0.23) 10^{-9}$
^{160}Tb	72.3 дн	$(1.91 \pm 0.17) 10^{-8}$	$(5.00 \pm 0.27) 10^{-8}$
^{161}Tb	6.89 дн	$(7.91 \pm 0.84) 10^{-8}$	$(8.74 \pm 0.87) 10^{-8}$
^{162}Tb	7.6 мин	$(1.78 \pm 0.01) 10^{-8}$	-
^{163}Tb	19.5 мин	$(1.46 \pm 0.11) 10^{-8}$	-

Для сравнения экспериментальных данных с расчетами на основе комбинированной модели фотоядерных реакций и по программе TALYS были рассчитаны относительных выходы фотонуклонных реакций, нормированные на выход ^{155}Dy на природной смеси изотопов диспрозия:

$$Y_{\text{отн}} = \frac{Y_k^{\text{prod}}}{Y_{^{155}\text{Dy}}^{\text{prod}}},$$

где $Y_k^{\text{prod}} = \alpha \sum_i \eta_i \int_{E_{i \text{ thr}}}^{E^m} \sigma(E, E^m) \sigma_i(E) dE$, η_i - процентное содержание изотопа в природной смеси, $\sigma(E, E^m)$ - сечение Зельтцера-Бергера, $\sigma_i(E)$ - сечение исследуемой реакции.

Относительные выходы фотонейтронных реакций на изотопах диспрозия

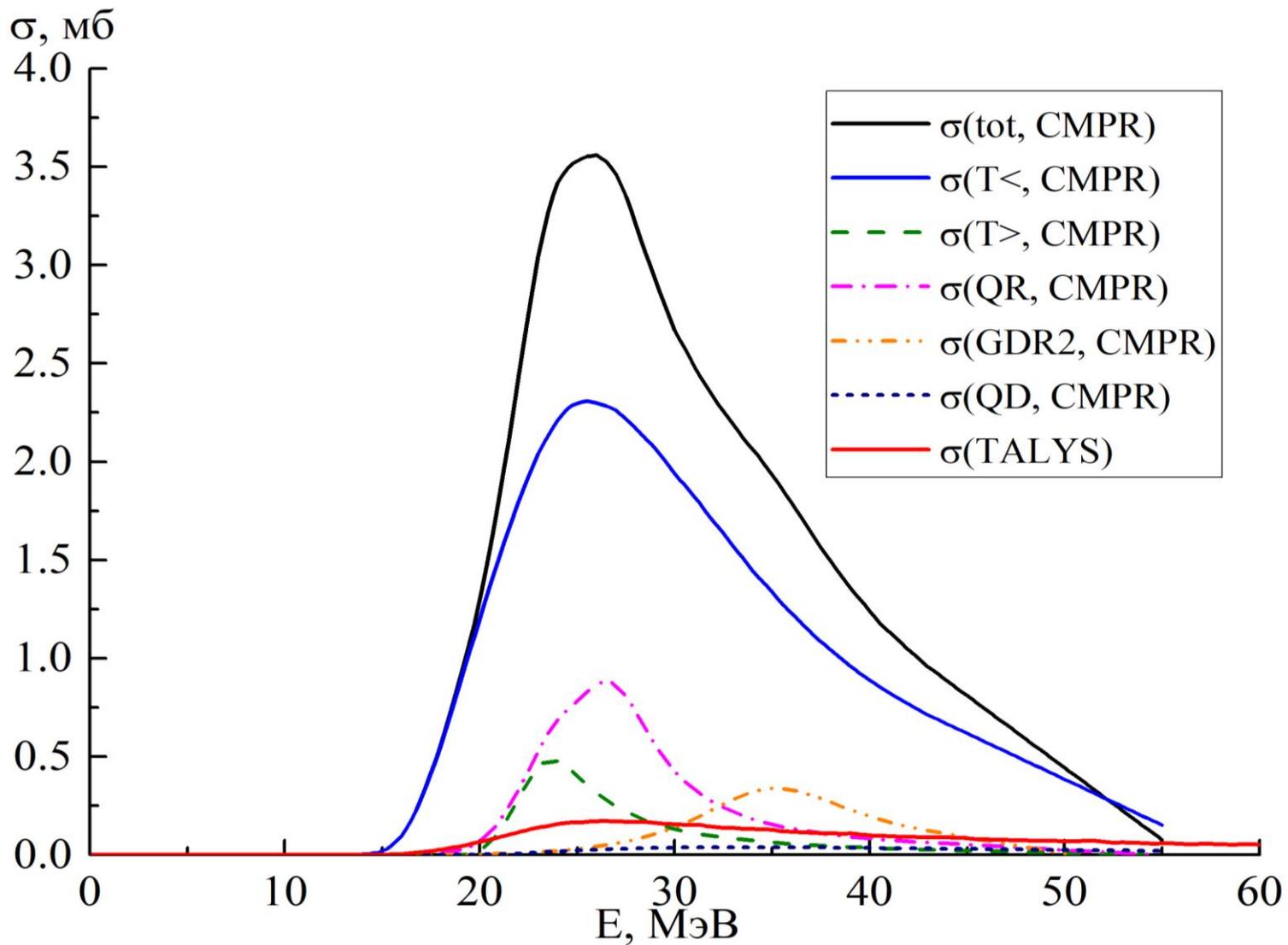
Изотоп	Реакции образования изотопа	$Y_{\text{отн}}$ (ЭКСП)	$Y_{\text{отн}}$ (КМФР+TALYS)	$Y_{\text{отн}}$ (TALYS)
^{155}Dy	$\text{natDy}(\gamma, \text{in}) =$ $0.00056 \cdot ^{156}\text{Dy}(\gamma, 1\text{n})$ $+0.00095 \cdot ^{158}\text{Dy}(\gamma, 3\text{n})$ $+0.02329 \cdot ^{160}\text{Dy}(\gamma, 5\text{n})$ $+0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 6\text{n})$	1	1 0.67 0.03 0.12 0.18	1 0.65 0.03 0.13 0.19
^{157}Dy	$\text{natDy}(\gamma, \text{in}) =$ $0.00095 \cdot ^{158}\text{Dy}(\gamma, 1\text{n})$ $+0.02329 \cdot ^{160}\text{Dy}(\gamma, 3\text{n})$ $+0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 4\text{n})$ $+0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 5\text{n})$ $+0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 6\text{n})$ $+0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 7\text{n})$	7.61 ± 0.94	7.47 1.15 0.92 3.12 1.80 0.48 0.003	7.72 1.15 0.87 3.29 1.90 0.51 0.004
^{159}Dy	$\text{natDy}(\gamma, \text{in}) =$ $0.02329 \cdot ^{160}\text{Dy}(\gamma, 1\text{n})$ $+0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 2\text{n})$ $+0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 3\text{n})$ $+0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 4\text{n})$ $+0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 5\text{n})$	205.3 ± 40.1	112.80 27.84 65.39 12.48 4.60 2.48	110.35 26.98 65.24 10.92 4.69 2.52

^{155}Dy	^{156}Dy	^{157}Dy	^{158}Dy	^{159}Dy	^{160}Dy	^{161}Dy	^{162}Dy	^{163}Dy	^{164}Dy
9.92 h	STABLE	8.14 h	STABLE	145.3 d	STABLE	STABLE	STABLE	STABLE	STABLE
	0.056%		0.095%		2.329%	18.889%	25.475%	24.896%	28.26%
$\varepsilon + \beta + = 100\%$		$\varepsilon + \beta + = 100\%$		$\varepsilon = 100\%$					

Относительные выходы фотопротонных реакций на изотопах диспрозия

Изотоп	Реакции образования изотопа	$Y_{\text{отн}}$ (ЭКСП)	$Y_{\text{отн}}$ (КМФР+TALYS)	$Y_{\text{отн}}$ (TALYS)
^{155}Tb	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\gamma, \text{in}1\text{p}) =$ $0.00056 \cdot ^{156}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p})$ $+0.00095 \cdot ^{158}\text{Dy}(\gamma, 2\text{n}1\text{p})$	0.137 ± 0.03	0.023 0.020 0.003	0.003 0.002 0.001
^{160}Tb	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\gamma, \text{in}1\text{p}) =$ $0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p})$ $+0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 1\text{n}1\text{p})$ $+0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 2\text{n}1\text{p})$ $+0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 3\text{n}1\text{p})$	6.06 ± 0.64	5.43 3.63 1.11 0.53 0.18	1.04 0.25 0.46 0.23 0.10
^{161}Tb	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\gamma, \text{in}1\text{p}) =$ $0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p})$ $+0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 1\text{n}1\text{p})$ $+0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 2\text{n}1\text{p})$	10.58 ± 1.42	6.57 4.53 1.44 0.60	1.10 0.31 0.52 0.27
^{162}Tb	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\gamma, \text{in}1\text{p}) =$ $0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p})$ $+0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 1\text{n}1\text{p})$	4.50 ± 0.47	5.12 4.10 1.02	0.74 0.27 0.47
^{163}Tb	$0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 1\text{p})$	3.69 ± 0.42	4.02	0.25

^{156}Dy STABLE 0.056%	^{157}Dy 8.14 h $\epsilon + \beta^+ = 100\%$	^{158}Dy STABLE 0.095%	^{159}Dy 145.3 d $\epsilon = 100\%$	^{160}Dy STABLE 2.329%	^{161}Dy STABLE 18.889%	^{162}Dy STABLE 25.475%	^{163}Dy STABLE 24.896%	^{164}Dy STABLE 28.26%
^{155}Tb 5.32 d $\epsilon = 100\%$	^{156}Tb 5.35 d $\epsilon + \beta^+ = 100\%$	^{157}Tb 71 y $\epsilon = 100\%$	^{158}Tb 180 y $\epsilon + \beta^+ = 83.4\%$ $\beta^- = 16.6\%$	^{159}Tb STABLE 100%	^{160}Tb 72.3 d $\beta^- = 100\%$	^{161}Tb 6.96 d $\beta^- = 100\%$	^{162}Tb 7.6 min $\beta^- = 100\%$	^{163}Tb 19.5 min $\beta^- = 100\%$



Сечение реакции $^{164}\text{Dy}(\gamma, 1p)^{163}\text{Tb}$, рассчитанное на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций (с компонентами) и по программе TALYS

Сравнение экспериментальных данных, полученных в данной работе и работах [1-3], с расчетами в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS

Изотоп	Е, МэВ	$Y_{\text{отн}}$	$Y_{\text{отн present work}}$	$Y_{\text{отн (КМФР+TALYS)}}$
^{157}Dy	12	1.85 ± 0.23 [1]	—	2.20
	14	1.98 ± 0.78 [2]	—	1.90
		1.42 ± 0.15 [1]		
	16	1.88 ± 0.19 [1]	—	1.81
	55	8.06 ± 1.53 [3]	7.61 ± 0.94	7.47
	65	6.39 ± 1.09 [1]	—	5.18
75	5.40 ± 1.12 [1]	—	3.60	
^{159}Dy	55	—	205.3 ± 40.1	112.80
	65	60.20 ± 12.57 [1]	—	57.64
	75	42.96 ± 8.87 [1]	—	34.93
^{160}Tb	55	7.18 ± 1.38 [3]	6.06 ± 0.64	5.43
^{161}Tb	55	9.56 ± 1.74 [3]	10.58 ± 1.42	6.57
^{163}Tb	55	2.84 ± 0.63 [3]	3.69 ± 0.42	4.02

[1] Naik H., Kim G.N., Schwengner R. et al. // Eur.Phys. J. A 56, N 264 (2020).

[2] Vagena E., Stoulos S. // Eur. Phys. J. A 53 (2017).

[3] Fedotova A.O., Aliev R.A., Egorova B.V. et al. // Applied Radiation and Isotopes 198, 110840(2023).

Спасибо за внимание!