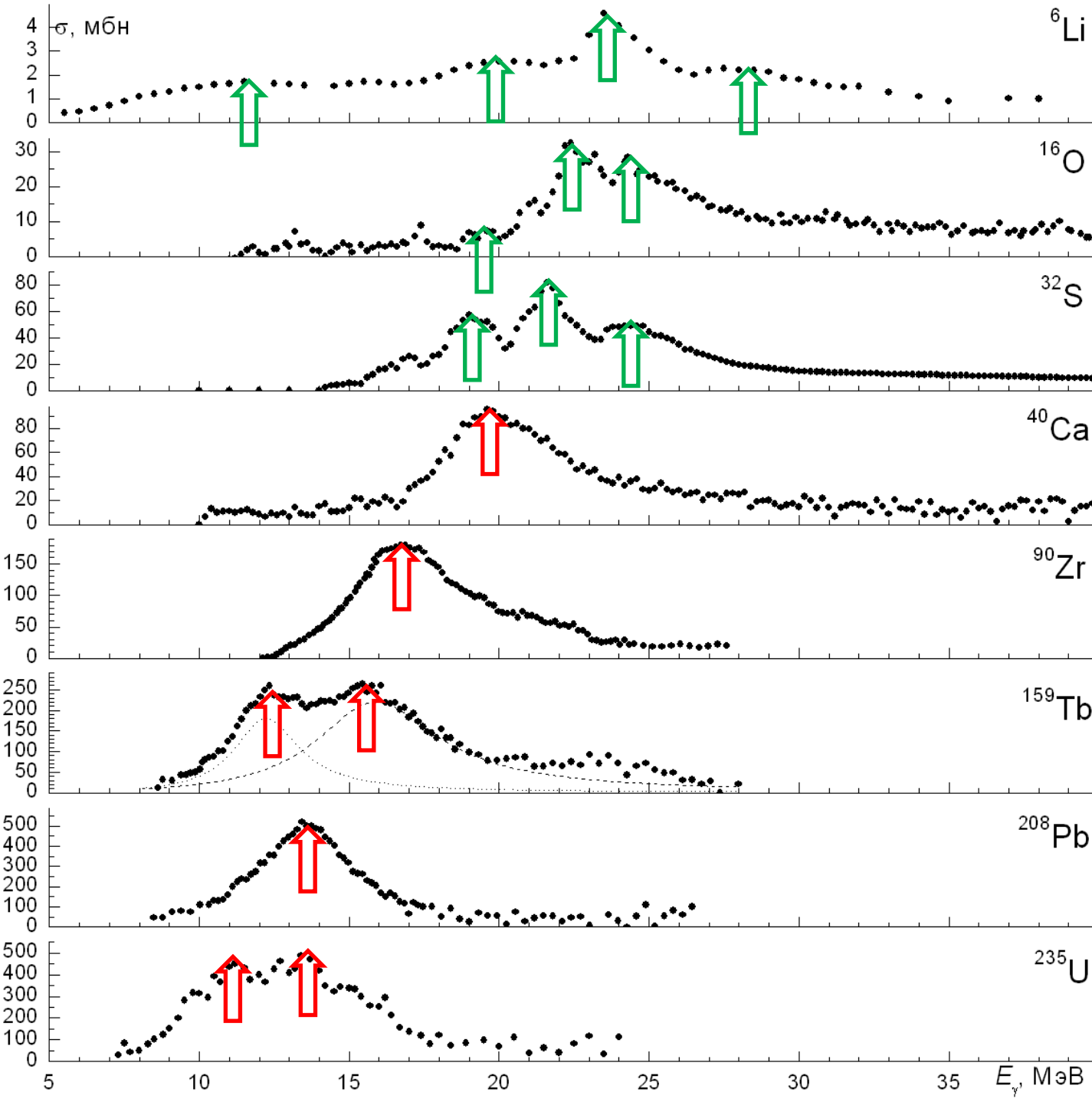


МНОГОЧАСТИЧНЫЕ РЕАКЦИИ РАСПАДА ДИПОЛЬНОГО ГИГАНТСКОГО РЕЗОНАНСА

Трощев Сергей Юрьевич
ФГБНУ ТИСНУМ

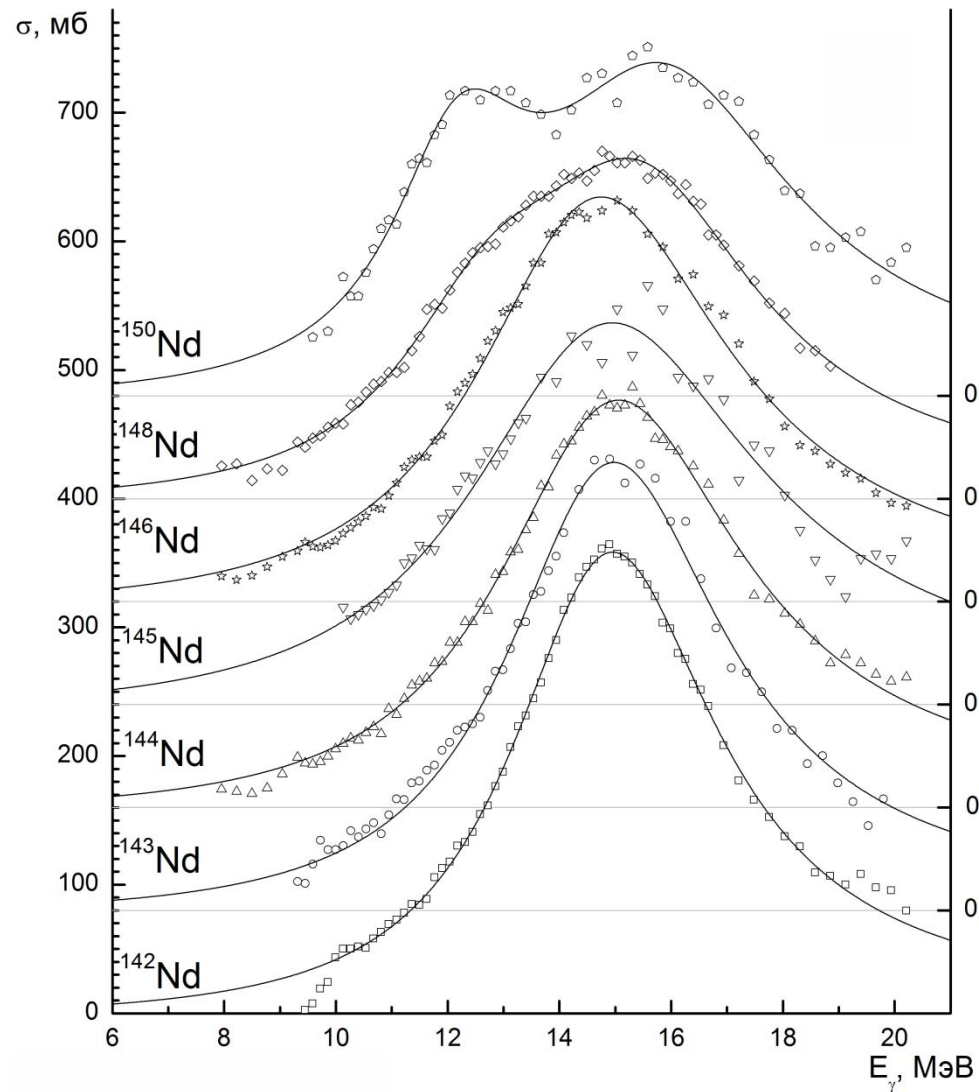
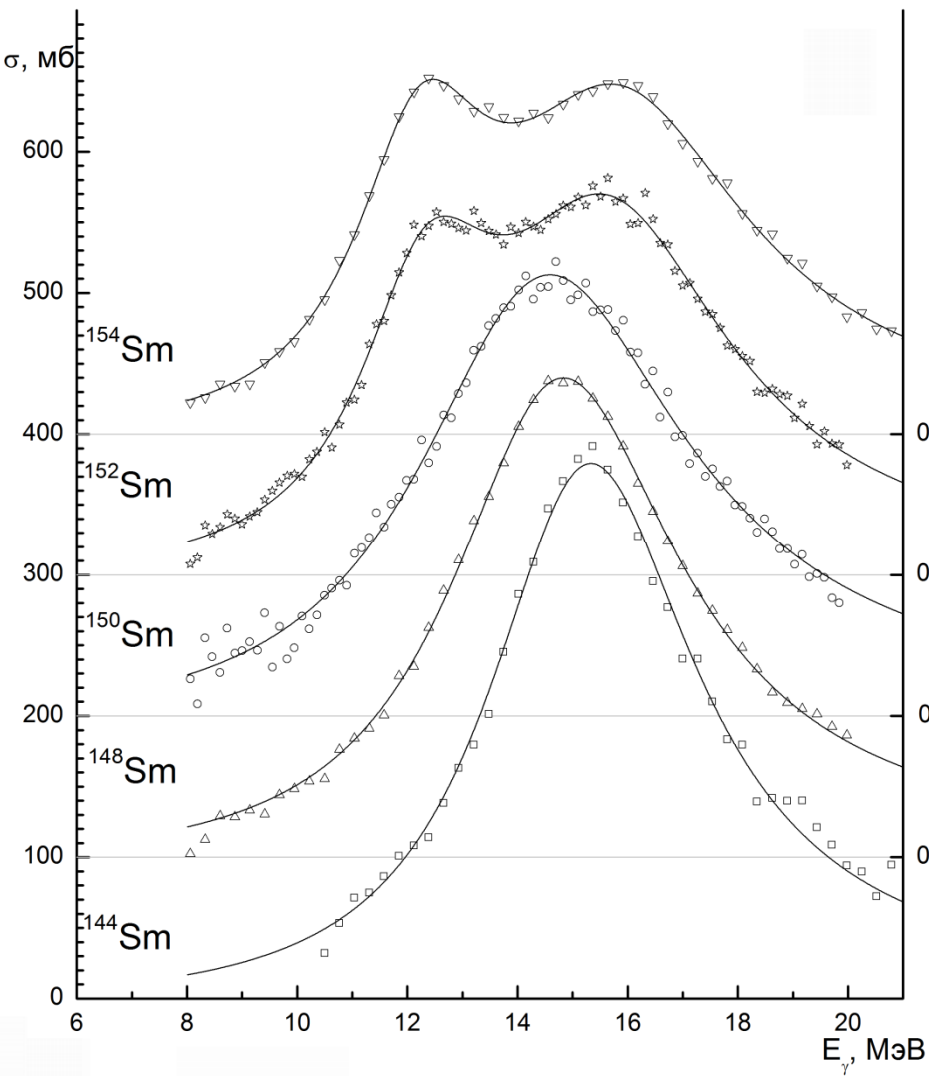
Москва 2014

Дипольный Гигантский Резонанс (ДГР)

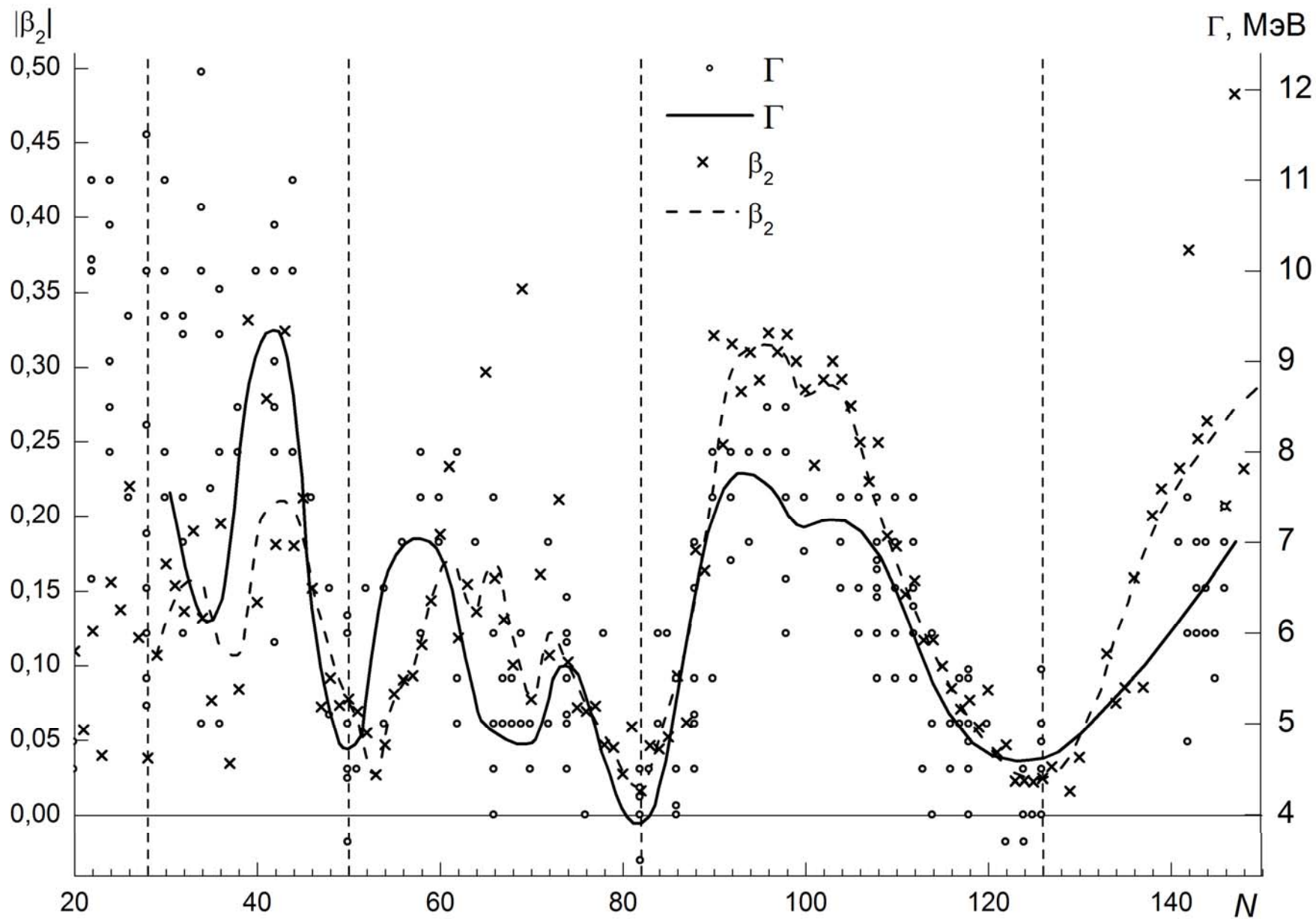


- сечения
поглощения
фотонов
атомными
ядрами

ДГР в деформированных ядрах

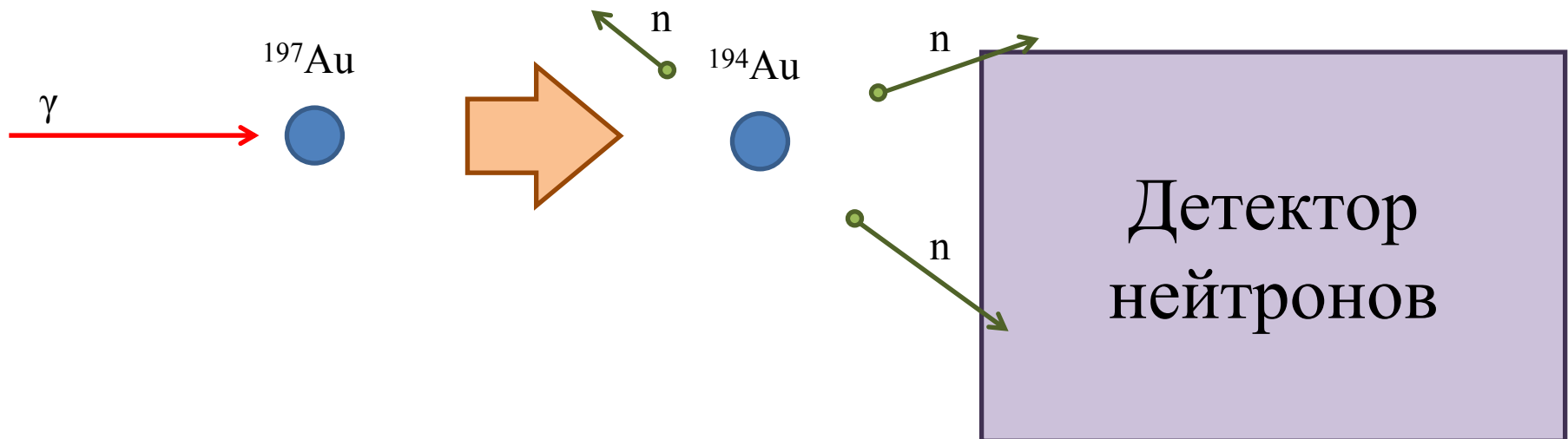


ДГР в деформированных ядрах



Экспериментальные исследования распада ДГР

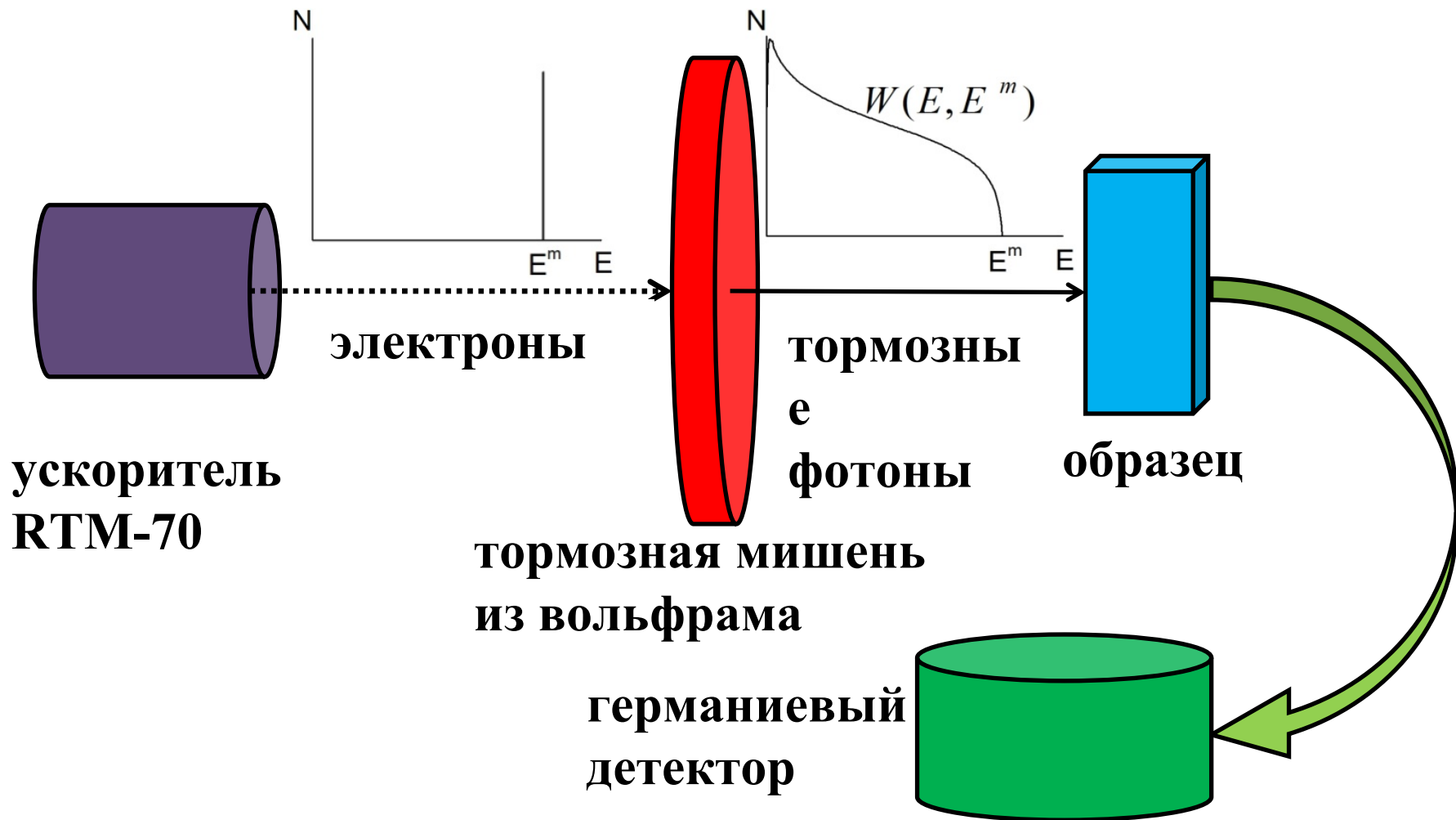
- Обычно для исследования ДГР в тяжелых ядрах проводятся эксперименты с использованием нейтронных детекторов.
- Такие эксперименты имеют ряд существенных недостатков:
 - Эффективность регистрации нейтронов зависит от их энергии и не известна точно;
 - Одновременная регистрация нескольких нейтронов с разной энергией сложна, и ее эффективность неизвестна;
 - Для исследования фотопротонных реакций требуются отдельные эксперименты;
 - Сложность обработки.



Гамма-активационная методика

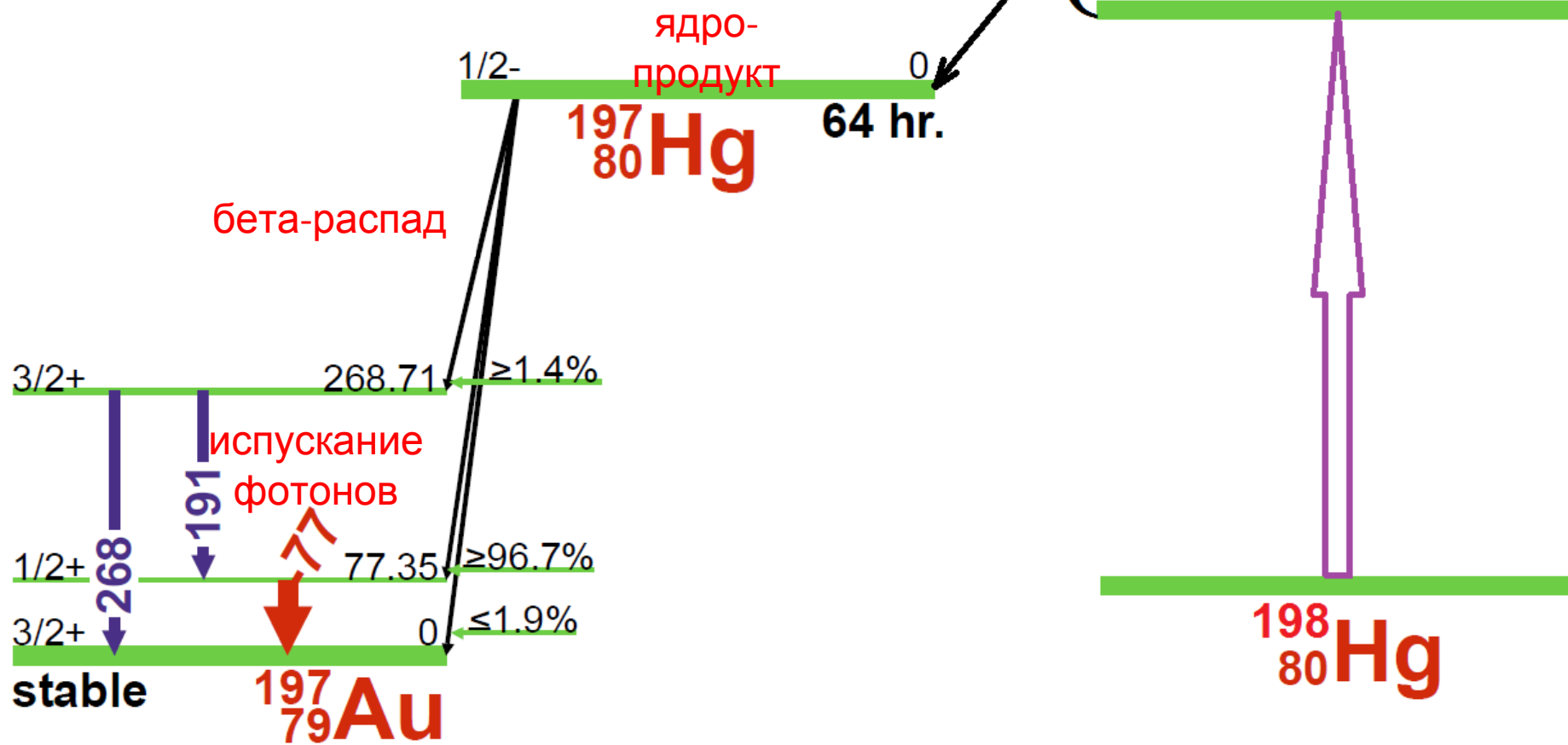
- В настоящей работе используется гамма-активационная методика, основанная на наблюдении продуктов фотонуклонных реакций без прямой регистрации вылетающих нейтронов.
- Такие эксперименты позволяют:
 - Измерять в одном эксперименте выходы, величины которых отличаются на 4 – 5 порядков;
 - Исследовать фотопротонные и фотонейтронные реакции в одном эксперименте;
 - Исследовать фотонуклонные реакции с образованием ядер в изомерных состояниях.
- Для получения наиболее полного изучения фотонуклонных реакций необходимо проводить эксперименты по всем доступным методикам и анализировать все результаты.

Эксперимент по исследованию ДГР по гамма-активационной методике



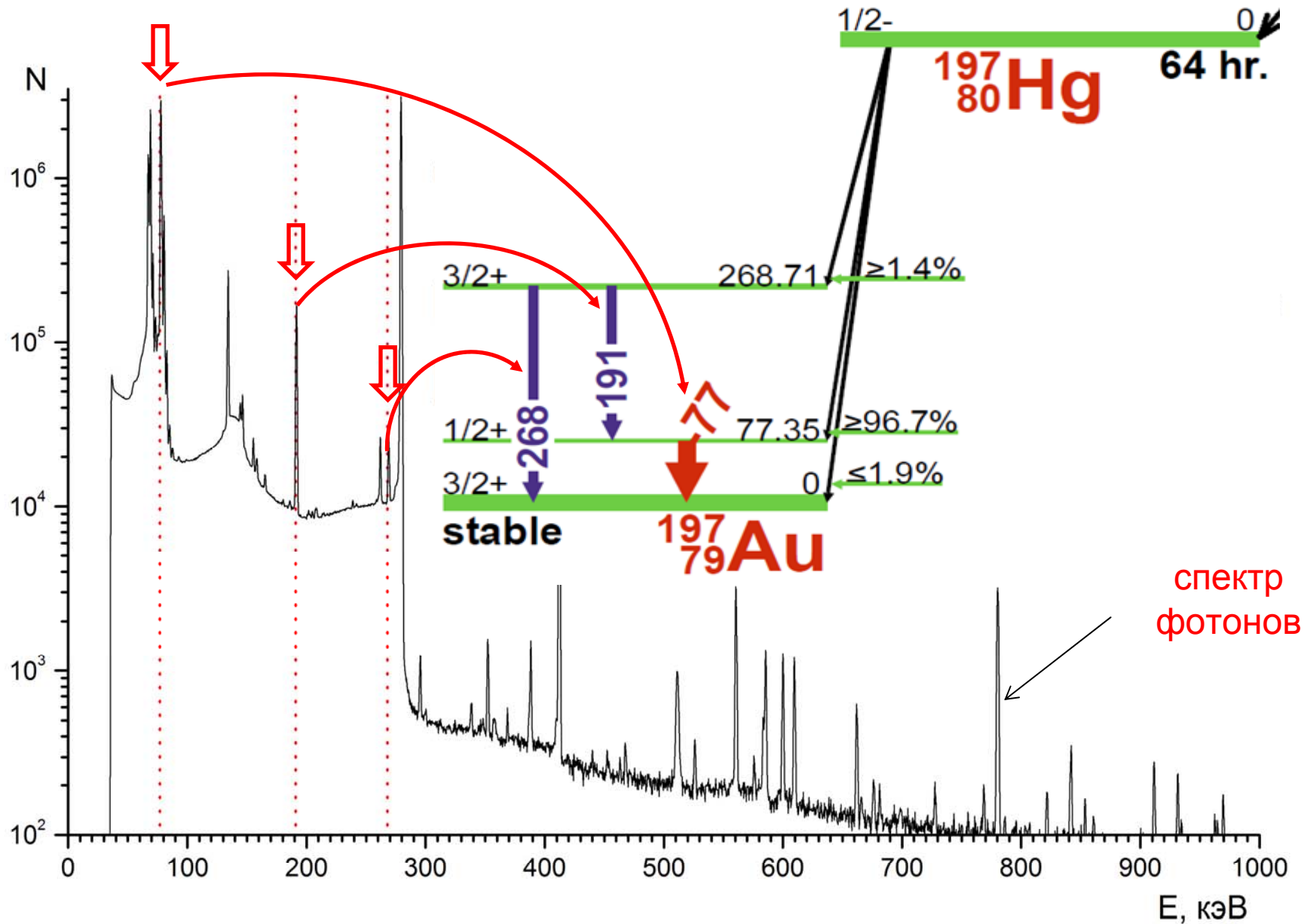
- Всего было измерено более 3700 спектров. Время измерения одного спектра составляло от 1 минуты до 2 часов.

ДГР

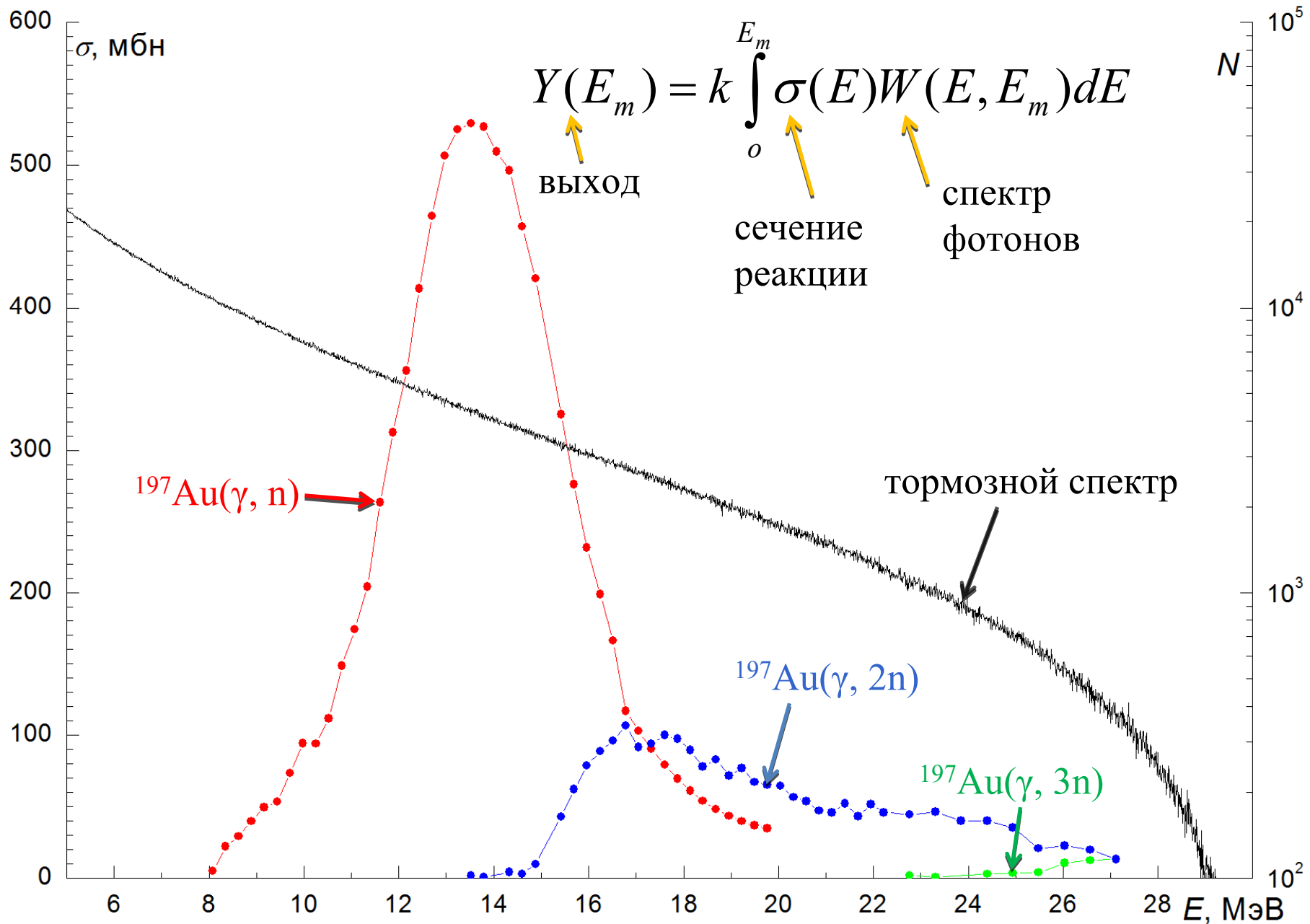


Hg 195 40 h 9,5 h I _y (37...) e ⁻ : s γ 560; 368... m e ⁻ : s γ 780; 61... g	Hg 196 0,15 σ 110 + 3000	Hg 197 23,8 h 64,1 h I _y 134... e ⁻ : s γ 77; 191... e ⁻ : s γ 77; 191... g σ 0,017 + 2	Hg 198 9,97 σ 0,017 + 2	Hg 199 42,6 m 16,87 I _y 158; 374... e ⁻ : s γ 2100; σ < 60	Hg 200 23,10 σ < 60	Hg 201 13,18 σ < 60	Hg 202 29,86 σ 5,0	Hg 203 46,59 d β ⁻ 0,2 γ 279	Hg 204 6,87 σ 0,4
Au 194 38,0 h e ⁻ : s β ⁺ 1,5... γ 328; 294; 1469...	Au 195 30,5 s 186,1 d I _y 262... e ⁻ : s γ 99... g	Au 196 9,7 h 8,2 s 5,2 d I _y 146; 188... e ⁻ : s γ 99... g β ⁻ 0,3 γ 956; 333; 426...	Au 197 7,73 s 100 I _y 279... e ⁻ : s σ 88,7	Au 198 2,30 d 2,6943 d I _y 215; 97; 180; 204... β ⁻ 1,0; 1,4... γ 412... σ 26500	Au 199 3,139 d β ⁻ 0,3; 0,5... γ 158; 208... g σ 30	Au 200 18,7 h 48,4 m β ⁻ 0,9 γ 368; 498; 579; 256... γ 333... β ⁻ 2,3 γ 368; 1226; 1263...	Au 201 26,4 m β ⁻ 1,3... γ 543; 517; 613; 167...	Au 202 28 s β ⁻ 3,5... γ 440; 1125; 1307; 1204...	Au 203 60 s β ⁻ 2,0... γ 218; 44; 51; 318; 369

Измеренный спектр остаточной активности



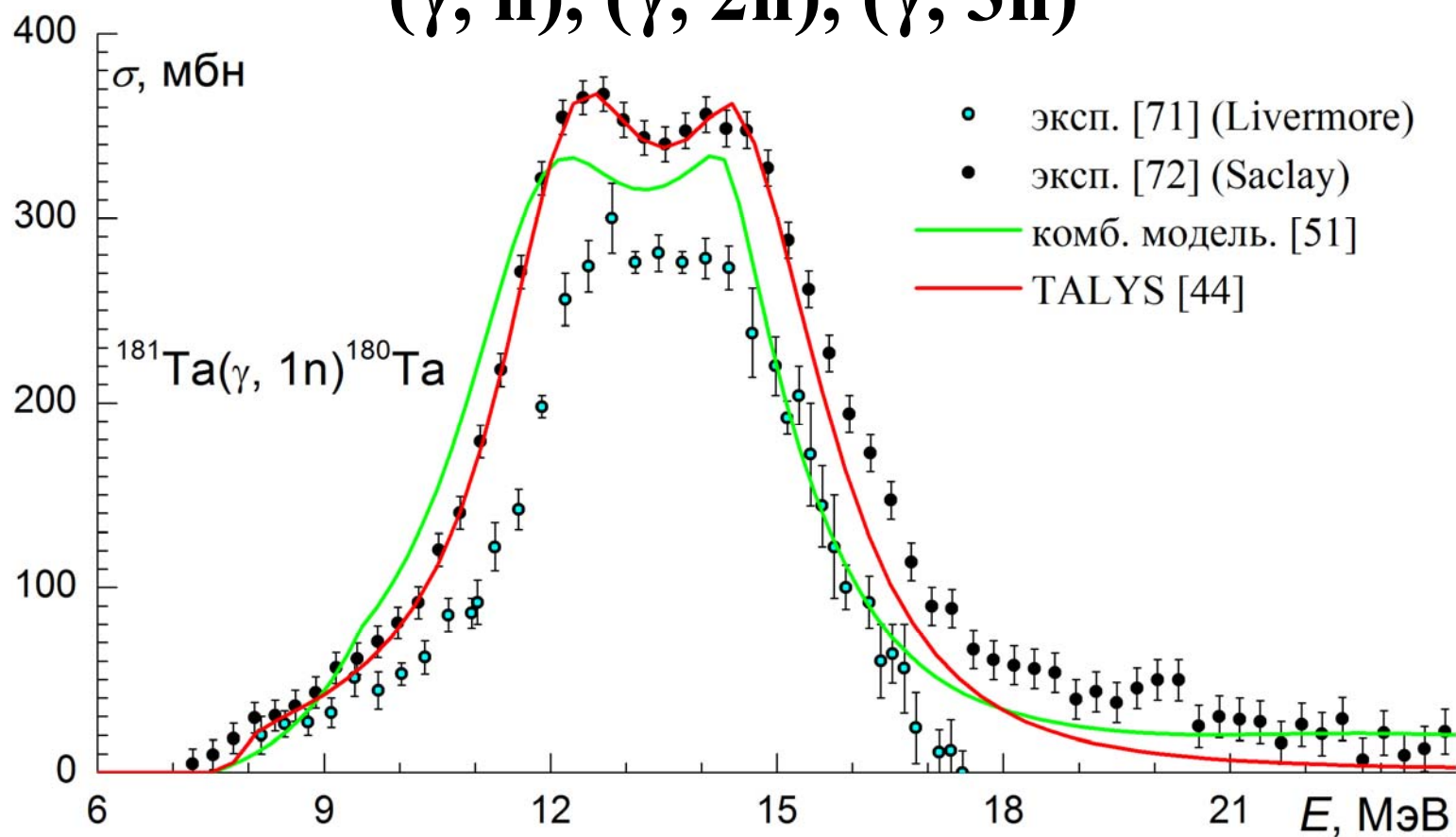
Выходы фотонуклонных реакций



Проведенные эксперименты

Мишень	$E^{\max}$, МэВ	Наблюдаемые реакции
^{181}Ta	67.7	Вылет от 1 до 6 нейтронов 2 реакции с вылетом протонов 3 реакции с образованием изомера
^{197}Au	29.1	Вылет от 1 до 3 нейтронов 1 реакция с образованием изомера
Ест. смесь. Hg	19.5	6 реакций с вылетом нейтрона 3 реакции с вылетом протона 3 реакции с образованием изомера
Ест. смесь. Hg	29.1	6 реакций с вылетом нейтрона 5 реакции с вылетом протона 3 реакции с образованием изомера
Ест. смесь. Pb	67.7	Вылет от 1 до 6 нейтронов 2 реакции с образованием изомера 1 реакция с вылетом протона

Расхождения в измеренных сечениях реакций (γ, n), ($\gamma, 2n$), ($\gamma, 3n$)



51. Ишханов Б. С., Орлин В. Н. // ЯФ **74**. С. 21 (2011).

44. Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. in "Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007", EDP Sciences, Nice, France, 2008, ed. By O.Bersillon, F.Gunsing, E.Bauge et al., P. 211.

71. Bramblett R. L., Caldwell J. T., Auchampaugh G. F., Fultz S. C. // Phys. Rev. **129**, P. 2723 (1963).

72. Bergere R., Beil H., Veyssiere A. // Nucl. Phys. A**121**, P. 463 (1968).

Анализ результатов – реакции (γ , 2n)

- Измеренные выходы фотонуклонных реакций на изотопах ^{181}Ta и ^{197}Au позволяют оценить правильность измерения сечений реакций (γ , 2n) и правильность их оценки.
- Выходы, рассчитанные на основе данных Ливермора, оказываются больше, чем выходы, рассчитанные на основе данных Сакле.
- Измеренные значения выходов реакций $^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)$ и $^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)$ лежат между значениями выходов, рассчитанными на основе данных Сакле и Ливермора.

Реакция	Выход				
	Наст. работа	Сакле	Ливермор	Оцененный	КМ
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{179}\text{Ta}$	0.34 ± 0.07	0.24	0.42	0.37 [38]	0.29
$^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	0.17 ± 0.03	0.12	0.18	0.17 [78]	0.15

38. Варламов В. В., Песков Н. Н., Руденко Д. С., Степанов М. Е. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. № 1-2. С. 48 (2003).

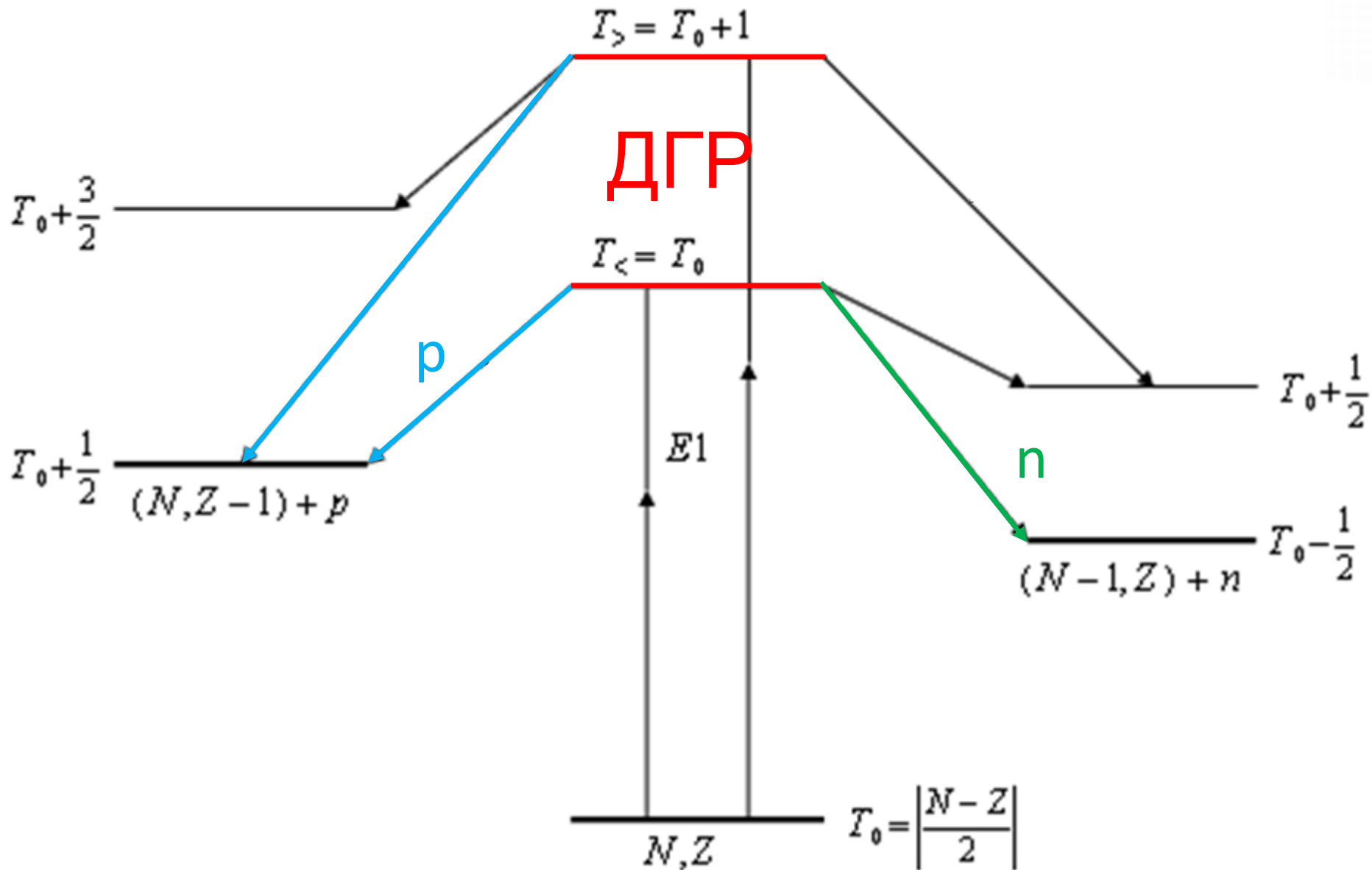
78. Варламов В. В., Ишханов Б.С., Орлин В. Н., Трощев С. Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 74, С. 874 (2010).

Анализ результатов – реакции (γ , 3n)

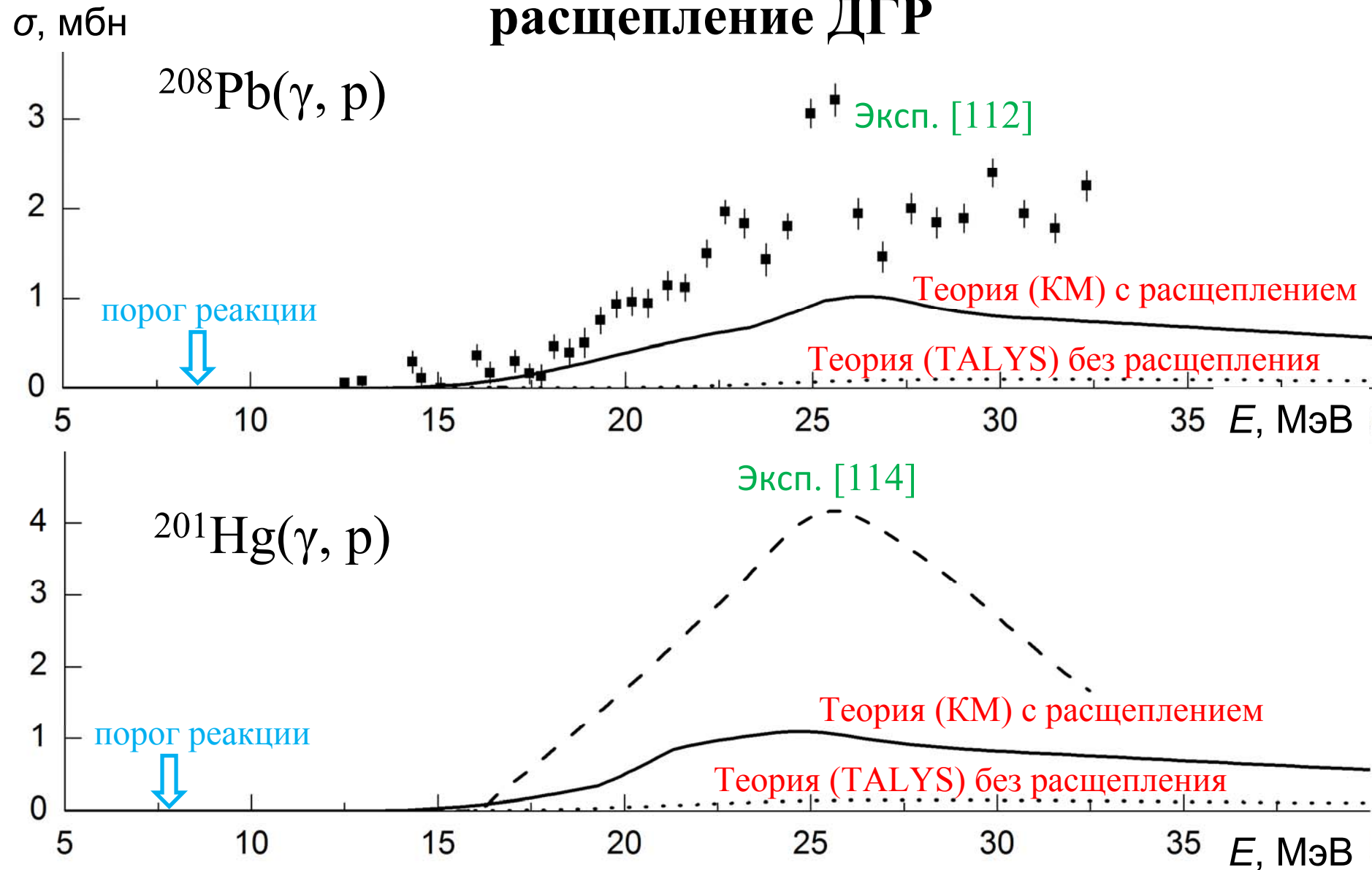
- Измеренные выходы реакций $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)$ и $^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)$ в пределах погрешности совпадают с выходами, рассчитанными на основе данных Сакле.
- Сечения этих реакции не были измерены в Ливерморе.

Реакция	Выход		
	Наст. работа	Сакле	КМ
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178}\text{Ta}$	$(2.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$
$^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	$(1.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$

Изоспиновое расщепление ДГР



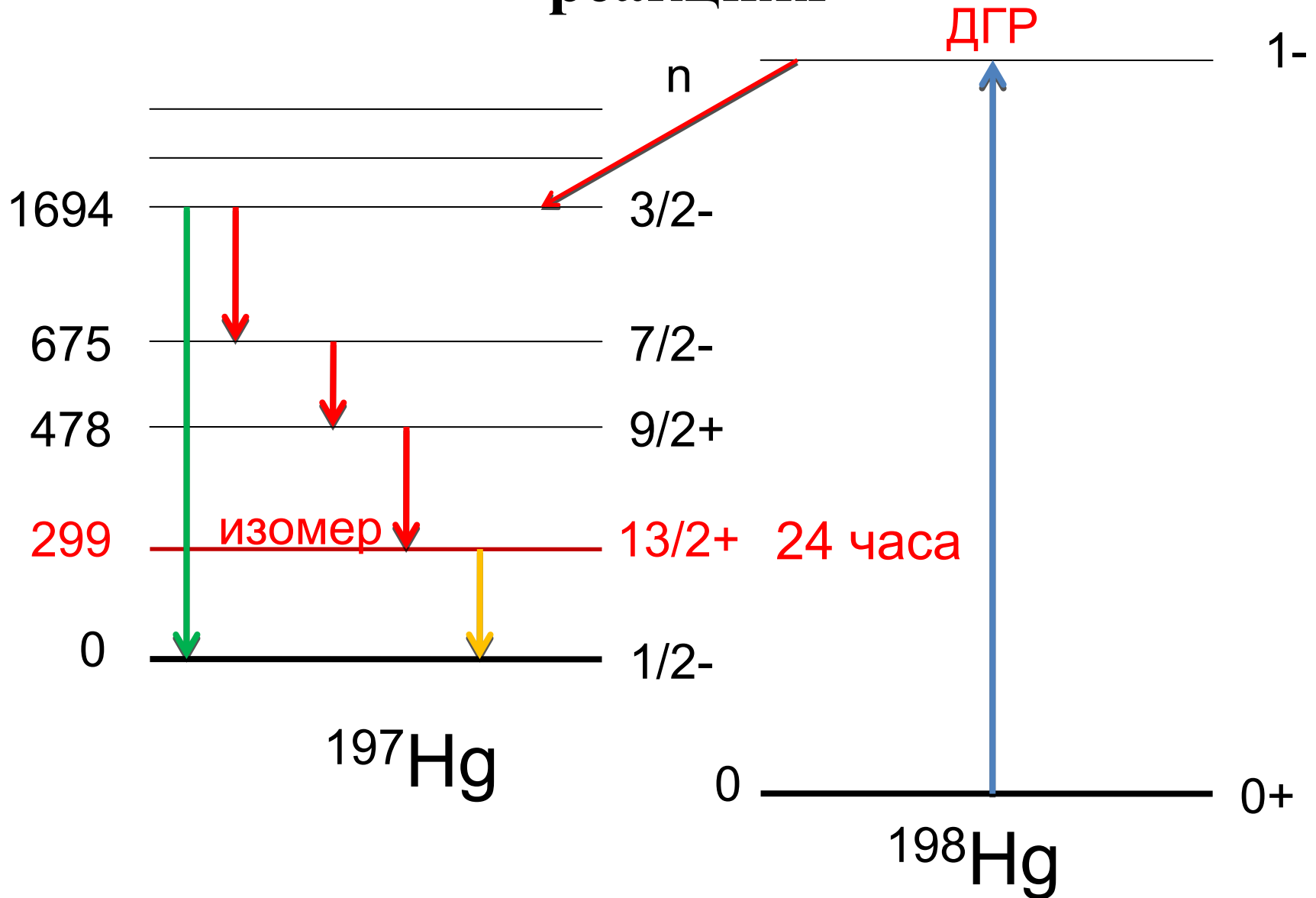
Анализ результатов – реакции (γ , p) и изоспиновое расщепление ДГР



112. Dahmen H. et al. // Nucl. Phys. A164, P. 140 (1971).

114. Carver J. H., Peaslee D. C., Taylor R. B. // Phys. Rev **127**, P. 2198 (1962).

Образование изомеров в фотонуклонных реакциях



Анализ результатов – реакции с образованием изомеров

- В настоящей работе наблюдалось образование одновременно основных и изомерных состояний ядер в четырех фотонуклонных реакциях:
 $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)$, $^{197}\text{Au}(\gamma, n)$, $^{198}\text{Hg}(\gamma, n)$, $^{196}\text{Hg}(\gamma, n)$.

							Изомерно
Начальное ядро	Реакция	$E^{\max}$, МэВ	Конечное ядро	J_i^P	J_f^P	Выход	е отношени
^{197}Au	(γ, n)	29.1	$^{196}\text{g.s. Au}$	$3/2^+$	2^-	≈ 1	е 0.0005
			$^{196\text{m}}\text{Au}$		12^-	0.0005	
^{198}Hg	(γ, n)	19.5	$^{197}\text{g.s. Hg}$	0^+	$1/2^-$	1.26	0.08
			$^{197\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.1	
^{196}Hg	(γ, n)	19.5	$^{195}\text{g.s. Hg}$	0^+	$1/2^-$	0.9	0.11
			$^{195\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.1	
^{198}Hg	(γ, n)	29.1	$^{197}\text{g.s. Hg}$	0^+	$1/2^-$	1.27	0.12
			$^{197\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.15	
^{196}Hg	(γ, n)	29.1	$^{195}\text{g.s. Hg}$	0^+	$1/2^-$	0.88	0.14
			$^{195\text{m}}\text{Hg}$		$13/2^+$	0.12	
^{181}Ta	$(\gamma, 3n)$	67.7	$^{178}\text{g.s. Ta}$	$7/2^+$	1^+	0.018	0.28
			$^{178\text{m}}\text{Ta}$		7^-	0.005	

Выходы фотонуклонных реакций на тантале

Реакция	J_f^P	Выход Y (67.7 МэВ)						
		Облучение 1	Облучение 2	КМ [51]	TALYS [44]	Эксп [71]	Эксп [72]	Оцен [39]
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{g.s.}}\text{Ta}$	1^+	1	1	1	0.93	1	1	1
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{m}}\text{Ta}$	9^-				0.07			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{179}\text{Ta}$	$7/2^+$	0.34 ± 0.07		0.29	0.32	0.42	0.24	0.37
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{g.s.}}\text{Ta}$	1^+	$(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$(2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$		$2 \cdot 10^{-2}$	
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	(7^-)	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$					
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$(1.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 5n)^{176}\text{Ta}$	$(1)^-$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 6n)^{175}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(1.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 7n)^{174}\text{Ta}$	3^+			$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{g.s.}}\text{Hf}$	0^+			$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$	8^-	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$		$3 \cdot 10^{-5}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{g.s.}}\text{Hf}$	$9/2^+$			$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{m}}\text{Hf}$	$25/2^-$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-5}$						

51. Ишханов Б. С., Орлин В. Н. // ЯФ 74. С. 21 (2011).

44. Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. in “Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007”, EDP Sciences, Nice, France, 2008, ed. By O.Bersillon, F.Gunsing, E.Bauge et al., P. 211.

71. Bramblett R. L., Caldwell J. T., Auchampaugh G. F., Fultz S. C. // Phys. Rev. 129, P. 2723 (1963).

72. Bergere R., Beil H., Veyssiere A. // Nucl. Phys. A121, P. 463 (1968).

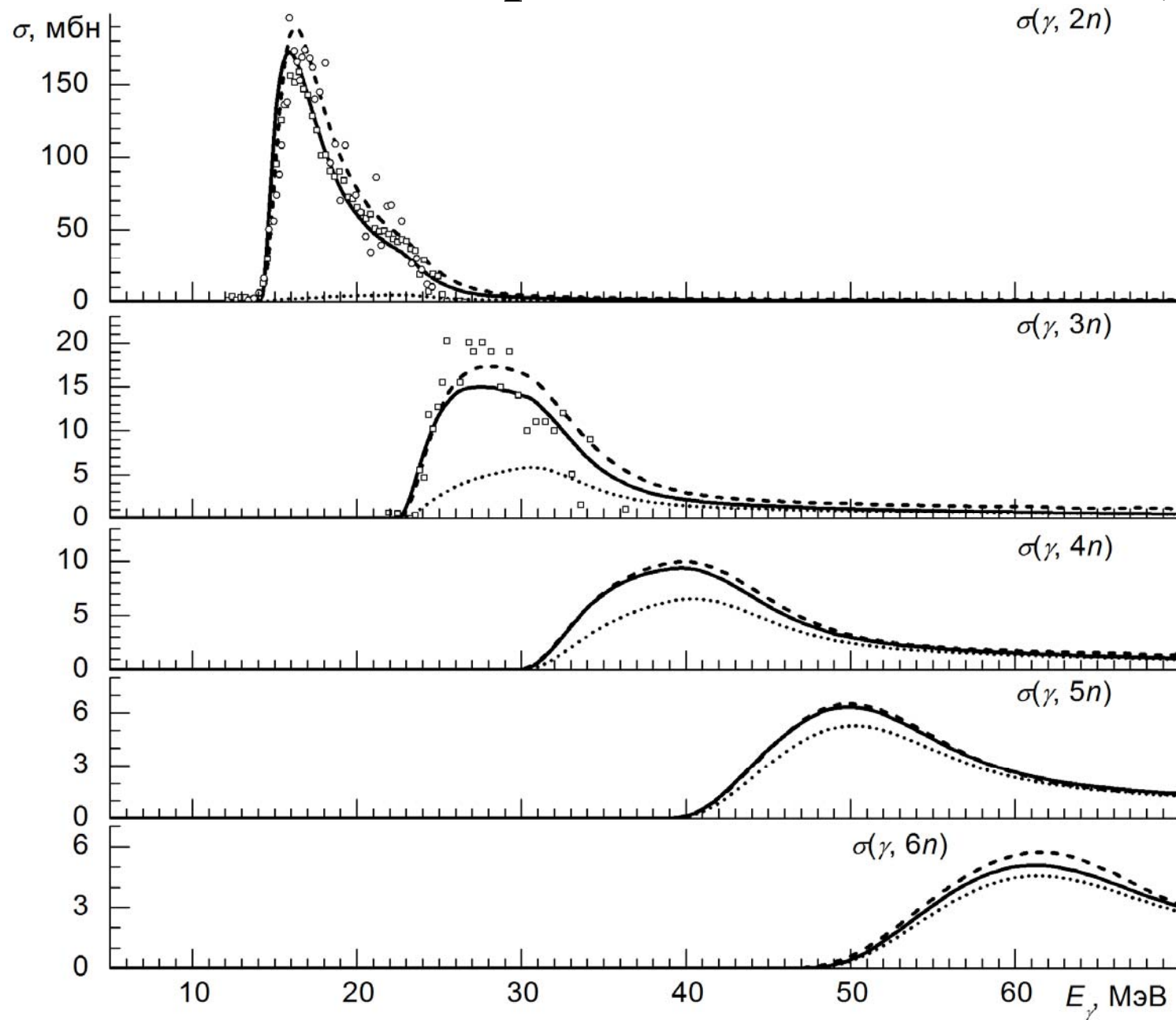
39. Варламов В. В., Песков Н. Н., Руденко Д. С., Степанов М. Е. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. № 1-2. С. 48 (2003).

Основные результаты работы

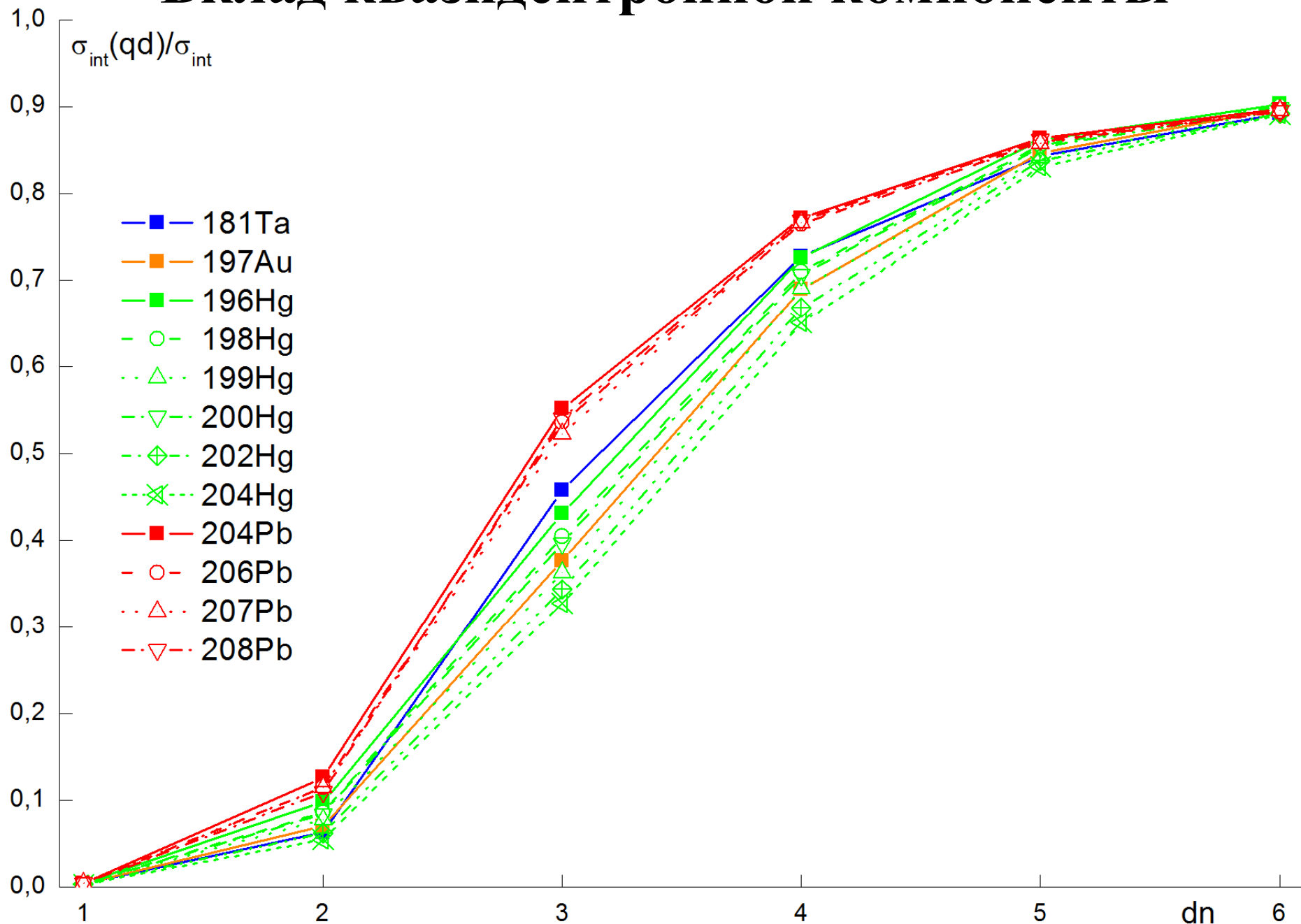
- Измерены спектры остаточной активности и выходы 28 фотонуклонных реакций под действием тормозных фотонов в образцах
 - Ta (максимальная энергия тормозного спектра 67.7 МэВ)
 - Au (максимальная энергия тормозного спектра 29.1 МэВ)
 - Hg (максимальные энергии тормозных спектров 19.5 и 29.1 МэВ)
 - Pb (максимальная энергия тормозного спектра 67.7 МэВ)
- Показана низкая надежность разделения фотонейтронных реакций различной множественности в экспериментах на квазимонохроматических фотонах. Подтверждена необходимость и правильность оценки экспериментальных данных.
- Продемонстрирована решающая роль изоспинового расщепления в механизме фотопротонных реакций в тяжелых ядрах.
- В четырех реакциях наблюдалось образование ядер-продуктов как в основном, так и в изомерном состояниях. Показана связь полученных изомерных отношений с разностью спинов начальных ядер и ядер-продуктов.

Спасибо за внимание!

Вклад квазидейтронной компоненты (^{181}Ta)



Вклад квазидейтронной компоненты



Выходы фотонуклонных реакций на тантале

Реакция	J_f^P	Выход Y (67.7 МэВ)						
		Облучение 1	Облучение 2	КМ [51]	TALYS [44]	Эксп [71]	Эксп [72]	Оцен [39]
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{g.s.}}\text{Ta}$	1^+	1	1a	1b	0.93c	1d	1e	1f
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{m}}\text{Ta}$	9^-				0.07c			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{179}\text{Ta}$	$7/2^+$	0.34 ± 0.07		0.29b	0.32c	0.42d	0.24e	0.37f
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{g.s.}}\text{Ta}$	1^+	$(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$(2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}\text{a}$	$2.4 \cdot 10^{-2}\text{b}$	$2.7 \cdot 10^{-2}\text{c}$		$2 \cdot 10^{-2}\text{e}$	
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	(7^-)	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}\text{a}$					
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}$	$(1.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-2}\text{a}$	$1.0 \cdot 10^{-2}\text{b}$	$1.1 \cdot 10^{-2}\text{c}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 5n)^{176}\text{Ta}$	$(1)^-$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}\text{a}$	$3.7 \cdot 10^{-3}\text{b}$	$3.5 \cdot 10^{-3}\text{c}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 6n)^{175}\text{Ta}$	$7/2^+$	$(1.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(1.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}\text{a}$	$1.2 \cdot 10^{-3}\text{b}$	$1.3 \cdot 10^{-3}\text{c}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, 7n)^{174}\text{Ta}$	3^+			$6 \cdot 10^{-5}\text{b}$	$6 \cdot 10^{-5}\text{c}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{g.s.}}\text{Hf}$	0^+			$7 \cdot 10^{-3}\text{b}$	$8 \cdot 10^{-4}\text{c}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$	8^-	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}\text{a}$		$3 \cdot 10^{-5}\text{c}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{g.s.}}\text{Hf}$	$9/2^+$			$5 \cdot 10^{-3}\text{b}$	$1 \cdot 10^{-3}\text{c}$			
$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn)^{179\text{m}}\text{Hf}$	$25/2^-$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-5}$						

51. Ишханов Б. С., Орлин В. Н. // ЯФ **74**. С. 21 (2011).

44. Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. in “Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007”, EDP Sciences, Nice, France, 2008, ed. By O.Bersillon, F.Gunsing, E.Bauge et al., P. 211.

71. Bramblett R. L., Caldwell J. T., Auchampaugh G. F., Fultz S. C. // Phys. Rev. **129**, P. 2723 (1963).

72. Bergere R., Beil H., Veyssiere A. // Nucl. Phys. A**121**, P. 463 (1968).

39. Варламов В. В., Песков Н. Н., Руденко Д. С., Степанов М. Е. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. № 1-2. С. 48 (2003).

Выходы фотонуклонных реакций на золоте

Реакция Выход реакции (29.1 МэВ)	$(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	$(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	$(\gamma, 1n)^{196\text{m}2}\text{Au}$
наст. раб.	0.17 ± 0.03	$(1.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
теор. КМ [51]	0.15	$2.0 \cdot 10^{-3}$	
эксп. [87]	0.12	$1.2 \cdot 10^{-3}$	
оцен. [81]	0.16	$1.1 \cdot 10^{-3}$	
эксп. [88]	0.18		
оцен. [81]	0.18		
эксп. [91, 92]			$5.0 \cdot 10^{-4}$
теор. [93]			$5 \cdot 10^{-4}$
эксп. [93]			$6 \cdot 10^{-4}$
эксп. [94]			$5.3 \cdot 10^{-4}$
эксп. [95]			$6.5 \cdot 10^{-4}$

51. Ишханов Б. С., Орлин В. Н. // ЯФ **74**, С. 21 (2011).

87. Veyssiere A., Beil H., Bergere R., Carlos P., Lepretre A. // Nucl. Phys. A**159**, С. 561 (1970).

81. Варламов В. В., Ишханов Б.С., Орлин В. Н., Троцкий С. Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. **74**, С. 874 (2010).

88. Fultz S. C., Bramblett R. L., Caldwell T. J., Kerr N. A. // Phys. Rev. **127**, С. 1273 (1962).

91. Сорокин Ю. И., Пономарев В. Н., в сб.: Тезисы докладов XXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Наука, Москва, 1976), С. 449.

92. Сорокин Ю. И., Пономарев В. Н., в сб.: Тезисы докладов XXVIII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Наука, Москва, 1978), С. 258.

93. Гангрский Ю. П., Колесников Н. Н., Лукашик В. Г., Мельникова Л. М. // ЯФ **67**, С. 1 (2004).

94. Джилавян Л. З., Лазарева Л. Е., Пономарев В. Н., Сорокин А.А. // ЯФ **33**, С. 1251 (1981).

95. Чжо Чжо Тун, Автореферат дисс. канд. физ.-мат. наук (КДУ, Москва, 2007).

Выходы фотонуклонных реакций на ртути

Начальное ядро	Реакция	Конечное ядро	Спин, четность		Выход реакции				
			Нач. ядро	Конечное ядро		Эксперимент		Расчет КМ [51]	
				Осн. сост.	Изомер. сост.	$E^{\max} = 19.5$ МэВ	$E^{\max} = 29.1$ МэВ	$E^{\max} = 19.5$ МэВ	$E^{\max} = 29.1$ МэВ
^{204}Hg	(γ , n)	^{203}Hg	0^+	$5/2^-$		1.22 ± 0.24	1.16 ± 0.23	1.05	0.99
^{200}Hg	(γ, n)	^{199}Hg	0^+	$1/2^-$				1.06	1.10
		$^{199\text{m}}\text{Hg}$			$13/2^+$	0.087 ± 0.018	0.085 ± 0.017		
^{198}Hg	(γ, n)	^{197}Hg	0^+	$1/2^-$		1.26 ± 0.26	1.27 ± 0.29	1.02	1.01
		$^{197\text{m}}\text{Hg}$			$13/2^+$	0.10 ± 0.02	0.15 ± 0.03		
^{196}Hg	(γ, n)	^{195}Hg	0^+	$1/2^-$		0.90 ± 0.17	0.88 ± 0.20	1	1
		$^{195\text{m}}\text{Hg}$			$13/2^+$	0.10 ± 0.03	0.12 ± 0.03		
^{202}Hg	(γ, p)	^{201}Au	0^+	$3/2^+$		$< 10^{-4}$	$(1.4 \pm 0.7)10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
^{201}Hg	(γ, p)	^{200}Au	$3/2^-$	$1(-)$		$(2.3 \pm 0.6)10^{-4}$	$(2.4 \pm 0.5)10^{-3}$	$0.7 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$
		$^{200\text{m}}\text{Au}$			12^-	$< 4 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-5}$		
^{200}Hg	(γ, p)	^{199}Au	0^+	$3/2^+$		$(4.6 \pm 1)10^{-4}$	$(2.8 \pm 0.6)10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
^{199}Hg	(γ, p)	^{198}Au	$1/2^-$	2^-		$(3.9 \pm 0.8)10^{-4}$	$(2.7 \pm 0.5)10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
		$^{198\text{m}}\text{Au}$			(12^-)	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-5}$		
^{198}Hg	(γ, n + p)	^{196}Au	0^+	2^-		$< 2 \cdot 10^{-6}$	$(6 \pm 2)10^{-5}$	10^{-9}	$7 \cdot 10^{-4}$

Выходы фотонуклонных реакций на свинце

Изотоп, образующийся в результате фотонуклонных реакций	Суммарный выход , эксп. 67.7 МэВ	Суммарный выход [51]	Доля полного выхода, обусловленная реакцией на начальном стабильном изотопе (расчет [51])			
			²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb
²⁰³ Pb	1	1	0.68	0.19	0.07	0.05
²⁰¹ Pb	$3.9 \cdot 10^{-2}$	$3.9 \cdot 10^{-2}$	0.264	0.658	0.076	0.002
²⁰⁰ Pb	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$9.2 \cdot 10^{-3}$	0.535	0.458	0.007	<0.001
²⁰² Tl	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$0.57 \cdot 10^{-2}$	0.279	0.623	0.094	0.004
^{202m} Pb	$6.9 \cdot 10^{-3}$					
^{204m} Pb	$3.8 \cdot 10^{-2}$					

Ядро	Реакция	Рассчитанный выход [51]	Выход	Работа
²⁰⁶ Pb	(γ, n)	0.97	0.84	[102]
²⁰⁷ Pb		1	0.74	[102]
²⁰⁸ Pb		1	1	[103]
²⁰⁶ Pb	(γ, 2n)	0.13	0.10	[102]
²⁰⁷ Pb		0.11	0.11	[102]
²⁰⁸ Pb		0.15	0.13	[103]
²⁰⁸ Pb	(γ, 3n)	0.015	0.02	[103]

Pb 199 12.2 m β ⁺ 124 γ 367; 353; γ 45- 2613	Pb 200 1,5 h β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 201 61 s β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 202 3,53 h β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 203 6,2 s β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 204 67,2 m β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 205 1,5 · 10 ⁷ a β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 206 24,1 β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 207 22,1 β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...	Pb 208 52,4 β ⁺ 367; 353; γ 148; 257; 236; 268...
Tl 198 1,87 h β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 199 7,42 h β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 200 26,1 h β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 201 73,1 h β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 202 12,23 d β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 203 29,524 β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 204 3,78 a β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 205 70,476 β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 206 3,7 m β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...	Tl 207 1,33 s β ⁺ 437; 412; γ 455; 208; 247; 158...

51. Ишханов Б. С., Орлин В. Н. // ЯФ 74. С. 21 (2011).

102. Harvey R. R., Caldwell J. T., Bramblett R. L., Fultz S. C. // Phys. Rev **136**, P. B126 (1964).

103. Veyssiere A., Beil H., Bergere R., Carlos P., Lepretre A. // Nucl. Phys. **A159**. P. 561 (1970).

Фоторасщепление тантала (67.7 МэВ)

Количество испускаемых протонов	Количество испускаемых нейтронов								
	0n	1n	2n	3n	4n	5n	6n	7n	8n
0p		7.58	14.22	22.15	29.00	37.54	44.46	53.20	60.61
1p	5.94	13.33	21.87	29.80	33.44	41.60	48.31	56.82	63.90

Ta 174 1,04 h ϵ β^+ 2,5; 2,8... γ 207; 91; 1206...	Ta 175 10,5 h ϵ γ 207; 349; 267; 82; 126; 1793...	Ta 176 8,1 h ϵ β^+ ... γ 1159; 88; 1225...	Ta 177 56,6 h ϵ β^+ γ 113; 208... g	Ta 178 $\xleftrightarrow{9,25 \text{ m} \quad 2,45 \text{ h}}$ ϵ β^+ 0,9... γ 93; 1351; 1341... g ϵ γ 332... m ₁	Ta 179 665 d ϵ no γ g	Ta 180 0,012 $> 10^{15} \text{ a}$ $\sigma \sim 560$ 8,15 h ϵ β^- 0,7... γ 93; 104 g	Ta 181 99,988 σ 0,012 + 20
Hf 173 23,6 h ϵ γ 124; 297; 140; 311...	Hf 174 0,162 $2,0 \cdot 10^{15} \text{ a}$ α 2,50 σ 620	Hf 175 70,0 d ϵ γ 343...	Hf 176 5,206 σ 23	Hf 177 51 m 1,1 s 18,60 I_γ 277; 295; 327... I_γ 208; 229; 379... σ 10^{-7} ; +1 +375	Hf 178 31 a 4,0 s 27,30 I_γ 426; 326; 213; 89... I_γ 454; 363; 123; 146... σ ? +53 +32	Hf 179 25 d 18,7 s 13,63 I_γ 454; 363; 123; 146... I_γ 214 σ 0,42 +46	Hf 180 5,5 h 35,10 I_γ 332; 443; 215; 57... β^- ...; m σ 13

Номер образца	t_1 , час	t_2	t_3 , сут	Кол-во измеренных спектров
№1	2.5	2 мин	3	54
		360 сут	6	276
№2	3	3 мин	4	95

Фоторасщепление золота (29.1 МэВ)

Au 194 38,0 h ϵ β^+ 1,5... γ 328; 294; 1469...	Au 195 30,5 s 186,1 d ϵ γ 99... e^- g I_γ 262... e^-	Au 196 9,7 h 8,2 s 6,2 d ϵ β^- 0,3 γ 356; 333; 426... I_γ 148; (85) 188... e^-	Au 197 7,73 s 100 I_γ 279... e^- σ 98,7
Pt 193 4,33 d ~ 50 a I_γ (136...) e^- ϵ no γ g	Pt 194 32,9 σ 0,1 + 1,1	Pt 195 4,02 d 33,8 I_γ 99; 130... e^- σ 28	Pt 196 25,3 σ 0,045 + 0,55

$t_1,$	t_2	$t_3,$ сут	Кол-во измеренных спектров
3 ч 23 мин	5 мин	70	2437

Фоторасщепление ртути (19.5 и 29.1 МэВ)

Изотоп	Проц. содерж. в ест. смеси	Порог реакции, МэВ				
		(γ , n)	(γ , 2n)	(γ , 1p)	(γ , 2p)	(γ , n + p)
¹⁹⁶ Hg	0.15	8.90	15.78	6.55	11.64	14.92
¹⁹⁸ Hg	9.97	8.48	15.27	7.10	12.88	15.17
¹⁹⁹ Hg	16.87	6.66	15.15	7.25	13.70	13.77
²⁰⁰ Hg	23.1	8.03	14.69	7.70	14.17	15.28
²⁰¹ Hg	13.18	6.23	14.26	7.68	14.85	13.93
²⁰² Hg	29.86	7.75	13.98	8.23	15.32	15.44
²⁰⁴ Hg	6.87	7.49	13.49	8.84	16.69	15.65

Hg 194 520 a ϵ по γ	Hg 195 40 h, 9,5 h ϵ по γ	Hg 196 0,15 σ 110 + 3000	Hg 197 23,8 h, 64,1 h ϵ по γ	Hg 198 9,97 σ 0,017 + 2	Hg 199 42,6 m, 16,87 σ 2100	Hg 200 23,10 σ < 60	Hg 201 13,18 σ < 60	Hg 202 29,86 σ 5,0	Hg 203 46,59 d β^- 0,2 γ 279	Hg 204 6,87 σ 0,4
Au 193 3,9 s, 17,65 h ϵ по γ	Au 194 38,0 h ϵ по γ	Au 195 30,5 s, 186,1 d ϵ по γ	Au 196 9,7 h, 8,2 s, 6,2 d ϵ по γ	Au 197 7,73 s, 100 σ 98,7	Au 198 2,30 d, 2,6943 d σ 26500	Au 199 3,139 d σ 30	Au 200 18,7 h, 48,4 m σ 333	Au 201 26,4 m σ 613; 167...	Au 202 28 s σ 1307; 1204...	Au 203 60 s σ 318; 369

Облучение	$E_{\max}$, МэВ	t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , сут	Количество измеренных спектров
1	19.5	260	5	130	298
2	29.1	60	5	130	356

Фоторасщепление свинца (67.7 МэВ)

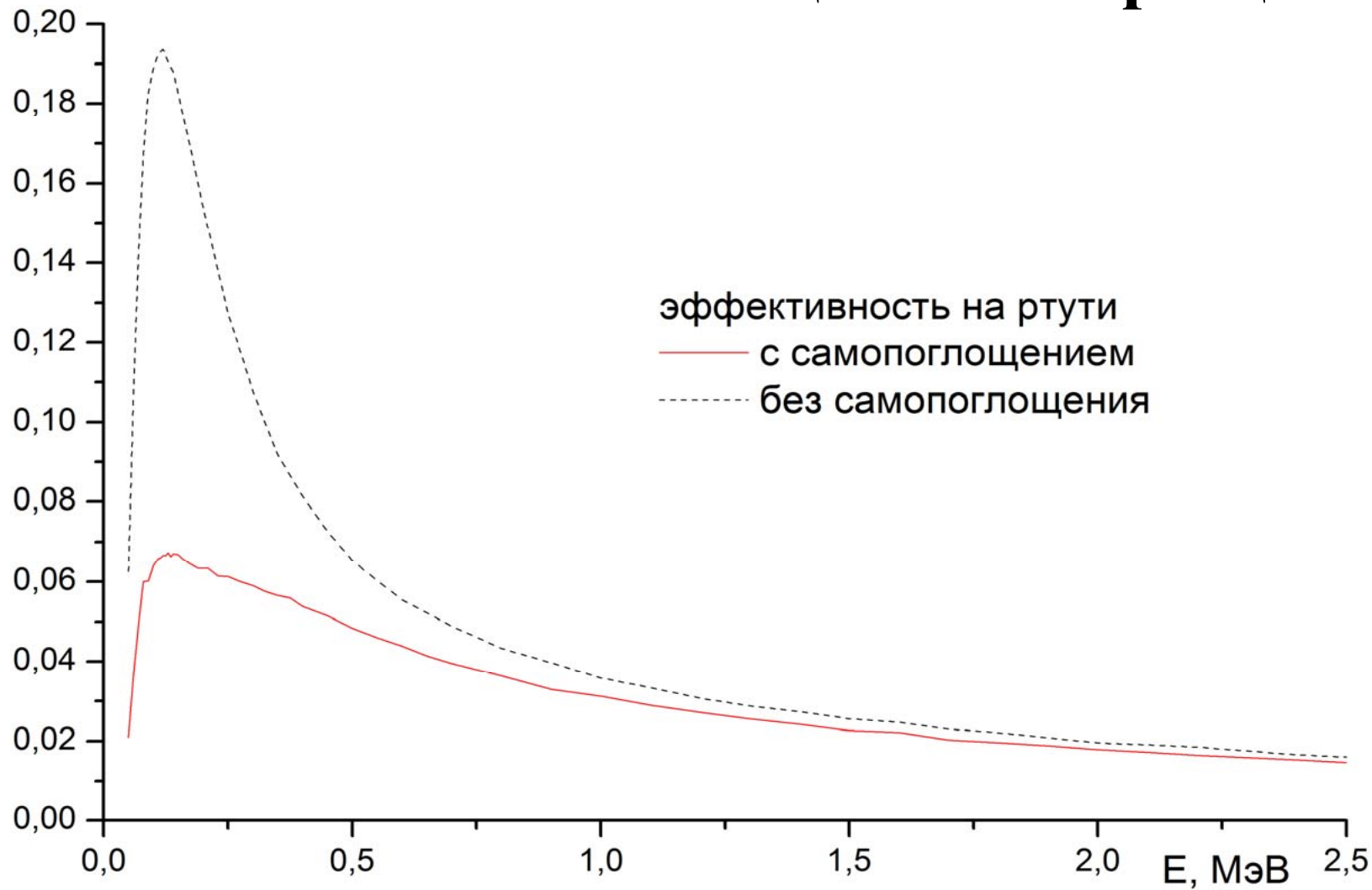
Изотоп	n, %	Порог реакции, МэВ									
		(g, n)	(g, 2n)	(g, 3n)	(g, 4n)	(g, 5n)	(g, 6n)	(g, 7n)	(g, 8n)	(g, p)	(g, np)
²⁰⁴ Pb	1,4	8,39	15,32	24,07	31,15	40,24	47,49	56,86	64,32	6,64	14,49
²⁰⁶ Pb	24,1	8,09	14,82	23,21	30,14	38,88	45,97	55,06	62,31	7,25	14,80
²⁰⁷ Pb	22,1	6,74	14,82	21,56	29,95	36,87	45,62	52,71	61,79	7,49	13,99
²⁰⁸ Pb	52,4	7,37	14,11	22,19	28,92	37,32	44,24	52,99	60,08	8,00	14,86

Pb 199 12,2 m 1,5 h β^- 124; 367; 353; 1135; 720... γ 45; 2613	Pb 200 21,5 h β^- 148; 257; 236; 268...	Pb 201 61 s 9,4 h β^- 829; 946...	Pb 202 3,53 h 5,25 · 10 ⁴ a β^- 961; 422; 787...; ϵ 490; 460; 390... no γ	Pb 203 6,2 s 51,9 h β^- 825; 820...; γ 279; 401...	Pb 204 67,2 m 1,4 β^- 899; 912; 375...; σ 0,68	Pb 205 1,5 · 10 ⁷ a ϵ no γ σ ~ 5	Pb 206 24,1 σ 0,030	Pb 207 22,1 σ 0,70	Pb 208 52,4 σ 0,00049
Tl 198 1,87 h 5,3 h β^- 637; 412; 587...; γ 263...	Tl 199 7,42 h β^- 455; 208; 247; 158...; g	Tl 200 26,1 h β^- 368; 1206; 579; 828...	Tl 201 73,1 h ϵ 167; 135...	Tl 202 12,23 d ϵ 440; (520...)	Tl 203 29,524 σ 11	Tl 204 3,78 a β^- 0,8; ϵ no γ ; g σ 22	Tl 205 70,476 σ 0,11	Tl 206 3,7 m 4,20 m β^- 686; 453; 216; 266; 1021...; γ (803...)	Tl 207 1,33 s 4,77 m β^- 1000; 351; γ (896...)

t_1 ,	t_2	t_3 , сут	Кол-во измеренных спектров
3 ч	5 мин	5	267

Эффективность детектора

Влияние самопоглощения в образце



Самопоглощение учитывалось при помощи GEANT4.

Определение выхода реакции

$$Y(E_m) = \frac{\lambda \cdot A}{\varepsilon \cdot I(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_d}(1 - e^{-\lambda t_m})}$$

λ – постоянная распада образующегося ядра

ε – эффективность регистрации детектором

I – интенсивность линии

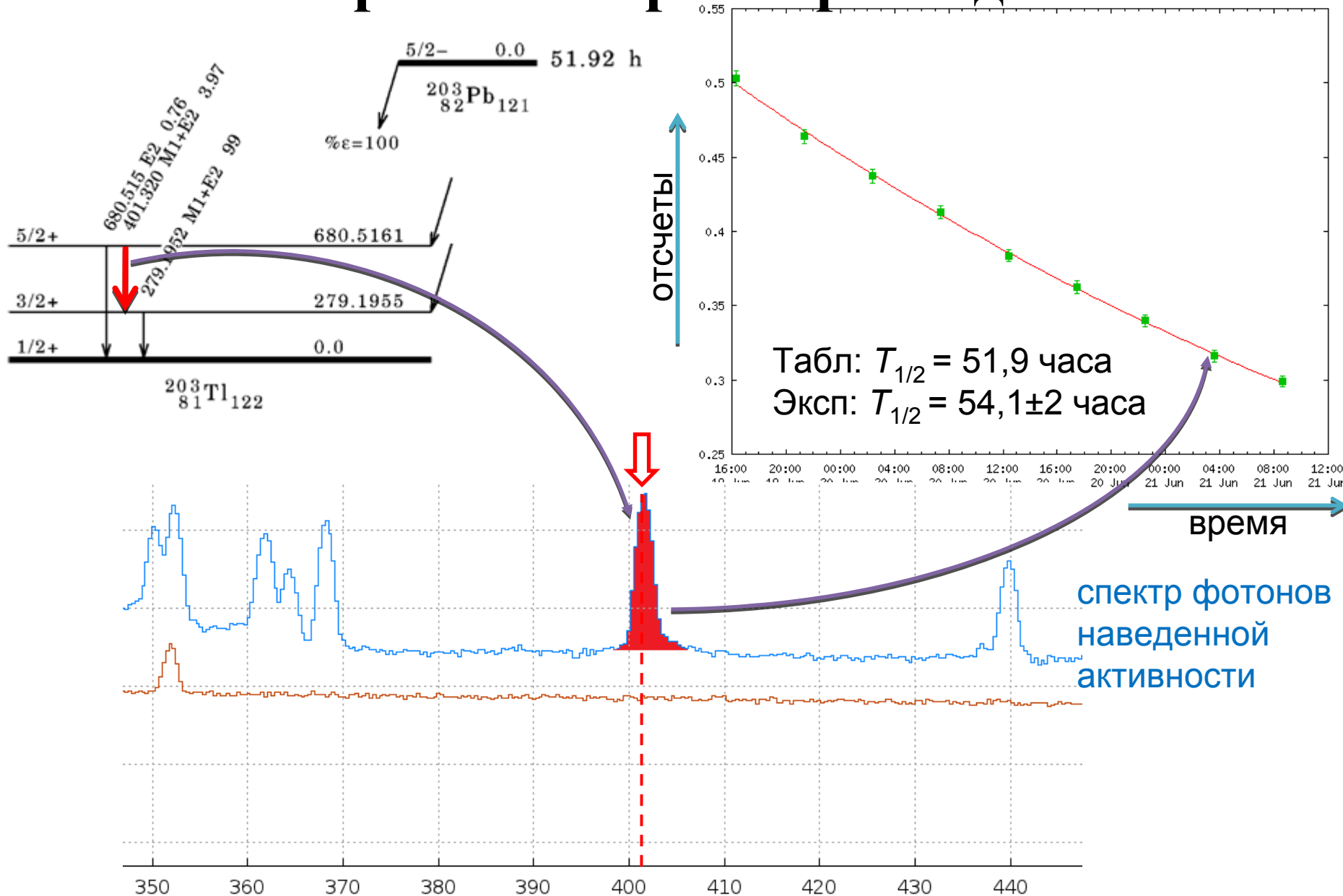
t_i – время облучения

t_d – время между концом облучения и началом измерения спектра

t_m – продолжительность измерения спектра

A – площадь под соответствующим максимумом в спектре

Идентификация максимумов: энергия и скорость распада

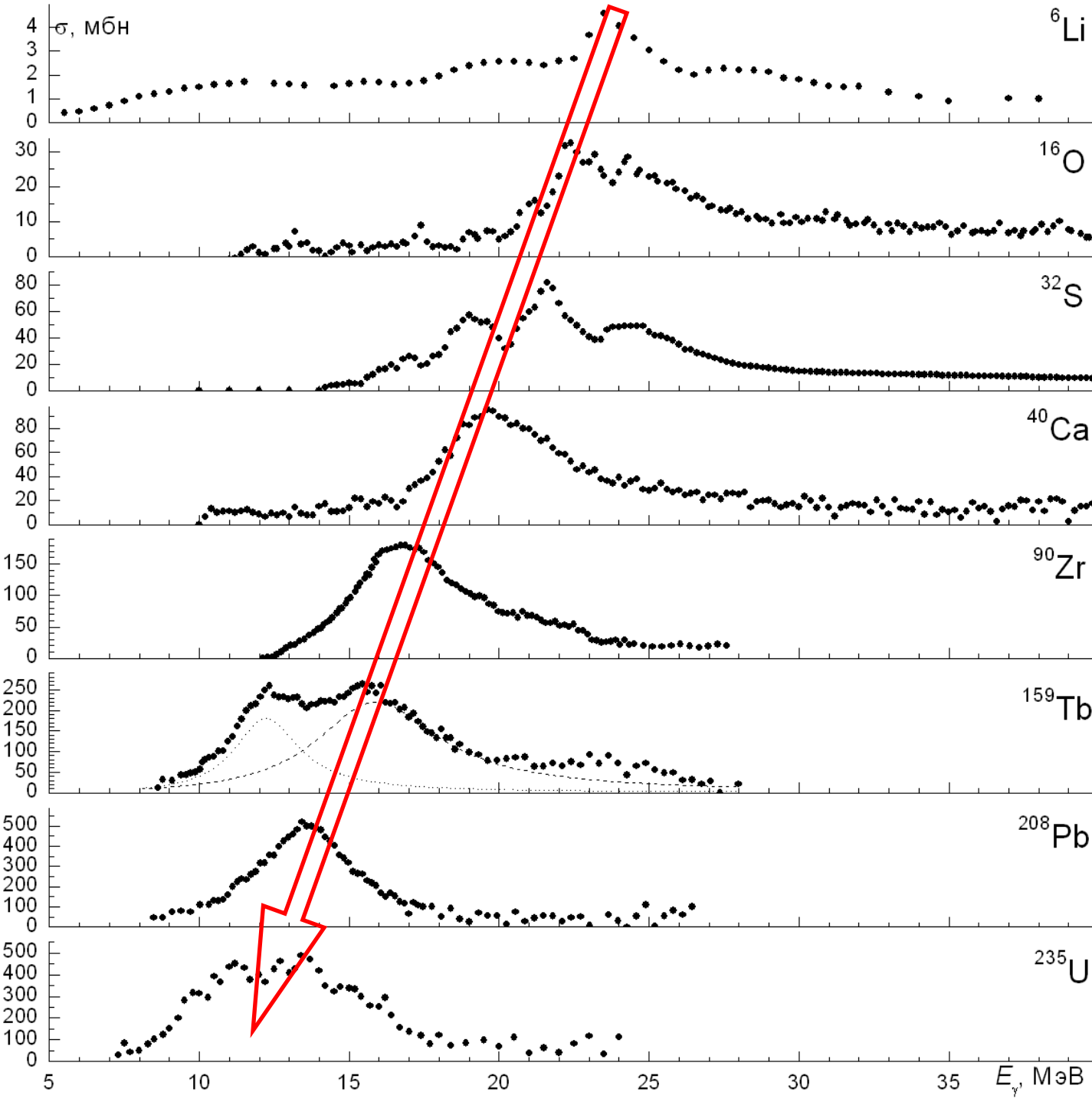


Цели и задачи работы

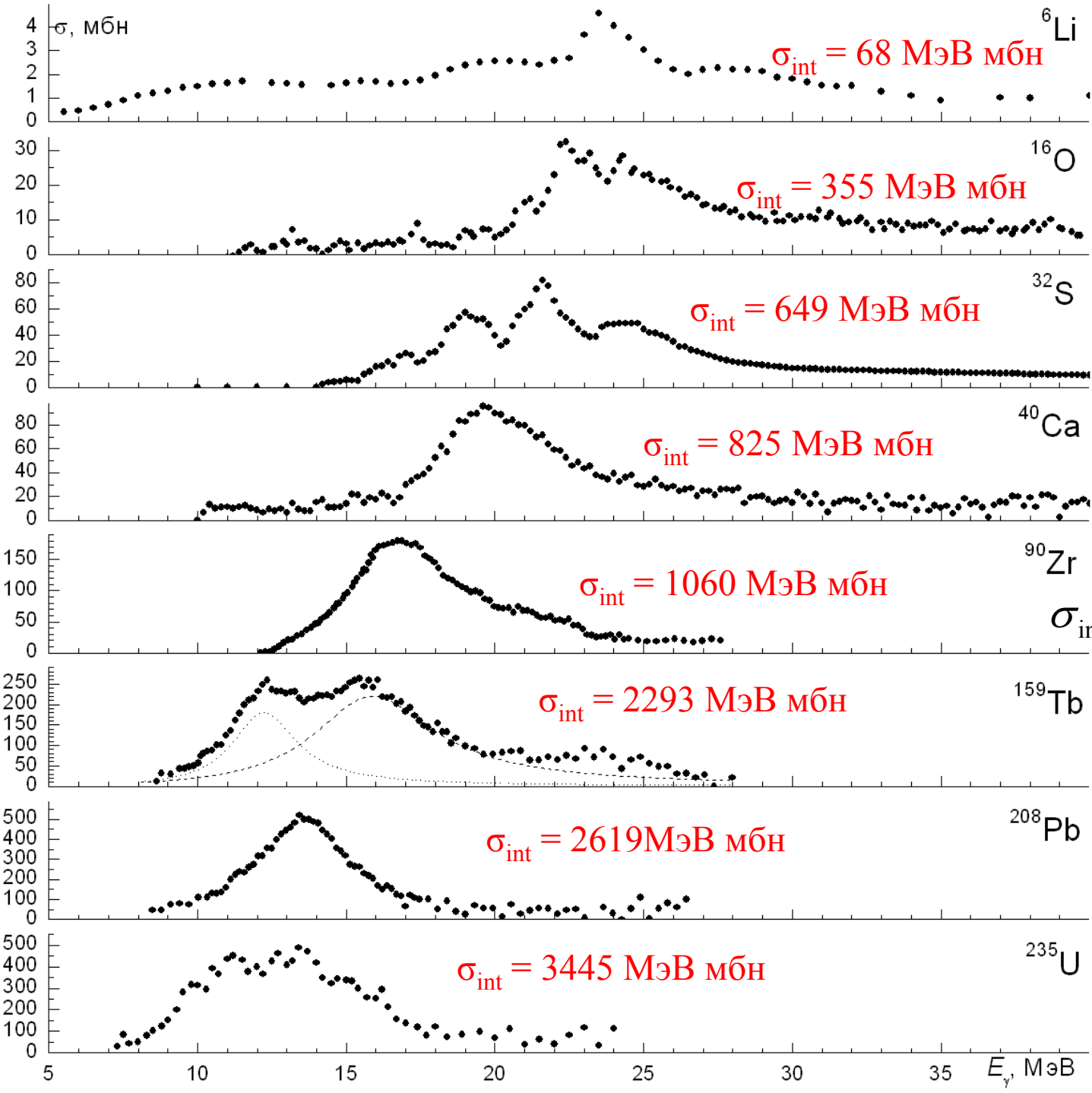
- Усовершенствовать методику проведения эксперимента по гамма-активационному анализу.
- Идентифицировать радиоактивные изотопы, образующиеся под воздействием пучка тормозных фотонов в образцах
 - естественной смеси изотопов тантала;
 - золота ^{197}Au ;
 - естественной смеси изотопов ртути;
 - естественной смеси изотопов свинца.
- Измерить выходы реакций, в которых образуются эти изотопы.
- Рассчитать выходы фотонуклонных реакций на стабильных изотопах тантала, золота, ртути и свинца с использованием сечений
 - измеренных в экспериментах на квазимонохроматических пучках;
 - рассчитанных при помощи различных моделей.
- Сравнить измеренные выходы фотонуклонных реакций с

Дипольный Гигантский Резонанс (ДГР)

$$E \approx 78 A^{-1/3} \text{ МэВ}$$



Дипольный Гигантский Резонанс (ДГР)



$$\sigma_{\text{int}} \approx \frac{60NZ}{A} \text{ МэВ} \cdot \text{мбн}$$