

Фотоядерные реакции на изотопах палладия

К. А. Стопани

НИИЯФ МГУ

*диссертация на соискание степени кандидата физико-
математических наук*

Изотопы палладия и существующие данные о фотоядерных реакциях на них

$Z = 46$, изотопы природного палладия:

Изотоп	Содержание	J^P	Изотоп	Содержание	J^P
^{102}Pd	1.02%	0+	^{106}Pd	27.33%	0+
^{104}Pd	11.14%	0+	^{108}Pd	26.46%	0+
^{105}Pd	22.33%	5/2+	^{110}Pd	11.72%	0+

Предыдущие измерения:

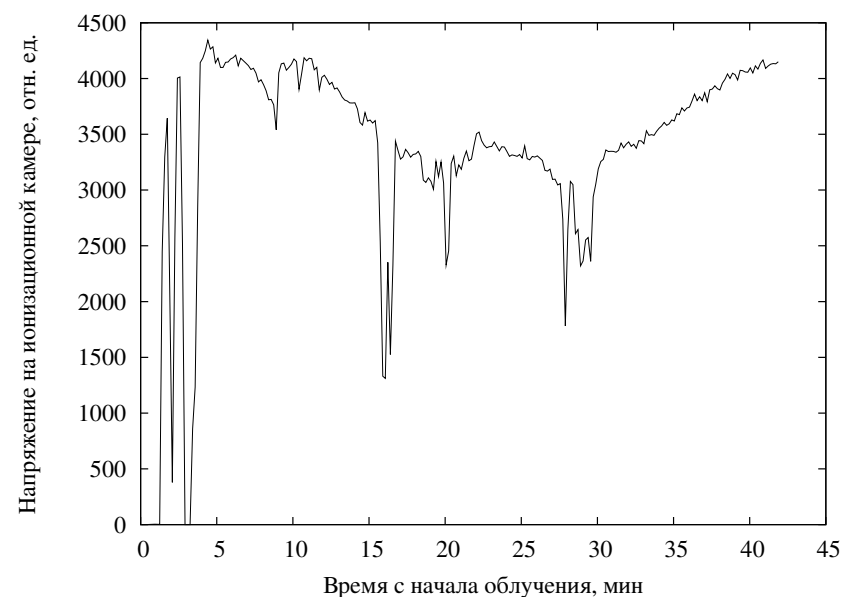
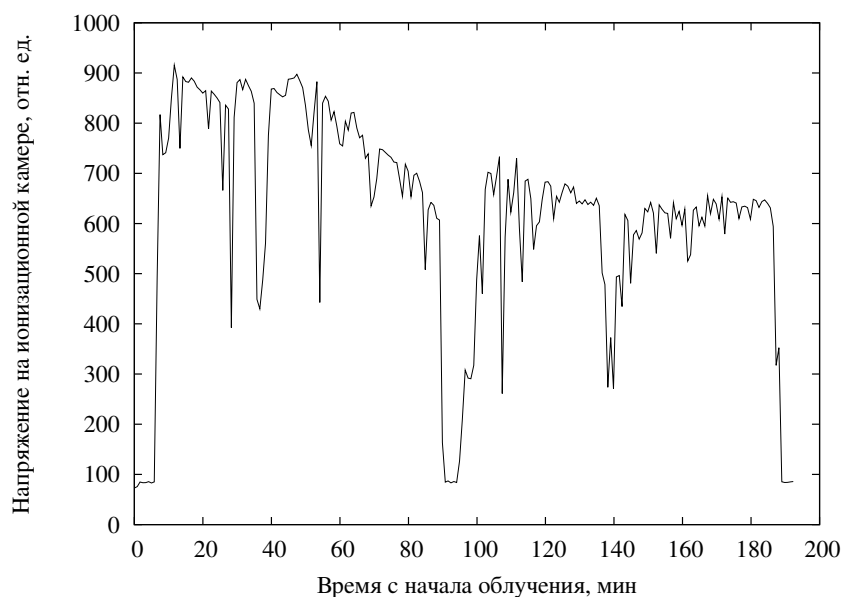
1. A. Leprêtre et al., Nucl. Phys. A 219 (1974): (γ, n) , (γ, np) , $(\gamma, 2n)$ at 8—30 MeV.
2. T.K. Deague, E.G. Muirhead and B.M. Spicer, Nucl. Phys. A 139 (1969): (γ, n) , (γ, p) , (γ, np) , $(\gamma, 2n)$ at ~8—29 MeV.
3. А.Г. Белов и др., ЯФ, 1996, т. 59, №4: (γ, n) at 25 MeV.
4. J. Tickner, R. Bencardino, G. Roach, NIM B 268 (2010): (γ, n) at 11--14 MeV.
5. H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 82, 064610 (2010): (γ, n) at 8--16 MeV.
6. V. M. Mazur, Z. M. Bigan, D. M. Symochko, Ukr. J. Phys, 2007, V. 52, N 8: 8—18 MeV.
7. H. D. Luc, T. D. Thier, T. T. An, P. An, Болг. Физ. Ж. 14 (1987), 2: 15—20.5 MeV.

Измерение выходов фотоядерных реакций на Pd с помощью метода наведенной активности

Для облучения использовалась мишень из природного палладия толщиной 377 мкм. Облучение проводилось на разрезных микротронах НИИЯФ (максимальная энергия пучка 70 и 55 МэВ).

Энергия электронов	29.1 МэВ	55.5 МэВ
Тормозная мишень	Pb, 4 мм; Al, 30 мм	W, 2.3 мм
Средний ток пучка	10 нА	75 нА
Длительность облучения	3 ч	40 мин
Набор спектров	21 + 10 д	45 д
Число спектров в БД	1609	2062

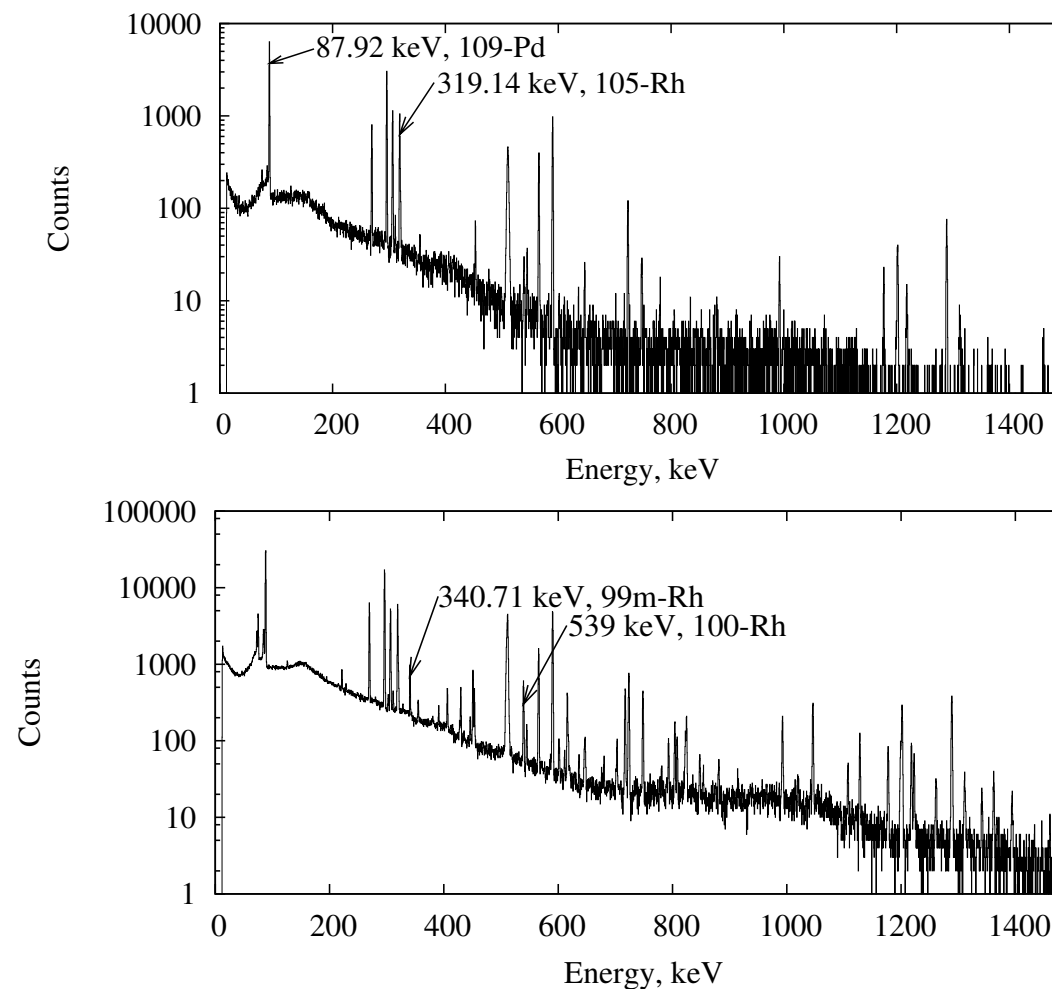
Ток ускорителя, записанный с помощью ионизационной камеры:



Измерение γ -спектров наведенной активности

Измерение спектров проводилось при помощи HPGe-детектора с относительной эффективностью 30% в низкофоновой защитной камере.

Длительность измерения каждого спектра 60—1800 с. Начало измерений через 5—7 мин после окончания облучений.



Спектры, измеренные через 2 ч после облучения при энергии 29.1 МэВ и 55.5 МэВ.

Идентификация продуктов реакций

99Ag 124 S ε: 100.00%	100Ag 2.01 M ε: 100.00%	101Ag 11.1 M ε: 100.00%	102Ag 12.9 M ε: 100.00%	103Ag 65.7 M ε: 100.00%	104Ag 69.2 M ε: 100.00%	105Ag 41.29 D ε: 100.00%	106Ag 23.96 M ε: 99.50% β- < 1.00%	107Ag STABLE 51.639%	108Ag 2.382 M β-: 97.15% ε: 2.85%	109Ag STABLE 48.161%	110Ag 24.6 S β-: 99.70% ε: 0.30%	111Ag 7.45 D β-: 100.00%	112Ag 3.130 H β-: 100.00%
98Pd 17.7 M ε: 100.00%	99Pd 21.4 M ε: 100.00% *	100Pd 3.63 D ε: 100.00% *	101Pd 8.47 H ε: 100.00% *	102Pd STABLE 1.02%	103Pd 16.991 D ε: 100.00%	104Pd STABLE 11.14%	105Pd STABLE 22.33%	106Pd STABLE 27.33%	107Pd 6.5E+6 Y β-: 100.00% *	108Pd STABLE 26.46%	109Pd 13.7012 H β-: 100.00% *	110Pd STABLE 11.72%	111Pd 23.4 M β-: 100.00%
97Rh 30.7 M ε: 100.00%	98Rh 8.72 M ε: 100.00%	99Rh 16.1 D ε: 100.00% *	100Rh 20.8 H ε: 100.00% *	101Rh 3.3 Y ε: 100.00% *	102Rh 207.3 D ε: 78.00% β-: 22.00% *	103Rh STABLE 100%	104Rh 42.3 S β-: 99.55% ε: 0.45% *	105Rh 35.36 H β-: 100.00% *	106Rh 30.07 S β-: 100.00% *	107Rh 21.7 M β-: 100.00% *	108Rh 16.8 S β-: 100.00% *	109Rh 80 S β-: 100.00% *	110Rh 28.5 S β-: 100.00%
96Ru STABLE 5.54%	97Ru 2.83 D ε: 100.00% *	98Ru STABLE 1.87%	99Ru STABLE 12.76%	100Ru STABLE 12.60%	101Ru STABLE 17.06%	102Ru STABLE 31.55%	103Ru 39.247 D β-: 100.00% *	104Ru STABLE 18.62%	105Ru 4.44 H β-: 100.00% *	106Ru 371.8 D β-: 100.00%	107Ru 3.75 M β-: 100.00%	108Ru 4.55 M β-: 100.00%	109Ru 34.5 S β-: 100.00%
95Tc 20.0 H ε: 100.00%	96Tc 4.28 D ε: 100.00%	97Tc 4.21E+6 Y ε: 100.00%	98Tc 4.2E+6 Y β-: 100.00%	99Tc 2.111E+5 Y β-: 100.00%	100Tc 15.46 S β-: 100.00% ε: 2.6E-3%	101Tc 14.02 M β-: 100.00%	102Tc 5.28 S β-: 100.00%	103Tc 54.2 S β-: 100.00%	104Tc 18.3 M β-: 100.00%	105Tc 7.6 M β-: 100.00%	106Tc 35.6 S β-: 100.00%	107Tc 21.2 S β-: 100.00%	108Tc 5.17 S β-: 100.00%
94Mo STABLE 9.15%	95Mo STABLE 15.84%	96Mo STABLE 16.67%	97Mo STABLE 9.60%	98Mo STABLE 24.39%	99Mo 65.976 H β-: 100.00%	100Mo 7.3E+18 Y 9.82% 2β-: 100.00%	101Mo 14.61 M β-: 100.00%	102Mo 11.3 M β-: 100.00%	103Mo 67.5 S β-: 100.00%	104Mo 60 S β-: 100.00%	105Mo 35.6 S β-: 100.00%	106Mo 8.73 S β-: 100.00%	107Mo 3.5 S β-: 100.00%
93Nb STABLE 100%	94Nb 2.03E+4 Y β-: 100.00%	95Nb 34.991 D β-: 100.00%	96Nb 23.35 H β-: 100.00%	97Nb 72.1 M β-: 100.00%	98Nb 2.86 S β-: 100.00%	99Nb 15.0 S β-: 100.00%	100Nb 1.5 S β-: 100.00%	101Nb 7.1 S β-: 100.00%	102Nb 4.3 S β-: 100.00%	103Nb 1.5 S β-: 100.00%	104Nb 4.9 S β-: 100.00% β-n: 0.06%	105Nb 2.95 S β-: 100.00% β-n: 1.70%	106Nb 0.93 S β-: 100.00% β-n: 4.50%
92Zr STABLE 17.15%	93Zr 1.61E+6 Y β-: 100.00%	94Zr STABLE 17.38%	95Zr 64.032 D β-: 100.00%	96Zr 2.35E+19 Y 2.80% 2β-	97Zr 16.749 H β-: 100.00%	98Zr 30.7 S β-: 100.00%	99Zr 2.1 S β-: 100.00%	100Zr 7.1 S β-: 100.00%	101Zr 2.3 S β-: 100.00%	102Zr 2.9 S β-: 100.00%	103Zr 1.32 S β-: 100.00% β-n: 1.00%	104Zr 0.87 S β-: 100.00% β-n: 1.00%	105Zr 0.66 S β-: 100.00% β-n: 2.00%

Система набора и анализа γ-спектров

База данных γ-спектров

Спектры гамма квантов: **Pd**

Сравнить спектры Анализ

N	id	Начало измерения	Конец измерения	Полное время, с	Живое время, с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	27779	2010-03-29 16:35:17	2010-03-29 16:36:17	60	40.84	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	27780	2010-03-29 16:36:26	2010-03-29 16:37:26	60	41.7299999	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	27781	2010-03-29 16:37:36	2010-03-29 16:38:36	60	42.47	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	27782	2010-03-29 16:38:45	2010-03-29 16:39:45	60	43.22	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	27783	2010-03-29 16:39:55	2010-03-29 16:40:55	60	43.96	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	27784	2010-03-29 16:41:05	2010-03-29 16:42:05	60	44.63	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

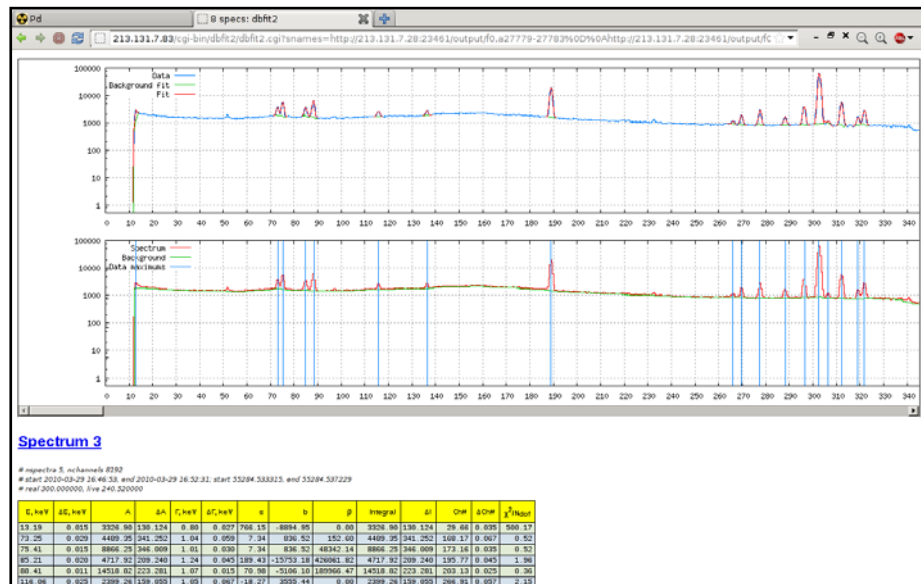
<...>

2055	29833	2010-05-12 15:09:45	2010-05-12 15:39:45	1800	1798.37	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2056	29834	2010-05-12 15:39:56	2010-05-12 16:09:56	1800	1798.41	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2057	29835	2010-05-12 16:10:06	2010-05-12 16:40:06	1800	1798.35	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2058	29836	2010-05-12 16:40:17	2010-05-12 17:10:17	1800	1798.39	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2059	29837	2010-05-12 17:10:27	2010-05-12 17:40:27	1800	1798.44	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2060	29838	2010-05-12 17:40:37	2010-05-12 18:10:37	1800	1798.39	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2061	29839	2010-05-12 18:10:46	2010-05-12 18:40:46	1800	1798.37	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2062	29840	2010-05-12 18:40:56	2010-05-12 19:10:56	1800	1798.39	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

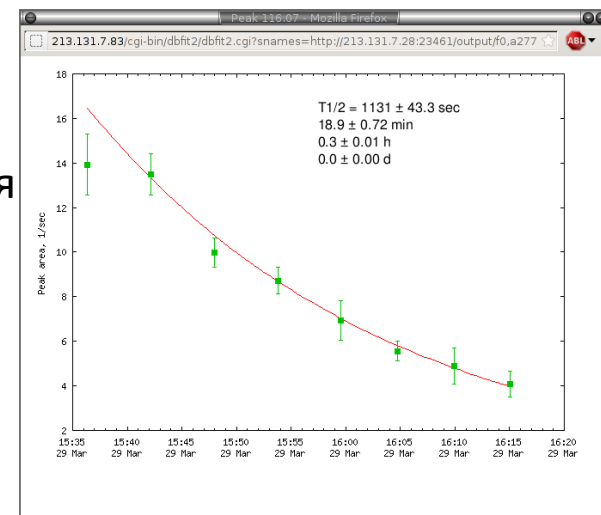
Сравнить спектры Анализ

Предназначена для автоматического набора и обработки в WEB большого количества спектров. БД содержит около 30 000 спектров.

Автоматический анализ спектров в БД

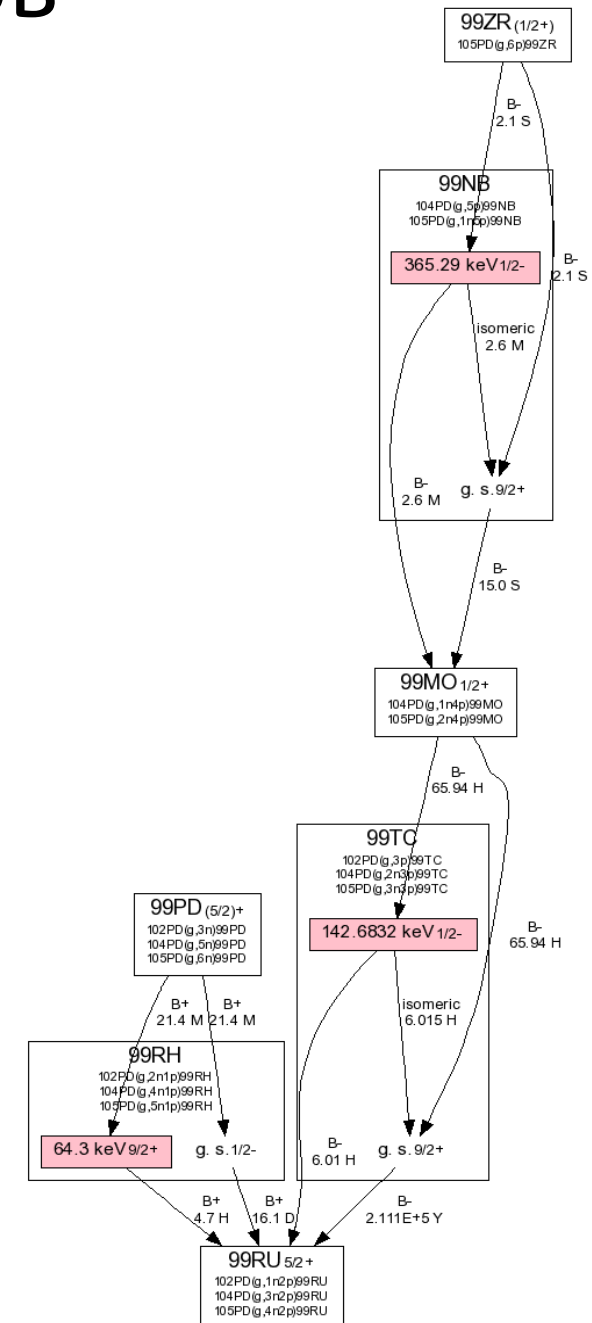


Поиск пиков в спектрах, построение кривых распада, идентификация изотопов по энергии пика и $T_{1/2}$.



Цепочки распадов

- При энергии облучения 55.5 МэВ возможно протекание реакций с вылетом до 6 нуклонов.
- Нестабильные продукты реакций образуют сложные цепочки последовательных распадов.
- Выходы реакций могут быть получены с использованием нелинейного МНК, что (а) является нестабильной процедурой, (б) не дает возможности определения ошибок.
- Если предварительно учтены нестатистические источники ошибок (TCS, ошибки табличных данных), то выходы могут быть найдены с использованием линейного МНК.
- Программа для расчета порогов реакций, построения цепочек распадов и моделирования накопления и распада продуктов облучения на основе ENSDF.



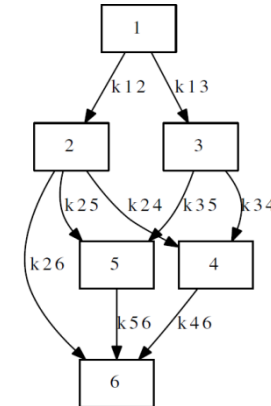
Определение выходов реакций на основе анализа цепочек распадов

Выход реакции по определению равен $y(E_e) = \frac{I_e}{e} n \int_0^{E_e} \sigma(E) \nu(E, E_e) dE$

где E_e — энергия электронов, $\nu(E, E_e)$ — спектр тормозных фотонов, I_e — ток пучка, а n — число ядер в облучаемой части мишени.

Образование и распад элементов цепочки подчиняется системе ОДУ:

$$\frac{dn_i}{dt} = \underbrace{y_i I_e(t) + \sum_j k_{ij}^j \lambda_j n_j}_{\text{накопление}} - \underbrace{\lambda_i n_i}_{\text{распад}}, \quad i = 1, \dots, N$$



где n_i — количество ядер данного типа (или в данном изомерном состоянии), y_i — выход реакции образования i -го ядра, λ_i — постоянные распада, k_{ij}^j — вероятность распада j -го ядра в i -е, $I_e(t)$ — ток ускорителя (если $t > T_{\text{обл}}$ (время облучения), $I_e(t) = 0$).

Можно показать, что решения системы относительно y_i образуют линейную модель:

$$n_i(t) = \sum_{j=1}^N a_j^i(t) y_j + c_i(t)$$

А вектор измерений x подчиняется линейной статистической модели:

$$Ex = Ay + \varepsilon$$

В случае распределения Пуассона эффективная оценка вектора выходов y и его дисперсии может быть получена с помощью МНК:

$$y^* = (A^T \Omega^{-1} A)^{-1} A^T \Omega^{-1} x,$$
$$Dy^* = (A^T \Omega^{-1} A)^{-1}$$

Поскольку ковариационная матрица площадей пиков не может быть измерена, можно применить один из приближенных методов:

1) $y_{FGLS}^* = (A^T \Omega^{-1*}_1 A)^{-1} A^T \Omega^{-1*}_1 x$, где $\Omega^{-1*}_1 = \text{diag}(1/(x_\alpha + 1))$

2) МНК с итерационным перевзвешиванием (iteratively reweighted LSQ)

$$y_{n+1}^* = (A^T \text{diag}(A y_n^*)^{-1} A)^{-1} A^T \text{diag}(A y_n^*)^{-1} x$$

Если данная итерационная процедура сходится, то ее предел является оценкой максимального правдоподобия y .

Полученный метод:

- позволяет определить выходы из кривых распада без аналитического решения системы дифференциальных уравнений, т.е. автоматически;
- позволяет получить асимптотически эффективную оценку выходов и ее дисперсию;
- не использует нелинейный МНК.

Результаты анализа

Энергия облучения 29.1 МэВ

Реакция	Относительный выход реакций		
	Эксперимент	TALYS [104]	Модель [67]
$^{102}\text{Pd} (\gamma, n) ^{101}\text{Pd}$	1.018(4)	1.0	0.89
$^{110}\text{Pd} (\gamma, n) ^{109}\text{Pd}$	1.000(4)	1.0	1.0
$^{102}\text{Pd} (\gamma, p) ^{101}\text{Rh}$	0.140(1)	0.12	0.11
$^{106}\text{Pd} (\gamma, p) ^{105}\text{Rh}$	0.0537(3)	0.0026	0.051
$^{108}\text{Pd} (\gamma, p) ^{107}\text{Rh}$	0.0427(3)	0.0011	0.034
$^{102}\text{Pd} (\gamma, 2n) ^{100}\text{Pd}$	0.171(8)	0.098	0.063

[67] Ишханов Б. С., Орлин В. Н. Полумикроскопическое описание дипольного гигантского резонанса // ЭЧАЯ. — 2007. — Т. 38, № 2. — С. 460–503.

[104] Koning A., Hilaire S., Duijvestijn M. Talys-1.0 / Ed. by O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge et al. — Nice, France : EDP Science, 2008. — P. 211 – 214.

Реакция	Относительный выход реакций		
	Эксперимент	TALYS [104]	Модель [67]
(γ, n)			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, n)^{101}\text{Pd} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 3n)^{101}\text{Pd}$	1.449(7)	1.1	1.1
$^{104}\text{Pd}(\gamma, n)^{103}\text{Pd} + 2.00$ $^{105}\text{Pd}(\gamma, 2n)^{103}\text{Pd}$	2.44(4)	1.4	1.1
$^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{m}}\text{Pd}$	0.1091(6)	0.04	
$^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{g.s.}}\text{Pd}$	0.891(6)	0.96	1
(γ, p)			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, p)^{101\text{m}}\text{Rh} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{101\text{m}}\text{Rh}$	0.17(2)	0.12	
$^{102}\text{Pd}(\gamma, p)^{101\text{g.s.}}\text{Rh} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{101\text{g.s.}}\text{Rh}$	0.125(1)	0.10	0.20
$^{105}\text{Pd}(\gamma, p)^{104\text{m}}\text{Rh} + 1.22$ $^{106}\text{Pd}(\gamma, np)^{104\text{m}}\text{Rh}$	0.0186(7)	0.0025	
$^{105}\text{Pd}(\gamma, p)^{104\text{g.s.}}\text{Rh} + 1.22$ $^{106}\text{Pd}(\gamma, np)^{104\text{g.s.}}\text{Rh}$		0.0067	0.086
$^{106}\text{Pd}(\gamma, p)^{105\text{m}}\text{Rh} + 0.97$ $^{108}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{105\text{m}}\text{Rh}$		0.00072	
$^{106}\text{Pd}(\gamma, p)^{105\text{g.s.}}\text{Rh} + 0.97$ $^{108}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{105\text{g.s.}}\text{Rh}$	0.0630(3)	0.0014	0.061
$^{108}\text{Pd}(\gamma, p)^{107}\text{Rh} + 0.44$ $^{110}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{107}\text{Rh}$	0.0455(2)	0.0025	0.049
$^{110}\text{Pd}(\gamma, p)^{109}\text{Rh}$	0.023(4)	0.0011	0.039
(γ, np)			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, np)^{100}\text{Rh} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)^{100}\text{Rh}$	0.0408(3)	0.052	0.052
$^{104}\text{Pd}(\gamma, np)^{102\text{m}}\text{Rh} + 2.00$ $^{105}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{102\text{m}}\text{Rh}$	0.0058(5)	0.0087	
$^{104}\text{Pd}(\gamma, np)^{102\text{g.s.}}\text{Rh} + 2.00$ $^{105}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{102\text{g.s.}}\text{Rh}$	0.0219(3)	0.036	0.027
$^{108}\text{Pd}(\gamma, np)^{106\text{m}}\text{Rh} + 0.44$ $^{110}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)^{106\text{m}}\text{Rh}$	0.00216(4)	0.00091	
$^{108}\text{Pd}(\gamma, np)^{106\text{g.s.}}\text{Rh} + 0.44$ $^{110}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)^{106\text{g.s.}}\text{Rh}$		0.0012	0.010
$^{110}\text{Pd}(\gamma, np)^{108\text{m}}\text{Rh}$	0.00112(4)		
$^{110}\text{Pd}(\gamma, np)^{108\text{g.s.}}\text{Rh}$		0.0012	0.0086
Остальные			
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n)^{100}\text{Pd} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 4n)^{100}\text{Pd}$	0.1652(8)	0.14	0.098
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 3n)^{99}\text{Pd} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 5n)^{99}\text{Pd}$	0.0059(1)	0.0032	0.0048
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{99\text{m}}\text{Rh} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 4n1p)^{99\text{m}}\text{Rh}$	0.0087(2)	0.0056	
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{99\text{g.s.}}\text{Rh} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 4n1p)^{99\text{g.s.}}\text{Rh}$	0.0064(3)	0.0047	0.0076
$^{102}\text{Pd}(\gamma, na)^{97}\text{Ru} + 10.92$ $^{104}\text{Pd}(\gamma, 5n1\alpha)^{97}\text{Ru}$	0.0049(8)	0.0018	1.3×10^{-6}
$^{105}\text{Pd}(\gamma, 2p)^{103}\text{Ru} + 1.22$ $^{106}\text{Pd}(\gamma, 1n2p)^{103}\text{Ru}$	$7.66(9) \times 10^{-4}$	6.9×10^{-6}	2.8×10^{-5}
$^{108}\text{Pd}(\gamma, 1n2p)^{105}\text{Ru} + 0.44$ $^{110}\text{Pd}(\gamma, 3n2p)^{105}\text{Ru}$	$1.5(1) \times 10^{-4}$	6.1×10^{-6}	1.6×10^{-6}

Фотонейтронные реакции

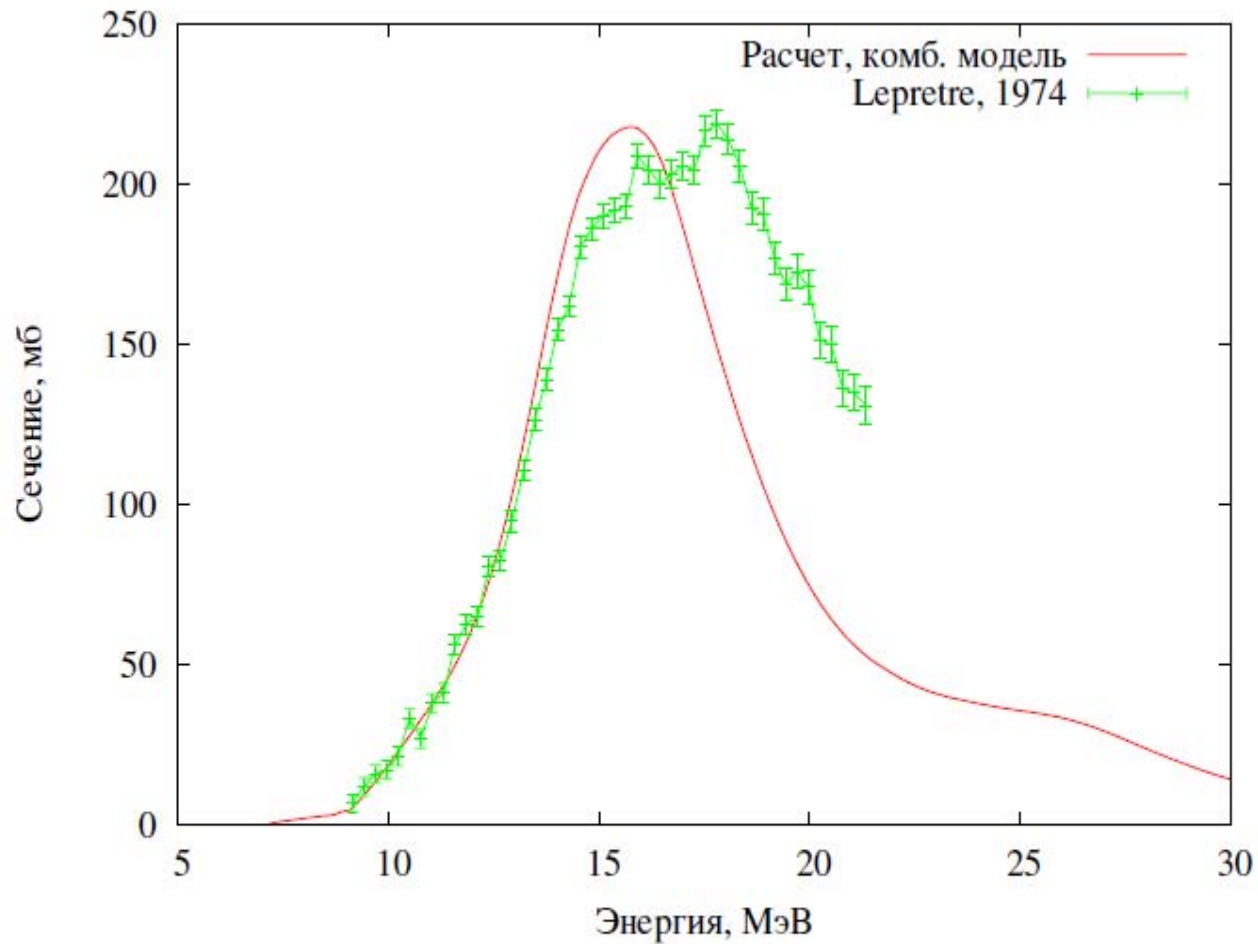


Рис. 56: Сравнение полных сечений фотонейтронных реакций, полученных в работе [23] и рассчитанных по модели [67].

Фотопротонные реакции

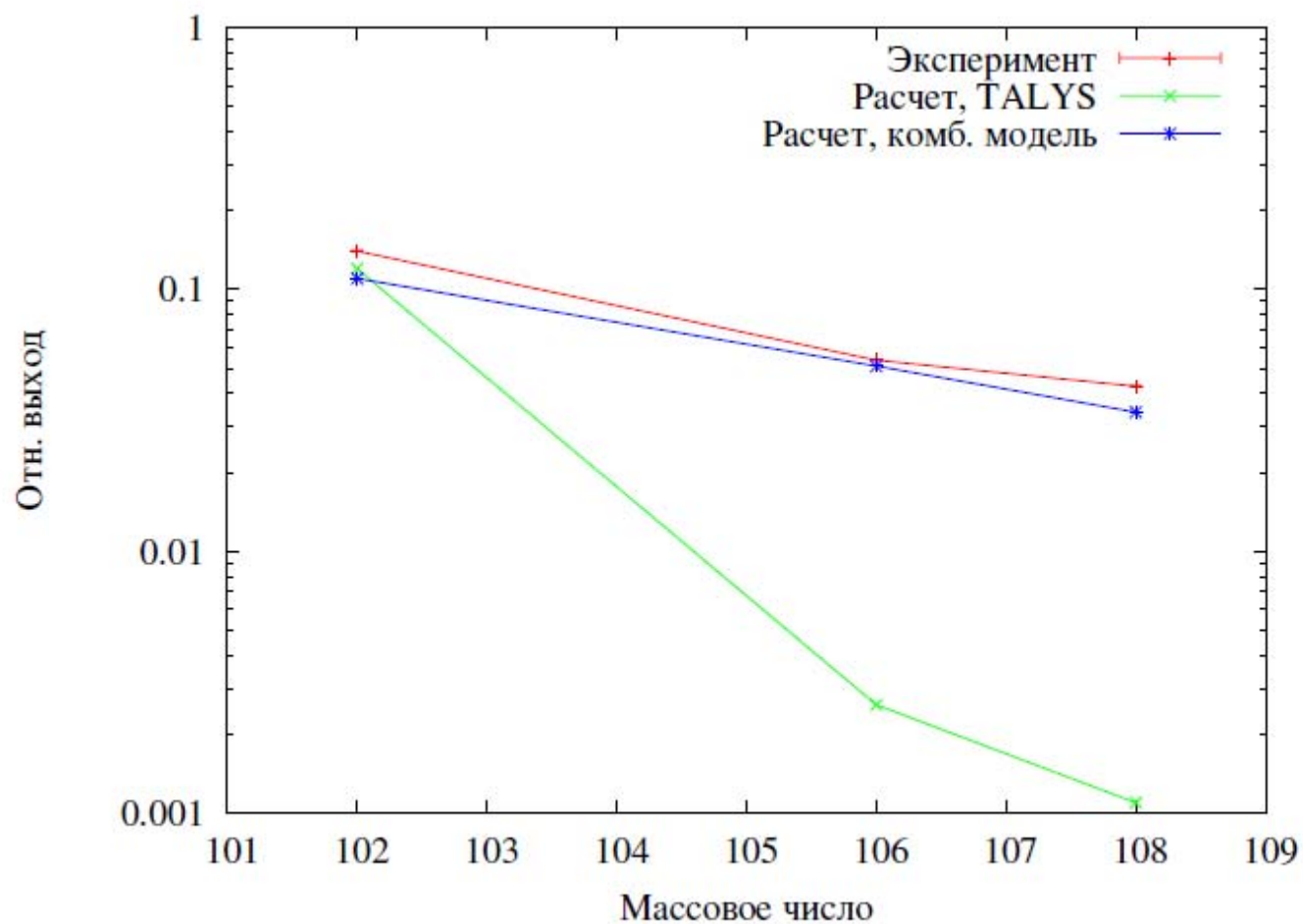


Рис. 58: Сравнение выходов фотопротонных реакций при энергии облучения 29.1 МэВ.

Фотопротонные реакции

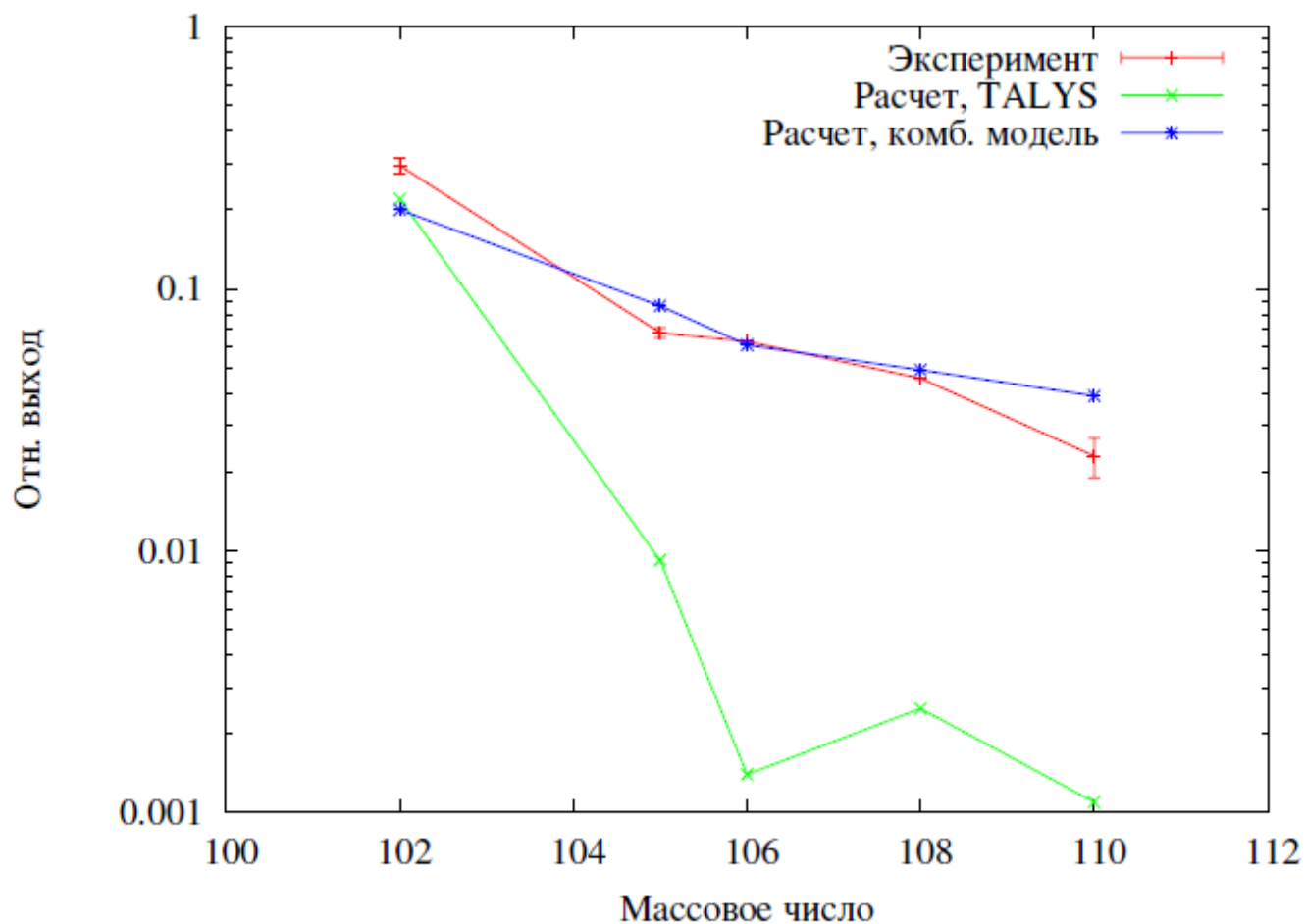
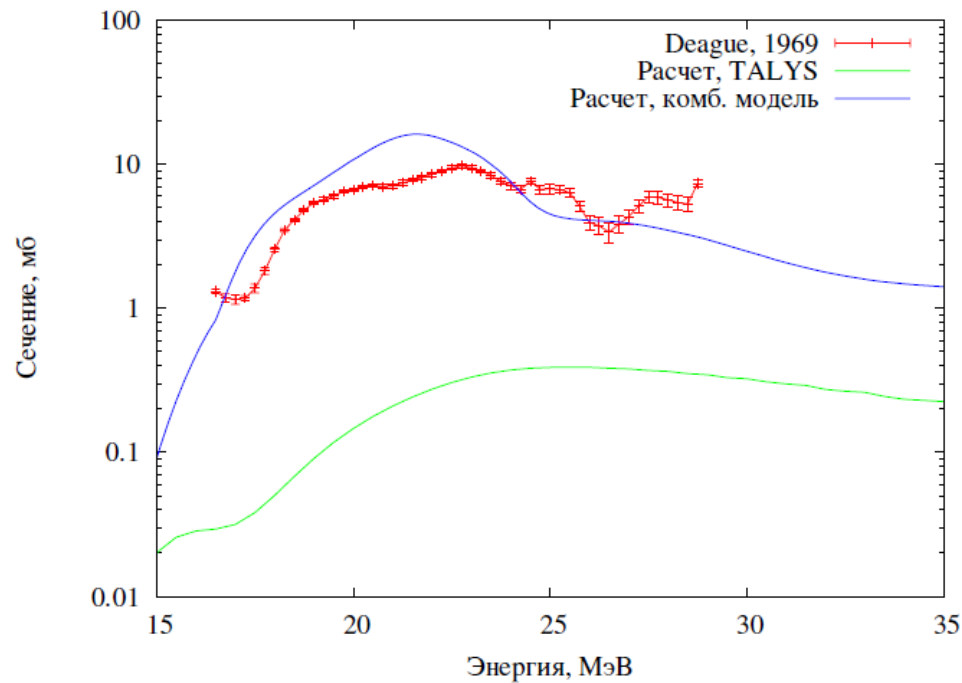


Рис. 57: Сравнение выходов фотопротонных реакций при энергии облучения 55.5 МэВ.

Фотопротонные реакции, влияние изоспинового расщепления на расчет сечения вылета протона



Реакция $^{108}\text{Pd}(\gamma, p)^{107}\text{Rh}$.

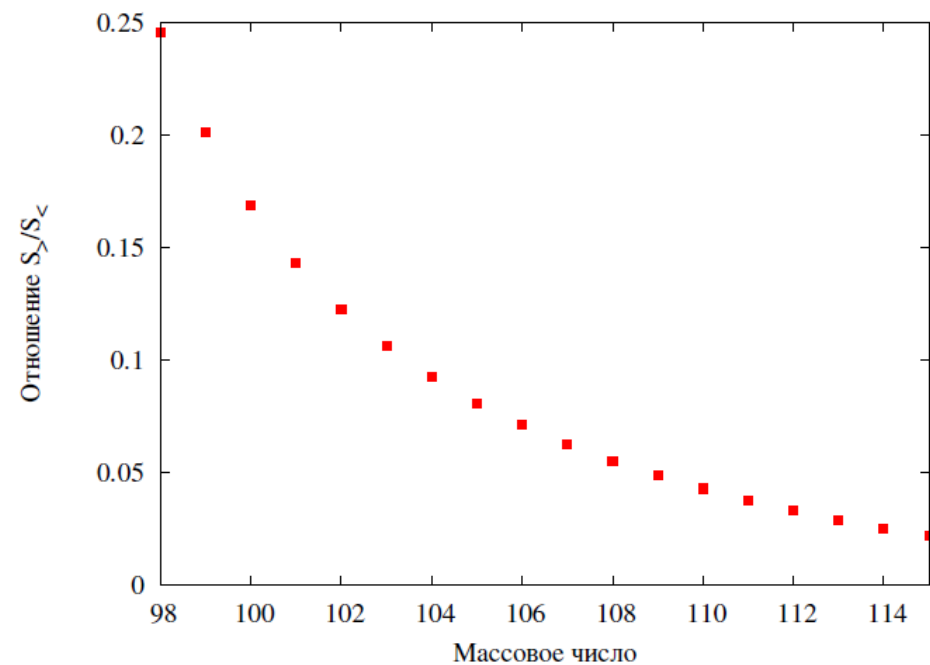


Рис. 59: Отношение сечений каналов ГДР $S_{>}/S_{<}$ [105].

$$\frac{\sigma_{>}}{\sigma_{<}} = \frac{1}{T_0} \frac{1 - 1.5T_0A^{-2/3}}{1 + 1.5A^{-2/3}}$$

Изомерные отношения

Таблица 35: Отношения выходов реакций с образованием изомерного состояния к основному состоянию $R = y_m/y_{g.s.}$. Спины и четности начальных ядер во всех случаях равны 0^+ .

Реакция	$J^P_{g.s.}$ (конеч. ядра)	Изомерное состояние (конеч. ядра)	29.1 МэВ		55.5 МэВ	
			R	R_{TALYS}	R	R_{TALYS}
$^{102}\text{Pd} (\gamma, p) ^{101}\text{Rh}$	$1/2^-$	157 кэВ, $J^P = 9/2^+$	0.49(1)	0.43 (1.1)	1.4(2)	0.44 (1.1)
$^{102}\text{Pd} (\gamma, 2n1p) ^{99}\text{Rh}$	$1/2^-$	64 кэВ, $J^P = 9/2^+$		0.46 (0.54)	1.4(1)	1.2 (1.2)
$^{104}\text{Pd} (\gamma, np) ^{102}\text{Rh}$	$(1^-, 2^-)$	141 кэВ, $J^P = 6^{(+)}$		0.056 (0.065)	0.26(2)	0.17 (0.15)
$^{110}\text{Pd} (\gamma, n) ^{109}\text{Pd}$	$5/2^+$	189 кэВ, $J^P = 11/2^-$	0.10(2)	0.05 (0.037)	0.099(5)	0.06 (0.039)

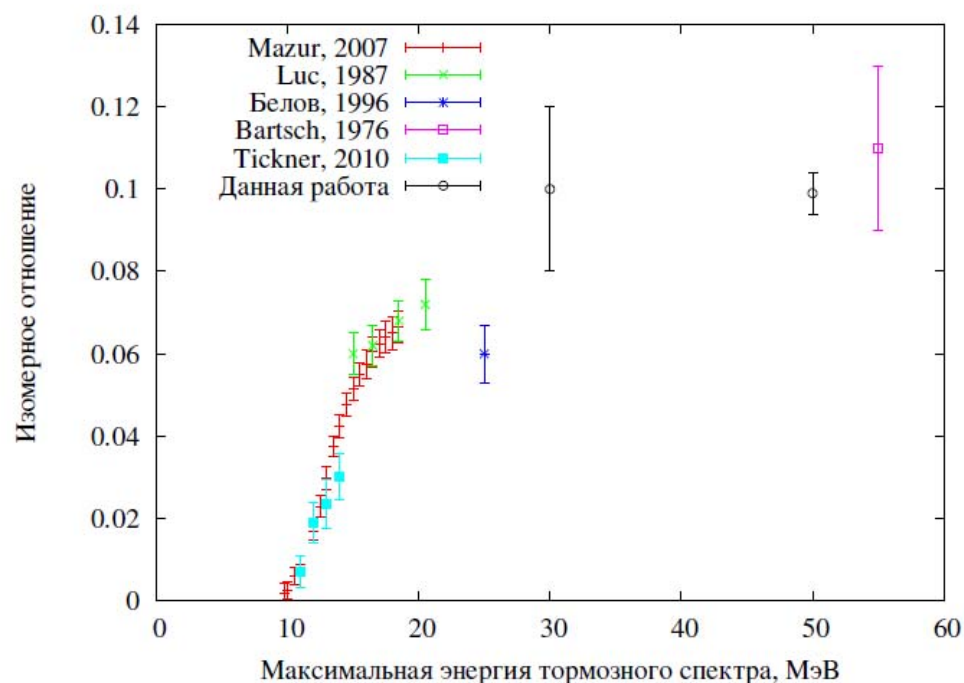
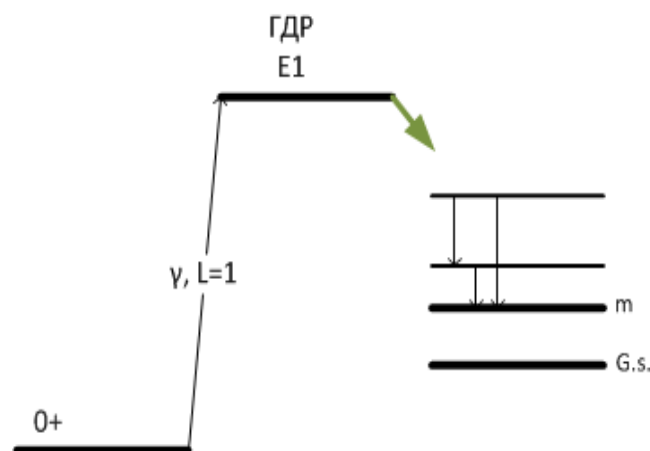
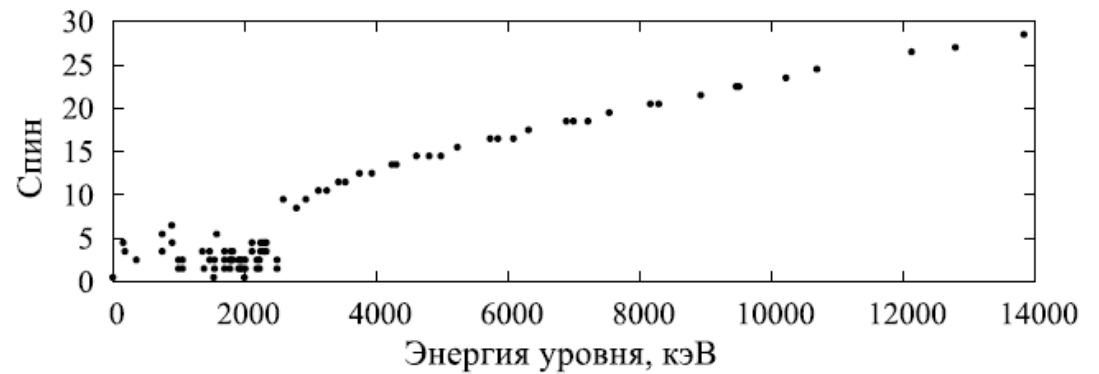
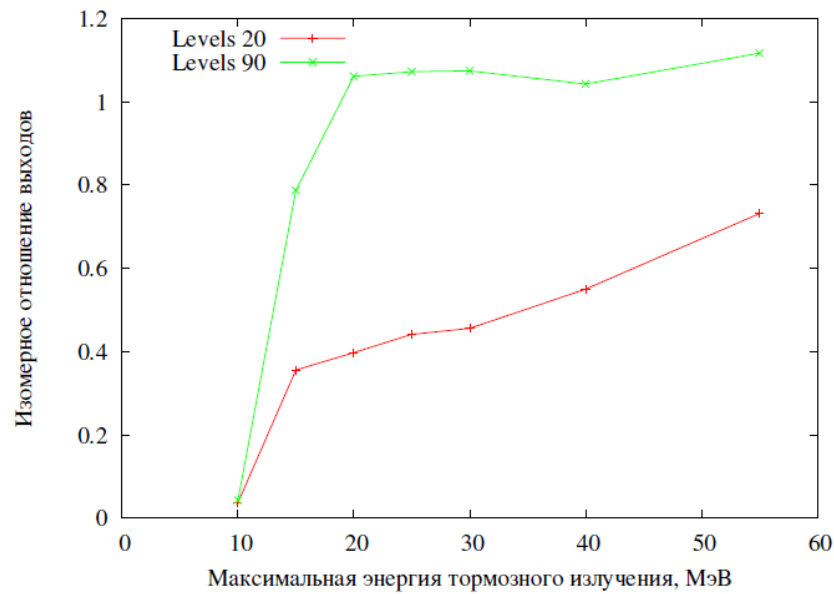


Рис. 65: Сравнение результатов измерения изомерного отношения в реакции $^{110}\text{Pd} (\gamma, n) ^{109}\text{Pd}$.

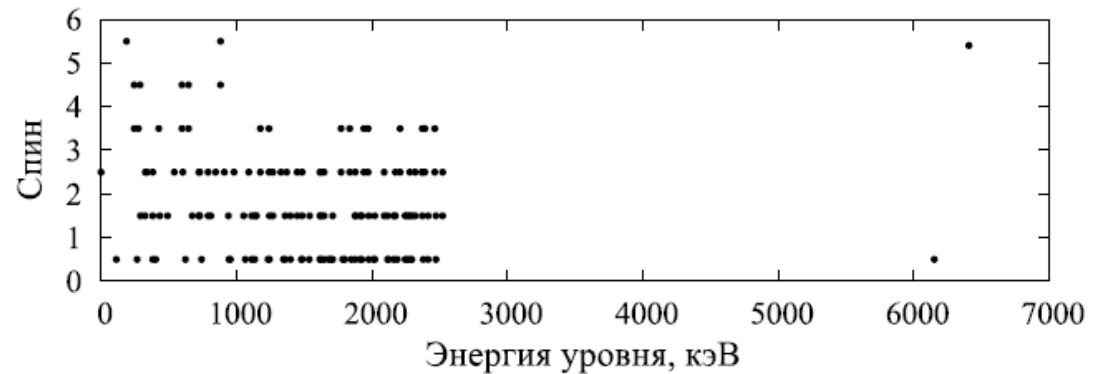
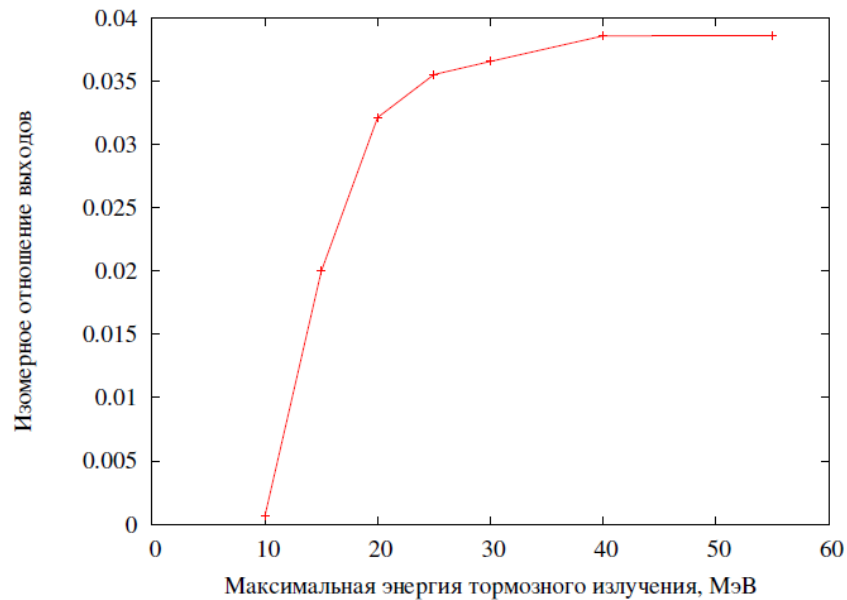
Изомерные отношения в TALYS

Реакция $^{102}\text{Pd}(\gamma, p)^{101}\text{Rh}$.



Параметры уровней конечного ядра из RIPL.

Реакция $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109}\text{Pd}$.



Заключение

- Создана система, позволяющая проводить эксперименты по методике наведенной активности, с помощью которой возможно проводить одновременное измерение выходов большого числа фотоядерных реакций, протекающих в немоноизотопной мишени во время облучения.
- Предложен метод, позволяющий получить асимптотически эффективные оценки выходов реакций и их дисперсии на основе анализа цепочек распадов в удобном для автоматизации виде.
- Проведены эксперименты по облучению мишени из природного палладия тормозным излучением с верхними энергиями спектра 29.1 и 55.5 МэВ и получены выходы фотоядерных реакций.
- Определены изомерные отношения выходов фотоядерных реакций на изотопах ^{102}Pd , ^{104}Pd и ^{110}Pd в области энергий выше гигантского дипольного резонанса.
- Метод, основанный на использовании современных ускорителей электронов с высокой интенсивностью и энергией пучка, созданные программы моделирования и планирования эксперимента и автоматическая система набора и анализа спектров и мониторинга эксперимента позволяют проводить измерение выходов фотоядерных реакций с вылетом нескольких нуклонов и образованием изотопов, удаленных от полосы бета-стабильности.
- Использованный метод позволяет одновременно получать относительные выходы реакций, отличающиеся на несколько порядков, что невозможно при прямом методе измерений.

Спасибо за внимание!