

# ФОТОНЕЙТРОННЫЕ РЕАКЦИИ НА ИЗОТОПАХ РЬ

А.А. Костюков, С.Ю. Трощев

Физический Факультет МГУ

E-mail: akostuckov@gmail.com

## Введение

Экспериментальные исследования фотоядерных реакций в области дипольного гигантского резонанса на изотопах РЬ проводятся в течение уже многих лет. В результате таких исследований хорошо исследованы одночастичные реакции ( $\gamma, n$ ), а также получены данные о сечениях реакций ( $\gamma, 2n$ ), тогда как реакции более высокой множественности остаются слабо исследованными.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования фотонейтронных реакций высокой множественности на изотопах РЬ. Для этого были измерены выходы фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов РЬ. В табл. 1 приведено содержание стабильных изотопов в естественной смеси РЬ, а также пороги фотоядерных реакций на них.

Табл. 1. Содержание изотопов РЬ в естественной смеси  $n$ , и пороги фотонейтронных реакций на них.

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

## Методика эксперимента

Измерение выходов реакций проводилось по гамма-активационной методике. Пучок электронов с энергией  $E^{\max}=67,7$  МэВ из ускорителя электронов RTM-70 [1] попадал на вольфрамовую тормозную мишень толщиной 2,5 мм. В тормозной мишени генерировалось тормозное излучение с непрерывным спектром с верхней границей, равной энергии электронов. Непосредственно за тормозной мишенью располагался образец РЬ. Под действием тормозного пучка в нем происходили фотоядерные реакции с вылетом до 8 нуклонов. В результате таких реакций образовывались радиоактивные изотопы и метастабильные состояния. Облучение продолжалось в течение 3 часов.

После окончания облучения активированный образец РЬ помещался к детектору из сверхчистого германия [2] для измерения спектра остаточной активности. Чтобы получить информацию о выходах реакций с образованием изотопов со временем жизни от нескольких минут до нескольких лет, было произведено два измерения: первое в течение 5 дней сразу после облучения и второе в течение 7 дней через месяц после облучения.

В спектрах остаточной активности выделялись максимумы, соответствующие распадам нестабильных изотопов. Идентификация максимумов проводилась по их энергии и времени жизни в спектрах. Пример измеренного спектра приведен на рис. 1.

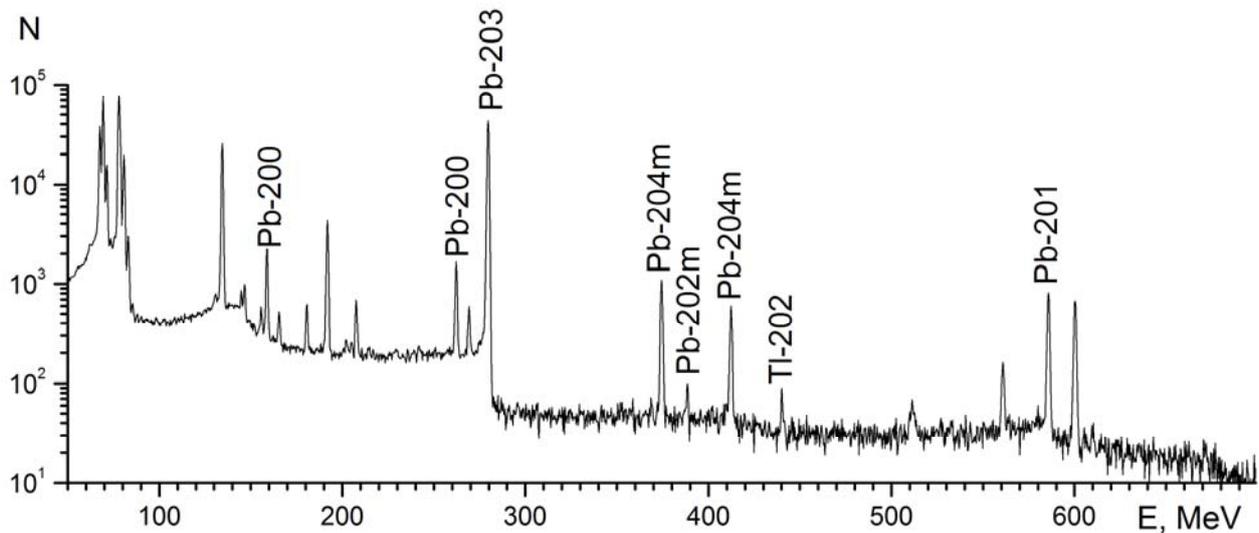


Рис. 1. Спектр остаточной активности образца Pb, измеренный через час после облучения. Измерение длилось 10 минут. Указаны продукты фотоядерных реакций на изотопах Pb, распад которых сопровождается испусканием гамма-квантов с энергиями, соответствующими положению отмеченных максимумов в спектре.

Выход реакции  $Y(E^{\max})$ , связанный с тормозным спектром  $W(E, E^{\max})$  и сечением реакции  $\sigma(E)$  соотношением

$$Y(E^{\max}) = \int_0^{E^{\max}} \sigma(E) W(E, E^{\max}) dE, \quad (1)$$

рассчитывался по формуле

$$Y(E^{\max}) = \frac{\lambda \cdot A}{n \cdot \varepsilon \cdot I (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада образующегося ядра,  $n$  – процентное содержание исходных ядер в естественной смеси изотопов Pb,  $\varepsilon$  – эффективность регистрации германиевым детектором соответствующей гамма-линии в спектре остаточной активности образовавшихся изотопов,  $t_1$  – время облучения,  $t_2$  – время между концом облучения и началом измерения спектра,  $t_3$  – продолжительность измерения спектра,  $A$  – количество отсчетов детектора, соответствующих выбранной гамма-линии спектра остаточной активности образца Pb.  $I$  – интенсивность линий в спектре гамма-квантов дочерних ядер, образующихся при бета-распадах продуктов реакций. При расчетах использовались интенсивности гамма-переходов [3], рассчитанные при помощи интерфейса [4]. При нахождении выходов учитывалось самопоглощение в образце Pb, рассчитанное при помощи библиотек GEANT4 [5].

Особенностью исследования фотоядерных реакций высокой множественности на естественной смеси изотопов Pb является возможность образования легких ( $A < 208$ ) изотопов в результате реакций различной

множественности на различных стабильных изотопах Pb. Однако ситуация разрешается за счет того, что все изотопы с  $A < 204$  образуются преимущественно за счет фотонейтронных реакций на  $^{204}\text{Pb}$ , так образование тех же изотопов требует реакций более высокой (на два и более) множественности на  $^{206-208}\text{Pb}$ , а выходы таких реакций намного меньше. Расчеты, подтверждающие это, приведены в разделе «обсуждение результатов».

Выходы всех ядер с  $A < 204$  рассчитаны в предположении, что они целиком образовывались в результате фотоядерных реакций на  $^{204}\text{Pb}$ . Выход реакции  $^{206}\text{Pb}(\gamma, 2n)^{204\text{m}}\text{Pb}$  рассчитан в предположении, что изотоп  $^{204\text{m}}\text{Pb}$  образуется только в ходе этой реакции.

Измеренные выходы фотоядерных реакций на изотопах Pb были нормированы на выход реакции  $^{204}\text{Pb}(\gamma, n)^{203}\text{Pb}$ . Нормированные выходы приведены в табл. 2. Точность эксперимента по нашим оценкам составляет 20%.

Табл. 2. Измеренные нормированные выходы фотоядерных реакций на изотопах Pb. Указаны спины и четности  $J_f^P$  продуктов реакций.

Ядро	Реакция	Продукт реакции	$J_f^P$	Выход
$^{204}\text{Pb}$	$(\gamma, n)$	$^{203}\text{Pb}$	5/2-	1
$^{204}\text{Pb}$	$(\gamma, 2n)$	$^{202\text{m}}\text{Pb}$	9-	0,01
$^{204}\text{Pb}$	$(\gamma, 3n)$	$^{201}\text{Pb}$	5/2-	0,056
$^{204}\text{Pb}$	$(\gamma, 4n)$	$^{200}\text{Pb}$	0+	0,011
$^{204}\text{Pb}$	$(\gamma, 1n1p)$	$^{202}\text{Tl}$	0+	0,022
$^{206}\text{Pb}$	$(\gamma, 2n)$	$^{204\text{m}}\text{Pb}$	9-	0,00033

### Обсуждение результатов

Образование изотопов  $^{205}\text{Pb}$  и  $^{202\text{g.s.}}\text{Pb}$  не наблюдалось, так как они не могут быть зарегистрированы в гамма-активационном эксперименте из-за отсутствия гамма-квантов при их распаде. Фотопротонные реакции (кроме  $^{204}\text{Pb}(\gamma, 1n1p)^{202}\text{Tl}$ ) на изотопах Pb не наблюдались.

Эксперимент показывает, что с увеличением множественности реакции на единицу, выход ее понижается в 4-6 раз. Это изменение обусловлено уменьшением величины сечения, сдвигом положения максимума сечения в область более высоких энергий, уменьшением числа фотонов в тормозном спектре с увеличением энергии и изменением ширины сечения.

Мы проанализировали экспериментальные данные о сечениях фотоядерных реакций на изотопах  $^{206-208}\text{Pb}$ , а также на естественной смеси изотопов Pb, полученные на пучках квазимонохроматических фотонов [6,7]. Сечения изображены на рис. 2, а основные параметры этих сечений, а также сечения фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов Pb [8] приведены в табл. 3. Сечения фотоядерных реакций в области дипольного гигантского резонанса на изотопе  $^{204}\text{Pb}$  не измерены.

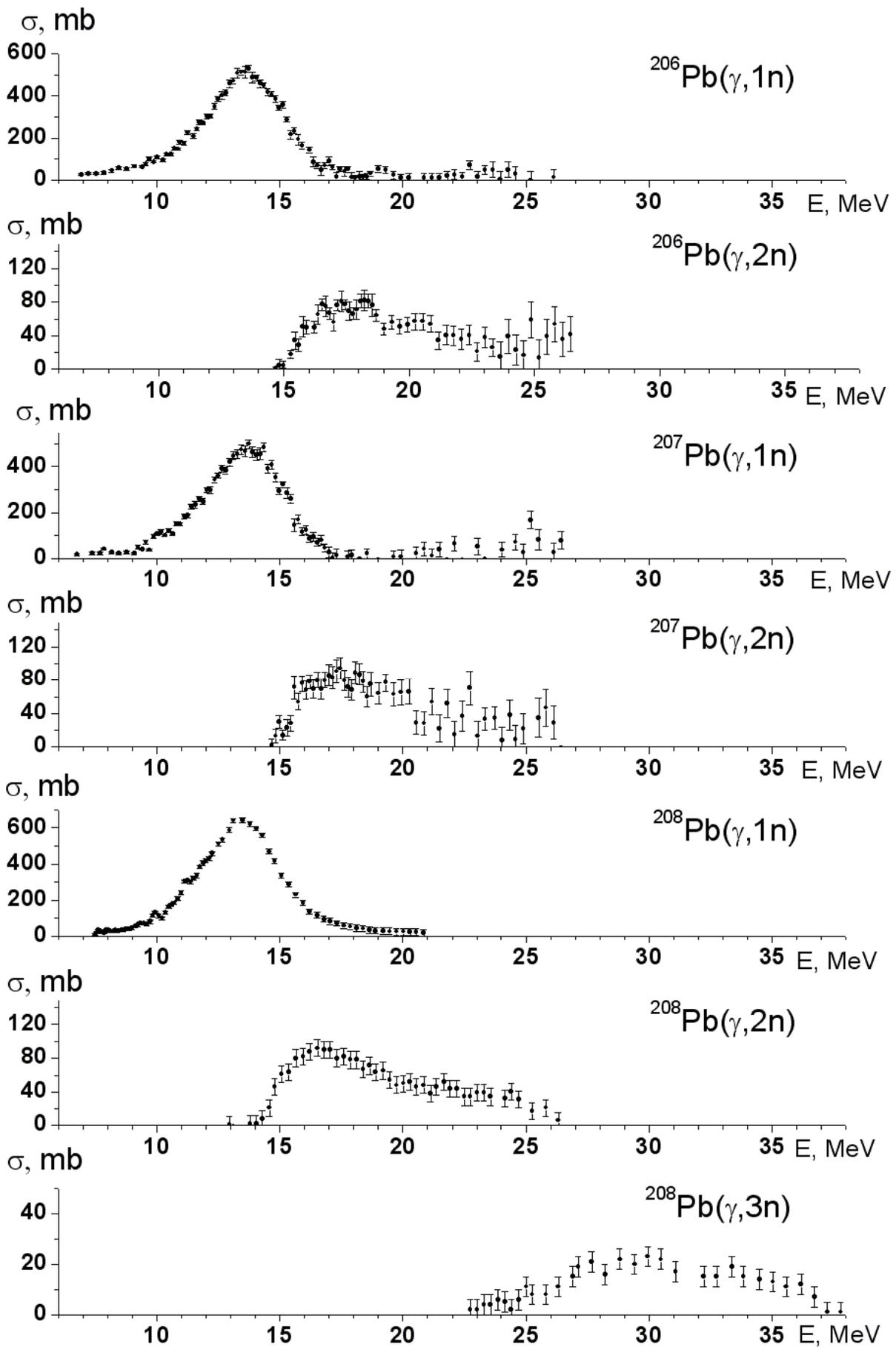


Рис. 2. Экспериментально измеренные парциальные сечения фотоядерных реакций на изотопах  $^{206,207,208}\text{Pb}$  [6,7].

Табл. 3. Экспериментально измеренные [6,7,8] положения максимумов сечений  $E_{\max}$ , величины сечений в максимумах  $\sigma_{\max}$ , полуширины сечений  $\Gamma$  и интегральные сечения  $\sigma_{\text{int}}$  фотоядерных реакций на изотопах Pb, а также на естественной смеси изотопов Pb.

Изотоп	Реакция	$E_{\max}$ , МэВ	$\sigma_{\max}$ , мб	$\Gamma$ , МэВ	$\sigma_{\text{int}}$ , МэВ·мб	Работа
$^{206}\text{Pb}$	$(\gamma, n)$	13,74	529	4	2220	[6]
$^{207}\text{Pb}$		13,74	500	4	2050	[6]
$^{208}\text{Pb}$		13,50	645	3,5	2731	[7]
Смесь изотопов		13,50	613	3,8	1909	[8]
$^{206}\text{Pb}$	$(\gamma, 2n)$	18,23	82	8	560	[6]
$^{207}\text{Pb}$		17,46	94	8	600	[6]
$^{208}\text{Pb}$		16,53	92	8	613	[7]
Смесь изотопов		16,85	94		145	[8]
$^{208}\text{Pb}$	$(\gamma, 3n)$	29,95	23	11	197	[7]

Из табл. 3 видно, что положение максимума сечения реакции  $(\gamma, n)$  с увеличением массового числа  $A$  незначительно смещается в область более низких энергий. Смещение максимума реакции  $(\gamma, 2n)$  более заметно. Полуширина сечения реакции  $(\gamma, 2n)$  по данным [6,7] составляет 8 МэВ и в два раза превышает полуширину сечения  $(\gamma, n)$ . Полуширина ДГР минимальна на дважды магическом ядре  $^{208}\text{Pb}$ .

В работе [8] измерены сечения реакций в узком диапазоне энергий – от 12 до 17 МэВ, поэтому интегральные сечения значительно меньше, чем в работах [6,7], а полуширина сечения реакции  $(\gamma, 2n)$  не может быть надежно определена.

На основе экспериментальных данных мы вычислили выходы фотоядерных реакций на стабильных изотопах Pb под действием тормозного пучка с максимальной энергией  $E^{\max}=67,7$  МэВ. Для этого парциальные сечения фотоядерных реакций  $\sigma_{\text{exp}}(E)$  [6,7] были свернуты с тормозным спектром  $W_{\text{calc}}(E, E^{\max})$ , полученным при помощи GEANT4 [5]:

$$Y(E^{\max}) = \int_0^{E^{\max}} \sigma_{\text{exp}}(E) W_{\text{calc}}(E, E^{\max}) dE.$$

Полученные таким образом выходы, нормированные на выход реакции  $^{208}\text{Pb}(\gamma, n)^{207}\text{Pb}$ , приведены в табл. 4.

Табл. 4. Выходы фотоядерных реакций на изотопах Pb, рассчитанные на основе экспериментальных данных [6,7].

Ядро	Реакция	Выход	Работа
$^{206}\text{Pb}$	$(\gamma, n)$	0,84	[6]
$^{207}\text{Pb}$		0,74	[6]
$^{208}\text{Pb}$		1	[7]
$^{206}\text{Pb}$	$(\gamma, 2n)$	0,10	[6]
$^{207}\text{Pb}$		0,11	[6]
$^{208}\text{Pb}$		0,13	[7]
$^{208}\text{Pb}$	$(\gamma, 3n)$	0,02	[7]

Соотношения выходов реакций  $(\gamma,3n)$ ,  $(\gamma,2n)$  и  $(\gamma,n)$ , приведенные в табл. 4, полностью подтверждают наше предположение о том, что в образовании изотопов Pb с  $A < 204$  доминируют реакции на изотопе  $^{204}\text{Pb}$ .

К сожалению, из-за отсутствия экспериментально измеренных сечений реакций на изотопе  $^{204}\text{Pb}$  невозможно прямое сравнение наших данных с другими экспериментами. Однако можно утверждать, что в целом соотношение выходов реакций различной множественности совпадает с измеренным нами.

### Заключение

В работе впервые измерены выходы фотоядерных реакций с вылетом до 4 нуклонов на изотопе  $^{204}\text{Pb}$  и выход реакции  $^{206}\text{Pb}(\gamma,2n)^{204\text{m}}\text{Pb}$  под действием тормозного пучка фотонов с максимальной энергией 67,7 МэВ в предположении, что все изотопы Pb с  $A < 204$  образуются в результате реакций на  $^{204}\text{Pb}$ . Это предположение подтверждается расчетом выходов фотоядерных реакций различной множественности на изотопах Pb, основанным на экспериментальных данных [6,7,8].

- 
1. V.I. Shvedunov, A.N. Ermakov, I.V. Gribov // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Research A. 2005. V. 550. P. 39.
  2. С.Ю. Трошиев // Труды X межвузовской научной школы молодых специалистов «концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Москва. КДУ, 2009. С. 174.
  3. Jagdish K. Tuli. Nuclear wallet cards. National Nuclear Data Center (<http://www.nndc.bnl.gov/>)
  4. LUNDS homepage <http://ie.lbl.gov/toi/>
  5. S. Agostinelli et al. // Nuclear Instruments and Methods A. 2003. V. 506. P. 250.
  6. R.R. Harvey, J.T. Caldwell, R.L. Bramblett, S.C. Fultz // Phys. Rev. 1964. V. 136. P. B126.
  7. A. Veysiere, H. Beil, R. Bergere, P. Carlos, A. Lepretre // Nucl. Phys. A. 1970. V. 159. P. 561.
  8. B.L.Berman, R.E.Pywell, S.S.Dietrich, M.N.Thompson, K.G.McNeill, J.W.Jury // Phys.Rev. C. 1987. V. 36. P. 1286.