

Фотоядерные реакции на изотопах кальция

Аспирант Юсюк Д.А., ст. науч. сотр. Желтоножская М.В.,
зав. каф. ускорителей и радиационной медицины Черняев А.П.

Исследование фотоядерных реакций представляет большой интерес для исследований структуры ядра, построения моделей протекания ядерных реакций, определения возможности практического использования для наработки разнообразных медицинских изотопов. Использование гамма-активационного анализа для исследования конструкционных материалов атомных электростанций при выводе из эксплуатации так же задействует данные о сечениях фотоядерных реакций.

Природный кальций представляет собой смесь из шести изотопов: пяти стабильных ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca , ^{46}Ca и одного нестабильного ^{48}Ca с периодом полураспада $T_{1/2}=5,6 \cdot 10^{19}$ лет. На сегодняшний день имеющиеся данные о фотоядерных реакциях представлены преимущественно реакциями на изотопе ^{40}Ca , имеются данные, полученные с применением программного кода EMPIRE, а также TALYS с использованием различных моделей атомного ядра. Небольшой объём данных о сечениях фотоядерных реакций на изотопах кальция делает подобное исследование перспективным.

Был проведён предварительный анализ разнообразных фотоядерных реакций, протекающих на каждом из шести изотопов природного кальция, значений их пороговых энергий, периодов полураспада продуктов и квантовых выходов с целью определения ожидаемых продуктов в спектрах остаточной активности.

Анализ продуктов фотоядерных реакций на изотопах природного кальция

Ca40 (распространённость 96,941%)				
Реакция	T1/2	Iy, %	Ey, кэВ	Епороговая, МэВ
(y,n)Ca39	859.6 ms	0.0023	2522.4	15,635
(y,p)K39	stable			8,328
(y,2n)Ca38	440 ms	2.6	328.3	28,93
		21.0	1567.9	
(y, p+n)K38	7.636 m	99.858	2167.405	19,181
(y,2p)Ar38	stable			14,71
(y,p+2n)K37	1.226 s	1.8	2796.0	25
(y, 2p+n)Ar37	35.04 d	5.6	2.622	18,83
(y,3p)Cl37	stable			24,95

Табл. 1. Продукты реакций на Ca40

Ca44 (распространённость 2,086%)				
Реакция	T1/2	Iy, %	Ey, кэВ	Епороговая, МэВ
(y,n)Ca43	stable			11,13
(y,p)K43	22.3 h	87.0	372.760	12,18
		79.2	617.490	
		11.85	396.861	
		11.26	593.390	
(y,2n)Ca42	stable			19,064
(y, p+n)K42	12.360 h	18.0	1524.70	19,582
		0.336	312.6	
(y,2p)Ar42	32.9 y b-			21,62
(y,3n)Ca41	1.03E+5 y	3.9	3.311	30,55
		7.8	3.314	
(y, p+2n)K41	stable			20,859
(y,2p+n)Ar41	109.34 m	99.1	1293.587	23,33
		0.052	1677.198	
(y,4n)Ca40	stable			38,91

Табл. 3. Продукты реакций на Ca44

Ca48 (распространённость 0,187%)				
Реакция	T1/2	Iy, %	Ey, кэВ	Епороговая, МэВ
(y,n)Ca47	4.536 d	71.0	1297.09	9,95
		6.2	489.23	
		6.2	807.86	
(y,p)K47	17.50 s	93.0	2013.50	15,8
		79.7	586.01	
		13.27	564.79	
		5.60	2578.26	
(y,2n)Ca46	stable			17,23
(y, p+n)K46	105 s	100.0	1346.0	21,94
		6.4	1228.7	
		3.5	1675.0	
		2.2	3020.0	
(y,3n)Ca45	162.61 d b-			27,63
(y,p+2n)K45	17.3 m	74.4	174.276	22,56
		8.0	957.59	
		8.0	1260.53	
		53.0	1705.6	
		4.2	1434.59	
(y, 4n)Ca44	stable			35,04

Табл. 3. Продукты реакций на Ca48

В работе производится изучение фотоядерных реакций на изотопах ^{43}Ca , ^{44}Ca и ^{48}Ca , так как пороговые значения энергий фотоядерных реакций с вылетом как заряженных, так и нейтральных частиц являются относительно низкими, продукты имеют каналы распада с испусканием гамма-излучения и оптимальный период полураспада для регистрации на полупроводниковом спектрометре. Реакция $^{40}\text{Ca}(\gamma, n)^{39}\text{Ca}$ не рассматривается ввиду небольшого периода полураспада продукта (859,6 мс), который не позволяет идентифицировать её в спектре остаточной активности. Рассматриваются реакции $^{43}\text{Ca}(\gamma, p)^{42}\text{K}$ ($E_{\text{пор.}}=10,7$ МэВ), $^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$ ($E_{\text{пор.}}=12$ МэВ), $^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$ ($E_{\text{пор.}}=10$ МэВ). Периоды полураспада, поправки на схему распада, а также энергии испускаемых гамма-квантов продуктов описанных выше реакций представлены в таблице 3:

Материнский изотоп ^{43}Ca (распространённость 0,135%)				
Продукт	T1/2	I γ , %	E γ , кэВ	Епороговая, МэВ
^{42}K	12.360 h	18.0	1524.70	10,68
		0.336	312.6	
Материнский изотоп ^{44}Ca (распространённость 2,086%)				
^{43}K	22.3 h	87.0	372.760	12,18
		79.2	617.490	
		11.85	396.861	
		11.26	593.390	
Материнский изотоп ^{48}Ca (распространённость 0,187%)				
^{47}Ca	4.536 d	71.0	1297.09	9,95
		6.2	489.23	
		6.2	807.86	

Табл. 4. Характеристики продуктов рассматриваемых реакций

Описание эксперимента

Было проведено облучение потоком тормозных фотонов мишени массой 5,36 г из хлорида кальция CaCl_2 .

Для контроля потока совместно с мишенью из кальция облучалась мониторинговая мишень из тантала (пластинка массой 1,84 г, вырезанная по форме чашке Петри, в которую были насыпаны кристаллы хлорида кальция).



Рис.1 Сборка облучаемых мишеней

Облучение проводилось на медицинском ускорителе электронов Varian Trilogy с энергией электронов 20 МэВ в течение 33 минут.

Оценка плотности потока тормозных фотонов

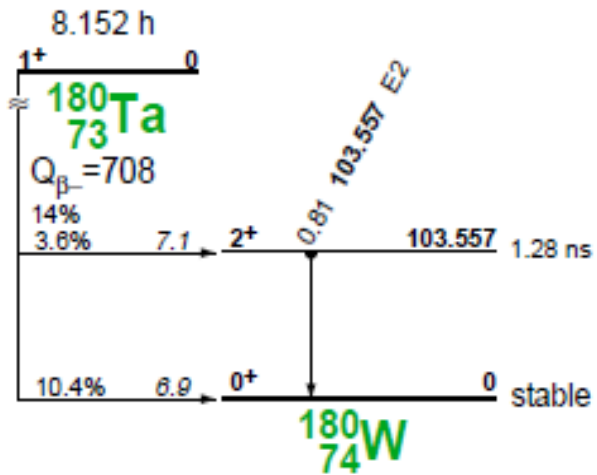


Рис. 2. Схема распада Ta-180 [1]

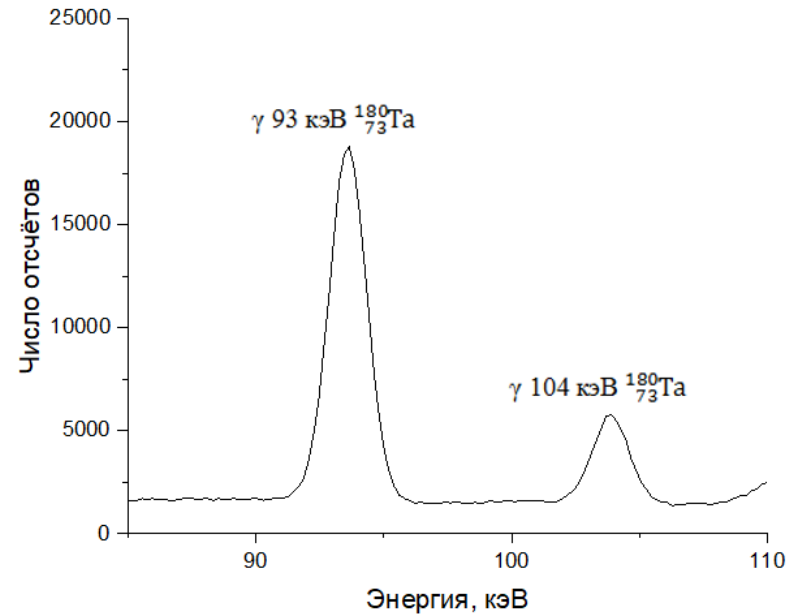


Рис. 3. Фрагмент спектра остаточной активности облученной мишени тантала

Оценка плотности потока тормозных фотонов

$$\Phi = \frac{N_t \lambda M}{\eta \epsilon m N_a (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) \sigma^{\text{эфф}} k_{\text{самопогл}}}$$

$$\sigma^{\text{эфф}} = \frac{\int_{E_{\text{пор}}}^{E_0} \sigma(E) \Phi(E_0, E) dE}{\int_{E_{\text{пор}}}^{E_0} \Phi(E_0, E) dE}$$

Распределение числа тормозных фотонов для ускорителя Varian Trilogy было получено с применением программного пакета Geant4

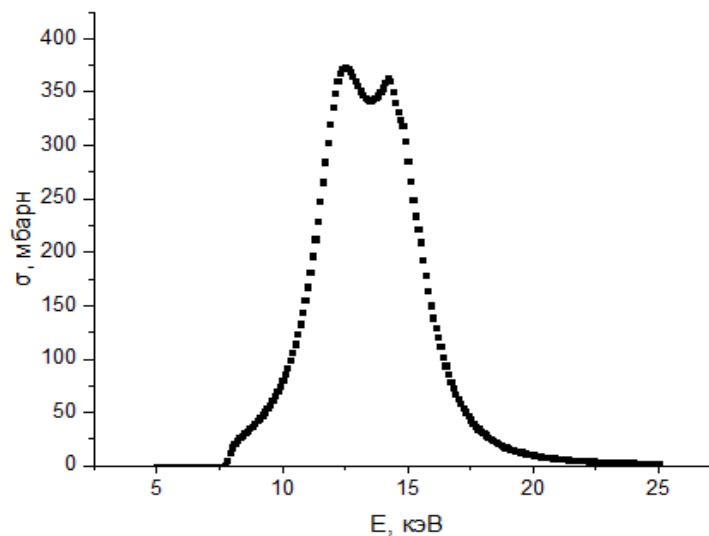


Рис. 4. Зависимость сечения от энергии для мониторинговой реакции (TALYS)

Оценка выходов фотоядерных реакций

$$Y = \frac{N_t \lambda M}{\eta \varepsilon m N_a (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) \Phi}$$

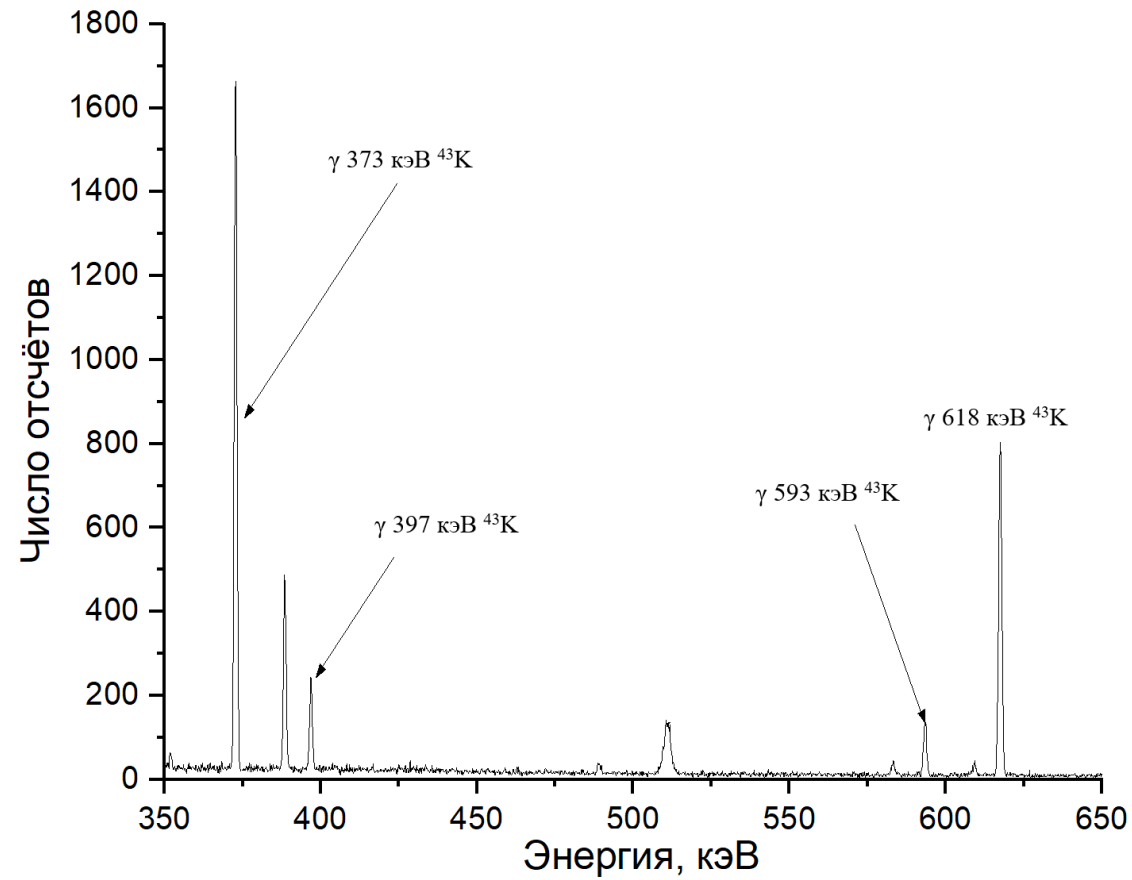


Рис. 5. Фрагмент спектра наведённой активности облученного природного кальция

Оценка выходов фотоядерных реакций

Были измерены и обработаны спектры наведённой активности, образующиеся при облучении сборки мишеней из естественных кальция и тантала. В ходе их обработки были получены экспериментальные значения выходов рассматриваемых реакций, также был проведён расчёт значений соответствующих им эффективных сечений с использованием программного пакета TALYS (модель Ферми-газа). Данные представлены в таблице 4:

Реакция	Υ , мбарн	$\sigma_{\text{эфф}}$, мбарн
$^{43}\text{Ca}(\gamma, p)^{42}\text{K}$	$1,67 \pm 0,14$	1,5
$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$	$3,36 \pm 0,25$	0,7
$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$	$13,0 \pm 0,9$	12,8

Табл. 5. Экспериментальные значения выходов реакций и эффективные сечения, полученные с помощью программного пакета TALYS

Спасибо за внимание!