

УДК 539.172

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ФОТООБРАЗОВАНИЯ ^{24}Na И ^{18}F ИЗ МИШЕНЕЙ Al , Si И S С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ПУЧКА ФОТОНОВ

Е. О. ГРИГОРЯН, А. Г. ХУДАВЕРДЯН

Ереванский государственный университет

А. П. БЕЗВЕРХАЯ, Н. А. ДЕМЕХИНА

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 25 апреля 1984 г.)

Измерены выходы ^{24}Na и ^{18}F в реакциях фоторасщепления Al , Si и S квазимонохроматическим тормозным излучением, полученным при торможении электронов, ускоренных до энергии 3,75 ГэВ, на монокристалле алмаза. Разработана сравнительно простая методика вычисления сечений реакций фоторасщепления путем последовательного вычитания выходов, измеренных при облучении квазимонохроматическими и некогерентными пучками при различных ориентациях и разориентированном положении кристалла алмаза.

Введение

В настоящее время исследование фотоядерных реакций в области высоких энергий проводится в основном с тормозным фотонным спектром, в котором энергия фотонов простирается от нулевого значения до максимального значения, практически совпадающего с энергией ускоренных электронов. В силу непрерывного характера спектра на эксперименте измеряется не сечение, а выход реакции, представляющий собой интегральный эффект процесса, нормированный на единицу энергии взаимодействующего пучка. Использование непрерывного спектра особенно неудобно в экспериментах, когда продукты реакции кинематически не выделяются. Выходы реакции обычно нормируются на один эквивалентный квант. Полное число эквивалентных квантов в спектре с точностью до постоянной определяется так

$$Q = \frac{\int_0^{E_{\max}} N(E, E_{\max}) E dE}{E_{\max}},$$

где $N(E, E_{\max}) dE$ — число фотонов в интервале энергий $(E, E+dE)$ при максимальной энергии спектра $E_{\max}$.

Выход реакции $\sigma_q(E_{\max})$ и сечение $\sigma_k(E)$ связаны интегральным

уравнением, известным в литературе как уравнение Фредгольма первого рода:

$$\sigma_q(E_{\max}) = \frac{1}{Q} \int_0^{E_{\max}} N(E, E_{\max}) \sigma_k(E) dE. \quad (1)$$

В математике нахождение решения этого уравнения относится к числу некорректно поставленных задач, для которых характерны как угодно большие отклонения решения при сколь угодно малом разбросе исходных данных. В литературе обсуждается несколько различных приближенных методов решения такого типа задач [1—3]. К числу наиболее ранних и простых способов решения, не требующих сложных расчетов на ЭВМ, относится разностный метод. Этим методом можно рассчитать функцию возбуждения реакции, имея набор последовательных измерений выходов реакций при различных значениях максимальной энергии спектров. При этом для определения числа фотонов можно использовать одно из известных выражений для аппроксимации тормозного спектра.

В частности, наиболее простое «прямоугольное приближение», приводящее к замене $N(E, E_{\max}) \rightarrow 1/E$, позволяет решить уравнение (1) непосредственным интегрированием и получить сечение реакции в виде

$$\bar{\sigma}_k = d\sigma_q/d(\ln E),$$

где $\bar{\sigma}_k$ — среднее поперечное сечение реакции. В такой форме сечение представляет собой наклон кривой выхода к энергетической оси в логарифмическом масштабе. Точность такого приближения зависит от характера энергетической зависимости сечений, а также от статистических ошибок экспериментальных измерений.

В области высоких энергий вычисление сечения таким способом затруднено следующими обстоятельствами:

а) сечения фотоядерных реакций в области энергий ~ 1 ГэВ в основном падают, выходы, полученные в последовательных измерениях, мало отличаются друг от друга и процедура вычитания приводит к большой ошибке в разности;

б) высокоэнергетический конец спектра описывается аппроксимирующими функциями обычно с большой ошибкой и расчеты числа фотонов в этой области неточны.

Более чувствительным способом исследования сечений в этой области энергий является использование квазимонохроматического когерентного пучка, получаемого при торможении ускоренных электронов на кристаллической мишени. Спектры такого типа имеют ярко выраженную пиковую структуру на фоне непрерывного спектра. В настоящее время в литературе имеются публикации, касающиеся применения квазимонохроматических пучков при исследовании фотоядерных реакций [4, 5]. В работе [5] авторы использовали такие пучки для изучения процесса фотodelения ряда элементов в энергетической области 200—1000 МэВ. Данные, приведенные в [6], относятся к измерениям указанным способом инклюзивных сечений фотообразования частиц при энергиях 10 и 14 ГэВ.

В настоящей работе рассматривается возможность использования

квазимонохроматических фотонных пучков для исследования функции возбуждения в реакциях фоторасщепления.

Экспериментальные результаты

Измерения выполнены на Ереванском синхротроне с использованием квазимонохроматического фотонного пучка, получаемого при торможении электронов с максимальной энергией $E_{max} = 3,75$ ГэВ на кристалле алмаза. Измерения фотонных спектров проводились парным спектрометром непосредственно в процессе облучения; толщина облученных мишеней $\sim 0,01$ рад.ед. не вносила существенных нарушений в структуру спектра. Пиковые значения энергии выбирались равными 440, 545, 724, 834, 900, 1050, 1220 и 1540 МэВ. Для измерения полной энергии падающего фотонного пучка применялся квантометр Вильсона.

Исследовались реакции фоторасщепления с образованием ^{24}Na и ^{18}F . В качестве мишеней использовались Al (0,999%), монокристалл Si (0,999%) и порошкообразный S (0,99%), прессованный в виде дисков. Тонкие мишени и абсолютные измерения интегральной интенсивности пучка позволили определить абсолютные значения сечений реакций.

Измерения наведенной активности проводились с помощью Ge (Li) -детектора с чувствительным объемом 60 см^3 , соединенного с 4000-канальным анализатором «DIDAC». Идентификация изотопов осуществлялась по энергии γ -перехода 1368 МэВ (^{24}Na) и 511 кэВ (^{18}F) и соответствующим периодам распада 15,05 и 1,82 час. Выходы реакций, отнесенные к одному эквивалентному кванту, представлены в таблице.

Таблица

E_γ , МэВ	$(\sigma_q \pm \Delta\sigma_q)$, мб					
	$\text{Al} - ^{24}\text{Na}$	$\text{Al} - ^{18}\text{F}$	$\text{Si} - ^{24}\text{Na}$	$\text{Si} - ^{18}\text{F}$	$\text{S} - ^{24}\text{Na}$	$\text{S} - ^{18}\text{F}$
440 ± 75	$1,84 \pm 0,04$	$0,80 \pm 0,03$	$0,70 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,02$
545 ± 90	$1,50 \pm 0,03$	$0,80 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,02$	$0,79 \pm 0,03$	$0,60 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,02$
724 ± 100	$1,13 \pm 0,025$	$0,60 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,015$	$0,59 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,015$
834 ± 110	$0,97 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,015$	$0,34 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,02$	$0,37 \pm 0,015$	$0,36 \pm 0,015$
900 ± 125	$0,93 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,015$	$0,325 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,015$	$0,34 \pm 0,015$	$0,37 \pm 0,01$
1050 ± 125	$0,85 \pm 0,025$	$0,42 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$	$0,42 \pm 0,015$	$0,30 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,01$
1220 ± 125	$0,85 \pm 0,025$	$0,39 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$	$0,41 \pm 0,015$	$0,33 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$
1540 ± 125	$0,78 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$
$3750 \pm 50^*$	$0,87 \pm 0,03$	$0,39 \pm 0,015$	$0,29 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,015$	$0,27 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$

* Измерение проводилось на разориентированном кристалле.

Расчет реакции

Для определения сечения, относящегося к энергии основного пика в спектре, мы проводили последовательные вычитания данных, полученных с квазимонохроматическими и непрерывными тормозными пучками фотонов при разных ориентациях кристалла. При этом предполагалось, что полный выход реакции, протекающей под действием квазимонохроматического фотонного пучка, можно представить в виде

$$\sigma_q^{kv}(E_{\text{пик}}, E_{\text{max}}) = \sigma_q^{\text{ког}}(E_{\text{пик}}, E_{\text{max}}) + \sigma_q^{\text{неког}}(E_{\text{пик}}, E_{\text{max}}),$$

где $\sigma_q^{\text{ког}}(E_{\text{пик}}, E_{\text{max}})$ — выход, обусловленный когерентной частью пучка, $\sigma_q^{\text{неког}}(E_{\text{пик}}, E_{\text{max}})$ — выход, обусловленный некогерентной частью пучка.

Основным условием расчета функции возбуждения реакции является наличие экспериментальных данных, полученных при разных ориентациях кристалла с различными пиковыми значениями энергии, а также в разориентированном положении, соответствующем некогерентной части спектра. Предварительная обработка экспериментальных данных включала расчет теоретических спектров, которые подгонялись к экспериментальным с использованием в качестве свободных параметров углового разброса электронов и коллимации фотонного пучка. С помощью подогнанных теоретических спектров были получены необходимые для расчета сечения данные. В частности определялись:

а) доля некогерентной части в спектре квазимонохроматического фотонного пучка, $1/k$;

б) число эквивалентных квантов под пиком

$$\Delta N^{\text{экв}} = \frac{1}{E_{\text{max}}} \int_{E_1}^{E_2} EN(E, E_{\text{пик}}) dE,$$

где значения E_1 и E_2 на энергетической оси характеризуют ширину пика на полувысоте с учетом вклада некогерентной части пучка;

в) число реальных фотонов в энергетическом интервале

$$\Delta N_{\Phi} = \int_{E_1}^{E_2} N(E, E_{\text{пик}}) dE.$$

Сечение реакции, отнесенное к реальному фотону, вычислялось по формуле

$$\sigma_k(E) = \frac{[k \sigma_q^{kv}(E_{\text{пик}}, E_{\text{max}}) - \sigma_q^{\text{неког}}(E_{\text{пик}}, E_{\text{max}})] \Delta N^{\text{экв}}}{(k-1) E_{\text{max}} \Delta N_{\Phi}},$$

где коэффициент k по данным предварительных расчетов характеризует некогерентную часть в спектре квазимонохроматического фотонного пучка.

Реакция $Al - {}^{24}Na$ исследовалась подробно в области высоких энергий в работе [7]. Авторы [7], располагая более полным набором экспериментальных данных, применили более строгий метод решения уравнения (1). Указанный метод сводится к замене интегрального уравнения системой линейных алгебраических уравнений, решения которой могли иметь определенный физический смысл только при предварительном сглаживании выходов реакций. Удовлетворительное согласие результатов [7] с расчетами настоящей работы (рис. 1) подтверждает достоверность полученных нами данных и позволяет предположить, что описанный способ может рассматриваться как более простой и практически более удобный метод оценки сечений реакций фотопоглощения в области высоких энергий. На

рис. 2—6 приведены сечения реакций $Al-^{18}F$, $Si-^{24}Na$, $Si-^{18}F$, $S-^{24}Na$ и $S-^{18}F$. В области энергий 0,44—1,5 ГэВ, исследованной в настоящей работе, наблюдается спад сечений, который является более крутым для реакций с образованием ^{24}Na (более низкий порог). Можно пред-

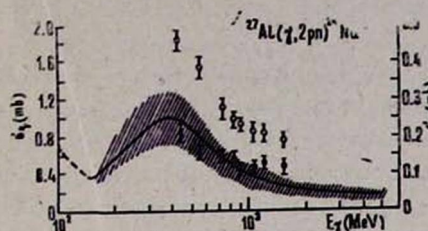


Рис. 1. Реакция $Al-^{24}Na$: $\circ$ — экспериментальные выходы, рассчитанные на эквивалентный квант, $\blacksquare$ — рассчитанные значения сечений. Сплошная кривая — расчет сечения работы [7]; ошибки указаны заштрихованной областью.

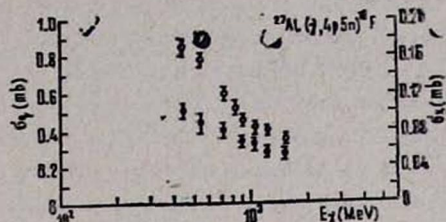


Рис. 2. Экспериментальные выходы и рассчитанные значения сечений реакции $Al-^{18}F$ (обозначения те же, что и на рис. 1).

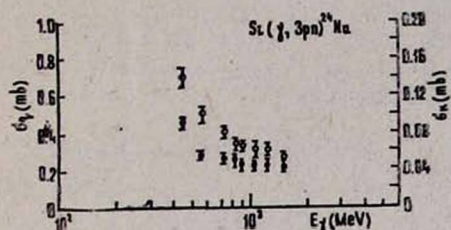


Рис. 3. Экспериментальные выходы и рассчитанные значения сечений реакции $Si-^{24}Na$ (обозначения те же, что и на рис. 1).

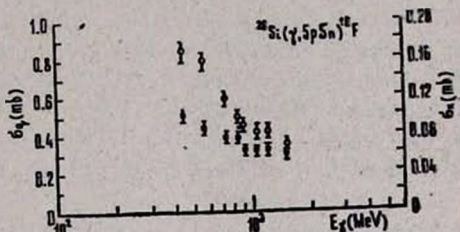


Рис. 4. Экспериментальные выходы и рассчитанные значения сечений реакции $Si-^{18}F$ (обозначения те же, что и на рис. 1).

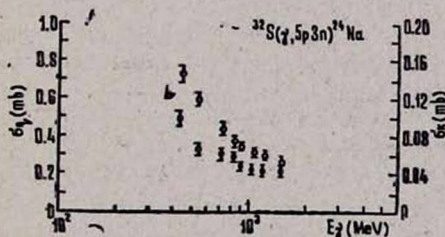


Рис. 5. Экспериментальные выходы и рассчитанные значения сечений реакции $S-^{24}Na$ (обозначения те же, что и на рис. 1).

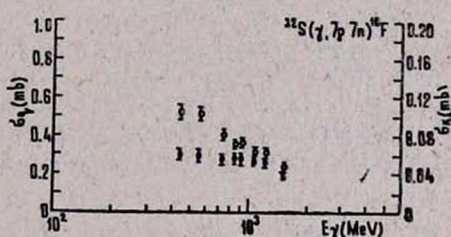


Рис. 6. Экспериментальные выходы и рассчитанные значения сечений реакции $S-^{18}F$ (обозначения те же, что и на рис. 1).

положить, что мы измеряем часть максимума в сечении реакции, приходящегося на область фоторождения л-мезонов и последующего поглощения их в ядерной материи. На факт наличия такого пика указывали авторы, исследовавшие поведение сечений фотоделения [5, 8], а также полного фотопоглощения на ядре [9].

Ошибки обусловлены точностью измеренных выходов (2—3% для ^{18}F и 5—7% для ^{24}Na) и рассчитанных спектров (статистическая ошибка ~ 5%, точность подгонки ~ 10—15%). Для получения более точных данных необходимо проведение детальных измерений с высокой точностью на спектрах с большим значением отношения пик/плато и малым вкладом фотонов в области низких энергий.

Таким образом, предложенный метод является сравнительно простым и легко доступным средством обработки выходов реакций фоторасщепления, исследуемых с помощью квазимонохроматических фотонных пучков.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Р. О. Авакяна и Г. А. Вартапетяна за ценные советы и внимание к работе, а также персонал Ереванского ускорителя за обеспечение хороших параметров пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cook B. C. Nucl. Instrum. and Meth., 24, 256 (1963).
2. Tesch K. Nucl. Instrum. and Meth., 95, 245 (1971).
3. Тихонов А. Н. ДАН СССР, 151, 501 (1963).
4. Авакян Р. О. и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 18, 343 (1978).
5. Bellini V. et al. Nuovo Cim., 71, 229 (1982).
6. Kanue W. et al. Phys. Rev., D11, 473 (1975).
7. Andersson G. et al. Nucl. Phys., A197, 44 (1972).
8. Вартапетян Г. А. и др. ЯФ, 14, 65 (1971).
9. Arends J. et al. Phys. Lett., 94B, 423 (1981).

ՖՈՏՈՆՆԵՐԻ ՔՎԱԶԻՄՈՆՈՒԵՆԴԵՏԻԿ ՓԵՋԻ ՄԻՋՈՑՈՎ Al , Si ԵՎ S ԹԻՐԱԽՆՆԵՐԻՑ ^{24}Na ԵՎ ^{18}F ՄԻՋՈՒԿՆԵՐԻ ՖՈՏՈՍԱՌԱՋԱՅՄԱՆ ՌԵԱԿՑԻԱՅԻ ԳՐԳՈՒՄԱՆ ՖՈՒՆԿՑԻԱՅԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ե. Օ. ԳՐԻԳՐՅԱՆ, Ա. Զ. ԽՈՒԴԱՎԵՐԴՅԱՆ, Ա. Պ. ԲԵՅՎԵՐԽԱՅԱՆ, Ն. Ա. ԴԵՄՅՈՒՔԻՆԱ

Չափված են ^{24}Na և ^{18}F միջուկների ֆոտոտեստիզման ելքերը Al , Si և S թիրախներում, երբ վերջինները ճառագայթվում են 3,75 ՄԷՎ էներգիայով օժտված էլեկտրոնների կողմից արմատի մոնոքրոբիզում առաջացված արգելակման քվանտներով: Մշակված է ֆոտոնակ՝ քվադրանտներգետիկ և ոչ կոհերենտ փնջով ճառագայթման ժամանակ արմատի բյուրակ՝ քվադրանտներգետիկ և ոչ կոհերենտ խնջով ճառագայթման ժամանակ արմատի բյուրեղի տարբեր ուղղությունների դեպքում չափված ելքերի հաջորդական հանման միջոցով:

INVESTIGATION OF EXCITATION FUNCTIONS OF PHOTOPRODUCTION OF ^{24}Na AND ^{18}F FROM Al , Si AND S TARGETS WITH QUASI-MONOCROMATIC PHOTON BEAM

E. O. GRIGORYAN, A. G. KHUDAVERDYAN, A. P. BEZVERKHAYA,
N. A. DEMJOKHINA,

Yields of ^{24}Na and ^{18}F have been measured in reactions of Al , Si and S photopallation with quasi-monochromatic bremsstrahlung from 3,75 GeV electrons striking a diamond single crystal. A comparatively simple technique was developed for the calculation of cross-sections of photopallation reactions by consecutive subtraction of yields measured at the irradiation of targets with quasi-monochromatic and completely incoherent beams from oriented and disoriented positions of the diamond crystal.