

УДК 539.172.3

ОБРАЗОВАНИЕ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ ЯДРА ${}^8\text{Be}$ В РЕАКЦИИ ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$

С.Н. Афанасьев

ННЦ "Харьковский физико-технический институт"

ул. Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина

e-mail: afanserg@kipt.kharkov.ua

Received 26 September 2012, accepted 2 November 2012

Методом диффузионной камеры в магнитном поле получены экспериментальные данные по реакции ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ в энергетическом интервале от порога до 40 МэВ. Выполнен анализ распределений по энергии возбуждения системы 2α -частиц и выделен канал образования основного состояния ядра ${}^8\text{Be}$. Частицы, образующие ядро ${}^8\text{Be}$, идентифицированы как α_3 и α_4 . Измерено парциальное сечение этого канала в зависимости от энергии γ -кванта. В сечении наблюдается четыре резонанса. Обнаружена корреляция между энергией, соответствующей i -му максимуму парциального сечения и энергией возбуждения $E_0({}^8\text{Be})$ i -го уровня ядра ${}^8\text{Be}$: $E_\gamma^i({}^{16}\text{O}) = E_0^i({}^8\text{Be}) + \varepsilon({}^{16}\text{O})$, где $\varepsilon({}^{16}\text{O})$ - порог реакции ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$. Качественно результаты объяснены в модели поглощения γ -кванта виртуальным квазибериллием. При анализе распределений по кинетической энергии α -частиц, сопутствующих образованию основного состояния ядра ${}^8\text{Be}$, определено, что α_1 -частица вышла из квазибериллия, а α_2 -частица совместно с α_3 - и α_4 -частицами образует промежуточное ядро ${}^{12}\text{C}$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диффузионная камера, фоторасщепление, энергия возбуждения, квазибериллий.

THE ${}^8\text{Be}$ GROUND STATE FORMATION IN ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ -REACTION

S.N. Afanas'ev

NSC "Kharkiv Institute of Physics and Technology"

Akademicheskaya st. 1, Kharkiv, 61108, Ukraine

The reaction ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ was studied with the aid of a diffusion chamber placed in a magnetic field in the energy range $E_\gamma < 40$ MeV. The ground of the ${}^8\text{Be}$ nucleus manifested in the distribution of events with respect to the excitation energy of two alpha particles. A particle was identified as α_3 and α_4 . The partial cross section for the channel formation ground state ${}^8\text{Be}$ was measured versus the photon energy. Fourth resonances have been observed in the cross section. The energy corresponding to the i th maximum of the partial cross section and the excitation energy of the i th level of the ${}^8\text{Be}$ nucleus have been found to be correlated as $E_\gamma^i({}^{16}\text{O}) = E_0^i({}^8\text{Be}) + \varepsilon({}^{16}\text{O})$, where $\varepsilon({}^{16}\text{O})$ is the reaction ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ threshold. Qualitatively, the results have been explained on the basis of the model of photon absorption by a quasiberyllium. At the analysis of distributions on kinetic energy of α -particles it is certain, that α_1 -particle escapes from the ${}^{12}\text{C}$ nucleus, while the remaining α_2 -particles with α_3 - and α_4 -particles form an excited nucleus ${}^{12}\text{C}$.

KEY WORDS: diffusion chamber, photodisintegration, the excitation energy, quasiberyllium.

УТВОРЕННЯ ОСНОВНОГО СТАНУ ЯДРА ${}^8\text{Be}$ В РЕАКЦІЇ ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$

С.М. Афанасьєв

ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

вул. Академічна, 1, Харків, 61108, Україна

Методом дифузійної камери в магнітному полі отримані експериментальні дані реакції ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ в енергетичному інтервалі від порогу до 40 МеВ. Виконано аналіз розподілу за енергією збудження системи 2α -частинок і виділено канал утворення основного стану ядра ${}^8\text{Be}$. Частинок, що утворюють ядро ${}^8\text{Be}$, ідентифіковані як α_3 і α_4 . Виміряно парціальний переріз цього каналу в залежності від енергії γ -кванта. У перерізі спостерігаються чотири резонанси. Встановлено, що енергія, яка відповідає i -му максимуму парціального перерізу, і енергія збудження $E_0({}^8\text{Be})$ i -го рівня ядра ${}^8\text{Be}$ корелюють: $E_\gamma^i({}^{16}\text{O}) = E_0^i({}^8\text{Be}) + \varepsilon({}^{16}\text{O})$, де $\varepsilon({}^{16}\text{O})$ - поріг реакції ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$. Якісно результати пояснені в моделі поглинання γ -кванта віртуальним квазиберилієм. При аналізі розподілів за кінетичною енергією α -частинок, які виникли не в разі утворення основного стану ядра ${}^8\text{Be}$, отримано, що α_1 -частинка вийшла з віртуального квазиберилію, а α_2 -частинка разом з α_3 - і α_4 -частинками утворює проміжне ядро ${}^{12}\text{C}$.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дифузійна камера, фоторозщеплення, енергія збудження, квазиберилій.

Выполнено исследование реакции полного α -частичного фоторасщепления ядра ${}^{16}\text{O}$:



где $\varepsilon({}^{16}\text{O})$ – энергетический порог реакции. Реакция может быть использована для проверки $N\alpha$ -частичной модели ядра ${}^{16}\text{O}$, а также для получения дополнительных сведений о характере α - α взаимодействия. Результаты представляют интерес как для многотельной проблемы [1], так и для астрофизики и термоядерного синтеза [2]. В многочастичных фотоядерных реакциях с несколькими α -частицами в конечном состоянии на промежуточном этапе наиболее вероятно образование ядра ${}^8\text{Be}$ в основном или в одном из возбужденных состояний. А реакция $\alpha + {}^8\text{Be}$ благодаря существованию уровня ядра ${}^{12}\text{C}$ возле порога реакции способствовала существенному продвижению в построении теории эволюции звезд [3].

Экспериментальные данные по реакции ${}^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ имеют низкую статистику [4-7] и существенный разброс данных по полному сечению. В ранних работах, в основном, выполнены оценки относительного вклада каналов

образования промежуточных возбужденных ядер. Процесс фоторасщепления ядра ^{16}O на α -частицы может идти через два механизма: непосредственный развал на взаимодействующие между собой α -частицы и двухэтапный распад с образованием промежуточных ядер. До настоящего времени не сделан определенный выбор между ними. В рамках последовательного двухчастичного типа распада возможно образование возбужденных ядер $^{12}\text{C}^*$ и $^8\text{Be}^*$. Возможность выделения канала с образованием определенного возбужденного состояния промежуточного ядра может помочь в определении механизма взаимодействия γ -кванта с ядром-мишенью.

Все экспериментальные данные получены с помощью фотоядерных эмульсий, поэтому представляет интерес исследование реакции другим методом.

Цель работы – определить механизм взаимодействия γ -кванта с ядром ^{16}O в канале образования основного состояния ядра ^8Be .

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные данные по реакции $^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ получены методом диффузионной камеры [8] в магнитном поле на пучке тормозных фотонов с максимальной энергией $E_{\gamma}^{\text{макс}} = 150$ МэВ [9]. Мягкая компонента тормозного спектра убиралась бериллиевым фильтром толщиной 2,5 рад. ед. Спектральное распределение фотонов бралось шиффовским, исправленным на неравномерное ослабление спектра фильтром. С целью уменьшения плотности мишени камера заполнялась смесью кислорода и гелия в пропорции 1:7 до давления 1,5 ата. Это позволило иметь приемлемые для измерений длины треков медленных остаточных ядер и достаточную четкость их изображения на фотопленке при давлениях близких к атмосферному. Благодаря совмещению 4π -детектора с мишенью малой плотности экспериментальный метод дал возможность исследовать реакцию $^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ практически от ее порога. В эксперименте с диффузионной камерой имеется ряд преимуществ: практически чистая мишень и из-за ее малой плотности - низкий порог регистрации α -частиц, магнитное поле и ионизационные потери позволяют надежнее идентифицировать продукты реакции. Кинематические особенности реакции позволяют в большинстве случаев ещё на первом этапе (при визуальном отборе) идентифицировать событие, принадлежащее этой реакции.

Для обработки отбирались четырехлучевые звезды, лучи которых принадлежат двухзарядным частицам. Идентификация событий производилась после измерений треков на полуавтоматических приборах типа ПУОС. Для событий реакции $^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ можно ожидать получение баланса поперечного импульса. В зачет брались события, небаланс импульсов у которых не превышал 15 МэВ/с. Энергия γ -кванта вычислялась как сумма кинетических энергий четырех α -частиц и порога реакции.

Из-за недостаточной длины проекции трека на медианную плоскость не удалось измерить с нужной точностью кинематические параметры частиц, не остановившихся в рабочем объеме камеры и вышедших под углом меньшим, чем 50° , к вектору напряженности магнитного поля. На необработанные по этой причине события введена геометрическая поправка, вычисленная в предположении азимутальной изотропии, так как пучок γ -квантов не поляризован.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основное состояние ядра ^8Be

Распределение пар α -частиц по их энергии возбуждения [10]

$$E_x(\alpha\alpha) = M_{\text{эф}}(\alpha\alpha) - 2m_\alpha, \quad (2)$$

где $M_{\text{эф}}(\alpha\alpha)$ – эффективная масса, равная полной энергии пары α -частиц в системе их покоя, а m_α – масса α -частицы, представлено на рис. 1а гистограммой. Шаг гистограммы – 0,2 МэВ.

Из-за неразличимости α -частиц в реакции не удастся выделить пару, образовавшуюся в результате распада ядра ^8Be . Для каждого события можно вычислить по шесть возможных величин энергии возбуждения системы 2 α -частиц (перебираются все комбинации пар α -частиц). Поэтому в экспериментальном распределении событий по энергии возбуждения двух α -частиц могут возникать одна резонансная (если образуется ядро ^8Be) и пять фоновых $\alpha\alpha$ -комбинации. На рис. 1а при построении распределения для каждого события представлено все шесть значений.

Экспериментальное распределение сравнивалось с фазовым [10]:

$$f(E_x) \propto E_x^{\frac{3}{2}k - \frac{5}{2}} \cdot (E_x^{\text{max}} - E_x)^{\frac{3}{2}(n-k) - 1}, \quad (3)$$

где n – число конечных частиц, k – число частиц, образующих резонанс ($k < n$), E_x^{max} – максимально возможное значение энергии возбуждения системы k частиц, равное максимальной энергии γ -кванта на данном интервале минус порог реакции. В данном случае $n=4$, а $k=2$. Фазовое распределение вычислено для тормозного пучка суммированием распределений для узких интервалов, где энергия γ -кванта считалась постоянной. Площадь под фазовой кривой пронормирована на число событий, приходящихся на каждый интервал. Фазовое распределение на рис. 1а показано штриховой кривой. Отличие экспериментального распределения от фазового, особенно в околороговой области, позволяет сделать вывод, что в реакции $^{16}\text{O}(\gamma, 4\alpha)$ образуются

возбужденные состояния ядра ${}^8\text{Be}$.

Околопороговой резонанс (при энергии возбуждения до 0,2 МэВ на рис. 1а), показан на рис. 1б темными кружками с шагом 10 кэВ. Ошибки – статистические. В основном, вклад в этот резонанс дает только одна из шести возможных $\alpha\alpha$ -комбинаций. В случае 1,85 % событий возможен вклад в эту энергетическую область более чем одной комбинации события. Наличие нескольких комбинаций проявляется при малых энергиях фотона и в этих комбинациях одной из α -частиц является самая низкоэнергетическая α -частица. Установлено, что только в одном событии возможен случай, когда две комбинации с разными α -частицами проявляются в этом резонансе. На рис. 1б светлыми кружками представлено распределение по $E_x(\alpha\alpha)$ для других пяти $\alpha\alpha$ -комбинаций при $E_x(\alpha\alpha) < 0,5$ МэВ с шагом 10 кэВ. Видно, что зона перекрытия резонансной пары и фоновых 5 пар незначительна и резонансная пара с достаточной достоверностью выделяется.

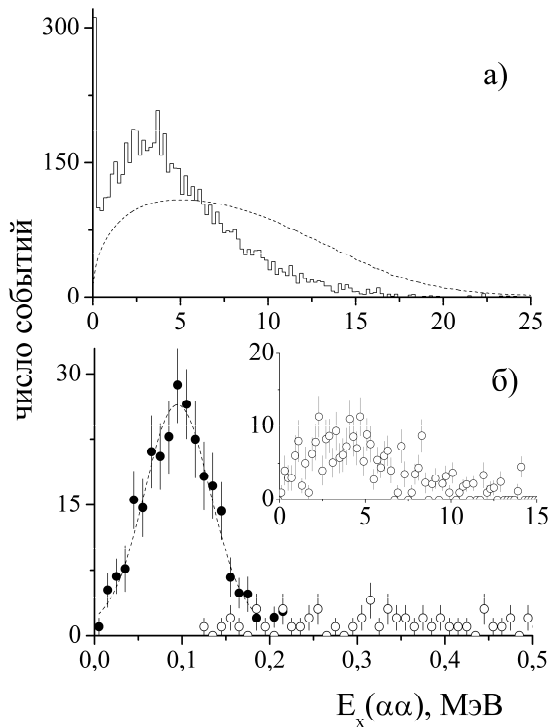


Рис. 1. Распределение пар α -частиц по их энергии возбуждения.

а) гистограмма - все комбинации, штриховая линия – фазовое распределение 2 из 4 (ф. (3)), б) ● - основное состояние ядра ${}^8\text{Be}$, ○ - пара α -частиц, вышедших не из ядра ${}^8\text{Be}$ в основном состоянии, штриховая линия – подгонка функцией Брейт-Вигнера.

что процесс $\gamma + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + {}^8\text{Be}^{\text{oc}}$ не является преобладающим и при распаде образуется только одно ядро ${}^8\text{Be}$, соответствующее ОС: $\gamma + {}^{16}\text{O} \rightarrow \alpha + \alpha + {}^8\text{Be}^{\text{oc}} \rightarrow \alpha + \alpha + \alpha_3 + \alpha_4$.

Парциальное сечение канала образования ОС

На рис. 2а точками представлено парциальное сечение канала образования ОС ядра ${}^8\text{Be}$ при энергиях от порога реакции до 40 МэВ с шагом 1 МэВ. Определение абсолютного сечения выполнено с учетом поправок на необработанные события. Точки поставлены посередине интервала. Ошибки статистические.

В кривой возбуждения наблюдаются несколько максимумов. Штриховыми кривыми на рис. 2а показана подгонка сечения линейной комбинацией 4-х функций Брейт-Вигнера, в результате которой определены энергии положения максимумов E_γ и их ширины Γ . Результаты подгонки представлены в таблице 1 в первой и второй колонках. Сплошной кривой представлена сумма 4-х функций Брейт-Вигнера.

Ранее, в работе [12] был выделен канал образования ОС ядра ${}^8\text{Be}$ в реакции ${}^{12}\text{C}(\gamma, 3\alpha)$ и наблюдалась подобная резонансная структура в парциальном сечении. Было показано, что качественно резонансная структура парциального сечения объясняется в рамках модели поглощения γ -кванта квази- α -частичной парой. Фотон взаимодействует с виртуальным квазибериллием, переводя его в возбужденное состояние. Положение этого состояния проявляется в сечении канала: $E_\gamma({}^{12}\text{C}) = E_0({}^8\text{Be}) + \varepsilon({}^{12}\text{C})$, где $\varepsilon({}^{12}\text{C})$ - порог реакции ${}^{12}\text{C}(\gamma, 3\alpha)$, $E_0({}^8\text{Be})$ – значение максимума уровня ядра ${}^8\text{Be}$. Максимумы в сечении соответствовали первому уровню ($E_0 =$

Максимум при $E_x(\alpha\alpha) < 0,2$ МэВ подогнан распределением Брейт-Вигнера с параметрами $E_0^{\text{экс}} = 0,095 \pm 0,003$ МэВ, $\Gamma = 0,088 \pm 0,007$ МэВ. Результаты подгонки представлены штриховой кривой. Из данных спектрометрических измерений [11] известно, что основное состояние (ОС) ядра ${}^8\text{Be}$ нестабильно и имеет максимум при $E_0 = 0,092$ МэВ с шириной $\Gamma = 5,57$ эВ. Следовательно, концентрацию событий в районе 0,1 МэВ можно объяснить образованием ОС ${}^8\text{Be}$. Наблюдаемая в данном эксперименте ширина резонанса является аппаратурной.

События, у которых одна из пар α -частиц соответствует образованию ОС ядра ${}^8\text{Be}$, надежно выделяются и в дальнейшем будет выполнен анализ только этого парциального канала, относительный выход его – 25,44 %. В событиях, которые обсуждались выше (1,85 %) резонансной парой считалась та, у которой значение $E_x(\alpha\alpha)$ было ближе к экспериментальному значению $E_0^{\text{экс}}$. Для пары α -частиц, вышедших после распада ОС ядра ${}^8\text{Be}$, в дальнейшем присвоим обозначения α_3 и α_4 .

На внутренней вставке рис. 1б светлыми кружками представлено распределение по энергии возбуждения пары α -частиц $E_x(\alpha\alpha)$, сопутствующих образованию ядра ${}^8\text{Be}$ в ОС. Распределение приведено при энергии < 15 МэВ с шагом 0,2 МэВ. Не наблюдается резонансной структуры, соответствующей образованию другого ядра ${}^8\text{Be}$ в основном или возбужденном состоянии. Вид распределения подобен фазовому, приведенному на рис. 1а штриховой кривой. Можно сделать вывод,

3,04 МэВ и $\Gamma = 1,5$ МэВ), второму уровню ($E_0 = 11,4$ МэВ и $\Gamma = 3,5$ МэВ), комбинации близлежащих третьего и четвертого уровней ($E_0 = 16,63$ МэВ, $\Gamma = 0,1$ МэВ и $E_0 = 16,92$ МэВ, $\Gamma = 0,07$ МэВ) и широких уровней с $E_0 \approx 20,0$ МэВ и $\Gamma \approx 2,0$ МэВ [11]. Ширины резонансов парциального сечения $\Gamma(^{12}\text{C})$ совпадали с ширинами возбужденных состояний виртуального квазицентра ⁸Be.

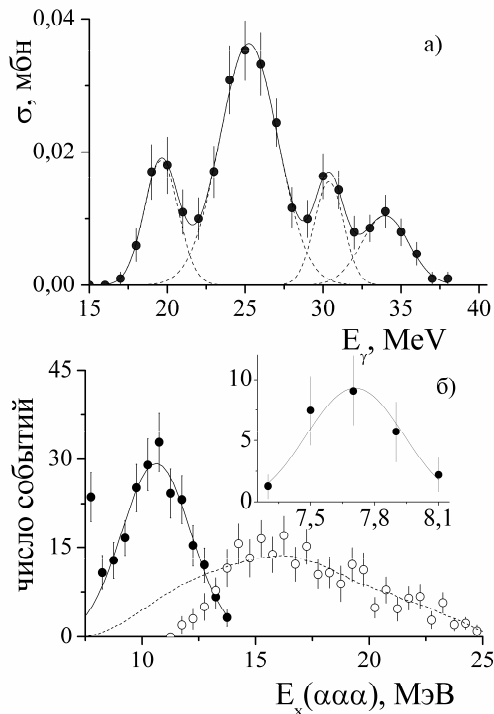


Рис. 2. Энергетические зависимости систем 4-х и 3-х α -частиц в канале образования ОС ядра ⁸Be. а) Парциальное сечение. Штриховые кривые – подгонка функциями Брейт-Вигнера, сплошная кривая – сумма 4-х функций Брейт-Вигнера. б) Распределение энергии возбуждения системы 3-х α -частиц: ● – $E_x(\alpha_2\alpha_3\alpha_4)$, ○ – $E_x(\alpha_1\alpha_3\alpha_4)$, сплошная линия – подгонка функцией Брейт-Вигнера, штриховая линия – фазовое распределение.

идентифицированы только две α -частицы (α_3 и α_4), образующие ОС ядра ⁸Be.

Идентификация α -частиц

На рис. 3 представлены распределения по кинетической энергии α -частиц T_α , сопутствующих образованию ОС ядра ⁸Be. Распределения построены в 4-х областях энергий γ -кванта (первая колонка табл. 2), соответствующих положениям максимумов, обнаруженным на рис. 2а и представленным в табл. 1 в 1-й и 2-й колонках.

Из рис. 3б-г видно, что α -частицы надежно разделяются по энергии. Для α -частицы, энергия которой соответствует второму максимуму (большей кинетической энергии) на рис. 3б-г, в дальнейшем присвоим обозначения α_1 . На рис. 3б определено, что на область пересечения максимумов приходится менее 3% событий, что находится в пределах нашей статистической погрешности. Для α -частицы, энергия которой соответствует первому максимуму на рис. 3б-г, в дальнейшем присвоим обозначения α_2 . Положение и ширина первого максимума на рисунках совпадают (колонки 1 и 2 табл. 2).

Из рисунка видно, что с ростом энергии γ -кванта в распределении проявляется два максимума. На рис. 3б-г (сплошная кривая) выполнена подгонка линейной комбинацией 2-х функций Брейт-Вигнера и определены положения и ширины максимумов, которые приведены в таблице 2 в 4-6 строках. Положение первого из максимумов с ростом энергии γ -кванта не меняется (колонки 2 и 3), в то время как положение второго максимума (колонки 4 и 5) имеет тенденцию к смещению в более высокоэнергетичную область. Можно отметить, что параметры второго максимума коррелируют с параметрами возбужденных уровней ядра ⁸Be, и, соответственно, с энергией γ -кванта. Качественно такую зависимость можно записать как

$$T_\alpha^i = E_0^i(^8\text{Be})/2 \quad (5).$$

Наличие подобной резонансной структуры и в настоящем эксперименте (реакция ¹⁶O($\gamma,4\alpha$)) позволяет проверить возможность такого же механизма взаимодействия γ -кванта с ядром. В таблице 1 в третьей колонке приведен расчет энергии фотона по формуле

$$E_\gamma(^{16}\text{O}) = E_0^i(^8\text{Be}) + \varepsilon(^{16}\text{O}) \quad (4).$$

Использовались положения уровней ядра ⁸Be, приведенные выше. Параметры неразделенных третьего и четвертого уровней брались из эксперимента (16,77±0,18 МэВ, 1,14±0,17 МэВ) [12]. Расчетные ширины, соответствующие ширинам уровней ядра ⁸Be, представлены в колонке 4. Предсказываемые моделью положения максимумов и ширины парциального сечения удовлетворительно согласуются с экспериментом. Таким образом, и в реакции ¹⁶O($\gamma,4\alpha$) обнаружена корреляция между энергией, соответствующей i -му максимуму сечения и энергией возбуждения $E_0^i(^8\text{Be})$ i -го уровня ядра ⁸Be.

Таблица 1. Резонансы в сечении канала образования ОС ядра ⁸Be.

Эксперимент		Расчет	
E_γ , МэВ	Γ , МэВ	E_γ , МэВ	Γ , МэВ
19,607±0,212	2,144±0,328	17,437	1,5
25,232±0,165	3,712±0,378	25,877	3,5
30,376±0,236	1,826±0,504	31,207	1,14
33,977±0,389	3,009±0,643	34,437	2

В реакции ¹²C($\gamma,3\alpha$) [12] при выделении канала образования ОС ядра ⁸Be надежно идентифицировались все α -частицы: и пара, образующая ОС, и α -частица, первая покинувшая ядро после распада виртуального бериллия. В настоящем эксперименте из 4-х α -частиц, наблюдаемых в конечном состоянии, пока надежно

