

УДК 539.144.3

ИЗУЧЕНИЕ ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ИЗОТОПОВ БЕРИЛЛИЯ В РЕАКЦИЯХ ${}^{6,7}\text{Li} + \alpha$ ПРИ $E_\alpha = 94 \text{ МэВ}$

И. Я. Барит, С. В. Зуев, В. В. Осташко, В. А. Симонов

Экспериментально изучена область высоких возбуждений ($E_x = 20 - 50 \text{ МэВ}$) изотопов бериллия с $A = 7 - 10$. Получены указания на возможность существования в легких ядрах возбужденных состояний вплоть до энергии полного развала ядер на свободные нуклоны.

Некоторые теоретические [1, 2] и экспериментальные [3, 4] данные указывают на возможность существования в легких атомных ядрах узких состояний с ширинами 0,1 – 2,0 МэВ при энергиях возбуждения вплоть до энергий полного развала ядер на свободные нуклоны. Поэтому представляется важным экспериментальное изучение области высоких возбуждений ($E_x = 30 - 50 \text{ МэВ}$) изотопов бериллия, для которых есть теоретические предсказания [1, 2] о положении, ширинах и спинах указанных состояний.

Экспериментальное подтверждение наличия таких высоковозбужденных состояний может дать регистрация энергетических спектров продуктов реакций, идущих с образованием соответствующих ядер в различных возбужденных состояниях. В нашем случае такими ядрами являлись ядра бериллия с $A = 7 - 10$, состояния которых изучались нами в реакциях, идущих под действием альфа-частиц на ядрах ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ при углах регистрации 26 и 46°.

Коллимированный пучок альфа-частиц с энергией 94,3 МэВ из изохронного циклотрона У-240 направлялся на мишени в виде самоподдерживающих фольг из ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ с обогащением соответственно 93,8 и 90,7% и толщиной 100 мкм. Однозарядные продукты реакций из мишени регистрировались телескопом с кремниевым поверхностно-барьерным dE/dx -детектором толщиной 500 мкм и E -детектором из особоочищенного германия площадью 150 мм² и толщиной чувствительной области 5 мм. Угловой разброс пучка не превышал $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$, а угловой аксептанс телескопа составлял 0,1 – 0,3°.

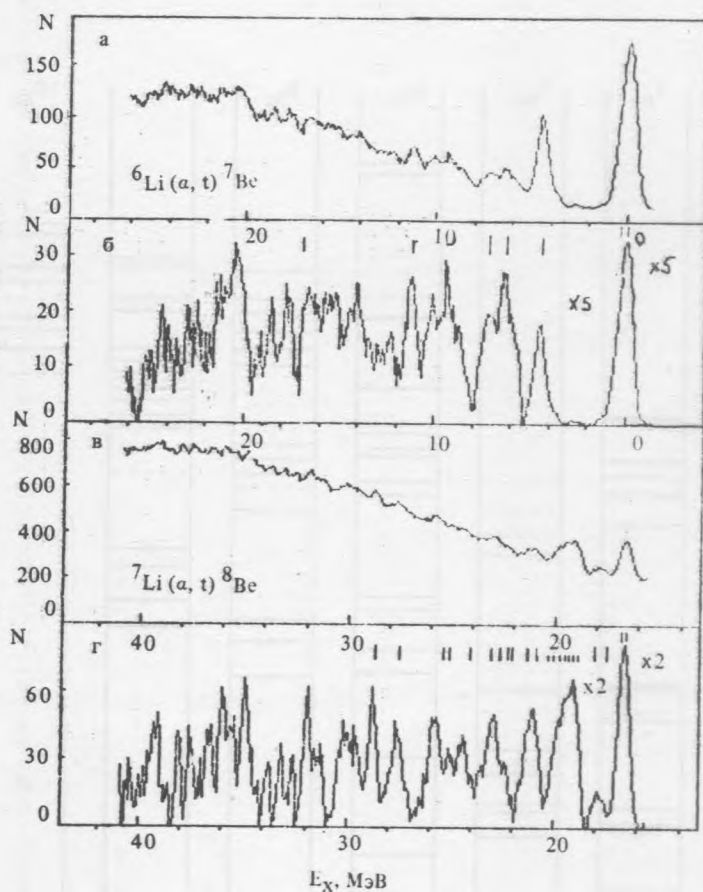


Рис. 1. Инклюзивные спектры тритонов из реакции ${}^6\text{Li}(\alpha, t){}^7\text{Be}$ (а) и ${}^7\text{Li}(\alpha, t){}^8\text{Be}$ (б) для угла $\theta_\alpha = 46^\circ$ и соответствующие им разностные спектры (в, г), сглаженные по пяти точкам. Вертикальными метками отмечено положение известных уровней ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{Be}$.

Обработка накопленных двумерных спектров заключалась в выделении локусов, соответствующих определенному сорту регистрируемых частиц, получении одномерных энергетических спектров и их калибровке по энергии, преобразовании энергетической шкалы от энергии регистрируемых частиц к энергии возбуждения ядер отдачи, выделении из спектра части, соответствующей реакциям на примесях в мишени и континуума, соответствующего реакциям, идущим с образованием более двух частиц в выходном канале.

Калибровка спектров по энергии проводилась по хорошо выделяемым пикам, соответствующим образованию ядра ${}^7\text{Be}$ в основном и возбужденном ($E_x = 4,57 \text{ МэВ}$) состояниях в реакции ${}^6\text{Li}(\alpha, t){}^7\text{Be}$ для угла регистрации 46° , а также по пикам протонов

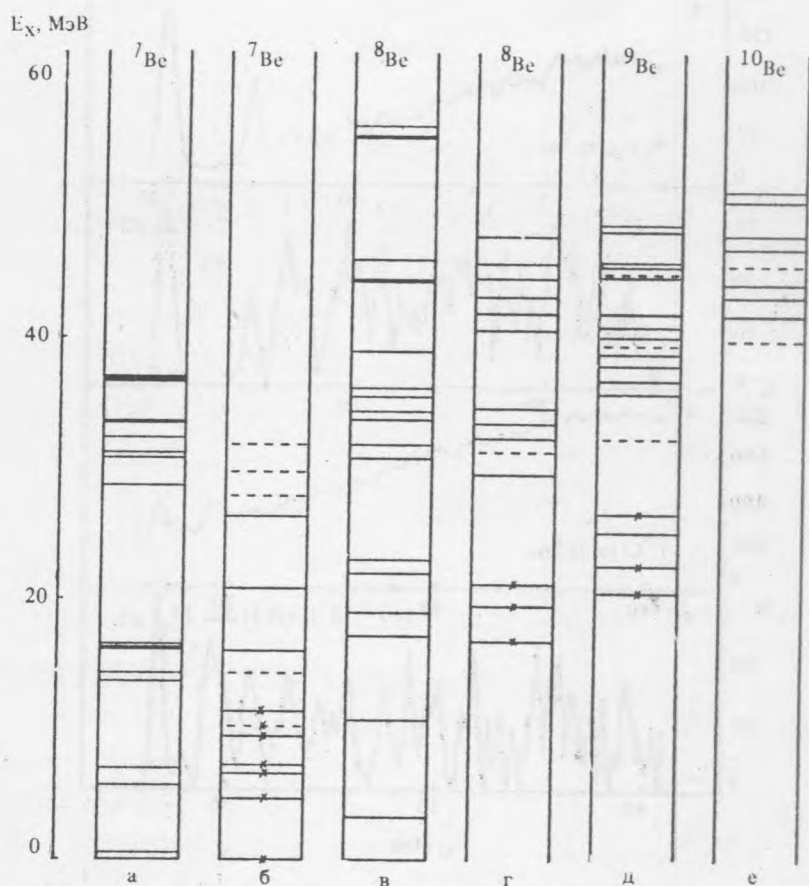


Рис. 2. Схемы уровней ядер: теоретические (а, б) из работ [1, 2] и экспериментальные (б, г-е) из настоящей работы. Сплошными и штриховыми линиями обозначены уровни, для которых вероятности статистических флуктуаций меньше, соответственно, 10^{-3} и 10^{-4} , x – известные уровни.

отдачи из упругого рассеяния $\alpha - p$ на водородосодержащих примесях в мишенях.

Собственное энергетическое разрешение спектрометра на основе детектора из особо чистого германия составляло не хуже 160 кэВ [5], а экспериментальная ширина пиков на полувысоте для моноэнергетических частиц с энергией $30 - 40 \text{ МэВ} = 750 \text{ кэВ}$ в энергии регистрируемых частиц при точности в калибровке по энергии не хуже $0,5 \text{ МэВ}$ в энергии возбуждения.

Для учета вклада в спектры реакций на основных примесях, которыми служат ${}^7\text{Li}$ или ${}^6\text{Li}$ в мишенях ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$, а также на кислороде, водороде и других примесях, связанными с химическим взаимодействием лития с воздухом и парами воды (O и H при-

сутствуют в основном в виде $LiOH$), использовалась следующая процедура. Так как отсутствуют литературные данные по взаимодействию альфа-частиц с энергией около 100 МэВ с ядрами 6,7Li , ${}^{14}N$ и ${}^{16}O$, то из спектров частиц из мишени 6Li вычитались поканально для соответствующего угла спектры частиц из мишени 7Li , нормированные на ток пучка (по счету интегратора), на содержание 7Li в мишени 6Li (по пику, соответствующему возбужденному состоянию ядра 8Be с $E_x = 3,0 \text{ МэВ}$) или на содержание примеси OH по пикам протонов отдачи из рассеяния $p - \alpha$ (вводилась лишь большая из этих двух поправок). Соответственно, для мишени 7Li , спектр реакции на 6Li нормировался таким же образом на содержание 6Li в 7Li по пику, соответствующему возбужденному состоянию ($E_x = 4,57 \text{ МэВ}$) ядра 7Be и на содержание примесей O и H .

Отсутствие существенных изменений в спектрах в рассматриваемой области энергий возбуждения $25 - 52 \text{ МэВ}$ указывает на малый вклад примесных реакций в спектры в этой области, что объясняется малым содержанием примесей в мишенях.

Помимо дискретного спектра в виде отдельно стоящих пиков, соответствующих малым энергиям возбуждения конечных ядер, наблюдается (рис. 1) дискретный спектр в области больших энергий возбуждения, наложенный на континуум, соответствующий образованию в реакции более чем двух частиц при регистрации в условиях неполного кинематического эксперимента.

Для разделения спектра на дискретную составляющую и континуум обычно прибегают к модельному представлению формы континуума, его нормировке и вычитанию из исходного спектра. Однако в нашем случае открыты (разрешены по кинематике) большое количество многочастичных каналов реакций, что делает сложным описание формы такого континуума в рамках какой-либо модели реакции. Поэтому мы воспользовались тем, что континуум представляет собой гладкую функцию энергии, на которую наложен дискретный спектр в виде набора пиков. Для выделения континуумной части спектра сначала производилось сглаживание по трем-пяти точкам, после чего сглаженный спектр сравнивался с исходным и в тех точках исходного спектра, где его значения превышали значения сглаженного, производилась замена этих значений на значения сглаженного спектра. После такой замены, вершины пиков будут "срезаны". Многократно повторяя описанную процедуру, в итоге получаем только гладкий континуум, который определяется многочастичными реакциями. Вычитая континуум из исходного спектра, получаем "чистые" пики в разностном спектре, которые должны были бы идентифицироваться просто по превышению над нулевым уровнем при отсут-

ствии статистического разброса точек континуума. Идентификацию пиков проводили на основе статистического анализа данных, используя критерий χ^2 и метод определения статистической значимости экспериментальных данных [6].

Для разностного спектра, полученного вычитанием из исходного спектра гладкого континуумного фона, через точки, не превышающие нулевой уровень более чем на две статистические ошибки фона, методом наименьших квадратов проводилась кривая в виде полинома первой или второй степени, представляющая континуум.

Основанием для такого проведения кривой служит то, что использование метода "сглаживания" не дает на самом деле точного вида континуумной части спектра и ее абсолютного значения. В то же время, можно надеяться, что общий ход континуума воспроизводится достаточно верно. Считая полученную таким образом гладкую кривую нижней границей развального фона, можно предположить, что верхней границей будет кривая, отстоящая от первой на две статистические ошибки фона. Некоторым подтверждением такого предположения служит тот факт, что точки, остающиеся в спектре после исключения из него областей с предполагаемым содержанием пиков, лежат в этой полосе шириной в две статистических ошибки континуумного фона.

Далее, относительно полученной таким способом кривой для всех точек рассматриваемого участка разностного спектра определялись значения χ^2 . Точки, которые отстояли от кривой более чем на три статистических ошибки для континуума, исключались из спектра и проводилась кривая по оставшимся точкам. Подобную процедуру повторяли до тех пор, пока в разностном спектре не оставались только те точки, χ^2 которых относительно кривой не превышал 9. Полученный таким образом набор точек спектра содержит как точки, принадлежащие гладкому континуумному фону, так и точки из дискретного спектра. Для того, чтобы полиномиальная кривая более корректно отражала форму фона, учитывался тот факт, что точки фона должны быть статистически распределены относительно нее. При этом точки, для которых значения χ относительно этой кривой отрицательны, должны быть также распределены статистически относительно нее и удовлетворять критерию χ^2 с одной степенью свободы, что позволяет отделить их от точек дискретного спектра. Кривая проводилась таким образом, чтобы усредненный по N точкам (с отрицательными χ) $\langle \chi^2 \rangle$ был равен 1. При этом его дисперсия равна $(2/N)^{1/2}$.

Для точек исходного спектра определялись значения χ^2 относительно полученной данным способом кривой. Точки спектра, для которых значения χ^2 превышали 9, рассматривались в качестве "пиков", если в "пике" было более 3-4 таких точек. При этом,

определялась [6] вероятность того, что выявленные пики являются статистическими флуктуациями.

Из сравнения спектров, соответствующих различным углам регистрации и реакциям, видно, что в области энергий $E_x = 0 - 25$ МэВ имеется корреляция в наличии и положении пиков, а также соответствие наблюдаемых пиков известным [7] состояниям изучаемых ядер. Вероятность ошибочного принятия в качестве пика статистической флуктуации составляет менее $10^{-3} - 10^{-4}$. Ширины выявленных состояний составляют 0,5 - 2,5 МэВ и не могут быть определены с большей точностью из имеющихся данных из-за большой погрешности при недостаточной статистике.

Анализ полученных дискретных спектров позволяет сделать следующие выводы.

Ширины и положения пиков, наблюдаемых в области энергий возбуждения $E_x = 0 - 25$ МэВ, соответствуют ширинам и положениям известных состояний [7]. Вероятность ошибочного принятия в качестве пика статистической флуктуации составляет менее $10^{-3} - 10^{-4}$.

В области энергий возбуждения $E_x > 30$ МэВ в разностных спектрах также наблюдаются пики, для которых вероятность ошибочного принятия в качестве пика статистической флуктуации составляет менее $10^{-3} - 10^{-4}$. При этом имеется корреляция в наличии и положении пиков, соответствующих различным углам регистрации и реакциям. Пики имеют ширины 0,5 - 2,5 МэВ. Также имеется некоторое соответствие между положением и ширинами наблюдаемых пиков и положением и ширинами состояний, предсказываемых теорией коллективных резонансов в легких атомных ядрах [1].

Таким образом, полученные результаты указывают на возможность существования в легких ядрах возбужденных состояний вплоть до энергии полного развала ядер на свободные нуклоны. Однако окончательные выводы можно будет сделать после повторения измерений, а также измерений с лучшим энергетическим разрешением в более широком интервале углов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Filippov G. F., Proc. Fifth Int. Conf. Clustering Aspects in Nucl. and Subnucl. Systems, Kyoto, 1988. J. Phys. Soc. Japan, **58** Suppl., 118 (1989).
- [2] Arickx F. et al., Nucl. Phys., **A252**, 416 (1975).
- [3] Kozlowski M. et al., Lettere al Nuovo Cimento, **31**, N 16, 565 (1981).
- [4] France R. et al., Nucl. Phys., **A433**, N 3, 351 (1985).

- [5] Н е м е ц О. Ф. и др. Тезисы докладов 33 Совещ. по ядерн. спектр. и структуре атомн. ядра. Л., Наука, 1983, с. 373.
- [6] В и н о г р а д о в В. Б. и др. Сообщения ОИЯИ, P1-7155, Дубна, 1973.
- [7] A j z e n b e r g - S e l o v e F., Nucl. Phys., **A490**, N 1, 1 (1989).

Поступила в редакцию 1 июня 1994 г.