

ВОЗМОЖНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗБУЖДЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ЯДРА ${}^3\text{H}$ В РЕАКЦИИ $\text{H}({}^6\text{He}, \alpha)$

Д.В.Александров, Е.Ю.Никольский, Б.Г.Новацкий, Д.Н.Степанов

Российский научный центр "Курчатовский институт"

123182 Москва, Россия

Поступила в редакцию 12 января 1994 г.

Впервые измерены сечения реакции $\text{H}({}^6\text{He}, \alpha)$ на ядрах H и ${}^{12}\text{C}$ и $\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})$ при энергии $E_{\alpha,\text{He}} = 19,3 \text{ МэВ}$. В спектре α -частиц из реакции $\text{H}({}^6\text{He}, \alpha)$, помимо основного состояния тритона, обнаружен резонанс с $E^* = 7,0 \pm 0,3 \text{ МэВ}$ и шириной $\Gamma = 0,6 \pm 0,3 \text{ МэВ}$, лежащий выше порога диссоциации $t \rightarrow n + d$. Сделано предположение, что данный уровень имеет конфигурацию $(^2n + p)$.

В последние годы достигнут значительный прогресс в получении вторичных пучков радиоактивных ядер. Использование таких пучков позволило измерить полные сечения взаимодействия ядер ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, которые оказались необычно большими [1]. В дальнейших экспериментах было обнаружено, что у таких ядер, как ${}^{11}\text{Li}$ и ${}^{11}\text{Be}$, существует "нейтронное гало" [2].

В настоящее время ведутся интенсивные исследования на вторичных пучках при энергиях от нескольких десятков до сотен МэВ на нуклон. Несомненный интерес представляют и опыты при низких энергиях, где возможно проведение спектроскопических исследований реакций, вызываемых радиоактивными ядрами. В этой области энергий следует ожидать проявления уникальных свойств ядер-снарядов с большим избытком нейтронов, например больших сечений реакций передачи "валентных" нейтронов.

Нами была поставлена задача получить вторичный пучок ионов ${}^6\text{He}$ с энергией 3–4 МэВ/А и исследовать реакцию $\text{H}({}^6\text{He}, \alpha)$ на легких ядрах-мишениях. Интерес именно к ядру ${}^6\text{He}$ объясняется тем, что энергия связи последних двух нейтронов у ${}^6\text{He}$ аномально мала – 0,97 МэВ, тогда как у стабильных ядер, например ${}^9\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}$, она равна 20,6 и 31,8 МэВ, соответственно. Малость энергии связи и относительно большая энергия спаривания двух нейтронов позволяют предположить, что при взаимодействии ${}^6\text{He}$ с ядрами при малых энергиях будет преобладать механизм прямой передачи динейтрона как кластера. Это подтверждается и теоретическими расчетами [3], в которых показано наличие в ${}^6\text{He}$ ярко выраженной конфигурации α -частица плюс динейtron.

Для получения вторичного пучка ${}^6\text{He}$ нами выбрана реакция ${}^{14}\text{C}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^{15}\text{N}$. Ионы ${}^7\text{Li}$, ускоренные на циклотроне РНЦ "Курчатовский Институт" до энергии 25 МэВ, попадали на мишень ${}^{14}\text{C}$ толщиной 1,3 мг/см² и обогащением 80%. Продукты реакции анализировались и фокусировались на вторичной мишени с помощью магнитного сепаратора МАСЭ [4].

Жесткость дипольных магнитов МАСЭ была настроена на максимальное пропускание ядер ${}^6\text{He}$. Для уменьшения примеси сопутствующих частиц, имеющих такую же магнитную жесткость, между анализирующим и собирающим диполями устанавливалася деградер-майларовая фольга толщиной 50 мкм. В результате получен пучок ионов ${}^6\text{He}$ с энергией 20,8 МэВ, разрешением 0,9 МэВ и интенсивностью $2 \cdot 10^3$ частиц в 1 с. Диаметр пучка на вторичной мишени – 6 мм, примесь ионов трития не превышала 2%, α -частиц – не более $10^{-3}\%$.

Система идентификации продуктов реакций состояла из двух полупроводниковых ΔE детекторов толщиной по 30 мкм и детектора E диаметром 5 см. Центральная область E счетчика была закрыта от прямого пучка tantalовым экраном диаметром 3 см. Энергетические спектры измерялись в кольцевой геометрии под углом $6,3 \pm 1,3^\circ$, телесный угол детектирующей системы составлял $3,1 \cdot 10^{-2}$ ср.

Первоначальным объектом исследования была выбрана реакция ($^6\text{He}, \alpha$) на ядрах водорода и углерода. В качестве мишней применялись пленки из полизтилена и углерода толщинами 6,6 и 7,3 мг/см², соответственно.

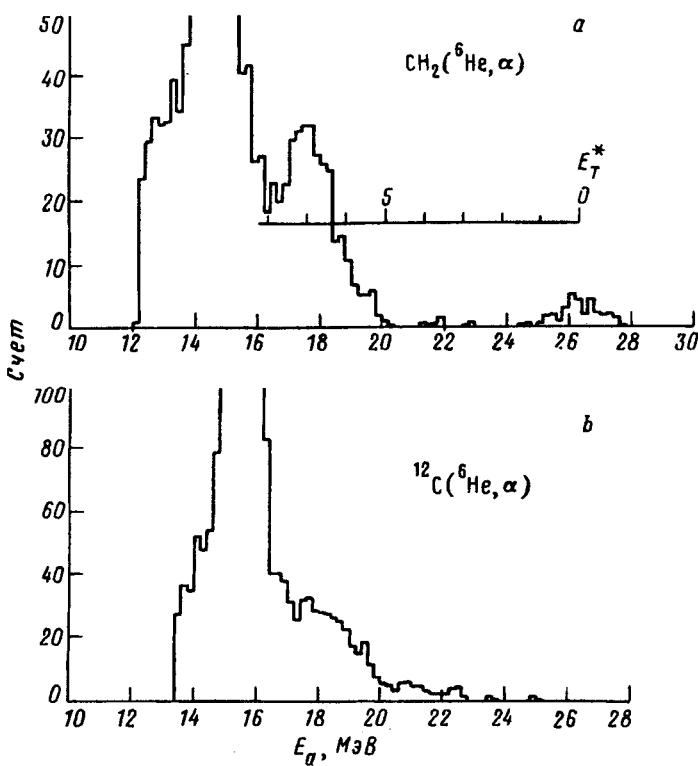


Рис.1. Энергетический спектр α -частиц из реакции ($^6\text{He}, \alpha$), измеренный под углом $6,3^\circ$ на мишнях: *a* – CH_2 и *b* – ^{12}C

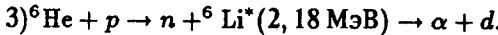
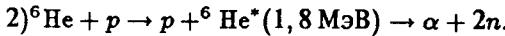
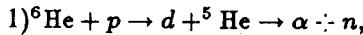
На рис.1 a показан спектр α -частиц из реакции ($^6\text{He}, \alpha$) на мишени CH_2 . В жесткой части спектра при энергии 26,5 МэВ наблюдается пик, который однозначно идентифицирован как основное состояние тритона, заселяемое в реакции $\text{H} (^6\text{He}, \alpha)$. Его сечение в системе центра масс равно $d\sigma/d\Omega = 14$ мбарн/ср. Помимо этого пика, при энергии 17,5 МэВ виден четко выраженный резонанс. Попытка объяснить этот пик наличием углерода в мишени CH_2 оказалась несостоятельной после измерений реакции ($^6\text{He}, \alpha$), проведенных на углеродной мишени (см. рис.1 b). Из рисунка видно, что резонанс при энергии 17,5 МэВ отсутствует. Небольшое увеличение счета в данной области спектра следует

приписать примеси (< 10%) водорода в углеродной мишени. Способ изготовления мишени – пиrolиз метана – допускает такое содержание водорода в углеродной пленке.

Дополнительные измерения спектров α -частиц из реакции $(^6\text{He}, \alpha)$ на ${}^9\text{Be}$ и ${}^{28}\text{Si}$ показали, что выходы реакции $(^6\text{He}, \alpha)$ на этих мишнях в десятки раз меньше, чем сечение $\text{H}(^6\text{He}, \alpha)$. Следовательно, резонанс при $E_\alpha = 17,5 \text{ МэВ}$ не может быть объяснен наличием незначительных примесей в мишени CH_2 .

Обращает на себя внимание и сильный рост числа событий в левой части спектра при $E \approx 15 \text{ МэВ}$ на рис.1а и б. Данный эффект возникает вследствие неполного сбора заряда в детекторе E от упруго рассеянных ядер ${}^6\text{He}$.

Известно, что в спектрах продуктов реакций появление резонансно-подобных структур можно объяснить и с помощью двухступенчатых процессов. При взаимодействии ${}^6\text{He}$ с водородом возможны следующие реакции, идущие в две стадии:



Кинетический анализ позволил исключить первые два процесса из-за несовпадения положений и ширин расчетных пиков с наблюдаемыми. Вычисления проводились с помощью программы "SPEC" (автор Х.Г.Болен, Ган-Майтнер Институт, Берлин), в которой были учтены анизотропия каналов реакций и геометрия детектирующей системы. Для реакции квазиупругой передачи ${}^6\text{He} + p \rightarrow n + {}^6\text{Li}^*$ кинематический анализ однозначно не исключает появления резонанса в спектре α -частиц из распада ${}^6\text{Li}^* \rightarrow \alpha + d$. Поэтому нами выполнены специальные измерения реакции $\text{H}(^6\text{He}, {}^6\text{Li})n$ в тех же условиях. Оказалось, что выход реакции с образованием ${}^6\text{Li}$ в основном состоянии в 4-5раз меньше вероятности заселения резонанса при $E_\alpha = 17,5 \text{ МэВ}$. Отметим, что минимальный переданный момент в реакции $\text{H}(^6\text{He}, {}^6\text{Li}_{g.s.})$ равен $L = 0$. В случае возбуждения уровня $2,18 \text{ МэВ}$ (3^+) в ${}^6\text{Li}$ реакция будет идти с минимальным моментом $L = 2$. Оценки центробежного барьера $B_{\text{ц}} = \hbar^2 L(L+1)/2\mu R^2$ для системы ${}^6\text{He} + p$ с $L = 2$ показывают, что $B_{\text{ц}} \approx 9 \text{ МэВ}$ при $R = 4 \text{ фм}$, тогда как энергия взаимодействия ${}^6\text{He} + p$ в ц.м. составляет $E = 2,7 \text{ МэВ}$. Отсюда уровень 3^+ в ${}^6\text{Li}^*$ будет возбуждаться слабее основного состояния на фактор проницаемости $T_{L=2} = 0,2$. Таким образом, пик при $E_\alpha = 17,5 \text{ МэВ}$ не может быть объяснен рассмотренными двухступенчатыми процессами.

Нами сделано предположение, что в реакции $\text{H}(^6\text{He}, \alpha)\text{T}$ с сечением $d\sigma/d\Omega$ ц.м. = $36 \pm 6 \text{ мб/срд}$ заселяется неизвестное до сих пор возбужденное состояние ядра трития с $E^* = 7,0 \pm 0,3 \text{ МэВ}$ и шириной $\Gamma = 0,6 \pm 0,3 \text{ МэВ}$. Шкала энергий возбуждения тритона показана на рис.1а. Отметим, что существование в Т уровня, лежащего выше порога распада $n + d$ на $0,5 \text{ МэВ}$, предсказывалось в ряде теоретических работ (см., например, обзор [5]).

Для выяснения природы рассматриваемого уровня нами на газовой мишени измерена реакция $\text{H}({}^6\text{Li}, \alpha)$ при энергии $E_{\text{Li}} = 30 \text{ МэВ}$, в которой с большой вероятностью может идти передача дейтрона как кластера [6]. Дело в том, что если данное состояние в Т имеет конфигурацию $(d + n)$, то подобный аналоговый уровень структуры $(d + p)$, с точностью до кулоновских поправок, должен быть и в зеркальном ядре ${}^3\text{He}$. На рис.2 показан спектр α -частиц

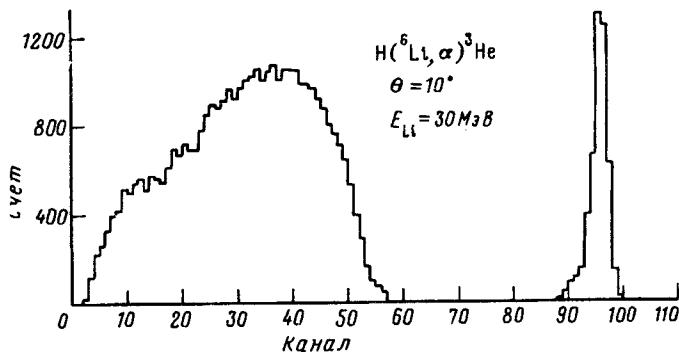


Рис.2. Энергетический спектр α -частиц из реакции $H(^6Li, \alpha)^3He$, измеренный при $E_{\alpha Li} = 30$ МэВ

из реакции $H(^6Li, \alpha)^3He$, в котором помимо пика, соответствующего основному состоянию 3He , наблюдается широкое непрерывное распределение, связанное с диссоциацией 6Li . Никаких особенностей, указывающих на существование возбужденного состояния в 3He , не обнаружено. Исходя из вышеуказанного и предположения о преобладающем механизме передачи динейтрана в реакции $(^6He, \alpha)$ можно сделать вывод, что уровню с $E^* = 7,0$ МэВ в Т соответствует конфигурация $(^2n + p)$. В пользу этой гипотезы говорит и отсутствие резонанса в энергетической зависимости полного эффективного сечения рассеяния нейтрона на дейtronе.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность А.А.Барабанову и В.Д.Эфросу за полезные обсуждения, Ю.А.Глухову и Е.А.Кузьмину – за помощь на отдельных этапах работы.

1. I.Tanihata, Nucl. Phys. A522, 275 (1991).
2. T.Kobayashi, O.Yamakawa, K.Omata et al., Phys. Rev. Lett. 60, 2599 (1988); I.Tanihata, T.Kobayashi, T.Suzuke et al. Phys. Lett. B287, 307 (1992).
3. M.V.Zhukov, B.V.Danilin, A.A.Korsheninnikov et al. Nucl. Phys. A538, 375 (1992).
4. В.В.Бураков, Н.И.Веников, А.М.Добычин и др. Препринт ИАЭ-4816/2 М: 1989.
5. К.Меллер, Ю.В.Орлов, ЭЧАЯ, 1989. с.1341.
6. Ю.А.Глухов, Б.Г.Новацкий, А.А.Оглоблин и др. ЯФ 13, 277 (1971).