

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1966

УДК 539.17.012 : 621.384.611

С. С. ВАСИЛЬЕВ, Ю. А. ВОРОБЬЕВ, Т. Н. МИХАЛЕВА, Д. Л. ЧУПРУНОВ

## ИЗМЕРЕНИЕ НА ЦИКЛОТРОНЕ ФУНКЦИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ С МАЛЫМ ШАГОМ

Дано описание экспериментального устройства, позволяющего производить измерение функций возбуждения на 120-сантиметровом циклотроне НИИЯФ МГУ с разбросом по энергии падающего пучка протонов 0,16%. Приведены функции возбуждения для  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  из реакции  $Al^{27}(\rho, \alpha)Mg^{24}$ , измеренные на циклотроне с энергиями от 6,235 до 6,540 Мэв и шагом  $\sim 10$  Кэв. Угол, под которым производились измерения, равен  $90^\circ$  в лаб. сист. координат. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с имеющимися в литературе данными, полученными на перезарядном электростатическом генераторе с шагом 50 и 25 Кэв.

В последние годы появилось достаточно много работ, посвященных изучению ядерных реакций при малых и средних энергиях, в которых помимо измерения угловых распределений выполняется измерение функции возбуждения через малые интервалы энергии. Сопоставление функции возбуждения, измеренной через малые интервалы энергии, с угловыми распределениями позволяет иногда сделать более надежные выводы о механизме ядерной реакции, а в некоторых случаях определить время жизни высоко возбужденных состояний составного ядра или промежуточной составной системы. Кроме того, имеется ряд работ, в которых для получения сведений о механизме ядерного процесса предлагается тот или иной анализ функции возбуждения.

Как правило, измерение функции возбуждения производится на пучке заряженных частиц, ускоренных на электростатическом генераторе [1—10] в силу того, что  $\Delta E$  пучка на таком ускорителе мало, а энергия пучка легко изменяется с малым шагом: 2, 5, 10, 50 и больше Кэв. Измерение функции возбуждения на циклотронах обычно выполняется с большим шагом энергии: на циклотронах с переменной энергией  $\sim 50$ —100 Кэв, [11—15], а на циклотронах с постоянной энергией с использованием тормозящих фольг 100—500 Кэв [16—19]. При использовании тормозящих фольг к начальному разбросу  $\Delta E$  пучка добавляется  $\Delta E_x$ , зависящее от толщины тормозящих фольг, что в случае образования составного ядра будет существенно изменять интервал энергий возбуждения.

В настоящей работе сделана попытка получить функцию возбуждения через возможно малые интервалы энергии на пучке частиц, ускоренных на 120-сантиметровом циклотроне НИИЯФ МГУ, сохраняя  $\Delta E/E$  постоянным во всем изучаемом интервале энергий, и сравнить

полученные результаты с литературными данными, полученными на пучке частиц, ускоренных на электростатическом генераторе. Для проведения сравнения мы выбрали реакции  $Al^{27}(p, \alpha_0)Mg^{24}$  и  $Al^{27}(p, \alpha_1)Mg^{24}$ \* в силу того, что в литературе имеются [1, 2]\* для них функции возбуждения с выраженной структурой, измеренные на электростатическом генераторе в интервале энергий, позволяющем произвести сравнение.

### Экспериментальное устройство

Протоны ускорялись на 120-сантиметровом циклотроне, фокусировались двумя квадрупольными линзами, после чего проходили отклоняющий магнит, где отклонялись на угол  $45^\circ$ . Схематичное расположение основных элементов установки дано на рис. 1. Перед квадрупольными линзами помещается диафрагма  $D_1$  диаметром 10 мм. После отклоняющего магнита, перед бетонной защитой, расположена диафрагма  $D_2$  шириной 10 мм, позволяющая вырезать сравнительно узкий пучок протонов, попадающих в ионопровод, и очень сильно уменьшить  $\gamma$ -фон в экспериментальном зале. На расстоянии 3,7 м от диафрагмы  $D_2$ , за бетонной защитой, перед входом в камеру рассеяния установлена 4-миллиметровая выходная диафрагма коллиматора  $D_3$ . Таким образом, на мишень, расположенную в центре камеры диаметром 1500 мм, попадала только часть с небольшого участка пучка, развернутого отклоняющим магнитом. Измерение энергии протонов производилось по упруго рассеянными на  $Al^{27}$  протонам: при измерении без фильтра по положению максимумов упругого рассеяния и неупругого с возбуждением в  $Al^{27}$  уровня 2,21 Мэв осуществлялась градуировка многоканального сцинтилляционного спектрометра (определялась цена канала), а затем производилось измерение с фильтром. Фильтр состоял из одной золотой пластинки толщиной 50 мк и помещался перед датчиком, в пучке рассеянных протонов. После этого могла быть вычислена энергия  $E_p$ , потерянная упруго рассеянными на заданный угол протонами в использованном фильтре. По графику зависимости  $E_p$  от энергии падающих протонов (с учетом рассеяния на выбранный угол, в нашем случае  $\theta = 90^\circ$ ), который составлен по таблице из [20], определяется энергия протонов, падающих на мишень. Измерив энергию падающих протонов для нескольких значений показаний прибора, включенного в цепи отклоняющего магнита, получаем в полуквадратичном масштабе график энергии протонов от показаний прибора в цепи отклоняющего магнита (см. рис. 2), по которому и определяется  $E_p$  для любого значения поля отклоняющего магнита.

В измерении энергии могла быть систематическая ошибка, возникающая при определении энергии по потере энергии в фильтре из кривой пробег—энергия, из-за неопределенности в толщине фильтра, так как его толщина определяется для размера, значительно превышающего его размер «рабочей области» фильтра. Сравнение наших результатов с измерениями работы [1] показало, что в шкале энергий имеется систематическое расхождение, которое мы учитываем в дальнейшем.

Ускоритель был настроен так (частота 10,4 мгц, магнитное поле 13 450 эрст), что энергия ускоренных протонов в максимуме интенсивности равна  $\sim 6,35$  Мэв,  $\Delta E/E = \pm 1,5\%$ . Небольшая подстройка ускорителя на верхней и нижней границах энергии позволяет еще несколько увеличить интервал энергии ускоренных частиц. Таким образом,

\* Работа Лоренса и Куинтона [1] появилась в печати, когда наша статья оформлялась для публикации.

при данной (основной) настройке ускорителя мы имеем протоны в интервале от 6,235 до 6,540 Мэв. При измерении основной настройки ускорителя (частота 10,7 мгц, магнитное поле 13 700 эрст) интервал энергий протонов увеличивается до 6,7 Мэв [23], т. е. получается интервал энергий вполне достаточный [24, 25] для того, чтобы из измеренной

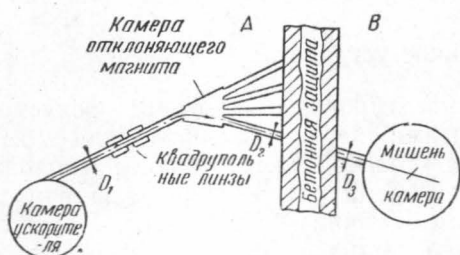


Рис. 1. Схематическое расположение основных элементов установки. А — циклотронный зал, В — экспериментальный зал

в нем функции возбуждения уже можно было сделать некоторые выводы.

При фиксированной геометрии диафрагм коллиматора, выделение падающих на мишень протонов определенной энергии осуществлялось выбором определенного поля отклоняющего магнита (стабилизация 0,05%) и небольшими изменениями рабочих параметров циклотрона. Оценочный расчет показывает, что в нашем случае  $\Delta E/E$  составляет 0,16%, т. е. при прохождении интервала энергий от 6,540 до 6,235 Мэв  $\Delta E$  изменяется на 0,5 Кэв; если это же уменьшение энергии произвести алюминиевой тормозящей фольгой, то, согласно [20], разброс потерь энергии около среднего представляется кривой с полушириной  $\Delta E_{A1} = 35$  Кэв.

Ток на мишень был 0,1 мка, уменьшаясь на границах энергетического интервала до 0,05 мка. Перед началом работы отклоняющий магнит подвергался размагничиванию.

Регистрация продуктов реакций, протекающих на мишени, осуществлялась многоканальным сцинтилляционным спектрометром, использованным и описанным в предыдущих работах [21, 22].

## Результаты измерений

Измерения производились с  $Al^{27}$  мишенью, толщиной 2 мк ( $0,54$  мг/см<sup>2</sup>), расположенной под углом 45° к пучку протонов. Пример спектров  $\alpha$ -частиц, из реакции  $Al^{27}(p, \alpha)Mg^{24}$ , оставляющих  $Mg^{24}$  в основном и первом возбужденном состояниях, дан на рис. 3, а, причем для иллюстрации выбраны спектры, полученные для граничных и среднего значения энергии протонов. Как видно из этого рисунка,  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  — полностью отделяются друг от друга во всем интервале энергий протонов. На рис. 3, б даны результаты измерений и расчета по формуле Резерфорда дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов на золоте.

Функции возбуждения для  $Al^{27}(p, \alpha_0)Mg^{24}$  и  $Al^{27}(p, \alpha_1)Mg^{24}$  измерялись нами только в части нашего интервала энергий падающих

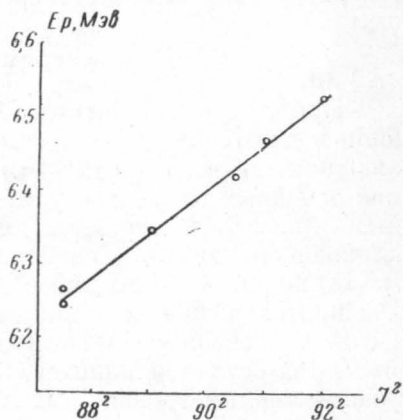


Рис. 2. Зависимость энергии протонов от квадрата тока отклоняющего магнита (в делениях прибора). Точки — экспериментальные данные

протонов под углом  $90^\circ$  в лабораторной системе координат. Результаты наших измерений даны на рис. 4 вместе с результатами других авторов, которые выполняли измерение этих функций возбуждения на перезарядном электростатическом генераторе. Уорш с сотрудниками [2] производил измерения через 55 Кэв на мишени, толщина которой, так

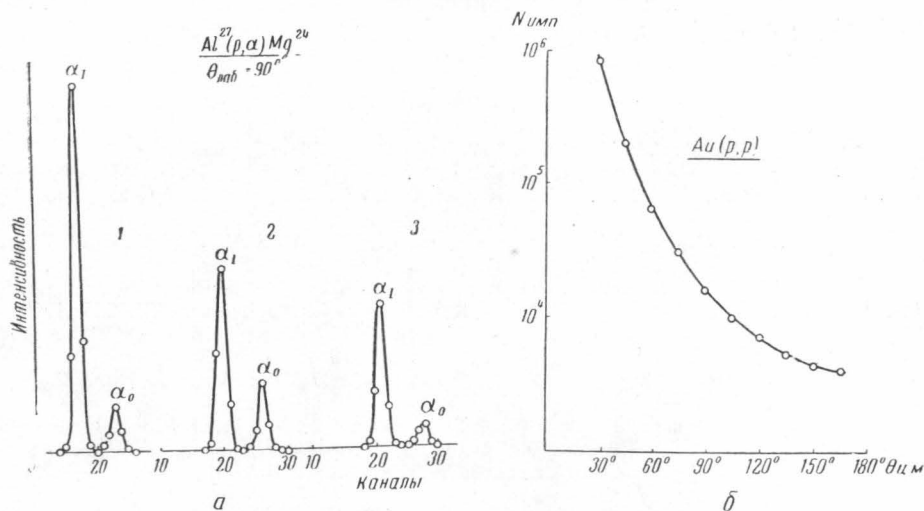


Рис. 3. *a* — спектры  $\alpha$ -частиц из реакции  $Al^{27}(p, \alpha)Mg^{24}$ , составляющих ядро магния в основном и первом возбужденном состояниях, при граничных (1), (3) и среднем (2) значениях энергий падающих протонов, *б* — дифференциальное сечение упругого рассеяния протонов на  $Au^{197}$ . Точки — экспериментальные данные, кривая рассчитана по формуле Резерфорда

же как и разброс пучка протонов по энергии, незначительна. Лоренс и Куинтон [1] производили измерения через 25 Кэв на мишени, толщина которой  $0,01-0,07 \text{ мг/см}^2$ , а разброс пучка протонов по энергии 5—10 Кэв. Регистрация  $\alpha$ -частиц в работах [1, 2] осуществлялась полу-

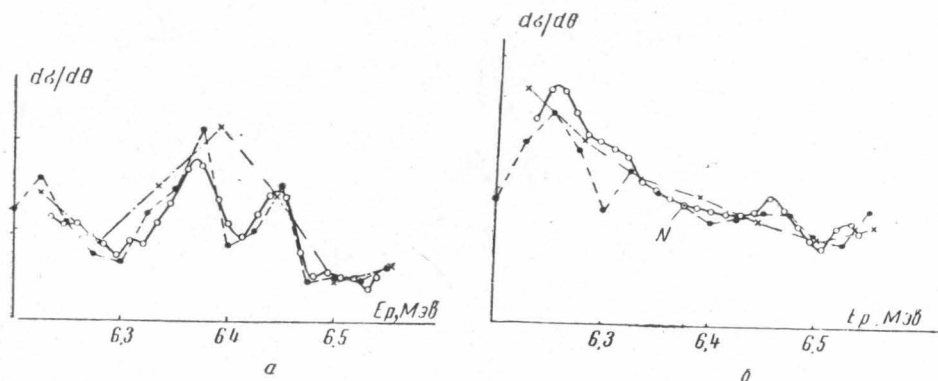


Рис. 4. Функции возбуждения: *a* — для  $Al^{27}(p, \alpha_0)Mg^{24}$  и *б* — для  $Al^{27}(p, \alpha)Mg^{24}$  измеренные под углом  $90^\circ$  в лабораторной системе координат.  $\circ$  — экспериментальные результаты данной работы,  $\times$  — данные из работы Уорша с сотрудниками [3],  $\bullet$  — данные из работы Лоренса и Куинтона [1], *N* — точка, в которой произведено нормирование наших данных с данными работы [1]

проводниковыми детекторами. Нормирование результатов наших измерений с литературными данными для  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  произведено только в одной точке, обозначенной *N* на рис. 4. Как видно из этого рисунка, из-

меренные нами функции возбуждения хорошо совпадают с имеющимися в литературе данными.

Несмотря на то что наши измерения производились на циклотроне, они дают возможность выявить так же четко структуру функций возбуждения, как и при измерениях на электростатическом генераторе.

Авторы выражают благодарность за помощь в работе Кирьянову Е. Ф. и бригаде циклотрона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lawrence G. P., Quinton A. R. Nucl. Phys., **65**, 275, 1965.
2. Warsh K. L., Temmer G. M., Blieden H. R. Nucl. Phys., **44**, 329, 1963.
3. Сторишко В. Е., Попов А. И. «Изв. АН СССР», сер. физич., **28**, 1145—1152, 1964.
4. Omar H. H., Zaloubovsky I. I., Bark M. H. S., Zagloul R., Gontchar Y. J. Nucl. Phys., **56**, 97, 1964.
5. Blieden H. R., Temmer G. W., Warsh K. L. Nucl. Phys., **49**, 209, 1963.
6. Almqvist E., Bromley D. A., Kuchner I. Nucl. Phys., **21**, 555, 1960.
7. Von Brentano P., Ernst J., Häusser O., Mayer-Kuckuk T., Richter A., Von Witsch W. Phys. Letters, **9**, 43, 1964.
8. Hibert L. M., Durham F. E., Moak C. D., Zucker A. Nucl. Phys., **47**, 353, 1963.
9. Jenkin J. G., Earwaker L. O., Titterton E. W. Nucl. Phys., **44**, 453, 1963.
10. Ключарев А. П., Титов Ю. И. и др. Программа и тезисы XV ежегодн. совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. М.—Л., «Наука», 1965, стр. 124—125, 127, 130.
11. Kumabe I., Ogata H., Komatuzaki T., Inoue N., Tomita S., Yamada Y., Yamaki T., Matsumoto S. Nucl. Phys., **46**, 437, 1965.
12. Ogata H., Iton H., Masuda Y., Takamatsu K., Kawashima M., Masaike A., Kumabe I. J. Phys. Soc. Japan, **15**, 1719, 1960.
13. Alford W. P., Blau L. N., Cline D. Nucl. Phys., **61**, 368, 1965.
14. Deshpande V. K. Nucl. Phys., **47**, 257, 1963.
15. Dachnick W. W., Sherr R. Phys. Rev., **133 B**, 934, 1964.
16. Seldom Kaufman, Phys. Rev., **117**, 1532, 1960.
17. Теплов И. Б., Фатеева Л. Н. ЖЭТФ, **48**, 385, 1965.
18. Yamashita S. J. J. Phys. Soc. Japan, **16**, 2378, 1961.
19. Priest J. R., Tendam D. J., Bleuler E. Phys. Rev., **119**, 1391, 1960.
20. Стародубцев С. В., Романов А. М. Прохождение заряженных частиц через вещество, АН УзССР, Ташкент, 1962.
21. Васильев С. С., Михалева Т. Н., Чупрунов Д. Л. «Изв. АН СССР», сер. физ., **29**, 181, 1965; **30**, 214, 1966; ЖЭТФ, **47**, 1585, 1964; «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон. № 4, 88, 1964; Congres international de physique nucléaire, II, 427, 1964.
22. Михалева Т. Н., Зазулин В. С., Чупрунов Д. Л., Титов В. И. «Изв. АН СССР», сер. физ., **30**, 343, 1966; Чупрунов Д. Л., Зазулин В. С., Михалева Т. Н. «Атомная энергия», № 7, 1966.
23. Васильев С. С., Воробьев Ю. А., Михалева Т. Н., Чупрунов Д. Л. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 1, 1965.
24. Cindro N., Kulisic P., Strohs P. Phys. Letters, **6**, 205, 1963.
25. Lee L. L., Schiffer J. P. Phys. Letters, **4**, 104, 1963.

Поступила в редакцию  
6. 5 1965 г.

НИИЯФ