

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 67, ВЫПУСК 12
25 ИЮНЯ, 1998

Письма в ЖЭТФ, том 67, вып.12, стр.959 - 963

© 1998г. 25 июня

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОТОННО-ИЗБЫТОЧНОГО ЯДРА ^8Be В
РЕЗОНАНСНОМ РАССЕЯНИИ РАДИОАКТИВНОГО ЯДРА ^7Be НА
ВОДОРОДЕ**

*В.З.Гольдберг¹⁾, Г.В.Рогачев, М.С.Головков, В.И.Духанов, И.Н.Сериков,
В.А.Тимофеев*

*Российский научный центр "Курчатовский Институт",
123182 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 8 мая 1998 г.

Измерена функция возбуждения упругого резонансного рассеяния $^7\text{Be} + p$ под углом 180° в с.ц.м. Измерения проводились новым методом, сочетающим преимущества обратной кинематики и толстых мишеней. Получена новая информация о структуре уровней ядра ^8Be .

PACS: 21.10.Pc, 25.40.Ny, 27.20.+n

Проблема экзотических ядер – одна из самых интересных в современной ядерной физике. На трудном пути продвижения к границам ядерной стабильности получение радиоактивных пучков является наиболее принципиальным способом решения задачи.

В известных мировых центрах радиоактивные пучки получают путем фрагментации "обычных" ядер, ускоренных до высоких энергий (от 35 МэВ/А до 1 ГэВ/А). Продукты фрагментации сепарируют с помощью сложных магнитных систем. Отобранные продукты ядерных реакций (радиоактивные пучки) обладают энергией, близкой к энергии первичных пучков, характеризуются большим энергетическим разбросом (по сравнению с "обычными" пучками) и интенсивностью по крайней мере на семь порядков ниже, чем интенсивность первичных пучков. Следует отметить что высокая энергия радиоактивных пучков также может рассматриваться, как недостаток для осуществления стандартных ядерных реакций, поскольку эта энергия значительно превышает энергию Ферми в ядрах. Уменьшение энергии приводит к резкой потере интенсивности.

¹⁾ e-mail: GOLD@nucint.kiae.su

В работе [1] описан метод использования "рядовых" циклотронов для получения радиоактивных пучков. В этом методе тяжелые ионы с энергией 5-10 МэВ/А бомбардируют мишень из легкого вещества. При этом проигрыш в интенсивности первичных пучков и в толщине первичных мишеней (из-за сравнительно малой энергии) в значительной степени компенсируется благоприятной кинематикой и большими поперечными сечениями процесса, который может носить резонансный характер из-за малой относительной энергии в с.ц.м. Наконец, получаемая энергия радиоактивных пучков оказывается в диапазоне, удобном для изучения резонансного рассеяния (вторичного) методом, использующим преимущества обратной кинематики и очень толстых газовых мишеней (метод Гольдберга [2-4]). Настоящее сообщение содержит первые физические результаты, полученные на циклотроне РНЦ "Курчатовский институт". С помощью указанных методов получения радиоактивных пучков и их применения нами получены новые экспериментальные данные об уровнях ядра ${}^8\text{В}$. Это ядро представляет известный астрофизический интерес как источник солнечных нейтрино и интересно как пограничное ядро – вероятный кандидат на обладание протонным гало. Информация о схеме уровней ядра ${}^8\text{В}$ (зеркального по отношению к ${}^8\text{Li}$) также важна для объяснения β -распада ${}^8\text{He}$ и как тест для трехтельных подходов к решению задач ядерной физики. К сказанному следует добавить, что из-за экспериментальных трудностей изучения в ядре ${}^8\text{В}$ достоверно известны квантовые характеристики только одного возбужденного состояния с изотопическим спином $T = 1 \ 3^+$ (2.32 МэВ).

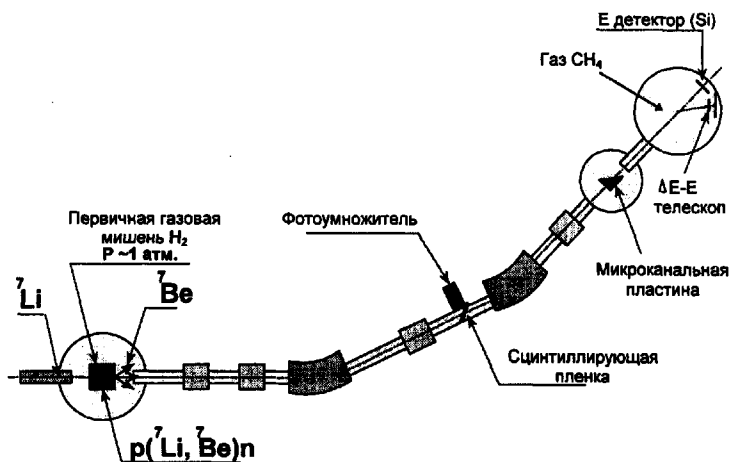


Рис.1. Схема экспериментальной установки МАСЭ, используемой для получения радиоактивного пучка ${}^7\text{Be}$ на циклотроне РНЦ "Курчатовский институт". В конце МАСЭ расположена камера рассеяния, заполненная метаном (CH_4)

В настоящей работе уровни ${}^8\text{В}$ изучали в резонансном упругом рассеянии ${}^7\text{Be}$ на водороде. Ядра ${}^7\text{Be}$ получали в реакции ${}^7\text{Li}(p, n)$ бомбардировкой газовой водородной мишени ионами ${}^7\text{Li}$, ускоренными на циклотроне РНЦ "Курчатовский институт" до энергии 53 МэВ. Ядра ${}^7\text{Be}$ (и другие продукты взаимодействия ${}^7\text{Li}$ с первичной мишенью) анализировали магнитным сепаратором МАСЭ. Схема экспериментальной установки показана на рис.1. В центре сепаратора помещали тонкий (20 мкм) ор-

ганический скintиллятор, который просматривался ФЭУ. Сцинтиллирующая пленка служила деградером (позволяющим добиться лучшей сепарации ${}^7\text{Be}$ путем подстройки магнитной жесткости второго плеча МАСЭ в соответствии с потерями ${}^7\text{Be}$ в пленке) и источником временного сигнала для анализа частиц по времени пролета. Кроме того, анализировали спектр амплитуд ФЭУ, который позволял отделить ${}^7\text{Be}$ от более легких примесей ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$ и p . В конце сепаратора (перед вторичной мишенью) ионы проходили через тонкую пленку – источник электронов для микроканальной пластины (МКП). Сигналы ФЭУ и МКП использовали для анализа времени пролета через участок МАСЭ длиной 2 м. Временное разрешение равнялось примерно 1 нс. Такой анализ позволял выделять ${}^7\text{Be}$ без заметных примесей других частиц. Интенсивность пучка ${}^7\text{Be}$ с энергией 32 МэВ (перед вторичной мишенью) была 10^4 частиц/сек. Сепарированный пучок радиоактивных ядер ${}^7\text{Be}$ направлялся на входную фольгу, отделяющую объем камеры рассеяния от МАСЭ. Камера рассеяния заполнялась метаном (CH_4), давление подбиралось таким образом, чтобы остановить ядра ${}^7\text{Be}$ до детектора, расположенного под углом 0° в л.с. Кроме одиночного детектора, использовался ΔE - E телескоп, расположенный рядом с одиночным детектором на угле, близком к 0° . Детектор регистрировал протоны отдачи, возникающие в акте рассеяния ${}^7\text{Be}$ на протонах молекулы метана. Анализ проводили по удельным и полным потерям энергии в телескопе и по времени пролета (относительно сигнала МКП) и энергии в одиночном детекторе. Контрольные измерения проводили, используя в качестве первичного пучка ${}^7\text{Li}$, полученный в тех же условиях, что и ${}^7\text{Be}$. По известным уровням ${}^8\text{Be}$ была оценена общая точность энергетической калибровки (лучше 20 кэВ) и энергетическое разрешение (лучше 30 кэВ). Больше сведений об использованных методах можно найти в работах [2–4].

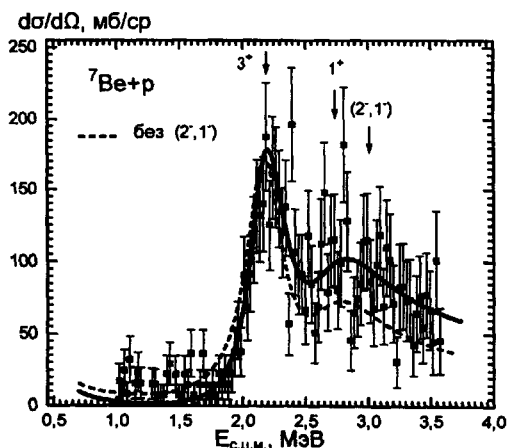


Рис.2. Функция возбуждения упругого рассеяния ${}^7\text{Be}+p$, измеренная под углом 180° в с.д.м. Сплошная кривая – наилучшая подгонка по потенциальной модели с использованием трех резонансов (3^+ фиксирован). Штриховая кривая демонстрирует подгонку без уровня $2S(2^-, 1^-)$

Измеренная функция возбуждения упругого рассеяния ${}^7\text{Be}$ на водороде под углом 180° , переведенная в с.д.м., показана на рис.2. Абсолютная точность измерений определяется, в основном, примесями других частиц в пучке ${}^7\text{Be}$, других газов в CH_4 , неточностями определения давления в мишени и неточностями расчета удельных потерь ${}^7\text{Be}$ в газе. Оценка всех факторов позволяет утверждать, что эта точность лучше 25%.

Для анализа функции возбуждения мы выбрали потенциальный подход в духе работы [5]. Отказ от обычного R -матричного анализа связан с тем, что ожидаемая плотность состояний невелика, а потенциальный подход позволяет легко сопоставлять спектры зеркальных ядер ${}^8\text{Li}$ и ${}^8\text{B}$. Для описания спектра состояний ядер ${}^8\text{Li}$ и ${}^8\text{B}$ был взят обычный потенциал Вудса – Саксона с "разумными" параметрами. Изменяя глубину потенциала, несложно подогнать положения уровней, однако рассчитанные ширины состояний оказываются всегда заметно больше экспериментальных (в частности, этот факт ясно указывает на сложный, неодночастичный характер рассматриваемых состояний). Для того чтобы обеспечить возможность подгонки ширины в потенциал Вудса – Саксона, вводился дополнительный барьер на поверхности ядра (отталкивающий потенциал) гауссовой формы. С помощью такого чисто математического трюка мы получили возможность описания как расположения, так и ширин состояний. Положение и ширина уровня 3^+ (2.32 МэВ) в ${}^8\text{B}$ фиксировались в соответствии с известными данными [6]. Положение и ширину уровня 1^+ (зеркального уровню 3.21 МэВ в ${}^8\text{Li}$) меняли, чтобы достичь лучшего описания функции возбуждения (рис.2). Оказалось, что во всех случаях гипотетического расположения уровня 1^+ в изученной области рассчитанное сечение заметно меньше измеренного. Пример расчета показан на рис.2 штриховой линией. Поскольку расчет основан на одноканальном приближении, то он предсказывает максимальное поперечное сечение, достижимое при отсутствии других каналов распада, кроме распада из состояний ${}^8\text{B}$ "назад" в основное состояние ${}^7\text{Be}$. Таким образом, полученный результат прямо указывает на существование в ядре ${}^8\text{B}$ еще одного неизвестного состояния в изученной области. Ближайшими к данной области являются состояния с $l = 2$ ($1d$) и $l = 0$ ($2S$). Однако состояние с $l = 2$ всегда оказывается слишком узким (из-за большого центробежного барьера) по сравнению с широкой измеренной структурой. Предположение о существовании $2S$ -состояния позволяет получить очень хорошее описание эксперимента, как видно на рис. 2 (сплошная кривая; расчет отнормирован на эксперимент с коэффициентом нормировки 1.2). Таблица обобщает полученные результаты.

Уровни в ${}^8\text{B}$

Уровень, I^π	Энергия, МэВ \pm кэВ	Γ с.ч.м., кэВ
3^+	2.32 ± 20	350 ± 30
1^+	2.83 ± 150	780 ± 200
$(1^-, 2^-)$	3.0	широкий

Сопоставление данных об уровне 1^+ в ${}^8\text{B}$ (2.83 МэВ), найденного в настоящей работе, с данными об уровне 1^+ в ${}^8\text{Li}$ (3.2 МэВ)[6] показывает, что ширины и положение уровней отличаются от расчетов, учитывающих кулоновские поправки на основе потенциальной модели. Хотя данных об уровне 1^+ в ${}^8\text{Li}$ мало [7], а исследование β -распада ${}^8\text{He}$ [8] указывает на необходимость "смещения" этого уровня в сторону более низких энергий возбуждения (как и настоящая работа), обнаруженные расхождения между результатами настоящей работы и литературными данными для уровня 1^+ не следует считать окончательно установленными. Для окончательного решения этой проблемы следует улучшить статистическую достоверность настоящих результатов. По-видимому, самый важный конкретный результат настоящей работы – это обнаружение низколежащего широкого состояния $2S$ в ядре с $A = 8$. Действительно, неожиданное опускание $2S$ -состояний играет основную роль в соз-

дании гало легких ядер, лежащих на границе стабильности, например, в ^{11}Be , ^{11}Li и т.д. Причина возникновения низколежащих (или основных) состояний $2S$ в легких ядрах не ясна и активно обсуждается в настоящее время [9]. Одна из основных идей объяснения этого явления сводится к предположению о существенной деформации ядер, обладающих малой энергией связи и исходит, по-видимому, из предположения о структуре ядра ^{11}Be , опубликованного в монографии Бора и Моттельсона [10]. В случаях больших деформаций одночастичные ширины S -уровней должны резко уменьшаться [10], наши наблюдения широких $2S$ -состояний ранее в ^{11}N [5] и теперь в ^8B свидетельствуют против этой гипотезы. Предстоит оценить, как повлияют новые данные о широком уровне $2S$ на расчеты сечения радиационного захвата протонов ^7Be при энергиях, соответствующих температуре Солнца.

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку, грант 97-02-17113, а также Международному фонду Сороса за поддержку этих исследований на ранней стадии.

-
1. В.З.Гольдберг, А.Е.Пахомов, ЯФ **56**, 31 (1993).
 2. К.П.Артемов, О.П.Белянин, А.Л.Ветошкин и др., ЯФ **52**, 634 (1990).
 3. V.Z.Goldberg, *Int. Conf. Clustering Phenomena in Atoms and Nuclei 1991*, Eds. M.Brenner et al., Springer Series in Nuclear and Particle Physics, 1992, p. 366.
 4. К.П.Артемов, М.С.Головков, В.З.Гольдберг и др., ЯФ **55**, 2615 (1992).
 5. L.Axelsson, M.J.G.Borge, S.Fayans et al., *Phys. Rev.* **C54**, R1511 (1996).
 6. F.Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys.* **A490**, 1 (1988).
 7. H.D.Knox and R.O.Lane, *Nucl. Phys.* **A359**, 131 (1981).
 8. L.V.Grigorenko, N.B.Shul'gina, and M.V.Zhukov, *Nucl. Phys.* **A607**, 277 (1996).
 9. P.G.Hansen, A.S.Jensen, and B.Jonson, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **45**, 591 (1995).
 10. О.Бор, В.Моттельсон, *Структура атомного ядра*, М.: Мир, 1977.