

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P7-86-309

А.В.Белозеров, К.Борча, З.Длоугы, А.М.Калинин,
Нгуен Хоай Тьяу, Ю.Э.Пенионжкевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ^3n И ^4n
В РЕАКЦИИ $^7\text{Li} + ^{11}\text{B}$

Направлено в журнал "Письма в ЖЭТФ"

1986

Изучение свойств нуклидов, расположенных вблизи границы ядерной стабильности, дает возможность исследовать ядерную материю в экстремальных состояниях и получать экспериментальную информацию для проверки различных модельных представлений о структуре ядер и свойствах ядерных сил. Граница ядерной стабильности практически достигнута в области легчайших элементов ($Z < 10$), где наблюдаются ядра с большим избытком нейтронов ($N/Z > 2,5$), имеющие энергии связи, близкие к нулю, в то время как энергия отделения нейтрона в известных изотопах средних и тяжелых элементов еще далека от нуля. С ростом нейтронного избытка энергия связи нейтрона уменьшается, а затем должна обращаться в нуль. Однако образовавшаяся нестабильная ядерная система не обязательно должна распадаться мгновенно. Центробежный барьер и ряд структурных факторов ядер могут замедлить распад, что приводит к существованию за границей ядерной стабильности области квазистационарных ядер. В настоящее время экспериментально найдено 8 нейтроноизбыточных квазистационарных ядер (${}^2\text{n}$, ${}^4\text{n}$, ${}^6\text{n}$, ${}^5\text{He}$, ${}^7\text{He}$, ${}^9\text{He}$, ${}^{10}\text{Li}$ и ${}^{13}\text{Be}$). Между тем трудно утверждать, что в области легчайших ядер граница устойчивости достигнута, т.к. квазистационарных ядер обнаружено очень мало. Кроме этого, нейтроноизбыточные ядра легчайших элементов могут оказаться значительно стабильнее, чем это предполагалось ранее. Вопрос о стабильности мультинейтронных ядер был поставлен Я.Б.Зельдовичем и В.И.Гольданским ^{/1/}, предсказавшими существование ядерно-стабильного ${}^8\text{He}$, которое было затем открыто экспериментально ^{/2/}. Эти работы в значительной мере стимулировали развитие исследований по поиску стабильных нейтроноизбыточных ядер. Особенно принципиальной с этой точки зрения является проблема стабильности чисто нейтронных ядер. Причем, как показано в работе А.И.База и др. ^{/3/}, в случае стабильности тетранейтрона (${}^4\text{n}$) можно с большой вероятностью предполагать существование и более тяжелых нейтронных ядер, а в пределе — большие нейтронные капли. Между тем, как следует из работы ^{/3/}, отсутствие стабильного тетранейтрона еще не исключает существования более тяжелых мультинейтронов, т.к. из-за наличия поверхностного натяжения должен меняться определенный критический размер минимальной "нейтронной капли", которая может оказаться много больше тетранейтрона.

Возможность существования ядерно-стабильных или квазистационарных систем из трех, четырех и большего числа нейтронов неоднократно исследовалась экспериментально и теоретически. Последние теоретические предсказания ядерной стабильности ${}^3\text{n}$, ${}^4\text{n}$ весьма противоречивы:

от полного отсутствия резонансов в этих системах ^{/4/} до возможности существования связанного тринейтрона ^{/5/}.

В большом числе экспериментальных работ предпринимались попытки синтеза и регистрации ядерно-стабильных мультинейтронов. Для получения мультинейтронов использовались реакции деления на тепловых, быстрых нейтронах и дейтронах ^{/6,7,8/}, реакции фрагментации ^{/9,10/}, двойной перезарядки на α -кластерах тяжелых ядер ^{/11,12/}, развала легких ядер после захвата мезона ^{/13,14,15/}. Использовались также реакции с ^3He , ^4He ^{/16,17,18,19/}, реакции двойной перезарядки мезонов на ^3He и ^4He ^{/20-25/}, реакции $T(\pi^-, \gamma)$ ^{/26/} и $^4\text{He}(\gamma, 2\pi^+)$ ^{/27/}. Мультинейтроны регистрировались либо с помощью времяпролетной методики, либо по активации с последующим радиохимическим выделением продуктов распада ядер, захвативших мультинейтрон. В большинстве работ был получен отрицательный результат. Только авторы работ ^{/9,19/}, в которых использовалась активационная методика, обнаружили стабильные мультинейтроны. Между тем, подобные эксперименты требуют чрезвычайно высокой чистоты мишени и тщательного учета различных фонов. Поэтому, как это оказалось впоследствии, эффект, наблюдаемый в работе ^{/9/}, можно было объяснить фоном. Более однозначный, на наш взгляд, результат о стабильности нейтронных ядер извлекается из экспериментов, в которых измеряется энергетический спектр сопряженного продукта. В этом случае можно сделать заключение не только о стабильности ядра, но и измерить его массу, так, как это было сделано при определении стабильности ядер ^4H , ^5H и ^6H ^{/28,29/}.

Так, из анализа энергетических спектров π^+ -мезонов и γ -квантов в реакциях $^3\text{He}(\pi^-, \pi^+)^3\text{n}$ ^{/20/} и $T(\pi^-, \gamma)^3\text{n}$ ^{/26/} было сделано заключение о наличии резонанса и сильном взаимодействии в конечном состоянии в системе, состоящей из трех нейтронов (3n). Подобный результат сильного взаимодействия в системе (4n) был получен в работе ^{/25/}, где измерялся спектр π^+ -мезонов в реакции $^4\text{He}(\pi^-, \pi^+)^4\text{n}$. Таким образом, вопрос о стабильности мультинейтронов требует дальнейшего исследования. Целью настоящей работы является изучение систем ^3n , ^4n в двухтелных реакциях $^7\text{Li}(\text{II}^{\text{B}}, ^{15}\text{O})^3\text{n}$, $^7\text{Li}(\text{II}^{\text{B}}, ^{14}\text{O})^4\text{n}$. Выбор этих реакций объясняется следующими соображениями.

Использование прямых реакций с тяжелыми ионами, имеющих два продукта в выходном канале, позволяет определять свойства одного из партнеров по энергетическому спектру другого. Это обстоятельство становится особенно важным, если исследуемый продукт находится в несвязанном состоянии. Тогда, измеряя энергетический спектр сопряженного продукта реакции, который должен быть нуклоностабильным, можно получить информацию о массе в основном состоянии и низколежащих возбужденных состояниях изучаемого ядра. Между тем, кроме возбужденных

состояний исследуемых ядер в энергетических спектрах могут проявляться возбужденные состояния измеряемого продукта. С этой точки зрения ядра ^{14}O , ^{15}O являются удобными для идентификации уровней сопряженных продуктов, их собственные энергетические уровни имеют значения больше 5 МэВ.

Эксперименты проводились на пучке ионов $\text{II}^{\text{B}+2}$ циклотрона У-300 с энергией 88 МэВ, энергия пучка периодически измерялась в процессе эксперимента по упругому рассеянию на тонкой мишени из Ar, изменение энергии пучка в процессе длительных измерений составило величину ~ 250 кэВ и учитывалось при обработке спектров. Мишень из ^7Li толщиной ~ 350 кг/см² с обогащением 99,2%, приготавливалась вакуумным напылением на тонкую ~ 20 кг/см² органическую подложку. После напыления мишень хранилась в вакууме для исключения интенсивного окисления.

Продукты реакции регистрировались под углом $8^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$, в телесном угле 0,6 мср. Установка для проведения экспериментов, подробно описанная в ^{/30/}, состояла из магнитного анализатора МСП-144 с ионизационной камерой в фокальной плоскости. Измерение трех параметров ΔE , E и x (координата вдоль фокальной плоскости) позволяло идентифицировать изотоп и измерять энергетические спектры. Неопределенность в измерении энергии в данном эксперименте составила величину ~ 600 кэВ и определялась энергетическим разрешением пучка, толщиной мишени и угловой апертурой спектрометра.

Энергетический спектр ^{15}O , измеренный в диапазоне 52+76 МэВ для реакции $^7\text{Li}(\text{II}^{\text{B}}, ^{15}\text{O})^3\text{n}$, показан на рис.1. Верхняя шкала соответствует энергии возбуждения в системе из трех нейтронов (отсчет ведется от нулевой энергии связи, показанной на рисунке стрелкой). Шпилькой кривой представлены результаты расчетов фазового пространства в предположении, что вклад дают два канала реакции $^7\text{Li} + \text{II}^{\text{B}} \rightarrow ^{15}\text{O} + \text{n} + \text{n} + \text{n}$ и $^7\text{Li} + \text{II}^{\text{B}} \rightarrow ^{15}\text{O}^* + \text{n} + \text{n} + \text{n}$ ($E^* = 5,183$ МэВ). Вклады каналов с образованием основного и первых возбужденных уровней ^{15}O , вычисляемые при помощи специальной подпрограммы, составляли 0,36 и 0,64 соответственно. Учет в расчете других каналов, в частности попытка сгруппировать два из трех нейтронов в выходном канале с нулевой энергией связи, дает значительно худшее согласие с экспериментальными точками. Из рисунка видно, что не наблюдается каких-либо значительных отклонений от кривой фазового пространства, что свидетельствует об отсутствии в системе трех нейтронов квазистационарного состояния, заселяемого в данной реакции. Отсутствие событий с энергией, меньшей нулевой энергии связи, позволяет определить верхнюю границу образования связанного тринейтрона в данной

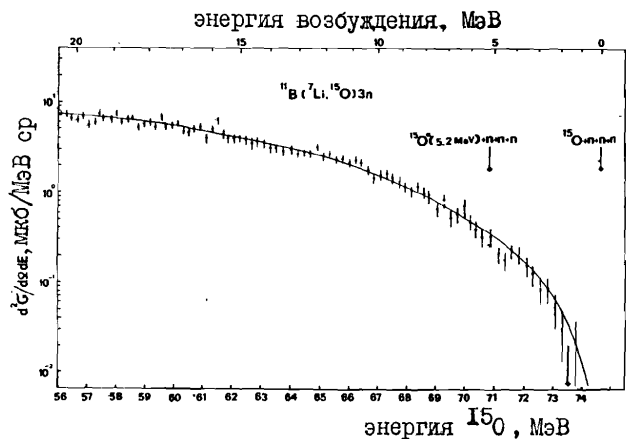


Рис.1. Энергетический спектр I^{50} из реакции $^{11}\text{B}(^7\text{Li}, I^{50})3n$. Сплошной линией показана сумма кривых для фазовых объемов $I^{50} + n + n + n$ и $I^{50*}(5,2 \text{ МэВ}) + n + n + n$ в выходном канале реакции.

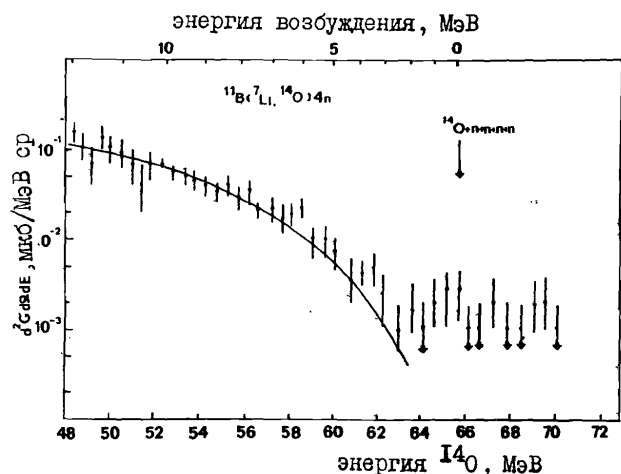


Рис.2. Энергетический спектр I^{40} из реакции $^{11}\text{B}(^7\text{Li}, I^{40})4n$. Сплошной линией показана кривая фазового объема для пятичастичного развала в выходном канале реакции $I^{40} + n + n + n + n$.

реакции, которая составляет 10 нб/ср. На рис.2 представлен энергетический спектр I^{40} , измеренный в реакции $^7\text{Li}(^{11}\text{B}, I^{40})4n$, верхняя шка-

ла обозначает энергию возбуждения в системе из четырех нейтронов. Правее стрелки, соответствующей нулевой энергии связи нейтронов в системе 4n , наблюдается несколько событий, объясняемых фоном эксперимента, который в основном определяется наложением импульсов в ионизационной камере и соответствует сечению ~ 1 нб/ср. На рис.2 сплошной кривой показано расчетное фазовое пространство для пятичастичного развала в выходном канале $^7\text{Li} + ^{11}\text{B} \rightarrow I^{40} + n + n + n + n$. Как видно, расчет хорошо описывает экспериментальные точки. Попытка описать экспериментальный спектр с помощью кривых фазового пространства, соответствующего другим каналам реакции, не привело к удовлетворительному согласию с экспериментальными данными. Небольшое превышение над кривой фазового пространства при энергиях I^{40} 58,5 МэВ и 61,5 МэВ объясняется фоном от реакций на примеси углерода в мишени $I^2\text{C}(^{11}\text{B}, I^{40})^9\text{Li}$ и $I^2\text{C}(^{11}\text{B}, I^{40})^9\text{Li}^*$ ($E^*=2,7 \text{ МэВ}$), которые измерялись нами независимо на углеродной мишени. Между тем, из сравнения расчетного фазового пространства, соответствующего пятичастичному развалу в выходном канале и экспериментальных точек на рис.2, видно, что в районе нулевой энергии связи нейтронов в системе из четырех нейтронов ($E=65,8 \text{ МэВ}$) наблюдаются 6 событий в двух каналах при среднем значении фона 0,5 событий на канал. Не исключено, что эти события можно отнести к фоновой реакции на примесях кислорода. В этом случае реакции $I^{60}(^{11}\text{B}, I^{40})I^{32}\text{B}$ должен соответствовать пик при энергии $E=65 \text{ МэВ}$. Однако малая статистика не позволяет сделать однозначных выводов о природе этого пика. Окончательный вывод можно будет сделать после существенного улучшения статистики и выбора такой реакции, в которой пики, соответствующие нулевой энергии связи нейтронов в системе из четырех нейтронов и фоновой реакции на кислороде, будут разнесены по энергетической шкале более чем на 1,5 МэВ. Этот эксперимент предполагается осуществить с использованием реакции $^7\text{Li}(^9\text{Be}, I^{20})4n$.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить академика Г.Н.Флорова и профессора Ю.Ц.Оганесяна за интерес к данной работе и полезные обсуждения ее результатов, Б.Г.Новацкого за обсуждение результатов настоящей работы и предоставление литиевой мишени.

Л и т е р а т у р а

1. Я.Б.Зельдович, ЖЭТФ, 1960, 38, 1123.
В.Н.Гольданский, ЖЭТФ, 1960, 38, 1637.
2. Yu.A.Batusov et al. Phys.Lett. 1966, 22, 487.
3. Базь А.Н. и др. "Легкие и промежуточные ядра вблизи границ нуклонной стабильности", М., "Наука", (1972).

4. А.М.Бадалян и др. ЯФ, 4I, (1985) стр.1460.
5. В.В.Комаров, А.М.Попова Вестн.Моск.Ун-та сер.3(1985) т.26, № 4, стр. 2I.
6. J.P.Schiffer and Vandenbosh, Phys.Lett. 5 (1963) 292.
7. В.Р.Бурмистров и др. ЯФ, 4, (1966), стр.332.
8. S.Ciergacks et al. Phys.Rev. 137 (1965)B, 945.
9. C.Detraz Phys.Lett. v.66B (1977) No.4 333.
10. A.Turkevich et al. Phys.Rev.Lett. v.38 (1977) 20, 1129, Phys.Lett. 72B (1977) 163.
11. Ю.А.Батусов и др. Сообщение ОИЯИ PI-7475, Дубна, 1973.
12. D.Chultem et al. Nucl.Phys. (1979) v.316, 290.
13. R.C.Cohen et al. Phys.Lett. 16 (1965) 292.
14. Ю.А.Батусов и др. Препринт ОИЯИ, PI-3306, Дубна, 1967.
15. Н.М.Агабабян и др. ЯФ, 15, 1972, стр.18.
16. De Boer F.W.N. et al. Nucl.Phys. 1980, A350, 149.
17. O.D.Brill et al. Phys.Lett. 12 No.1 (1964) 51.
18. J.Cerny et al. Phys.Lett., 53B (1977), 247.
19. В.А.Агеев и др. Препринт КИЯИ-85-4, КЯИ АН УССР (1985).
20. J.Sperinde et al. Phys.Lett. 32B (1970) 3, 185.
21. R.E.P.Davis et al. Bull. Am. Phys. Sec., 9, 1964, 627.
22. L.Gilly et al. Phys.Lett. 19, 1965, 335.
23. L.Kaufman et al. Phys.Rev., 175, 1968, 1358.
24. A.Steth et al. Phys.Rev.Lett. 47 (1981) 5,6, 333.
25. J.E.Ungar et al. Phys.Lett. 144B (1984) 5,6, 333.
26. J.A.Bistirlich Phys.Rev.Lett. 36 (1976) 16, 942.
27. A.Amaldi et al. Instr.Super.Sanita (Rome), Report JSS 64/65.
28. Д.Б.Александров и др. ЯФ, 39 (1984), 5I3.
29. A.V.Belozyorov et al. Preprint JINR E7-85-966 (1985), to be publish in Nucl.Phys.
30. А.В.Белозеров и др. Сообщение ОИЯИ I3-85-535, Дубна, 1985.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Рукопись поступила в издательский отдел
14 мая 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Белозеров А.В. и др.

P7-86-309

Исследование 3n и 4n в реакции $^7Li + ^{11}B$

В реакции $^{11}B/88 \text{ МэВ} + ^7Li$ измерялись энергетические спектры ^{14}O и ^{15}O , под углом 8° , для получения информации о партнерах в выходном канале реакции - системах 4n и 3n . Энергетические спектры хорошо описываются кривыми фазового пространства многочастичного развала в выходном канале без учета взаимодействия в конечном состоянии, однако в спектре ^{14}O содержится указание на возможное образование квазистационарного 4n . Предел по сечению образования связанных 4n и 3n в данной реакции составляет величину 1 нб/ср и 10 нб/ср соответственно.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Belozyorov A.V. et al.

P7-86-309

Search for 3n and 4n in the $^7Li + ^{11}B$ Reaction

The energy spectra of ^{14}O and ^{15}O nuclei have been measured in the ^{11}B (88 MeV) + 7Li reaction at 8° angle to obtain information about their partners in reaction exit channel - 4n and 3n systems. The energy spectra are well described by many-body phase space curves calculated without final state interaction in the exit channel, but in the ^{14}O spectrum there are some indications to the prediction of unbound 4n . The upper limits for the production cross sections of bound 4n and 3n systems in this reaction are 1 nb/sr and 10 nb/sr, respectively.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1986