

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3539/82

2/VI-82

P7-82-302

Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Э.Герлик,  
Р.Калпакчиева, Т.Павлат, К.Борча, А.В.Белозеров,  
Ю.П.Харитонов, С.П.Третьякова, В.Г.Субботин,  
С.М.Лукиянов, Н.В.Пронин, А.А.Быков

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОИСКУ ЯДЕР  $^{10}\text{Ne}$   
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Направлено в «Письма в "Журнал экспериментальной  
и теоретической физики"»

1982

Получение и изучение свойств нуклидов, расположенных вблизи границ нуклонной устойчивости, представляет большой интерес. Это объясняется возможностью исследования ядерной материи в экстремальных состояниях и важностью получения экспериментальной информации для проверки тех или иных модельных представлений о структуре ядра, на основе которых делается предсказание свойств ядер в различных областях масс. Большой прогресс, произошедший в последнее время в области ускорительной техники и методики эксперимента, позволил существенно продвинуться к границам нуклонной устойчивости, особенно в области легких ядер<sup>1-4/</sup>. Одним из наиболее эффективных методов получения ядер, удаленных от линии  $\beta$ -стабильности, явилось использование реакций с тяжелыми ионами<sup>4/</sup>. Однако получение ядер вблизи границы нуклонной устойчивости связано с большими методическими сложностями, возникающими вследствие малого сечения их образования  $/10^{-31}-10^{-34} \text{ см}^2/$  и краткости времени их жизни, достигающего величины  $\sim 10^{-8} \text{ с}$ . Особые требования предъявляются к методу синтеза таких ядер в связи с необходимостью их получения с малой энергией возбуждения из-за слабой связи нуклонов в этих ядрах.

Одним из принципиальных вопросов в этой проблеме является определение стабильности нуклида  $^{10}\text{He}$ . Этот вопрос уже более 15 лет исследуется теоретиками и экспериментаторами. В работе База и др.<sup>5/</sup> было показано, что устойчивость ядра  $^{10}\text{He}$  относительно распада  $^{10}\text{He} \rightarrow ^8\text{He} + 2n$  существенно зависит от центрального потенциала взаимодействия двух нуклонов с полным спином и изотопическим спином  $S=T=1$ . Форма и величина этого потенциала определяются неточно, а его небольшое изменение, не противоречащее данным по NN-рассеянию, может приводить в расчете к устойчивости не только ядер  $^{10}\text{He}$ , но и более тяжелых изотопов гелия.

Следует отметить, что все теоретические оценки и экстраполяции на основе экспериментальных данных дают различные значения масс ядер в области даже легких ядер и соответственно определяют неоднозначно границу нуклонной устойчивости<sup>5-8/</sup>. Ответ на эти вопросы может дать только эксперимент.

Первые экспериментальные поиски ядер  $^{10}\text{He}$ , проведенные в 1966-1967 гг. при исследовании тройного деления  $^{252}\text{Cf}$ <sup>9,10/</sup> и продуктов реакции взаимодействия протонов с энергией 5,3 ГэВ с ядрами урана<sup>11/</sup>, дали лишь верхнюю границу образования  $^{10}\text{He}$

по отношению к  $^8\text{He}$ , равную  $\leq 1/20$  в первом случае и  $1/100$  во втором. В последующих экспериментах поиски ядер  $^{10}\text{He}$  велись в тройном делении  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  тепловыми нейтронами<sup>8,11/</sup>, а также в реакциях многонуклонной передачи  $^{232}\text{Th}(^{15}\text{N}, -5p) \rightarrow ^{10}\text{He}$ <sup>12/</sup>. В этих экспериментах  $^{10}\text{He}$  также не наблюдался.

Недавно было проведено еще два эксперимента по поиску ядер  $^{10}\text{He}$  в реакциях фрагментации ядра-мишени  $^{232}\text{Th}$  на пучке дейтронов с импульсом 4,8 ГэВ/с<sup>13/</sup>, а также тройного деления  $^{252}\text{Cf}$ <sup>13/</sup>. В первом случае была опять установлена лишь верхняя граница сечения образования изотопа  $^{10}\text{He} \sim 2 \text{ мкб}$ , во втором случае наблюдалось несколько событий, соответствующих по энергии ядрам  $^{10}\text{He}$ , которые образуются в качестве легкой частицы в реакции тройного деления. Однако факт обнаружения ядер  $^{10}\text{He}$  в этом эксперименте, по мнению самих авторов, нуждается в дополнительной экспериментальной проверке с более совершенной методикой.

Важным этапом в решении этой проблемы явились эксперименты по определению массы нестабильного ядра  $^9\text{He}$ <sup>14/</sup>. В реакции двойной перезарядки под действием  $\pi$ -мезонов  $^9\text{Be}(\pi^-, \pi^+) ^9\text{He}$  на основе измеренного энергетического спектра пионов был найден дефект массы ядра  $^9\text{He}$ , который оказался равным 40,98 МэВ, что почти на 2 МэВ ниже значения, приведенного ранее в других работах<sup>15/</sup>. Энергия связи нейтрона в ядре  $^9\text{He}$ , определенная на основании результатов этих же экспериментов, хотя и является отрицательной  $-1,31 \text{ МэВ}$ , однако на 1-2,5 МэВ превышает энергию связи, предсказываемую ранее<sup>15/</sup>. Если теперь в расчетах по формуле Гарвея-Келсона<sup>16/</sup> принять данное значение массы  $^9\text{He}$ , то  $^{10}\text{He}$  оказывается стабильным по отношению к испусканию одного нейтрона  $/B(n) = = +0,93 \text{ МэВ}/$ , но нестабильным по отношению к испусканию двух нейтронов  $/B(2) = -1,66 \text{ МэВ}/$ <sup>14/</sup>. Дефект массы  $^{10}\text{He}$  найден равным 49,40 МэВ<sup>14/</sup>. Эти оценки, однако, имеют неопределенность не менее 1 МэВ, и поэтому нельзя, в принципе, исключить стабильность  $^{10}\text{He}$  и по отношению распада на  $^8\text{He} + 2n$ .

Настоящая работа была предпринята с целью поисков ядер  $^{10}\text{He}$  в различных реакциях с тяжелыми ионами с использованием высокочувствительной установки, регистрирующей образование легких частиц вплоть до сечений  $\sim 5 \cdot 10^{-35} \text{ см}^2/\text{ср}$ .

#### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нами исследовался выход всех известных изотопов He, образующихся в ядерных взаимодействиях ускоренных ионов  $^{10,11}\text{B}$  и  $^{22}\text{Ne}$  с мишенями  $^{67}\text{Tl}$  и  $^{232}\text{Th}$  в энергетическом диапазоне от 8 до 10 МэВ/нуклон. Эксперименты проводились на ускорителе тяже-

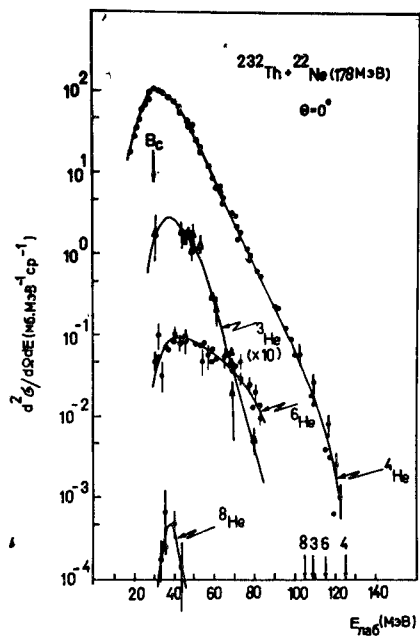


Рис.1. Энергетические спектры изотопов He, измеренные в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne} / 178 \text{ МэВ}$ . Стрелками на оси  $E_{\text{лаб}}$  указаны максимально возможные энергии разных изотопов, рассчитанные в предположении о двухтелном механизме реакции /16/.

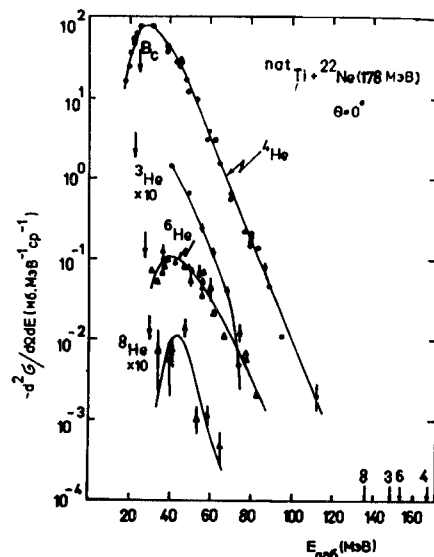


Рис.2. То же, что на рис.1, для реакции  $^{\text{ест}}\text{Ti} + ^{22}\text{Ne} / 178 \text{ МэВ}$ .

лых ионов У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Для изучения энергетических спектров и сечений образования этих ядер под углами  $0^\circ$  и  $20^\circ$  использовался магнитный спектрометр МСП-144, в фокальной плоскости которого располагался телескоп из  $\Delta E-E$  полупроводниковых детекторов. Полная эффективность регистрации спектрометра с одним телескопом, состоящим из детекторов с диаметром 17 мм, составляла  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  ср. Толщина мишени во всех опытах была  $2,5-7 \text{ мг/см}^2$ , ток пучков ионов на мишени равнялся  $3-7 \text{ мкА}$ . На рис.1-4 представлены энергетические спектры изотопов гелия для реакций  $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne} / 16/$ ,  $^{\text{ест}}\text{Ti} + ^{22}\text{Ne} / 16/$ ,  $^{\text{ест}}\text{Ti} + ^{10}\text{B}$  и  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$ . Из рисунков видно, что наибольшее сечение образования изотопа  $^8\text{He}$  имеет место в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$  /рис.4/. Путем экстраполяции экспериментальных данных по сечениям образования изотопов гелия /рис.5/ мы нашли, что сечение образования  $^{10}\text{He}$  в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$  должно составлять около  $5 \cdot 10^{-3}$  мб/ср. Эта реакция и была выбрана нами для поиска ядер  $^{10}\text{He}$ .

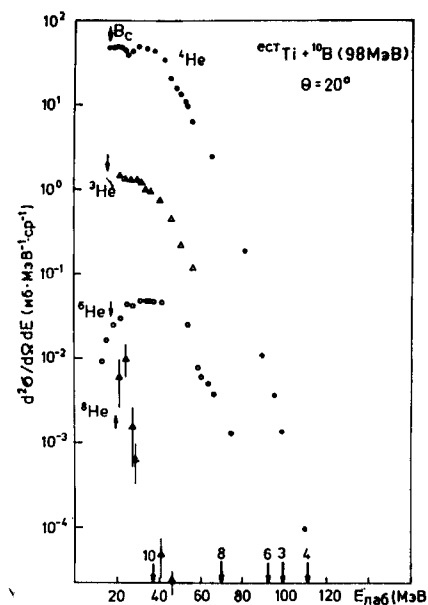


Рис.3. То же, что и на рис.1, для реакции  $^{\text{ест}}\text{Ti} + ^{10}\text{B} / 98 \text{ МэВ}$ .

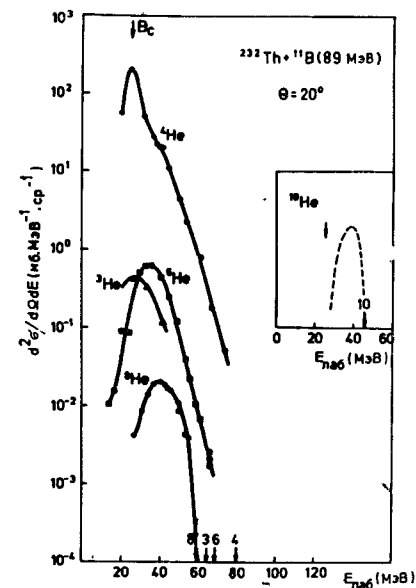


Рис.4. То же, что на рис.1, для реакции  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B} / 89 \text{ МэВ}$ . Пунктиром изображена предполагаемая форма спектра  $^{10}\text{He}$ .

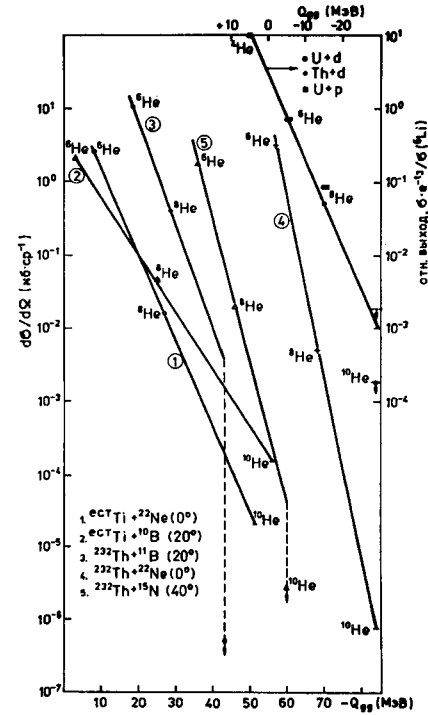


Рис.5. Зависимость выходов гелиевых изотопов от  $Q$  реакции ( $Q_{\text{гг}} = (M_1 + M_2) - (M_3 + M_4)$ ) для реакций с дейтронами и протонами /3/ тяжелыми ионами  $^{15}\text{N} / 12/$ ,  $^{22}\text{Ne} / 16/$ ,  $^{10,11}\text{B}$  /настоящая работа/.

Энергетический интервал регистрации ядер  $^{10}\text{He}$  выбирался таким образом, чтобы перекрывался интервал энергии, заключенный между энергией, соответствующей выходному кулоновскому барьеру, и энергией, соответствующей кинематическому пределу, рассчитанному в предположении о двухтельном механизме реакции<sup>/16/</sup>. Эти значения составляли 25 и 45,5 МэВ соответственно. Положение максимума в энергетическом спектре  $^{10}\text{He}$  определялось экстраполяцией наиболее вероятных энергий спектров  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ , образованных в этой же реакции  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$ . Максимальный выход ядер ожидался при энергии 40 МэВ.

Для регистрации ядер  $^{10}\text{He}$  нами была использована система из 8 полупроводниковых телескопов, расположенная в фокальной плоскости магнитного спектрометра. Диаметр детекторов составлял 20 мм. Толщины  $\Delta E$ -детекторов составляли 60-200 мкм, а  $E$ -детекторов - 1,5-2 мм. При выбранном магнитном поле система телескопов перекрывала энергетический диапазон для  $^{10}\text{He}$  от 26 до 31 МэВ. Использовался еще один полупроводниковый телескоп, положение которого соответствовало энергии  $^{10}\text{He}$   $40 \pm 0,5$  МэВ. Информация с полупроводниковых телескопов в виде  $\Delta E, \Delta E', E$  и времени пролета записывалась на ЭВМ типа СМ-3. Подобная система регистрации позволяла проводить двойную идентификацию зарегистрированных частиц<sup>/21/</sup>. Применяя функции идентификации типа

$$(\Delta E_1 + \Delta E_2 + E)^{1,73} - (\Delta E_2 + E)^{1,73} = ID_1,$$

$$(\Delta E_2 + E)^{1,73} - E^{1,73} = ID_2,$$

можно было построить распределение отношений  $ID_2/ID_1$ , среднее значение которых с высокой точностью совпадало с известным отношением толщин детекторов  $\Delta E_2$  и  $\Delta E_1$ . На следующем этапе обработки данных это среднее значение  $ID_2/ID_1$  с его дисперсией задавалось как критерий отбора нужных событий. Такая система регистрации отбора событий позволяла существенно повысить надежность идентификации. Имелась и дополнительная возможность идентификации по времени пролета.

Кроме использования телескопов из полупроводниковых детекторов нами применялся также другой метод, основанный на регистрации треков легких ядер. Для этой цели в диапазоне энергий  $^{10}\text{He}$  от 32 до 39 МэВ в фокальной плоскости магнитного спектрометра располагался диэлектрический детектор ядерных частиц типа CR-39<sup>/17/</sup>. CR-39 - это промышленное название аморфного детектора на основе амилдигликолькарбоната/. Толщина слоя CR-39 составляла 500 мкм, что достаточно для пол-

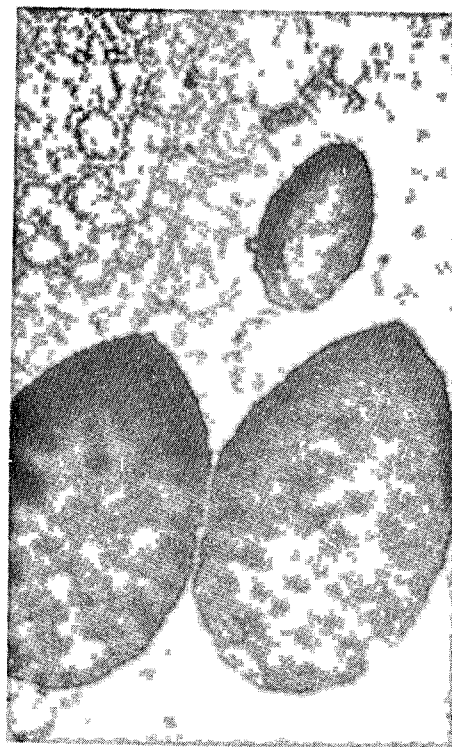
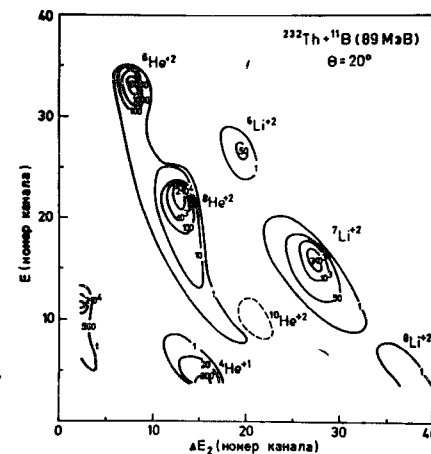


Рис.6. Микрофотография треков изотопов  $^8\text{He}$  /15 мкм,  $dE/dx = 0,76$  МэВ см<sup>2</sup>/мг,  $E = 0,9$  МэВ/н/ и  $^6\text{Li}$  /35 мкм,  $dE/dx = 1,7$  МэВ см<sup>2</sup>/мг,  $E = 0,9$  МэВ/н/ при травлении детектора со стороны остановки частицы. Увеличение - 1650X.

Рис.7.  $\Delta E$ - $E$  матрица, полученная с помощью телескопа, расположенного в области энергии  $^{10}\text{He}$  40 МэВ, при облучении Th -мишени ионами  $^{11}\text{B}$ .



ного поглощения  $^{10}\text{He}$  с энергией до 45 МэВ, входящего в детектор под углом  $41^\circ$ . Детектор CR-39 позволяет регистрировать все частицы, входящие в фокальную плоскость спектрометра, практически с эффективностью 100%.

Определяющим фактором идентификации следов частиц в пластике является удельная ионизация частицы  $dE/dx$ , которая однозначно связана с диаметром трека. Отношение энергии любых двух частиц сохраняется постоянным для каждой точки фокальной плоскости магнитного спектрометра. В связи с этим можно подобрать такую толщину детектора, при которой различие отношений  $dE/dx$  для частиц изучаемой группы будет максимальным. Проведенный нами расчет  $dE/dx$  для разных частиц, регистрируемых в пла-

стике CR-39, показал, что на глубине вблизи конца пробега  $^{10}\text{He}$  с энергией 33 МэВ  $dE/dx$  будет равно 1,5 МэВ см<sup>2</sup>/мг. На той же глубине пластика для ядер  $^7\text{Li}$ , имеющих наиболее близкие к ядрам  $^{10}\text{He}$  удельные потери,  $dE/dx = 1,0$  МэВ см<sup>2</sup>/мг. Для всех остальных ионов эта величина сильно отличается от потерь для  $^{10}\text{He}$ . Для примера на рис.6 показана микрофотография треков изотопов  $^8\text{He}$  и  $^6\text{Li}$ , удельные потери которых равны 0,76 и 1,7 МэВ см<sup>2</sup>/мг соответственно. Сильное отличие диаметров треков для этих изотопов, удельные потери которых примерно такие же, как для случая  $^{10}\text{He} - ^7\text{Li}$ , позволяет сделать вывод о возможности надежной идентификации. Указанным методом можно регистрировать одно событие образования  $^{10}\text{He}$  на фоне  $10^6$  частиц, попадающих в детектор.

### ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис.7 представлена  $\Delta E_2 - E$  матрица, полученная с помощью одного телескопа, расположенного в области энергии  $^{10}\text{He}$  40 МэВ, при облучении Th-мишени ионами  $^{11}\text{B}$ . Пунктиром на рисунке обозначена область, где можно было зарегистрировать ядра  $^{10}\text{He}$ . Для этой же матрицы энергия  $^8\text{He}$  составляла 49,5 МэВ, а число событий - около 44000. Общее количество ядер  $^8\text{He}$ , зарегистрированных в нашем эксперименте при интегральном потоке ионов  $^{11}\text{B} \sim 7,5 \cdot 10^{17}$ , составляло  $\sim 1,5 \cdot 10^6$ . В то же время мы не обнаружили ни одного события образования ядер  $^{10}\text{He}$ .

Полученная таким образом верхняя граница образования ядер  $^{10}\text{He}$  в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$  составляла  $5 \cdot 10^{-7}$  мб/ср./см. рис.5/.

Выход  $^{10}\text{He}$  оказался намного меньше ожидаемого, полученного путем экстраполяции сечений образования легких изотопов He /рис.5/. Этот факт, по-видимому, свидетельствует о нестабильности ядер  $^{10}\text{He}$ . Однако данное утверждение не является абсолютным. Нельзя полностью исключить возможность того, что вследствие слабой устойчивости ядер  $^{10}\text{He}$  сечение их образования сильно подавлено в силу того, что часть энергии реализуемой реакции может перейти в энергию внутреннего возбуждения продуктов реакции.

Нами были проведены модельные эксперименты, в которых изучались сечения образования слабосвязанных ядер  $^{11}\text{Li}$  и  $^{14}\text{Be}$ . Сечение образования  $^{11}\text{Li} / V_{2n} = 0,17$  МэВ<sup>2/3</sup> /, образующегося в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$  при энергии ионов бора 89 МэВ, составляло  $2,8 \cdot 10^{-3}$  мб/ср. Измеренный нами также выход ядер  $^{14}\text{Be} / V_{2n} = 0,2$  МэВ<sup>2/3</sup> /, образующихся в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{15}\text{N}$  при энергии ионов азота 145 МэВ, составлял  $4 \cdot 10^{-5}$  мб/ср. Таким образом, экспериментально измеренные сечения образования в этих

реакциях изотопов  $^{11}\text{Li}$  и  $^{14}\text{Be}$  оказались на порядок ниже сечений, ожидаемых из экстраполяции по выходам остальных изотопов лития и бериллия /18,19/. Отсюда следует, что предсказания сечений образования слабосвязанных ядер путем экстраполяции данных по остальным изотопам являются ненадежными.

Для однозначного ответа на вопрос о стабильности ядер  $^{10}\text{He}$  является необходимым их получение в основном состоянии. С этой целью, на наш взгляд, наиболее эффективной может явиться реакция двойной перезарядки  $^{14}\text{C} (^{10}\text{Be}, ^{10}\text{He}) ^{14}\text{O}$ . Такие реакции в последнее время начинают использоваться для возбуждения гамма-теллеровских резонансов, и их сечение может составлять  $10^{-2}$  мб/ср<sup>20</sup>. Эти реакции приводят к образованию конечных продуктов в основном состоянии. Причем в случае ядерной нестабильности  $^{10}\text{He}$  можно будет с достаточной точностью определить его массу из спектра кинетических энергий  $^{14}\text{O}$ , измеренных в заданных кинематических условиях, и тем самым сделать окончательные выводы о его устойчивости. Необходимо, однако, заметить, что подобный эксперимент связан с получением пучка экзотических ионов  $^{10}\text{Be}$  и поэтому требует особой подготовки.

В заключение авторы выражают признательность академику Г.Н.Флерову за постановку задачи и ценные советы в процессе ее выполнения. Мы благодарны также В.Ф.Кушнируку и А.В.Рыхлюк за помощь в изготовлении полупроводниковых детекторов, З.Д.Покровской за помощь в обработке экспериментальных данных, а также коллективу эксплуатации циклотрона У-300 за обеспечение эффективной работы ускорителя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Poskanzer A.M. et al. Phys.Rev.Lett., 1966, 17, p.1271; Poskanzer A.M. et al. Phys.Lett., 1968, 27B, p.414.
2. Bowman J.D. et al. Phys.Rev.Lett., 1973, 31, p.614.
3. Безногих Г.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, вып.6, с.349.
4. Volkov V.V. In: Proc. Int.Conf. on Nucl.Phys., Munich, 1973, vol.2, p.279.
5. Базь А.И. и др. ЯФ, 1969, 9, с.1184.
6. Garvey G.T., Kelson I. Phys.Rev.Lett., 1966, 16, p.197.
7. Виноградов Б.И., Немировски П.Е. ЯФ, 1969, 10, с.505.
8. Воробьев А.А. и др. Препринт ФТИ-232, Л., 1969.
9. Whetstone S.L., Jr., Thomas T.D. Phys.Rev., 1967, 154, p.1174.
10. Cospers S.W. et al. Phys.Rev., 1967, 154, p.1193.
11. Vorobiev A.A. et al. Phys.Lett., 1969, 30B, p.332.
12. Artukh A.G. et al. Nucl.Phys., 1971, A168, p.321.
13. Байер Р. и др. В сб. "Нейтронная физика", Киев, 1980, ч.3, с.20.

14. Nann H. In: Atomic Masses and Fundamental Constants. (Ed. J.A.Nolen, Jr., Benenson W.), Plenum Press, New York and London, 1979, vol.6, p.51.
15. Thibault C., Klapisch R. Phys.Rev., 1974, C9, p.793; Jelly N.A. et al. Phys.Rev., 1975, C11, p.2049; Wapstra A.H., Bos K. At.Data Nucl. Data Tables, 1976, 17, p.474.
16. Borcea C. et al. JINR, E7-82-46, Dubna, 1982.
17. Cartwright B.C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 153, p.457.
18. Volkov V.V. Nukleonika, 1975, 21, No.1/75, p.53.
19. Artukh-A.G. et al. JINR, E7-82-98, Dubna, 1974.
20. Brendel C. et al. In: Proc. 4th Int.Conf. on Nuclei Far from Stability, Helsingør, Denmark, 1981, p.664.
21. Goulding F.S., Harvey B.G. Ann.Rev.Nucl.Sci., 1975, p.167.
22. Drake D.M. et al. Phys.Rev.Lett., 1980, 45, p.1765.
23. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1977, 19, p.175.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 апреля 1982 года.

Оганесян Ю.Ц. и др.

P7-82-302

Эксперименты по поиску ядер  $^{10}\text{He}$  в реакциях с тяжелыми ионами

Представлены экспериментальные результаты измерения выхода изотопов гелия, образующихся при взаимодействии ускоренных ионов  $^{10,11}\text{B}$  и  $^{22}\text{Ne}$  с мишенями ест.  $\text{Ti}$  и  $^{232}\text{Th}$  в энергетическом диапазоне от 8 до 10 МэВ/нуклон. Измерение проводилось с помощью магнитного спектрометра под углом  $20^\circ$ . Наибольший выход изотопов гелия наблюдается в реакции  $^{232}\text{Ti} + ^{11}\text{B}$ . Для этой реакции была измерена верхняя граница образования ядер  $^{10}\text{He}$ , которая составила  $5 \cdot 10^{-7}$  мб/ср. Полученные данные обсуждаются с точки зрения использования различных реакций с тяжелыми ионами для определения массы ядра  $^{10}\text{He}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Oganessian Yu.Ts. et al.

P7-82-302

Search for  $^{10}\text{He}$  Nuclei in Heavy-Ion Reactions

The experimental yields of helium isotopes from an interaction of the accelerated  $^{10,11}\text{B}$  and  $^{22}\text{Ne}$  ions with the  $^{\text{nat}}\text{Ti}$  and  $^{232}\text{Th}$  target-nuclei in the energy range from 8 to 10 MeV/nucleon are presented. The measurements were performed by means of a magnetic spectrometer located at an angle of  $20^\circ$  with respect to the beam direction. In the  $^{11}\text{B} + ^{232}\text{Th}$  collision, the maximum yield of helium isotopes was registered. In this reaction the upper limit of the cross-section of helium-10 formation was established to be equal to  $5 \cdot 10^{-7}$  mb/sr. On the basis of the results presented here the possibilities of using heavy-ion reactions for the determination of the  $^{10}\text{He}$  mass are discussed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1982