

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ436

1 - 7894

A-187

2685/2-74

В.В.Авдейчиков, В.И.Богатин, Е.Л.Григорьев,
О.В.Ложкин,

ИЗОТОПНЫЕ ЭФФЕКТЫ
ПРИ НЕУПРУГОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 660 МЭВ
С ЯДРАМИ ^{10}B И ^{11}B

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 7894

В.В.Авдейчиков, В.И.Богатин, Е.Л.Григорьев,
О.В.Ложкин.

ИЗОТОПНЫЕ ЭФФЕКТЫ
ПРИ НЕУПРУГОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 660 МЭВ
С ЯДРАМИ $^{10}\text{В}$ И $^{11}\text{В}$

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Авдейчиков В.В., Богатин В.И., Григорьев Е.Л.,
Ложкин О.В.

1 - 7894

Изотопные эффекты при неупругом взаимодействии протонов
660 МэВ с ядрами ^{10}B и ^{11}B

При экспериментальном изучении реакций на изотопах ^{10}B и ^{11}B под действием протонов 660 МэВ проведено исследование эффектов, связанных с неодинаковым числом нейтронов в ядрах-мишенях. Обнаружено различие в абсолютных сечениях образования изотопов $^1,2,3\text{H}$ и $^3,4\text{He}$ из двух изотопов бора и установлено различие в форме спектров ^3He и ^4He , испускаемых изотопами бора. Отношение сечений образования изотопов H и He из ^{10}B и ^{11}B указывает на четкую корреляцию с изотопическим спином вторичных частиц.

Исследование выполнено на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна, 1974

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с вопросами о кластерной структуре ядер и природе прямых процессов в литературе широко обсуждается механизм взаимодействия частиц высоких энергий с легкими ядрами и систематика продуктов неупругих взаимодействий.

Определенный успех в систематике сечений образования остаточных ядер^{/1/} посредством аппроксимации их эмпирическими формулами типа формулы Рудстама инициировал внимание к каскадно-испарительной и каскадно-взрывной (break-up) моделям расщеплений легких ядер при высоких энергиях частиц. В ряде работ^{/2,3,4/} было получено разумное соответствие экспериментальных сечений образования остаточных ядер с вычисленными по модели каскад + многочастичный распад, а также по зависимости этих сечений от энергии падающих протонов. Кроме того, как отмечалось в работе^{/5/}, использование модели многочастичного распада возбужденных ядер дает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по соотношению изотопов ^3H , ^3He , ^4He в реакциях $p + ^{12}\text{C}$ при энергии 660 МэВ.

Замеченная авторами работ^{/1,3/} качественно важная роль изотопических спинов (T_z) ядер-мишеней и ядер-продуктов в систематике абсолютных сечений образования остаточных ядер также нашла свое естественное объяснение в модели каскад - многочастичный распад, а именно: образование остаточного ядра с минимальным значением $\Delta T_z = T_{z\text{миш.}} - T_{z\text{ост.я.}}$ энергетически выгодно с точки зрения кинетической энергии, реализуемой в стадии многочастичного распада. Результаты работы^{/6/} по

изучению остаточных ядер ${}^7,9,10\text{Be}$, образованных при взаимодействии протонов 150 и 600 МэВ с ядрами ${}^{13}\text{C}$, показывают существенное увеличение сечений образования нейтроноизбыточных изотопов Be по сравнению со случаем, когда мишенями являются ядра ${}^{12}\text{C}$, что качественно соответствует изменению ΔT_z в этих двух случаях. Вместе с тем подобные данные по полным сечениям вторичных продуктов ядерных расщеплений не дают возможности понять структурные особенности легких ядер из-за малой чувствительности расчетных величин к выбору тех или иных параметров (см., например, /6/). Необходимы измерения и теоретический анализ дифференциальных сечений образования вторичных частиц в широком диапазоне $Z, M, E, \Theta_{\text{лаб}}$. Экспериментальная информация такого рода, полученная в реакциях при высоких энергиях протонов /7/ для ядер среднего атомного веса, показала, что в зависимости от величины нейтронного избытка в ядре-мишени существенно меняются и полные, и дифференциальные сечения образования вторичных частиц.

Можно было бы полагать, что обнаруженное влияние структурных особенностей ядер-мишеней на характеристики продуктов реакций при высоких энергиях будет существенно и для легких ядер-мишеней. Для проверки этого предположения и предпринята данная работа по исследованию дифференциальных характеристик изотопов водорода и гелия при взаимодействии протонов 660 МэВ с ядрами ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился на выведенном пучке протонов синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. В используемой камере рассеяния были установлены мишени и телескоп из полупроводниковых кремниевых детекторов, в состав которых входили детектор dE/dx толщиной 40 мкм; детектор E и детектор антисовпадений с толщинами соответственно 800 и 500 мкм. Все детекторы были выполнены методом, раз-

работанным в Радиовом институте им. В.Г.Хлопина /8/; они обладали собственным энергетическим разрешением менее 50 кэВ для $E_\alpha = 5,5$ МэВ. Детектор полного поглощения (E) имел чувствительную зону почти на всю толщину, и лишь мертвая зона с обратной стороны составляла доли микрона. Телесный угол регистрации частиц телескопом был определен при помощи калибровочного источника α -частиц и составлял $(1,99 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$ ср.

Вакуумная камера с дистанционным управлением позволяла устанавливать телескоп под заданным углом и помещать в пучок протонов ту или иную из исследуемых мишеней или убирать их из пучка для измерения фона в процессе работы ускорителя. Интенсивность пучка измерялась ионизационной камерой, калиброванной по реакциям ${}^{27}\text{Al}(p, 3pn){}^{24}\text{Na}$ и ${}^{12}\text{C}(p, pn){}^{11}\text{C}$. Ошибка определения абсолютного сечения продуктов реакции составляла <10%, и складывалась, в основном, из ошибок в сечении упомянутых калибровочных реакций и методических ошибок наших измерений сечений этих реакций.

Электронное логическое устройство, использованное в данной работе для идентификации частиц в ядерных реакциях и для измерения их энергий, описано в работе /9/. Малая длительность пучка протонов ускорителя (160 мксек) приводила к значительной загрузке телескопа как частицами от мишени, так и фоновыми частицами. Поэтому в систему отбора частиц для анализа была введена быстрая схема совпадений ($2\tau \approx 70$ нсек) и антисовпадений, которая управляла работой электронного логического устройства. Для получения правильного значения потока падающих протонов была введена схема "мертвого времени", работой которой управлял импульс блокировки входа логического устройства. Блок-схема электронного устройства приведена на рис. 1.

Калибровка энергетической шкалы анализирующего устройства проводилась с помощью α -источника и генератора точной амплитуды. α -источники были установлены непосредственно в телескопе с обратной стороны детек-

Таблица

Дифференциальные сечения образования изотопов водорода и гелия из ^{10}B и ^{11}B для угла $\theta = 90^\circ$ лаб.

Изотоп	Интервал энергий (МэВ)	$\frac{d\sigma}{d\Omega} (90^\circ)$ мб/стерадиан*		$\sigma (^{10}\text{B})$
		^{10}B	^{11}B	
^1H	(2,5+4)-II	$4,92 \pm 0,08$	$3,99 \pm 0,07$	$1,23 \pm 0,04$
^2H	5 - I4	$4,02 \pm 0,07$	$3,96 \pm 0,07$	$1,02 \pm 0,04$
^3H	6 - I7	$2,26 \pm 0,05$	$2,69 \pm 0,06$	$0,84 \pm 0,04$
^3He	7 - 33	$2,25 \pm 0,03$	$1,96 \pm 0,03$	$1,15 \pm 0,03$
^4He	8 - 33	$4,45 \pm 0,04$	$4,17 \pm 0,04$	$1,07 \pm 0,02$

* Указаны статистические ошибки. Полная ошибка в определении абсолютных сечений $< 10\%$.

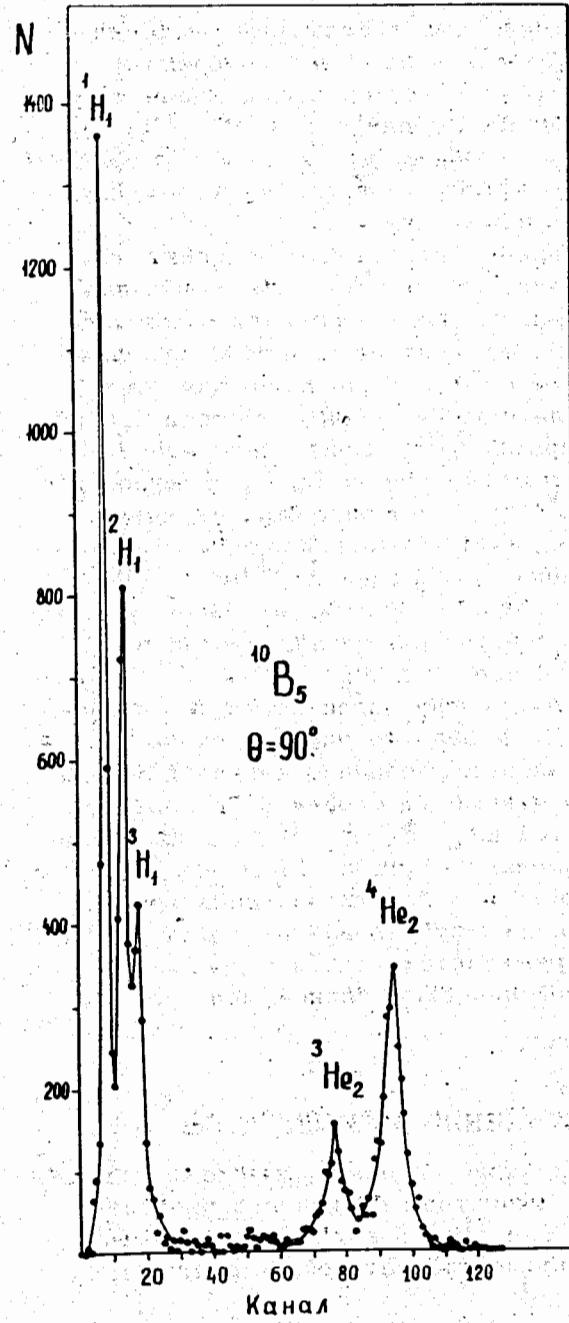


Рис. 2. Массовое распределение продуктов взаимодействия протонов с энергией 660 МэВ с ядрами ^{10}B .

Там же приведены измеренные абсолютные дифференциальные сечения образования изотопов водорода и гелия из ^{10}B и ^{11}B и их отношения. Как видно из таблицы, отношения сечений образования ^1H , ^3H , ^3He заметно отличаются от единицы, что является указанием на наличие изотопного эффекта для упомянутых продуктов в реакциях при высоких энергиях.

На рис. 3 представлены энергетические спектры изотопов $^3,4\text{He}$ из ядер ^{10}B и ^{11}B , полученные под углом $\theta_{\text{лаб.}} = 90^\circ$. Для изотопа ^3He (для обеих мишеней) наблюдаются более жесткие спектры, чем для ^4He и это проявление вообще характерно для этих продуктов в случае неупругого взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами [5,10]. Более интересным, на наш взгляд, является различие в форме спектров изотопов ^4He (и ^3He) от двух изотопов ядер-мишеней. Это следует из рис. 4, на котором приведены отношения дифференциальных сечений образования ^3He и ^4He ; смягчение спектров вторичных частиц для более легких ядер-мишеней отмечалось уже ранее для изотопов Ni и Sn [7]. Однако в случае изотопов ^{10}B и ^{11}B выявилась еще одна особенность рассматриваемой зависимости, а именно, для ^4He в области энергии около 15 МэВ отношение дифференциальных сечений становится меньше единицы. Зависимость отношения сечений образования легких вторичных частиц из ^{10}B и ^{11}B от их изотопического спина приведена на рис. 5. Здесь же показаны аналогичные зависимости для других изотопов ядер-мишеней, взятые из ранее опубликованных работ [7,10]. Во всех случаях обнаруживается четкая корреляция отношения сечений с изотопическим спином испускаемой частицы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование показало, что одни и те же легкие продукты взаимодействия протонов с энергией 660 МэВ с ядрами ^{10}B и ^{11}B образуются с разными сечениями и имеют разные энергетические спектры

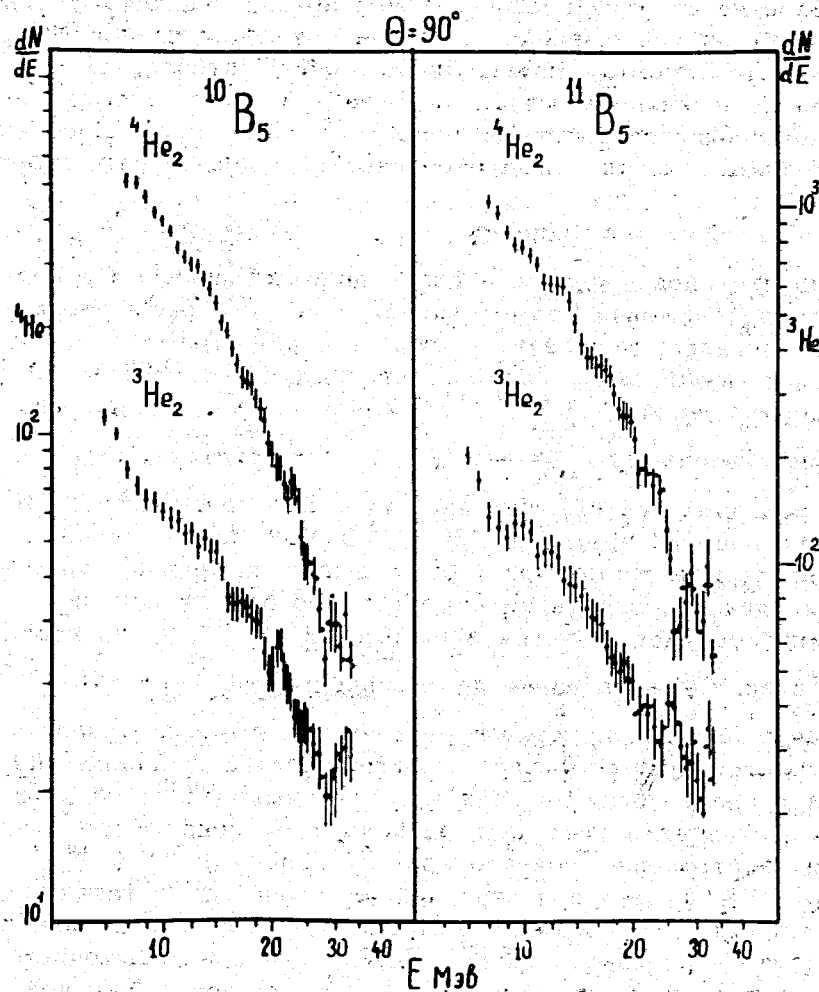


Рис. 3. Дифференциальные энергетические спектры ^3He и ^4He в реакциях $p + ^{10}\text{B}$, $p + ^{11}\text{B}$ при энергии 660 МэВ для $\theta_{\text{лаб.}} = 90^\circ$.

в зависимости от типа ядра-мишени. Оба указанных эффекта невелики, однако необходимо иметь в виду, что обуславливаются они разницей между исходными ядрами всего на один нейтрон и с точки зрения существующих представлений о природе реакций при высоких энергиях являются неожиданными. Представляет интерес, не затрагивая вопросов механизма реакций, использовать уже упоминавшийся выше формализм изотопического спина для выявления характерных особенностей наблюдаемых эффектов.

Как было показано на рис. 5, зависимость $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = f(T_z)$ для изотопов водорода и гелия аппроксимируется в первом приближении прямой линией в полулогарифмических координатах. Используя результаты работы [6] по изучению сечений образования остаточных ядер ${}^7,9,10\text{Be}$ из ядер-мишеней ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{13}\text{C}$ можно построить аналогичную зависимость $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = f(T_z)$ для остаточных ядер

в реакциях при высоких энергиях. Эти зависимости для двух энергий протонов, 150 и 600 МэВ показаны на рис. 6. Они также могут быть аппроксимированы прямыми линиями, наклон которых гораздо больше наклона линий соответствующей зависимости σ_1 / σ_2 для легких частиц. Существование двух зависимостей $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = f(T_z)$

для вторичных продуктов реакций при высоких энергиях характеризует различное влияние состава исходных ядер на природу легких частиц и остаточных ядер в реакции. Сопоставление этих двух зависимостей показывает, что для нейтроноизбыточного изотопа ядра-мишени (${}^{13}\text{C}$ или ${}^{11}\text{B}$) эффект нейтронной избыточности остаточных ядер выше, чем эффект нейтронной избыточности легких частиц в реакции. Таким образом, нейтроноизбыточные продукты ядерных расщеплений легких ядер с большой вероятностью образуются как остаточные ядра, а не как испускаемые частицы.

Отмеченный эффект полезно учитывать при изучении нейтроноизбыточных изотопов легких ядер вблизи границы стабильности с помощью реакций при высоких энер-

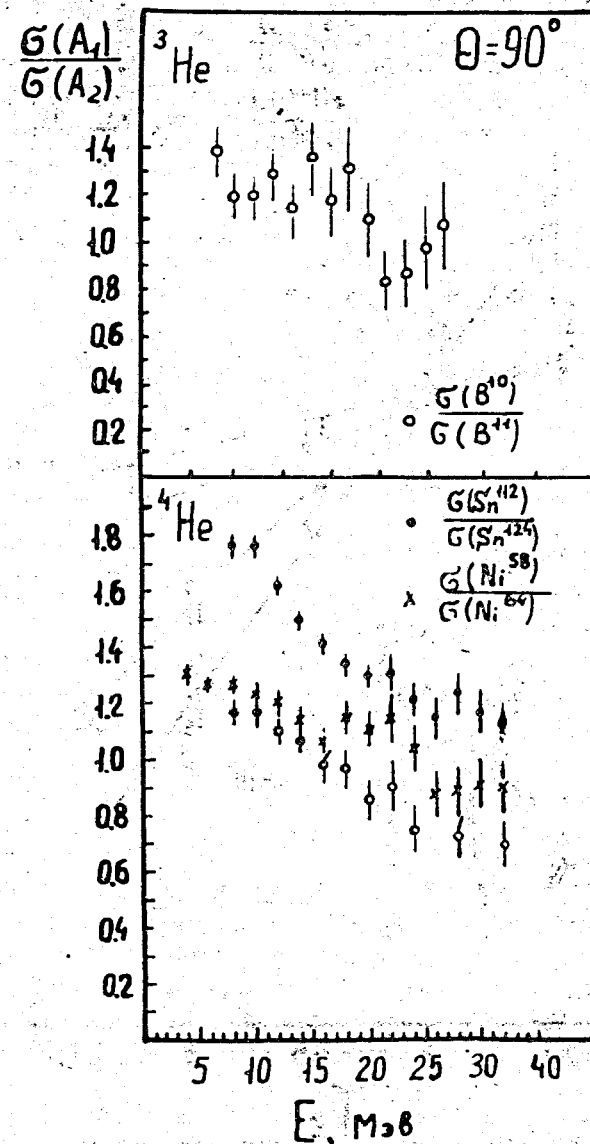


Рис. 4. Зависимость отношения сечений образования изотопов ${}^3,4\text{He}$ из ${}^{10,11}\text{B}$, Ni и Sn [7] от энергии частиц.

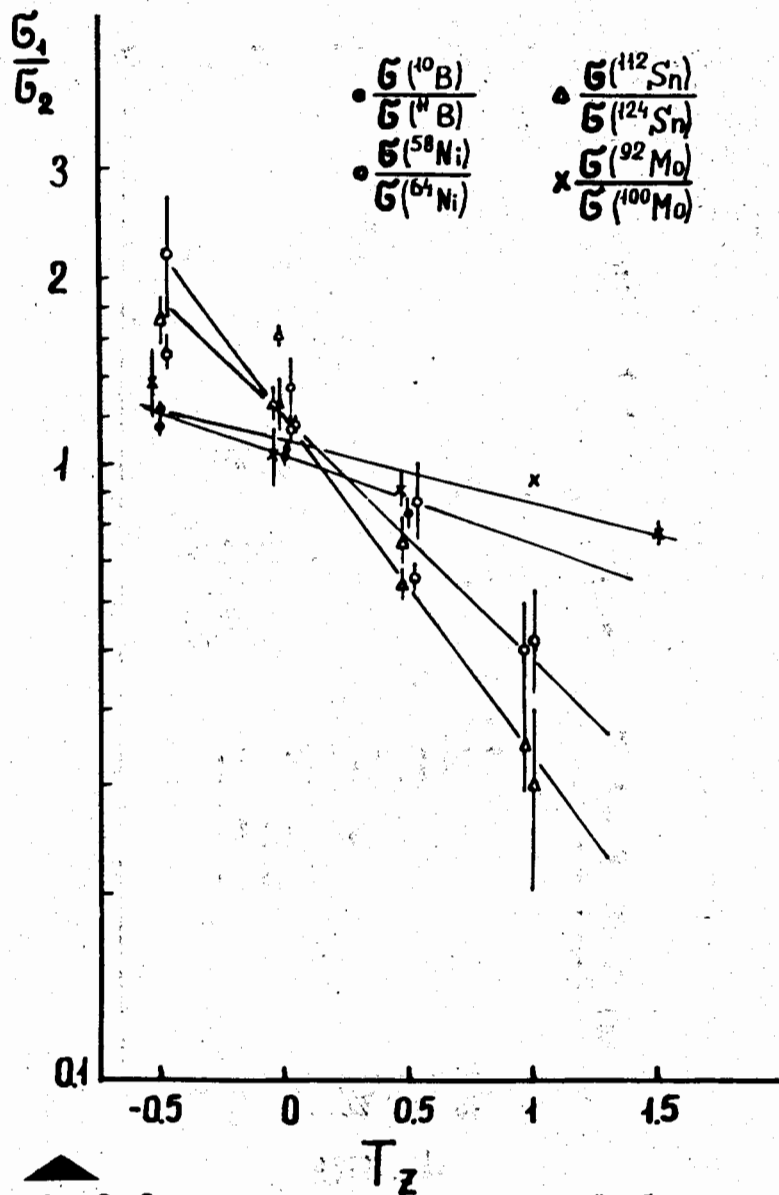
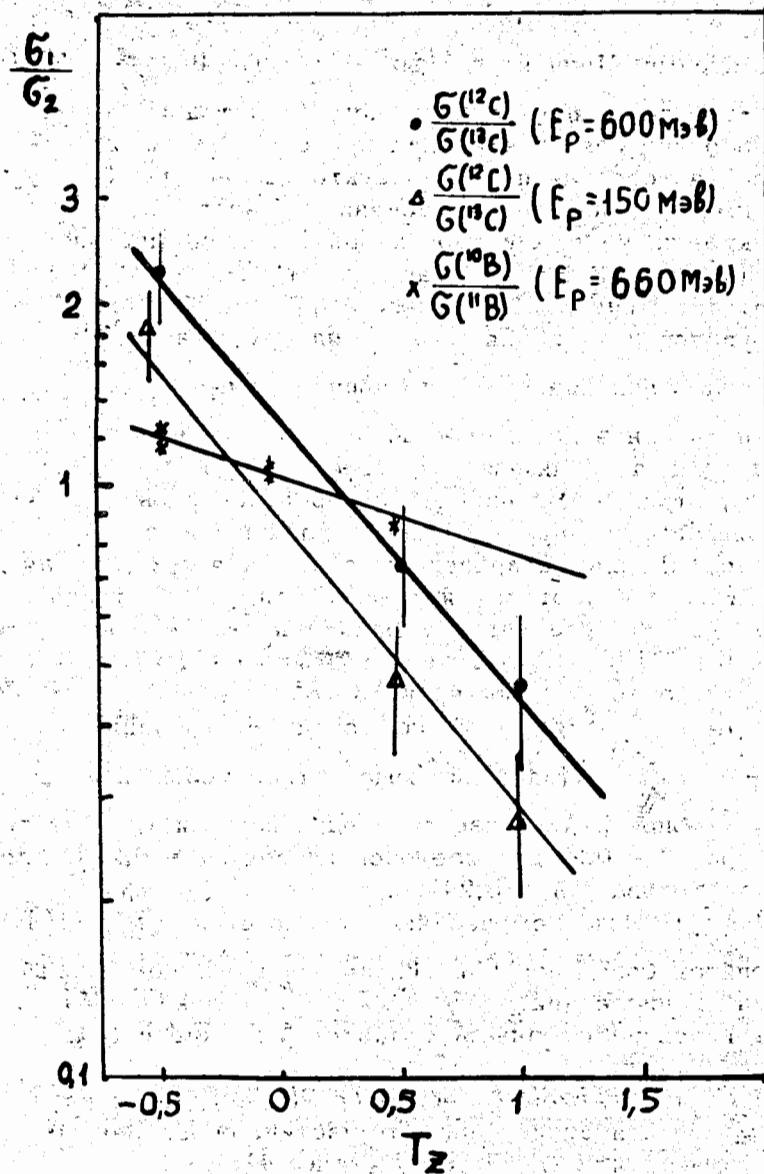


Рис. 5 и 6. Зависимость отношения сечений образования вторичных частиц из двух изотопов ядер-мишеней от изотопического спина частиц. Прямые линии - аппроксимация экспериментальных точек.



гиях. Для повышения вероятности их наблюдения необходимо выбирать нейтроноизбыточные ядра-мишени и иметь дело с продуктами, которые являются остаточными ядрами. Наличие разных зависимостей $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = f(T_z)$ для остаточных ядер и испускаемых частиц может быть использовано для определения природы механизма образования того или иного продукта ядерной реакции, если имеются абсолютные сечения образования этих продуктов на разных изотопах данного ядра-мишени.

Наблюдаемая в опыте зависимость от изотопического спина отношений сечений образования различных изотопов водорода и гелия из двух ядер-мишеней ^{10}B и

^{11}B оказалась аналогичной зависимости $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = f(T_z)$ найденной ранее для ядер-мишеней Ni и Sn и является, по-видимому, некоторой общей закономерностью, отражающей влияние нейтронного избытка в ядрах-мишенях на характеристики реакций при высоких энергиях. На рис. 5 приведены отношения σ_1/σ_2 для изучаемых пар изотопов ядер-мишеней. Рассматривая в совокупности результаты реакций на разделенных изотопах B , Ni и Sn , можно отметить следующие особенности изотопных эффектов при образовании $^1, ^2, ^3\text{H}$, $^3, ^4, ^6\text{He}$, $^6, ^7, ^8\text{Li}$ в зависимости от величины $\frac{N_1 - N_2}{Z} = \delta$ характеризующей относительный избыток нейтронов в двух изотопах ядра-мишени (для изотопов бора $\delta = 0,2$, для изотопов никеля $\delta = 0,214$, для изотопов олова $\delta = 0,24$):

1) С уменьшением величины δ зависимость $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = f(T_z)$ становится более пологой. Таким образом, чем больше разница в числе нейтронов двух ядер-мишеней, тем более нейтроноизбыточными становятся легкие частицы в расщеплении.

2) С увеличением δ несколько увеличивается различие в энергетических спектрах частиц, образованных из двух изотопов ядер-мишени (рис. 4).

Указанные тенденции изотопных эффектов для легких частиц в реакциях при высоких энергиях сохраняются, по-видимому, и для более тяжелых частиц. В работе^{11/} исследовалось образование изотопов Na из ^{92}Mo и ^{100}Mo ; на рис. 5 показано рассчитанное по результатам этой работы распределение $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = f(T_z)$. Эта зависимость имеет такой же характер, как и для изотопов H , He , Li в данной области T_z и характеризуется еще меньшим наклоном в полулогарифмических координатах, что находится в соответствии с уменьшением величины δ для изотопов Mo ($\delta = 0,19$).

Кажется естественным, что наблюдаемые относительные изотопные эффекты пропорциональны величине нейтронного избытка в ядрах. Однако удивительными представляются и "чувствительность" характеристик реакций к параметру δ , и качественно одинаковый характер изотопных эффектов, несмотря на большое различие абсолютных сечений реакций и кулоновских барьеров для вторичных частиц, а также несмотря на разный (по современным представлениям) вклад прямых и статистических процессов в образование вторичных частиц при расщеплении легких и тяжелых ядер (таких, как ядра бора и олова). Другой трудностью для понимания природы наблюдаемых эффектов является различие энергетических спектров частиц, испущенных из двух изотопов ядер-мишеней. Все это говорит о необходимости дальнейших исследований изотопных эффектов при высоких энергиях.

Авторы выражают свою признательность члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову за предоставленную возможность провести эксперимент на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и профессору Н.А.Перфилову за постоянный интерес и внимание к работе.

Литература

1. R. Bernas et al. *Ann. Phys.*, 44, 426 (1967).
2. О.Б.Абдинов, В.С.Барашенков. *Acta Phys. Polon.*, ВЗ, No. 3, 385 (1972).
3. M. Rey. *Campagholle-Epherre These*, ORSAY (1972).
4. M. Epherre, E. Gradsztajn, R. Klapisch, H. Reeves. *Nucl. Phys.*, A 139, 545 (1969).
5. В.И.Богатин, А.И.Вихров, Е.Л.Григорьев, О.В.Ложкин. Сообщение ОИЯИ, 1-7653, Дубна, 1973.
6. M. Raisbeck, J. Lestringuer, F. Yiou. *Nature Phys. Sci.*, 244, No. 132, 28 (1973).
7. В.И.Богатин, В.К.Бондарев, В.Ф.Литвин, О.В.Ложкин, Н.А.Перфилов, Ю.П.Яковлев, В.П.Бочин. *ЯФ*, 19, в. 1, 32 (1974).
8. В.В.Авдейчиков, В.И.Богатин, О.В.Ложкин. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, XXXII №5, 903 (1968).
9. В.В.Авдейчиков, В.И.Капустин, О.В.Ложкин, Н.А.Перфилов. Сб. "Прикладная ядерная спектроскопия". Атомиздат, 1970, стр. 294.
10. J. P. Alard, A. Cordailat, M. Cornago, J. Fargeix, L. Fraysse, G. Roche, A. Sicre. *C.R. Acad. Sc. Paris, serie B270*, 1438 (1970).
11. Catherine Thibault-Phillippe. *These*, ORSAY (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 1974 года.