

B-676



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

7 - 6416

В.В.Волков

РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ НА ТЯЖЕЛЫХ ИОНАХ

**(Механизм реакций и синтез легких ядер
с большим избытком нейтронов)**

**Специальность 01.055 - физика атомного ядра
и космических лучей**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1972

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
доктор физико-математических наук
доктор физико-математических наук
профессор

А.И.Базь,
А.А.Оглоблин,
К.А.Петржак

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физико-технический институт АН УССР, Харьков.

Автореферат разослан " " 1972 года.

Защита диссертации состоится " " 1972 года на заседании Объединенного Ученого совета Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Отзывы и замечания просим направлять по адресу: Дубна, Московской области, ОИЯИ, ЛНФ.

Ученый секретарь Совета

Э.Н. Каржавина

7 - 6416

В.В.Волков

РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ НА ТЯЖЕЛЫХ ИОНАХ

(Механизм реакций и синтез легких ядер с большим избытком нейтронов)

Специальность 01.055 - физика атомного ядра и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Введение

С созданием специальных ускорителей тяжелых ионов началось быстрое развитие исследований, в которых в качестве бомбардирующих частиц используются ядра легких элементов.

В Советском Союзе начало таким исследованиям было положено работами Г.Н.Флерова с сотрудниками в ИАЭ им. И.В.Курчатова ^{/1/}. С вводом в строй в 1960 г. 310-сантиметрового циклотрона ОИЯИ ученые социалистических стран получили в свое распоряжение первоклассный ускоритель тяжелых ионов. По разнообразию ускоряемых частиц и интенсивности пучков циклотрон У-310 является наиболее мощным ускорителем тяжелых ионов своего поколения ^{/2/}.

На базе У-310 в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ были развернуты исследования по всем основным направлениям физики тяжелых ионов: синтезу новых элементов и изотопов, изучению механизмов ядерных реакций, возбуждению различных ядерных состояний ^{/2/}.

Один из важных разделов этих исследований - изучение процессов, протекающих при касательном столкновении двух ядер.

Значительно больший, по сравнению с протонами и дейтонами, атомный номер и массовое число тяжелого иона приводят к резкому возрастанию роли кулоновских и центробежных сил во взаимодействии. Два столкнувшихся ядра не всегда сливаются даже при сильном перекрытии ядерных поверхностей. Существует некоторое критическое значение орбитального момента, выше которого не происходит образования компаунд-ядра. Вместе с тем интенсивное ядерное взаимодействие создает благоприятные условия для передачи от ядра к ядру значительного числа нуклонов.

Диссертация посвящена изучению механизмов реакций передачи, особенно передачи нескольких нуклонов, использованию этих реакций для синтеза изотопов легких элементов с большим избытком нейтронов и оценке, на основании полученных данных, границы ядерной устойчивости для этой области нуклидов.

Гл. I . Экспериментальные методы изучения реакций передачи с тяжелыми ионами

Большое число каналов прямых реакций с тяжелыми ионами и небольшие различия в удельной ионизации и энергии соседних изотопов предъявляют высокие требования к разрешающей способности аппаратуры. Загрузка детекторов интенсивным потоком упруго и неупруго рассеянных ионов затрудняет идентификацию реакций с малым сечением.

В первой главе диссертации описан ряд методов, разработанных и использованных нами для изучения реакций передачи на тяжелых ионах.

1. Выделение радиоактивных продуктов реакции передачи без применения радиохимии путем использования значительных пробегов и специфического углового распределения /3-5/ .

2. Регистрация запаздывающих нейтронов распада ядер ^{17}N и энергичных β -частиц и γ -квантов распада ^{16}N /6-9/ .

3. Особенно эффективной методикой оказалась предложенная нами комбинация магнитного анализа и метода $\Delta E, E$ /10/ . В фокальную плоскость магнитного анализатора был помещен телескоп из тонкого и толстого полупроводниковых детекторов. Методика сочетает в себе быстроедействие, высокое изотопное разрешение - удается разделить изотопы с массой 40-50, высокую чувствительность $\approx 10^{-33}$ см² .

Гл. II . Однуклонные передачи

Малая длина дебройлевской волны тяжелого иона и сильное поглощение в ядерном веществе приводят к поверхностной локализации реакций передачи. Эту особенность можно попытаться использовать для изучения структуры поверхности тяжелых ядер. Сравнивая подхват нейтрона, протона и α -частицы, можно, в принципе, получить информацию об α -кластеризации на поверхности тяжелых ядер, которая предсказывалась в ряде работ (см., например, /11/).

Нами были проведены эксперименты по изучению подхвата нейтрона в реакции (^{15}N , ^{16}N) на ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{232}Th , ^{238}U /8/ . Были измерены дифференциальные сечения, функции возбуждения, энергетические спектры. Функции возбуждения были измерены также на ^{12}C , ^{27}Al , Cu и ^{103}Rh . Из полученных данных следует, что подхват нейтрона на тяжелых ядрах происходит при периферийных поверхностных столкновениях. Для сечений реакций на различных ядрах была получена зависимость логарифма сечения от квадратного корня из энергии связи нейтрона в ядре-доноре /12/ .

Подхват протона изучался, в основном, в реакции (^{12}C , ^{13}N) на ^{12}C , ^{27}Al , ^{51}V , ^{93}Nb , Ag , ^{181}Ta /13,14/. Специфической особенностью подхвата протона, обнаруженной в наших экспериментах, оказалось сильное влияние кулоновского поля ядра-мишени на вероятность передачи. Сечение реакции (^{12}C , ^{13}N) быстро падает с ростом Z ядра-мишени. Отношение сечений реакций (^{12}C , ^{13}C) и (^{12}C , ^{13}N) на ^{197}Au и ^{232}Th достигает нескольких тысяч. При подхвате протона сечение реакции падает с энергией более резко, чем при подхвате нейтрона. Для объяснения падения сечения в реакции (^{12}C , ^{13}N) было высказано предположение о "поляризации" волновой функции слабо связанного протона в ядре ^{13}N ($E_n = 1,93$ Мэв). Подавление кулоновским полем тяжелого ядра-мишени подхвата протона крайне затруднило возможность изучения структуры поверхности тяжелых ядер. Подхват α -частиц вообще не удалось надежно зарегистрировать на тяжелых ядрах, тогда как на ^{27}Al он достигал десятка миллибарн.

Гл. III. Реакции передачи нескольких нуклонов

Реакции передачи нескольких нуклонов, особенно многонуклонные передачи – процессы, характерные для взаимодействия двух сложных ядер. Поскольку их теоретическое описание – сложная и пока что нерешенная задача, при проведении экспериментов особое внимание уделялось выявлению эмпирических закономерностей в свойствах многонуклонных передач. Такие закономерности помогают качественно понять механизм реакций и дают возможность эффективно использовать их для синтеза новых изотопов и возбуждения специфических ядерных состояний. Они служат хорошей экспериментальной основой для построения количественных теоретических моделей.

В наших экспериментах была получена первая информация о "спектре" реакций передач /15,16/. Была показана возможность прямых реакций, в которых ядро-мишень теряет более 20 нуклонов, а налетающее ядро подхватывает более 10 нуклонов. Далее, была выявлена асимметрия в сечениях реакций передачи нейтронов и протонов на тяжелых ядрах: нейтроны передаются преимущественно от тяжелого к легкому ядру, протоны – в противоположном направлении /17/.

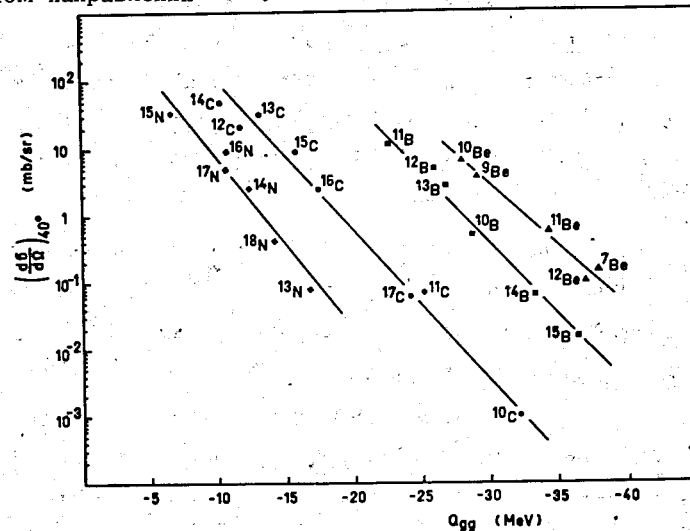


Рис. 1. Сечения образования изотопов азота, углерода, бора и бериллия при облучении ^{232}Th ионами ^{16}O с энергией 137 Мэв. Сечения даны в зависимости от величины Q реакции, соответствующего образованию конечных продуктов в основном состоянии.

Была установлена систематика сечений различных каналов реакций передачи для реакций, идущих со срывом протонов /17/ (рис. 1.). Логарифм сечения реакций, в которых образуются изотопы определенного элемента, зависит линейно от Q_{gg} – энергии, идущей на перестройку ядер. Систематика отчетливо де-

монстрирует сильное влияние на величину сечения числа протонов, переданных от легкого к тяжелому ядру. Имея в виду значительное возбуждение конечных ядер в многонуклонных передачах, полученную зависимость можно интерпретировать как указание на статистический характер процесса обмена нуклонами. Систематика позволяет предсказывать сечения образования в реакциях передачи новых изотопов.

На ряде ядер изучались реакции подхвата двух и трех нейтронов /18-26/. Показано, что эти реакции протекают при периферийных поверхностных столкновениях двух ядер. Получена линейная зависимость логарифма полного сечения реакции от квадратного корня из энергии связи передаваемых нейтронов в ядре-доноре, аналогичная зависимости для подхвата одного нейтрона /26/.

Измерено значительное число функций возбуждения реакций подхвата, срыва и обмена нуклонами /18,21/. Измерены функции возбуждения и дифференциальные сечения реакции (^{15}N , ^{17}N) на разделенных изотопах циркония: ^{90}Zr , ^{92}Zr , ^{94}Zr /20,22/. Сечения реакции оказались весьма чувствительны к изменению структуры ядра, особенно вблизи кулоновского барьера. Угловые распределения, напротив, для всех трех изотопов практически одинаковы и отражают, в основном, глобальные характеристики взаимодействия - кулоновское отталкивание и ядерное поглощение.

При изучении подхвата нуклонов на мишенях из ^{27}Al , ^{51}V и ^{93}Nb , облучавшихся ионами ^{16}O с энергией 137 Мэв, с использованием тонкого (10 мк) полупроводникового детектора, в энергетическом спектре легких продуктов реакций передачи обнаружена низкоэнергетическая часть спектра (рис. 2), свидетельству-

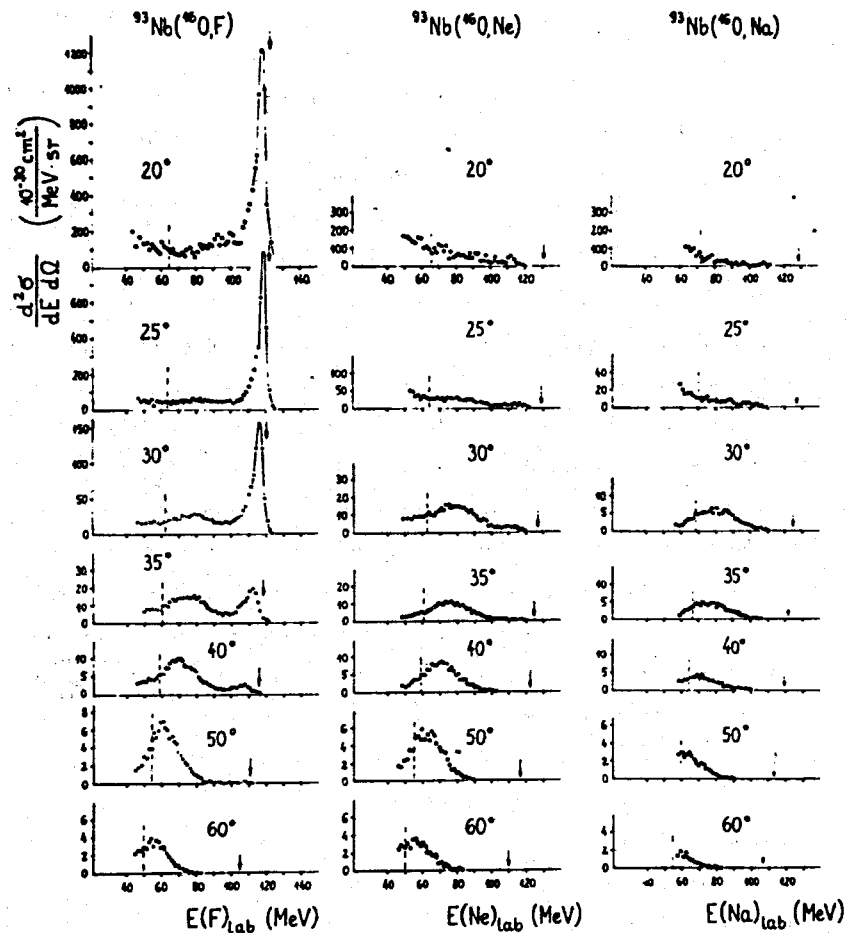


Рис. 2. Энергетические спектры F , Ne и Na , полученные при облучении ^{93}Nb ионами ^{16}O с энергией 131 Мэв в ЛСК. Стрелкой указана энергия для $Q = Q_{gg}$, пунктиром - выходной кулоновский барьер.

ющая о протекании процессов передачи при глубоко неупругих столкновениях двух ядер /29,30/. Были зарегистрированы частицы с энергией значительно ниже кулоновского барьера для конечных ядер. Ранее /31/ частицы малых энергий были обнаружены нами в реакции $^{27}\text{Al} (^{14}\text{N} , ^{18}\text{F})$ при регистрации радиоактивного ^{18}F в стопках алюминиевых фольг. В рамках обычного двухтельного представления о прямой реакции объяснить появление в выходных каналах частиц таких малых энергий не удается.

Предложен возможный механизм, ответственный за появление низкоэнергичных частиц. Столкновения с энергией выше кулоновского барьера и угловым моментом, большим критического, но близким к нему, приведет к образованию гантелеобразной системы из двух ядер. Кулоновские и центробежные силы препятствуют их слиянию. Сильное ядерное взаимодействие обеспечивает вращение системы как единого целого. После поворота на некоторый угол система разрывается. Замедление вращения, связанное с увеличением момента инерции, приводит к тому, что время жизни системы до разрыва оказывается много больше характерного ядерного времени. В результате в системе успевают проявиться статистические закономерности, а сама система перед разрывом оказывается сильно деформированной.

Предложена систематика механизмов реакций передачи, в основу которой положена величина углового момента столкновения. Выяснены условия, в которых могут протекать: квазиупругий процесс передачи, передачи при скользящем столкновении и передачи при глубоко неупругом столкновении.

Гл. IV . Получение легких ядер с большим избытком нейтронов в реакциях передачи с тяжелыми ионами. Граница ядерной стабильности

В последние годы внимание физиков все больше привлекают ядра, расположенные вдали от полосы β -стабильности. Значительное изменение соотношения между числом нейтронов и протонов в ядре приводит к появлению новых ядерных свойств. Возникает возможность новых видов радиоактивного распада, существенно меняется взаимное пространственное распределение протонов и нейтронов.

Одна из фундаментальных проблем ядерной физики – границы ядерной устойчивости нуклидов /32,33/. Предел протонному избытку в ядре ставит кулоновское отталкивание. С нейтронным избытком дело обстоит сложнее. Рассматривается область легких ядер, где имеются экспериментальные возможности получения большого относительного избытка нейтронов. Расчеты в рамках модели оболочек показывают, что легкие ядра с большим избытком нейтронов не могут быть устойчивыми, поскольку в них для размещения нуклонов требуется больше уровней, чем в ядре с $N \approx Z$, и верхние уровни оказываются несвязанными. Однако к этим выводам следует подходить с осторожностью. Модель оболочек предсказывает, что ядро ^{11}Li должно быть ядерно-неустойчиво, однако трем экспериментальным группам удалось его синтезировать. Развиваемый в последние годы новый подход к расчету масс ядер и оценке их стабильности на основе метода многомерных гармоник не исключает возможности существования ядер со значительно большим избытком нейтронов, чем у известных нуклидов /34,35/. Весьма существенно, что в этом методе установлена тесная связь между свойствами таких ядер

и величиной и знаком потенциала V^{33} , описывающего взаимодействие нуклонов со спином и изоспином, равным единице.

В наших экспериментах впервые для получения легких ядер с большим избытком нейтронов были использованы реакции передачи на тяжелых ионах. Возможность их использования следовала из наших данных по подхвату одного, двух и трех нейтронов: сечение реакций, хотя и падало с увеличением числа переданных нейтронов, однако падение не было резким ^{/26/}. Реализовать эту возможность удалось лишь после создания новой методики - комбинации магнитного анализа и метода $\Delta E, E$, обеспечившей надежные выделения и идентификацию новых изотопов.

В этих экспериментах в качестве бомбардирующих частиц использовались легкие ядра, уже имеющие избыток нейтронов: $^{11}B, ^{15}N, ^{18}O, ^{22}Ne$. Мишенью служил ^{232}Th . Продукты реакций передачи регистрировались под углом, близким к углу резерфордского рассеяния при касательном столкновении двух ядер. В таблице 1 приведены полученные результаты. За сравнительно короткий срок в реакциях передачи с тяжелыми ионами удалось синтезировать 11 новых изотопов C, N, O, F, Ne и все известные до этого наиболее тяжелые изотопы от 8He до ^{24}Ne ^{/36-44/} (рис. 3). В таблице 2 приведены реакции передачи, использованные для получения этих изотопов.

Сравнение регистрируемых выходов наиболее тяжелых изотопов C, N и O в реакциях глубокого расщепления высокоэнергичными протонами и в реакциях передачи на тяжелых ионах показывает, что последние обладают значительным преимуществом - регистрируемый выход на тяжелых ионах в сотни раз больше. Это дало возможность поставить эксперименты по оцен-

Таблица 1

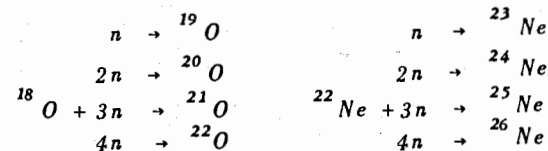
Нейтронноизбыточные изотопы легких элементов, полученные в реакциях передачи с тяжелыми ионами

- а) известные изотопы
 $^8He, ^{11}Li, ^{12}Be, ^{15}B, ^{17}C, ^{19}N, ^{21}O, ^{22}F, ^{24}Ne$
- б) новые изотопы
 $^{18}C, ^{20}N, ^{22}O, ^{23}F, ^{25}Ne$
 $^{21}N, ^{23}O, ^{24}F, ^{26}Ne$
 $^{24}O, ^{25}F$

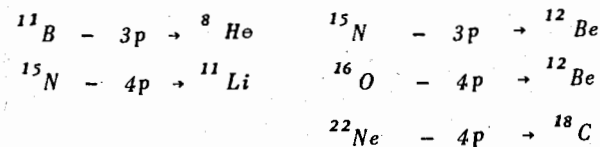
Таблица 2

Реакции передачи с тяжелыми ионами, использованные для получения нейтронноизбыточных изотопов легких элементов

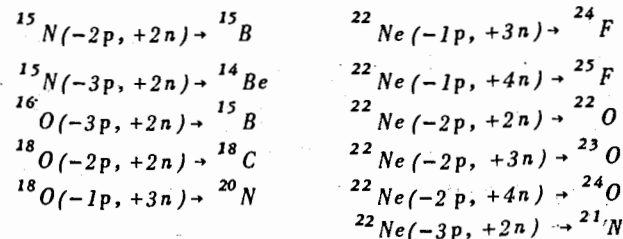
1) подхват нейтронов



2) срыв протонов



3) обмен нуклонами



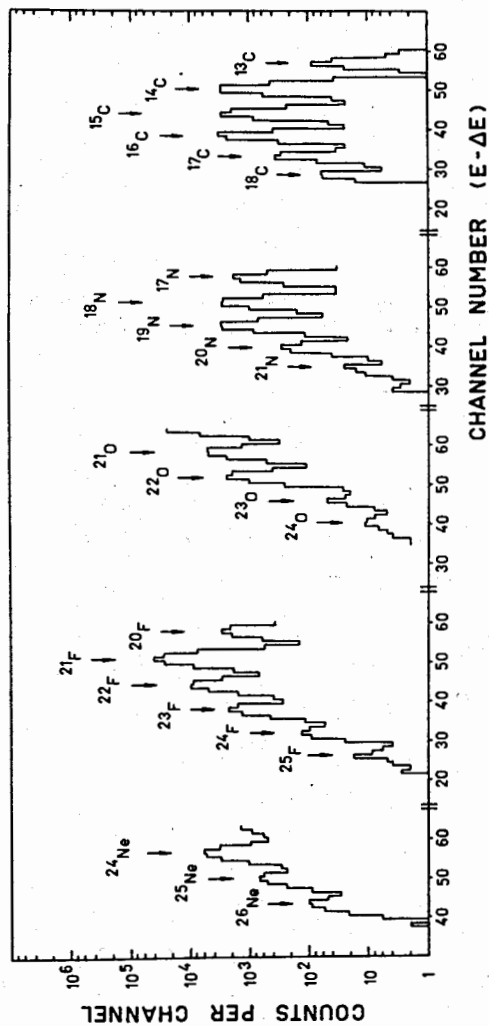


Рис. 3. Выходы нейтроноизбыточных изотопов неона, фтора, кислорода, азота и углерода, полученные при облучении ^{232}Th ионами ^{22}Ne с энергией 174 Мэв ЛСК. Время облучения - 20 часов. Суммарный поток частиц через мишень - $5,1 \cdot 10^{16}$.

ке положения границы ядерной стабильности в этой области нуклидов.

На рис. 4 изображена карта изотопов в области легких элементов и отмечена граница ядерной стабильности по теоретическим оценкам /45,36/. Нами были проведены эксперименты по синтезу ядер ^{10}He , ^{13}Be , ^{14}Be , которые лежат за пределами предсказываемой теорией границы /47-49/. Заметим, что ^{10}He является дважды магическим ядром. Расчеты массы ^{10}He , выполненные в работе /35/ методом многомерных гармоник, оставляли открытым вопрос о существовании этого ядра. Положение с предсказанием свойств ^{14}Be было также неопределенным. Эмпирическая экстраполяция энергии связи нейтронов указывала на его ядерную устойчивость /50/.

Для синтеза ^{10}He была использована реакция срыва 5 протонов с ядра ^{15}N . В экспериментах с заметным выходом были зарегистрированы реакции срыва от 1 до 4 протонов с ^{15}N . ^{13}Be и ^{14}Be должны были образоваться в реакциях обменного типа: $^{15}\text{N}(-3p, +n) ^{13}\text{Be}$, $^{15}\text{N}(-3p, +2n) ^{14}\text{Be}$. Обе эти реакции наблюдались с заметным сечением при облучении ^{232}Th ионами ^{16}O с энергией 137 Мэв. В качестве мишеней в обоих случаях использовался ^{232}Th . Энергия ионов ^{15}N составляла 145 Мэв. Для построения систематики сечений и выбора магнитного поля анализатора были измерены выходы и энергетические спектры изотопов C, B, Be, Li, He при облучении ^{232}Th ионами ^{15}N .

За 20-часовое облучение ^{232}Th ионами ^{15}N при среднем токе $\approx 2 \mu\text{A}$ в области, где ожидалась регистрация ^{10}He , не было зарегистрировано ни одного импульса (при нулевом фоне). Такой же результат был получен при двух других значениях магнитно-

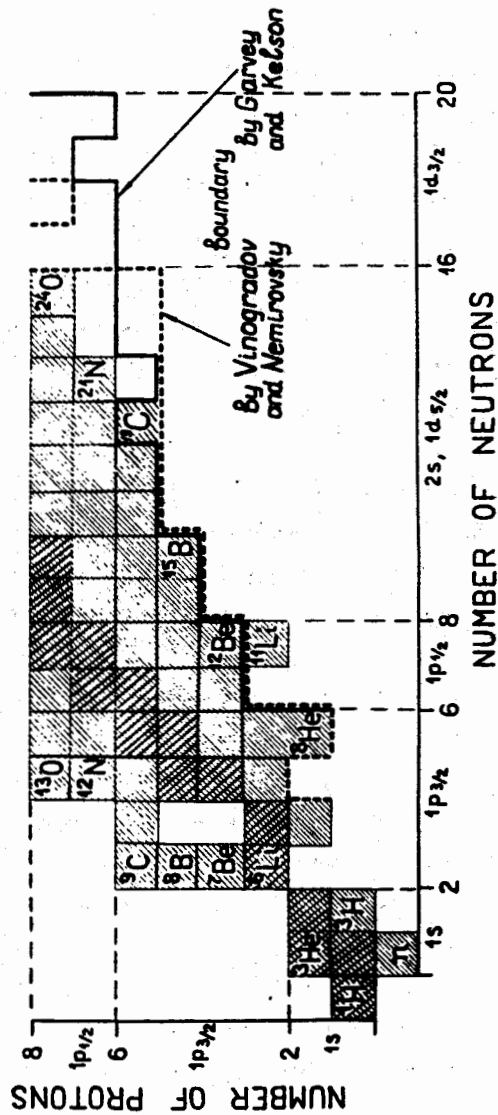


Рис. 4. Карта изотопов в области легких элементов. Пунктиром отмечена граница ядерной устойчивости по Виноградову и Немировскому, сплошной линией — по Гарвею и Келсону.

го поля несколько выше и ниже основного. Если бы ^{10}He был ядерно-устойчив, мы должны были бы зарегистрировать примерно 80 событий (рис. 5). Верхний предел сечения, обозначенный на этом рисунке точкой со стрелкой, соответствует регистрации одного события за 20 часов облучения. При поисках ^{13}Be и ^{14}Be ожидалась регистрация примерно 550 ядер ^{13}Be и от 30 до 70 ядер ^{14}Be (в зависимости от предположений об энергии связи двух нейтронов). ^{10}He ранее искался среди продуктов спонтанного деления ^{252}Cf , правда, в условиях очень плохой статистики и при делении ^{235}U тепловыми нейтронами /50/. В обоих случаях был получен отрицательный результат. Заметим, что ожидаемый выход ^{10}He в этих работах оценивался на основании формальной экстраполяции выходов ^4He , ^6He , ^8He .

Поскольку изотопы с малой энергией связи ^{14}B , ^{11}Li хорошо укладываются в систематику сечений (рис. 1), полученные нами результаты можно интерпретировать, как указания на ядерную неустойчивость ^{10}He , ^{13}Be и ^{14}Be .

Окончательный вывод о границе ядерной стабильности в области легких нуклидов с большим избытком нейтронов делать, по-видимому, еще рано. Нужны дальнейшие эксперименты с изотопами других элементов и более высокой чувствительностью, а также тщательный теоретический анализ условий образования в реакциях передачи с тяжелыми ионами и сохранение от развала легких нуклидов с малой энергией связи нейтронов.

Основные выводы

1. Разработан ряд методик для изучения реакций передачи, включая регистрацию радиоактивных и стабильных продуктов. Наиболее эффективной является комбинация магнитного анализа и метода ΔE , E .

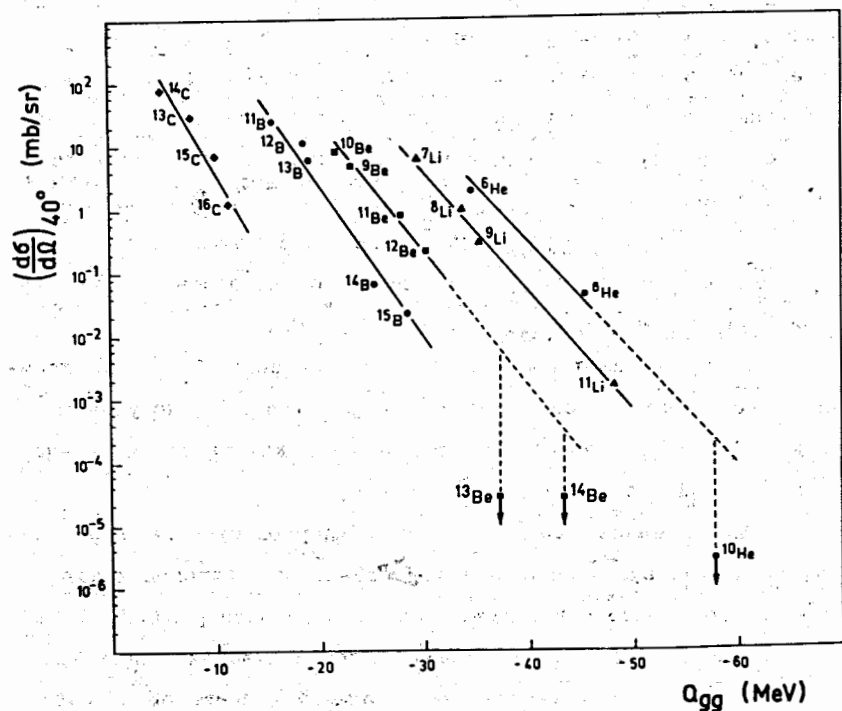


Рис. 5. Сечения образования изотопов углерода, бора, бериллия, лития и гелия при облучении ^{232}Th ионами ^{15}N с энергией 145 МэВ ЛСК, в зависимости от Q_{gg} . Указаны верхние границы сечения образования ^{10}He , ^{13}Be , ^{14}Be , установленные в эксперименте. Значения Q_{gg} для образования этих нуклидов соответствуют порогам их ядерной устойчивости. Для ^{14}Be второе значение Q_{gg} соответствует энергии связи двух нейтронов $-1,9 \text{ МэВ}^{50/}$.

2. На ряде ядер изучены реакции подхвата нейтрона и протона. Показано, что обе реакции протекают при периферийных поверхностных столкновениях и носят квазиупругий характер. Для подхвата нейтрона получена линейная зависимость логарифма сечения от энергии связи нейтрона в ядре-доноре. Обнаружено сильное влияние кулоновского поля ядра-мишени на сечение передачи протона.

3. Для многонуклонных передач получены данные о функциях возбуждения, угловых распределениях и энергетических спектрах. Установлена систематика сечений различных каналов реакций передачи для реакций со срывом протонов. Обнаружены передачи при глубоко неупругих столкновениях. Предложена возможная интерпретация этих процессов на основе образования двойной ядерной системы. Предложена систематика механизмов реакций передачи.

4. Реакции передачи с тяжелыми ионами впервые применены для синтеза изотопов легких элементов с большим избытком нейтронов. Получено 11 новых тяжелых изотопов C , N , O , F и Ne . Показано, что регистрируемый выход этих изотопов в реакциях передачи в сотни раз больше, чем в реакциях глубокого расщепления высокоэнергичными протонами.

5. Проведены эксперименты по оценке границы ядерной устойчивости для легких нуклидов с большим избытком нейтронов. Получены данные, свидетельствующие о ядерной неустойчивости ^{10}He , ^{13}Be и ^{14}Be .

Основные материалы диссертации опубликованы в работах /3, 6-10, 13, 15-20, 23-26, 29-31, 36-38, 44, 47-49, 51/ и докладывались на Всесоюзной конференции "Ядерные реакции при малых и средних энергиях" - 1957 г. /4/; конференции по

ядерным реакциям с многозарядными ионами - 1958 г., Дубна ^{/5/}; международном симпозиуме по экспериментальным методам в ядерных исследованиях - 1961 г., Англия ^{/7/}; международных конференциях по физике тяжелых ионов; 1963 г., США ^{/15,22/}; 1966 г., Дубна ^{/12,24,52/}; 1969 г., ФРГ ^{/30/}; 1971 г. Дубна ^{/49/}; Гордоновской конференции 1970 г., США; международной конференции по свойствам ядер, далеких от области бета-стабильности (1970 г.), Швейцария ^{/39/}; первом и втором проблемных симпозиумах по физике ядра - 1967 г., Тбилиси ^{/28/}; 1970 г. - Новосибирск ^{/42/}; XIX и XX ежегодных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра ^{/41,43/}, международном семинаре по исследованию атомного ядра с помощью заряженных частиц 1971 г., ГДР ^{/43/}.

Литература

1. G.N.Flerov. Proc. of the Second United Nations International Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy; United Nations, Geneva, 1958; vol. 14, p.151.
2. Г.Н.Флеров. Доклад на IV Межд. конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1971. Препринт ОИЯИ Р7-6133, Дубна, 1971.
3. В.В. Волков, А.С.Пасюк, Г.Н. Флеров. ЖЭТФ, 33, 585, (1957).
4. В.В. Волков, А.С. Пасюк, Г.Н. Флеров. Ядерные реакции при малых и средних энергиях. Труды Всесоюзной конференции (ноябрь, 1957), Изд. АН СССР, Москва, 1958, стр. 513.
5. В.В. Волков. Материалы конференции по ядерным реакциям с многозарядными ионами. Дубна, 1958. ОИЯИ Р-374, Дубна, 1959, стр. 81.
6. Г.Н.Флеров, В.В.Волков, Л.Поморски, Я. Тыс. ЖЭТФ 41, 1965, 1961.

7. G.N.Flerov, L.Pomorski, J.Tys, V.V.Volkov. Symposium on Nucl.Instruments, Harwell Proceedings. Ed. by T.B.Birks, London Heywood, 1962, p.242.
8. В.В. Волков, Л. Поморски, Я. Тыс. Сообщение ОИЯИ Р13-2965, Дубна, 1966.
9. А.Г. Артюх, В.В. Волков, Т. Квечинска, ЯФ 4, 1165, 1966.
10. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, J.Erö, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev and V.V.Volkov. Nucl.Instr. and Meth., 83, 72 (1970).
11. D.H.Wilkinson. Proc. of Intern.Conf.on Nuclear Structure, Kingston, Canada (D.A.Bromley and E.W.Vogt, University of Toronto Press, 1960), p.20.
12. В.В. Волков. Труды Межд. конференции по физике тяжелых ионов, Дубна, 1966, Д7-5342, 1970, вып. 3, стр. 145.
13. V.V.Volkov and T.Wilczynski. Nucl.Phys., A92, 495 (1967).
14. V.V.Volkov and T.Wilczynski. Int.Conf. on Nucl. Struct., Tokyo, Japan 1967; Contributions, p.212.
15. W.Grochulski, T.Kwiecinska, Lan Go-chan, E.Lozynski, J.Maly, L.K.Tarasov, V.V.Volkov. Proc. of the Third Conf. on Reactions between Complex Nuclei. Asilomar 1963, p.120.
16. W.Grochulski, T.Kwiecinska, Lian Go-chan, E.Lozynski, J.Maly, L.K.Tarasov, V.V.Volkov. Int. Conf. on Nuclear Structure; Tokyo, Japan, 1967. Contributions, p.215.
17. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, T.Erö, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov and J.Wilczynski. Nucl. Phys., A160, 511 (1971).
18. В.В. Волков, Л. Поморски, Я. Тыс, Г.Н. Флеров. ЖЭТФ 42, 635, 1962.
19. В.В. Волков, Л. Поморски, Я. Тыс, Г.Н. Флеров, ЖЭТФ 43, 865, 1962.

20. В.В. Волков, Л. Поморски, Я. Тыс, Я. Вильчински. ЖЭТФ 45, 865, 1962.
21. V.V.Volkov, L.Pomorski, J.Tys, G.N.Flerov, Proc. Conf. on Direct Interactions and Nuclear Mechanisms, Padua, 1962. Ed. by E.Clement and C.Villi. Cordon and Breach Sci.Publ.Inc., New York, London, 1962; p. 994.
22. L.Pomorski, T.Tys, V.V.Volkov and J.Wilczynski. Proc. of the Third Conf. on Reactions between Complex Nuclei. Ed. by A.Giorso, R.M.Diamond and H.E.Conzett. University of California Press, 1963; p.135.
23. L.Pomorski, T.Tys, V.V.Volkov. JINR E1-4817, Dubna, 1969.
24. В.В. Волков, Л. Поморски, Я. Тыс. Труды Межд. конференции по физике тяжелых ионов, Дубна, 1966. Д7-5342, Дубна, 1970. вып. 3, стр. 247.
25. A.G.Artukh, L.Pomorski, T.Tys and V.V.Volkov. Intern.Conf. on Nuclear Structure, Tokyo Japan, 1967. Contributions, 7.10, p. 214.
26. А.Г. Артюх, В.В. Волков, Л. Поморски, Я. Тыс, ОИЯИ Р7-5494 (1970).
27. V.V.Volkov, Proc. of the Intern.Conf. on Nucl. Physics, ed. by A.Zucker et al. Gatlinburg, 1966; Academic Press, New York and London, 1967; p. 85.
28. В.В. Волков. Труды проблемного симпозиума по физике ядра. Тбилиси 1967, том 1, стр. 226.
29. G.F.Gridnev, V.V.Volkov and J.Wilczynski. Nucl. Phys., A142, 385 (1970).
30. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, J.Wilczynski, V.V.Volkov. Proc. of the Intern. Conf. on Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, Heidelberg, 1969. Ed. by R.Bock, and W.R.Hering. North-Holland Publishing Comp. Amsterdam-London 1970; p. 140.

31. Я. Вильчински, В.В. Волков, П. Децовски, ЯФ 5, 942, 1967.
32. П.Э. Немировский, ЖЭТФ 36, 889, 1959.
33. А.И. Базь, В.И. Гольданский, Я.Б. Зельдович, УФН XXII 211, 1960.
34. А.И. Базь. Тезисы докладов XIX ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ереван, 1969, ч. 1, стр. 179.
35. А.И. Базь, Ф.Д. Демин, М.В. Жуков. ЯФ 9, 1184, 1969.
36. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev and V.V.Volkov. Nucl.Phys., A137, 348 (1969).
37. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov and J.Wilczynski. Phys. Lett., 31B, 129 (1970).
38. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, L.P.Chelnokov, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.I.Vakatov, V.V.Volkov and J.Wilczynski. Phys.Lett., 32B, 43 (1970).
39. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, J.Erö, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov and J.Wilczynski. Int.Conf. on the Properties of Nuclei Far from the Region of Beta-Stability, Leysin, Switzerland, 1970. CERN 70-30, Geneva, 1970, p.47.
40. А.Г. Артюх, В.В. Волков, Г.Ф. Гриднев, В.Л. Михеев. Тезисы докладов XI Совещания по ядерн. спектроскопии. Дубна, 1-5 июля 1969 г. 6-4756, Дубна, 1969, стр. 15.
41. А.Г. Артюх, В.В. Авдейчиков, Я. Вильчински, В.В. Волков, Г.Ф. Гриднев, В.Л. Михеев, Я. Эре, А.А. Воробьев, В.В. Грачев, Ю.К. Золите, И.А. Кондуров, А.М. Никитин, Д.М. Селиверстов. Известия АН СССР, XXXV 2, 1971.
42. А.Г. Артюх, В.В. Авдейчиков, Я. Вильчински, В.В. Волков, Г.Ф. Гриднев, В.Л. Михеев, Я. Эре. Второй проблемный симпозиум по физике ядра. Новосибирск, 1970 г., стр. 532.
43. В.В. Волков. Проблемы физики элементарных частиц и атомного ядра, т.2, вып. 2, стр. 285, Атомиздат, 1971.

44. В.В. Волков. Межд. семинар по исследованию атомного ядра с помощью заряженных частиц. Кюлунгсборн, ГДР, 1971, часть 1, стр. 13.
45. G.T. Garvey and I. Kelson. Phys. Rev. Lett., 16, 197 (1966).
46. Б.И. Виноградов, П.Э. Немировский. ЯФ 10, 505, 1969.
47. A.G. Artukh, V.V. Avdeichikov, J. Erö, G.F. Gridnev, V.L. Mikheev, V.V. Volkov and J. Wilczynski. Phys. Lett., 33B, 407 (1970).
48. A.G. Artukh, V.V. Avdeichikov, G.F. Gridnev, V. V. L. Mikheev, V.V. Volkov and J. Wilczynski. Nucl. Phys., A168, 321 (1971).
49. А.Г. Артюх, В.В. Авдейчиков, Я. Вильчински, В.В. Волков, Г.Ф. Гриднев, В.Л. Михеев, Я. Эре. Международная конференция по физике тяжелых ионов, Дубна, 1971, Д7-5769, Дубна, 1971, стр. 193.
50. А.А. Воробьев, В.Т. Грачев, Ю.К. Залите, И.А. Кондуров, А.М. Никитин, Д.М. Селиверстов. Препринт ФТИ-232, Ленинград, 1969.
51. J. Wilczynski and V.V. Volkov. Nuc. Phys., A93, 113 (1967).
52. Я. Вильчински, В.В. Волков, Труды Межд. конференции по физике тяжелых ионов, Дубна, 1966, Д7-5342, Дубна, 1970, вып. 3, стр. 187.
53. А.Г. Артюх, Я. Вильчински, В.В. Волков. Тезисы докладов XVIII ежегодн. сов. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Рига, 1968, Изд. "Наука", стр. 127.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 апреля 1972 года.