

СЗУ1.2

Б-201

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



1994/2-73

4/VI-73  
7 - 7073

О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ В ОИЯИ  
ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ЯДРА  
С ПОМОЩЬЮ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

В составлении участвовали: А. Баланда, В. Волков,  
Ю. Гангрский,  
В. Карнауков,  
С. Кармян, К. Каун,  
Г. Н. Флеров (редактор)

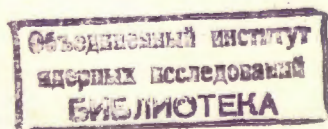
**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

7 - 7073

О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ В ОИЯИ  
ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ЯДРА  
С ПОМОЩЬЮ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

В составлении участвовали: А. Баланда, В. Волков,  
Ю. Гангрский,  
В. Карнаухов,  
С. Карамян, К. Каун,  
Г. Н. Флеров (редактор)



## О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
I. ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
II. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОЖНЫХ ЯДЕР . . . . .	7
I. Кулоновское взаимодействие . . . . .	8
I.1. Кулоновское возбуждение коллективных состояний . . . . .	8
I.2. Деформация ядер в процессе столкновения, кулоновское деление . . . . .	11
2. Реакции передачи . . . . .	13
2.1. Использование реакций передачи для изучения структуры ядер . . . . .	14
2.2. Многоуклонные передачи . . . . .	15
3. Составное ядро . . . . .	17
3.1. Неделющиеся ядра . . . . .	17
3.2. Деление ядер . . . . .	22
III. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕР, УДАЛЕННЫХ ОТ ЛИНИИ БЕТА-СТАБИЛЬНОСТИ . . . . .	25
I. Протонные излучатели . . . . .	27
2. Ядра с большим избытком нейтронов . . . . .	30
IV. СПОНТАННО ДЕЛЯЩИЕСЯ ИЗОМЕРЫ . . . . .	33
V. ИССЛЕДОВАНИЕ НИЖНИХ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР . . . . .	35
I. Протяженные вращательные полосы . . . . .	35
2. Измерения времен жизни уровней с помощью эффекта Доплера . . . . .	38
3. Исследование изомерных состояний ядер . . . . .	40
4. Измерение магнитных моментов возбужденных состояний . . . . .	42
VI. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ . . . . .	44
VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	47

## I. В В Е Д Е Н И Е

Исследования ядра с помощью тяжелых ионов проводятся в различных лабораториях мира уже в течение примерно 20 лет. За это время было продемонстрировано, что тяжелые ионы являются уникальным средством для получения различного рода важной информации об атомном ядре. Использование тяжелых ионов вдохнуло новую жизнь в такие направления ядерной физики, как кулоновское возбуждение, исследование деления и распада составного ядра, исследование ядерной поверхности, спектрометрия возбужденных состояний нестабильных ядер и т.д. В реакциях с тяжелыми ионами впервые наблюдались такие фундаментальные явления, как: спонтанное деление изомеров, протонный распад радиоактивных ядер, тройное деление, квазимолекулярные состояния, многократное кулоновское возбуждение. С помощью тяжелых ионов было синтезировано большое число новых изотопов и изомеров.

Реакции с тяжелыми ионами являются сейчас единственным способом расширения границ периодической системы элементов: с помощью пучков ускоренных ионов кислорода и неона были синтезированы в Дубне элементы I02, I03 и I04 (курчатовий), I05 (нильсборий).

В последние годы определились аспекты использования тяжелых ионов для народного хозяйства и в смежных областях науки. В этом отношении работа только начинается, но перспективы многообещающие.

До настоящего времени Объединенный институт ядерных исследований сохраняет лидерство в области физики тяжелых ионов. Это было обусловлено созданием в 1960 году циклотрона У-300,

который по своим параметрам (ассортимент частиц, интенсивности пучков) значительно превосходит все ускорители многозарядных ионов за рубежом.

Трудно переоценить роль тяжелых ионов, как средства для исследований ядерной структуры, в течение последних десяти лет. Опасно недооценить место этого экспериментального метода в ядерной физике ближайшего десятилетия. Центральной проблемой ближайшего будущего является проникновение в новую область стабильности - синтез и изучение свойств сверхтяжелых элементов ( $Z=110-126$ ). Анализ показывает, что единственный путь здесь - использование ускорителей, способных давать интенсивные пучки тяжелых ионов вплоть до урана. Появление таких ускорителей существенно обогатит и другие направления исследований. Для примера можно назвать следующие задачи:

- а). Кулоновское возбуждение состояний со спинами вплоть до  $20\hbar$ ;
- б). Исследование деформируемости ядер кулоновским полем;
- в). Исследование "гидродинамики" ядерного вещества;
- г). Кулоновское деление;
- д). Кулоновское возбуждение изомеров формы;
- е). Деление при параметрах делимости, превышающих критический;
- ж). Изучение пересмещенных протонами и нейтронами ядер;
- з). Распад составных ядер с аномально высоким угловым моментом и т.д.

Фундаментальный интерес с точки зрения электродинамики представляют ядра с  $Z > 137$ . Нет сомнения, что направления ядерной физики, связанные с применением тяжелых ионов, находятся сейчас на подъеме; их развитие, безусловно, принесет еще немало важных

результатов, которые продвинули наше понимание ядерной структуры.

Ведущие физики Запада это хорошо представляют. На Международной конференции по свойствам ядерных состояний в Монреале (1969г.) проф. Х. Э. Гоув (Рочестер, США) сделал обзорный доклад "Успехи в экспериментальных методах". Проф. Х. Гоув говорит: "Некоторые считают, что эра волнующих событий в ядерной физике кончилась, и теперь для нее осталась только прозаическая задача выяснения деталей. Я не придерживаюсь этой точки зрения". И далее свой доклад он практически целиком посвятил перспективам развития исследований с помощью тяжелых ионов, чтобы "... подчеркнуть веру в то, что физика ядерной структуры будет продолжать оставаться волнующей областью исследований в течение многих лет". Он глубоко убежден, что много важных результатов по структуре ядра будет получено на новых ускорителях тяжелых ионов (вплоть до урана с энергиями в сотни и тысячи Мэв). Центральной задачей из тех, что ясны уже сейчас - является синтез и исследование свойств сверхтяжелых элементов из новой области стабильности. Он говорит: "Возможно, не будет преувеличением сказать, что получение сверхтяжелых элементов является одной из последних границ в физике ядерной структуры".

О месте исследований с тяжелыми ионами говорит также тот факт, что 25% всех публикаций по ядерной физике в "Phys. Rev. Lett." связано с тяжелыми ионами.

Волнующая перспектива изучения сверхтяжелых ядер отмечалась проф. В. Вайскопфом на панели-дискуссии в Дубне в 1968 году: "Это область, в которой мы исследуем новые явления, это подобно открытию нового континента".

По мнению проф. О. Бора (Копенгаген, Дания), ядерная физика ближайших 10 лет — это физика тяжелых ионов.

Интерес зарубежных ученых к физике тяжелых ионов отнюдь не платонический. Сейчас в режиме ускорения тяжелых ионов работает четверть всех ускорителей в мире. Скоро появятся установки, способные давать интенсивные пучки очень тяжелых ионов. Близится к завершению реконструкция линейного ускорителя в Беркли, в результате чего будут получены пучки ксенона. В 1974 г. вступит в строй "УНИЛИАК" в Дармштадте (ФРГ), способный ускорять все ионы вплоть до урана. В ФРГ будет сооружен и второй ускоритель такого типа. В США обсуждается проект создания национальной лаборатории тяжелых ионов с ускорителем для всех ионов. Расширяется ускорительная база для тяжелых ионов во Франции и Японии.

Будет большим просчетом, если Объединенный институт ядерных исследований утратит свое лидерство в области исследований ядра с помощью тяжелых ионов. Это случится, если в следующей пятилетке не будет сооружен ускоритель ионов вплоть до урана с высокой интенсивностью пучков.

До настоящего времени Лаборатория ядерных реакций является единственным местом в мире, где имеется пучок ионов ксенона, полученный на тандем-циклотроне. Проведены первые эксперименты по изучению взаимодействия ксенона с ядрами, первые опыты по синтезу сверхтяжелых элементов. Однако эта установка будет неконкурентно-способна с появлением специальных ускорителей очень тяжелых ионов, рассчитанных на большие энергии и интенсивности.

Реконструкция циклотрона У-300 в У-400 расширит экспериментальные возможности, но не решит проблемы получения сверхтяжелых ионов, необходимых для синтеза элементов из новой области стабильности, и ряда других задач. Действительно, для получения достаточно высокой энергии на ускорителе У-400 нужно иметь источники ионов с высокой степенью ионизации: +18 для ксенона и +28 для урана. Это означает, что интенсивности пучков таких ионов на У-400 будут ничтожно малы.

В дальнейшем дается краткий обзор основных направлений исследований с тяжелыми ионами с акцентом на новые возможности, которые откроются при использовании более тяжелых частиц и более интенсивных пучков, чем имеющиеся сейчас.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОЖНЫХ ЯДЕР.

Результат столкновения двух сложных ядер при данной энергии зависит от прицельного параметра. Дальние пролеты приводят к кулоновскому возбуждению, главным образом, коллективных состояний. Касательные столкновения или близкие к ним сопровождаются передачей нуклонов. Поскольку взаимодействующие ядра состоят из многих нуклонов, каналы реакции передачи весьма разнообразны. При меньших прицельных параметрах образуются составные ядра. Тяжелые ионы дают уникальную возможность исследовать статистические свойства возбужденного ядра.

Рассмотрим несколько подробнее перспективы исследований отдельных типов реакций с тяжелыми ионами.

## I. Кулоновское взаимодействие.

### I.1. Кулоновское возбуждение коллективных состояний.

Кулоновское возбуждение уровней сталкивающихся ядер является основным неупругим процессом при энергии частиц ниже кулоновского барьера. Сечение этого процесса при столкновении двух ядер средней массы достигает величины 100-1000 бари для нижних уровней коллективной природы. За счет процесса многократного кулоновского возбуждения заселяется целая система низколежащих коллективных состояний (вращательных и колебательных). С увеличением масс бомбардируемых частиц сечение многократного кулоновского возбуждения быстро возрастает.

Отсюда ясно, что кулоновское возбуждение на пучках очень тяжелых ионов при энергии 3-5 Мэв/нукл. может служить эффективным методом заселения комплекта коллективных уровней вплоть до состояний с высоким спином ( $> 20\hbar$ ). Достоинством метода является практически полное отсутствие каких-либо фонов и конкурирующих процессов, что существенно упрощает интерпретацию данных.

Использование к.в.я. в качестве источника возбужденных ядер дает возможность вести многостороннее исследование структуры коллективных состояний ядер, например:

а). Измерение спектров излучения позволяет установить схему уровней. В случае ротационных полос энергии переходов непосредственно определяют величину момента инерции ядра в функции спина. В последнее время установлено, что зависимость момента инерции от угловой скорости вращения является сложной функцией. Этот эффект, возможно, связан с фазовым переходом в сверхпроводящем ядре. Несколько подробнее об этом будет сказано

в одном из последующих разделов. Здесь только отметим, что многократное кулоновское возбуждение очень тяжелыми ионами позволит исследовать протяженные вращательные полосы в наиболее чистых условиях.

На рис. I в качестве примера показан  $\gamma$ -спектр многократного кулоновского возбуждения вольфрама ионами  $^{40}\text{Ar}$ , ускоренного на циклотроне У-300 до энергии 130 Мэв.

б). Измерение времен жизни состояний с помощью эффекта Доплера на ядрах отдачи (при использовании техники совпадений  $\gamma$ -квантов и рассеянных ионов) позволит определить квадрупольные моменты и параметры деформации, а также их зависимость от спина.

в). Определение статического квадрупольного момента возбужденных состояний. Один из наиболее перспективных методов здесь основан на измерении прецессии углового распределения. Как было показано Г.Брейтом, взаимодействие статического квадрупольного момента возбужденного состояния ( $2+$ ) с электрическим полем тяжелого иона меняет вероятность заполнения  $P^{(m)}$  подсостояний с различным  $m$ . Это приводит к своего рода смещению углового распределения  $\gamma$ -квантов, измеряемых в совпадении с рассеянной частицей. Угол смещения относительно направления переданного импульса оказывается пропорциональным квадрупольному моменту. Налетающая частица  $Z$  со скоростью  $v$  на расстоянии наибольшего сближения  $D$  обуславливает градиент электрического поля  $\frac{Ze}{D^3}$ . Угловое распределение квантов от перехода  $2+ \rightarrow 0+$  смещается на величину  $\Delta \sim \frac{PZQ}{D^2V}$ ,  
где  $Q$  - статический квад-

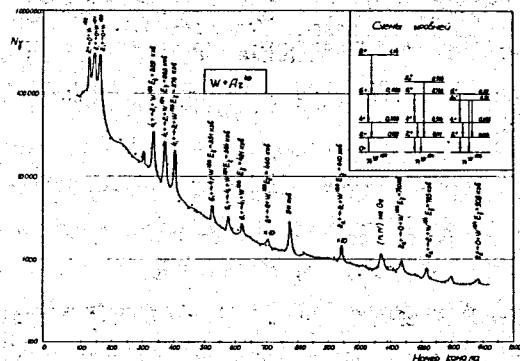


Рис.1. Энергетический спектр гамма-излучения, зарегистрированный Ge(Li) спектрометром при облучении естественной смеси изотопов вольфрама пучком ионов  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 130 МэВ.

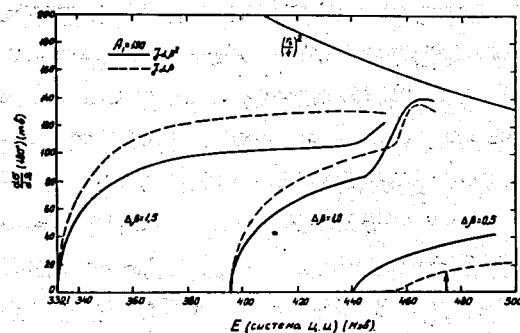


Рис.2. Результат расчета функции возбуждения процесса кулоновского деления ядер  $^{238}\text{U}$  при рассеянии ионов  $^{130}\text{Xe}$  на угол  $180^\circ$  (L.Wilets et al.Phys.Rev.156,1349,1967).  $\frac{Z_c^2}{4}$  - сечение упругого рассеяния,  $\Delta\beta$  - разность деформации ядер в седловой точке и в основном состоянии,  $J(\beta)$  - момент инерции ядра в зависимости от деформации  $\beta$ .

рупольный момент состояния  $2+$ ,  $P$  - поляризация этого состояния. Измерением  $\Delta$  определяется не только величина, но и знак квадрупольного момента. При возбуждении кислородом состояния  $2+$  в  $^{150}\text{Sm}$  ( $Q = 1$  барн) величина  $\Delta \approx 0,5^\circ$ . Требуется весьма утонченная техника, чтобы точно измерить такой эффект. Однако величина  $\Delta$  линейно зависит от  $Z$ -бомбардирующей частицы. Переход к более тяжелым ионам будет весьма плодотворен для этого метода.

г) Исследования взаимодействия электрических и магнитных моментов ядер с мощными магнитными и электрическими полями, действующими на ядро отдачи при торможении в средах.

Это особый круг исследований, относящийся, по существу, к применению методов ядерной физики для исследования твердого тела и решения ряда проблем атомной физики.

1.2. Деформация ядер в процессе столкновения, кулоновское деление ядер.

Одним из новых эффектов, еще не наблюдавшихся экспериментально, но предсказанных теоретически, является динамическая деформация ядер кулоновским полем в процессе столкновения. Эффект возникает в случае, когда оба взаимодействующих ядра обладают достаточно высоким атомным номером (по оценкам  $Z > 30$ ). При этом кулоновское поле, действующее на каждое ядро, оказывается достаточно большим, чтобы изменить условия равновесия кулоновских сил и сил поверхностного натяжения в ядре и заставить его принять новую равновесную форму. Такой вывод следует из предположения о квазистатическом характере процесса столкновения. В действительности процесс столкнове-

ния является достаточно быстрым, и возникают связанные с этим эффекты запаздывания деформации, кулоновского возбуждения внутренних степеней свободы ядра и др. Модель усложняется, кроме того, необходимостью включения в расчет динамических характеристик ядра, таких как инерциальные параметры (массовые коэффициенты), а также параметры жесткости, о которых сейчас имеется бедная информация. Эксперименты по поиску эффектов деформации ядер кулоновским полем можно выполнять различными способами:

- а). Измерение угловых распределений упруго рассеянных тяжелых ионов, в зависимости от энергии частиц;
- б). Измерение функций возбуждения реакций полного слияния с целью определения величины кулоновского барьера взаимодействующих ядер;
- в). Измерение функций возбуждения для процессов кулоновского возбуждения ядер;
- г). Опыты по регистрации кулоновского деления ядер.

Эксперименты, перечисленные в пунктах а) и б), имеют важнейшее значение для точного определения основных параметров потенциала взаимодействия сложных ядер. Их необходимо выполнять безотносительно к проблеме поиска кулоновской деформации ядер. В то же время опыты этого типа, возможно, не столь чувствительны к обнаружению динамической деформации, поскольку небольшие изменения параметра радиуса потенциала при переходе к все более тяжелым бомбардирующим частицам могут найти объяснение, не связанное с динамической деформацией.

Измерение энергетической зависимости сечений кулоновского возбуждения в области энергий волизи барьера представляет значительный интерес для обнаружения интерференции кулоновского и ядерного взаимодействий. Отсюда можно получить сведения о протяженности "хвоста" ядерного потенциала. В то же время получение данных о динамической деформации ядер из подобных опытов затруднено тем, что пока отсутствует точная теория многократного кулоновского возбуждения с учетом эффектов деформации взаимодействующих ядер.

Кулоновское деление может стать наиболее достоверным доказательством существования деформации сложных ядер в процессе столкновения. Кулоновское деление - необычное физическое явление, обладающее целым рядом характерных кинематических особенностей, что позволяет поставить опыты таким образом, чтобы исключить неопределенность в выводах о его наблюдении или ненаблюдении. Количественное изучение закономерностей кулоновского деления, таких как зависимости сечения от энергии, угла рассеяния частиц и от атомного номера ядра мишени, угловые корреляции осколков деления и рассеянной частицы должны дать важные сведения о динамике процесса деления. Эти исследования могут дать такую важную информацию о свойствах ядра, как жесткость, вязкость ядерной жидкости, величина массовых коэффициентов в коллективной кинетической энергии ядер и т.д.

## 2. Реакции передачи.

Реакции передачи на тяжелых ионах обладают рядом особенностей по сравнению с прямыми реакциями на легких частицах. Значительный заряд и масса налетающего иона приводят к резкому



возрастанию роли кулоновских и центробежных сил во взаимодействии. Два столкнувшихся ядра не всегда сливаются даже при сильном перекрытии ядерных поверхностей. Для каждой пары ядер существует критический угловой момент, выше которого образования компаунд-ядра не происходит. С ростом  $A$  и  $Z$  иона доля компаунд-ядра в полном сечении реакций падает, и для таких ионов, как  $Kr$ ,  $Xe$ , реакции передачи становятся доминирующим ядерным процессом.

В настоящее время в изучении реакций передачи можно выделить два интенсивно развивающихся направления. Одно из них связано с получением информации о структуре известных ядер, другое — с синтезом и изучением свойств новых изотопов и элементов.

### 2.1. Использование реакций передачи для изучения структуры ядер.

Хорошо известно, что реакции срыва и подхвата на легких частицах:  $(d,p)$ ,  $(d,n)$ ,  $(p,d)$  являются эффективным методом ядерной спектроскопии. Получаемая информация отражает преимущественно одночастичный аспект ядерных состояний. Реакции передачи на тяжелых ионах позволяют сделать следующий шаг. Срывая и подхватывая дейтрон, пары нейтронов, протонов и, в особенности,  $\alpha$ -частицы, можно получить важные сведения о корреляциях нуклонов в ядрах. Особый интерес в последнее время вызывает четверные корреляции " $\alpha$ -частичного" типа. Возбуждение таких состояний недоступно для легких частиц. Однако передача  $\alpha$ -частицы не предел для тяжелых ионов при возбуждении кластерных состояний. Наблюдение квазимолекулярных состояний при рас-

сеянии  $^{12}C$  на  $^{12}C$  и  $^{16}O$  на  $^{16}O$  позволяет думать о возможности передачи крупных комплексов нуклонов, обладающих повышенной внутренней прочностью ( $C^{12}_0I^{16}$ ).

Использование реакций передачи для изучения структуры ядер требует хорошего энергетического разрешения. Создание мощного циклотрона тяжелых ионов с высокой интенсивностью пучков позволит ввести монохроматор и тем самым создаст благоприятные условия для развития исследований по ядерной спектроскопии в рассмотренных выше направлениях.

### 2.2. Многонуклонные передачи

Многонуклонные передачи являются спецификой тяжелых ионов. Наблюдались реакции, в которых от ядра к ядру передавались до 2-х, 3-х десятков нуклонов. Механизм этих реакций не имеет аналога среди реакций на легких частицах. При столкновении с энергией выше кулоновского барьера и угловым моментом, большим критического, но близким к нему, большая часть кинетической энергии сбрасывается, переходя в возбуждение ядер. Скорость относительного движения ядер резко падает, и они, по-видимому, образуют систему, напоминающую гантель, которая поворачивается как единое целое. Поворачиваясь, система деформируется и, наконец, разрывается, так как кулоновские и центробежные силы превосходят притяжение между ядрами. Оценки показывают, что время жизни двойной ядерной системы много больше характерного ядерного времени. В результате в системе успевает установиться подобие статистического равновесия и сечение различных каналов реакций передачи будет определяться плотностью конечных состояний. Это позволяет понять найденную в ЛЯР зависимость сечений реакций передачи от

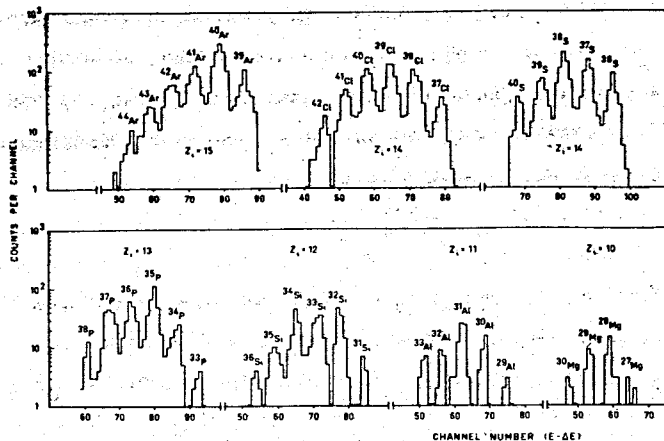


Рис.3. Выход изотопов Mg, Al, Si, P, Cl, Ar в реакциях передачи при облучении  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 290 Мэв. Впервые зарегистрированы изотопы  $^{29,30}\text{Mg}$ ,  $^{31,32,33}\text{Al}$ ,  $^{33,34,35,36}\text{Si}$ ,  $^{35,36,37,38}\text{P}$ ,  $^{39,40}\text{S}$ ,  $^{40,41}\text{Cl}$ . Идентификация изотопов осуществлялась комбинацией магнитного анализа и метода  $\Delta E, E$ . Угол наблюдения продуктов -  $40^\circ$ . Указаны зарядовые состояния, в которых регистрировались изотопы.

$Q_{\text{ср}} \equiv Q_0$  - энергии, идущей на перестройку ядер из начальных в конечные (см.рис.9).

Многонуclidные передачи при глубоконеупругих столкновениях удивительным образом соединяют в себе свойства компаунд-ядра и прямых процессов и занимает промежуточное положение между этими классическими механизмами ядерных реакций. Реакции многонуclidных передач могут быть использованы как способ получения изотопов. Так, при облучении  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{40}\text{Ar}$  наблюдалось образование из  $^{40}\text{Ar}$  легких элементов от бора до никеля. Сопряженные тяжелые продукты в этом случае имеют Z, лежащее между 80 и 103. Чем больше масса налетающего ядра, тем шире диапазон значений A и Z конечных продуктов. Использование интенсивных пучков тяжелых ионов, ускоренных на мощном циклотроне, существенно расширит такие возможности.

### 3. Составное ядро.

#### 3.1. Неделаящиеся ядра.

Реакции с образованием составного ядра - один из основных типов взаимодействия сложных ядер. Хотя много уже известно об этом типе реакции, еще больше предстоит узнать, объем и значимость информации существенно возрастает при переходе к исследованиям с более тяжелыми и более энергичными ионами.

Еще много неясного относительно первого этапа реакции - стадии смятия ядер. Что происходит, когда сталкиваются две капли ядерного вещества? Как они деформируются? Как перемещаются их составные части - нейтроны и протоны? Какова "гидродинамика" ядерной материи? На этой стадии конкурируют процессы

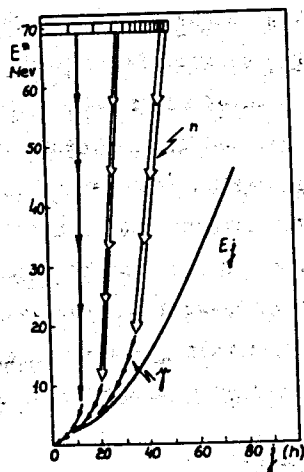


Рис. 4. Диаграмма распада составного ядра с высоким спином. Парабола  $E_J$  - проходит через значения энергий, отвечающих минимальной плотности уровней ядра. Прямоугольники вверху показывают распределение составных ядер из реакции  $\text{Na} + {}^{12}\text{C}$  (95 Мэв) по спину. Вначале идет нейтронный каскад, затем каскад  $\gamma$ -лучей из состояний, отличающихся от  $E_J$  примерно на энергию связи нейтрона.

полного слияния ядер и "прямого" взаимодействия того или иного типа. Сведения о динамике процесса слияния могут быть получены из измерений зависимости сечения слияния от энергии и массы бомбардируемых частиц.

Практически не изучен вопрос о предравновесной эмиссии частиц из системы двух ядер, предшествующей появлению составного ядра. Для экспериментов в этом направлении требуются интенсивные пучки ионов с энергией 20-30 Мэв/нуклон.

Составные ядра, образуемые тяжелыми ионами, характеризуются большой энергией возбуждения и высоким угловым моментом (исчисляемым десятками  $\hbar$ ). Схематическая диаграмма распада вращающегося составного ядра показана на рис. 4. На первом этапе испускаются нуклоны, уносящие большую часть энергии возбуждения. Затем ядро оказывается в нейтронно-метастабильном состоянии, имеющем возбуждение, превышающее энергию связи нейтрона, но малую нейтронную ширину из-за высокого углового момента. Переход в основное состояние происходит путем каскада  $\gamma$ -квантов. Этот каскад на диаграмме  $E-J$  идет вблизи линии, соответствующей "холодному" вращению ядра "угавт"-линия. Это - качественное представление о распаде вращающегося составного ядра. Количественные данные по ряду важных пунктов весьма ограничены. Наиболее слабо изучена последняя стадия распада - гамма-каскад. Необходимы детальные исследования спектров, угловых распределений, множественности  $\gamma$ -лучей.

Расчеты показывают, что вращающееся ядро должно деформироваться под действием центробежных сил. При малых энергиях вращения возбужденное ядро имеет форму сплюснутого сфероида. С увеличением энергии вращения деформация постепенно растет,

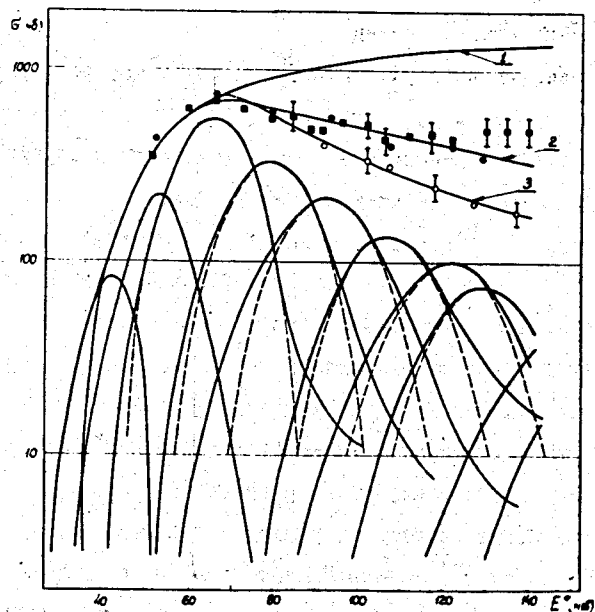


Рис.5. Функции возбуждения реакций  $^{130}\text{Te}(I^2, I^3, \alpha, xn)$  при числе нейтронов  $x$  от 3 до 12, измеренные на пучке циклотрона ДЯР У-200. Пунктиром показаны кривые Гаусса, совпадающие с экспериментом вблизи максимумов функций возбуждения. Кривая 1 - расчет сечения образования составного ядра без учета критического углового момента. Кривая 2 проведена по экспериментальным точкам, полученным суммированием сечений всех реакций типа  $(I^2, I^3, \alpha, xn)$  и  $(I^2, I^3, \alpha, xn)$ . Кривая 3 - суммарное сечение реакций  $(I^2, I^3, \alpha, xn)$ .

пока энергия вращения (в единицах поверхностной энергии) не достигнет некоторого критического значения. Дальнейшее поведение ядра зависит от величины параметра делимости: тяжелые ядра разрываются центробежными силами, для недеформирующихся ядер равновесной формой становится аксиально несимметричная конфигурация - псевдоэллипсоид. Исследование деформации вращающегося ядра дало бы важную информацию о свойствах ядерной материи. Экспериментально эффект деформации может быть изучен по эмиссии заряженных частиц. Этот эффект будет выделен более четко, если удастся работать с ориентированными вращающимися ядрами. Составные ядра, образующиеся в реакциях с тяжелыми ионами, имеют угловые моменты, изотропно распределенные в плоскости, перпендикулярной пучку. Если использовать реакцию частичного слияния, то регистрация фрагмента бомбардирующей частицы выделит возбужденные ядра с угловыми моментами, перпендикулярными плоскости реакции. Можно надеяться, что исследование испарительных спектров заряженных частиц под различными углами к этой плоскости даст информацию о деформации вращающегося ядра. Такие эксперименты требуют более высокой интенсивности пучков, чем обычные опыты по исследованию распада составного ядра.

Существенное повышение интенсивности пучков тяжелых ионов позволит исследовать и другие возможные поляризационные эффекты: поляризацию испарительных нейтронов и  $\gamma$ -лучей. Оценки показывают, что при выделении поляризованных вращающихся ядер можно ожидать значительной поляризации нейтронов. Эксперименты по исследованию поляризации нейтронов, испускаемых возбужденными ядрами с высоким угловым моментом, сложны,

однако они открывают новый подход к изучению спин-орбитального взаимодействия нуклона с ядром.

### 3.2. Деление ядер.

Деление является основным способом распада тяжелых возбужденных составных ядер. При переходе к очень тяжелым ускоренным ионам, таким как ксенон и уран, деление должно стать еще более универсальным процессом, играющим существенную роль при бомбардировке практически всех доступных мишеней. При этом особый интерес представляет исследование гигантских составных ядерных систем, содержащих более 150 протонов и более 250 нейтронов. Поведение таких систем должно существенно отличаться от привычных представлений, которыми характеризуется образование и распад составных ядер. Однако без экспериментальных исследований в настоящее время весьма трудно высказать сколь-нибудь достоверные предположения даже о глобальных характеристиках процесса взаимодействия двух тяжелых ядер, не говоря уже о многих важных деталях. Можно лишь сформулировать некоторые основные вопросы, на которые требуется ответить и которые уже изучаются сейчас в Дубне с использованием пучков ионов ксенона и криптона, полученных на тандем-циклотроне:

а). Образуется ли при взаимодействии двух тяжелых ядер промежуточный объект - составная система, или процесс носит характер квазиупругого рассеяния с малым обменом массой и кинетической энергией? Если образуется, то:

б). Каково время жизни составной системы и в какой степени способ ее распада независим от способа образования?

в). Каков вид распределений массы, заряда и кинетической энергии продуктов распада и зависимости их от характеристик составной системы?

Кроме общезначимости данных исследований изучение деления ядер под действием очень тяжелых ионов имеет большое значение для разработки нового метода синтеза изотопов и элементов, в том числе и сверхтяжелых элементов. Эта проблема обсуждается детально в отдельном разделе.

Среди перечисленных выше вопросов ключевое место занимает вопрос о времени жизни составной системы в реакциях с очень тяжелыми ионами, поскольку время жизни системы в конечном итоге определяет основные стороны развития процесса. В настоящее время в Дубне выполняются эксперименты по измерению ультракоротких времен жизни делящихся составных ядер в диапазоне ( $10^{-17} - 10^{-18}$ ) сек с помощью нового метода, использующего эффект теней в ядерных реакциях на монокристаллических мишенях. Получены данные о временах жизни  $\tau$  составных ядер, образующихся при облучении вольфрама и тантала ионами  $^{11}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{31}\text{P}$ . В данных экспериментах измеряется среднее смещение составных ядер за счет скорости отдачи  $V_c$  из узлов кристаллической решетки, равное  $V_c \tau$ . Измеримый диапазон смещений равен  $5 \cdot 10^{-10} \text{ см} < V_c \tau < 10^{-8} \text{ см}$ , откуда измеримый диапазон времен при скорости отдачи  $V_c = 5 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$  (характерная скорость для реакций типа  $W + ^{22}\text{Ne}$ ) лежит в интервале  $10^{-18} \text{ сек} < \tau < 2 \cdot 10^{-17} \text{ сек}$ . Очевидно, что при использовании сверхтяжелых ионов скорость отдачи составных ядер значительно возрастет и измеримый диапазон времен сдвинется в сторону существенно более коротких времен (около  $10^{-19}$  сек).

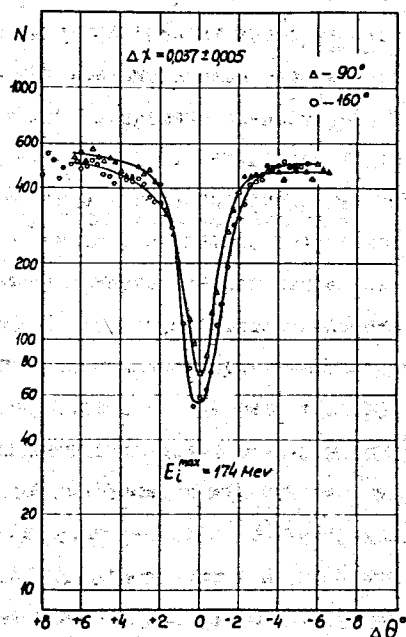
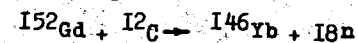
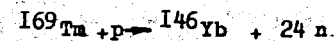


Рис. 6. Результат просмотра теневой картины (фрагментограммы) в угловом распределении осколков деления при облучении монокристалла вольфрама ионами  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 174 Мэв. Разность глубин теней  $\Delta\chi$ , зарегистрированных под углами  $90^\circ$  и  $160^\circ$  к пучку бомбардирующих частиц, связана с временем жизни составного ядра  $\tau$  соотношением:  $\Delta\chi = \text{const} (Vc\tau)^2$ .

Выполнение этих исследований применительно к реакциям со сверхтяжелыми ионами может дать самую существенную информацию о механизме процессов взаимодействия двух тяжелых ядер. На рис. 6 для иллюстрации приведены результаты просмотра теневой картины, зарегистрированной стеклянным детектором осколков деления при облучении монокристалла вольфрама ускоренными ионами  $^{22}\text{Ne}$ .

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕР, УДАЛЕННЫХ ОТ ЛИНИИ БЕТА-СТАБИЛЬНОСТИ.

Рис. 7 показывает карту изотопов, включающую как уже открытые изотопы, так и еще не обнаруженные. Согласно оценке, полное число возможных радиоактивных изотопов равно  $\sim 6000$ . К настоящему времени известно не более 1/3 от этого числа. Но главное заключается не в том, что расширение коллекции радиоактивных изотопов обогащает систематику свойств ядер. Удаление от линии стабильности открывает новые возможности получения информации о ядре, недоступные ранее. Здесь есть новые дважды магические ядра, новые области деформированных ядер, новые типы радиоактивного распада. Тяжелые ионы — весьма эффективное средство получения пересыщенных протонами ядер. Это видно из следующего примера, где  $^{146}\text{Yb}$  получается за счет реакции, вызываемых протоном,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{28}\text{Si}$  и  $^{58}\text{Ni}$



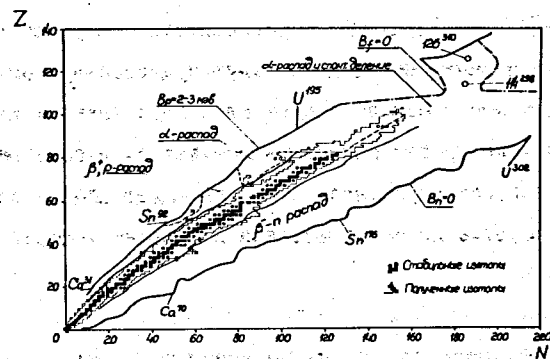


Рис.7. Карта изотопов. Указаны стабильные и искусственно полученные радиоактивные изотопы, а также показаны границы нуклонной стабильности ядер.

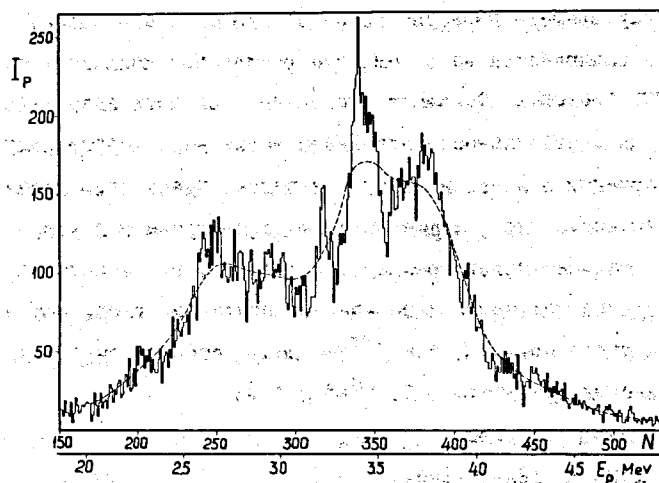


Рис.8. Энергетический спектр запаздывающих протонов при распаде изотопа  $^{109}\text{Te}$ .

Интенсивные пучки таких ионов, как  $^{58}\text{Ni}$  и более тяжелые, недоступны сейчас. Вместе с тем именно они позволят пройти вплоть до границы ядерной устойчивости со стороны избытка протонов. При использовании пучка  $^{58}\text{Ni}$  изотоп  $^{146}\text{Gd}$ , лежащий вблизи границы области радиоактивных ядер, получается испарением только 4-х нейтронов; в реакциях с протоном требуется вылет 24 нейтронов.

Нейтронноизбыточные ядра могут быть получены за счет реакций передачи нейтронов, либо обмена протонов и нейтронов. Эффективным средством синтеза изотопов является также деление. Массовое и изотопное распределение осколков деления тяжелыми ионами существенно шире, чем при обычном делении. Это позволяет рассчитывать на эффективное использование деления для получения нейтронноизбыточных изотопов.

### I. Протонные излучатели.

В 1962 году в ЛЯР ОИЯИ были открыты излучатели запаздывающих протонов. За десять лет, прошедших с этого момента, явление широко исследовалось в ряде лабораторий мира. Сейчас известно уже около тридцати излучателей запаздывающих протонов от  $^9\text{C}$  до  $^{183}\text{Hg}$ . Показано, что практически для любого элемента вплоть до висмута при достаточном обеднении нейтронами должны появиться излучатели запаздывающих протонов.

В настоящее время протонные излучатели уже не экзотическое явление, а средство для получения ценной ядерной информации. Для  $Z < 30$  протонные излучатели имеют  $Z > N$ . В этом случае среди протонно-нестабильных состояний, заселяемых в позитронном распаде, находится изобарный аналог. Переход в это

состояние является сверхразрешенным. Анализ протонных спектров позволяет установить "чистоту" возбужденных состояний в отношении изотопического спина.

Для более тяжелых элементов в ЛЯР развита статистическая модель испускания запаздывающих протонов. Эта модель имеет дело с усредненными по уровням характеристиками  $\beta^+$ -распада, протонными и  $\gamma$ -ширинами. Обработка протонных спектров с помощью этой модели позволяет извлекать силовую функцию  $\beta$ -распада - величину, характеризующую распределение квадратов матричных элементов  $\beta$ -перехода по возбужденным состояниям дочернего ядра.

На рис. 8 приведен типичный для средних ядер спектр запаздывающих протонов  $^{109}\text{Te}$ . Четко видна gross-структура: увеличение интенсивности, в среднем, с ростом энергии от 2,0 до 3,5 Мэв, затем спад. Такой ход связан с действием двух противоборствующих факторов: с одной стороны, с ростом энергии протона увеличивается вероятность туннелирования протона сквозь барьер, поэтому возрастает  $\Gamma_p/\Gamma$ ; с другой стороны, с ростом  $E_p$  уменьшается энергия  $\beta$ -перехода, и резко падает его вероятность. В районе 3,7 Мэв виден промежуточный резонанс, который приписывается влиянию трехквартичного состояния, заселяемого при  $\beta$ -переходе протона из  $9/2$  в нейтрон в  $8-7/2$   $^{109}\text{Te}$ . Изучение локальных резонансов в силовой функции  $\beta$ -распада несет ценную информацию о взаимодействии простых состояний и уровней составного ядра. Они аналогичны входным состояниям ядерных реакций.

Большой интерес представляет изучение тонкой структуры протонных спектров. Она связана с флуктуациями парциальных

переходов. Анализ тонкой структуры позволит получить плотность уровней в функции энергии в диапазоне 3 - 8 Мэв. До сих пор не существовало метода определения плотности ядерных состояний в этом интервале энергий возбуждения.

Измерение спектра протонов в совпадении с позитронами и  $\gamma$ -лучами позволяет установить разницу дефектов масс начального и конечного ядра. Это ценный метод проверки расчетов масс ядер. Сейчас известно большое число формул для расчета основной характеристики ядра-массы. Изотопы, удаленные от долины  $\beta$ -стабильности, наиболее подходящий объект для проверки этих формул, т.к. в этом случае достигается максимальная чувствительность к выбору параметров.

Интенсивные пучки тяжелых ионов, которые будут доступны на новом ускорителе, дадут возможность широко исследовать протонные излучатели.

Изучение изотопов на границе новой области деформации может дать информацию о ядерных переходах между состояниями с различной деформацией. Можно также рассчитывать на получение определенных экспериментальных данных о протонном распаде из основного состояния и двухпротонном распаде. Это явление ожидается для ультранейтронно-дефицитных изотопов, сечение образования которых крайне низко. В ЛЯР уже получены первые экспериментальные указания на наблюдение протонного распада из основного состояния легких изотопов редких земель. В этих экспериментах использовались пучки  $^{32}\text{S}$ . Для дальнейшего продвижения необходимо существенно более интенсивные пучки и более тяжелые ионы.



## 2. Ядра с большим избытком нейтронов.

Проведенный в ЛЯР цикл экспериментов показал, что реакции передачи на тяжелых ионах являются эффективным средством получения изотопов с большим избытком нейтронов.

При облучении  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{18}\text{O}$  и  $^{22}\text{Ne}$  были синтезированы одиннадцать новых тяжелых изотопов:  $^{18}\text{C}$ ,  $^{20,21}\text{N}$ ,  $^{22,23,24}\text{O}$ ,  $^{23,24,25}\text{F}$ ,  $^{25,26}\text{Ne}$ . Были получены также все известные до этого самые тяжелые изотопы гелия, лития, бериллия и бора. Регистрируемый выход этих изотопов оказался в сотни раз больше, чем в реакциях глубокого расщепления на энергичных протонах. Тем самым открылись большие возможности для изучения ядерных свойств этих своеобразных нуклидов.

Почему интересны эти изотопы?

Большое различие энергий связи нейтронов и протонов в таких ядрах приводит к тому, что их поверхностный слой состоит практически из одних нейтронов, а размеры ядер существенно возрастают по сравнению со стабильными изобарами. При достаточном избытке нейтронов возможен новый тип радиоактивного распада — испускание пар нейтронов. Как показал анализ, выполненный в работах А.И.Базя и др., изучение свойств изотопов с большим избытком нейтронов может дать ценную информацию об эффективном нуклон-нуклонном взаимодействии в ядрах. Важное значение имеет проблема границы ядерной устойчивости. В случае легких ядер ее положение может быть проверено экспериментально. Существование такой границы для ядер с большим избытком протонов не вызывает сомнения. Кулоновские силы довольно быстро ставят предел увеличению числа протонов при фиксированном числе нейтронов.

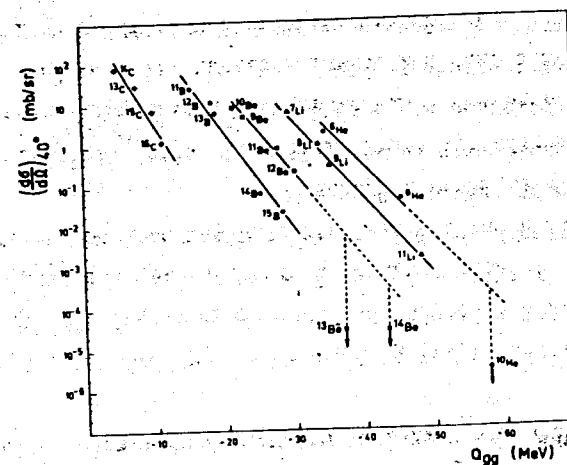


Рис.9. Сечения образования изотопов C, B, Be, Li и Ne при облучении  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{15}\text{N}$  с энергией 145 Мэв. Сечения даны в зависимости от  $Q_{gg}$  — энергии, необходимой на перестройку ядер из начальных в конечные. Указаны верхние границы сечения образования  $^{10}\text{Ne}$ ,  $^{13}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Be}$  — точки со стрелками.  $Q_{gg}$  для образования этих изотопов соответствует порогам их ядерной устойчивости.

С избытком нейтронов дело обстоит сложнее. Среди теоретиков по этому вопросу нет полного единодушия. Высказывалось мнение о возможности ядерной устойчивости  $^{10}\text{Ne}$  и  $^{22}\text{Ne}$ . Как известно, в космосе существуют объекты, почти целиком построенные из нейтронов, — это отождествляемые с пульсарами нейтронные звезды. Может быть, и в земных условиях удастся синтезировать ядра, состоящие почти целиком из нейтронов, — своего рода ядерные нейтронные капли. Ведь у  $^8\text{He}$  число нейтронов в три раза превышает число протонов.

Значительный выход в реакциях передачи изотопов легких ядер с большим избытком нейтронов позволил начать эксперименты по продвижению к границе ядерной стабильности, предсказываемой в ряде теорий, а для  $Z = 2$  и  $4$ , даже пересечь ее.

Использование для облучения мишеней более тяжелых ионов открывает еще более широкие возможности получения в реакциях передачи легких ядер с большим избытком нейтронов. Так, при облучении  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{40}\text{Ar}$  было синтезировано 17 новых тяжелых изотопов:  $^{29,30}\text{Mg}$ ,  $^{31,32,33}\text{Al}$ ,  $^{33,34,35,36}\text{Si}$ ,  $^{35,36,37,38}\text{P}$ ,  $^{39,40}\text{S}$ ,  $^{41,42}\text{Cl}$ .

Создание мощного циклотрона тяжелых ионов позволит получать интенсивные пучки ионов  $^{48}\text{Ca}$  и более тяжелых ионов. В таких ионах число нейтронов значительно превосходит число протонов. Это даст возможность синтезировать еще более экзотические легкие ядра с большим избытком нейтронов. Ожидаемый значительный выход нейтроноизбыточных изотопов позволит начать широким фронтом детальное изучение их ядерных свойств, с использованием масс-сепаратора, работающего "в линии" с ус-

корителем. Уже сейчас на такого рода установке в ЛЯР получен ряд ценных данных о схемах распада ядер.

#### IV. СПОНТАННО ДЕЛЯЩИЕСЯ ИЗОМЕРЫ.

Спонтанно делящиеся изомеры были открыты в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в 1962 году. Эти изомеры характеризуются рядом необычных свойств: повышенной вероятностью спонтанного деления, большим запретом для  $\gamma$ -излучения при малом спине и большой энергии возбуждения ( $\sim 2,5$  Мэв), корреляцией процессов образования изомера и вынужденного деления. Такие свойства изомеров объясняются сложной формой барьера деления, имеющего вид двугорбой кривой с минимумом в районе седловой точки (рис. 10). В соответствии с общепринятой моделью спонтанно делящийся изомер является нижним уровнем во второй потенциальной яме. Исследования спонтанно делящихся изомеров позволяют получать очень важные сведения о форме потенциального барьера, о свойствах уровней при аномально высоких деформациях и о переходах между состояниями, очень сильно различающимися по деформации.

Для этих исследований используются различные, главным образом, легкие бомбардирующие частицы, однако в ряде случаев наиболее перспективным является применение тяжелых ионов.

Упомянем следующее:

I. Установление области распространения спонтанно делящихся изомеров. Все известные в настоящее время спонтанно делящиеся изомеры (в ядрах от  $\text{U}$  до  $\text{W}$ ) расположены в центре долины стабильности. Для продвижения в сторону ядер с большим избытком протонов или нейтронов наиболее выгодным явля-

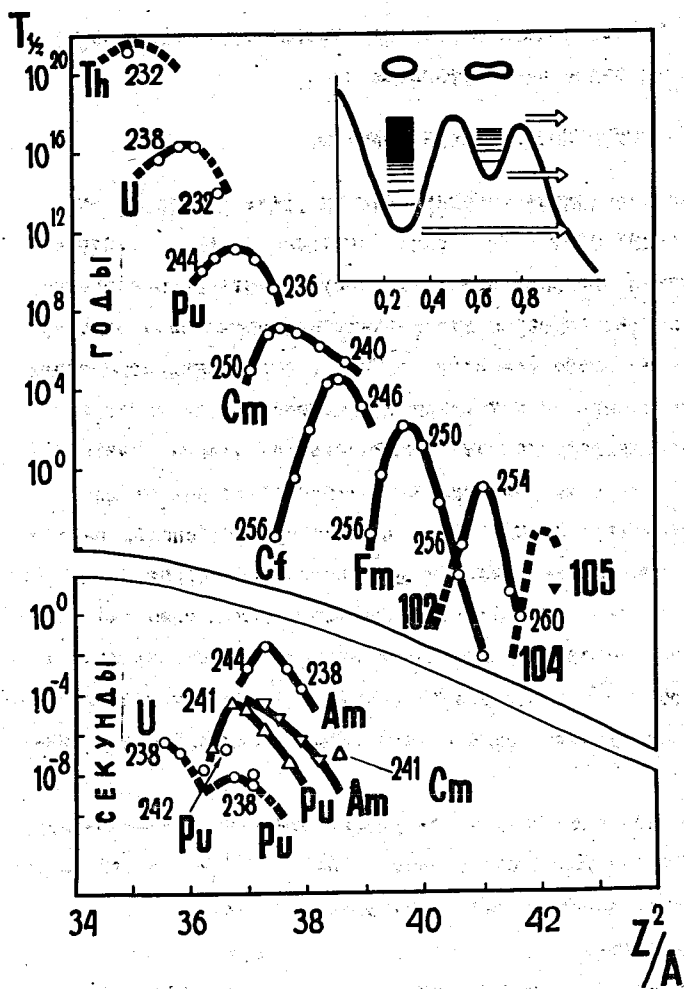


Рис. 10. Систематика периодов спонтанного деления основных состояний (верхняя половина диаграммы) и спонтанно-делящихся изомеров ядер-актиноидов. Схематически изображен двугорбый барьер деления, спонтанно-делящимся изомерам отвечают состояния во втором минимуме потенциальной энергии при деформации около 0,6.

ется использование тяжелых ионов. Эти исследования позволят установить границу области распространения спонтанно делящихся изомеров, а также проследить, как меняется глубина второй потенциальной ямы с изменением  $A$  и  $Z$  (эта глубина определяет время жизни и сечение реакции образования изомерного состояния).

2. Кулоновское возбуждение спонтанно делящихся изомеров. Изомерное состояние заселяется при кулоновском возбуждении уровней во второй потенциальной яме. Измерение сечения кулоновского возбуждения позволяет получить сведения о вероятностях перехода между основным состоянием (или каким-либо другим уровнем в первой яме) и состояниями во второй яме, т.е. состояниями, сильно различающимися по деформации. Переходы между такими состояниями позволяют судить о таких свойствах ядер, как степень связи между одночастичными и коллективными степенями свободы, деформируемость и вязкость ядра. Сечения кулоновского возбуждения уровней во второй яме могут быть достаточно большими при использовании таких тяжелых ионов, как Кг или Хе.

#### У. ИССЛЕДОВАНИЕ НИЖНИХ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР.

##### 1. Протяженные вращательные полосы.

В последнее время стало возможным наблюдать в реакциях типа  $(\alpha, xn)$  и  $(nI, xn)$  вращательные состояния с высокими угловыми моментами порядка  $20\hbar$ . С точки зрения исследования структуры ядра эксперименты по изучению высокоспиновых вращательных состояний очень интересны тем, что при некотором "критическом" значении спина предполагается наблюдение фазо-

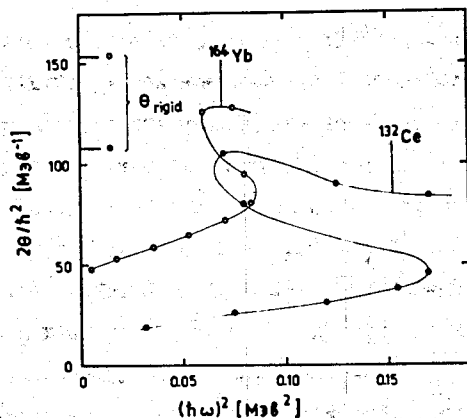


Рис. II. Зависимости моментов инерции ядер  $^{164}\text{Yb}$  и  $^{132}\text{Ce}$  от квадрата частоты вращения, полученные из данных об энергии переходов в протяженной ротационной полосе основного состояния. Уровни заселялись в реакциях  $^{120}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 4n)$ ,  $^{159}\text{Tb}(^{11}\text{B}, 6n)$ ,  $^{157}\text{Gd}(^{12}\text{C}, 5n)$ . (Данные из работ P.H. Mokler et al. Phys.Rev.Lett.29,827(1972), J. Rafelski et al. Phys.Rev.Lett.27,958(1970)).

вого перехода из сверхтекучего в нормальное состояние (из-за антиспаривательного эффекта силы Кориолиса). Существование такого фазового перехода должно проявляться в сильном изменении значения момента инерции ядра. Полученные до сих пор экспериментальные данные о высокоспиновых ротационных и квази-ротационных состояниях четно-четных деформированных ядер и ядер переходной области показывают, что действительно имеется очень сложная зависимость момента инерции от частоты коллективного вращения ядра. Оказывается, что момент инерции является даже многозначной функцией угловой частоты вращения и соответствующая кривая имеет "S"-образную форму. О характере этой зависимости и о структуре уровней выше критического значения спина имеются пока различные предположения. Кроме антиспаривательного эффекта силы Кориолиса рассматривается, в частности, возможность сильного изменения значения момента инерции из-за взаимодействия с уровнями полос различных двухквантовых конфигураций. Выяснение таких особенностей в структуре высокоспиновых вращательных состояний требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Реакции с более тяжелыми ионами могут дать при дальнейшем усовершенствовании экспериментальных методов интересные и неожиданные сведения о вращательных состояниях с еще более высокими значениями углового момента, в том числе о временах жизни их по методу доплеровского сдвига. Реакции с очень тяжелыми ионами являются далее единственным и очень перспективным средством для изучения пока еще почти не исследованной области так называемых "углов" -уровней, для выяснения механизма возбуждения их и их структуры.

2. Измерение времен жизни уровней с помощью эффекта

Доплера.

Измерение времен жизни возбужденных уровней ядер является важной частью исследований по структуре ядра, поскольку из этих измерений извлекается прямая информация об абсолютных значениях матричных элементов электромагнитных переходов в ядрах и, в частности, о величине квадрупольных моментов ядер.

Использование метода измерения времен жизни с помощью эффекта Доплера применительно к ядерным уровням, возбуждающимся в реакциях с тяжелыми ионами, позволяет продвинуться во временной диапазон  $10^{-12} < \tau < 10^{-9}$  сек. При этом возможно изучать ядра, удаленные от линии бета-стабильности, которые образуются в реакциях полного слияния и испарения нескольких нейтронов. Здесь имеется уникальная возможность получить в прямых измерениях основные спектроскопические данные о ядрах из новых областей деформации, которые невозможно изучать классическими методами ядерной спектроскопии из-за их короткого времени жизни. Второй важной особенностью таких опытов является то обстоятельство, что в результате реакций с тяжелыми ионами заселяются с большой вероятностью состояния с предельно высоким спином, имеющие коллективную природу.

Переход к реакциям с еще более тяжелыми ускоренными ионами позволит продвинуться к значительно более коротким временам жизни вплоть до  $10^{-13}$  сек и, следовательно, к измерению периодов полураспада более высоковозбужденных уровней коллективной природы. Эти данные представляют значительный интерес для понимания зависимости момента инерции ядра от величины спина вращательных состояний, и многого другого.

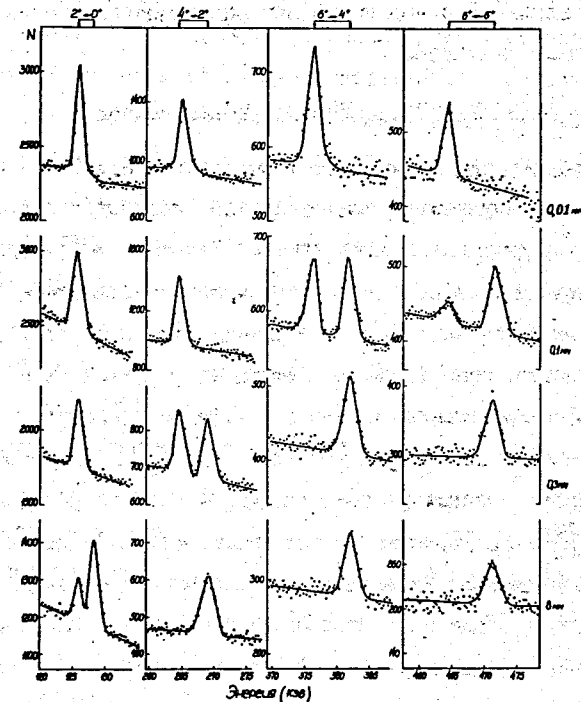


Рис.12. Энергетические спектры гамма-излучения ядра  $^{164}\text{Yb}$ , образующегося в реакции  $^{128}\text{Te} (^{40}\text{Ar}, 4n)$ . При увеличении расстояния  $D$  между мишенью и стоппером ядер отдачи наблюдается расщепление каждой гамма-линии на две: смещенную за счет эффекта Доплера для ядер, распадающихся на лету, и несмещенную, соответствующую распаду заторможенных ядер отдачи.

На рис. 12 для иллюстрации показаны спектры  $\gamma$ -излучения ядра  $^{164}\text{Tb}$ , образующегося в реакции  $^{128}\text{Te}(^{40}\text{Ar}, 4n)$ . Демонстрируется расщепление  $\gamma$ -линии на смещенную за счет эффекта Доплера линию и несмещенную при изменении расстояния пролета ядер отдачи в вакууме.

### 3. Исследование изомерных состояний ядер.

Известно, что в реакциях с тяжелыми ионами с большой вероятностью возбуждаются высокоспиновые изомерные состояния различной структуры. Особый интерес вызывает исследование таких изомерных состояний, которые имеют многочастичную конфигурацию. Только недавно были обнаружены, например, высокоспиновые четырехквартичные изомеры в нечетно-нечетных ядрах  $\text{Bi}$ . На рис. 13 представлена в качестве примера схема распада изомерного состояния со спином  $I^\pi = 16^+$  ядра  $^{204}\text{Bi}$ . Исследование многочастичных конфигураций в ядрах, близких к дважды магическому ядру  $^{208}\text{Pb}$ , изучение их мультиплетного расщепления дает важную информацию о применимости оболочечной модели в зависимости от числа нуклонов вне заполненных оболочек. Получаются также сведения о характере остаточных взаимодействий между нуклонами, например, о рр-взаимодействии в тяжелых ядрах. В ядерных реакциях с более тяжелыми ионами значительно расширяется область исследуемых ядер, а также увеличивается возможное значение переданного углового момента и тем самым вероятность для возбуждения изомерных состояний с очень большими спинами.

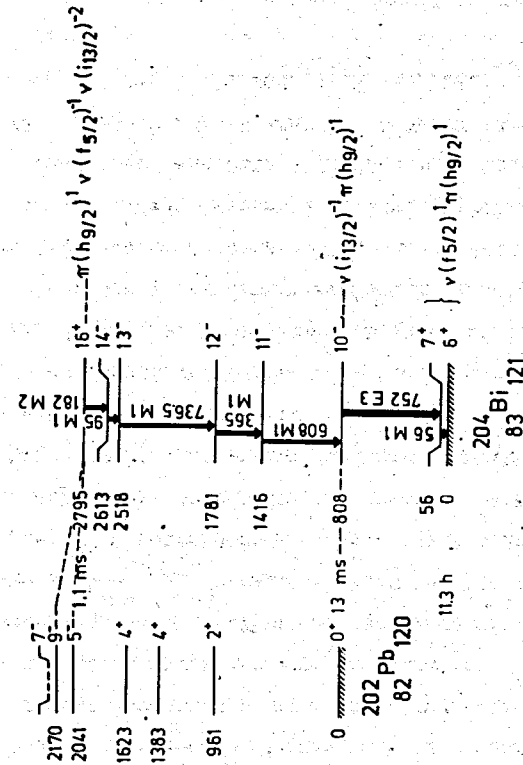


Рис. 13. Схема распада четырехквартичного изомера со спином  $I^\pi = 16^+$  в ядре  $^{204}\text{Bi}$ .

#### 4. Измерение магнитных моментов возбужденных состояний.

Определение магнитных моментов является одним из важных способов изучения структуры возбужденных состояний ядер. Экспериментальные методы здесь основаны на использовании взаимодействия моментов с магнитными полями. При измерении магнитных моментов на пучке ускорителя используется метод возмущенных угловых корреляций. Рассмотрим уровни ротационной полосы. При любом способе возбуждения этих уровней (кулоновским полем, или за счет распада составного ядра) получают "выстроенные" ядра (с угловыми моментами вблизи плоскости, перпендикулярной пучку). Это обуславливает угловую анизотропию излучения относительно направления пучка. Если есть внешнее магнитное поле, то за счет ларморовской прецессии магнитного момента угловое распределение смещается на угол  $\Delta\theta = \omega\tau = \frac{gM_N\hbar\tau}{\hbar}$ , где  $g$  - гиромагнитное отношение,  $\tau$  - время жизни. Для примера укажем, что для  $\tau = 10^{-9}$  сек и  $\tau = 10^{-12}$  сек смещение углового распределения на 10 мрад. требует полей 5,5 кгаусс и 5,5 мгаусс соответственно. Большой интерес представляют времена жизни в районе  $10^{-12}$  сек. Такого порядка времена жизни ожидаются для верхних уровней вращательных полос, где может происходить фазовый переход в "сверхпроводящем" ядре. Измерение магнитных моментов для ротационных состояний с высоким спином весьма важно для понимания того, что происходит в ядре при больших частотах вращения. При работе со столь короткими временами жизни внутренние магнитные поля, действующие в ферромагнетиках на ядра-примеси, оказываются недостаточными. Здесь представляется перспективным использование переходных полей, которые действуют на ядра-отдачи, движущиеся через ферромагнетик. На рис. 14 показаны результаты измерения  $\omega\tau = f(\tau)$  для четных протонов Pt, внедренных и движущих-

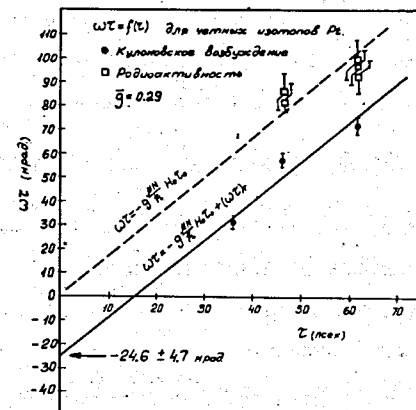


Рис. 14. Зависимость смещения углового распределения гамма-лучей ( $\Delta\theta = \omega\tau$ ) от времени жизни уровней ( $\tau$ ). Разница между данными, полученными в кулоновском возбуждении и с радиоактивными источниками, составляет эффект переходного поля  $(\omega\tau)_t = -24,6$  мрад. (Рисунок из работы Н.В. Kugel Nucl. Phys. A137, 500 (1969)).

ся через ферромагнетик. Четко виден эффект дополнительного, переходного магнитного поля.

В таких измерениях применение очень тяжелых ионов для возбуждения ротационных состояний оказывается решающим, т.к. эффект переходного поля оказывается большим, и метод становится более чувствительным при больших импульсах ядер отдачи.

Другим очень перспективным методом измерения  $\sigma$ -факторов на пучке является метод, связанный с выбиванием ядер отдачи в газ или вакуум. В этом случае применение более тяжелых ионов тоже даст существенное расширение возможностей.

#### VI. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ.

Посвятив этот документ перспективам развития исследований структуры ядра с помощью тяжелых ионов, мы не можем не упомянуть о некоторых уникальных возможностях, которые дадут тяжелые ионы для смежных областей физики.

При столкновениях тяжелых ионов с атомами происходит ионизация внутренних атомных оболочек взаимодействующих частиц. Возникающее характеристическое рентгеновское излучение может дать информацию о механизме процесса ионизации. На рис. 15 представлены в качестве примера сечения образования КХ-лучей при облучении различных толстых мишеней ионами Хе с энергией 150 Мэв на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций. Механизм ионизации внутренних атомных оболочек при столкновениях тяжелых ионов с атомами является еще предметом дальнейших исследований. Изучение его имеет большое значение для ряда вопросов физики плазмы и астрофизики. Кроме того, оно имеет практическое значение для развития ускорительной техники многозарядных ионов (перезарядка ионов).

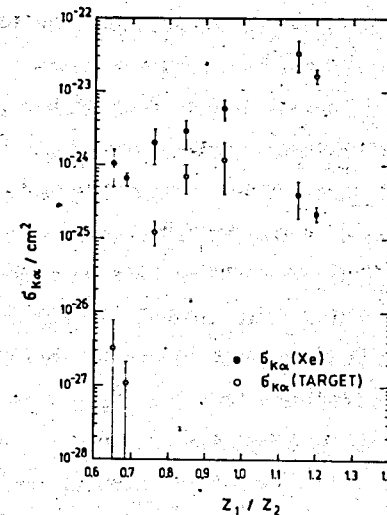


Рис. 15. Сечения образования КХ-лучей при облучении различных толстых мишеней ионами  $^{136}\text{Xe}$  с энергией 150 Мэв.

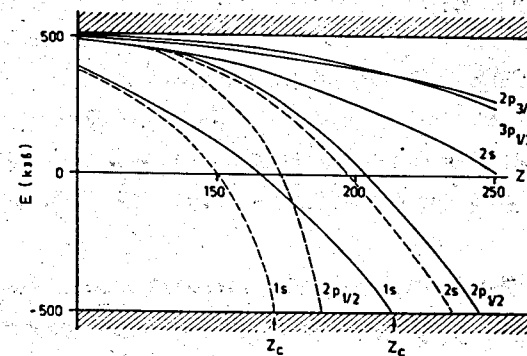


Рис. 16. Расчетные зависимости энергии связанных состояний электронов от заряда ядра  $Z$ . Сплошные кривые соответствуют нелинейной теории Борна-Инфельда, пунктирные кривые теории Максвелла.



Некоторое качественное объяснение процесса ионизации внутренних атомных оболочек можно получить с помощью модели квазиатомов, которая была развита в 1965 году Фано и Лихтеном. По этой модели атом мишени с порядковым номером  $Z_1$  и налетающий ион  $Z_2$  могут в определенных условиях образовать во время столкновения квазиатом с порядковым номером  $Z_1+Z_2$  и с общими электронными оболочками. В процессе образования квазиатома часть электронов из внутренних оболочек должна по принципу Паули переходить на более высокие оболочки квазиатома, так что в процессе столкновения с большой вероятностью возникает вакансия во внутренних оболочках разлетающихся частиц. Если вакансия образуется и у квазиатома, то имеется некоторая вероятность для обнаружения характеристического излучения квазиатома с порядковым номером  $Z_1+Z_2$ . Слабый эффект наблюдался до сих пор только для M-оболочки квазиатома.

Экспериментальное наблюдение характеристического рентгеновского излучения, особенно L- и K-лучей, было бы исключительно интересным по следующим причинам:

1. Оно могло быть исключительным средством для изучения свойств электронной оболочки, а также методом идентификации синтезированных в ядерных реакциях сверхтяжелых трансурановых элементов.

2. фундаментальное значение имело бы наблюдение характеристического K-излучения квазиатомов с порядковым номером  $Z > 150$ , так как это означает проверку квантовой электродинамики в области сверхсильных полей. Расчет связанных состояний электронов по линейной теории Максвелла и по нелинейной теории

Борна-Инфельда показывает, что уже для  $Z = 164$  разница в энергиях K-лучей по этим теориям составляет около 100 кэВ. Результаты этих расчетов представлены на рис. 16. В зависимости от предположений расчета связанное 1S-состояние при разных значениях  $Z_c$  опускается в отрицательный континуум ( $E = -\pi_0 c^2$ ). Наличие при  $Z > Z_c$  незаполненной K-оболочки квазиатома должно приводить к рождению электрон-позитронной пары, причем электроны садятся на K-оболочку, а позитроны уходят в бесконечность. Условия спонтанного рождения позитронов при столкновении тяжелых ионов подробно рассмотрены в ряде теоретических работ в СССР и за рубежом.

Для экспериментального исследования этого круга явлений необходимо иметь очень тяжелые ионы, вплоть до урана с достаточно большой энергией порядка 5 МэВ/нуклон.

## УП. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше рассмотрены только отдельные примеры исследований в области структуры ядра и атомной физики с помощью тяжелых ионов. Многие из того, что сделано либо может быть сделано, даже не упомянуто из-за недостатка места. Но несомненным является следующее. Двадцать лет существования физики тяжелых ионов продемонстрировали исключительную плодотворность этого направления. Оно не только не исчерпало себя, но, напротив, находится сейчас на подъеме. Проведение в будущем программы исследований, которая ясна уже сейчас, принесет много результатов, важных для понимания ядерной и атомной структуры. На пути осуществления этой программы могут встретиться и не-

запланированные неожиданности, как это уже не раз случалось, поскольку многое делается впервые и поскольку ядерное вещество исследуется в экстремальных условиях: предельные значения  $Z$  (громоздкие электрические поля), аномальные соотношения протонов и нейтронов, предельные угловые моменты, высокие энергии возбуждения и т.д.

Однако надо четко отдавать себе отчет в том, что перспективы развития физики тяжелых ионов неразрывно связаны с возможностью использовать более тяжелые бомбардирующие частицы, чем доступные сейчас, и более интенсивные пучки ионов, уже используемых в эксперименте. Развитие этого направления привело к необходимости создания установки, способной ускорять все ионы вплоть до урана при интенсивностях  $10^{13}$ - $10^{14}$  част/сек.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 апреля 1973 года.