

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

P15-85-650

И.В.Кузнецов, В.П.Саранцев

ПЕРВООЧЕРЕДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА КУТИ-20

1985

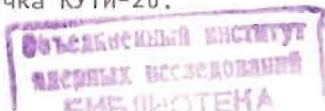
Решение фундаментальных проблем ядерной физики, прикладных народнохозяйственных задач в значительной мере связано с развитием ускорительной и экспериментальной базы физики тяжелых ионов. Исследования на пучках тяжелых ионов проводятся или планируются в большинстве научных центров мира, создаются новые ускорительные комплексы, обсуждаются проекты использования тяжелоионных пучков в области управляемого термоядерного синтеза.

В Отделе новых методов ускорения ОИЯИ завершается создание первой очереди коллективного ускорителя тяжелых ионов/КУТИ-20/^{1/}. Предполагается, что после предварительного ускорения в градиентном магнитном поле электронные кольца, загруженные ионами, будут дополнительно ускоряться в трех секциях линейного индукционного ускорителя. Проектная энергия ионов на этом этапе составит ~8 МэВ/нукл., энергетический разброс $\Delta E/E \sim 3\%$. После разделения электронной и ионной компонент на выходе линейного ускорителя ионный пучок будет иметь кольцевую форму с радиусом ~4 см и полуразмером малого сечения кольца ~0,2 см. Интенсивность пучка при цикличности срабатывания ускорителя ~20 Гц составит $2 \cdot 10^{13} \div 10^{12}$ ион/с для легких и средних по массе ионов и $5 \cdot 10^{11}$ ион/с для урана. Вместе с основными в электронном кольце будут ускоряться также ионы остаточного газа. Их содержание в зависимости от значения вакуума в камере ускорителя изменяется в пределах $\sim 1 \div 10\%$ от количества основных частиц в кольце. На выходе из ускорителя в краевом магнитном поле ионы приобретают азимутальную скорость v_{ϕ} , составляющую $\sim 10^{-3}$ от скорости света.

Преимуществом коллективного ускорителя является возможность ускорять ионы практически всех элементов периодической таблицы. Наиболее существенное отличительное свойство ионного пучка коллективного ускорителя по сравнению с традиционными - быстрый сброс ионов на мишень. При размерах сечения кольца ~0,4 см и скорости ионов $\sim 4 \cdot 10^9$ см/с время прохождения пучка через тонкую мишень составляет $\sim 10^{-10}$ с.

Указанные выше особенности КУТИ, такие как кольцевая форма пучка, универсальность по отношению к массе ускоряемых ионов, быстрый сброс ионов на мишень, сложный ионный состав пучка, с одной стороны, будут усложнять ядерно-физические исследования, а с другой - представляют уникальные возможности для постановки экспериментов в ранее недоступных или малоизученных областях физики тяжелых ионов.

В настоящей работе рассмотрены некоторые из экспериментальных направлений, в которых можно весьма эффективно использовать особенности ионного пучка КУТИ-20.



ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ С ВРЕМЕНАМИ ЖИЗНИ $\tau \geq 0,1$ нс

Короткий $\sim 10^{-10}$ с сгусток ионов высокой интенсивности, вплоть до $\sim 10^{12}$ частиц в сгустке, обеспечивает уникальную по эффективности возможность возбуждения в ядерных реакциях короткоживущих ядерных состояний и измерения их времени жизни. Схема экспериментов в этом случае довольно проста. Детекторы радиоактивного излучения (γ , β , α , Ω) размещаются вблизи мишени и сменного сборника исследуемых нуклидов. Сгусток ионов после прохождения через мишень отводится на возможно большее расстояние от сборника ядер отдачи и высаживается на поглотителе. Измерение времени жизни ядерных состояний начинается сразу же после прохождения пучка через мишень.

Высокая интенсивность ионного пучка в импульсе $\sim 10^{20} \div 10^{22}$ ион/с на много порядков превышает возможности традиционных линейных и циклических ускорителей по этому параметру. Использование быстродействующих детекторов и электронной аппаратуры позволит эффективно исследовать состояния ядра с временем жизни $\tau \geq 0,1$ нс. От указанных экспериментов следует ожидать новых результатов в области изучения механизма ядерных реакций, структуры ядра, ядерной изомерии и т.д.

Быстрый сброс ионов высокой интенсивности на мишень открывает большие перспективы и в экспериментах по спектрометрии нейтронов по времени пролета, поиску и измерению жестких γ -квантов ($E_\gamma \sim 10$ МэВ), испускаемых при образовании экзотических ядер в реакциях с тяжелыми ионами. Значительно упрощается методика измерения энергетического спектра легких заряженных частиц p , α и др. в области их максимальной энергии. При постановке таких экспериментов обычно используются сложные магнитные анализаторы^{1,2}.

На пучке КУТИ-20 в результате быстрого сброса ионов на мишень и превышения в некоторых реакциях скорости исследуемых частиц более чем в 2 раза по сравнению со скоростью бомбардирующих ионов на пролетной базе в несколько метров первыми будут достигать детектора высокоэнергетические частицы. Оценки показывают, что для измерения времени пролета, $\Delta E/\Delta x$ и E быстрых частиц иногда оказывается доступным временной промежуток ~ 100 нс. Таким образом, используя естественную временную сепарацию продуктов ядерных реакций, на КУТИ-20 можно упростить методику изучения быстрых заряженных частиц.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПАДА СОСТАВНЫХ ЯДЕР

Процесс образования и распада составных ядер в реакциях с тяжелыми ионами довольно интенсивно исследовался в широкой

области бомбардирующих энергий и масс сталкивающихся ядер. Вместе с тем сравнительно мало к настоящему времени изучен механизм подбарьерного слияния тяжелых ядер с $A \geq 20$. Интерес к изучению подбарьерного слияния в основном обусловлен необходимостью решения астрофизических проблем. Существенным является и возможность получения информации о потенциале межъядерного взаимодействия на основе данных о сечении подбарьерного образования составных ядер. Известно, что вероятность проникновения через потенциальный барьер зависит от его высоты, формы и положения. Поэтому путем измерения функции возбуждения подбарьерного слияния с хорошей точностью и в широком энергетическом интервале можно детально исследовать параметры потенциального барьера, а следовательно, и составляющую ядерную часть потенциала.

Исследования подбарьерного слияния в области средних масс ядер позволили выявить влияние статической деформации сталкивающихся ядер³ и изотопических эффектов на сечение образования составных ядер⁴. Общепризнано, что для лучшего понимания механизма подбарьерного образования компаунд-ядер в реакциях с тяжелыми ионами необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования этого процесса.

Низкие сечения подбарьерного слияния в значительной мере затрудняют экспериментальное изучение этого интересного явления, предъявляют повышенные требования к чувствительности методики, к эффективности очистки от продуктов фоновых реакций. Ионные пучки КУТИ-20 позволяют создать методику, отвечающую этим требованиям. Именно быстрый сброс ионов на мишень, кольцевая форма пучка и универсальность ускорителя по отношению к массе ускоряемых ионов значительно упрощают задачу выделения и идентификации продуктов ядерных реакций, проходящих через стадию образования составного ядра. Для ядер отдачи, образующихся в таких реакциях, характерно, что они вылетают из мишени по направлению пучка ионов с угловым разбросом в несколько градусов и имеют скорость, которая много меньше скорости ионов.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности КУТИ-20, рассмотрим реакцию образования составного ядра $^{96}_{44}\text{Ru}$ при облучении мишени $^{32}_{16}\text{S}$ ионами $^{64}_{28}\text{Ni}$.

Кулоновский барьер для этой реакции в лабораторной системе координат составляет ~ 180 МэВ. Плавное снижение энергии ионов никеля до требуемой величины можно осуществить путем изменения напряжения на ускоряющих секциях ускорителя электронно-ионных колец. Для отделения составных ядер от первичного пучка и от продуктов фоновых реакций предполагается использовать электростатическую коаксиальную линзу, состоящую из трубы $\phi 12$ см, длина $l = 40$ см, и внутреннего соосного с трубой стержня $\phi 3$ см, на который подается высокое напряжение. Линза размещена вблизи мишени. Кольцевой сгусток образующихся составных ядер, который

поступает в линзу, имеет радиус ~ 4 см. Если на линзу подано напряжение $U = -40$ кВ, то в электрическом поле $E = U/r$ положительно заряженные продукты реакций будут отклоняться к оси линзы. Можно показать, что, например, ядро ${}^{94}\text{Ru}^{+29}$ после прохождения линзы отклонится к оси и достигнет радиуса 1,5 см. В то же время первичные ионы ${}^{64}\text{Ni}^{+19}$ с энергией ~ 180 МэВ при прохождении линзы отклонятся к оси до радиуса ~ 3 см. Если учесть азимутальную скорость ионов, приобретаемую ими на выходе из ускорителя, то после прохождения линзы ионный сгусток будет иметь средний радиус $\sim 3,5$ см. Таким образом, устанавливая после линзы коллиматор $\phi \leq 2,5$ см, можно отделить составные ядра от первичных ионов. Еще большей степени очистки можно добиться, если после фокусирующей линзы пропустить продукты реакций через дефокусирующую линзу примерно с такими же параметрами. Коллимация на выходе второй линзы дополнительно подавляет продукты фоновых реакций и снижает уровень загрузки позиционно-чувствительных детекторов. Для надежной идентификации Z и A продуктов надо измерить время их пролета от мишени до детектора, удельные потери энергии $\Delta E/\Delta x$ и полную энергию. Весьма кстати оказывается быстрый сброс ионов на мишень, так как он обеспечивает естественный короткий $\sim 10^{-10}$ с "стартовый" сигнал для времяпролетных измерений и снимает необходимость в дополнительных детекторах, используемых обычно для этой цели. В качестве "Стоп"-детектора предполагается использовать многопроволочные пропорциональные камеры низкого давления. Значения $\Delta E/\Delta x$ и E будут измеряться с помощью позиционно-чувствительных ионизационных камер.

Современные газовые детекторы заряженных частиц позволяют однозначно идентифицировать Z и A продуктов реакций в области $A \leq 100$.

Успешное применение электростатического анализатора в подобных экспериментах⁴ позволяет надеяться, что система коаксиальных линз обеспечит высокую степень очистки исследуемых продуктов от большого фона сопутствующих реакций. Эффект подавления фона можно будет усилить за счет импульсного питания линз и того обстоятельства, что быстрая высадка ионов на мишень благоприятствует пространственной и временной сепарации продуктов реакции, образующихся в ядерных реакциях с различными значениями скоростей. Интенсивность ионного пучка КУТИ-20 позволит исследовать процесс подбарьерного слияния ядер в области средних масс с сечением до ≥ 10 нб, тем более что пучки ионов, имеющих массу, значительно большую, чем масса ядра мишени, допускают облучение толстых мишеней ≥ 1 мг/см² при наименьшей энергии ионов. Надежная идентификация продуктов по Z и A кроме определения сечения слияния позволит изучить и процесс распада составных ядер в узком диапазоне угловых моментов и энергий возбуждения. Сложнее ситуация с исследованием подбарьерного образования составных ядер с массовым числом $A \geq 200$. Систематические исследования в этой области ранее не проводились из-за очень низкого сечения

образования компаунд-ядер, отсутствия пучков тяжелых ионов требуемой энергии и интенсивности.

КУТИ-20 открывает возможности постановки экспериментов и в этой области масс составных ядер. Особенно подходящими здесь оказываются интенсивные пучки тяжелых ионов с $A > 150$. Для надежной идентификации ядер отдачи с $A \geq 200$ предполагается модифицировать вышеописанную методику. Усовершенствования методики включают применение магнитного анализатора после системы линз и газовых сцинтилляционных детекторов для измерения энергии частиц.

ЯДРА, УДАЛЕННЫЕ ОТ ПОЛОСЫ СТАБИЛЬНОСТИ

Известно, что реакции полного слияния тяжелых ионов с ядром мишени при энергии выше кулоновского барьера широко используются для получения и изучения свойств сильнейтрондефицитных ядер. Широкое применение для этой цели находит техника электромагнитной масс-сепарации продуктов ядерных реакций. Несомненно оправданным будет использование такой методики на пучке КУТИ-20. Возможна следующая схема масс-сепаратора на пучке КУТИ-20. После отделения ядер отдачи от ионного пучка с помощью коаксиальных линз их направляют в транспортирующий канал и выводят за радиационную защиту, обеспечивая этим снижение γ -фона, так как поглощение основного пучка ионов происходит сразу же после прохождения линзы. Далее исследуемые нуклиды фокусируют на входное окно ионного источника масс-сепаратора. Бомбардирующие ионы, которые по массе тяжелее ядра мишени, обеспечивают возможность использования во входном окне сравнительно толстых фольг из тугоплавких материалов. Ядра отдачи проходят через фольгу и вбиваются в стенки источника, которые нагреты до высокой температуры, $T = 1500-2500^\circ\text{C}$. Из нагретых стенок нуклиды диффундируют в объем камеры, где они ионизируются посредством поверхностной ионизации⁵ или электронным ударом⁶. Из источника однозарядные ионы вытягиваются и ускоряются до определенной энергии, а затем сепарируются по массам магнитным анализатором. В фокальной плоскости анализатора размещаются приемник исследуемых продуктов и детекторы, необходимые для измерения радиоактивного излучения. На базе имеющегося в ОНМУ магнита СП-63 можно создать масс-сепаратор с разрешением по массам $M/\Delta M = 400$. Универсальность КУТИ-20 по отношению к массе ускоряемых ионов допускает оптимальный выбор комбинации мишень+ион для синтеза новых нуклидов на краю полосы стабильности и обеспечивает тем самым условия для получения интересных результатов и в этой области физики тяжелых ионов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОН-ИОННЫХ И ИОН-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Электронные кольца КУТИ-20 являются уникальным средством формирования интенсивных встречных пучков⁷. Достижимые светимость $\sim 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и зарядность ионов⁸ вплоть до ядер, полностью лишенных электронной оболочки, а также высокая относительная скорость сталкивающихся ионов $V_{\text{отн.}} = 8 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ позволят эффективно исследовать экспериментально совершенно не изученные процессы взаимных столкновений тяжелых многозарядных ионов. Эксперименты в этой области могут привести к неожиданным результатам.

Ускорение на КУТИ-20 ионов с $A \approx 200$ и энергией $\sim 8 \text{ МэВ/нукл.}$ в свою очередь создает основу для систематических исследований физики ион-атомных столкновений. Быстрый сброс ионов на мишень, конечно, потребует методических разработок для обеспечения традиционных экспериментов в этой области. Вместе с тем в опытах по поиску и изучению экзотических атомных и ионных состояний с временами жизни $\tau \approx 0,1 \text{ нс}$ пучки КУТИ-20 можно будет эффективно использовать на сравнительно простой экспериментальной базе.

Для однозначной интерпретации данных, полученных в опытах по наблюдению рождения позитронов при столкновении ядер с массой тяжелее урана, требуются дополнительные эксперименты на пучках ионов более высокой зарядности, вплоть до ядер, полностью лишенных электронной оболочки. В⁸ показана принципиальная возможность получения в электронных кольцах ионов U^{90} . Ускорение ионов урана такой высокой зарядности до энергии $\sim 8 \text{ МэВ/нукл.}$, несомненно, представляет большой интерес для синтеза и изучения атомных систем со сверхкритическим зарядом.

В заключение отметим, что в данной работе кратко рассмотрены экспериментальные направления, в которых может проявиться высокая конкурентная способность КУТИ-20. Видно, что использование особенностей коллективного ускорителя позволит эффективно провести исследования в малодоступных или неизученных ранее областях ядерной и атомной физики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983, с.76.
2. Borcea C. et al. JINR, E7-82-46, Dubna, 1982.
3. Stokstad R.G. et al. Phys.Rev.Lett., 1978, 41, p.465.

4. Stefanini A.M. et al. Phys.Rev., 1984, C30, No.6, p.2088.
5. Карнаухов В.А. и др. ОИЯИ, Р13-7657, Дубна, 1974.
6. Иванов Н.С. и др. ОИЯИ, Р13-9645, Дубна, 1976.
7. Кузнецов И.В. и др. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, №10-85, Дубна, 1985, с.62.
8. Perelstein E.A., Shirkov G.D. JINR, E9-85-4, Dubna, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 сентября 1985 года.