

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

2511/83

16/5-83

P7-83-127

**М.Совински, Н.К.Скобелев, А.Солтан, Т.Китовска,
Р.Купчак, М.Левитович, А.Янковски, В.З.Майдигов,
Р.А.Никитина**

**ЭМИССИЯ ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
И ЕЕ СВЯЗЬ С ДЕЛЕНИЕМ**

1983

1. ВВЕДЕНИЕ

По мере развития физики тяжелых ионов становится очевидным, что всестороннее изучение механизма взаимодействия сложных ядер представляет далеко не простую задачу. Взаимодействие сложных ядер характеризуется множеством каналов реакций, причем значительный вклад приходится на долю реакций с испусканием легких заряженных частиц.

Изучение спектров легких заряженных частиц и их угловых распределений может дать ценную информацию о состоянии взаимодействующей системы ядер, а также свойствах остаточного ядра^{1/}. Известно, что сечения образования α -частиц и протонов в реакциях с тяжелыми ионами имеют большие величины, превосходящие предсказываемые по статистической модели^{2/}. Энергетические спектры легких заряженных частиц имеют максимумы несколько выше выходного кулоновского барьера с существенным вкладом в распределение высокоэнергетических α -частиц, максимально достижимые энергии которых близки к расчетному кинематическому пределу^{3/}. Мало изученной оказывается низкоэнергетическая часть спектров легких частиц, которая может быть связана с их вылетом при тройном делении тяжелых атомных ядер^{4/}. Такие исследования приводят к необходимости разработки и создания новых, более чувствительных и высокоэффективных методик, способных регистрировать продукты ядерных реакций, отличающиеся по величинам сечений на много порядков.

В настоящей работе была предпринята попытка изучения спектров легких заряженных частиц с малой кинетической энергией. С этой целью была разработана и создана многомерная система сбора, сортировки и обработки данных.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на выведенном пучке ускорителя У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

В качестве мишеней использовались самоподдерживающиеся фольги из естественного Ti , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{232}Th - 2-3 мг/см², а также тонкие фольги ~ 0,3 мг/см² ^{197}Au и 0,5 мг/см² ^{238}U , нанесенного на подложку из Ta или Al толщиной от 1,5 до 5 мкм. Энергетическое разрешение тяжелых ионов было не хуже 1%. Мониторинг пучка осуществлялся путем прямого измерения тока частиц, а также по регистрации поверхностно-барьерным детектором упруго рассеянных

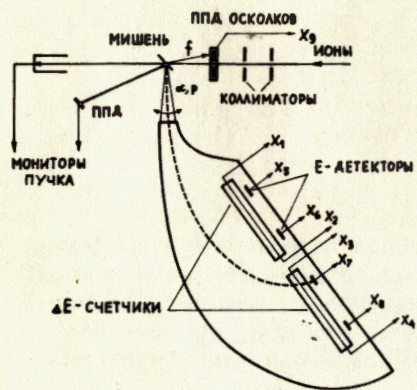


Рис.1. Блок-схема регистрирующей аппаратуры.

них углах устанавливались дополнительно полупроводниковые детекторы обычного или кольцевого типа площадью $\sim 3 \text{ см}^2$.

Магнитный анализатор предназначен для очистки продуктов реакций от ионов первичного пучка и сортировки частиц по их магнитной жесткости ^{15/}. Телесный угол захвата анализатора варьировался от 4 до 7 мср на длине фокальной плоскости $\sim 150 \text{ см}$. На этой длине возможен анализ частиц, отличающихся по импульсу в $2,6$ раза, что позволяет одновременно измерять широкие энергетические распределения заряженных частиц.

Магнитный анализатор может быть установлен при различных углах к направлению падающего на мишень пучка ионов, что дает возможность изучать энергетические спектры заряженных продуктов ядерных реакций, испускаемых в широком диапазоне углов, включая 0° .

Пропорциональные газовые счетчики. Конструкция позиционно-чувствительных пропорциональных счетчиков обеспечивает возможность их размещения вдоль фокальной плоскости так, чтобы охватить всю ее длину или устанавливать друг за другом для одновременных измерений энергетических распределений частиц с различными значениями удельных потерь ^{16,7/}. Уменьшение потерь энергии частиц обеспечивалось за счет снижения толщины входных окон, в качестве которых был использован металлизированный лавсан толщиной от 3 до 5 мкм . Анодом служила нихромовая нить диаметром 10 мкм и удельным сопротивлением $12,5 \text{ Ом/мм}$.

В качестве рабочего газа использовались насыщенные пары гептана (C_7H_{16}) или гексана (C_6H_{14}) со стабилизацией давления до 40 или 120 Тор соответственно. Выбор давления определялся величиной удельных потерь регистрируемых частиц. Рабочее напряжение составляло $\sim 700\text{--}850 \text{ В}$. Съем сигнала осуществлялся с обоих концов нити, причем отношение распределения зарядов, снимаемых

на мишени ионов под углом 30° . Легкие заряженные частицы, образовавшиеся в ядерных реакциях, анализировались по их магнитной жесткости, удельным потерям и остаточной энергии.

На рис.1 представлена блок-схема регистрирующей аппаратуры, состоящей из магнитного анализатора, газовых пропорциональных позиционно-чувствительных счетчиков для измерения координат и потерь энергии частиц и полупроводниковых детекторов для измерения их остаточной энергии. Для регистрации осколков деления в реакционной камере в зад-

с концов счетчика, определяло место прихода частицы на фокальную плоскость. По сумме зарядов определялись удельные потери частиц. Энергетическое разрешение на стандартном источнике α -частиц ^{241}Am составляло величину $\sim 8\%$, позиционное разрешение на рабочей длине счетчика $\sim 45 \text{ см}$ было $\sim 3\text{--}4 \text{ мм}$.

Полупроводниковые детекторы. Для измерения энергии частиц применяются дрейфовые полупроводниковые кремниевые детекторы диаметром около 40 мм и толщиной 4 мм , которые размещаются непосредственно за пропорциональными счетчиками, организуя таким образом $\Delta E \times E$ -телескопы. В данных экспериментах порог регистрации α -частиц устанавливался на уровне от 8 до 10 МэВ .

С целью более эффективного анализа частиц в фокальной плоскости спектрометра и устранения трудностей, связанных с применением большого числа полупроводниковых детекторов и электронных блоков, предусмотрено применение микроканальных пластин ^{18/} и лавинных счетчиков ^{19/} для измерения энергии частиц по времени их пролета.

Система сбора и обработки данных. На рис.2 представлена система организации сбора и обработки информации на базе ЭВМ СМ-3. Сигналы с предусилителей, установленных непосредственно у счетчиков, после усиления поступают на 1024 -канальные амплитудно-цифровые преобразователи /АЦП/ типа 712 фирмы 'ПОЛОН'. Для организации совпадений и передачи данных с АЦП в ЭВМ разработан специальный блок прерывания в системе КАМАК. Полученные цифровые данные передаются через интерфейс КАМАК в ЭВМ. Время совпадений может быть установлено от $0,1$ до $1,5 \text{ мкс}$ программным образом с шагом $0,1 \text{ мкс}$. К системе подключены интерфейс черного дисплея для наблюдения одномерных спектров и интерфейс цветного телевизора - для двумерных спектров, используемые в он-лайн-и офф-лайн-режимах работы с ЭВМ. Калибровка выполнялась отдельной программой, что позволяло легко определять области суммирования спектров для последующей обработки. Сортировка и обработка данных производились на ЭВМ в основном в режиме офф-лайн.

С помощью описанной аппаратуры измерялся выход легких заряженных частиц с $1 \leq Z \leq 4$, вылетающих из мишени под фиксированными углами 0° , 20° и 90° по направлению к падающему пучку ионов ^{22}Ne и ^{40}Ar с энергиями 178 и 221 МэВ соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис.3 представлены полученные в реакциях $^{48}\text{Ti} + ^{22}\text{Ne}$, $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ и $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$ спектры α -частиц, вылетающих в направлении пучка ионов. Для уменьшения загрузки счетчиков рассеянными ионами в опытах под углами 0° и 20° устанавливался поглотитель из того же материала, что, естественно, увеличивало порог

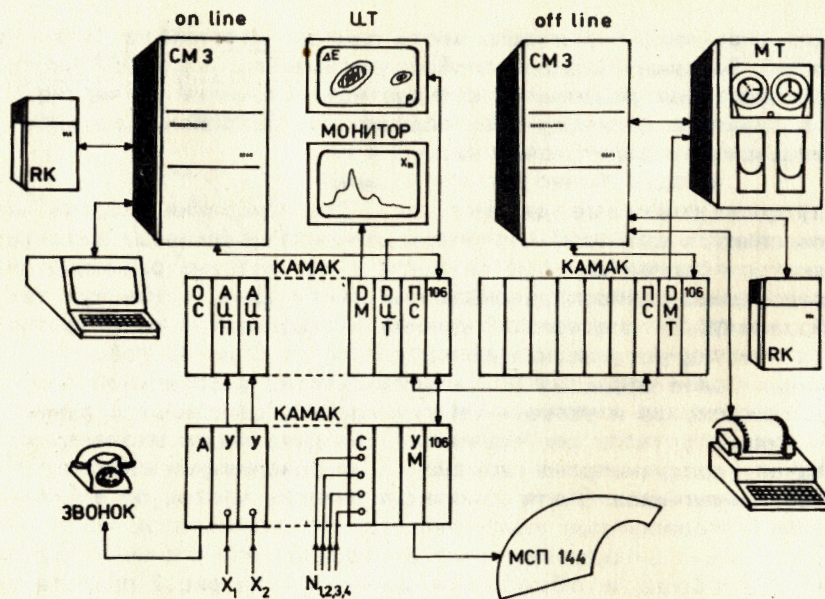


Рис.2. Система сбора и обработки информации на базе ЭВМ CM-3. Обозначения: РК - магнитные диски, ЦТ - цветной телевизор, МТ - накопитель на магнитной ленте, ОС - блок организации совпадений и прерывания, АЦП - амплитудно-цифровые преобразователи, ДМ - блок драйвера ЦТ, ПС - блок связи, ДМТ - блок интерфейса МТ, А - блок сигнала, У - усилители, С - 4-кратный счетчик, УМ - блок управления магнитным анализатором МСП-144, 106 - блок интерфейса КАМАК-СМ-3, $X_{1,2} \dots$ - спектрометрические сигналы, $N_{1,2,3,4}$ - сигналы, считываемые пересчетными устройствами.

Рис.3. Энергетические спектры α -частиц, полученных в реакциях $^{48}\text{Ti} + ^{22}\text{Ne}$, $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ и $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$ под углом 0° / для реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ приведены спектры α -частиц под углами 0° , 20° и 90° .

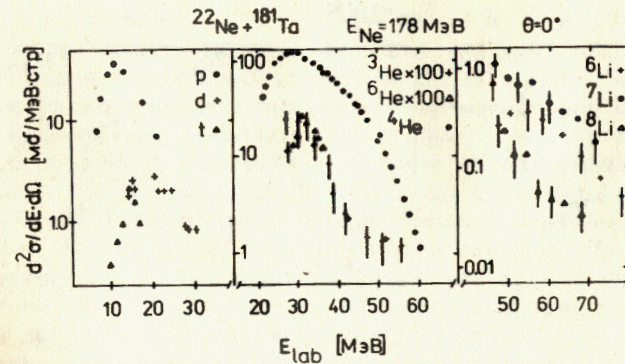
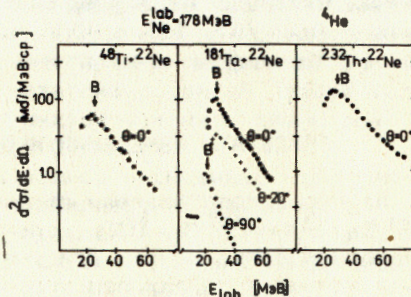


Рис.4. Энергетические спектры легких заряженных частиц, вылетающих в направлении пучка, в реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$.

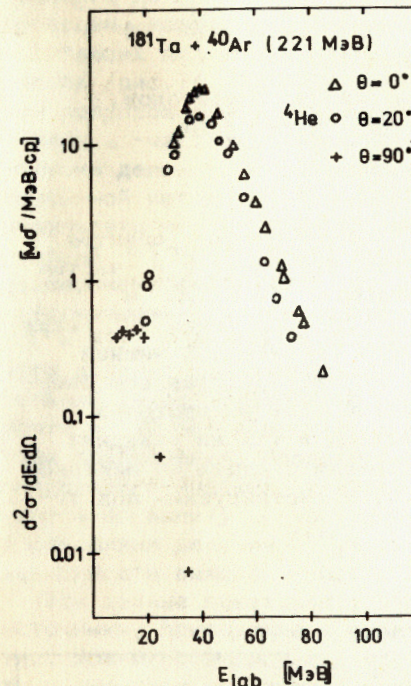


Рис.5. Энергетические спектры α -частиц в реакции $^{181}\text{Ta} + ^{40}\text{Ag}$, вылетающих под разными углами.

регистрации в этих опытах. Форма спектров ядер ^4He и других заряженных частиц /рис.4/ и сечения их образования с асимметрией в высокоэнергетической части спектра близки к полученным в работе /3/. Очевидно, что представленная методика дает надежную идентификацию легких заряженных частиц.

На рис.3 и 5 представлены энергетические спектры α -частиц в реакциях $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ и $^{181}\text{Ta} + ^{40}\text{Ag}$, вылетающих под разными углами. Следует подчеркнуть, что под углом 90° в обеих реакциях наблюдается заметный вклад мягкой компоненты/части спектра с энергиями ниже величины выходного кулоновского барьера/. Мягкая компонента под углом 90° в α -спектрах и спектрах тритонов наблюдается и в реакциях с ионами ^{22}Ne на ^{197}Au и ^{232}Th /рис.6/, а также в реакциях $^{181}\text{Ta} + ^{40}\text{Ag}$ и $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ag}$ /рис.7, верхняя часть/. Относительный вклад мягкой компоненты становится более существенным в реакциях с ионами неона для более тяжелых мишеней. Отметим, что в реакции $^{181}\text{Ta} + ^{40}\text{Ag}$ под углом 90° низкоэнергетическая часть α -спектра слабо меняется

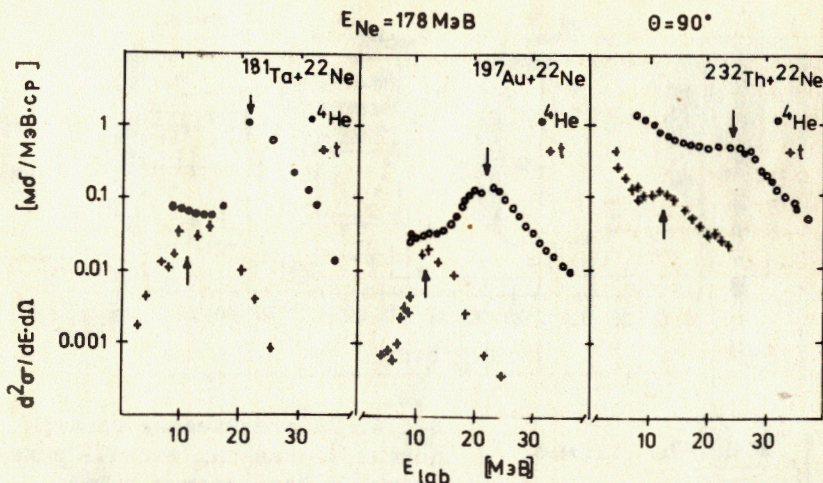


Рис.6. Энергетические спектры α -частиц и тритонов, полученных в реакциях $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$, $^{197}\text{Au} + ^{22}\text{Ne}$ и $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$ под углом 90° .

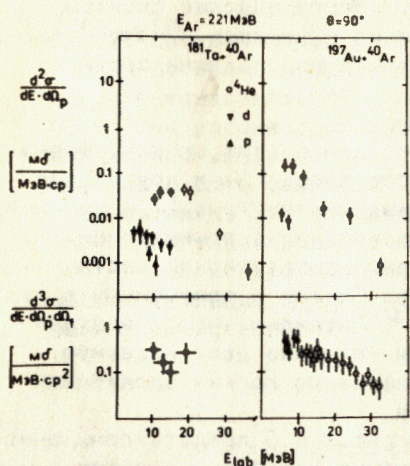
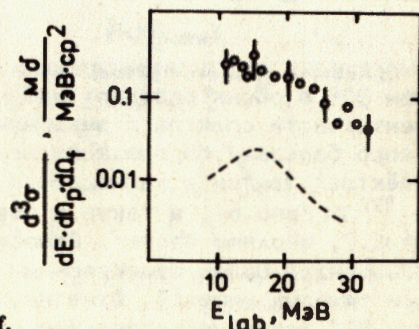


Рис.8. Энергетический спектр α -частиц в реакции $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ag}$, зарегистрированный под углом 90° в совпадении с одним из осколков деления. Штриховая линия - вклад от тройного деления в предположении, что вероятность испускания α -частиц и форма спектра при тройном делении $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ag}$ ($Z=97$) подобны известным для тройного деления ^{252}Cf .

Рис.7. Энергетические спектры протонов, дейтронов и α -частиц в реакциях $^{181}\text{Ta} + ^{40}\text{Ag}$ и $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ag}$ под углом 90° /верхняя часть рисунка/. В нижней части рисунка представлены энергетические спектры протонов и α -частиц в тех же реакциях в совпадении с одним из осколков деления, регистрируемым под углом 170° .



с уменьшением энергии частиц. Таким образом, в исследованных нами реакциях мы наблюдаем низкоэнергетические α -частицы, относительный вклад которых возрастает для более тяжелых взаимодействующих систем. Контрольные эксперименты, проведенные на мишенях из углерода и алюминия, показали, что мягкая компонента спектра не может быть объяснена реакциями, идущими на возможных примесях легких элементов в мишенях. Поэтому следует искать другие возможные источники образования частиц с малой кинетической энергией. Одним из них может быть тройное деление 4,10 . В таком случае для α -частиц должен наблюдаться резко выраженный максимум в энергетическом $/E_{\text{max}} \sim 15 \text{ МэВ}/$ и угловом распределении. Максимальный выход α -частиц ожидается под углом, близким к 90° относительно оси деления 4,10 . Для оценки вклада α -частиц от тройного деления в низкоэнергетические области спектров были проведены корреляционные эксперименты по регистрации α -частиц, вылетающих под углом $\sim 90^\circ$ относительно направления разлета осколков /рис.1/. Один из осколков деления регистрировался кольцевым полупроводниковым детектором в телесном угле 51 мср . Выделялись α -частицы, зарегистрированные в совпадении с этими осколками деления, и анализировались по энергии с помощью ранее описанной методики. На рис.7 /нижняя часть рисунка/ приведены результаты корреляционных экспериментов, полученные при анализе реакций $^{181}\text{Ta} + ^{40}\text{Ag}$ и $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ag}$. Результаты корреляционных экспериментов показали, что: 1/ выход α -частиц значительно выше предсказываемого для тройного деления составного ядра $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ag} /Z = 97/$, а их энергетический спектр шире известного для тройного деления при спонтанном делении ^{252}Cf /рис.8/; 2/ относительный выход протонов по сравнению с α -частицами превышает почти в 100 раз известный для тройного деления при малых энергиях возбуждения. Проведенные нами оценки угловой зависимости низкоэнергетических α -частиц и данные корреляционных экспериментов по вылету α -частиц более высоких энергий в совпадении с осколками деления 11 указывают на отсутствие резкой угловой зависимости выхода α -частиц при отходе от углов, близких к 90° .

Эти данные показывают, что, видимо, необходимо искать другие источники, приводящие к вылету низкоэнергетических легких частиц. Можно предположить, что наблюдаемые легкие заряженные частицы вылетают из сложной сильнодеформированной или вращающейся ядерной системы с последующим делением остатка 12 . Не исключена возможность образования низкоэнергетических частиц в процессе сложных касательных или периферических взаимодействий. Указания на возможность испускания низкоэнергетических легких ядер ($Z > 5$) из деформированных систем с оценкой степени их деформации содержатся в работах 13,14 . Поэтому вылет низкоэнергетических заряженных частиц и легких ядер требует более тщательного внимания и описания этого явления, а также постановки дальнейших экспериментов с более высокой чувствительностью и регистрацией их под малыми углами.

ВЫВОДЫ

1. Создана многомерная система для анализа заряженных частиц под разными углами вылета из мишени с малыми кинетическими энергиями /до 8-10 МэВ/.

2. Измерены энергетические спектры α -частиц и некоторых других легких частиц, вылетающих под углами 0° , 20° и 90° .

3. Под углом 90° наблюдаются значительные выходы легких заряженных частиц /р, d, t и α / в подбарьерной области энергий, которые нельзя объяснить эмиссией частиц при тройном делении, если предположить, что механизм тройного деления резко не меняется с увеличением энергии возбуждения и углового момента. Вылет этих частиц, по-видимому, происходит до деления при динамической деформации сложной ядерной системы или при ее сильном вращении.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность академику Г.Н.Флерову, профессору Ю.Ц.Оганесяну за предоставленную возможность проведения этой работы. Авторы благодарят Ю.Э.Пенионжкевича и Б.И.Пустыльника за обсуждение работы и ценные замечания, Н.Т.Суравицкую, З.Китовски и группу эксплуатации У-300, способствовавших выполнению данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оганесян Ю.Ц. В кн.: Труды Международной школы по структуре ядра. ОИЯИ, Д4-80-385, Дубна, 1980, с.261.
2. Волков В.В. В кн.: Ядерные реакции глубокоэластичных переходов. "Энергоиздат", М., 1982, с.130.
3. Borcea C. et al. JINR, E7-82-46, Dubna, 1982.
4. Vandenbosch R., Huizenga J. Nuclear Fission. Academic Press, New York and London, 1973, p.373-399.
5. Майдигов В.З. и др. ПТЭ, 1979, № 4, с.68.
6. Sowinski M., Soltan A. In: Proc. of the Int. Workshop on Gross Properties of Nuclear and Nuclear Excitations IX. /Ed. by H.Feldmeier/. Inst. für Kernphysik. Darmstadt, February, 1981, p.181.
7. Купчак Р. и др. Международный симпозиум по синтезу и свойствам новых элементов. Дубна, 23-27 сентября 1980 г. Сборник аннотаций. ОИЯИ, Д7-80-556, Дубна, 1980, с.78.
8. Дмитриев В.Д. и др. ПТЭ, 1982, № 2, с.7.
9. Вальцог Д. и др. ПТЭ, 1979, № 6, с.36.
10. Yuet C. et al. Nucl.Phys., 1979, A314, p.1-26.
11. Rivet M.F. et al. Phys.Rev., 1982, C25, p.2430.
12. Blann M., Komoto T.T. Phys.Rev., 1981, C24, p.426.
13. Артюх А.Г. и др. ЯФ, 1978, 28, с.611.
14. Artukh A.G. et al. Z.Phys., 1981, A303, p.41.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 марта 1983 года.

Совински М. и др.

P7-83-127

Эмиссия легких заряженных частиц и ее связь с делением

Изучена эмиссия легких заряженных частиц в ядерных реакциях с тяжелыми ионами ^{22}Ne и ^{40}Ar на мишенях из Ti, Ta, Au и Th под углами 0° , 20° и 90° . Измерения проводились с помощью многомерной системы анализа, состоящей из магнитного анализатора и установленных в его фокальной плоскости $\Delta E \times E$ -телескопов из тонких газовых пропорциональных счетчиков и полупроводниковых детекторов. Информация собиралась и обрабатывалась с помощью малой ЭВМ СМ-3. На тяжелых мишенях наблюдался значительный выход легких заряженных частиц в подбарьерной области энергий. Корреляционные эксперименты по регистрации р- и α -частиц с осколками деления показали, что величины сечений их образования значительно выше ожидаемых для тройного деления. Сделано предположение о вылете этих частиц до деления при динамической деформации сложной ядерной системы или ее сильном вращении.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Sowinski M. et al.

P7-83-127

Emission of Light Charged Particles and Its Connection to Fission

Emission of light charged particles in reactions of ^{22}Ne and ^{40}Ar ions with Ti, Ta, Au and Th targets at 0° , 20° and 90° was investigated. The multiparameter measurements were performed making use of magnetic spectrometer with $\Delta E \times E$ telescopes (thin gas proportional counters and semiconductor detectors). The SM-3 computer was used for data collecting and handling. A strong component of subbarrier light charged particles has been observed in the case of heavy targets. Coincidence experiments (protons and α -particles with fission fragments) have shown cross sections greater than expected for ternary fission. It is suggested that light particles are emitted before fission and are connected with dynamical deformation or rotation of complex nuclear system.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.