

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3784

P7-87-621

Х.Зодан, С.М.Лукьянов, Ю.Э.Пенионжкевич,
В.С.Саламатин, Г.Г.Чубарян¹, К.Хайдель, А.Поп²,
К.Д.Шиллинг³, Э.Вилл³, П.Гиппнер³, К.Борча

ПРОЯВЛЕНИЕ ОБОЛОЧЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ
В ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРОДУКТОВ
РЕАКЦИИ $Zn+Sn$

Направлено в журнал "Ядерная физика"

¹Ереванский физический институт

²Институт ядерной техники и технологии, Бухарест, СРР

³ЦИЯИ АН ГДР, Россендорф

Таблица

Реакция	$\eta = \frac{(M_T - M_P)}{(M_T + M_P)}$	$E_{\text{с.с.}}$ (МэВ)	E/V_c	l_{max}
$^{64}\text{Zn} + \text{nat Ag}$	0,26	300	1,18	94
		335	1,31	124
$^{64}\text{Zn} + \text{II}^{114}\text{Sn}$	0,28	314	1,19	99
		330	1,24	114
		390	1,47	157
$^{64}\text{Zn} + \text{II}^{116}\text{Sn}$	0,29	314	1,19	102
$^{64}\text{Zn} + \text{I}^{122}\text{Sn}$	0,31	314	1,22	110
$^{64}\text{Zn} + \text{I}^{139}\text{La}$	0,37	345	1,26	131
		365	1,34	152

Результаты измерений

Измерения проводились на двухплечевом времяпролетном спектрометре ДЭМАС ^{18/}. Спектрометр позволяет регистрировать коррелированные продукты реакции двумя времяпролетными плечами. Геометрия расположения "плеч" и угловой аксептанс ($\sim 18^\circ$) установки позволяют регистрировать продукты бинарных реакций со значениями полной кинетической энергии и масс (ТКЕ и МЗ, М4) в области, ограниченной пунктирными линиями на рисунке 1. Из экспериментально измеренных значений времен пролета, углов вылета частиц проводился отбор событий двухтельного процесса по сумме углов разлета частиц в системе центра масс $\bar{\theta}_3 + \bar{\theta}_4$ без полного предположения о механизме реакции. Для событий, удовлетворяющих условию $\bar{\theta}_3 + \bar{\theta}_4 = 180^\circ \pm 3^\circ$, вычислялись значения масс и энергий продуктов, соответствующие значениям до испарения нуклонов и продуктов реакции.

На рис.2 представлены результаты измерений зависимости выхода продуктов реакции $^{64}\text{Zn} + \text{II}^{114}\text{Sn}$ от массы и полной кинетической энергии при трех значениях энергий налетающих ионов. Для максимальной энергии пучка (соответствующей отношению энергии в с.ц.м. к кулоновскому барьеру $E/V_c = 1,47$) в представленной на рис.2 зависимости наблюдаются две группы событий: одна - соответствующая упругим и квазиупругим реакциям (А), а другая (область С) - продуктам симметричной фрагментации. Первая группа событий характеризуется широким интервалом значений по ТКЕ при средних значениях масс

Оболочечная структура атомных ядер проявляется во многих ядерных процессах. В спонтанном и низкоэнергетическом делении повышенный выход осколков с массой $130 \div 140$ а.е.м. связан с образованием магических ядер Sn. Влиянием оболочечных эффектов объясняют высокие значения полных кинетических энергий деления изотопов Md и Fm ^{1/}. Большой интерес представляет поиск проявлений оболочечной структуры в реакциях с тяжелыми ионами. Реакции с тяжелыми ионами могут приводить к полному слиянию налетающего иона с ядром мишени с образованием составного ядра. При этом энергия возбуждения E^* компаунд-ядра составляет величину от нескольких десятков до сотен МэВ. В тех случаях, когда энергия $E^* < 50$ МэВ, возможно проявление оболочечных эффектов в массовых и энергетических распределениях продуктов распада составного ядра ^{2/}. По мере утяжеления оскоблдирующих ионов сечение полного слияния падает, так, для реакций с ионами Ar > 20 на урановой мишени его вклад в полное сечение уже невелик ^{3/}, а для еще более тяжелых снарядов, с Ar > 40 , доминирующими являются другие неупругие процессы. Однако в характеристиках продуктов реакций, не приводящих к полному слиянию, также могут проявляться оболочечные эффекты. В работах ^{4,5/} наблюдалось влияние оболочечной структуры в массовых распределениях продуктов реакции, образующихся в процессе эволюции двойной ядерной системы к симметричной фрагментации без образования составного ядра. Таким процессом может быть реакция быстрого долонил, характеризующаяся релаксацией почти всех степеней свободы.

Проявление оболочечных эффектов в характеристиках продуктов глубокоэластичных передач (ГЭП) наблюдалось в работе ^{6/}, где отмечались максимумы сечений для легких продуктов с замкнутыми оболочками и под-оболочками, образующихся при значительной перестройке взаимодействующих ядер. Для ГЭП характерным является диссипация кинетической энергии и углового момента с образованием в основном продуктов с массами вблизи масс взаимодействующих ядер. Используя магические и околомагические ядра во входном канале, можно попытаться найти эффекты, зависящие от влияния оболочечной структуры сталкивающихся ядер на процесс эволюции составной ядерной системы. Именно в глубокоэластичных взаимодействиях, когда ядерная система еще не "поплыла" входной канал, можно найти наиболее яркие эффекты проявления структур входных ядер ^{7/}. Настоящая работа предпринята с целью исследования влияния структуры ядер во входном канале на процесс взаимодействия тяжелых ионов. Измерены массовые, энергетические и угловые распределения продуктов реакции ^{64}Zn на мишенях из олова, лантана, осеребра. Параметры входного канала исследуемых реакций представлены в таблице.

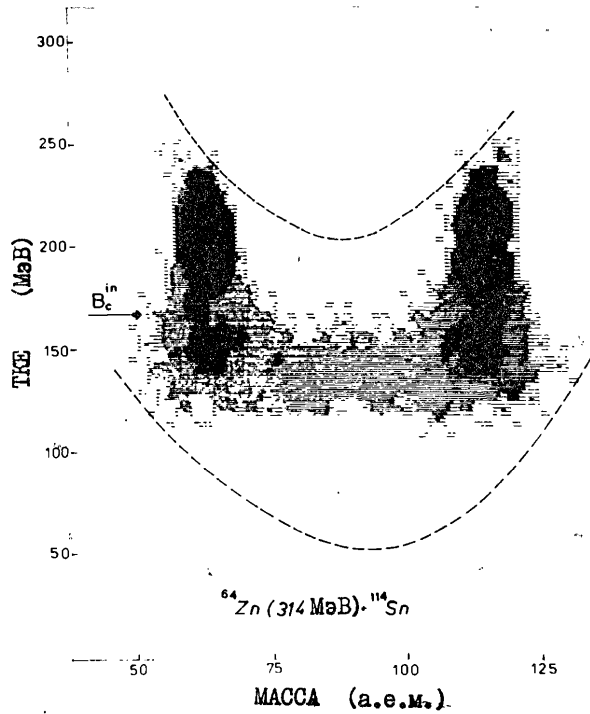


Рис. 1. Измеренная зависимость выхода продуктов реакции $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$ в зависимости от массы M продуктов и ТКЕ. Геометрия расположения детекторов позволяла регистрировать бинарные продукты со значениями масс и ТКЕ во внутренней области, ограниченной пунктирными линиями

продуктов, приблизительно равных значениям масс взаимодействующих ядер M_p и M_t . Область (C) характеризуется более узким распределением по ТКЕ, но широким набором масс продуктов от M_p и M_t . Среднее значение ТКЕ для центра этой группы соответствует значению, которое ожидается согласно систематике по средним полным кинетическим энергиям для осколков симметричного деления ^{9/}. С уменьшением энергии бомбардируемых ионов выход продуктов симметричной фрагментации (область C) уменьшается, а в распределении по ТКЕ в группе (A) появляется дополнительный максимум (область B). Наконец, при энергиях вблизи кулоновского

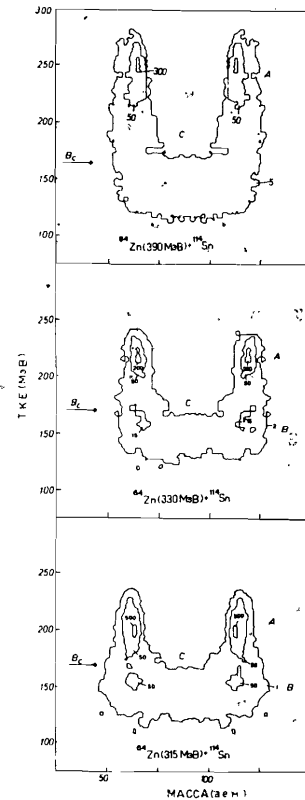


Рис. 2. Зависимости выходов продуктов реакции $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$ от массы и ТКЕ при различных энергиях налетающих ионов.

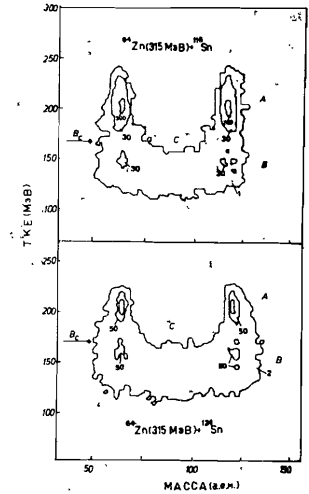


Рис. 3. Зависимости выходов продуктов от массы и ТКЕ в реакциях с ионами ^{64}Zn (315 МэВ) на мишенях из различных изотопов Sn.

барьера ($E/Vc \sim 1,2$) распределение по ТКЕ для снарядо- и мишенеподобных продуктов имеет четко выраженные два максимума. Средняя величина ТКЕ для событий группы (А) соответствует энергии бомбардирующих ионов в системе центра масс, а для области (В) значениям ТКЕ несколько меньше входного барьера Vc .

Зависимости выхода продуктов от массы и ТКЕ были измерены в реакциях с другими разделенными изотопами олова: ^{116}Sn и ^{122}Sn при энергии ионов $^{64}\text{Zn} \sim 315$ МэВ. Результаты этих измерений представлены на рис.3, из которого следует, что изменение числа нейтронов ядер мишени не приводит к существенному изменению формы спектров и сохраняется двугорбое распределение по ТКЕ для снарядо- и мишенеподобных продуктов. Положение максимума второго пика (В) по ТКЕ соответствует образованию мишенеподобных фрагментов в глубоконеупругом канале реакции и смещается в сторону больших масс с увеличением массового числа ядра мишени.

Для определения влияния оболочечных эффектов на характеристики продуктов реакций в выходном канале была проведена серия экспериментов, где в качестве мишеней были выбраны ядра ^{139}La и ^{nat}Ag . Результаты измерений выходов продуктов в зависимости от M и ТКЕ для двух значений энергии ^{64}Zn представлены на рис.4,5 для реакций $^{64}\text{Zn} +$

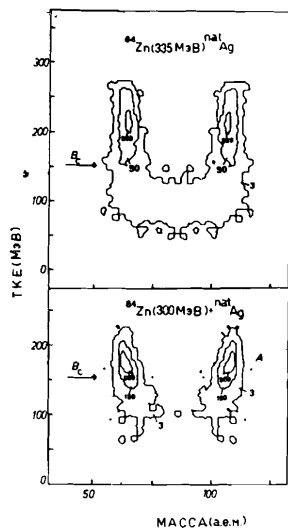


Рис. 4. Зависимости выходов продуктов от массы и ТКЕ для реакции $^{64}\text{Zn} + ^{nat}\text{Ag}$.

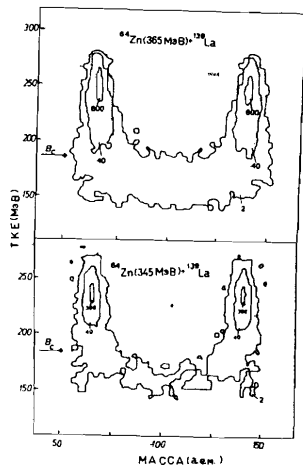


Рис. 5. Зависимости выходов продуктов от массы и ТКЕ для реакции $^{64}\text{Zn} + ^{139}\text{La}$.

$+ ^{nat}\text{Ag}$ и $^{64}\text{Zn} + ^{139}\text{La}$, соответственно. Из сравнения этих спектров со спектрами на оловянных мишенях видно, что в распределении по ТКЕ для мишене- и снарядоподобных продуктов не наблюдается дополнительного максимума при $TKE \leq Vc$, в отличие от реакций на изотопах олова. Для большей наглядности на рис.6 представлены распределения полной кинетической энергии для мишене- и снарядоподобных продуктов для реакций $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$ и $^{64}\text{Zn} + ^{139}\text{La}$. Из этого рисунка следует, что для второй реакции, как и в случае с мишенью из Ag , распределение монотонно.

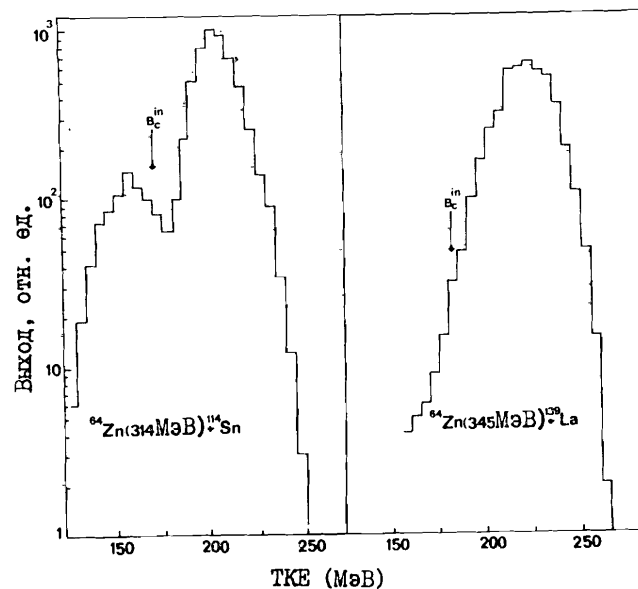


Рис. 6. Спектры полной кинетической энергии для мишенеподобных продуктов в реакциях $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$, ^{139}La при одинаковых энергиях пучка над кулоновским барьером.

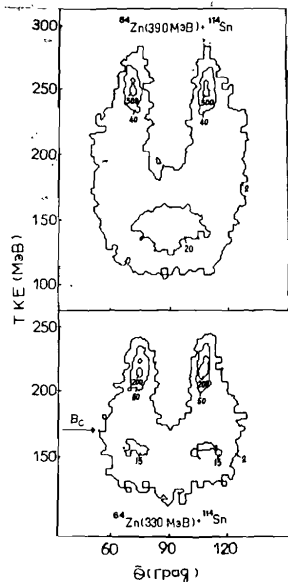


Рис. 7. Зависимости выхода продуктов реакции $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$ от угла рассеяния в с.ц.м. и ТКЕ.

Дополнительную информацию о механизме ядерных реакций можно получить из корреляционных функций между углом вылета продуктов в системе центра масс и полной кинетической энергии ТКЕ. На рисунке 7 представлены также диаграммы для реакции $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$ при различных энергиях налетающих ионов. Для продуктов глубоконеупругих процессов при энергиях вблизи барьера ($E/V_c \sim 1,2$) наблюдается сильная "фокусировка": эти продукты вылетают в системе центра масс под углами, близкими к углам упругого рассеяния, вне зависимости от величины потерь кинетической энергии (ТКЕ). Этот факт указывает на малое время взаимодействия при образовании снарядо- и мишенеподобных продуктов со значениями $\text{TKE} \leq V_c$. За это короткое время может осуществляться эквilibрация по N/Z и диссипация кинетической энергии и практически отсутствует вращение фрагментов друг относительно друга и значительный обмен нуклонами.

Обсуждение экспериментальных результатов

В исследованных реакциях на мишенях из разделенных изотопов олова при энергиях вблизи кулоновского барьера в зависимостях выхода продуктов от их массы и полной кинетической энергии обнаружены отчетливые максимумы для снарядо- и мишенеподобных продуктов при значениях $\text{TKE} \leq V_c$, т.е. при значительных потерях кинетической энергии, характерных для ГНП $^{10}/$. Выход продуктов с указанными значениями масс и ТКЕ зависит от энергии налетающих ионов. Так, при энергиях пучка вблизи барьера ($E/V_c < 1,3$) указанные максимумы превосходят выход продуктов симметричной фрагментации. С дальнейшим повышением энергии налетающих ионов ($E/V_c \sim 1,47$) в спектрах полной кинетической энергии для снарядо- и мишенеподобных продуктов наблюдается монотонная зависи-

мость. Результаты измерений таких же зависимостей для реакций с немагическими по Z ядрами мишеней показали отсутствие дополнительных максимумов в области $\text{TKE} \leq V_c$.

Такое изменение формы спектров может быть связано с сохранением структуры взаимодействующих ядер, а именно оболочки $Z=50$ ядер олова, в выходном канале реакции. Поскольку в процессах глубоконеупругих передач успевают осуществиться N/Z -равновесие и диссипация кинетической энергии и отсутствует релаксация вдоль масс-асимметричной коллективной переменной, то в этих процессах не происходит значительной перестройки взаимодействующих ядер. Продукты реакции еще "помнят" о свойствах входного канала и сохраняют в себе устойчивую оболочечную структуру ($Z=50$), если она заложена во входном канале. Это проявляется в виде дополнительных максимумов в распределении по ТКЕ в реакциях с оловянными мишенями.

Как уже отмечалось $^{13}/$, оболочечные эффекты наблюдаются, если энергия возбуждения не превышает 50 МэВ. Из полученных данных можно оценить энергию возбуждения образующихся фрагментов. В реакции $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$ с $E/V_c \sim 1,2$ максимальные потери кинетической энергии составляют 50 МэВ. Для больших энергий налетающих ионов ($E/V_c \sim 1,45$) потери увеличиваются в два раза и распределение по ТКЕ для снарядо- и мишенеподобных продуктов становится монотонным. В исследуемой реакции при энергии $E/V_c \sim 1,2$ энергия возбуждения, например, для продуктов с массой $M \sim 110$, составляет 40 МэВ и в два раза больше для $E/V_c \sim 1,45$. Вероятно, при энергии налетающих ионов вблизи барьера не происходит разрушения оболочек. Поэтому в характеристиках продуктов глубоконеупругих передач могут проявляться свойства взаимодействующих ядер, в частности оболочки $Z=50$.

Интерес представляет более детальное исследование реакции $^{64}\text{Zn} + ^{139}\text{La}$ на предмет изучения проявления оболочки $N=82$ ядра мишени в характеристиках продуктов реакции.

Ранее в работе $^{15}/$ по изучению массовых и энергетических распределений продуктов реакций, приводящих к образованию составной системы с $Z=108$, наблюдался повышенный выход продуктов с массами вблизи 210 а.е.м. Эти результаты интерпретировались как проявление оболочечных эффектов ($Z=82, N=126$) в процессе эволюции ядерной системы, не приводящей к образованию составного ядра (реакция быстрого деления). В случаях быстрого деления времени протекания реакции больше характерных времен глубоконеупругих процессов, и за это время помимо N/Z -равновесия также устанавливается равновесие относительно масс-асимметричной коллективной переменной. Поэтому наблюдение повышенного выхода продуктов с магическими значениями масс, по-видимому,

можно интерпретировать, в отличие от глубоконеупругого процесса, как следствие установления равновесия относительно масс-асимметричной коллективной переменной.

В заключение авторы выражают благодарность профессору Ю.Ц.Оганесяну за постоянное внимание к данной работе, Ю.А.Музычке и Б.И.Пустыльнику за критические замечания и плодотворные дискуссии, коллективу ускорителя У-300 за обеспечение работы на выводном пучке ионов цинка, З.Д.Покровской за помощь в оформлении рукописи.

Л и т е р а т у р а

1. E.K.Hulet, J.F.Wild, Phys.Rev.Lett., v.56, p.313, 1986.
2. R.Kalpakchieva et al. Phys.Lett., v.69B, p.287, 1977.
3. Yu.Ts.Oganessian, Yu.A.Lazarev. Treatise on HI-Science, v.4, Plenum Press, New York, 1985.
4. R.Kalpakchieva et al. Nucleonica, v.24, No 4/79, p.417, 1979.
5. P.Gippner et al. Z.Phys., A325, p.335, 1986.
6. В.В.Волков и др. Изв. АН СССР, сер.физ., 1978, т.42, с.2234.
7. В.В.Волков. Ядерные реакции глубоконеупругих передач. Москва, Энергоиздат, 1982, стр.79.
8. Э.Вилл и др. Сообщение ОИЯИ № I3-85-754, Дубна, 1985.
9. V.E.Viola et al. Phys.Rev.C, v.31, No 4, p.1550, 1985.
10. M.Lefort et al. Nucl.Phys., A216, p.166, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 августа 1987 года.

P7-87-621

Зодан Х. и др.
Проявление оболочечной структуры
в характеристиках продуктов реакции Zn+Sn

Приводятся результаты измерений зависимостей выхода продуктов от массы и полной кинетической энергии ТКЕ в реакциях с ионами ^{64}Zn на мишенях из серебра, олова и лантана при различных энергиях пучка над кулоновским барьером. В представленных зависимостях в реакциях с магическими ядрами олова, в отличие от измерений на других мишенях, наблюдается значительный выход снарядо- и мишенеподобных продуктов при значениях ТКЕ, меньших входного кулоновского барьера. Наблюдаемые особенности в формах спектров могут быть связаны со структурой взаимодействующих ядер, а именно с оболочкой $Z = 50$ ядер олова, которая обеспечивает сохранение индивидуальных свойств ядер мишени.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод авторов

P7-87-621

Sodan H. et al.
Observation of Shell Structure in Zn+Sn Reaction
Product Characteristics

The results of measurements of dependences for reaction product yields versus mass and total kinetic energy TKE for ^{64}Zn induced reactions on the silver, tin, lanthanum targets at the different beam energy under Coulomb barrier are presented. Considerable yields of projectile- and target-like products with TKE-values smaller than Coulomb barrier had been observed in the reactions with Sn-targets in contrast to the results for other targets. Disclosed shape peculiarities can be connected with initial structures of interacting nuclei, namely, with shell effect $Z = 50$ of target, which provides for saving of individual properties of the target nuclei.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987