

Ա. Ի. Ալիխանյանի անվան ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ (Երֆի)

Հովհաննիսյան Գոհար Հովհաննեսի

ԱՆԱԳԻ ՀԱՐՍՏԱՑՎԱԾ ԹԻՐԱԽՆԵՐՈՒՄ
ԲԱՐՁՐ ԷՆԵՐԳԻԱՅՈՎ ^{12}C ԻՈՆՆԵՐԻ ԱՌԱՋԱՑՐՎԱԾ
ՄԻՋՈՒԿ-ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՓՈՆԱԶՂԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ա.04.16-«Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական ճառագայթների
ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների
թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան-2011

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ им. А. И. Алиханяна (ЕрФИ)

Оганесян Гоар Оганесовна

ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ
ИОНАМИ ^{12}C НА ОБОГАЩЕННЫХ МИШЕНЯХ ОЛОВА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01. 04.16 «Физика ядра, элементарных частиц и космических лучей»

Ереван –2011

Ատենախոսության թեման հաստատված է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր Ա.Ս. Դանագոյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր Ռ.Հ. Ավագյան
Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու Լ.Ա. Գրիգորյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական Հետազոտությունների
Ինստիտուտ (ՖՀԻ)

Պաշտակությունը կայանալու է 2011 թ-ի նոյեմբերի 15-ին, ժամը 14.00-ին
Ա. Ի. Ալիխանյանի անվան Ազգային գիտական լաբորատորիայում
գործող ՀՀ ԲՈՂ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում
(0036, Երևան, Ալիխանյան Եղբայրների փող. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան Ազգային
գիտական լաբորատորիայի գրադարանում:

Սեղմագիրն աղարկված է 2011 թ-ի հոկտեմբերի 14 -ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր՝ *Գ. Գազազյան* Է.Ն. Գազազյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физ.- мат. наук Данагулян А. С.

Официальные оппоненты: доктор физ.- мат. наук Авакян Р. О.
кандидат физ.- мат. наук Григорян Л. А.

Ведущая организация: Институт физических исследований (ИФИ) НАН РА

Защита состоится 15 ноября 2011 г. в 14.00 на заседании специализированного совета
ВАК РА 024. действующего при Национальной научной лаборатории
им. А. И. Алиханяна. (0036. Ереван, ул. Братьев Алиханян 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной научной лаборатории
им. А. И. Алиханяна.

Автореферат разослан 14 октября 2011 г.

Ученый секретарь спец. совета.
доктор физ.-мат. наук

Գ. Գազազյան

Газазян Э. Д.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Современные ускорители дают практически неограниченные возможности для получения пучков заряженных частиц с различными массами и энергиями – протонов, ядер гелия, тяжелых ионов. Со времени появления пучков протонов и тяжелых ионов высоких энергий исследованию образования остаточных ядер в вызываемых ими реакциях на различных мишенях посвящено большое количество работ, построены эмпирические систематики и созданы теоретические модели. Столкновения ионов при релятивистских энергиях – чрезвычайно сложный процесс. В результате высокоэнергетической ядерной реакции могут быть получены как стабильные, так и радиоактивные, в том числе далекие от линии стабильности, ядра. Образование этих ядер обусловлено довольно разнообразными процессами – от реакций с вылетом одного или двух нуклонов, вызванных не только и не обязательно сильным взаимодействием, но и возможной электромагнитной диссоциацией налетающего ядра или ядра-мишени в кулоновском поле – до реакций со множественным образованием фрагментов промежуточной массы, получивших название мультифрагментации.

В последнее время интерес к исследованиям релятивистских ядро-ядерных взаимодействий возрос по нескольким причинам. Во-первых, исследование множественного образования ядерных фрагментов промежуточной массы (мультифрагментов) позволяет судить о состоянии вещества в условиях, далеких от тех, которые характеризуют поведение ядер в основном состоянии. Основным предметом исследований при этом является уравнение состояния ядерного вещества. Результаты таких исследований необходимы для астрофизических приложений. Предполагается, например, что в процессе образования нейтронных звезд и взрывов сверхновых преобладающие термодинамические условия подобны тем, при которых происходит мультифрагментация. Во-вторых, поскольку во взаимодействии релятивистских ионов при больших прицельных параметрах спектры мишени и налетающей частицы приобретают большую энергию возбуждения и в то же время мало сжимаются [1], то периферийные взаимодействия ионов при высоких энергиях являются идеальным средством для изучения термальной мультифрагментации без учета эффекта сжатия. В-третьих, экспериментальные данные по взаимодействию ионов необходимы при решении таких актуальных задач, как получение вторичных пучков радиоактивных ядер. Помимо этого, интерес к исследованиям ядро-ядерных взаимодействий стимулирует создание новых экспериментальных установок. Например, в GSI (Дармштадт, Германия) создан новый магнитный сепаратор, позволяющий идентифицировать продукты реакций в очень широкой массовой области, от легких с $A < 20$ до тяжелых околومیшенных [2].

Точные экспериментальные данные о сечениях образования продуктов ядерных реакций, охватывающие широкую область энергий и различных комбинаций налетающая частица – мишень, необходимы также для проверки теоретических моделей, поскольку ни одна из имеющихся на сегодняшний день моделей полностью не воспроизводит экспериментальные данные.

Таким образом, получение новых экспериментальных данных по реакциям на конкретных ядрах, и установление существования общих свойств, характеризующих процесс взаимодействия, являются актуальными, но все еще открытыми вопросами.

Целью настоящей работы является исследование ядро-ядерных взаимодействий.

Основные задачи: измерение абсолютных сечений образования продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$, сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами протон- и дейтрон- ядерных реакций; проведение сравнения полученных экспериментальных данных с модельными; изучение явления изоскейлинга для продуктов рассматриваемых реакций; измерение изомерных отношений некоторых продуктов и обсуждение влияния оболочечных эффектов на величину изомерных отношений.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые получены данные по сечениям продуктов взаимодействия релятивистских ионов ^{12}C с обогащенными мишенями олова $^{112,118,120,124}\text{Sn}$ в широкой массовой области.

Впервые оценено значение коэффициента симметрии в уравнении состояния разреженной термализованной ядерной материи с использованием данных, полученных методом наведенной активности.

Впервые обнаружено влияние оболочечных эффектов на значения изомерных отношений при высоких энергиях.

Практическая ценность. Полученные результаты могут быть использованы для проверки и развития моделей ядерных взаимодействий.

Произведенная при помощи параметра изоскейлинга мультифрагментов оценка коэффициента симметрии в уравнении состояния разреженного термализованного вещества необходима при моделировании астрофизических процессов.

Результаты и основные положения, выносимые на защиту:

- абсолютные значения сечений образования продуктов взаимодействия ионов ^{12}C с обогащенными изотопами олова $^{112,118,120,124}\text{Sn}$; зарядовые и массовые распределения продуктов этих реакций; проверка концепций факторизации при сравнении протон-, дейтрон- и ядро-ядерных реакций; сравнение полученных экспериментальных данных с модельными с использованием моделей INC+SMM и LAQGSM;
- зависимость сечений продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$ от протон-нейтронного состава мишеней и продуктов; оценка коэффициента симметрии уравнения состояния ядерной материи в термализованном разреженном состоянии с использованием параметра изоскейлинга;
- определение изотопической температуры в реакциях расщепления;
- анализ изомерных отношений и влияния оболочечных эффектов на их значения.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на ежегодных международных конференциях «NUCLEUS 2008, 2009, 2010, 2011» (Россия); а также NPAE - Kyiv 2008; Isomers in Nuclear and Interdisciplinary Research (INIR-2011) (Россия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в ведущих научных журналах, две работы – в сборниках материалов международных конференций. Список публикаций приводится в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 104 страницы, включающих 12 таблиц, 27 рисунков и список литературы из 116 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении кратко описаны каналы ядро-ядерных взаимодействий при релятивистских энергиях, обоснованы необходимость и актуальность подобных исследований, сформулированы цели и задачи исследования.

Обзор литературных данных проводится по отдельности в каждой главе, при необходимости – разделе, в соответствии с тематикой.

Первая глава состоит из трех частей: описания условий проведения эксперимента, описания метода наведенной активности, используемого в данной работе для расчета сечений образования остаточных ядер-продуктов, а также приведены полученные экспериментальные значения сечений продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$ при энергии взаимодействия 2.2 ГэВ/нуклон.

Облучение мишеней олова $^{112,118,120,124}\text{Sn}$ ионным пучком ^{12}C при энергии 2.2 ГэВ/нуклон проводилось на нуклотроне в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ Дубна). Мишени представляли собой слои металлических фольг.

С целью регистрации короткоживущих и долгоживущих радиоактивных элементов было проведено два независимых облучения. Для регистрации короткоживущих радиоактивных элементов мишени $^{118,120,124}\text{Sn}$ облучались в течение 0.7 ч. Одновременно облучалось по 3 слоя каждой мишени. Полное число частиц пучка составляло $6.3 \cdot 10^{10}$. Измерения γ -спектров на HpGe-детекторе было начато спустя 15 мин после облучения. Для регистрации долгоживущих радиоактивных элементов другой набор мишеней $^{112,118,120,124}\text{Sn}$ облучался в течение 10.8333 ч. Полное число частиц пучка составляло $2.3875 \cdot 10^{12}$. Одновременно облучались по 3 слоя мишеней $^{118,120,124}\text{Sn}$ и один слой мишени ^{112}Sn . Измерения γ -спектров на HpGe-детекторах были начаты спустя ~ 4ч после облучения и проводились с определенной периодичностью в течение примерно года.

Ядра продукты идентифицировались по энергиям и интенсивностям характерных γ -линий и периодам полураспада. Измерение γ -спектров проводилось для трех слоев каждой из мишеней $^{118,120,124}\text{Sn}$ в обоих случаях, что дало возможность зарегистрировать остаточные ядра с малыми сечениями образования. Для обработки γ -спектров использовался программный пакет DEIMOS [3].

Измерено около 120 сечений образования продуктов для каждой из мишеней. Значения сечений приведены в разделе 1.3 первой главы.

Вторая глава диссертации посвящена описанию зарядовых и массовых распределений продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,124}\text{Sn}$ и их сравнению с реакциями $p, d + ^{112,118,124}\text{Sn}$ при близких энергиях.

В разделе 2.1 описан способ получения массовых распределений. Поскольку используемый метод активационного анализа позволяет измерять лишь сечения радиоактивных ядер, то для описания распределений сечений образования нуклидов по массам и зарядам необходимо иметь аналитическое выражение, представляющее собой зависимость от A и Z и дающее возможность оценивать сечения неизмеряемых продуктов. В качестве аппроксимирующей функции для оценки сечений неизмеряемых продуктов использовалось выражение, которое представляет собой модификацию формулы Рудстама с десятью параметрами и позволяет помимо продуктов расщепления учитывать также вклады легких и относительно легких ($A \geq 22$) элементов в массовую кривую:

$$\sigma(Z, A) = \exp[\alpha_1 + \alpha_2 A + \alpha_3 A^2 + \alpha_4 A^3 + (\alpha_5 + \alpha_6 A + \alpha_7 A^2) |Z_p - Z|^{\alpha_8}]. \quad (1)$$

Параметры $\alpha_1 - \alpha_4$ определяют форму массовой кривой, $\alpha_5 - \alpha_7$ - ширину зарядового распределения. Параметр α_8 характеризует форму зарядового распределения для данного массового числа A . Значение $\alpha_8 = 2$ соответствует распределению Гаусса, меньшие значения ведут к более широкому распределению. Зарядовое распределение предполагается симметричным относительно наиболее вероятного заряда Z_p :

$$Z_p = \alpha_9 A + \alpha_{10} A^2. \quad (2)$$

Значения параметров $\alpha_1 - \alpha_{10}$ были получены фитированием экспериментальных значений сечений продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$ по формуле (1). Фитирование проводилось по отдельности для каждой из мишеней ^{112}Sn , ^{118}Sn и ^{124}Sn при помощи программы OriginPro8.

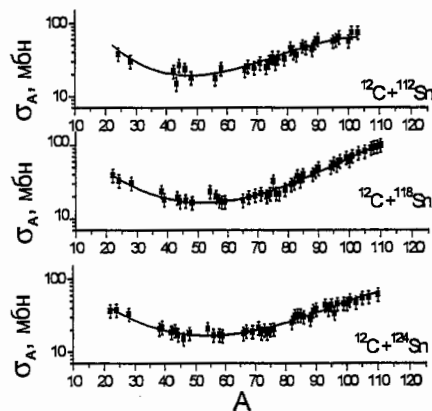


Рис. 1. Массовые распределения продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,124}\text{Sn}$. Точки представляют собой экспериментальные данные, в которых недостающие компоненты дополнены расчетными. Кривые получены на основе параметризации.

На рис. 1 приведены полученные массовые распределения для продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,124}\text{Sn}$. Как можно заметить, все три кривые имеют схожую U-образную форму. В области расщепления для всех кривых наблюдается рост сечений с увеличением значений A . В массовой области $40 < A < 60$ сечения σ_A почти не меняются. В этой области в процесс образования продуктов могут иметь вклад как расщепление, так и мультифрагментация и деление [4]. К области $A < 40$ могут относиться продукты фрагментации и мультифрагментации.

В разделе 2.2 представлены зарядовые распределения реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,120}\text{Sn}$, построенные при помощи полученных параметров.

Используя значения параметров α_9 и α_{10} , были определены значения наиболее вероятного заряда Z_p зарядовых распределений по формуле (2) для трех мишеней $^{112,118,124}\text{Sn}$. Сравнение этих значений для мишеней с различным нуклонным составом ($N/Z(^{112}\text{Sn}) = 1.24$; $N/Z(^{118}\text{Sn}) = 1.36$; $N/Z(^{124}\text{Sn}) = 1.48$) показывает, что положения максимумов зарядовых распределений Z_p продуктов, полученных из более нейтроноизбыточной мишени, смещаются в сторону нейтроноизбыточных изотопов. На рис. 2 приведены зависимости отношений $(N/Z)_p$ наиболее вероятных продуктов от массового числа продуктов (A) для трех мишеней $^{118,112,124}\text{Sn}$. Как видно из рисунка, расхождение зависимостей для различных мишеней наибольшее в области тяжелых ядер продуктов, образованных при передаче небольших энергий возбуждения. Для относительно легких элементов ($A \sim 22-24$) наблюдается слабое возрастание сечений образования нейтроноизбыточных изотопов из более нейтроноизбыточной мишени. Таким образом, можно заключить, что все продукты, независимо от механизма их образования и влияния испарительного процесса, обладают способностью "запоминать" начальное N/Z соотношение системы.

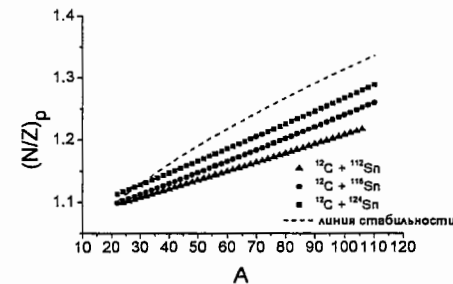


Рис. 2. Зависимость отношений $(N/Z)_p$ наиболее вероятных продуктов от массового числа продуктов A для трех мишеней $^{118,112,124}\text{Sn}$.

В разделе 2.3 проведено сравнение массовых распределений $p, d, ^{12}\text{C} + ^{118}\text{Sn}$ реакций. Используя экспериментальные данные по сечениям образования продуктов реакций p (8.1 ГэВ) + ^{118}Sn , d (3.65 А ГэВ) + ^{118}Sn , приведенные в работах [4], была проведена аппроксимация сечений неизмеряемых продуктов и получены массовые распределения этих реакций вышеизложенным способом.

Учитывая, что в пределах рассматриваемых энергий выполняется условие предельной фрагментации [5], массовые распределения продуктов реакций $p + ^{118}\text{Sn}$, $d + ^{118}\text{Sn}$ сравнивались с массовым распределением реакции ^{12}C (2.2 А ГэВ) + ^{118}Sn .

Наблюдалась схожесть кривых и сдвиг на определенный фактор, что согласуется с гипотезой о факторизации, предполагающей, что сечения продуктов в ион-ядерных реакциях превышают сечения продуктов в протон-ядерных реакциях на фактор, равный отношению соответствующих полных сечений реакций. В области $A < 40$, описывающей продукты мультифрагментации, образованные при центральных ударах, наблюдается значительное повышение сечений образования изотопов, образованных в ион-ядерных реакциях по сравнению с протон-ядерными реакциями.

В разделе 2.4 проведено сравнение экспериментальных данных с модельными. На рис. 3 приведены экспериментальные и рассчитанные при помощи модели INC + SMM (модель внутриядерного каскада + мультифрагментационная модель) [6] массовые распределения для реакций p (8.1 ГэВ), d (3.65 А ГэВ), ^{12}C (2.2 А ГэВ) + ^{118}Sn с учетом предравновесной эмиссии частиц (в рамках предравновесной экситонной модели ПЭМ [7]) и без нее. Расчеты проведены диссертантом, программа предоставлена профессором А.С. Ботвина.

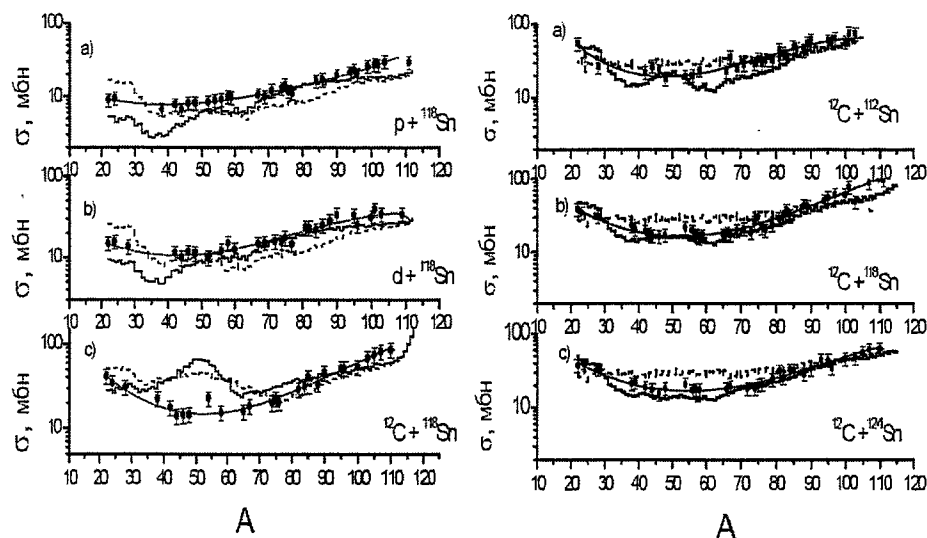


Рис. 3. Массовые распределения реакций а) $p + ^{118}\text{Sn}$ (8.1 ГэВ); б) $d + ^{118}\text{Sn}$ (3.65 А ГэВ); в) $^{12}\text{C} + ^{118}\text{Sn}$ (2.2 А ГэВ). Точки – экспериментальные полные изобарные сечения, в которых недостающие сечения дополнены рассчитанными по формуле (1), кривые получены на основе аппроксимации, гистограммы – расчеты по модели INC + SMM с учетом (сплошная линия) и без учета (штриховая линия) ПЭМ.

Другая использованная для сравнения с нашими экспериментальными данными модель – модель LAQGSM (Лос-Аламосская версия Кварк-глюонной струнной модели). Использовались две версии модели LAQGSM – LAQGSM03.01 [8] и LAQGSM03.S1 [9]. На рис. 4 приведены массовые распределения реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,124}\text{Sn}$, полученные экспериментально и при помощи моделей LAQGSM03.01 и LAQGSM03.S1. Как можно заметить, модель LAQGSM03.S1, учитывающая процесс мультифрагментации, хорошо согласуется с экспериментом, в отличие от модели LAQGSM03.01.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что при рассматриваемых энергиях процесс мультифрагментации как канал девозбуждения послекаскадного ядра играет важную роль для продуктов с массовыми числами вплоть до $A = 70$.

Третья глава состоит из пяти частей.

В разделе 3.1 рассматривается изотопический эффект (или изоскейлинг) – отношение сечений одного и того же изотопа из мишеней с различным изотопическим содержанием в зависимости от третьей проекции изоспина $t_3 = (N - Z) / 2$ [2*]:

$$R_{21} = Y_2(N, Z) / Y_1(N, Z) = \exp(C + Bt_3), \quad (3)$$

где Y_2 и Y_1 сечения образования продукта из нейтроноизбыточной и нейтронодефицитной мишеней соответственно, C и B параметры фитирования.

Проведенный в настоящей работе анализ сечений продуктов, образованных при взаимодействии ионов ^{12}C с обогащенными изотопами олова $^{112,118,120,124}\text{Sn}$ показал, что изотоп эффект наблюдается для продуктов, образованных в результате различных каналов реакций [2*]. Все зафиксированные продукты были разбиты на массовые области: $A < 40$, $40 < A < 60$, $60 < A < 80$, $80 < A < 90$, $90 < A < 100$ и $100 < A < 110$. На рис. 5, в качестве примера, приведена зависимость $R_{21}(t_3)$ для области $40 < A < 60$.

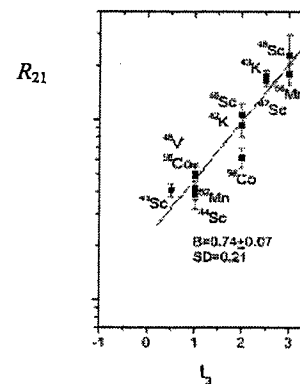


Рис. 5. Зависимость R_{21} от t_3 , построенная для продуктов массовой области $40 < A < 60$, образованных в мишенях ^{112}Sn и ^{124}Sn . Прямая получена фитированием по формуле (3).

Рис. 4. Массовые распределения реакций а) $^{12}\text{C} + ^{112}\text{Sn}$; б) $^{12}\text{C} + ^{118}\text{Sn}$; в) $^{12}\text{C} + ^{124}\text{Sn}$. Точки – экспериментальные полные изобарные сечения, в которых недостающие сечения дополнены рассчитанными по формуле (1), кривые получены на основе аппроксимации. Штриховая гистограмма – расчет по модели LAQGSM03.01, сплошная гистограмма – расчет по модели LAQGSM03.S1.

Значения параметров B , полученные при фитировании экспериментальных данных по сечениям образования продуктов различных массовых областей и пар мишеней $^{124}\text{Sn}/^{112}\text{Sn}$ ($\Delta N_i = 12$), $^{120}\text{Sn}/^{112}\text{Sn}$ ($\Delta N_i = 8$), $^{124}\text{Sn}/^{118}\text{Sn}$ ($\Delta N_i = 6$), $^{124}\text{Sn}/^{120}\text{Sn}$ ($\Delta N_i = 4$), сравнивались со значениями параметров B , полученными при фитировании сечений продуктов, образованных в реакциях $p + \text{Sn}$ ($E = 0,66; 3,65; 8,1$ ГэВ) и $d + \text{Sn}$ ($E = 3,65$ А GeV) (данные по сечениям взяты из работ [4, 10]) с использованием тех же элементов, что и в случае ионов ^{12}C в каждой из массовых областей.

Анализ полученных данных показал, что значения параметров B растут с увеличением массовых чисел продуктов для всех рассмотренных снарядов и пар мишеней [2*]. Исходя из этого можно предположить, что значение параметра B связано с механизмом образования ядер остатков.

Для тяжелых продуктов с массами, близкими к массам мишеней, и образованных, скорее всего, в реакциях расщепления, значение параметра B примерно в два раза превосходит значение параметра для легких продуктов ($7 \leq A \leq 28$). Для продуктов с массами между этими двумя группами, параметр B имеет промежуточное значение, что может указывать на то, что в процесс образования этих продуктов имеют вклад различные каналы (мультифрагментация, расщепление) [4, 10].

В случае реакций с протонами при энергии 0,66 ГэВ параметра B не меняется во всех рассмотренных массовых областях и имеет большое численное значение. Согласно [11] это означает преобладание процессов расщепления и глубокого расщепления при формировании конечных продуктов.

Раздел 3.2 посвящен фазовому переходу жидкость-газ, поскольку последующие разделы главы относятся к характеристикам возбужденного ядра в состоянии фазового перехода. Обсуждены условия, необходимые для существования фазового перехода, теоретические предпосылки перехода, основанные на схожести ядерных сил с силами взаимодействия в классической жидкости, приведены примеры экспериментального подтверждения существования фазового перехода.

В разделе 3.3 проведена оценка коэффициента симметрии в уравнении состояния разреженной горячей ядерной материи [3*]. В большом каноническом приближении, развитом в работе [12] при рассмотрении сечений образования продуктов мультифрагментации в двух идентичных реакциях с различным изотопическим составом мишени (или снаряда) считается, что температуры T рассматриваемых систем одинаковы, и параметры изоскейлинга выражаются через разности химических потенциалов протонов и нейтронов рассматриваемых систем: $\alpha = \Delta\mu_p/T$, и $\beta = \Delta\mu_n/T$ ($\alpha = B/2$). В работе также показано, что существует определенная связь между параметром изоскейлинга α мультифрагментов и коэффициентом энергии симметрии γ в уравнении ядерного состояния Вайцекера. Эта связь выражается следующим отношением:

$$\alpha = -4 \frac{\gamma}{T} \left(\frac{Z_1^2}{A_1^2} - \frac{Z_2^2}{A_2^2} \right) \quad (4)$$

где A_1, Z_1 и A_2, Z_2 – массы и заряды двух рассматриваемых мультифрагментирующих систем, T – температура систем, $\alpha = B/2$ – параметр изоскейлинга.

В настоящей работе проведена оценка коэффициента энергии симметрии γ в уравнении состояния горячего разреженного ядерного вещества с использованием

значений параметров изоскейлинга мультифрагментов с зарядовыми числами $Z = 4 - 12$, образованных в реакциях $p + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$, $d + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$ при энергии 3,65 А ГэВ. Полученно оценочное значение $\gamma \approx 10-13$ МэВ [3*].

В разделе 3.4 описывается используемый для оценки температуры источника формирования мультифрагментов метод, называемый методом “двойного изотопического отношения” или методом “термометра” [4*]. Этот метод успешно используется для продуктов мультифрагментации [13]. В работе [4*] обсуждается возможность применения вышеизложенного метода к продуктам расщепления, образованных под воздействием высокоэнергетических протонов.

Используя значения сечений образования изотопов скандия из различных мишеней, образованных под воздействием протонных пучков при энергиях в области предельной фрагментации, взятых из работ [4, 10, 14], рассчитана изотопическая температура T_{app} для пар продуктов ($^{47}\text{Sc}/^{48}\text{Sc}$) / ($^{43}\text{Sc}/^{44}\text{Sc}$), ($^{46}\text{Sc}/^{48}\text{Sc}$) / ($^{44}\text{Sc}/^{46}\text{Sc}$). Исходя из полученных значений T_{app} можно заключить, что для мишеней с $63 \leq A \leq 208$ процесс расщепления происходит при единой температуре.

Энергетической зависимости температуры, рассчитанной методом двойного изотопического отношения для рассматриваемых пар продуктов, в диапазоне $0,3 \leq E \leq 300$ ГэВ не наблюдалось, вероятно в результате того, что регистрируемые продукты расщепления образуются в процессе последовательных испарений послекаскадного ядра.

Раздел 3.4 посвящен систематизации фрагментов промежуточных масс [5*]. Анализ экспериментальных данных по сечениям образования фрагментов промежуточных масс (мультифрагментов) показывает, что степенной закон хорошо описывает распределения фрагментов по заряду $\sigma(Z_f) \sim Z_f^{-\tau}$ или массе $\sigma(A_f) \sim A_f^{-\tau}$. Это объясняется существованием фазового перехода жидкость-газ, происходящим в горячей ядерной материи при критической температуре, достигаемой при облучении ядрами мишени высокоэнергетическими адронами или ионами. Степенной закон распределения сечений образования мультифрагментов $\sigma(A_f) \sim A_f^{-\tau}$, $\sigma(Z_f) \sim Z_f^{-\tau}$, где $\tau = 2-3$, а $\sigma(A_f)$ и $\sigma(Z_f)$ – полные изобарные или изотопные сечения, предполагается в некоторых современных моделях, таких как статистическая мультифрагментационная модель (СММ) [6], перколяционная модель [15].

В работе [5*] проведена систематизация значений τ , полученных при подгонке по степенному закону

$$\sigma(A_f) = a A_f^{-\tau}, \quad (5)$$

или

$$\sigma(Z_f) = a' Z_f^{-\tau} \quad (6)$$

Помимо сечений продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$ с промежуточными массами ($7 \leq A \leq 39$), были использованы значения сечений образования фрагментов, зарегистрированных методом $\Delta E - E$ из работ [16, 17], а также радиоактивных фрагментов, полученных методом наведенной активности из работ [4, 10, 18].

На рисунках 6, 7 в качестве примера, представлены некоторые зависимости сечений образования фрагментов от массового числа A_f или заряда Z_f , профитированные по формулам (5), (6).

Анализ данных показал, что параметр τ принимает значения 2 – 3 как в случае больших энергий налетающих частиц, при которых энергия возбуждения послекаскадного ядра такова, что фазовый переход жидкость-газ имеет место, так и в случае низких энергий на ведущих к фазовому переходу. Таким образом, степенная зависимость (5), (6) с показателем $\tau = 2 - 3$ не является достаточным признаком фазового перехода [5*].

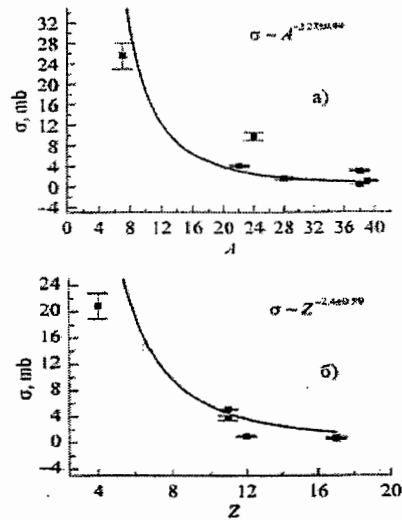


Рис. 6. (а)-Зависимость сечений фрагментов промежуточных масс, образованных в реакции $d + {}^{120}\text{Sn}$, от их массового числа. (б)-Зависимость сечений фрагментов промежуточных масс, образованных в реакции $p + {}^{118}\text{Sn}$, от их зарядового числа. Данные получены методом наведенной активности. Кривые получены фитированием по формулам (5), (6).

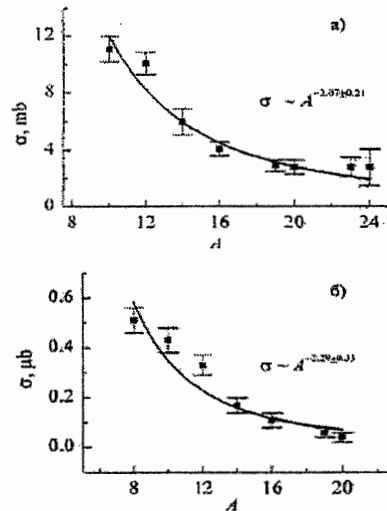


Рис. 7. (а)-Зависимость сечений фрагментов промежуточных масс, образованных в реакции $p + \text{Au}$, от их массового числа. (б)-Зависимость сечений фрагментов промежуточных масс, образованных в реакции $e + \text{Au}$, от их массового числа. Данные получены прямой регистрацией фрагментов методом $\Delta E - E$. Кривые получены фитированием по формуле (5).

Четвертая глава диссертации посвящена изучению изомерных отношений. В первой части главы приведены значения изомерных отношений для 17 пар изомеров и проведено сравнение с результатами, полученными при облучении тех же мишеней протонными и дейтронными пучками.

Во второй части главы обсуждается влияние оболочечных эффектов на значения изомерных отношений [6*]. Анализ изомерных отношений изотопов ${}^{108}\text{In}_{59}$, ${}^{110}\text{In}_{61}$, ${}^{111}\text{In}_{61}$, ${}^{117}\text{In}_{68}$, ${}^{117}\text{In}_{68}$, ${}^{117}\text{Cd}_{69}$, образованных при взаимодействии

высокоэнергетических ионов ${}^{12}\text{C}$ ($E = 2.2 \text{ А ГэВ}$) с обогащенными мишенями ${}^{118,120,124}\text{Sn}$, которые околomagичны по числу протонов, но деформированы по числу нейтронов, показывает, что изомерные отношения растут по мере увеличения числа нейтронов (рис. 8) (максимальная деформация ядра имеет место при $N = 66$).

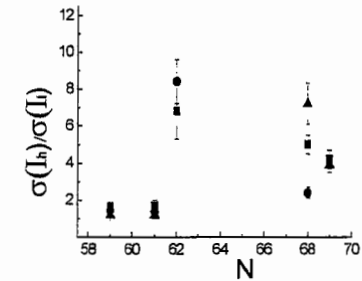


Рис. 8. Зависимость изомерных отношений продуктов, образованных в мишенях $\bullet - {}^{118}\text{Sn}$; $\blacksquare - {}^{120}\text{Sn}$; $\blacktriangle - {}^{124}\text{Sn}$, от числа нейтронов этих продуктов.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

- Впервые измерены сечения образования продуктов реакций ${}^{12}\text{C} + {}^{112,118,120,124}\text{Sn}$ при энергии 2.2 А ГэВ, на основе которых построены массовые и зарядовые распределения. Смещение максимума зарядового распределения в сторону нейтроноизбыточных продуктов из более нейтроноизбыточной мишени, возрастающее с массовым числом фрагментов, свидетельствует о способности продуктов “запоминать” начальное N/Z соотношение системы, причем эта способность сохраняется для всех массовых областей продуктов. Сравнение экспериментальных данных по реакциям $p, d, + {}^{118}\text{Sn}$ с расчетными по модели INC + SMM и ${}^{12}\text{C} + {}^{112,118,120,124}\text{Sn}$ по модели LAQGSM03.S1 дало удовлетворительные результаты [1*].
- Исследовано явление изоскейлинга. Результаты, сравнены с данными реакций, инициированных протонами и дейтронами на тех же мишенях. Показано, что величина параметра изоскейлинга зависит от механизма образования продуктов и не зависит от типа налетающей частицы [2*].
- Оценка коэффициента симметрии γ в уравнении состояния горячего разреженного ядерного вещества с использованием параметра изоскейлинга, полученного для продуктов мультифрагментации реакций $p, d + {}^{112,118,120,124}\text{Sn}$ ($E = 3.65 \text{ А ГэВ}$), дала значение $\gamma \approx 10 - 13 \text{ МэВ}$ [3*].
- Исследована возможность применения метода двойного изотопного отношения для определения температуры источника формирования к продуктам

расщепления. Показано, что в этом случае полученное значение нельзя считать количественной оценкой [4*].

- При проведении систематизации сечений образования фрагментов промежуточных масс, образованных в реакциях, инициированных протонами, дейтронами, электронами и ионами ^{12}C с различными начальными энергиями, показано, что а) сечения образования фрагментов промежуточных масс подвергаются степенному закону распределения $\sigma(A_f) \sim A_f^\tau$, $\sigma(Z_f) \sim Z_f^\tau$; б) при фазовом переходе жидкость – газ степенной показатель τ принимает значения $\tau = 2 - 3$, что, однако, не является достаточным условием фазового перехода [5*].
- Измерены изомерные отношения для некоторых продуктов реакций $^{12}\text{C} + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$. Полученные данные сравнены с данными протон- и дейтрон-инициированных реакций. *Впервые* замечено, что вероятность образования высокоспинового состояния (для ядер, околomagичных по числу протонов) при рассматриваемых энергиях взаимодействия зависит от степени деформации (по числу нейтронов) ядра остатка [6*].

Список опубликованных работ, содержащих основные результаты диссертации:

- 1*. G.H. Hovhannisyan, A.S. Danagulyan, A.R. Balabekyan, N.A. Demekhina, J. Adam, V.G. Kalinnikov, V.S. Pronskikh, S.G. Mashnik, Interaction of ^{12}C ions with the enriched isotopes $^{112,118,120,124}\text{Sn}$, The Proceedings of conference «NUCLEUS 2010», Saint-Petersburg State University, Russian Academy of Sciences, PNPI, JINR, Russia, July 6–9, 2010, p.180. (<http://www.springerlink.com/content/k86285r301325u42/fulltext.pdf>)
- 2*. A.S. Danagulyan, A.R. Balabekyan, G.H. Hovhannisyan, N.A. Demekhina, J. Adam, V.G. Kalinnikov, M.I. Krivopustov, V.M. Tsoupanko-Sitnikov, Isoeffect in reactions on enriched tin isotopes with ^{12}C ions at 2.2 A GeV energy, Nuclear Physics A (2008), v. 814, p. 109–117.
- 3*. A.S. Danagulyan, A.R. Balabekyan, and G.H. Hovhannisyan, Symmetry Energy and the Isoscaling in Reactions on Enriched Tin Isotopes, Physics of Atomic Nuclei (2010), v. 73, №1, p. 81–85.
- 4*. Г.О. Оганесян, Изотопическая температура в реакциях расщепления. Ядерная физика (2009), т. 72, №11, стр. 1999–2004.
- 5*. А.С. Данагулян, Г.О. Оганесян, Т.М. Бахшиян. Систематизация фрагментов промежуточных масс, Известия НАН Армении, Физика (2011) т. 46, №1, стр. 3-10.
- 6*. A.S. Danagulyan, G.H. Hovhannisyan, Shell Effects Influence on the Isomeric Ratios, The Proceedings of conference «Isomers in Nuclear and Interdisciplinary Research» Saint-Petersburg, July 4–10, 2011, p.12-13.

Цитируемая литература

1. K.-H. Schmidt, T. Brohm, H.-G. Clerc, et al., Phys. Lett. B (1993) v. 300, p. 313.
2. D. Henzlova, K.-H. Schmidt, et al., Phys. Rev. C (2008) v. 78, p. 044616.
3. J. Frána and J. Radional, Nucl. Chem. (2003) v. 257, p. 583.
4. V. Aleksandryan, J. Adam, A. Balabekyan, A. S. Danagulyan, et al., Nucl. Phys. A (2000) v. 674, p. 539; А.С. Данагулян, И. Адам, А. Балабекян и др., ЯФ (2000) v. 63, p. 204; В. Александрян, И. Адам, А. Балабекян и др., ЯФ (2002) т. 65, стр. 810.
5. P. Kozma, and C. Damdisuren, Czech. J. Phys. (1990) v. 40, p. 38.
6. J. P. Bondorf, A. S. Botvina, A. S. Iljinov, I. N. Mishustin, and K. Sneppen, Phys. Rep. (1995) v. 257, p. 133.
7. M. Blann Ann Rev. Nucl. Sci. (1975) v. 25, p. 123; К.К. Гудима, Г.А.Ососков, В.Д. Тонеев, ЯФ (1975) v. 21, p. 260.
8. S.M. Mashnik, K.K. Gudima, M.I. Baznat, et al., Report No. LA-UR-05-2686, LANL (Los Alamos, 2005)
9. S.M. Mashnik, K.K. Gudima, M.I. Baznat, et al., Report No. LA-UR-06-1764, LANL (Los Alamos, 2006)
10. A.R. Balabekyan, et al., Nucl. Phys. A (2004) v. 735, p. 267; A.R. Balabekyan, et al., ЯФ (2006) т. 69, стр. 1520.
11. M.B. Tsang, et al., Phys. Rev. Lett. (2001) v. 86, p. 5023; M.B. Tsang, et al., Phys. Rev. C (2001) v. 64, p. 054615.
12. A. S. Botvina, O. V. Lozhkin, W. Trautmann, Phys. Rev. C (2002) v. 65, p. 044610.
13. S. Albergo, S. Costa, E. Costanzo and A. Rubbino, Nuovo Cimento A (1985) v. 89, p. 1-28; J. B. Natowitz et al., Phys. Rev. C (2002) v. 65, p. 034618; W. Trautmann, Nucl. Phys. A (2005) v. 752, p. 407; J. Pochodzalla et al., nucl-ex/9607004.
14. M. Noguchi et al., Phys. Rev. C (1988) v. 38, p.1811; T. Asano et al., Phys. Rev. C (1983) v. 28, p. 1718; Y. Y. Chu et al., Phys. Rev. C (1977) v. 15, p. 352; J. B. Cumming et al., Phys. Rev. C (1976) v. 14, p. 1554.
15. A.D. Panagiotou, M.W. Carton et al. Phys. Rev. Lett. (1984) v. 52, p. 496.
16. В.В. Авдейчиков, А.И. Богданов и др., ЯФ (1988) v. 48, p. 1736.
17. G. E. Markaryan, A.M. Aivazyan, A.V. Badalyan. J., Phys. Nucl. Part. (1999) v. 25, L101; G. E. Markaryan, Fizika B (Zagreb) (2007) v. 16, p. 49.
18. N. T. Porile, G. D. Cole, and C. R. Rudy, Phys. Rev. C (1979) v. 19, p. 2288.

Ատենախոսությունը նվիրված է բարձր ենթագիայով միջուկ-միջուկային փոխազդեցությունների ուսումնասիրությանը՝ կատարվող ռեակցիաներում առաջացած էլքային միջուկների կտրվածքների հաշվարկմանը, ռեակցիաների մեխանիզմների պարզաբանմանը, քննարկվող պրոցեսների կախվածությունը թիրախ և էլքային միջուկների նուկլոնային կառուցվածքից:

Անագի հարստացում ^{112,118,120,124}Sn թիրախները ճառագայթվել են ¹²C իոնային փնջով ($E = 2.2 \text{ A ԳէՎ}$): Ճառագայթումը կատարվել է Միջուկային հետազոտությունների միջազգային ինստիտուտի (ՄՀՄԻ-ի) նուկլոտրոնի վրա (քաղաք Դուբնա): Ուսումնասիրության համար օգտագործվել է ներմուծված ակտիվության մեթոդը: Ռադիոակտիվ էլքային միջուկների γ -սպեկտրների չափումները կատարվել են HpGe-գրանցիչների օգնությամբ: Մնացորդային միջուկները նույնականացվել են γ -գծերի բնութագրական էներգիաների և ինտենսիվությունների, ինչպես նաև կիսատրոհման պարբերությունների արժեքների հիման վրա: γ -սպեկտրները մշակվել են DEIMOS համակարգչային ծրագրի օգնությամբ: Հաշվարկվել է յուրաքանչյուր թիրխից մոտ 120 էլքային միջուկների կտրվածքների բացարձակ արժեքներ: Կտրվածքների փորձարարական արժեքների հիման վրա ստացվել են զանգվածային և լիցքային բաշխումների կորերը: Լիցքային կորերի հետազոտումը ցույց է տալիս, որ նեյտրոն-ավելցուկային թիրախում ամենահավանական առաջացած մնացորդային միջուկը շեղվում է դեպի նեյտրոն-ավելցուկային տիրույթ:

Ստացված տվյալները համեմատվել են $p, d + \text{Sn}$ ռեակցիաների արդյունքների հետ: Այդ համեմատությունը ցույց է տվել, որ իոն-միջուկային ռեակցիաներում առաջացած միջուկների կտրվածքները մեծ են պրոտոն-միջուկային ռեակցիաներում առաջացած միջուկների կտրվածքներից որոշակի արժեքով, ինչը հաստատում է ֆակտորիզացիայի վարկածը:

Փորձարարական արդյունքները համեմատվել են հաշվարկային տվյալների հետ, հաշվարկված INC+SMM (ներմիջուկային կասկադ + վիճակագրական մուլտիֆրագմենտացիայի մոդել) և LAQGSM03.S1 (Լոս-Ալամոսի քվարկ-գլյուոնային լարային մոդել) մոդելների օգնությամբ: Մոդելային հաշվարկների համընկում փորձարարական տվյալների հետ բավարար է:

Թիրախների ընտրությունը թույլ է տալիս հետևություններ անել արդյունքների կախվածության մասին թիրախ և էլքային միջուկների նուկլոնային բաղադրություններից: Ուսումնասիրվել է իզոսպեյլինգի երևույթը, որը նկատվել է մնացորդային միջուկների բոլոր զանգվածային տիրույթների համար: Ստացված արդյունքները համեմատվել են $p, d + \sup{112,118,120,124}\text{Sn}$ ռեակցիաների արդյունքների

հետ: Իզոսպեյլինգի երևույթի հետազոտությունը ցույց է տալիս, որ իզոսպեյլինգի պարամետրի արժեքը փոխվում է էլքային միջուկների առաջացման մեխանիզմից կախված:

Թեթև մնացորդային միջուկների համար ստացված իզոսպեյլինգի պարամետրի արժեքների օգնությամբ գնահատվել է միջուկային նյութի վիճակի հավասարման մեջ մտնող սինետրիայի գործակցի (γ -ի) արժեքը գերտաք նոսր միջուկային նյութի համար: Գնահատականը տվել է $\gamma \approx 10-13 \text{ ԱէՎ}$ արժեքը: Այս տվյալը կարող է օգտագործվել նաև աստղաֆիզիկայում, քանի որ ենթադրվում է, որ նեյտրոնային աստղերի առաջացման և գերնոբերի պայթյունների պրոցեսները իրենց թերմոդինամիկական պայմաններով մոտ են միջուկում հեղուկ-գազ փուլային անցման պայմաններին:

Քննարկվել է ձեղքման ռեակցիաներում առաջացած մնացորդային միջուկների համար աղբյուրի ջերմաստիճանը իզոտոպների կտրվածքների կրկնակի հարաբերության միջոցով որոշելու հնարավորությունը:

Կատարվել է $7 \leq A \leq 39$ զանգվածային տիրույթի մնացորդային միջուկների համակարգում, քննարկվել է ֆրագմենտների կտրվածքների աստիճանային կախվածությունը զանգվածային և լիցքային թվերից: Բացի տվյալ աշխատանքում հաշվարկված կտրվածքների արժեքներից օգտագործվել են գրականությունից վերցված տարբեր մեթոդներով ստացված տվյալներ: Ցույց է տրված, որ հեղուկ-գազ փուլային անցման արդյունքում առաջացած մուլտիֆրագմենտների կտրվածքների համար նկատվում է $\sigma(A) \sim A_j^{-\tau}$; $\sigma(Z) \sim Z_j^{-\tau}$ աստիճանային կախվածությունը և ցուցիչը ընդունում է $\tau = 2 - 3$ արժեքները, ինչը, սակայն, չի կարելի համարել հեղուկ-գազ փուլային անցման բավարար պայման:

Քննարկվել են ստացված իզոմերային հարաբերությունների արժեքները: Առաջին անգամ նկատվել է մերձմոզակյան (ըստ պրոտոնների թվի) էլքային միջուկների իզոմերային հարաբերությունների արժեքների կախվածությունը մնացորդային միջուկների դեֆորմացիայից (թաղանթային էֆեկտներից):

Abstract

The thesis is devoted to the investigation of the high-energy nucleus-nucleus interaction – the residual nucleus cross sections calculation, discussion of the reactions mechanisms, and dependence of researched processes on targets and residual nuclei N/Z composition.

The enriched tin isotopes $^{112,118,120,124}\text{Sn}$ were irradiated at the Nuclotron of the JINR (Joint Institute for Nuclear Research at Dubna) by ^{12}C ion beam with the energy of 2.2 A GeV. The induced activity method was used. By HpGe detectors the γ -activity induced in the targets was measured. The radioactive nuclei were identified by half-lives and energies of the characteristic γ -lines. The obtained spectra were processed by the software package DEIMOS. Absolute cross-sections of about 120 residuals were obtained from each target.

Based on the experimental values of the cross-sections the mass and charge distributions were obtained. The charge curves analysis shows that the most probable product from neutron-rich target shifts to the neutron-rich area.

The results were compared to $p, d + \text{Sn}$ reactions data. The comparison shows that the cross sections in ion-induced reactions exceed the cross sections in proton-induced reactions on a certain value, which confirms the factorization hypothesis.

Experimental data was compared to model calculations. INC + SMM (Intra Nuclear Cascade + Statistical Multifragmentation Model) and LAQGSM03.S1 (Los Alamos quark - gluon string model) models were used. The results of comparison are in good agreement with experimental data.

The targets choice allows us to make conclusions about the dependence of results on targets' and residual nuclei's N/Z ratios. The isoscaling phenomenon was studied, which observed in all residual nuclei's mass range. The obtained data were compared with the $p, d + ^{112,118,120,124}\text{Sn}$ reactions results. The isoscaling

phenomenon analyses indicate that the value of isoscaling parameter changes depending on the mechanism of residual nucleus formation.

The value of the symmetry energy parameter γ in the nuclear equation of state was estimated using isoscaling parameter for the light residual nuclei as equal to $\gamma \approx 10\text{-}13$ MeV. These data are also important for astrophysical applications, because it is assumed that the thermodynamic conditions in processes of the neutron stars formation and the supernova explosion and the liquid-gas phase transitions in nuclear matter the same.

The application of the double isotope ratio method for spallation products source temperature estimation was discussed.

Systematization of the residual nuclei in $7 \leq A \leq 39$ mass range was made. The power dependence of fragments cross-sections on their mass and charge numbers was discussed. Beside data obtained in this work, the literary data obtained by different methods were used. It is shown that for the multifragments formed in liquid-gas phase transition process $\sigma(A_f) \sim A_f^{-\tau}$; $\sigma(Z_f) \sim Z_f^{-\tau}$ dependence is noticed with the power value 2 - 3, which, however, cannot be considered as sufficient condition of liquid-gas phase transition.

The obtained isomer ratios were discussed. The dependences of near magic residual nuclei (according to the number of protons) isomer ratios on its deformations was observed.

