

ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛОВ СЛИЯНИЯ ЯДЕР И ПЕРЕДАЧИ НУКЛОНОВ В РЕАКЦИИ $^{197}\text{Au} + ^6\text{He}$ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ ^6He ДО 20 МэВ/А

*Н. К. Скобелев^а, Ю. Э. Пенионжкевич^а, А. А. Кулько^а,
Н. А. Демехина^а, В. Крога^б, А. Куглер^б, С. М. Лукьянов^а,
Я. Мразек^б, Ю. Г. Соболев^а, В. А. Маслов^а,
Ю. А. Музыка^а, Е. И. Воскобойник^а, А. С. Фомичев^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерной физики АН ЧР, Ржеж, Чешская Республика

В работе представлены новые данные по сечениям реакций, протекающих при взаимодействии ядер ^6He с ^{197}Au в области энергий ^6He от 40 до 120 МэВ. Эксперименты проводились на вторичном пучке сепаратора АКУЛИНА Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Для идентификации продуктов реакции использовался активационный метод измерения гамма-активности сборки мишеней из тонких фольг. Измерены функции возбуждения реакций слияния ядер ^6He с последующим испусканием из составного ядра до 10 нейтронов. Анализ данных осуществлялся с использованием двух моделей — ALICE и NRV. Экспериментальные сечения реакций ($^6\text{He}, xn$), протекающих через составное ядро, в основном, согласуются с расчетами этих моделей, использующих статистический подход. Показано, что вплоть до энергий 114 МэВ падение сечения реакций полного слияния незначительно. Экспериментальные функции возбуждения реакций, приводящие к образованию изотопов ртути и золота (реакции передачи), свидетельствуют о том, что основной вклад в их образование вносят прямые процессы, а испарительные реакции ($^6\text{He}, pxn$) и ($^6\text{He}, \alpha xn$) играют второстепенную роль, что подтверждается сравнением величин измеренных сечений с результатами расчетов.

New data on the cross sections of reactions occurring during the interaction of ^6He nuclei with ^{197}Au at the energies of ^6He from 40 to 120 MeV are presented. The experiments were performed in the secondary beam separator ACCULINNA of the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR. To identify the reaction products, the activation method for measuring the gamma activity of the target assembly of thin foils was used. The excitation functions for fusion reactions involving the evaporation up to 10 neutrons from the compound nucleus as well as reactions with emission of charged particles and nucleon transfer in the investigated energy region are obtained. Data analysis was carried out using two codes — the ALICE-MP and NRV. The cross sections for the ($^6\text{He}, xn$) reactions proceeding through the compound nucleus are mostly in agreement with the results of model calculations based on the statistical approach. It is shown that up to the energies of 114 MeV the cross section drop in the complete fusion reactions is negligible. The experimental excitation functions of reactions leading to the formation of isotopes of mercury and gold (transfer reaction) indicate that the main contribution to their formation is made by direct processes, and evaporation reactions ($^6\text{He}, pxn$) and ($^6\text{He}, \alpha xn$) play a minor role, as evidenced by comparison of the measured cross sections with the calculation results.

PACS: 25.70.-z; 25.70.Gh; 25.70.Hi

ВВЕДЕНИЕ

Понимание механизмов процесса слияния и передачи нуклонов в реакциях с радиоактивными пучками и слабосвязанными стабильными ядрами крайне важно для синтеза сверхтяжелых элементов и астрофизики. Малая энергия связи валентных нуклонов в радиоактивных ядрах и кластерах в слабосвязанных ядрах, а также большие значения сечений развала таких ядер оказывают заметное влияние на процессы слияния взаимодействующих ядер в области энергий вблизи кулоновского барьера реакций. Отдельные каналы реакций передачи и неполного слияния могут оказаться более вероятными из-за наличия гало или образования слабосвязанных кластерных структур в экзотических и слабосвязанных ядрах. Кроме этого, на вероятность протекания реакции влияет Q реакции, которое в этих случаях является, как правило, положительным.

Реакции, вызываемые слабосвязанными ядрами типа ${}^6\text{He}$, для развала которого на α -частицу и два нейтрона необходима энергия около 1 МэВ, уже более полутора десятка лет активно исследуются многими научными центрами. Все это время основные усилия были направлены на выявление особенностей таких реакций при энергиях вблизи кулоновского барьера. Было обнаружено подбарьерное усиление слияния, влияние прямых процессов (развала налетающей частицы с последующим захватом фрагмента, реакций передачи) на механизм протекания реакции [1–4]. Эти исследования показали сильную зависимость процессов, протекающих при столкновении таких слабосвязанных ядер, от их структуры. С ростом энергии бомбардирующих частиц выше кулоновского барьера характер взаимодействия меняется, однако и в этой области свойства легких экзотических ядер могут проявиться в процессе образования продуктов реакций. В частности, с ростом энергии усиливается влияние прямых процессов на сечение образования составного ядра.

В экспериментах с ${}^6\text{He}$ в подбарьерной области энергий наблюдалось увеличение вероятности слияния этих ядер по сравнению с реакциями, вызванными взаимодействием ядер мишеней с ${}^4\text{He}$, представляющим кор ядра ${}^6\text{He}$ [5–7]. В подбарьерной области энергий в реакциях с ${}^6\text{He}$ было обнаружено также увеличение сечения передачи нейтронов ядру мишени. Следовательно, процессы развала снаряда и передачи нуклонов могут вносить большой вклад в полное сечение реакций в области энергий вблизи кулоновского барьера. Для реакций с ${}^6\text{He}$ в области энергий выше кулоновского барьера было получено удовлетворительное согласие с имеющимися экспериментальными данными по сечениям реакций слияния при использовании феноменологического подхода для описания ядерного взаимодействия [5].

В настоящей работе были измерены функции возбуждения каналов реакций полного и неполного слияния при взаимодействии ${}^6\text{He}$ с ${}^{197}\text{Au}$, а также каналов передачи нуклонов в энергетическом диапазоне от 40 до 120 МэВ. Получены также экспериментальные данные по изомерным отношениям некоторых продуктов реакций. Экспериментальные результаты для сечений реакций при взаимодействии ${}^6\text{He}$ с ядрами ${}^{197}\text{Au}$ сравнивались с данными для реакций с образованием этих же продуктов на пучках других стабильных частиц и с соответствующими расчетами.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на циклотроне У-400М ЛЯР ОИЯИ с использованием сепаратора вторичных пучков АКУЛИНА [8]. Пучок ускоренных ионов ${}^7\text{Li}$ с интенсивностью ~ 3 част. \cdot мкА и энергией 32 МэВ/А попадал на производящую Ве-мишень

сепаратора АКУЛИНА. Вторичный пучок ${}^6\text{He}$ был сфокусирован в ахроматическом фокусе F_3 сепаратора (рис. 1 в [8]). Интенсивность вторичного пучка ${}^6\text{He}$ с энергией 20 МэВ/А достигала значения 10^6 с^{-1} . В фокусе F_3 размещались сборки из золотых мишеней (Au-фольги от 4 до 12 мкм). Для сброса энергии ${}^6\text{He}$ между золотыми мишенями устанавливались поглотители из Al-фольг. Средняя энергия ${}^6\text{He}$, падающего на каждую мишень, потери энергии и энергетический разброс в каждой из мишеней рассчитывались с помощью кода SRIM [9] и программы LISE⁺⁺ [10].

Было проведено две серии экспериментов с использованием активационной техники измерения активности мишеней. Измерялась гамма-активность трех мишеней в первом облучении (средняя энергия ионов ${}^6\text{He}$ по золотым фольгам распределялась в диапазоне 113,7–84,4 МэВ) и четырех мишеней во втором облучении (средняя энергия в золотых фольгах изменялась от 113,7 до 40,8 МэВ). Это делалось для уменьшения энергетического разброса в фольгах. Характеристики пучка ${}^6\text{He}$, прошедшего через сборку мишеней, измерялись с помощью $\Delta E \times E$ телескопа, состоящего из ΔE полупроводникового Si-детектора и кристалла CsI в качестве E -детектора.

Измерения наведенной в мишенях γ -активности проводились на HPGe-детекторе с 20 %-й эффективностью по отношению к NaI и HWHM 1,8 кэВ для энергии γ -квантов 1,3 МэВ. Идентификация образовавшихся в реакциях ядер была проведена с учетом энергий характерных γ -линий и периодов полураспада образовавшихся радиоактивных ядер с использованием табличных ядерных данных [11]. В табл. 1 приведены значения энергий и интенсивности γ -переходов, а также периоды полураспадов изотопов, соответствующих определенным продуктам ядерных реакций.

На рис. 1 представлен характерный γ -спектр, полученный при измерении наведенной активности в одной из Au-мишеней. Расчет сечений образования продуктов ядерных реакций по отдельному каналу проводился по формуле

$$\sigma = \frac{S\lambda}{IN\varepsilon I_\gamma (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})},$$

где S — площадь под фотопиком; λ — постоянная радиоактивного распада; I — интенсивность падающего потока частиц (част. $\cdot \text{с}^{-1}$); N — число ядер мишени (атомов/см²); ε — эффективность регистрации γ -квантов; I_γ — интенсивность измеряемого γ -перехода (%); t_1 — время облучения образца; t_2 — время, прошедшее с конца облучения образца до начала измерения; t_3 — время измерения образца.

В случае наличия вклада от радиоактивного предшественника (соседней изобары или распада с изомерного уровня) независимые сечения образования в основном состоянии рассчитывались по формуле

$$\sigma_d = \frac{\left(\frac{S}{IN\varepsilon I_\gamma} - k_{br} \sigma_p A \right) \lambda_d}{(1 - e^{-\lambda_d t_1}) e^{-\lambda_d t_2} (1 - e^{-\lambda_d t_3})},$$

$$A = \frac{\lambda_p \lambda_d}{\lambda_d - \lambda_p} \left[\frac{(1 - e^{-\lambda_p t_1})}{\lambda_p^2} e^{-\lambda_p t_2} (1 - e^{-\lambda_p t_3}) - \frac{(1 - e^{-\lambda_d t_1})}{\lambda_d^2} e^{-\lambda_d t_2} (1 - e^{-\lambda_d t_3}) \right],$$

где σ_p , σ_d — сечения образования родительского (изомерного) и дочернего (основного) состояния соответственно; λ_p , λ_d — их постоянные распада; k_{br} — коэффициент ветвления в данной схеме распада.

Таблица 1. Значения энергий, периодов полураспада, спинов и интенсивностей γ -переходов некоторых изотопов Au, Hg и Tl [11]

Наблюдаемый изотоп	$T_{1/2}$, ч	J^π	E_γ , кэВ	I_γ , %
^{199g}Tl	7,42	$1/2^+$	247,26	9,3
^{198g}Tl	5,3	2^-	675,8	10,9
^{198m}Tl	1,87	7^+	1200,6 282,8 587,2	9,7 27 54,2
^{197g}Tl	2,84	$1/2^+$	152,22	7,3
^{196g}Tl	1,84	2^-	344,9	2
^{195g}Tl	1,16	$1/2^+$	563,52	11
^{195m}Tl	1,41	$9/2^-$	695,2	41
^{194g}Tl	0,55	2^-	645,2	12
^{194m}Tl	0,547	7^+	748,9	76
^{193g}Tl	0,36	$1/2^+$	324,7	100
^{198g}Au	64,68	2^-	411,802	95,62
^{198m}Au	54,53	12^-	180,31 204,10 214,84	49 40,8 77
^{196g}Au	148,0	2^-	355,73	87
$^{196m2}\text{Au}$	9,6	12^-	147,81 168,37 188,27	43,5 7,6 37,4
^{194g}Au	38,02	1^-	328,464	60,4
^{193g}Au	17,65	$3/2^+$	186,17	9,4
^{192g}Au	4,94	1^-	316,5	58
^{197m}Hg	23,8	$13/2^+$	133,98	33,5
^{195g}Hg	9,9	$1/2^-$	779,8	7
^{195m}Hg	41,6	$13/2^+$	261,75	31
^{193g}Hg	3,8	$3/2^-$	381,6	16
^{193m}Hg	11,8	$13/2^+$	257,99	49
^{192g}Hg	4,85	0^+	274,8	52

Статистические ошибки рассчитанных значений сечений образования складывались из точности определения площади пиков в γ -спектрах с вычитанием фона (в среднем $\sim 10\%$), неопределенности при расчете энергии падающего пучка ($\sim 2\%$), эффективности детектора ($\sim 5\%$) и возможной неточности некоторых табличных данных. Среди γ -излучателей были выделены продукты полного слияния ^6He с ядрами ^{197}Au с последующим испарением нейтронов — изотопы $^{193-199}\text{Tl}$. В спектрах также были идентифицированы изотопы $^{192-197}\text{Hg}$ и $^{194,196}\text{Au}$, образовавшиеся в реакциях с испарением заряженных частиц, а также в процессах неполного слияния ядер и при передаче нуклонов

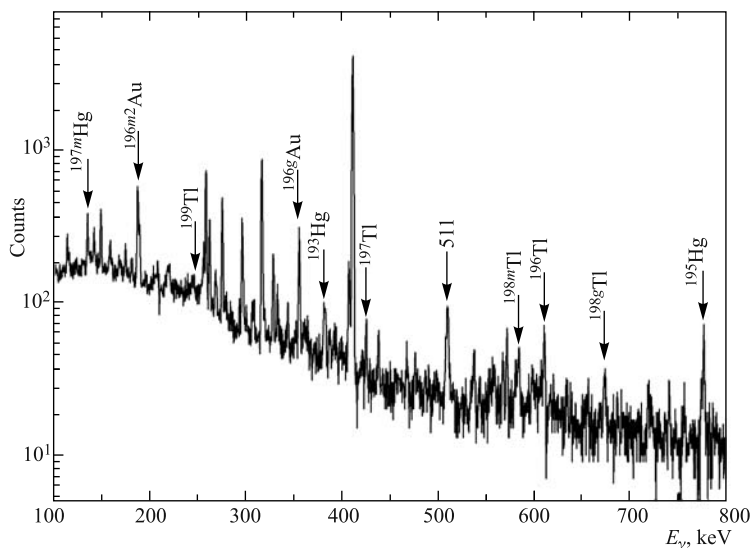


Рис. 1. Фрагмент γ -спектра, полученного при измерении в течение 2 ч наведенной активности в Au-мишени толщиной 12 мкм, облученной пучком ${}^6\text{He}$ с энергией 95 МэВ, спустя 8 ч после окончания облучения

при прямых взаимодействиях. Изотопы ${}^{193}\text{Tl}$ и ${}^{197}\text{Tl}$ могли образоваться только при испарении нейтронов из составного ядра, а в образование изотопов ${}^{197,195}\text{Hg}$ может вноситься дополнительный вклад от распада радиоактивных предшественников ${}^{197,195}\text{Tl}$. Следует отметить, что изотопы ${}^{197,195}\text{Hg}$ наблюдались в основном и изомерном состояниях. Сечение образования ${}^{197g}\text{Hg}$ не определялось ввиду низкой интенсивности гамма-перехода (0,49 %) с энергией 191,4 кэВ. Продукты реакций с образованием ${}^{192}\text{Hg}$ представляют кумулятивный выход, так как могут содержать продукты радиоактивных предшественников ${}^{192(m+g)}\text{Tl}$, которые в настоящей работе не определялись ($T_{1/2} \sim 10$ мин).

В суммарный выход изотопа ${}^{193m}\text{Hg}$ мог вноситься вклад от распада ${}^{193m}\text{Tl}$, который также не измерялся в настоящей работе ввиду относительно короткого периода полураспада ($T_{1/2} \sim 2$ мин), поэтому сечение для ${}^{193m}\text{Hg}$ приведено для кумулятивного выхода (sum). Изотоп ${}^{193g}\text{Hg}$ также не определяется независимым образом, так как содержит вклады от распадов ${}^{193g}\text{Tl}$ и ${}^{193m}\text{Hg}$. Наличие двух радиоактивных предшественников вносит большую неопределенность в расчеты и не позволяет определить непосредственно сечение образования ${}^{193g}\text{Hg}$.

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Образование изотопов ${}^{194-196}\text{Tl}$. Для компаунд-ядер с массовым числом вблизи $A = 200$ каналы с испарением нейтронов являются доминирующими. Кулоновский барьер, препятствующий вылету заряженных частиц, и барьер деления достаточно большие, чтобы эти процессы могли конкурировать с испарением нейтронов. Поэтому можно ожидать, что исследование xn -каналов в широком диапазоне энергий ионов ${}^6\text{He}$ даст важную информацию о механизме слияния ядер ${}^6\text{He}$ и золота.

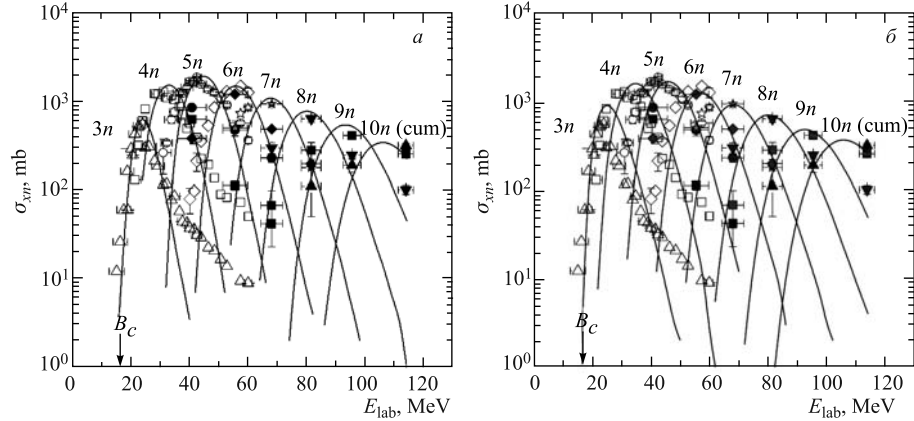


Рис. 2. Функции возбуждения реакций $^{197}\text{Au}(^6\text{He}, xn)^{203-xn}\text{Tl}$. Светлые символы — данные [6]; темные — данные настоящей работы; сплошные кривые — расчеты по программе ALICE [12] (а) и NRV [13] (б). B_c — кулоновский барьер

На рис. 2 приведены результаты настоящих измерений функций возбуждения для реакций полного слияния с образованием составного ядра ^{203}Tl и последующим испарением нейтронов и результаты, полученные в [6]. Сплошные и пунктирные кривые на рисунке представляют собой результаты расчетов по испарительной модели распада возбужденных ядер. Расчеты были проведены с применением кода ALICE-MP [12] и программы NRV [13]. В ALICE-MP используется потенциал Иго:

$$V_N(R) = V_0 \exp\left(\frac{r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) - R}{a}\right)$$

с параметрами $V_0 = -67,0$, $r_0 = 1,29$, $a = 0,4$. В NRV выбран вариант с потенциалом Вудса–Саксона с параметрами $V_0 = -105$, $r_0 = 1,12$ и $a = 0,75$. Используемые значения параметров являются стандартными для обоих кодов.

Систематическое затягивание высокоэнергетических ветвей экспериментальных функций возбуждения по сравнению с результатами расчетов связано с предравновесным процессом распада возбужденных ядер. Из рисунка видно, что с ростом энергии ^6He относительный вклад предравновесного распада в выход изотопов Tl растет. Хорошее совпадение с результатами расчетов экспериментальных функций возбуждения свидетельствует о том, что подавление сечения полного слияния при относительно больших энергиях возбуждения мало.

На рис. 3 приведена зависимость полного сечения реакций слияния $^6\text{He} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{203-x}\text{Tl}$, полученная путем суммирования сечений по всем каналам испарения нейтронов для каждой энергии. На том же рисунке представлены расчетные значения этих сечений, полученные по программам ALICE-MP [12] и NRV [13]. На поведение расчетных кривых при $E_{\text{lab}} > 50$ МэВ сказывается растущее с ростом энергии возбуждения составного ядра влияние делительного канала. Ускорение спада расчетных кривых при $E_{\text{lab}} > 100$ МэВ связано с тем, что в сумму по нейтронным каналам не включается канал $11n$, который не измерялся. Из сравнения расчетов с экспериментальными данными видно, что заметного подавления полного слияния не наблюдается.

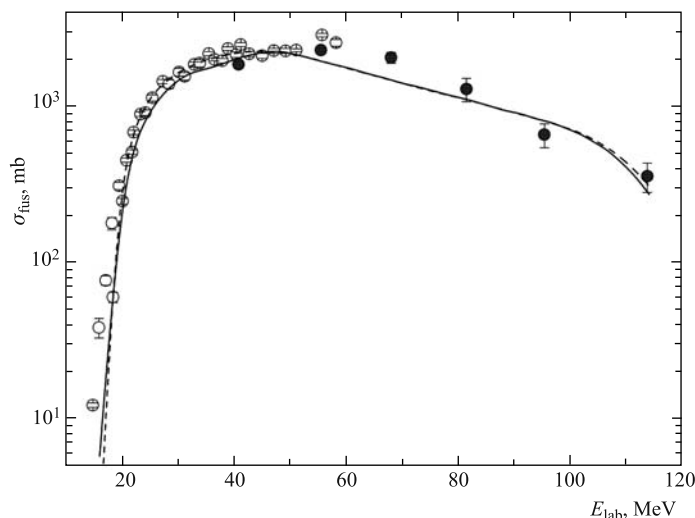


Рис. 3. Энергетическая зависимость сечений образования продуктов испарения нейтронов из составного ядра ^{203}Tl при взаимодействии $^6\text{He} + ^{197}\text{Au}$. Сплошная и штриховая кривые — результаты расчетов по программам ALICE-MP и NRV соответственно

2.2. Образование изотопов $^{194,196}\text{Au}$. На рис.4 представлены функции возбуждения образования изотопов ^{194}Au и ^{196}Au в реакции $^6\text{He} + ^{197}\text{Au}$. Слабо меняющаяся энергетическая зависимость сечений образования изотопов ^{194}Au и ^{196}Au указывает на доминирующий вклад прямых процессов в этих реакциях.

Механизм образования ^{196}Au до энергий $^6\text{He} \sim 60$ МэВ соответствует следующим каналам реакции:

— неупругое рассеяние ^6He с возбуждением ^{197}Au и последующим испарением нейтрона;

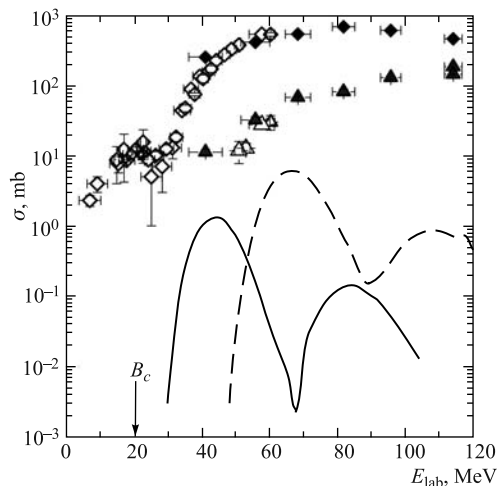


Рис. 4. Сечения образования изотопов ^{196}Au (ромбы) и ^{194}Au (треугольники) в реакции $^{197}\text{Au} + ^6\text{He}$. Светлые символы — данные [6]; темные — данные настоящей работы. Сплошная и штриховая кривые — соответствующие расчеты по программе ALICE-MP

— испарение двух протонов и шести нейтронов из ядра ^{203}Tl . Но вероятность такого процесса мала, так как высокий кулоновский барьер уменьшает вероятность вылета заряженных частиц;

— испускание заряженных кластеров, таких как d - и α -частицы, с последующим испарением нуклонов. Вероятность такого процесса также мала по той же причине;

— испарение 2–5 нейтронов из ядер ^{198}Au и ^{199}Au , образованных с достаточной энергией возбуждения, при передаче одного или двух нейтронов от ^6He ядру мишени ^{197}Au .

Функция возбуждения с образованием изотопа ^{194}Au в области энергий выше кулоновского барьера также монотонно растет с выходом на плато. Слабое изменение энергетической зависимости сечений образования ядра-остатка ^{194}Au указывает на механизм, отличный от слияния взаимодействующих ядер.

В целом, форма функции возбуждения ^{194}Au повторяет энергетическую зависимость реакции с образованием ^{196}Au , хотя по абсолютной величине значения сечений реакций существенно различаются. Это позволяет сделать вывод о том, что основную роль в этих реакциях играет один и тот же механизм. Расчеты по программе NRV дают для максимума функции возбуждения реакции ($^6\text{He}, \alpha 3n$), соответствующего энергии пучка 48 МэВ, значение 10,1 мб, а для реакции ($^6\text{He}, \alpha 5n$) 37,4 мб при энергии 68 МэВ. Экспериментальные значения сечений при этих энергиях отличаются от расчетных больше чем в 40 раз в первом случае и вдвое во втором. Расчеты по ALICE-MP (рис. 4) дают еще меньшие значения: 1,05 мб для реакции ($\alpha 3n$) и 6 мб для реакции ($\alpha 5n$). Это можно объяснить основным вкладом при образовании ^{194}Au и ^{196}Au прямых реакций с выбиванием нейтронов.

Реакции с образованием изотопов ^{194}Au и ^{196}Au ранее исследовались на пучках α -частиц [14, 15] и дейтронов [16, 17]. И в том и в другом случае поведение функций возбуждения образования изотопов Au имеет монотонный вид, качественно похожий на поведение аналогичных величин в реакциях с ^6He (рис. 5), что может также служить указанием на основной вклад в образование этих изотопов прямых реакций.

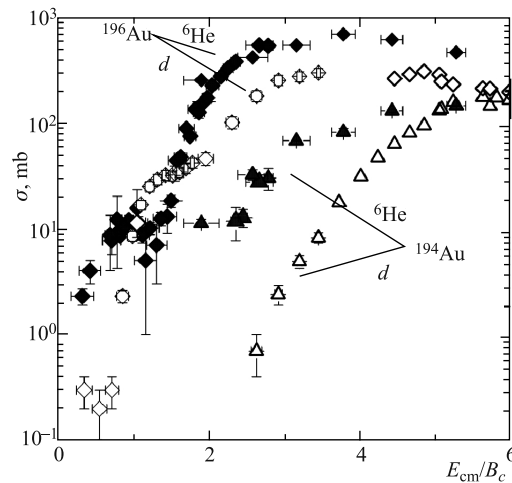


Рис. 5. Сечения образования ^{196}Au и ^{194}Au в реакциях $^6\text{He} + ^{197}\text{Au}$ (настоящая работа и [6]) и $d + ^{197}\text{Au}$ [16]

При сравнении сечений реакций ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$ с образованием ${}^{194}\text{Au}$ и ${}^{196}\text{Au}$ с данными реакций $d + {}^{197}\text{Au}$ видно, что сечения образования этих изотопов в реакции ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$ выше, чем в реакции с дейтронами. С ростом энергии ${}^6\text{He}$ различие в величине сечений образования изотопов золота становится меньше, что может также служить указанием на основной вклад в образование этих изотопов прямых реакций.

3. ОБРАЗОВАНИЕ ИЗОТОПОВ Hg

В настоящей работе наблюдались изотопы ${}^{192}\text{Hg}$, ${}^{193m}\text{Hg}$, ${}^{195(m+g)}\text{Hg}$ и ${}^{197m}\text{Hg}$. На рис. 6 приведены функции возбуждения реакций с образованием этих продуктов. Из рисунка видно, что функции возбуждения слабо меняются с ростом энергии ${}^6\text{He}$. Отсутствие ярко выраженных максимумов в энергетической зависимости сечений образования ${}^{195(m+g)}\text{Hg}$ и ${}^{197m}\text{Hg}$ может служить отражением конкурирующего вклада процессов с испарением большего числа нуклонов. По абсолютной величине сечения образования изотопов ${}^{195(m+g)}\text{Hg}$ и ${}^{197m}\text{Hg}$ значительно превосходят расчетные значения по программе ALICE-MP.

При энергиях бомбардирующих частиц ниже пороговых значений конкретных каналов реакций (см. табл. 2) необходимо учитывать вклад в сечения образования изотопов Hg процессов, сопровождающихся вылетом легких ядер-кластеров, что может уменьшить экспериментальные пороги этих реакций. К числу каналов, которые могут давать вклад в образование указанных выше изотопов Hg, относятся:

- полное слияние с последующим испарением нейтронов и протонов;
- неполное слияние с вылетом дейтронов и последующим испарением из нового составного ядра нейтронов;
- неупругое рассеяние бомбардирующего ядра или продуктов его распада с возбуждением ядра-остатка.

Рис. 6. Сечения образования изотопов Hg в реакции ${}^6\text{He} + {}^{197}\text{Au}$ (квадраты — ${}^{197m}\text{Hg}$, кружки — ${}^{195(m+g)}\text{Hg}$, ромбы — ${}^{193m}\text{Hg}$, треугольники — ${}^{192}\text{Hg}$ (кумулятивный выход)). Расчетные значения по программе ALICE-MP представлены кривыми: сплошная — ${}^{197m}\text{Hg}$, штриховая — ${}^{195(m+g)}\text{Hg}$, штрихпунктирная — ${}^{193m}\text{Hg}$, пунктирная — ${}^{192}\text{Hg}$ (кумулятивный выход)

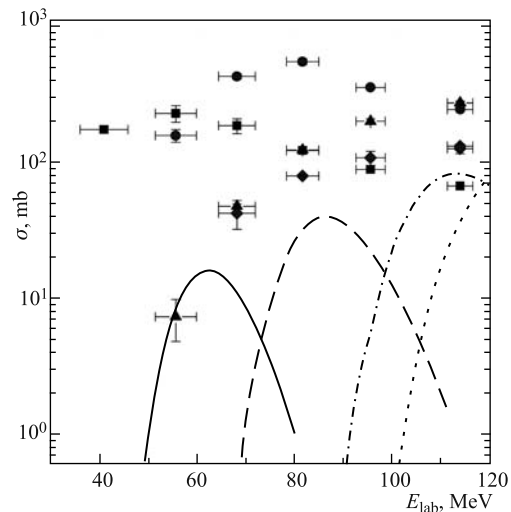


Таблица 2. Каналы реакций $^{197}\text{Au}(^6\text{He},X)^{196,194}\text{Au}$ и $^{197}\text{Au}(^6\text{He},X)^{192-197}\text{Hg}$

Продукт	Реакция	Порог, МэВ
^{194}Au	$\rightarrow ^{194}\text{Au} + 2p + 7n$	52,36
	$\rightarrow ^{194}\text{Au} + ^4\text{He} + 5n$	24,1
	$\rightarrow ^{194}\text{Au} + ^6\text{He} + 3n$	23,1
^{196}Au	$\rightarrow ^{196}\text{Au} + 2p + 5n$	37,34
	$\rightarrow ^{196}\text{Au} + ^4\text{He} + 3n$	9,044
^{197}Hg	$\rightarrow ^{197}\text{Hg} + p + 5n$	31,6
	$\rightarrow ^{197}\text{Hg} + d + 4n$	29,3
	$\rightarrow ^{197}\text{Hg} + ^3\text{H} + 3n$	22,85
^{195}Hg	$\rightarrow ^{195}\text{Hg} + p + 7n$	47,75
	$\rightarrow ^{195}\text{Hg} + d + 6n$	45,5
	$\rightarrow ^{195}\text{Hg} + ^3\text{H} + 5n$	39
^{193}Hg	$\rightarrow ^{193}\text{Hg} + p + 9n$	64,3
	$\rightarrow ^{193}\text{Hg} + d + 8n$	62,04
	$\rightarrow ^{193}\text{Hg} + ^3\text{H} + 7n$	55,6
^{192}Hg	$\rightarrow ^{192}\text{Hg} + p + 10n$	—
	$\rightarrow ^{192}\text{Hg} + d + 9n$	69,34
	$\rightarrow ^{192}\text{Hg} + ^3\text{H} + 8n$	62,9

Вид измеренных функций возбуждения с образованием изотопов Hg указывает на то, что эти изотопы как в основном, так и изомерном состояниях могли образоваться не только в реакциях полного и неполного слияния, но и в прямых реакциях с возможной передачей кластеров (d или α) и последующим снятием возбуждения за счет испарения частиц.

Для изотопа ^{195}Hg были измерены функции возбуждения в основном и изомерном состояниях (рис. 7).

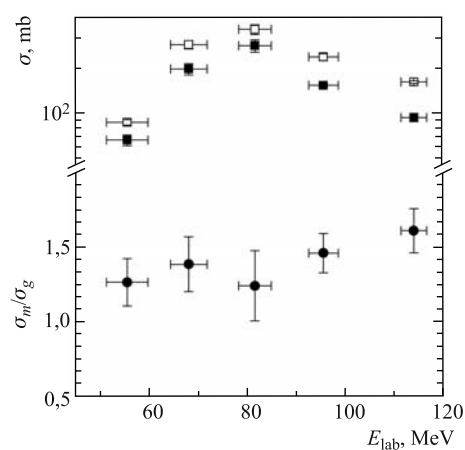


Рис. 7. Зависимость сечения образования изотопа ^{195}Hg в реакции $^6\text{He} + ^{197}\text{Au}$ (светлые квадраты — ^{195m}Hg , темные квадраты — ^{195g}Hg) и изомерного отношения (темные кружки — $^{195m}\text{Hg}/^{195g}\text{Hg}$) от энергии ^6He

4. ИЗОМЕРНЫЕ ОТНОШЕНИЯ

В настоящей работе были измерены зависимости сечений образования ^{196}Au в основном (2^-) и изомерном (12^-) состояниях от энергии бомбардирующих частиц ^6He (рис. 8). Из рисунка видно, что изомерное отношение ($^{196m}\text{Au}/^{196g}\text{Au}$) практически не меняется с ростом энергии в области 60–120 МэВ.

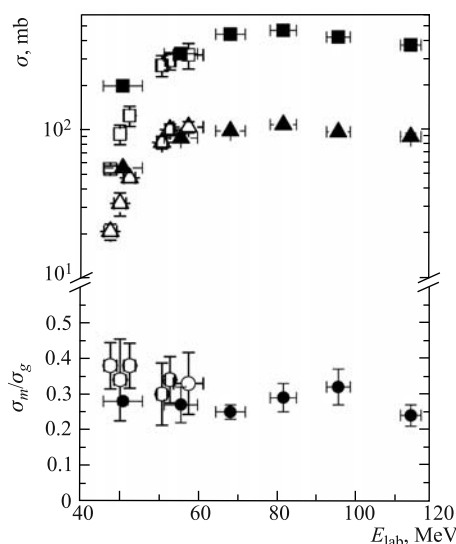


Рис. 8. Зависимость сечений образования ^{196}Au в реакции $^6\text{He}+^{197}\text{Au}$ (квадраты — ^{196g}Au , треугольники — ^{196m}Au) и изомерного отношения (кружки — $^{196m}\text{Au}/^{196g}\text{Au}$) от энергии ^6He . Светлые символы — данные работы [18], темные — результаты настоящей работы

В реакции $^6\text{He}+^{197}\text{Au}$ были определены выходы изотопа ^{195}Hg в основном ($1/2^-$) и изомерном ($13/2^+$) состояниях (см. рис. 7). Из приведенных функций возбуждения видно, что сечения образования ^{195m}Hg выше, чем ^{195g}Hg . Измерения изомерного отношения $^{195m}\text{Hg}/^{195g}\text{Hg}$ в реакции $d+^{197}\text{Au}$ [16] также дали его значения, превосходящие единицу. К сожалению, данных по изомерным отношениям для изотопов Hg, полученных в экспериментах на α -частицах, недостаточно, чтобы провести с ними такое сравнение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных о взаимодействии галоидальных ядер ^6He с ^{197}Au можно сделать следующие выводы.

- Процесс слияния с последующим испарением нейтронов достаточно хорошо описывается в рамках испарительной модели, и признаков подавления слияния со стороны конкурирующих прямых процессов до энергии 20 МэВ/нуклон не обнаружено.

• Абсолютная величина сечений образования изотопов $^{194,196}\text{Au}$ и $^{192-197}\text{Hg}$ из ^{197}Au , а также слабая энергетическая зависимость функций возбуждения от энергии ^6He указывает на определяющий вклад прямых процессов в их образование во всем исследованном диапазоне энергий ^6He (40–114 МэВ).

• Данные по сечениям реакций и сравнение с проведенными ранее измерениями в области более низких энергий [6] позволяет сделать вывод о том, что особенности ядерной структуры ^6He сильнее проявляются в области энергий вблизи кулоновского барьера реакций. В этой области энергий простая картина взаимодействия двух бесструктурных ядер не описывает всех характеристик реакции и необходимо учитывать связь каналов. С увеличением энергии ^6He характер взаимодействия в аналогичных каналах реакций качественно мало отличается от характера взаимодействия с другими легкими частицами (α и d).

Авторы выражают благодарность за обеспечение работ на пучке ^6He и помощь в работе сотрудникам и подразделениям, обслуживающим циклотрон У-400М.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (10-02-00271), а также грантом полномочного представителя Правительства Чехии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Canto L. A. et al.* Fusion and Breakup of Weakly Bound Nuclei // Phys. Rep. 2006. V. 424, No. 1. 112 p.
2. *Satchler G. R.* Introduction to Nuclear Reactions. 2nd ed. London: MacMillan Education, 1990. 318 p.
3. *Al-Khalili J. S., Tostevin J. A.* Matter Radii of Light Halo Nuclei // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76, No. 26. P. 3903–3906.
4. *Liang J. F., Signorini C.* Fusion Induced by Radioactive Ion Beams Inter // J. Mod. Phys. E. 2005. V. 14, No. 8. P. 1121–1150.
5. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* Deep Sub-Barrier Fusion Enhancement in the $^6\text{He}+^{206}\text{Pb}$ Reaction // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96, No. 16. P. 162701.
6. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* Excitation Functions of Fusion Reactions and Neutron Transfer in the Interaction of ^6He with ^{197}Au and ^{206}Pb // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 31, No. 2. P. 185–194.
7. *Zagrebaev V. I.* Sub-Barrier Fusion Enhancement Due to Neutron Transfer // Phys. Rev. C. 2003. V. 67, No. 6. P. 061601.
8. *Rodin A. M. et al.* Status of ACCULINNA Beam Line // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2003. V. 204. P. 114–118.
9. *Ziegler J. F., Biersack J. P., Ziegler M. D.* SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM code. <http://www.srim.org/>.
10. *Tarasov O. B., Bazin D.* LISE++: Radioactive Beam Production with In-Flight Separators // Nucl. Instr. Meth. B. 2008, V. 266, P. 4657–4664. URL: <http://groups.nsl.msu.edu/lise/>.
11. *Chu S. Y. F., Ekström L. P., Firestone R. B.* The Lund/LBL Nuclear Data. Search Version. 1999. URL: <http://nucldata.nuclear.lu.se/nucldata/toi/>.
12. *Muzychka Yu. A., Pustyl'nik B. I.* A Study of Cluster Emission from Excited Compound Nuclei // Phys. At. Nucl. 1987. V. 45, No. 1. P. 90–96.
13. Nuclear Reaction Video Project. URL: <http://nrv.jinr.ru/nrv>.

14. Kurz H. E. et al. Measurement and Equilibrium Statistical-Model Calculation of Excitation Functions of the $^{197}\text{Au}(\alpha, xn)$ Reactions in the Energy Range from 16 to 103 MeV // Nucl. Phys. A. 1971. V. 168, No. 1. P. 129–138.
15. Lanzafame F. M., Blann M. Reactions of ^{197}Au with 19 to 100 MeV ^4He Ions: Equilibrium Statistical Model Analyses // Nucl. Phys. A. 1970. V. 142, No. 3. P. 545–558.
16. Jahn P. et al. Measurement and Interpretation of $^{197}\text{Au}(d, xny\gamma)$ Excitation Functions in the Energy Range from 25 to 86 MeV // Nucl. Phys. A. 1973. V. 209, No. 2. P. 333–347.
17. Chevarier N. et al. Réactions Induites sur l'or par des deutons de 10 á 70 MeV // J. de Physique. 1971. T. 32. P. 483–490.
18. Kulko A. A. et al. Isomeric Ratios for and from Fusion and Transfer in the Interaction of ^6He with ^{197}Au // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2007. V. 34, No. 11. P. 2297–2306.

Получено 17 августа 2012 г.