

ЗАСЕЛЕНИЕ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ В ЯДРАХ ^{45}Ti В ЗАРЯДОВО-ОБМЕННЫХ РЕАКЦИЯХ НА ПУЧКЕ ^3He С ЭНЕРГИЕЙ 29 МэВ

Н. К. Скобелев^{1,*}, *Ю. Э. Пенионжкевич*^{1,2},
И. Сивачек^{1,3}, *Т. Исатаев*^{1,4}, *Дж. Д'Агата*³, *В. Бурьян*³,
*А. И. Килиц*³, *Я. Мразек*³, *В. Глаголев*³

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³ Институт ядерной физики Академии наук Чешской Республики, Ржеж, Чехия

⁴ Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Нур-Султан

Проведено исследование зарядово-обменной реакции ($^3\text{He}, t$) на нечетных ядрах — мишенях ^{45}Sc и ^{197}Au при энергии пучка ^3He 29 МэВ. Изучены угловые распределения вылета дейтронов и трития в реакциях $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$ и $^{197}\text{Au}(^3\text{He}, t)^{197}\text{Hg}$. Эксперименты показали, что максимальные значения сечений этих реакций с вылетом трития достигаются при углах, близких к углу грейзинга. Это свидетельствует о периферийном характере реакций зарядового обмена. Для реакции $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$ детально измерены угловые дифференциальные сечения вылета тритонов при заселении в ядрах ^{45}Ti основного и возбужденных состояний.

The charge-exchange reaction ($^3\text{He}, t$) was studied on odd target nuclei ^{45}Sc and ^{197}Au at ^3He beam energy of 29 MeV. The angular distributions of emission of deuterons and tritons in the reactions $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$ and $^{197}\text{Au}(^3\text{He}, t)^{197}\text{Hg}$ were studied. Experiments have shown that the maximum values of the cross sections for these reactions with the emission of triton are achieved at angles close to the grazing angle. This gives evidence on the peripheral nature of the charge-exchange reactions. The angular differential cross sections for the emission of tritons were measured in detail for the reaction $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$ when the ground and excited states in the ^{45}Ti nucleus are populated.

PACS: 25.55–e; 25.55.Kr

ВВЕДЕНИЕ

Процессы перезарядки нуклонов при взаимодействии ядер занимают особое место в ядерной физике. Исследование реакции перезарядки, как и любой ядерной реакции, направлено на изучение механизма реакции и структуры взаимодействующих ядер. Впервые процессы зарядового

* E-mail: skobelev@jinr.ru

обмена были выявлены в слабых взаимодействиях, а именно, в β -распаде. Позже эти процессы начали изучать в (p, n) -реакциях.

Изучение реакции перезарядки (p, n) дало обширную информацию о механизме этой реакции и изучении заселения в атомных ядрах изобарно-аналоговых состояний. Зарядово-обменная реакция $({}^3\text{He}, t)$ имеет одно важное преимущество. В ней проще контролировать входящие $({}^3\text{He})$ и идентифицировать вылетающие (t) частицы, чем нейтроны в реакции (p, n) .

Установлено, что сечения реакций $({}^3\text{He}, t)$ на порядок меньше сечений (p, n) . Это связано с тем, что реакции слияния с ${}^3\text{He}$, идущие по другим выходным каналам, ограничивают реакцию $({}^3\text{He}, t)$. Реакции слияния с ${}^3\text{He}$ и испарением трития и двухступенчатые реакции типа ${}^3\text{He}-d-t$ и ${}^3\text{He}-\alpha-t$ хотя и могут вносить вклады в суммарное сечение реакции $({}^3\text{He}, t)$, однако следует ожидать, что они значительно слабее, чем наблюдаемые сечения прямых двухтельных $({}^3\text{He}, t)$ -реакций, протекающих при взаимодействии периферийных нуклонов, находящихся на поверхности ядер. Поэтому зарядово-обменная реакция $({}^3\text{He}, t)$ должна иметь энергетические и угловые распределения, чувствительные к прицельному параметру сталкивающихся ядер, в конечном итоге, к переданному в их взаимодействии угловому моменту.

Полученные данные при низких энергиях ${}^3\text{He}$ дают ценную спектроскопическую информацию о заселении уровней с определенными значениями спина и четности, а получаемые в реакции угловые распределения трития должны стимулировать дальнейшие теоретические работы по описанию механизма самих зарядово-обменных реакций.

Ранее в основном изучались реакции $({}^3\text{He}, t)$ на ядрах с четной массой [1, 2]. Это связано с тем, что взаимодействие с четно-четными ядрами легче поддавалось теоретической трактовке.

Поэтому в литературе значительно меньше экспериментальных данных по изучению реакций $({}^3\text{He}, t)$ на нечетных ядрах при низкой энергии.

Ранее на циклотроне У-120М в Институте ядерной физики Академии наук Чешской Республики в Ржеже (ИЯФ АН ЧР) нами были измерены полные сечения реакций на нечетных ядрах ${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, t){}^{45}\text{Ti}$ [3], ${}^{194}\text{Pt}({}^3\text{He}, t){}^{194}\text{Au}$ и ${}^{197}\text{Au}({}^3\text{He}, t){}^{197}\text{Hg}$ [4]. В связи с относительно большими сечениями этих реакций [3–5] мы продолжили в этой работе дальнейшее изучение двух зарядово-обменных реакций ${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, t){}^{45}\text{Ti}$ и ${}^{197}\text{Au}({}^3\text{He}, t){}^{197}\text{Hg}$. В данной работе для уточнения механизма образования изотопов ${}^{45}\text{Ti}$ и ${}^{197}\text{Hg}$ были проведены прямые измерения одного из продуктов реакций зарядового обмена — трития.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты были выполнены на выведенном пучке ${}^3\text{He}$ циклотрона У-120М ИЯФ АН ЧР в Ржеже. На пути пучка ${}^3\text{He}$ с энер-

гией 29 МэВ в центре реакционной камеры устанавливались тонкие самоподдерживающиеся мишени из Sc и Au. Скандиевые металлические фольги (чистотой не хуже 99%) были приготовлены толщиной $\sim 1,7$ мкм. В экспериментах в качестве Au-мишеней использовалось металлическое «сусальное» золото толщиной ~ 190 мкг/см². В данных экспериментах использовались интенсивности пучков ^3He до 10 рпА. Для мониторинга пучка ^3He на выходе реакционной камеры был установлен цилиндр Фарадея. Продукты ядерных реакций регистрировались под разными углами четырьмя кремниевыми полупроводниковыми $\Delta E \times E$ -телескопами, состоящими из ΔE -детекторов толщиной ~ 500 мкм и E -детекторов толщиной 5 мм. $\Delta E \times E$ -телескопы располагались на расстоянии 175 мм от мишени. Калибровка ΔE -детекторов проводилась с помощью спектроскопического источника α -частиц $^{238}\text{Pu} + ^{244}\text{Cm}$. Калибровки сборок всех $\Delta E \times E$ -телескопов проводились на пучке ^3He с тонкой майларовой мишенью по измерению выхода продуктов реакций ($^3\text{He}, d$), ($^3\text{He}, t$), ($^3\text{He}, ^3\text{He}$) на ядрах ^{12}C и ^{16}O , содержащихся в мишени.

Смена мишеней и изменение положения $\Delta E \times E$ -телескопов для измерения угловых распределений продуктов реакций проводились дистанционно без нарушения вакуума в реакционной камере. Набор получаемой экспериментальной информации осуществлялся с помощью серийного дигитайзера в стандарте VME (С.А.Е.Н. модель 725). Используемая система позволяла также проводить онлайн контроль набора экспериментальных данных. Каждое зарегистрированное событие состояло из величин удельных энергетических потерь продуктов реакций в детекторах с отметкой времени регистрации. Анализ полученной экспериментальной информации осуществлялся с помощью программы ROOT (ЦЕРН).

Легкие рассеянные частицы и продукты реакций идентифицировались $\Delta E \times E$ -методом, т.е. по измеренным потерям их энергии ΔE в тонком детекторе и остаточной энергии $E_{\text{ост}}$ — в стоп- E -детекторе. Эта экспериментальная техника позволяла нам идентифицировать d , t , ^4He и рассеянные ^3He , а также определять их выход.

На рис. 1 приведен спектр возбужденных состояний в ядрах ^{45}Ti , восстановленный из энергетического спектра вылетающего трития, образовавшегося в реакции $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$.

Угловые распределения дейтронов и тритонов, образовавшиеся в реакциях $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, d) ^{46}\text{Ti}$ и $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$, имеют большую разницу в значениях сечений. Максимальные значения сечений для вылета дейтронов и тритонов в этих реакциях наблюдаются в передних углах. Однако если дифференциальные сечения вылета дейтронов практически плавно падают в диапазоне углов от 10 до 40° с 200 мб/ср до 10 мб/ср, то максимальные дифференциальные угловые сечения для тритонов значительно ниже по величине (несколько мб/мср), и они, несмотря на спад, имеют резонансную структуру. Угловые распределения трития, образовавшегося в реакции $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$, имеют различную структуру в случае заселения в ^{45}Ti основного и возбужденных состояний.

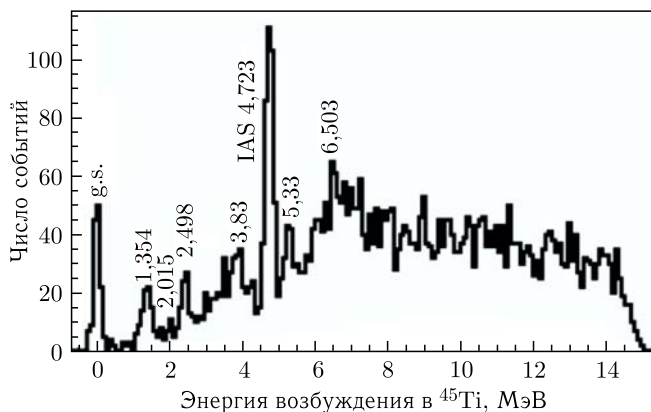


Рис. 1. Энергетический спектр возбужденных состояний в ядрах ^{45}Ti , восстановленный из спектра трития, образовавшегося в реакции $^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, t){}^{45}\text{Ti}$ и зарегистрированного под углом 15° в лабораторной системе

На рис. 2 приведено угловое распределение тритонов, сопровождающих образование в этой реакции ^{45}Ti в основном состоянии. Наблюдается практически плавное падение вылета тритонов с увеличением угла регистрации.

Угловые спектры тритонов, сопровождающих заселение в ^{45}Ti изобараналогового состояния (4,723 МэВ), имеют совсем другое распределение. Сечение вылета тритонов в передних углах растет и достигает максимума при угле грейзинга (рис. 3). Расчетный угол грейзинга для реакции $^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, t){}^{45}\text{Ti}$ с энергией ${}^3\text{He}$ 29 МэВ в лабораторной системе равен $16,2^\circ$ [6].

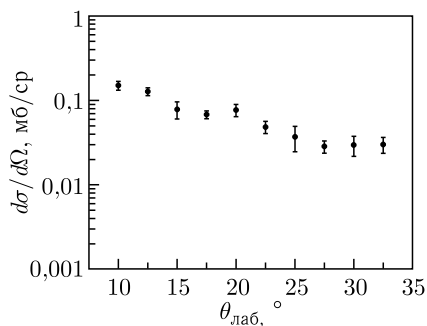


Рис. 2. Угловое распределение тритонов, сопровождающих образование ^{45}Ti в реакции $^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, t){}^{45}\text{Ti}$ в основном состоянии

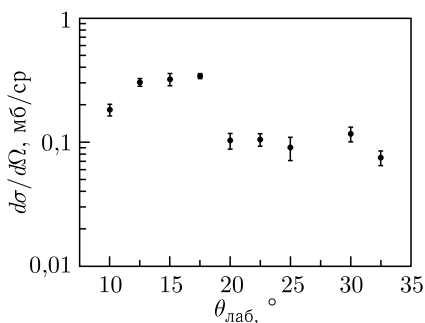


Рис. 3. Угловое распределение тритонов, сопровождающих образование в рассматриваемой реакции ^{45}Ti в изобараналоговом состоянии (4,723 МэВ)

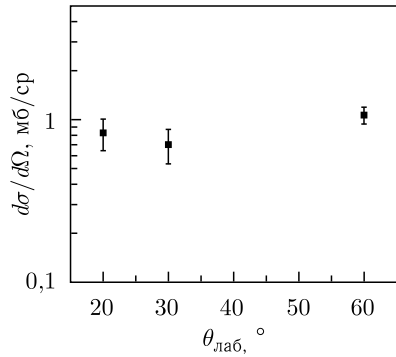


Рис. 4. Угловое распределение тритонов, полученных в реакции $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$. Точками представлены сечения, определенные для вылета тритонов при данном угле со всеми значениями энергии

Реакция $(^3\text{He}, t)$ действительно имеет различные структурированные угловые распределения трития, чувствительные к прицельному параметру взаимодействующих ядер, в конечном итоге, к переданному угловому моменту. Это приводит к различному заселению возбужденных состояний в ^{45}Ti .

Нами были также проведены эксперименты по суммарному измерению образовавшихся в реакциях $^{197}\text{Au} + ^3\text{He}$ дейтронов и тритонов, вылетающих под разными углами.

На рис. 4 показано угловое распределение тритонов, полученных в реакции $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$. Из рис. 4 видно, что максимальный выход тритонов в реакции $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$ наблюдается в задних углах, близких к углу грейзинга. Угол грейзинга для реакции $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$ с энергией ^3He 29 МэВ в лабораторной системе равен $68,8^\circ$ [6].

Отсюда следует, что зарядово-обменная реакция $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$, как и реакция на $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$, идет с большим сечением при взаимодействии ядер на расстоянии наибольшего сближения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работах [3–5] было показано, что наблюдаемые сечения реакций $(^3\text{He}, t)$ на ^{45}Sc и ^{197}Au нельзя объяснить образованием исходных продуктов в реакциях слияния. Вклад двухступенчатых реакций передач, как правило, также имеет малые сечения. В реакциях передачи нуклонов и кластеров, связанных с перестройкой в нем частиц и изменением зарядов ядер, происходит возбуждение ядра-остатка, энергию которого можно оценить [7]. На рис. 5 приведена зависимость интегральных сечений ранее изученных реакций зарядового обмена [3, 4] от эффективной энергии возбуждения $Q_{\text{эф}}$ [5, 7].

Из рисунка видно, что сечения реакций зарядового обмена линейно связаны с эффективной энергией возбуждения $Q_{\text{эф}}$ в выходном канале реакций с образованием ядер Ti, Au и Hg. Энергетические спектры

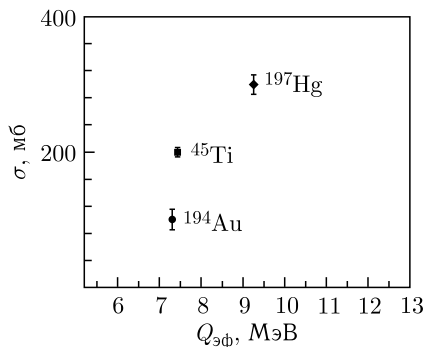


Рис. 5. Зависимость сечений образования ^{45}Ti [3], ^{194}Au [4] и ^{197}Hg [4] от расчетной эффективной энергии возбуждения $Q_{эф}$ [7] в выходных каналах реакций: $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$, $^{194}\text{Pt} (^3\text{He}, t) ^{194}\text{Au}$ и $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$ при энергии ^3He 20 МэВ в с. ц. м.

возбужденных состояний в ядрах ^{45}Ti (см. рис. 1) не противоречат этим оценкам энергии возбуждения.

Из сравнения угловых распределений продуктов реакций с ^3He можно заключить, что имеет место различное заселение возбужденных состояний ядер-остатков при взаимодействии ядер мишени и снаряда с разными прицельными параметрами. Изобар-аналоговые состояния с большей вероятностью заселяются во взаимодействиях при наибольшем сближении ядер (о чем свидетельствуют максимальные дифференциальные сечения вылета трития под углами, близкими к углу грейзинга).

В экспериментах также показано, что зарядово-обменная реакция $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$ идет преимущественно при взаимодействиях ядер на расстоянии наибольшего сближения. Эти эксперименты по изучению реакции $(^3\text{He}, t)$ на мишени из Au планируется продолжить, чтобы набрать большую статистику для анализа экспериментальных данных, относящихся к энергетическим распределениям вылета тритонов под разными углами для дальнейшего исследования механизма зарядово-обменных реакций и заселения различных возбужденных состояний на тяжелых нечетных ядрах мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что интегральные сечения зарядово-обменных реакций $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$, $^{194}\text{Pt} (^3\text{He}, t) ^{194}\text{Au}$ и $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$ увеличиваются с ростом энергии $Q_{эф}$.

Впервые были измерены энергетические спектры и угловые распределения тритонов в зарядово-обменной реакции $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$.

В результате анализа экспериментальных данных по энергетическим и угловым распределениям тритонов в реакции $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, t) ^{45}\text{Ti}$ показано, что различные возбужденные состояния заселяются по-разному:

- основное состояние заселяется в продуктах реакции при относительно дальних взаимодействиях;
- изобар-аналоговое состояние заселяется при взаимодействиях ядер на расстоянии наибольшего сближения, определяемого углом грейзинга.

В реакции $^{197}\text{Au} (^3\text{He}, t) ^{197}\text{Hg}$ образование ^{197}Hg идет с наибольшим сечением при взаимодействии с ^{197}Au с ^3He под углом, близким к углу грейзинга.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников службы циклотрона У-120М (ИЯФ АН ЧР, Ржеж, Чехия) за обеспечение бесперебойной работы во время эксперимента. Авторы признательны И. Н. Изосимову, С. М. Лукьянову, В. В. Самарину и М. А. Науменко за плодотворную дискуссию по зарядово-обменным реакциям.

Работа выполнена при финансовой поддержке в 2020 г. грантом Полномочного Представителя Правительства Чешской Республики в ОИЯИ (отв. И. Сивачек) и грантом Чешской Республики и ОИЯИ «3 + 3» (отв. Ю. Э. Пенионжкевич и В. Бурьян).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Becchetti F. D., Dehnhard D., Dzubay T. G.* Coulomb Displacement Energies for $1f-2p$ Shell Nuclei // *Nucl. Phys. A.* 1971. V. 168. P. 151–176.
2. *Janecke J., Aarts H. L., Drentje A. G., Harakeh M. N., Gaarde C.* Isobaric Analog States in Rare-Earth Nuclei Studied with the $(^3\text{He}, t)$ Charge-Exchange Reaction at $\Theta_L = 0^\circ$ // *Nucl. Phys. A.* 1983. V. 394. P. 39–59.
3. *Скобелев Н. К., Кулько А. А., Пенионжкевич Ю. Э. и др.* Сечения образования изотопов ^{43}Sc , ^{44}Sc и ^{46}Sc в реакции $^{45}\text{Sc} + ^3\text{He}$ // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2013. Т. 77, № 7. С. 878–882;
Skobelev N. K., Kulko A. A., Penionzhkevich Yu. E. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2013. V. 77. P. 795–799.
4. *Скобелев Н. К., Пенионжкевич Ю. Э., Воскобойник Е. И. и др.* Сечения реакций слияния и передачи при взаимодействии Pt и ^{197}Au с ^3He при энергии 10–24,5 МэВ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11, № 2(186). С. 198–208;
Skobelev N. K., Penionzhkevich Yu. E., Voskoboinik E. I. et al. // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11. P. 114–120.
5. *Скобелев Н. К., Пенионжкевич Ю. Э., Бурьян В., Мразек Я.* Зарядово-обменные реакции на пучках низкоэнергетических частиц // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84, № 4. С. 548–552;
Skobelev N. K. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2020. V. 84, No. 4. P. 425–429.
6. *Zagrebaev V. I., Denikin A. S., Karpov A. V., Alekseev A. P., Naumenko M. A., Rachkov V. A., Samarin V. V., Saiko V. V.* NRv Web Knowledge Base on Low-Energy Nuclear Physics. <http://nr.v.jinr.ru/nrv/>.
7. *Скобелев Н. К.* Влияние механизмов ядерных реакций на заселение возбужденных ядерных состояний и изомерные отношения // *ЯФ.* 2016. Т. 79, № 4. С. 347–355;
Skobelev N. K. // *Phys. Atom. Nucl.* 2016. V. 79, No. 4. P. 534–542.