

*Технические науки*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД  
ИЗМЕРЕНИЯ СЕЧЕНИЯ УПРУГОГО  
РАССЕЯНИЯ ЛЕГКИХ ЯДЕР НА АТОМАХ  
МИШЕНЕЙ ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО  
БАРЬЕРА НА ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-60**

<sup>1,2</sup>Буртебаев Н., <sup>2</sup>Морзабаев А.К., <sup>1,2</sup>Иванов И.А.,  
<sup>1,2</sup>Амангельды Н., <sup>3</sup>Келли Н.

<sup>1</sup>Институт ядерной физики, Астана;  
<sup>2</sup>Евразийский национальный университет  
им. Л.Н. Гумилева, Астана,  
e-mail: morz\_r@rambler.ru;

<sup>3</sup>Институт ядерных исследований  
им. А. Солтан, Варшава

В данной статье описывается экспериментальный метод измерения сечения упругого рассеяния легких ядер на атомах мишеней, развитый на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60, Астана, Казахстан. В рамках данной методики измерены сечения упругого рассеяния ядер  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  др на атомах мишеней вблизи кулоновского барьера [1].

**Введение.** Эксперименты на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Аф ИЯФ, г. Астана, Казахстан) по ядерной физике ориентированы, прежде всего, на получение недостающей информации о межъядерных потенциалах взаимодействия на больших расстояниях – на периферии ядра. От значений потенциала в этой области сильно зависят сечение ядерных реакций, протекающих как в высокотемпературной плазме, так и в звездах.

Полученные сечения ядерных реакций и параметры потенциалов взаимодействия для тяжелых ионов могут существенно дополнить банк мировых ядерных данных, поскольку в настоящее время в силу различных обстоятельств эксперименты по исследованию взаимодействия тяжелых ионов в области кулоновского барьера почти не проводятся – ускорители соответствующего класса в основном используются в прикладных целях.

Одной из основных проблем современной ядерной физики является определение характеристик ядерно-ядерного взаимодействия. Знание природы формирования и параметров межъядерного потенциала взаимодействия необходимо для расчета сечений всевозможных ядерных реакций и структурных характеристик сталкивающихся ядерных систем. При энергии в диапазоне 0,4–1,75 МэВ/нуклон взаимодействие сравнительно легких ядер, таких как углерод и кислород, будет происходить вблизи или ниже кулоновского барьера [2–5]. Кулоновское отталкивание препятствует глубокому перекрытию сталкивающихся ядер и взаимодействие носит, в основном, поверхностный характер и определяется поведением межъядерного по-

тенциала на расстояниях порядка суммы радиусов сталкивающихся систем. В этих условиях помимо упругого рассеяния доминируют квазиупругие процессы, приводящие к состояниям сравнительно простой структуры без глубокой перестройки ядерных систем. Это могут быть как вращательные и колебательные состояния, возбуждающиеся в неупругом рассеянии, так и одночастичные и кластерные состояния, заселяемые в реакциях передачи нуклонов или кластера.

С целью уточнения механизма передачи кластерных конфигураций в процессах рассеяния запланировано изучение механизмов формирования сечений упругого рассеяния при энергиях вблизи кулоновского барьера на системах  $^{13}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ ,  $^{13}\text{C} + ^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C} + ^{16}\text{O}$ , имеющих ярко выраженную нейтронно-кластерную структуру. Такая информация в дальнейшем может существенно прояснить динамику формирования сечений упругого рассеяния ионов углерода на ядрах 1р-оболочки.

**Методика эксперимента  
и результаты измерений**

Пучок ускоренных ионов получается на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 [6]. Циклотрон ДЦ-60 представляет собой дуальный циклотрон, который способен ускорять заряженные частицы до кинетической энергии рассчитанной в МэВ/нуклон, выраженной следующим соотношением:  $E = 60(z_i/A)^2$ , где  $z_i$  – зарядность иона, который ускоряется,  $A$  – атомный вес иона. Соотношение  $(z_i/A)$  в формуле должно лежать в следующих пределах:  $(z_i/A) = (1/6...1/12)$ , что накладывает зарядовые ограничения для ускоряемых частиц. Таким образом, диапазон ускоряемых ионов на циклотроне ДЦ-60 от  $^6\text{Li}$  до  $^{132}\text{Xe}$ , вариация энергии ионов в диапазоне от 0,33 до 1,75 МэВ/нуклон.

В качестве мишеней используют тонкие самонесущие пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $^{12}\text{C}$ , изготавливающиеся электрохимическим способом и ионоплазменным методом соответственно. Измерение толщин изготовленных подложек и мишеней осуществляется с использованием метода Резерфордского обратного рассеяния на протонах с энергией 1 МэВ, развитый на ускорительном комплексе УКП-2-1 ИЯФ РК [7]. Толщины мишеней обычно лежат в пределах 20–50 мкг/см<sup>2</sup> для пленок из углерода и алунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Регистрация упруго рассеянных частиц осуществляется в модифицированной экспериментальной камере NECRC43.

При следующих геометрических параметрах эксперимента: расстояние от центра мишени до детектора – 200 мм; диаметр коллиматора перед детектором – 2 мм; длина коллиматора –

300 мм, диаметр щели – 2 мм; энергетическое разрешение составляет порядка 300–500 кэВ.

Регистрация упруго рассеянных частиц осуществляется кремниевым детектором фирмы Ortec, толщиной 100 мкм. Сбор набранных спектров со спектрометрического тракта осуществляется при помощи программы Maestro-32 [8]. Обработка накопленных спектров производится с использованием, как самой программы набора спектров Maestro-32, так и специального программного обеспечения OriginPro. Необходимость такого подхода объясняется наличием в некоторых случаях сильно перекрывающихся пиков, соответствующих различным упруго рассеянным частицам. Нами получен участок обработанного спектра реакции упругого рассеяния ядер углерода с энергией 1,75 МэВ/нуклон с мишенью  $Al_2O_3$  при угле рассеяния  $28^\circ$ .

Обработка экспериментальных данных была условно разделена на два этапа:

- вычисление площадей пиков с учетом фона;
- расчет дифференциальных сечений ядерных процессов и ошибок их измерений в лабораторной системе координат (л.с.к.) и перехода к системе центра масс (с.ц.м.).

Дифференциальные сечения (в л.с.к.) взаимодействия частиц с ядрами (в мбн/ср) вычисляется по формуле, выведенной нами.

В качестве примера приведем сечения упругого рассеяния ионов  $^{13}C$  на ядрах  $^{12}C$  при энергиях  $E_{lab}(^{13}C)$  22,75 МэВ. Из полученных экспериментальных данных видно, что в угловом распределении упругого рассеяния для системы  $^{12}C + ^{13}C$  наблюдается значительный подъем дифференциального сечения под большими углами (аномальное рассеяния назад).

Теоретический анализ проводится с использованием компьютерных программ, SPIGENOA, SPIVAL, DWUCK-5 и FRESCO, которые реализуются теоретические методы, такие как: феноменологический подход к оптической модели, метода искаженных волн, двойной свертки модели и метода связанных каналов.

Аномальное поведение рассеяния ионов  $^{13}C$  на ядрах  $^{12}C$  удается воспроизвести с учетом вклада механизма обмена нуклонами [9] между взаимодействующими ядрами вычисленного в рамках метода искаженных волн.

Из результатов анализа экспериментальных данных сечения упругого рассеяния ускоренных ионов  $^{13}C$  на ядрах  $^{12}C$  при энергии 22,75 МэВ видно, что чисто резерфордское рассеяние воспроизводит дифференциальные сечения рассеяния только для передних углов.

**Заключение.** Представлен экспериментальный метод измерения сечения упругого рассеяния легких ядер на ядрах Гроболочках при энергиях вблизи кулоновского барьера, который успешно реализован на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60. С использованием данного метода измерения можно выявить вклад механизма об-

мена кластерами или нуклонами между взаимодействующими ядрами.

**Благодарности.** Данная работа выполнена в рамках проекта «Исследование выходов процессов упругого рассеяния ионов  $^{13}C$  на легких ядрах при энергиях вблизи кулоновского барьера» по программе «Грантовое финансирование научных исследований на 2015–2017 годы» финансируемого Министерством образования и науки Республики Казахстан.

#### Список литературы

1. Burtebaev N. et al., Detailed study for 16O elastically scattered from 16O at energies 20, 24 and 28 MeV, International Journal of Modern Physics E22 (8), 1350058.
2. Гикал Б.Н. Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий циклотрона ДЦ-60 // Дубна, 2006. – 12 с. – Препринт ОИЯИ P9-2006-38.
3. Brandan M.E., Satchler G.R. The interaction between light heavy ions and what it tell us // Phys. Rep. – 1997. – Vol. 285. – P. 143.
4. Ходгсон П.Е., Оптическая модель упругого рассеяния. – М.: Атомиздат. – С. 1966.–232.
5. Фаулер У.А., Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов // УФН. – 1985. – Т. 5. – Вып. 3. – С. 441–488.
6. B. Gikal et al., DC60 heavy ion cyclotron complex: First beams and project parameters // Physical of particles and nuclei letters. – Vol. 5(7). – P. 642–644.
7. Arzumanov A.A. The electrostatic tandem accelerator UKP-2-1 at the institute of nuclear physics // Proceedings of 13th particle accelerator conference. – Dubna, 1992. – Vol. 1. – P. 118–131.
8. <http://web.mit.edu/8.13/8.13d/manuals/Ortec-MAESTRO-software-manual.pdf>.
9. A. Barbadoro et al. // Il NuovoCimento. – 1986. – Vol. 95 A, № 3. – P. 197–210.

### КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Бурмасов П.И.

*Пермский институт железнодорожного транспорта – филиал Уральского государственного университета путей сообщения, Пермь,  
e-mail: PIBurmasov@pizht.ru*

В настоящее время, когда создана сложнейшая инфраструктура транспорта, повышена его скорость и грузоподъемность при высокой плотности движения, остро стала проблема контроля технического состояния движущихся объектов.

Применяемые в настоящем времени методы контроля технического состояния связаны с большими временными и материальными затратами, а диагностирование в реальном масштабе времени практически невозможно [1]. Необходимо разрабатывать принципиально новые методы и средства диагностики, позволяющие осуществлять контроль истинного технического состояния подвижных объектов в реальном масштабе времени

Разработку таких методов, как показывает проведенный анализ [1], можно осуществить на основе нелинейных преобразований диагностической информации, матричных испытаний,