



МРНТИ 29.15.19

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2024-149-4-128-141>

Научная статья

Изучение резонансных реакций на циклотроне ДЦ-60 с использованием методов ТМОК и времени пролета

Д.К. Наурузбаев*¹, А.Тихонов², Г.Е. Серикбаева^{1,2}, А.К. Нурмуханбетова¹

¹Система исследований и инноваций Назарбаев Университета, Астана, Казахстан

²Школа естественных и гуманитарных наук, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

(E-mail: ¹dosbol.nauruzbayev@nu.edu.kz)

Аннотация. Статья посвящена обзору проделанной работы по первой успешной реализации метода толстой мишени в обратной кинематике (ТМОК) на базе циклотрона ДЦ-60. Применение методики ТМОК совместно с время-пролетной системой диагностики пучка тяжелых ионов и идентификации продуктов реакции позволило исследовать резонансные ядерные реакции в области малых энергий взаимодействия, которые имеют также астрофизический интерес. Методика основана на измерении функций возбуждения рассеяния легких частиц в условиях обратной кинематики, где в качестве мишени используется толстая и протяженная газовая мишень (гелий или водород), а пучком служат тяжелые ускоренные ядра. Кроме этого, в ней детально приводится реализованная схема эксперимента и системы сбора и обработки данных. В результате достигли общего разрешения эксперимента порядка 35 кэВ и 2 нс под углом 180° в системе центра масс (сцм). Более того применение ТМОК методики позволило свести на нет фоновые реакции, благодаря использованию в качестве мишени сверхчистых легких газов гелия и водорода, а в качестве пучка изотопов тяжелых частиц. Все это вкупе позволило успешно провести ряд экспериментов по изучению резонансной структуры ядер ²⁰Ne, ²¹Ne, ¹⁹F, ²²Ne в реакциях ¹⁶O+α, ¹⁷O+α, ¹⁵N+α и ²²Ne+α соответственно.

Ключевые слова: резонансы, толстая мишень, обратная кинематика, время пролета, циклотрон, кластерные состояния.

Поступила 4.11.2024. После доработки 27.11.2024. Принята к печати 28.11.2024. Доступно онлайн 25.12.2024.

¹*автор для корреспонденции

Введение

Интерес к резонансным реакциям при низких энергиях с участием водорода или гелия обусловлен задачами ядерной астрофизики [1-3]. Гелий и водород являются самыми распространенными элементами во Вселенной (~21% и ~77% соответственно) [4,5]. Кроме всего прочего, реакции с гелием и водородом играют весомую роль в процессах, идущих на звездах. Процессы в звездах идут при энергии альфа-частиц ниже кулоновского барьера, но широкие альфа кластерные резонансы, расположенные выше, влияют на область окна Гамова [6] путем интерференции хвоста резонанса альфа кластерного состояния с чувствительной областью окна Гамова. Также низко лежащие резонансы, представляющие астрофизический интерес, возможно изучить через теоретические модели [7], в частности, кластерные. Известно, что для этого нужно знать спектр состояний, которые влияют на ширину исследуемых резонансов за счет смешивания конфигураций. Природа альфа-кластерной структуры довольно известна у легких ядрах $4N$ (^8Be , ^{12}C , ^{16}O ...) [8]. Они характеризуются в виде схожих по свойствам квазиротационными полосами состояний с отрицательной и положительной четностью, а также с значительной приведенной α -частичной шириной. При экспериментальном изучении α -кластерных состояний в ядрах с $N \neq Z$ возможно извлечь информацию о взаимосвязи одночастичной и кластерной степеней свободы. В подобных ядрах энергия связи нуклона как правило ниже в отличие от α -частицы (кроме ядер с $4N$ -структурой). И данные о природе распада α -кластерных состояний в ядрах с $N \neq Z$ могут предоставить ясность о взаимосвязи кластерной структуры и оболочечной модели. Более того, изучение α -кластерных состояний в ядерных системах с превышением числа протонов или нейтронов дают возможность сопоставить, применяя закон сохранения изоспина, свойства состояний зеркальных ядер. Такого рода исследования набирают популярность [9].

Методология ТМОК

Большая часть экспериментов выполнена на циклотроне ДЦ-60 (г. Астана, Казахстан). На циклотроне ДЦ-60 [10] имеется возможность получать частицы от Li до Xe в диапазоне энергией 0,3-1,75 МэВ/нуклон. Интенсивность пучка достигает порядка 10^{12} - 10^{13} частиц в секунду. Если говорить о дисперсии пучка по энергии, то она соответствует 2-3%, что касается временной ширины циклотронного сгустка (банча), то она порядка 5-7 нс. Чтобы улучшить временное разрешение и добиться 2, необходимо уменьшать интенсивность пучка, подстраивая при этом параметры ускорения и магнитной системы проводки пучка так, чтобы добиться вывода с одной орбиты ускорения.

На первый взгляд исследование резонансных ядерных реакций с помощью пучков циклотрона может выглядеть легко реализуемым, но в отличие от электростатических ускорителей они менее приспособлены для этого. Выигрыш электростатических ускорителей заключается в том, что можно получить высокоинтенсивный монохроматический настраиваемый по энергии пучок [11], столь необходимый для исследования

функций возбуждения с высоким разрешением. Циклотроны, в свою очередь, обладая более худшим энергетическим разрешением пучка и ввиду сложности, а также временем затратности, связанными с перестройками по энергии ускоряемых частиц, обычно не применяются для классического резонансного рассеяния. Нами используется метод толстой мишени в обратной кинематике (ТМОК) [12], который был разработан для изучения функций возбуждения с использованием циклотронного пучка [13]. В данной методике используется обратная кинематика. Ускоряется тяжелая частица (рисунок 1) [14], а в качестве мишени выступает легкая частица в виде газа (водород или гелий), заполняющего камеру рассеяния, отделяемого от ионопровода входным окном, выполненным из тонкой металлической пленки. Давление газа-мишени подбирается таким образом, чтобы пучок тяжелых частиц остановился в непосредственной близости от детекторов, расположенных в противоположной стороне от входного окна. В ходе замедления пучка возникают легкие ядра отдачи (протоны в случае водорода или α -частицы в случае гелия) из взаимодействия с ионами пучка и регистрируются кремниевыми детекторами, расположенными под прямыми углами, поскольку ядра отдачи p и α имеют меньшие потери энергии, чем рассеянные ионы. Подход ТМОК обеспечивает непрерывную функцию возбуждения в результате замедления пучка. Из-за эффектов разброса энергия и угловой разброс входящего пучка увеличиваются по мере того, как ион проходит через рассеивающую камеру. Метод ТМОК был разработан В.З. Гольдбергом в 90-х годах и реализован им совместно с коллегами и сотрудниками Курчатовского Института [13] и, к сожалению, не может конкурировать с классическим подходом в энергетическом разрешении функций возбуждения. Но несмотря на это, метод ТМОК имеет ряд других преимуществ.

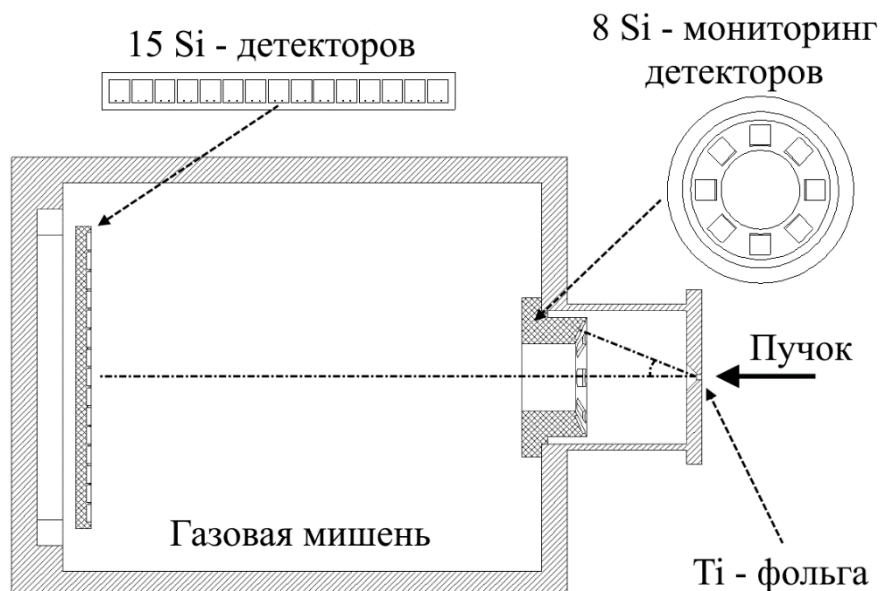


Рисунок 1. Схема эксперимента.

Во-первых, ТМОК позволяет проводить измерения под 180° , который не достижим при классическом подходе. Важность измерений под данным углом и вблизи него заключается в том, что потенциальное рассеяние минимально и тем самым становится возможным измерить резонансы в области кулоновского барьера. Также есть другие сложности с измерениями при низких энергиях в классическом подходе. К примеру, трудности связаны с уменьшением энергии частицы, рассеянной в обратном направлении и влиянием потери энергии в мишени. Измерения методом ТМОК просты при 180° (0° в лабораторной системе), поскольку пучок останавливается внутри мишени перед детекторами, а регистрируемая энергия частиц отдачи относительно высока из-за высокой энергии центра масс.

Во-вторых, в экспериментах, поставленных классическим способом есть трудности изготовления мишени с низким содержанием примесей, особенно сложно и дорогостояще получить изотопно чистые мишени. А в случае использования ТМОК методики таких сложностей не возникает, так как циклотрон ускоряет заданные ионы и в качестве легкой мишени используются газы водорода и гелия высокой чистоты (99,99%).

В-третьих, стоит отметить высокую эффективность метода ТМОК. Функция возбуждения промеряется с использованием одной энергии циклотрона от момента вхождения пучка в камеру рассеяния и до места полной остановки. И поэтому нет необходимости перестраивать пучок для каждого резонанса, что ведет к сокращению затрачиваемого экспериментального времени в десятки раз. Отсюда следует, что это благоприятный подход для изучения резонансных реакций с низкоинтенсивными радиоактивными пучками [15].

Рассмотрим детали проведения эксперимента. В нашем случае ионопровод циклотрона ДЦ-60 ограничивается от камеры рассеяния титановой пленкой толщиной 2 микрон. Так как нет возможности использовать цилиндр Фарадея для измерения интенсивности пучка внутри камеры, то нам пришлось изготовить мониторинг-систему на основе измерения Резерфордского рассеяния со входного окна. Данная система представляет из себя восемь кремниевых детекторов, расположенных по кругу под углом 21° и на удалении 84 мм от титановой пленки. А на удалении 450 мм от входного окна ставится основная система детектирования продуктов ядерной реакции при углах от 0° и до 14° относительно оси пучка. Основная детектирующая система реализована на планке из 15 кремниевых р-и-п диоды полного поглощения с площадью 10 на 10 мм при толщине чувствительного слоя 300 микрон. Для борьбы с краевым вкладом использовались диафрагмы из пластика (диаметр 8 мм и толщиной 1 мм) на основные детекторы. А для мониторинга детекторов использовались диафрагмы с меньшим отверстием (1 мм) с целью убавления загрузки на них.

Электроника (Рисунок 2) базируется на двух крейтах CAENnim ивме стандарта. В качестве предусилителя используется Mesytec MPR-16, после чего ставится усилитель Mesytec STM-16. Запитывались детекторы через предусилитель MPR-16 посредством блока питания Mesytec MHV-4 и им же контролируется значение обратного тока для своевременного выявления выходящих из строя детекторов. Для оцифровки информация об амплитуде и измерения по методике времени пролета использовали модули ADC

(Mesytec MADC-32) и TDC (CAEN V775), соответственно, а считывание с них производилось через контроллер шины VME W-IE-NE-R VM-USB. Программное обеспечение системы сбора и обработки данных реализована на NSCL DAQ [16] с открытым исходным кодом, а программа NSCL SpectCl [17] применяется для онлайн-мониторинга спектров. Полный анализ данных выполняется в автономном режиме.

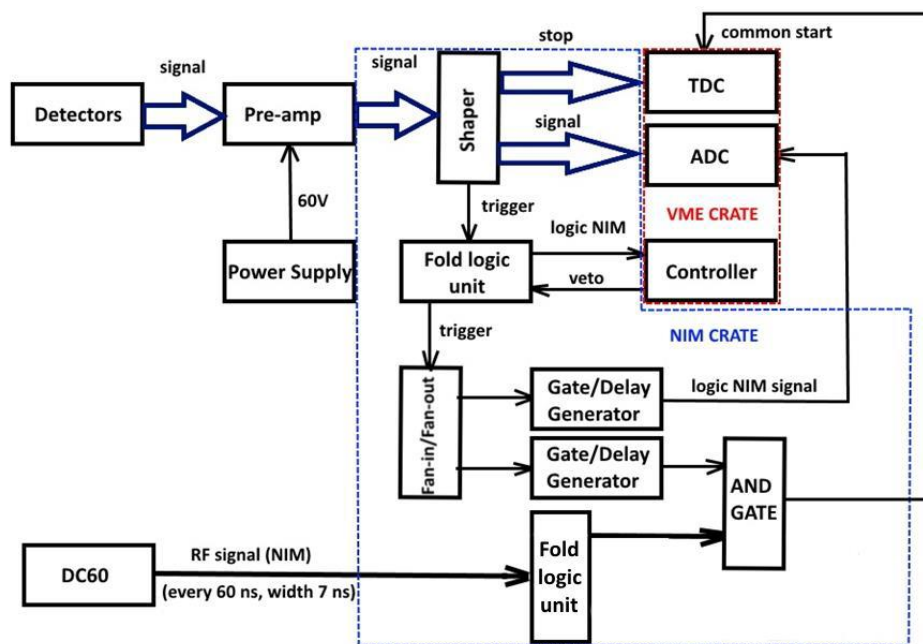


Рисунок 2. Принципиальная электронная схема.

Одна из немаловажных экспериментальных задач, решаемых в ходе исследовательских работ, - это извлечение необходимого эффекта из фона разной природы происхождения [18]. Временами удается на стадии планирования теоретически рассчитать и так выполнить эксперимент, чтобы остальные каналы ядерных реакций были закрыты. Но такой благополучный исход редкость. Существуют разные методики по идентификации разных каналов реакций. В частности, методика регистрации удельных потерь и полной энергии ($dE/dx-E$), а также техника времени пролета. Применение дополнительного пролетного детектора приводит к дополнительным потерям в энергетическом разрешении.

В нашем случае для отделения разных каналов реакций применяется время-пролетная методика (Рисунок 3). Данный подход дал возможность различить различные каналы распада (упругий, не упругий, распад с возбужденных состояний) без критического ухудшения энергетического разрешения. В поставленных экспериментах на ДЦ-60 с импульсной структурой пучка в качестве стартового сигнала был задействован сигнал генератора высокой частоты [10]. При этом важно добиться минимального значения ширины циклотронного банча (жертвуя интенсивностью в разумных пределах). Данная процедура нова для операторов циклотрона ДЦ-60. Для этих работ

использовался спектр упругого рассеяния со входного окна, который также служил и в качестве контроля стабильности параметров циклотрона со временем. На рисунке 3 показано время пролетного спектра для случая $^{18}\text{O}+p$. В том эксперименте пучок ионов ^{18}O с максимально возможной энергией 31,5 МэВ входит в камеру рассеяния через окно (титан 2 мкм) и при этом теряет 4,49 МэВ, дальше взаимодействует с газом-мишенью (водородом) при давлении 459 тор. Для этого случая, кроме упругого канала, открыт неупругий (p,α) канал реакции. Время-пролетная методика позволяет отделить каналы $^{18}\text{O}+p=^{19}\text{F}=\rightarrow^{15}\text{N}+\alpha$ (Рисунок 3), которые идут через основное состояние $^{15}\text{N}+\alpha_0$.

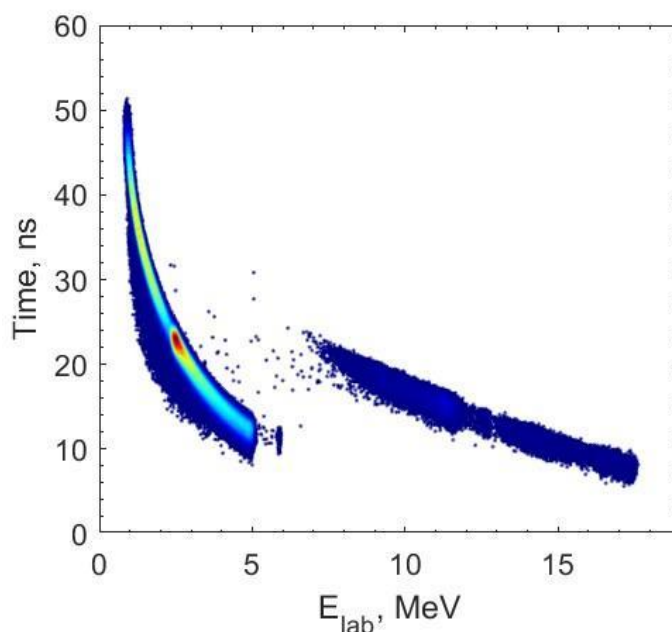


Рисунок 3. E-T спектр продуктов взаимодействия $^{18}\text{O}+p$.

Результаты и обсуждение

Был успешно проведен ряд экспериментов по изучению резонансной структуры ядер ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{19}F , ^{22}Ne в реакциях $^{16}\text{O}+\alpha$, $^{17}\text{O}+\alpha$, $^{15}\text{N}+\alpha$ и $^{22}\text{Ne}+\alpha$ соответственно [19-22].

При изучении ^{20}Ne посредством реакции $^{16}\text{O}+\alpha$ были получены следующие основные результаты. Во-первых, определены параметры широких резонансов в ^{20}Ne (Рисунок 4): уровень $0+$ при $8,77 \pm 0,150$ МэВ с шириной $750^{+500}-220$ кэВ; уровень $2+$ при $8,75 \pm 0,100$ МэВ с шириной 695 ± 120 кэВ; ширина уровня $9,48$ МэВ 65 ± 20 кэВ; и также показали, что уровень $9,19$ МэВ, $2+$ (если он существует) должен иметь ширину ≤ 10 кэВ. Во-вторых, было проведено детальное сравнение теоретических предсказаний CNCIM с экспериментальными данными по кластерным состояниям. Более точные и подробные результаты исследований приведены в [19].

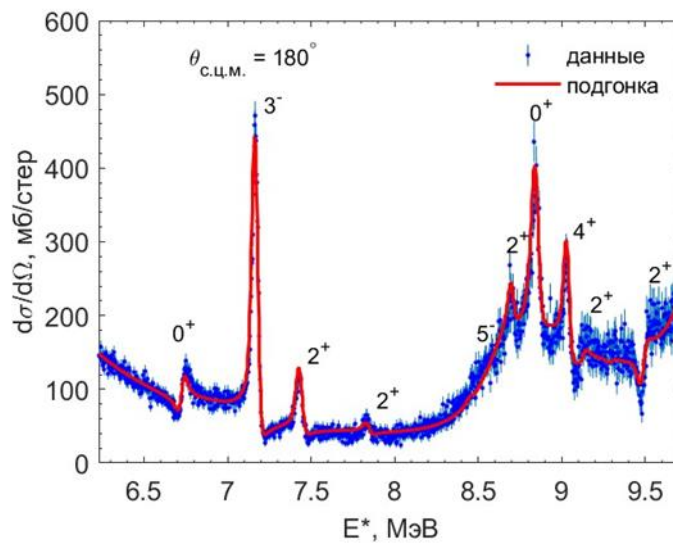


Рисунок 4. Функция возбуждения упругого рассеяния $^{16}\text{O}(\alpha,\alpha)^{16}\text{O}$.

В случае эксперимента $^{17}\text{O}+\alpha$, который впервые проведен и проанализирован нами, было обнаружено множество состояний α -кластера в области возбуждения ^{21}Ne с энергией возбуждения 9-13 МэВ. Также включая первое наблюдение широкого состояния $\ell=0$ в нечетно-четном ядре, которое, вероятно, является аналогом широкого 0^+ при 8 МэВ в ^{20}Ne . Кроме этого, наблюдаемая структура в ^{21}Ne оказалась поразительно похожей на ту, которая заселялась в резонансном рассеянии $^{16}\text{O}+\alpha$ в ^{20}Ne . Более того, результаты также полезны для уточнения данных о реакции $^{17}\text{O}(\alpha,n)$, представляющей важность для астрофизики. Более точные и подробные результаты исследований приведены в [20].

Что касается ^{19}F , то существует также глубокий астрофизический интерес к структуре его состояний вблизи порога α -распада. Ядерная структура этих состояний важна для понимания развития α -кластеризации в области ^{20}Ne . Возникновение кластеризованных состояний и, как правило, состояний, которым благоприятствуют связи с каналами реакции вблизи соответствующих порогов распада, в настоящее время представляет особый интерес в теоретической физике. Были установлены параметры широких низкоспиновых состояний в ^{19}F вблизи порога α -распада и выполнено теоретическое исследование этих состояний. Исследование ограничено $\ell=0$ и 1 относительными парциальными волновыми резонансами во взаимодействии $\alpha+^{15}\text{N}$ вблизи порога α -распада в ^{19}F . Ядерная структура ^{19}F была рассчитана с использованием методов взаимодействия конфигураций с недавно разработанным эффективным гамильтонианом взаимодействия. В результате в этой работе мы идентифицируем ряд α -кластерных резонансов в ^{19}F и оцениваем распределение кластерной силы, что имеет важное значение для вопросов астрофизики и для теоретического понимания физики многих тел и возникновения кластеризации в слабосвязанных или нестабильных ядрах. Был достигнут прогресс в теоретическом понимании происхождения кластеризации и определены вопросы для будущих

теоретических и экспериментальных исследований. Более точные и подробные результаты исследований приведены в [21].

Если говорить о свойствах резонансов во взаимодействии $18\text{O}+\alpha$, то они важны для анализа астрофизических процессов и для понимания развития структуры α -кластера при добавлении нейтронов к ядрам ${}^4\text{N}$. Предыдущие измерения с высоким энергетическим разрешением не обрабатывались с использованием современного подхода R-матрицы. Нами был проведен анализ резонансных данных с помощью R-матрицы и получили новые данные по 15 уровням в области возбуждения 11,7–12,5 МэВ ${}^{22}\text{Ne}$. Похоже, что модельные расчеты не предсказали наблюдаемую тенденцию в кластеризации α ${}^{20-22}\text{Ne}$. Более точные и подробные результаты исследований приведены в [22].

Заключение

В данной работе представлены результаты применения методики толстой мишени в обратной кинематике (ТМОК) для изучения резонансных реакций при взаимодействии ${}^{16}\text{O}+\alpha$, ${}^{17}\text{O}+\alpha$, ${}^{15}\text{N}+\alpha$ и ${}^{22}\text{Ne}+\alpha$ на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60. Метод ТМОК был усовершенствован путем его комбинации с методом времени пролета, что позволило интенсифицировать легкие частицы (протоны и α -частицы) в протяженной газовой мишени. Получено хорошее согласие между экспериментальными данными и теоретическими. Определено более 20 резонансных уровней в структуре ядра ${}^{20}\text{Ne}$. Описаны уровни основного состояния и уровня первого возбужденного состояния $0+$, а также уровни состояний $1-$, $3-$ и $2+$. Параметры этих уровней характеризуются как α -кластерные.

Также были выполнены первые измерения упругого рассеяния ${}^{17}\text{O}+\alpha$. В области возбуждения ядра ${}^{21}\text{Ne}$ от 9 до 13 МэВ было обнаружено много α -кластерных состояний, включая широкое состояние с $\ell=0$ в нечетно-четном ядре, которое, вероятно, является аналогом широкого состояния $0+$ на 8 МэВ в ${}^{20}\text{Ne}$.

Кроме того, в работе представлены результаты анализа данных упругого рассеяния $\alpha+{}^{15}\text{N}$ до энергии возбуждения 8,2 МэВ в ядре ${}^{19}\text{F}$. Мы обнаружили новые спины нескольких резонансов и уточнили спектрометрические параметры нескольких уровней. В отличие от ранее сделанных работ, наш теоретический анализ показал, что сильный пик при энергии возбуждения 8,15 МэВ в ядре ${}^{19}\text{F}$ при углах, близких к 180° , является результатом интерференции нескольких резонансов с различными спинами.

Теоретический анализ данных резонансного рассеяния $\alpha+{}^{18}\text{O}$ позволил уточнить параметры 15 уровней в ${}^{22}\text{Ne}$. В отличие от ядер ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{21}\text{Ne}$ и ${}^{19}\text{F}$, нами не были обнаружены низкоспиновые резонансы с большой приведенной α -шириной в исследуемой области возбуждения.

Проведенные исследования указывают на необходимость дальнейшего изучения данных структур при более высоких энергиях возбуждения, что позволит улучшить понимание развития альфа кластеризации (альфа кластерной структуры) в ядрах с $N \neq Z$.

Благодарность

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14869719).

Вклад авторов

Наурузбаев Д.К. – проведение эксперимента, подготовка экспериментального оборудования и запуск системы сбора данных, организация и контроль сбора данных во время эксперимента в течение двух недель, обработка и углубленный анализ полученных данных, выполнение необходимых расчетов, интерпретация результатов, подготовка иллюстраций, а также написание основного текста научной статьи.

Нурмуханбетова А.К. – формулировка и постановка научной задачи для экспериментов, участие в сборе данных во время эксперимента в течение двух недель, обработка и анализа данных, выполнение расчетов, интерпретация результатов, а также написание отдельных разделов текста статьи.

Серикбаева Г.Е. – участие в эксперименте, выполнение задач по сбору данных, их предварительная обработка и анализ, а также корректировка отдельных разделов текста статьи.

Тихонов А. – участие в эксперименте, выполнение задач по сбору данных, редактирование и доработка материалов научной статьи, включая уточнение формулировок и проверку структуры текста.

Список литературы

1. Epelbaum, H. Krebs, T.A. Lahde, D. Lee, U.G. Meiner, Structure and rotations of the hoyle state. // Phys. Rev. Lett. – 2012 – V. 109. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.252501> - **журнал на англ языке**
2. M.L. Avila, G.V. Rogachev, V.Z. Goldberg, E.D. Johnson, et al., α -cluster structure of ^{18}O . // Phys. Rev. C. – 2014 – V. 90 – P. 24327. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.90.024327> - **журнал на англ языке**
3. E. Uberseder, G.V. Rogachev, V.Z. Goldberg, E. Koshchiy, et al., Nuclear structure beyond the neutron drip line: the lowest energy states in ^9He via their $T=5/2$ isobaric analogs in ^9Li . // Phys. Lett. Sect. B Nucl. Elem. Part. High.-Energy Phys. – 2016 – V. 754 – P. 323–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.01.014> - **журнал на англ языке**
4. Сюняев Р. А. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. энциклопедия, 1986. – 783 с. -**книга**
5. Iliadis C. Nuclear Physics of Stars. 2nd ed. // Chapel Hill. Wiley-VCH, 2015. – 672 p. -**книга**
6. M. Wiescher. Cosmic alchemy in the laboratory. // Physics 2. – 2009. – V. 69. - **книга**
7. Mukhamedzhanov A. M., Timofeyuk N. K. Astrophysical S-factor for the reaction $^7\text{Be}+p\rightarrow^8\text{B}+\gamma$. // JETP Lett. – 1990. – V. 51. – No. 5. – P. 282 – 284. DOI: http://jetpletters.ru/ps/0/article_17241.shtml - **журнал на англ языке**

8. Freer M. The clustered nucleus – cluster structures in stable and unstable nuclei. // Rep. Prog. Phys. – 2007. – V. 70. – P. 2149-2210. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/12/R03> - **журнал на англ языке**
9. Goldberg V. Z., Rogachev G. V. New Era of Resonance Reaction Studies. // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – V. 83. – P. 513–519. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778820040110> - **журнал на англ языке**
10. Gikal B. et al. DC-60 heavy ion cyclotron complex: the first beams and project parameters // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2008. – V. 5. – P. 642–644. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477108070248> - **журнал на англ языке**
11. Thompson W. J., Wilkerson J. F., Clegg T. B., Feagin J. M. et al. Atomic-Excitation Effects on Nuclear Reactions. // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V. 45. – P 703. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.703> - **журнал на англ языке**
12. Nurmukhanbetova A. K., Goldberg V. Z., Nauruzbayev D. K., Rogachev G. V. et al. Implementation of TTIK method and time of flight for resonance reaction studies at heavy ion accelerator DC-60. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2017. – V. 847. – P. 125-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.11.053> - **журнал на англ языке**
13. Artemov K., Belyanin O. P., Vetoshkin A. L., Wolski R. et al. Effective Method of Study of α -Cluster States. // Yad. Fiz. – 1990. – V. 52. – P. 634. - **журнал на англ языке**
14. Nauruzbayev D.K. Investigation of $^{20,21}\text{Ne}$ states in $\alpha+^{16,17}\text{O}$ resonant elastic scattering. 2021. – P. 70. - **журнал на англ языке**
15. Almaraz-Calderon S., W.P. Tan, A. Aprahamian, B. Bucher, et al. Level structure of ^{18}Ne and its importance in the $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ reaction rate. // Phys. Rev. C. – 2012. – V. 86. – P. 25801. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.86.029901> - **журнал на англ языке**
16. NSCL DAQ. URL: <https://sourceforge.net/projects/nscldaq/> - **интернет источник**
17. NSCL Spectcl. URL: <https://sourceforge.net/projects/nsclspectcl/> - **интернет источник**
18. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т.1-3. Изд. 5 перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1993. - 1096 с.- **книга**
19. Nauruzbayev D. K., Goldberg V. Z., Nurmukhanbetova A. K., Golovkov M. S. et al. Structure of ^{20}Ne states in resonance $^{16}\text{O}+\alpha$ elastic scattering // Phys. Rev. C. – 2017. – V. 96. – P. 014322. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.96.014322> - **журнал на англ языке**
20. Nurmukhanbetova A.K., Goldberg V. Z., Nauruzbayev D. K., Golovkov M. S. et al. Evidence for α -cluster structure in ^{21}Ne in the first measurement of resonant $^{17}\text{O}+\alpha$ elastic scattering. // Phys. Rev. C. – 2019. – V. 100. – P. 062802(R). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.100.062802> - **журнал на англ языке**
21. Goldberg V.Z., Nurmukhanbetova A.K., Volya A., Nauruzbayev D.K. et al. α -cluster structure in ^{19}F and ^{19}Ne in resonant scattering. // Phys. Rev. C. – 2022. – V. 105. – P. 014615. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.014615> - **журнал на англ языке**
22. Nurmukhanbetova A.K., Goldberg V.Z., Volya A., Nauruzbayev D.K. et al. R-matrix analysis of ^{22}Ne states populated in $^{18}\text{O}(\alpha, \alpha)$ resonant elastic scattering. // Phys. Rev. C. – 2024. – V. 109. – P. 024607. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.109.024607> - **журнал на англ языке.**

Д.К. Наурузбаев*¹, А. Тихонов², Г.Е. Серикбаева^{1,2}, А.К. Нурмуханбетова¹

¹Назарбаев Университетінің Ғылыми-Инновациялық Жүйесі, Астана, Қазақстан

²Ғылым және Гуманитарлық Ғылымдар Мектебі, Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан

ДЦ-60 циклотронындағы резонанстық реакцияларды ККҚН және ұшу уақыты әдістерін қолдану арқылы зерттеу

Аңдатпа. Мақала ДЦ-60 циклотронына негізделген кері кинематикада қалың нысана (ККҚН) әдісін бірінші сәтті енгізу бойынша атқарылған жұмыстарды шолуға арналған. Ауыр иондық шоғырын диагностикалауға және реакция өнімдерін анықтауға арналған ұшу уақыты жүйесімен бірге ККҚН техникасын қолдану арқылы астрофизикалық қызығушылық тудыратын төмен әсерлесу энергиялары аймағындағы резонанстық ядролық реакцияларды зерттеуге мүмкіндік алдық. Әдістеме кері кинематика жағдайында жеңіл бөлшектердің шашырауының қоздыру функцияларын өлшеуге негізделген, мұнда қалың және ұзартылған газ нысанасы (гелий немесе сутегі) нысана ретінде пайдаланылады, ал ауыр жеделдетілген ядролар шоғыр ретінде қызмет етеді. Сонымен қатар, ол енгізілген эксперименттік жобаны және деректерді жинау және өңдеу жүйесін егжей-тегжейлі көрсетеді. Нәтижесінде біз салмақ орталығы жүйесінде (сож) 180° бұрышта 35 кВ және 2 нс-ге жуық жалпы тәжірибелік рұқсатқа қол жеткіздік. Сонымен қатар, ККҚН техникасын қолдануда гелиймен сутектің ультра таза жеңіл газдарын пайдаланып, ал ауыр бөлшектердің изотоптарының шоғыры ретінде қолданудың арқасында фондық реакцияларды жоққа шығаруға мүмкіндік алдық. Осының бәрі бірігіп біздің топқа сәйкесінше $^{16}\text{O}+\alpha$, $^{17}\text{O}+\alpha$, $^{15}\text{N}+\alpha$ және $^{22}\text{Ne}+\alpha$ реакцияларындағы ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{19}F , ^{22}Ne ядроларының резонанстық құрылымын зерттеу бойынша тәжірибелер сериясын сәтті жүргізуге мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: резонанстар, қалың нысана, кері кинематика, ұшу уақыты, циклотрон, кластерлік күйлер.

D.K. Nauruzbayev*¹, A. Tikhonov², G.E. Serikbayeva^{1,2}, A.K. Nurmukhanbetova¹

¹Nazarbayev University Research and Innovation System, Astana, Kazakhstan

²School of Science and Humanities, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

Study of resonance reactions at the DC-60 cyclotron using the TTIK and time-of-flight techniques

Abstract. The article is devoted to the review of the work done on the first successful implementation of the thick target method in inverse kinematics (TTIK) based on the DC-60 cyclotron. The use of the TTIK technique together with the time-of-flight system for heavy ion beam diagnostics and the identification of reaction products made it possible to study resonance nuclear reactions in the region of low interaction energies, which are also of astrophysical interest. The technique is based on measuring the excitation functions of light particle scattering under inverse kinematics conditions, where a thick

and extended gas target (helium or hydrogen) is used as a target, and heavy accelerated nuclei serve as a beam. In addition, it provides a detailed description of the implemented experimental scheme and the data acquisition and processing systems. As a result, the overall experimental resolution of about 35 keV and 2 ns at an angle of 180° in the center of mass system (cms) was achieved. Moreover, the use of the TTIK method allowed us to eliminate background reactions by using ultra-pure light gases helium and hydrogen as a target and heavy particle isotope beams. This approach enabled us to successfully conduct a series of experiments to study the resonance structure of ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{19}F , ^{22}Ne nuclei in the reactions $^{16}\text{O}+\alpha$, $^{17}\text{O}+\alpha$, $^{15}\text{N}+\alpha$ and $^{22}\text{Ne}+\alpha$, respectively.

Keywords: resonances, thick target, inverse kinematics, time of flight, cyclotron, cluster states.

References

1. Epelbaum, H. Krebs, T.A. Lahde, D. Lee, U.G. Meiner, Structure and rotations of the hoyle state. // Phys. Rev. Lett. – 2012 – V. 109. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.252501>
2. M.L. Avila, G.V. Rogachev, V.Z. Goldberg, E.D. Johnson, et al., α -cluster structure of ^{18}O . // Phys. Rev. C. – 2014 – V. 90 – P. 24327. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.90.024327>
3. E. Uberseder, G.V. Rogachev, V.Z. Goldberg, E. Koshchiy, et al., Nuclear structure beyond the neutron drip line: the lowest energy states in ^9He via their $T=5/2$ isobaric analogs in ^9Li . // Phys. Lett. Sect. B Nucl. Elem. Part. High.-Energy Phys. – 2016 – V. 754 – P. 323–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.01.014>
4. Sunyaev R.A. Fizika kosmosa: Malen'kaya entsiklopediya [Physics of Space: A Little Encyclopedia. // 2nd ed., revised and expanded] – Moscow: Soviet Encyclopedia. – 1986. – p. 783. [In Russian]
5. Iliadis C. Nuclear Physics of Stars. 2nd ed. // Chapel Hill. Wiley-VCH, 2015. – 672 p.
6. M. Wiescher. Cosmic alchemy in the laboratory. // Physics 2. – 2009. – V. 69.
7. Mukhamedzhanov A. M., Timofeyuk N. K. Astrophysical S-factor for the reaction $^7\text{Be}+p\rightarrow^8\text{B}+\gamma$. // JETP Lett. – 1990. – V. 51. – No. 5. – P. 282 – 284. DOI: http://jetpletters.ru/ps/0/article_17241.shtml
8. Freer M. The clustered nucleus – cluster structures in stable and unstable nuclei. // Rep. Prog. Phys. – 2007. – V. 70. – P. 2149-2210. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/12/R03>
9. Goldberg V. Z., Rogachev G. V. New Era of Resonance Reaction Studies. // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – V. 83. – P. 513–519. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778820040110>
10. Gikal B. et al. DC-60 heavy ion cyclotron complex: the first beams and project parameters // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2008. – V. 5. – P. 642–644. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477108070248>
11. Thompson W. J., Wilkerson J. F., Clegg T. B., Feagin J. M. et al. Atomic-Excitation Effects on Nuclear Reactions. // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V. 45. – P. 703. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.703>
12. Nurmukhanbetova A. K., Goldberg V. Z., Nauruzbayev D. K., Rogachev G. V. et al. Implementation of TTIK method and time of flight for resonance reaction studies at heavy ion accelerator DC-60. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2017. – V. 847. – P. 125-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.11.053>
13. Artemov K., Belyanin O. P., Vetoshkin A. L., Wolski R. et al. Effective Method of Study of α -Cluster States. // Yad. Fiz. – 1990. – V. 52. – P. 634

14. Nauruzbayev D.K. . Investigation of 20,21Ne states in $\alpha+16,17O$ resonant elastic scattering. 2021. – P. 70.
15. Almaraz-Calderon S., W.P. Tan, A. Aprahamian, B. Bucher, et al. Level structure of 18Ne and its importance in the 14O(α , p)17F reaction rate. // Phys. Rev. C. – 2012. – V. 86. – P. 25801. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.86.029901>
16. NSCL DAQ. URL: <https://sourceforge.net/projects/nscldaq/>
17. NSCL SpectCl. URL: <https://sourceforge.net/projects/nsclspectcl/>
18. Mukhin K.N. Eksperimental'naya yadernaya fizika [Experimental Nuclear Physics. Vol. 1-3. 5th ed., revised and expanded] Moscow: Atomizdat.- 1993. – p.1096. [In Russian]
19. Nauruzbayev D. K., Goldberg V. Z., Nurmukhanbetova A. K., Golovkov M. S. et al. Structure of 20Ne states in resonance 16O+ α elastic scattering // Phys. Rev. C. – 2017. – V. 96. – P. 014322. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.96.014322>
20. Nurmukhanbetova A.K., Goldberg V. Z., Nauruzbayev D. K., Golovkov M. S. et al. Evidence for α -cluster structure in 21Ne in the first measurement of resonant 17O+ α elastic scattering. // Phys. Rev. C. – 2019. – V. 100. – P. 062802(R). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.100.062802>
21. Goldberg V.Z., Nurmukhanbetova A.K., Volya A., Nauruzbayev D.K. et al. α -cluster structure in 19F and 19Ne in resonant scattering. // Phys. Rev. C. – 2022. – V. 105. – P. 014615. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.014615>
22. Nurmukhanbetova A.K., Goldberg V.Z., Volya A., Nauruzbayev D.K. et al. R-matrix analysis of 22Ne states populated in 18O(α , α) resonant elastic scattering. // Phys. Rev. C. – 2024. – V. 109. – P. 024607. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.109.024607>

Сведения об авторах:

Наурузбаев Д.К. – автор для корреспонденции, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник в частном учреждении Nazarbayev University Research and Innovation System, проспект Кабанбай батыра, 53, 010000, Астана, Казахстан.

Тихонов А. – PhD, ассоциированный профессор School of Science and Humanities, Nazarbayev University, проспект Кабанбай батыра, 53, 010000, Астана, Казахстан.

Серикбаева Г.Е. – PhD студент School of Science and Humanities, Nazarbayev University, член исследовательской группы частного учреждения Nazarbayev University Research and Innovation System, проспект Кабанбай батыра, 53, 010000, Астана, Казахстан.

Нурмуханбетова А.К. – PhD, руководитель проекта, Nazarbayev University Research and Innovation System, проспект Кабанбай батыра, 53, 010000, Астана, Казахстан.

Nauruzbayev D.K. – corresponding author, PhD in Physics and Mathematics, research fellow at the private institution Nazarbayev University Research and Innovation System, Kabanbay Batyr Avenue 53, 010000, Astana, Kazakhstan.

Tikhonov A. – PhD, Associate Professor, School of Science and Humanities, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Avenue 53, 010000, Astana, Kazakhstan.

Serikbayeva G.E. – PhD student at the School of Science and Humanities, Nazarbayev University, member of the research group of the private institution Nazarbayev University Research and Innovation System, Kabanbay Batyr Avenue 53, 010000, Astana, Kazakhstan.

Nurmukhanbetova A.K. – PhD, Project Manager, Nazarbayev University Research and Innovation System, Kabanbay Batyr Avenue 53, 010000, Astana, Kazakhstan.

Наурузбаев Д.К. – хат-хабар авторы, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Nazarbayev University Research and Innovation System жеке мекемесінің ғылыми қызметкері, Қабанбай батыр даңғылы 53, 010000, Астана, Қазақстан.

Тихонов А. – PhD, School of Science and Humanities, Nazarbayev University қауымдастырылған профессоры, Қабанбай батыр даңғылы 53, 010000, Астана, Қазақстан.

Серикбаева Г.Е. – School of Science and Humanities, Nazarbayev University PhD докторанты және Nazarbayev University Research and Innovation System жеке мекемесінің зерттеу тобының мүшесі, Қабанбай батыр даңғылы 53, 010000, Астана, Қазақстан.

Нурмуханбетова А.К. – PhD, жоба жетекшісі, Nazarbayev University Research and Innovation System, Қабанбай батыр даңғылы 53, 010000, Астана, Қазақстан.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).