

С. А. Крупко^{1,*}, С. Г. Белогуров^{1,2}, А. А. Безбах^{1,3},
Л. В. Григоренко^{1,2,4}, М. С. Головков^{1,3}, А. В. Горшков¹,
В. А. Горшков¹, Г. Каминьски¹, А. Г. Князев¹,
Е. Ю. Никольский^{1,4}, Ю. Л. Парфенова¹,
С. А. Рымжанова¹, Р. С. Слепнев¹, С. В. Степанцов¹,
Г. М. Тер-Акопьян^{1,3}, А. С. Фомичев^{1,3}, В. Худоба¹,
П. Г. Шаров¹

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА **ACCULINNA-2**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва

³ Государственный университет «Дубна», Дубна

⁴ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва

* E-mail: krupko@jinr.ru

Крупко С. А. и др.

P13-2023-63

Особенности конструкции и характеристики фрагмент-сепаратора ACCULINNA-2

Представлено обсуждение конструкции всех основных подсистем установки ACCULINNA-2: компонентов линии первичного пучка и оборудования для его диагностики, производящей мишени, поглотителя первичного пучка, оборудования для транспортировки, очистки и диагностики вторичного пучка, высокочастотного фильтра для дополнительной очистки пучка, криогенной физической мишени, переднего спектрометра, автоматизированной системы управления. Приведены характеристики вторичных пучков: угловое и пространственное распределения в финальном фокусе, качество идентификации ионов по спектру ΔE -ToF и выход искоемых изотопов при настройках на несколько энергий, полученные в ходе экспериментов 2018–2020 гг. на первичных пучках ^{11}B , ^{15}N , ^{32}S при настройке на вторичные пучки ^8He , ^9Li , ^{11}Li , ^{10}Be , ^{27}S и ^{26}P , проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами транспортировки вторичных пучков. Показано, что возможно проведение экспериментов с легкими экзотическими ионами при высокой точности идентификации и измерения параметров налетающего иона на конденсированных мишенях из изотопов водорода и гелия.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2023

Krupko S. A. et al.

P13-2023-63

Design and Performance of the Fragment Separator ACCULINNA-2

A systematic discussion is given of the design of all key subsystems of the ACCULINNA-2 facility: components of the primary beam line and beam diagnostics, producing target, primary beam absorber, equipment for transport, cleaning and diagnostics of the secondary beam, RF-filter for additional beam cleaning, cryogenic physical target, forward spectrometer, automated control system. The characteristics of the secondary beam are presented: angular and spatial distribution in the final focus, identification quality of ions by ΔE -ToF diagram and output of the desired isotopes at the settings to multiple energies, obtained during the experiments in 2018–2020 on primary beams of ^{11}B , ^{15}N , ^{32}S when set to secondary beams of ^8He , ^9Li , ^{11}Li , ^{10}Be , ^{27}S , and ^{26}P . Comparison with calculations of secondary beam transport has been performed. There is a possibility to carry out experiments with light exotic ions at high accuracy of detection and measurement of the parameters of the incident ion on condensed hydrogen and helium targets.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Фрагмент-сепаратор (ФС) ACCULINNA-2 — одна из ведущих установок ЛЯР — предназначен для изучения структуры легких экзотических ядер и редких каналов их распада. Установка работает в комплексе с циклотроном У-400М (U-400M) [1], производящим пучки стабильных легких изотопов. Реакции фрагментации или перезарядки ядер первичного пучка на бериллиевой производящей мишени приводят к образованию вторичных нейтронно- и протонно-избыточных радиоактивных пучков с энергией в несколько десятков МэВ/нуклон. Далее вторичные пучки взаимодействуют с физической мишенью, на которой рождаются исследуемые экзотические ядра.

При работе с ионами указанных энергий наиболее полная информация об образовании и распаде экзотических ядер может быть получена при регистрации максимального числа продуктов реакции, включая ядро отдачи. Необходимость регистрации последнего определяется использование в экспериментах на ФС ACCULINNA-2 легких физических мишеней, состоящих из изотопов водорода или гелия. В происходящих на физической мишени прямых реакциях в обратной кинематике (перезарядки, срыва или подхвата, а также передачи одного или нескольких нуклонов) заселяются возбужденные состояния изучаемых экзотических ядер.

В мире имеется несколько исследовательских центров, где получают радиоактивные пучки при низких энергиях (до 100 МэВ/нуклон) методом сепарации на лету. Среди них FRIB (Michigan State University (MSU), США) [2], GANIL (Франция) [3], RNC (RIKEN, Япония) [4], INFN-LNS (Италия) [5]. В этих лабораториях решается свой круг специфических задач, во многом определяемый энергией вторичных пучков. Так, в MSU значительный акцент сделан на исследованиях ядер с $Z \geq 16$ [6]. В GANIL большое внимание уделяется измерениям радиусов ядер, сечений взаимодействия, и в основном рассматриваются реакции на тяжелых мишенях [7], хотя проводятся исследования и на легких мишенях, например, водородной [8]. RIKEN перекрывает диапазон пучков ФС ACCULINNA-2 как по доступным ядрам, так и по интенсивности и энергии. Однако экзотические ядра и механизмы реакций, на которые нацелены наши исследования, занимают в научной программе RIKEN лишь малую часть. Поэтому, с одной стороны, RIKEN не составляет конкуренции систематическим объемным исследованиям, выполняемым в нашей лаборатории, с другой стороны, имеется возможность независимой проверки наиболее важных наблюдений, сделанных в любой из двух лабораторий.

Разработка ФС ACCULINNA-2 основана на опыте, полученном при работе на его предшественнике ФС ACCULINNA [9, 10], и направлена на улучшение параметров, в частности, расширение энергетического диапазона, углового и импульсного захватов, повышение импульсного разрешения и качества идентификации ионов радиоактивных пучков. Концепция ACCULINNA-2 [11] была разработана в ЛЯР, сама установка была построена компанией SigmaPhi [12] и начала работу в 2017 г. Эксперименты на ФС ACCULINNA-2 проводятся с 2018 г.

При создании ФС ACCULINNA-2 были установлены следующие проектные условия и требования, учитывающие возможности циклотрона У-400М, ожидаемые после ведущейся в настоящее время модернизации. Первичные пучки имеют $Z < 16$, кинетическую энергию от 30 до 55 МэВ/нуклон и интенсивность до 10^{13} частиц/с, размер пятна первичного пучка на производящей мишени 0,2 см, эмиттанс первичного пучка 15π мм·мрад. Линия вторичного пучка должна работать с энергией в интервале 15–40 МэВ/нуклон, обеспечивать импульсный захват $\pm 6\%$, угловой захват (X) 65 мрад \times (Y) 90 мрад, интенсивность до $2 \cdot 10^6$ частиц/с, магнитную жесткость до 3,9 Тл·м. Также необходима высокая степень очистки вторичного пучка.

Оборудование сепаратора должно быть вписано в существующее здание. Должна быть обеспечена радиационная безопасность персонала и низкий фон в экспериментальном помещении, расположенном за пределами ускорительного зала. Управление ФС, мониторинг и управление его подсистемами должны быть автоматизированы. В связи с большим энергетическим, угловым и координатным разбросом вторичных ионов при проведении экспериментов необходимо проводить измерения координат и импульсов для каждого налетающего на физическую мишень иона.

На сегодня уже опубликован ряд работ [13–15], где обсуждаются основные задачи, разработанная ионно-оптическая схема, планируемые характеристики установки ФС ACCULINNA-2 и некоторые проведенные эксперименты. Данная работа посвящена последовательному обсуждению конструкции и особенностей реализации основных подсистем установки ACCULINNA-2: компонентов линии первичного пучка и оборудования для его диагностики производящей мишени, поглотителей первичного пучка, оборудования для транспорта, очистки и мониторинга вторичного пучка, высокочастотного фильтра для дополнительной очистки пучка, реакционной камеры и физической мишени, переднего спектрометра, автоматической системы мониторинга и управления (АСУ) как вакуумной и газовой системами, так и питанием пучковой оптики и детекторов.

В работе представлены характеристики вторичных пучков, полученных в ходе экспериментов 2018–2020 гг. на первичных пучках ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон), ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон), ^{32}S (52,7 МэВ/нуклон) при настройке на вторичные пучки ^8He , ^9Li , ^{11}Li , ^{10}Be , ^{27}S и ^{26}P , приводится сравнение экспериментально достигнутых результатов с расчетами транспортировки вторичных пучков.

Показано, что имеется возможность проведения уникальных экспериментов на пучках легких экзотических ядер с точной идентификацией налетающего иона и измерением его кинематических параметров на мишенях из изотопов водорода и гелия.

1. ЛИНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПУЧКА

Вывод пучка ионов из циклотрона У-400М осуществляется путем перезарядки на фольге и транспортировки через экранирующий канал, после которого пучок имеет сечение, вытянутое по горизонтали. Далее следует ряд квадрупольей, фокусирующих пучок, и раздающий магнит. Горизонтальные апертуры квадрупольей снижаются по ходу пучка от 14 см на выходе из экранирующего канала до 6 см на входе в раздающий магнит, вертикальные апертуры составляют 6 см.

За раздающим магнитом начинается линия первичного пучка ФС ACCULINNA-2, предназначенная для транспортировки пучка до произво-

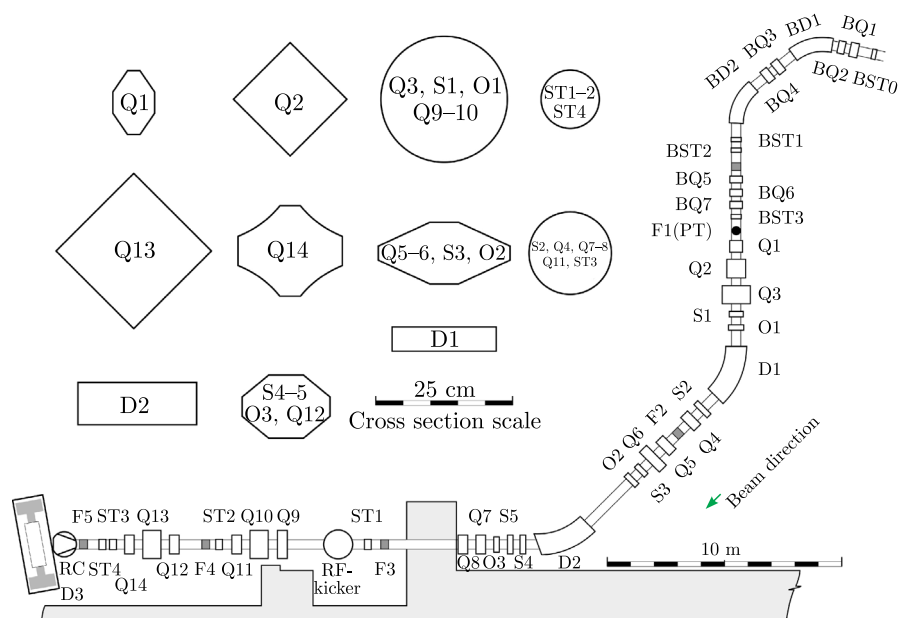


Рис. 1. Схема линии пучка ACCULINNA-2 (правая и нижняя часть рисунка). Размеры изображенных объектов пропорциональны их действительным габаритам. Элементы от BST0 до BST3 образуют линию первичного пучка. Линия вторичного пучка включает в себя элементы от производящей мишени (PT) в фокусе F1 до реакционной камеры (RC) в конечном фокусе F5. Серыми прямоугольниками обозначены диагностические камеры. В области рисунка, смещенной вверх и влево от схемы линии пучка, показаны сечения ионорода внутри указанных элементов пучковой линии

дящей мишени и фокусировки на ней и включающая в себя два поворотных магнита (BD1, BD2), семь квадрупольей (BQ1–BQ7) и четыре корректирующих диполя (BST0–BST3). Диаметр ионопровода на этом участке 5,5 см, внутри поворотных диполей сечение представляет собой вытянутый по горизонтали прямоугольник $5,5 \times 4$ см. Схема линии первичного пучка показана в верхней правой части рис. 1.

Для настройки и оперативного контроля тока первичного пучка на линии применяются дистанционно управляемые цилиндры Фарадея, размещенные на выходе из циклотрона (FC1), после раздающего магнита (FC2), после поворотного магнита BD1 (FC3) и после производящей мишени (FC4). Цилиндры вводятся в рабочее положение пневмоприводами, имеют водяное охлаждение и оборудованы постоянными магнитами, обеспечивающими возвращение электронов вторичной эмиссии на корпус цилиндра, что согласно оценкам позволяет измерить ток пучка с точностью не хуже 10%.

1.1. Производящая мишень. В области фокальной плоскости сепаратора F1 компактно размещаются устройства, объединенные в узел производящей мишени (далее ПМ) и описанные ниже в порядке следования по пучку.

1. Профилومتر, предназначенный для контроля наведения и фокусировки пучка на ПМ, состоит из двух взаимно перпендикулярных рядов проволочек из нержавеющей стали, расположенных с шагом 1,33 мм и перекрывающих область 20×20 мм. Для считывания с проволочек вызванного пучком тока вторичной электронной эмиссии используется многоканальный измеритель слабых токов POLAND [16]. Головка измерителя смонтирована на пневмоприводе и помещается на 21 см выше по пучку от положения плоскости ПМ.

2. Система ограничивающих пучок охлаждаемых диафрагм, включающая сменную стационарную диафрагму с диаметром отверстия 1,2 см и переключаемые дополнительные диафрагмы, установленные на четырехпозиционном флажковом механизме с набором диаметров от 0,2 до 0,7 см. Все диафрагмы имеют рабочие части из меди и охлаждаются водой.

3. Узел вращения тела мишени с жидкостным охлаждением (см. рис. 2). Тело ПМ из бериллия выполнено в форме диска толщиной от 0,05 до 0,25 см, закрепленного на омываемой изнутри охлаждающей жидкостью (ОЖ) чашке узла. Вращение передается от шкива ременного привода на внутреннюю часть вакуумной оболочки узла, соединенную с внешней неподвижной частью через магнитно-жидкостное уплотнение. Жидкостный объем узла имеет центральную неподвижную часть, уплотненную с подвижной частью через манжету из полиуретана или высокомолекулярного полиэтилена (UHMW PE).

ОЖ на основе моноэтиленгликоля с антикоррозийными добавками циркулирует по контуру бак – насос – узел вращения – теплообменник – бак. Замкнутый контур необходим для снижения давления в узле вращения и ограничения загрязнения и коррозии системы.

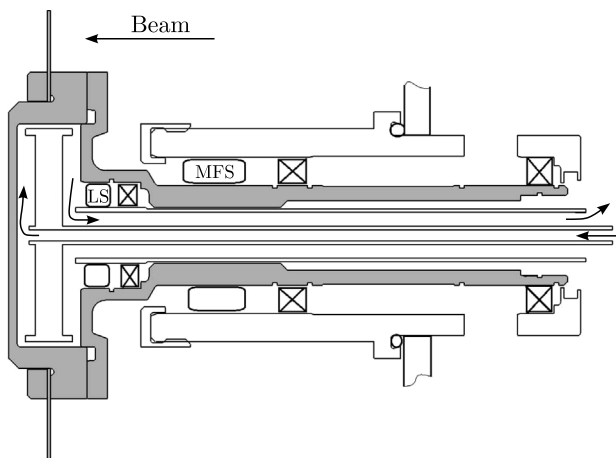


Рис. 2. Узел вращения ПМ. Бериллиевый диск, в который попадает пучок, образует тело мишени. Вращающаяся часть обозначена серым цветом. Поток охлаждающей жидкости показан стрелками. Герметичные подшипники обозначены перечеркнутыми наискось прямоугольниками. MFS обозначает магнитно-жидкостное уплотнение, LS — манжетное уплотнение

Проектная тепловая нагрузка на узел вращения составляет 2 кВт. С учетом того, что в используемой мишени выделяется не более 30% энергии пучка, допустимая по проекту тепловая нагрузка обладает более чем двукратным запасом даже с учетом ведущейся в настоящее время модернизации ускорителя У-400М. Максимальная долговременная тепловая нагрузка на ПМ, зафиксированная в экспериментах, составляла 700 Вт, суммарная наработка на 2 имеющихся взаимозаменяемых узла вращения достигла порядка 6000 ч при скорости вращения до 25 об/с, при этом нарушений работоспособности узлов не наблюдалось.

4. Измеритель тока первичного пучка, прошедшего через мишень, собран на основе цилиндра Фарадея FC4, к которому прикреплен держатель танталовой фольги толщиной 4 мкм. Фольга и FC4 находятся в электрическом контакте и подключены ко входу пикоамперметра Keithley 6485. Для мониторинга пучка измеряется средний ток с фольги, установленной на пути пучка. Период записи тока в лог-файл АСУ варьируется от 1 до 100 с.

Измеряемый ток пропорционален интенсивности пучка, но его величина определяется вторичной и тепловой эмиссией электронов, зависит от заряда и энергии ионов пучка, а также от интенсивности теплопотерь. Поэтому необходима калибровка тока фольги как меры тока пучка. Для калибровки на место фольги дистанционно вводится FC4. Кроме того, FC4 используется для оценки эффективности транспорта пучка. Сравнение токов, измеренных FC1 и FC4 при апертуре диафрагмы $\varnothing 0,5$ см, показывает, что, например, для пучков ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон) и ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон)

полная эффективность транспорта и фокусировки на ПМ выведенного из циклотрона пучка достигает 85%.

Все описанные выше устройства компактно расположены в специальной многосекционной вакуумной камере, позволяющей быстро заменять каждое устройство или узел ПМ целиком.

1.2. Поглотители первичного пучка. Линия вторичного пучка ФС настроена на желаемый вторичный изотоп, поэтому оставшийся после прохождения ПМ первичный пучок попадает на стенки элементов линии вторичного пучка, где поглощается, выделяя значительную энергию. Поглощение первичного пучка распределяется в основном между диафрагмой на входе в диполь D1, боковыми стенками камеры D1 и диафрагмой на выходе из D1. На эти детали приходится более 60% тепловой нагрузки с возможной компактной локализацией, поэтому (для облегчения отвода тепла) они выполнены из меди и снабжены водяным охлаждением.

На рис.3 показано сечение D1, иллюстрирующее расположение и устройство поглотителей. Камера D1 имеет двойные боковые стенки, обеспечивающие водяное охлаждение внутренних медных поглотителей, в которых останавливается первичный пучок. Для уменьшения количества примесей, рождаемых первичным пучком в случае получения протонно-

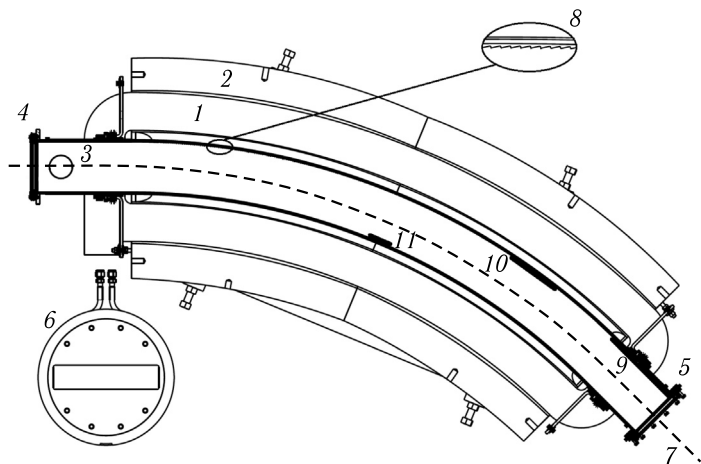


Рис. 3. Разрез дипольного магнита D1 с зонами остановки первичного пучка: 1 — обмотка; 2 — ярмо магнита; 3 — вакуумная камера; охлаждаемые медные диафрагмы на входе 4 и выходе 5 магнита; 6 — вид на охлаждаемую диафрагму поперек пучка; 7 — ось вторичного пучка; 8 — увеличенный вид изрезанной зубьями поверхности охлаждаемого поглотителя первичного пучка; 9 — область остановки первичного пучка ^{20}Ne при настройке тракта на вторичный пучок ^{17}Ne с энергией 47,5 МэВ/нуклон; 10 — область остановки первичного пучка ^{20}Ne при настройке тракта на вторичный пучок ^9C с энергией 25,8 МэВ/нуклон; 11 — область остановки первичного пучка ^{15}N при настройке тракта на вторичный пучок ^{11}Li с энергией 35,9 МэВ/нуклон

избыточных изотопов, стенка D1 с большим радиусом выполнена в форме зубцов (см. рис. 3). Такая форма призвана уменьшить вероятность попадания в линию вторичного пучка летящих под малыми углами высокоэнергичных продуктов взаимодействия первичного пучка со стенкой камеры магнита.

При проектировании сепаратора заложена возможность установки всех диафрагмирующих элементов в исполнении как для нейтронно-, так и для протонно-избыточных пучков. Первое исполнение характеризуется значительной толщиной и стенками отверстий, параллельными пучку, а второе — острыми и гладкими краями. Отличие обусловлено тем, что нейтронно-избыточные изотопы имеют магнитную жесткость выше, чем у первичного пучка, и потери энергии первичным пучком в толстом поглотителе улучшают очистку, а протонно-избыточные — ниже, вследствие чего замедленный первичный пучок становится наиболее значимой примесью ко вторичному пучку.

2. ЛИНИЯ ВТОРИЧНОГО ПУЧКА

В связи с необходимостью вписать ФС в существующее здание и обеспечить вывод вторичного пучка в низкофоновое помещение в основу компоновки ФС ACCULINNA-2 была положена модификация популярной схемы симметричного ахромата, примененной, например, в RIBS/Big-RIBS (RIBF, RIKEN, Япония), FRS/Super-FRS (FAIR, GSI, Германия), A1900 (FRIB, MSU, США). Реализованная схема представлена на рис. 1, там же показаны сечения на различных участках ионопровода. Проектные значения импульсного и углового захватов достигаются за счет больших поперечных сечений магнитных элементов. Обсуждение магнитооптических расчетов можно найти в [14].

Пучок радиоактивных ядер, рождаемых на производящей мишени в F1, захватывается короткофокусным триплетом квадруполей Q1–Q3, проводится через секступоль S1, октуполь O1 и далее транспортируется через дипольный магнит D1, после которого, пройдя через S2 и Q4, попадает в плоскость дисперсионного фокуса F2 (дисперсия составляет $2 \text{ см}/\% B_p$), где установлен ахроматический клин из бериллия. Далее пучок через последовательность Q5, Q6, S3, O2 проходит во второй дипольный магнит D2 и через последовательность S4, S5, O3, Q7, Q8 выходит из зала циклотрона У-400М в низкофоновую экспериментальную кабину.

Вне зала расположен ахроматический фокус F3, за ним стоят корректирующий магнит ST1, высокочастотный (ВЧ) фильтр (RF-kicker, см. п. 2.3), триплет квадруполей Q9–Q11 и ST2, после которых пучок приходит в фокус F4. Затем последовательность Q12–Q14, ST3, ST4 приводит пучок в ахроматический фокус F5, в котором в цилиндрической реакционной камере диаметром 100 см и высотой 40 см устанавливается физическая мишень. Ось цилиндрической камеры ориентирована вертикально.

Таким образом, ACCULINNA-2 является асимметричным ахроматом на двух диполях с прямолинейным участком, выводящим вторичный пучок из

циклотронного зала в низкофоновую зону. Все магниты как первичной, так и вторичной линий работают при комнатной температуре.

Юстировка всех элементов установки и контроль геометрической стабильности выполняется с помощью лазер-трекера LEICA AT401 и ПО Polyworks, что обеспечивает точность ± 100 мкм.

Магнитная система ФС настраивается на получение максимальной интенсивности заданного изотопа с фокусировкой на физической мишени при условии обеспечения приемлемой чистоты пучка. Большой эмиттанс транспортируемого вторичного пучка приводит к необходимости использования широкоапертурного ионопровода и создания требуемого магнитного поля в достаточно протяженных областях пространства, что требует магнитов большого размера. Например, один из наиболее тяжелых элементов — квадруполь Q13 — имеет апертуру $\varnothing 24$ см, массу 5,5 т и позволяет обеспечить постоянный в пределах 0,33 % градиент поля в области диаметром 24 см. Использование мультипольных магнитов позволяет улучшить эффективность транспорта вторичного пучка с $Z > 5$ на 10–20 % за счет уменьшения аберраций.

2.1. Диагностические боксы. На позициях фокусов F2–F4 вторичного пучка установлены так называемые диагностические боксы (ДБ) — вакуумные камеры с портами, имеющие размер $30 \times 30 \times 50$ см, 7 портов стандарта ISO-K DN100 и 4 ISO-K DN160. Предусмотрена возможность установки в каждой ДБ до четырех пневмоприводов или шаговых двигателей для введения на пучок различного диагностического оборудования и поглотителей.

Идентичная камера установлена на трассе первичного пучка перед последним триплетом квадруполей BQ5–BQ7. Непосредственно перед всеми ДБ, кроме расположенного в фокусе F4, размещены шибберные задвижки и вакуумное оборудование, позволяющие секционировать вакуумный объем ионопровода. Перед ДБ в фокусах F3 и F5 имеются гальванические развязки частей ионопровода, лежащих выше и ниже по пучку.

2.2. Щели и клинья в линии вторичного пучка. Помимо описанного ниже оборудования для диагностики вторичного пучка в некоторых ДБ установлены устройства диафрагмирования и замедления вторичного пучка.

В дисперсионном фокусе F2 установлена диафрагма с вытянутым по горизонтали прямоугольным отверстием $13,6 \times 4,8$ см, на которой в тепловом контакте закреплен ахроматический бериллиевый клиновидный поглотитель. Доступны поглотители с номинальными толщинами в середине — 500 мкм (угол 0,89 мрад), 750 мкм (угол 1,34 мрад), 1000 мкм (угол 1,79 мрад) и далее до 3000 мкм с шагом 500 мкм. Толщины поглотителей отличаются в каждой точке от проектных значений не более чем на 20 мкм. Для ограничения захвата сепаратора по жесткости предусмотрены подвижные шторки, формирующие вертикальную щель. Правая и левая шторки позиционируются независимо и имеют горизонтальный ход 6,8 см.

В ахроматическом фокусе F3 установлена диафрагма размером 140×60 мм, а шторки имеют горизонтальный ход во всю ширину диафрагмы. Здесь положение иона на горизонтальной оси находится в зависимости от $A^{5/2}/Z^{3/2}$. Это соотношение является результатом комбинации $B_p - \Delta E - B_p$ очистки при прохождении D1, затем потерь энергии в поглотителе и далее прохождения D2.

В фокусе F4 предусмотрена установка горизонтальной щели с регулируемым по вертикали положением шторок, необходимой при работе с ВЧ-фильтром. Для привода всех шторок используются присоединенные через вакуумный интерфейс шаговые двигатели с дистанционным управлением. Шторки изготовлены из нержавеющей стали в двух вариантах: для протонно- и нейтронно-избыточных вторичных пучков.

2.3. Высокочастотный фильтр. Сразу за фокусом F3 установлен изготовленный SigmaPhi [12] в сотрудничестве с NTG, QUI и Cosylab высокочастотный (ВЧ) фильтр. Этот прибор предназначен для удаления с основной траектории вторичного пучка всех ионов, движущихся со скоростью, значительно отличающейся от скорости полезного протонно-избыточного иона. Очистка происходит за счет подбора фазы высокочастотных колебаний электрического поля в зазоре, через который проходит пучок так, чтобы полезный ион проходил на гребне волны. Корректирующие магниты ST1 и ST2 служат для компенсации вертикального смещения

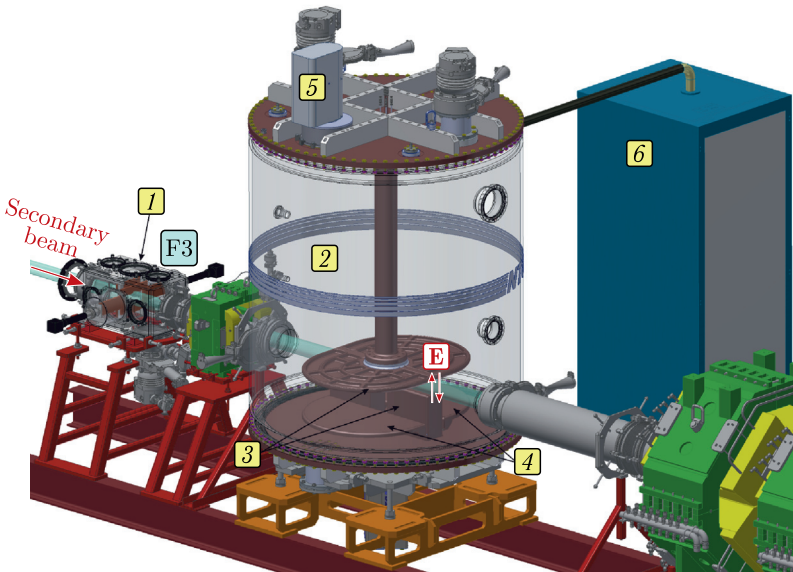


Рис. 4. Компонка F3 и устройство ВЧ-фильтра: 1 — камера с подвижными горизонтальными шторками и времяпролетным детектором; 2 — оболочка ВЧ-фильтра; 3 — основные электроды; 4 — электроды грубой настройки; 5 — механизм точной подстройки; 6 — ВЧ-усилитель

пучка электрическим полем в ВЧ-фильтре. Описание принципа на примере аналогичного устройства см. в [17].

Общий вид ВЧ-фильтра показан на рис. 4. В основе конструкции лежит коаксиальная полость, имеющая образованную плоскими круглыми электродами сосредоточенную емкость на конце центрального электрода. Механизм грубой подстройки частоты нарушает осевую симметрию, поскольку реализуется изменением геометрии нижнего электрода, заключающемся в синхронном вертикальном движении двух круговых сегментов при неподвижном положении прямоугольной центральной части размером 70×12 см. Центральная часть нижнего электрода образует постоянный зазор высотой 7 см, через который проходит пучок. ВЧ-фильтр гальванически развязан с основным ионопроводом. В фокусе F4 предусмотрена горизонтальная щель с регулируемым по вертикали положением шторок, обеспечивающая поглощение нежелательных ионов, покинувших главную траекторию после прохождения ВЧ-фильтра. Пример расчета эффективности очистки с помощью ВЧ-фильтра можно найти в [14].

После установки прибора были выполнены тесты на добротность, а также испытания с ручным управлением на высокой мощности в импульсном режиме со скважностью 2%. Например, при частоте 15,11 МГц и прямой мощности 9,5 кВт измерено значение $Q = 7200$. Для сравнения укажем, что из электродинамических расчетов, выполненных разработчиком, следует, что амплитуда напряжения между отклоняющими электродами при частоте 14,482 МГц и прямой мощности 9,907 кВт должна достигнуть 129,7 кВ при добротности $Q = 6613$.

В настоящее время ведется наладка системы охлаждения резонатора, автоматизация управления ВЧ-фильтром и разработка защиты от рентгеновского излучения. Ввод устройства в эксплуатацию будет осуществлен по завершении реконструкции циклотрона У-400М.

2.4. Диагностика вторичного пучка. Диагностика вторичного пучка осуществляется детектором пучковых частиц путем регистрации каждого налетающего иона, что позволяет получать детальные пространственные и импульсные распределения пучка в области фокуса F5, где расположена физическая мишень. Детектор пучковых частиц, подробно описанный в [18], состоит из двух времяпролетных и двух трековых станций. В основе каждой из времяпролетных станций лежит сцинтилляционный пластик BC-418 толщиной от 25 до 250 мкм, считываемый четырьмя ФЭУ Hamamatsu R7600U-200. Пластик, матированный с обеих сторон, образует одно из оснований светособирающего полого цилиндрического объема. Другое основание образовано пленкой из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм. Такая же пленка покрывает внешнюю сторону пластика. Образующая поверхность светособирающего объема высотой 3 см покрыта зеркальным отражателем, за исключением той части, которая занята фотокатадами ФЭУ (см. рис. 5, а).

Две времяпролетные станции расположены выше по пучку от физической мишени в диагностических камерах в фокусах F3 и F5 на расстоянии 12,35 м друг от друга. Они позволяют получить информацию как о времени

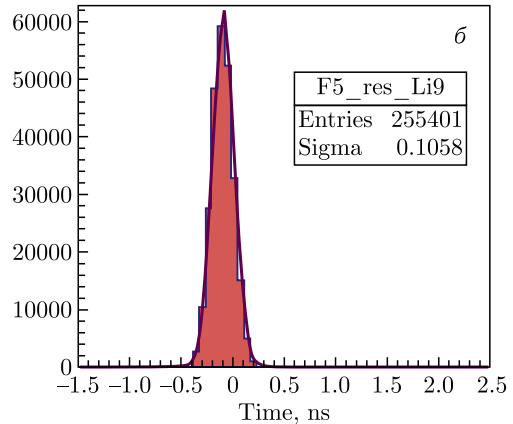
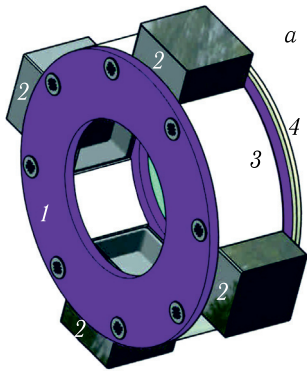


Рис. 5. а) Времяпролетный сцинтилляционный детектор: 1 — прижимное кольцо с входным окном из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм; 2 — ФЭУ; 3 — сцинтилляционная пластина; 4 — прижимное кольцо с выходным окном из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм. б) Распределение величины $\Delta = (T_1 + T_3)/2 - (T_2 + T_4)/2$ (разность времен между парами противостоящих ФЭУ) для времяпролетной станции, расположенной в фокусе F5, для пучка ${}^9\text{Li}$

пролета каждого иона, так и о величине потерь энергии в сцинтилляторе, что дает возможность идентифицировать ион и измерить его кинетическую энергию.

Временная привязка, формируемая i -й времяпролетной станцией, определяется в простейшем случае как $T_i = 1/4 \sum_{j=1}^4 T_{ij}$, где T_{ij} — временная метка с j -го ФЭУ i -й станции. Для измерения времени пролета необходимо прокалибровать задержку D между временными привязками, формируемыми двумя времяпролетными станциями. Процедура калибровки описана в [18].

Временное разрешение станции можно определить по распределению следующей, построенной из временных меток i -й станции, величины: $\Delta_i = (T_{i1} + T_{i3})/2 - (T_{i2} + T_{i4})/2$. Для частичной компенсации зависимости времени сбора света от координат точки прохождения ионом сцинтилляционной пластины временные отметки с ФЭУ, расположенных напротив друг друга, входят в выражение с одним знаком. Полученное таким образом разрешение составляет для разных ионов от 80 до 200 пс (RMS), (см. рис. 5, б). Заметный вклад в полученное разрешение вносят зависимость формы сигнала от точки прохождения иона и некомпенсированная использованием формирователя со следящим порогом зависимость момента формирования временной привязки от амплитуды.

В области фокуса F5 после второй времяпролетной станции на 93,8 см выше по пучку от физической мишени расположена первая трековая станция. Вторая такая же станция расположена в реакционной камере на 27 см выше по пучку от физической мишени. Каждая станция представляет

собой объем, заполненный газом CF_4 под давлением и при температуре окружающей среды, и состоит из следующих слоев по ходу пучка: вакуумное окно из каптона 25,4 мкм, катод из нержавеющей стали 6 мкм, массив из 32 вертикальных вольфрамовых проволочек диаметром 20 мкм, расположенных с шагом 0,125 см, два катода, массив из 32 горизонтальных проволочек, катод, вакуумное окно. Протяженность станции вдоль пучка составляет 8,5 см.

Качество идентификации ионов в детекторе пучка обсуждается в соответствующем разд. 7.2. Точность идентификации определяется в первую очередь погрешностью измерения энергетических потерь, которая зависит от многократного рассеяния ионов, неравномерности толщины пластика (± 10 мкм), неоднородности светосбора (т.е. зависимости светосбора от места прохождения частицы через пластик).

Анализ экспериментальных данных и моделирование с помощью пакета ExpertRoot [19] показывает (на примере пучка ${}^8\text{He}$ с энергией $E = 21,5$ МэВ/нуклон), что точность восстановления параметров иона в срединной плоскости мишени с помощью детектора пучка определяется следующими значениями (ПШПВ): $\Delta E_{\text{кин}} = 0,28$ МэВ, $\Delta X = \Delta Y = 0,17$ см, $\Delta \Theta_x = \Delta \Theta_y = 5$ мрад.

Детектор пучка интегрирован в систему считывания и сбора данных, реализованную в стандарте VME и основанную на MBS [20, 21], и позволяет справляться с потоком до $2 \cdot 10^6$ частиц/с при частоте следования банчей с циклотрона 14–18 МГц. События, в которых регистрируются более одной пучковой частицы, составляют не более 13% от полного числа событий и отбрасываются при анализе данных.

Упомянутая выше система считывания и сбора данных используется также для регистрации сигналов с таких детекторов продуктов исследуемых реакций, как размещенные в реакционной камере телескопы заряженных частиц и расположенные вне камеры в экспериментальной кабине детекторы нейтронов. Указанные детекторы позволяют во многих случаях проводить измерения в полной кинематике как рождения, так и распада исследуемого экзотического иона, получая спектр его состояний методами недостающей и комбинированной массы [22]. Подробное описание детекторов продуктов реакции и методики работы с ними выходит за рамки данной статьи. Некоторые детали можно найти в работах [23, 24].

Для сохранения в экспериментальных данных информации о пучке реализован так называемый пучковый триггер. Каждый n -й ион (n выбирается в диапазоне от 0 до 1024) запускает запись события, в которой содержатся временные отметки и амплитуды каждого ФЭУ времяпролетных станций, значения счетчиков сигналов с каждой из времяпролетных станций, обнуляемые после записи предыдущего события, амплитуды и временные отметки сигналов MWPC, значения микросекундного таймера, позволяющие определить время события относительно глобального времени закрытия файла с данными. Помимо пучкового триггера запись событий инициируется так называемым экспериментальным триггером, формируемым на основе сигналов детекторов продуктов реакций.

3. КРИОГЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МИШЕНЬ

Имеющееся на ФС ACCULINNA-2 криогенное оборудование позволяет получать конденсированные физические мишени из водорода и дейтерия, а также из стабильных изотопов гелия. Для долговременного хранения водорода и дейтерия используются урангидридные ловушки. Подробно работа с криогенными мишенями рассмотрена в [25].

Конструкция мишенной криогенной ячейки показана на рис. 6. Полезный объем ячейки 1 ограничен фольгами 2 из нержавеющей стали толщиной 6 мкм и имеет диаметр 2,5 см. Номинальная толщина ячейки составляет от 0,06 до 0,6 см. Дальнейшее увеличение толщины ячейки привело бы к неприемлемому снижению качества восстановления кинематических характеристик реакции за счет падения точности локализации точки взаимодействия пучкового иона с мишенью.

Ячейка окружена тепловым экраном 3, его внутренний объем геометрически замкнут, но не герметичен. Перпендикулярные пучку окна теплового экрана 4, выполненные из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм, отстоят от окон ячейки на 2 см.

Охлаждение ячейки и теплового экрана осуществляется двухступенчатой криоголовкой Leybold COOLPOWER 7/25. Теплового экран подсоединен к большому цилиндру криоголовки, а ячейка — к меньшему 5. Между нижним торцом меньшего цилиндра и ячейкой размещен резистивный нагреватель 6, а в нижней части корпуса ячейки установлены диодные кремниевые термодатчики 7, что позволяет стабилизировать ячейку при температуре 12–30 К и получать как жидкий, так и твердый водород или дейтерий.

Варьируя геометрической толщиной ячейки, давлением и температурой газа, можно получить желаемую поверхностную плотность водородной мишени в диапазоне до $2 \cdot 10^{22}$ атом/см². Для изотопов гелия из-за недоступности конденсированных фаз поверхностная плотность ограничена значением $1,5 \cdot 10^{20}$ атом/см².

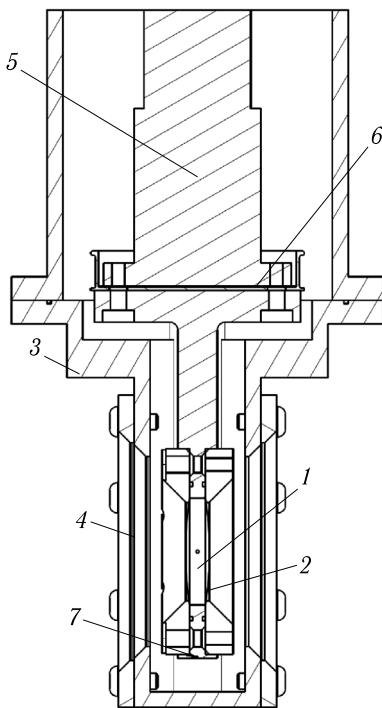


Рис. 6. Физическая мишень: 1 — полезный объем; 2 — фольги из нержавеющей стали; 3 — тепловой экран; 4 — окна теплового экрана; 5 — меньший цилиндр криоголовки; 6 — пленочный нагреватель; 7 — диодный кремниевый термодатчик

Также ведутся работы по созданию новой мишени на жидком тритии. Работы основаны на опыте эксплуатации подобной мишени на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-1 [26]. Новая ячейка, рассчитанная на объем до 1 см^3 жидкого трития (чистота $> 97\%$, активность $< 10^{14}$ Бк), будет окружена двумя слоями фольги из нержавеющей стали толщиной 8,5–10 мкм каждый. Реакционная камера будет вакуумно отделена от ионопровода окном из каптона толщиной 12,5 мкм и диаметром 6 см. Толщина тритиевой мишени может достигать $3 \cdot 10^{21}$ атом/см².

4. ПЕРЕДНИЙ СПЕКТРОМЕТР

При исследовании на ФС ACCULINNA-2 многонуклонных распадов нестабильных протонно- и нейтронно-избыточных ядер, таких как ${}^6\text{Be}$, ${}^8\text{C}$, ${}^{12}\text{O}$, ${}^{16}\text{Ne}$, ${}^{19}\text{Mg}$, ${}^{21}\text{Si}$, ${}^{26}\text{S}$ и ${}^{6,7}\text{H}$, ${}^{10}\text{He}$, ${}^{13}\text{Li}$, ${}^{16-18}\text{Be}$, ${}^{22}\text{C}$, ${}^{26}\text{O}$, возникает необходимость раздельной регистрации каждой из нескольких частиц, летящих под малыми углами к оси пучка. Для разнесения частиц в пространстве, их идентификации и измерения импульсов предназначен передний спектрометр.

Основой переднего спектрометра является дипольный магнит, изготовленный компанией SigmaPhi и введенный в эксплуатацию в 2017 г. Магнит имеет сердечник О-типа размером $325 \times 158 \times 33$ см и седловидные обмотки. Помещаемая в магнит вакуумная камера может иметь ширину до 52 см и высоту до 18 см. Номинальная магнитная индукция составляет 1,2 Тл, эффективная длина поля 53 см. Масса магнита 16 т. Магнит расположен с поворотом вокруг вертикальной оси на 10° (более подробное описание содержится в [14]). В рабочем положении магнит будет устанавливаться за реакционной камерой, присоединенной к вакуумному объему внутри магнита так, что расстояние от мишени до начала полюса магнита составит от 1 до 2 м. Позади магнита внутри вакуумной камеры могут быть установлены детекторы заряженных частиц, а снаружи — стенка нейтронных детекторов [23, 27]. В нерабочем положении магнит откатывают на 4 м по пучку, что дает возможность поставить стенку нейтронных детекторов между ним и реакционной камерой. Прецизионная система перемещения магнита позволяет позиционировать магнит по каждой из осей с точностью лучше 200 мкм.

Рассмотрим пример применения магнита D3, дающий новые экспериментальные возможности. На рис. 7 представлена схема эксперимента для изучения ${}^3\text{H} + 4n$ распада уже полученных [28, 29] резонансных состояний ${}^7\text{H}$ с энергией $E_T = 2,2$ и $5,5$ МэВ над порогом распада ${}^7\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + 4n$. Пучок ядер ${}^8\text{He}$ с энергией 200 МэВ облучает криогенную дейтериевую мишень D_2 толщиной 10^{21} см^{-2} . Телескоп *2a* регистрирует ядра отдачи ${}^3\text{He}$, испущенные из мишени *1* в интервале углов $5-30^\circ$ в системе центра масс реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$. Кольцевым Si-детектором *2b* измеряется угол вылета и удельная потеря энергии ядра ${}^3\text{H}$, обнаруженного в совпадении с сигналом от ядра отдачи ${}^3\text{He}$.

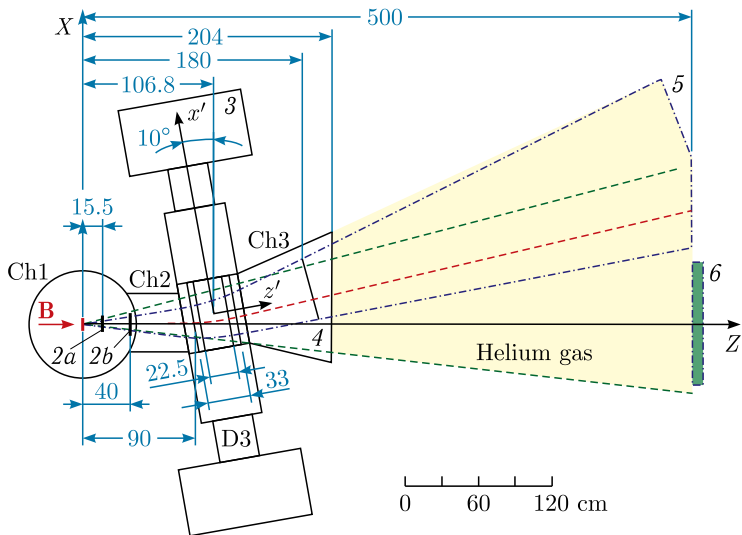


Рис. 7. Схема эксперимента с применением магнита D3 по изучению $4n$ -распада ядер ${}^7\text{H}$, получаемых в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$ на пучке ядер ${}^8\text{He}$ с энергией 200 МэВ: В — пучок; Ch1 — реакционная камера, вмещающая мишень I (дейтерий D₂) и кольцевые кремниевые детекторы 2a, 2b; 3 — магнит D3; Ch2, Ch3 — вакуумные камеры с окнами из нержавеющей стали толщиной 100 мкм; 4, 5 — сцинтилляционные детекторы; 6 — массив нейтронных детекторов

Заряженные частицы, отклоненные диполем D3 (3) от оси пучка, проходят через детекторы 4, установленные перед выходом из камеры Ch3. На расстоянии 5 м от мишени установлены детекторы 5, представляющие собой сцинтилляторы, выполненные из пластика толщиной 100 мкм, которые будут регистрировать заряженные частицы с точностью измерения 0,5 см для координат и 0,2 нс для времени. Нейтронная стенка 6 с размером по оси Z около 1 м и высотой 74 см составлена из пластических сцинтилляторов, описанных в [27].

Численные значения энергии и угла вылета каждой из пяти частиц ${}^3\text{He} + 4n$ распада ${}^7\text{H}$ были определены методом Монте-Карло. Штриховые линии зеленого цвета, исходящие из мишени, показывают размеры прямоугольника в плоскости, перпендикулярной оси Z, в который попадают нейтроны из распада ${}^7\text{H}$. На расстоянии $Z = 500$ см от мишени длина прямоугольника составляет примерно 200 см, высота $Y = 80$ см. Все тритоны распада ${}^7\text{H}$ попадают в сцинтилляционные детекторы 5 при условии, что высота этих детекторов $Y = 80$ см. Две штрихпунктирные линии синего цвета, исходящие из мишени, показывают размеры области, в пределах которой приходят тритоны распада ${}^7\text{H}$. Красная пунктирная линия показывает траекторию оси пучка ${}^8\text{He}$ на пути от мишени до плоскости $Z = 500$ см.

С учетом применения метода комбинированной массы [22] для изучения спектра состояний ядра ${}^7\text{H}$ получены численные значения вероятности событий ${}^3\text{He} + t4n$ и ${}^3\text{He} + t3n$, в которых при регистрации триггера от ${}^3\text{He}$ тритон распада ${}^7\text{H}$ приходит на детекторы 5 вместе с четверкой или тройкой нейтронов, попавших на нейтронную стенку 6. Также получены вероятности событий ${}^3\text{He} + 4n$. С пучком ${}^8\text{He}$ $5 \cdot 10^5$ ион/с оценки дали величины $6,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $4,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для светимости экспериментов по изучению спектров состояний ${}^7\text{H}$ с энергией 2,2 и 5,5 МэВ соответственно.

Планируется оснастить магнит D3 системой детекторов, образующих передний спектрометр. На входе и выходе из магнита будут установлены координатные детекторы, далее в том же вакуумном объеме будет установлен горизонтальный ряд ΔE – ΔE – E детекторов заряженных частиц, позволяющих идентифицировать разведенные магнитным полем частицы и измерять их энергию. При этом будет использоваться не только калориметрическая информация с детекторов заряженных частиц, но и данные о траекториях частиц в магнитном поле.

5. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Для обеспечения безопасной и согласованной работы всех подсистем установки даже при отключении питания, а также для мониторинга множества параметров и синхронизации всех задействованных в эксперименте компьютеров используется автоматизированная система управления (АСУ).

К АСУ подключены следующие подсистемы и элементы инфраструктуры:

- 1) датчики протока деионизованной воды в замкнутых контурах охлаждения магнитов, диафрагм и поглотителей первичного пучка;
- 2) источники питания с мониторами токов для магнитов (управляются отдельным ПК);
- 3) пневмоприводы мониторов первичного пучка, вакуумных вентиляй и шиберов с датчиками положения;
- 4) измерители вакуума и вакуумные насосы, датчики протока жидкости в замкнутом контуре охлаждения производящей мишени;
- 5) датчик вращения и частотный преобразователь производящей мишени;
- 6) логический сигнал положения шибера, расположенного перед ДБ в F1 и управляемого АСУ циклотрона;
- 7) измерители токов первичного пучка;
- 8) шаговые двигатели щелей;
- 9) вентили с датчиками положения и датчики давления газовых систем для многопроволочных пропорциональных камер и криогенной физической мишени;
- 10) контроллер низких температур LakeShore 335, к которому подключены датчики температуры и нагреватели криокамеры, а также нагреватели ловушек для водорода и дейтерия;

11) высоковольтное питание времяпролетных и трековых станций детектора пучка, а также детекторов продуктов реакции.

Система сбора данных с детекторов не связана напрямую с обсуждаемой АСУ.

Построение АСУ опиралось на следующие подходы.

- Разделение функций блокировки и управления/отображения/записи.
- Система блокировок выполнена на аппаратном уровне с помощью программируемых реле с использованием логических линий связи 24 В. В случае аварии время реакции не более 30 мс (до 1 с с учетом времени введения цилиндра Фарадея для перекрытия первичного пучка).

- АСУ генерирует общий сигнал готовности установки A2-ready, разрешающий ввод пучка в установку и учитывающий наличие вакуума, исправность систем охлаждения и питания магнитов, исправность узла вращения мишени. В отсутствие этого сигнала АСУ ускорителя автоматически вводит на пути пучка цилиндр Фарадея FC1 и перекрывает шибер, находящийся перед производящей мишенью.

- Последовательные и параллельные интерфейсы цифровых данных используются для задания желаемых режимов, мониторинга и протоколирования показаний датчиков на ПК. При попытке оператора установки дать команду управления, которая может привести к аварийной ситуации и повреждению оборудования, она будет заблокирована аппаратной частью АСУ, и вся система останется в работоспособном состоянии.

- Графический интерфейс системы, реализованный с помощью LabView, обеспечивает информирование оператора о параметрах работы системы и предупреждает о возникновении нестандартных ситуаций.

- Удаленный мониторинг системы возможен с любого устройства с выходом в интернет через веб-интерфейс. При возникновении нестандартной ситуации в системе предусмотрены настраиваемые оповещения по электронной почте. Реализован безопасный дистанционный доступ для управления.

Опыт эксплуатации АСУ в 2017–2020 гг. показал надежность, безопасность и достаточность реализованного решения на данном этапе. В настоящее время ведется работа по включению в АСУ RF-kicker, добавлению дистанционной смены клина в F2 и снижению участия оператора в наблюдении за работой установки.

6. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

Основным источником радиации при работе ФС ACCULINNA-2 являются поглотители первичного пучка. Для обеспечения допустимого уровня мощности дозы в низкофоновой кабине и других помещениях, примыкающих к залу ускорителя У-400М, была построена бетонная защита ФС и модифицирована защита откатных ворот, ведущих в зал циклотрона.

Дизайн защиты опирался на расчеты, выполненные с помощью пакета программ FLUKA [30, 31]. Достаточность выстроенной защиты подтверждается дозиметрическими измерениями при работе ACCULINNA-2. В качестве примера на рис. 8 показано распределение мощности дозы при одном

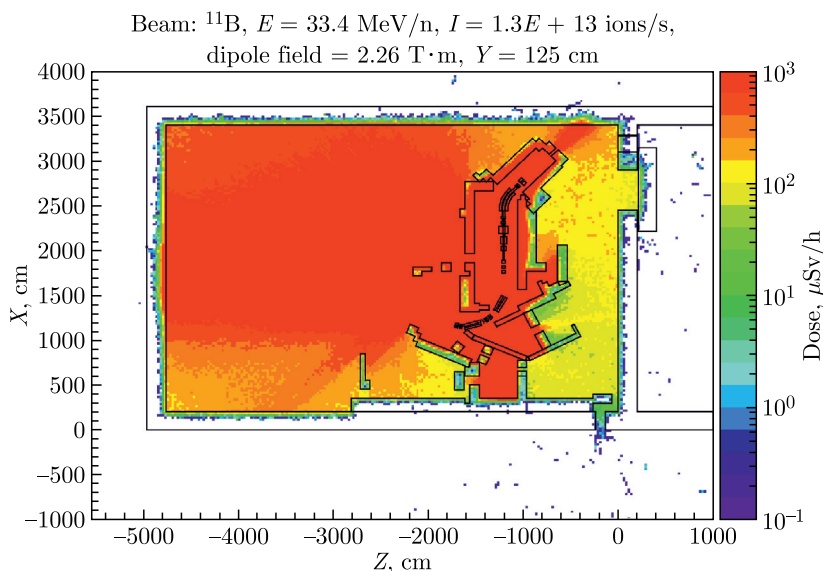


Рис. 8. Распределение мощности дозы при одном из наиболее неблагоприятных режимов работы, когда ФС настроен на ^9Li с энергией 29,0 МэВ/нуклон и первичный пучок ^{11}B с энергией 33,4 МэВ/нуклон останавливается близко к выходу из магнита D1

из наиболее неблагоприятных режимов работы, когда ФС настроен на работу с вторичным пучком ^9Li с энергией 29,0 МэВ/нуклон и первичный пучок ^{11}B с энергией 33,4 МэВ/нуклон останавливается близко к выходу из магнита D1, что ухудшает радиационный фон в зале ускорителя.

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФС ACCULINNA-2

Первая после ввода ACCULINNA-2 в эксплуатацию серия измерений 2018–2020 гг. проводилась с первичными пучками ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон), ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон) и ^{32}S (52,7 МэВ/нуклон), взаимодействовавшими с тонкой бериллиевой мишенью. Были получены как нейтронно-избыточные, так и протонно-избыточные вторичные пучки. Достиженные параметры пучков и условия их получения отображены в таблице.

Первоначальная настройка линии вторичного пучка была выполнена на максимальный выход вторичного изотопа ^8He , получаемого из первичного пучка ^{11}B . Далее для перехода на другие первичные и вторичные пучки устанавливалась желаемая жесткость магнита D2, а остальные магнитные элементы настраивались на максимальный выход искомого иона в F5. Отдельно настраивался магнит D1. Остальные элементы были разделены на три группы, в каждой из которых токи изменялись пропорционально

Максимальный измеренный выход вторичных ионов и их процентное содержание в коктейльном пучке (чистота) при данной настройке

Ион	E , МэВ/нуклон	Первичный пучок	Мишень + клин, мкм	$\pm \Delta p$, %	Выход, (ион/с)/пмкА	Выход ион/ион	Чистота, %
^8He	28,6	^{11}B 33,6 МэВ/нуклон	Ве(1000)+ Ве(1000)	3,25	$4,7 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^{-9}$	95,4
^9Li	25,2			2,00	$1,7 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	97,9
^{11}Li	17,7			3,25	$1,1 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	1,5
^{12}Be	15,1			3,25	$6,1 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^{-10}$	23,3
$^{10}\text{Be}^*$	45,0	^{15}N 49,3 МэВ/нуклон	Ве(1000)+ Ве(1000)	1,25	$2,3 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	78,4
$^{27}\text{S}^{**}$	28,2	^{32}S 52,7 МэВ/нуклон	Ве(500)+ Ве(500)	0,75	$1,6 \cdot 10^1$	$2,6 \cdot 10^{-12}$	0,002
^{26}P	26,7				$8,5 \cdot 10^1$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	0,012
^{25}Si	25,0				$2,9 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	0,56

*Вариации энергии не проводились.
**Основной изотоп, на который проводилась настройка.

(см. схему элементов на рис. 1). Деление на группы обусловлено тем, что, переходя из одной группы в другую, пучок изменял жесткость, пересекая последовательно клин, расположенный в F2, и первую станцию время-пролетного детектора, расположенную в F3. Таким образом, элементы от Q1 до Q4 образовывали первую группу, от Q5 до Q8 — вторую, а от Q9 до Q14 — третью.

7.1. Форма вторичного пучка. На примере вторичного пучка ^8He с энергией 27,5 МэВ/нуклон, полученного из первичного пучка ^{11}B обсудим согласие ожидаемых и наблюдаемых угловых и пространственных распределений ионов в фокусе F5. Для сравнения с расчетом установленные токи магнитных элементов закладывались в расчет тракта по программе MOCADI [32]. Магнитные поля всех магнитов определены по проектным (расчетным) калибровкам, за исключением диполей, для которых имеются соответствующие измерения.

Экспериментальные и расчетные распределения пучка на фазовых плоскостях $X-X'$ и $Y-Y'$ в соответствующих кроссоверах (плоскостях наименьшего сечения пучка по соответствующей оси) показаны на рис. 9. Можно заметить, что расчетные и измеренные значения эмиттанса совпадают с точностью до 15%, при этом положения соответствующих кроссоверов различаются на несколько десятков сантиметров, что говорит о необходимости более качественной калибровки магнитных элементов. Отметим, что в целом расчеты с проектными значениями калибровочных коэффициентов демонстрируют приемлемое для первого приближения согласие с экспериментом.

7.2. Идентификация. Для иллюстрации возможностей идентификации вторичных пучков на рис. 10 показан идентификационный спектр ΔE -ToF с суммой потерь в обоих сцинтилляторах ToF-детектора при настройке на ^{27}S при жесткости $D2 = 1,35 \text{ Тл} \cdot \text{м}$, полученный при взаи-

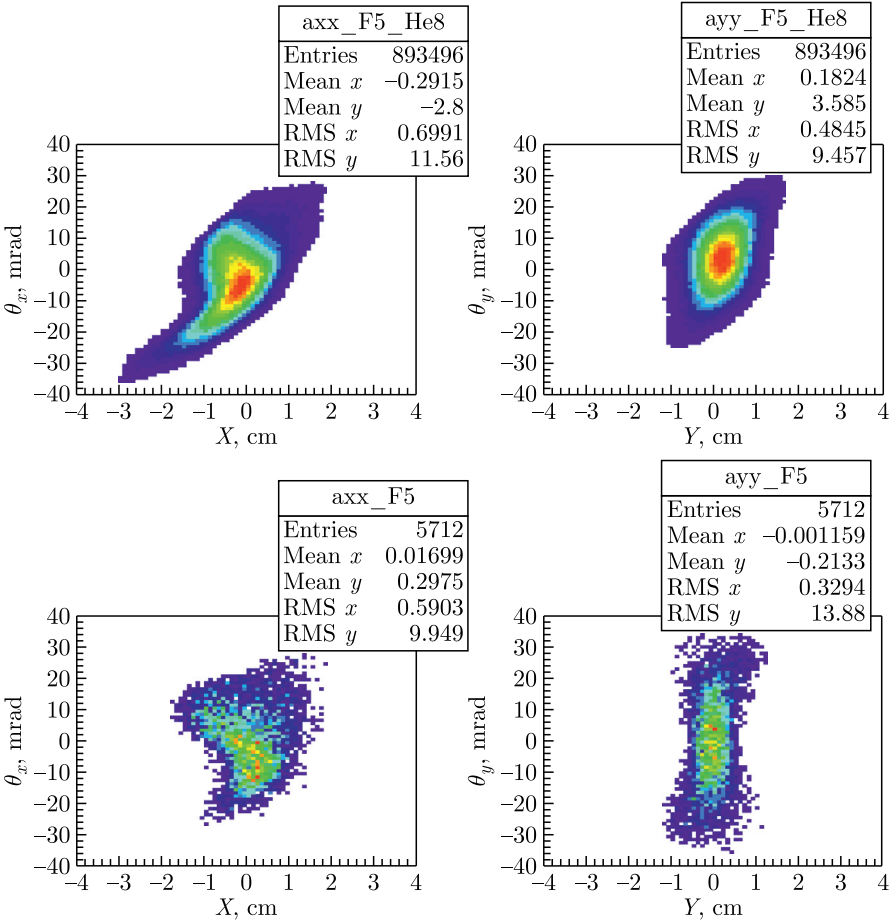


Рис. 9. Экспериментальные (верхний ряд) и расчетные (нижний ряд) распределения вторичного пучка ^8He с энергией 27,5 МэВ/нуклон, полученного из первичного пучка ^{11}B на фазовых плоскостях $X-X'$ (слева) и $Y-Y'$ (справа) в соответствующих кроссоверах вблизи финального фокуса F5. Продольные координаты и значения эмиттансов (RMS) в кроссоверах: $Z_{x \text{ эксп}} = -40$ см, $\varepsilon_{x \text{ эксп}} = 61,5\pi$ мм · мрад; $Z_{y \text{ эксп}} = -20$ см, $\varepsilon_{y \text{ эксп}} = 39,6\pi$ мм · мрад; $Z_{x \text{ расч}} = 0$, $\varepsilon_{x \text{ расч}} = 58,7\pi$ мм · мрад; $Z_{y \text{ расч}} = 75$ см, $\varepsilon_{y \text{ расч}} = 45,7\pi$ мм · мрад

модействии первичного пучка ^{32}S с энергией 52,7 МэВ/нуклон с бериллиевой производящей мишенью толщиной 500 мкм ($\Delta P \pm 1\%$, толщина бериллиевого клина 500 мкм). Видно, что присутствует большое множество вторичных ионов, при этом на краях диаграммы локусы нуклидов хорошо разделены, в то время как в центральной части имеются заметные перекрытия локусов. Наблюдаемая картина говорит о целесообразности дальнейшей очистки пучка с использованием ВЧ-фильтра.

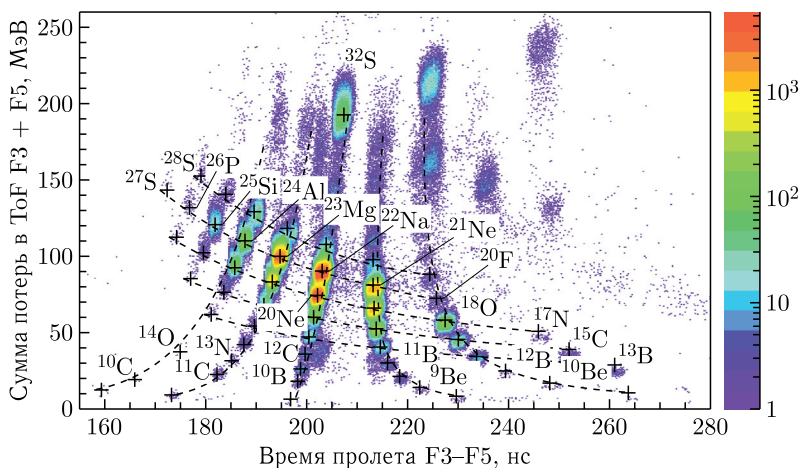


Рис. 10. Идентификационный спектр ΔE -ТоF «коктейля» ионов при настройке на ^{27}S при жесткости $D2 = 1,35 \text{ Тл} \cdot \text{м}$. $\Delta P \pm 1\%$, производящая мишень Be 500 мкм, клин Be 500 мкм, сцинтилляторы ТоF-детектора толщиной по 125 мкм каждый. Первичный пучок ^{32}S с энергией 52,7 МэВ/нуклон. Крестами обозначены расчетные положения центров локусов нуклидов для заданной жесткости $D2$. Обратим внимание на отсутствие событий в локусах нуклидов ^8Be , ^9Be и ^{16}F , не имеющих связанных состояний

На той же диаграмме показаны расчетные положения центров некоторых локусов, полученных при заданной жесткости $D2$. Видно, что наблюдаемые локусы в целом хорошо согласуются с расчетными, однако в области малых значений времени в расчете систематически недооценивается величина энерговыделения, а в области больших значений времени — переоценивается. Вероятно, таким образом проявляется несовершенство использованной математической модели ионизационных потерь $N1$ из $\text{Lise}++$, опирающейся на публикацию [33].

7.3. Выходы вторичных ионов. Для всех исследованных вторичных пучков в фокусе $F5$ проведены измерения выхода и чистоты при нескольких значениях энергии. Измерение интенсивности первичного пучка описано в разд. 1. Флуктуации последовательных значений не превышают $\pm 5\%$, запись тока осуществлялась каждые 10 с. Система считывания и сбора данных регистрировала события от каждого тысячного иона, при этом экспериментальный триггер не использовался. Выход изотопа определялся как доля событий в соответствующем локусе на ΔE -ТоF спектре, умноженная на интеграл импульсов в $F5$ и деленная на интеграл тока первичного пучка.

Результаты показаны на рис. 11 и приведены в таблице с указанием условий получения.

Для пучка ^8He была выполнена грубая подгонка импульсного распределения вторичного иона по форме вида Convolution в программе $\text{Lise}++$ [34]

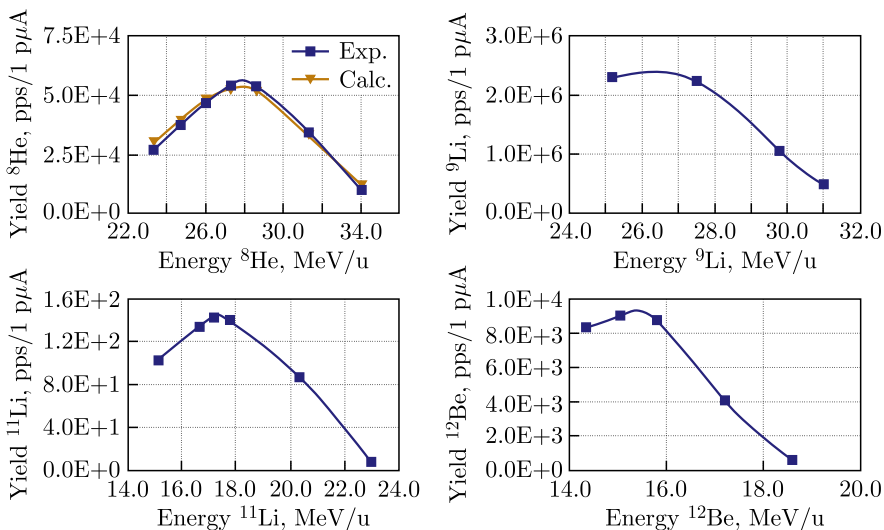


Рис. 11. Зависимость выхода вторичных ионов от энергии, измеренная в F5

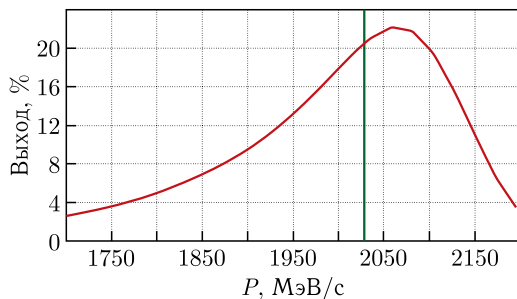


Рис. 12. Импульсное распределение ионов ^8He на входе в производящую мишень, полученное грубой подгонкой для воспроизведения измеренной зависимости от энергии интенсивности ионов ^8He на выходе из ФС, приведенной на рис.11. Вертикальная линия соответствует скорости пучковых частиц

для воспроизведения экспериментально полученной зависимости интенсивности ^8He на выходе из ФС в зависимости от энергии. Результат показан на рис. 12. Подробное исследование выходов вторичных пучков, доступных на ACCULINNA-2, и применимости различных теоретических моделей для описания выходов будет выполнено после завершения реконструкции циклотрона У-400М.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено последовательное обсуждение конструкции всех основных подсистем установки ACCULINNA-2: компонентов линии первичного пучка и оборудования для его диагностики, системы диафрагмирования и про-

изводящей мишени, поглотителя первичного пучка, линии вторичного пучка, системы предметных щелей и клиновидного поглотителя; диагностики вторичного пучка, высокочастотного фильтра для дополнительной очистки пучка, реакционной камеры и криогенной физической мишени, дипольного магнита переднего спектрометра, предназначенного для разделения и измерения продуктов реакции, летящих под малыми углами к направлению пучка, автоматизации мониторинга и управления как вакуумной и газовой системами, так и питанием пучковой оптики и детекторов.

Представлены характеристики вторичных пучков: угловое и пространственное распределения в финальном фокусе, качество идентификации ионов по ΔE -ToF спектру и выход искомым изотопам при настройках на несколько энергий, полученные в ходе экспериментов 2018–2020 гг. на первичных пучках ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон), ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон), ^{32}S (52,7 МэВ/нуклон) при настройке на вторичные пучки ^8He , ^9Li , ^{11}Li , ^{10}Be , ^{27}S и ^{26}P , проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами транспортировки вторичных пучков. Показано, что имеется возможность проведения экспериментов с легкими экзотическими ионами при высокой точности идентификации и измерения параметров налетающего иона на конденсированных мишенях из изотопов водорода и гелия.

Благодарности. Авторы благодарят профессора Ю. Ц. Оганесяна за плодотворные обсуждения научной программы исследований с радиоактивными пучками, С. Н. Дмитриева, С. И. Сидорчука и службу главного инженера ЛЯР за всестороннюю помощь в реализации проекта, В. Бикмана и других сотрудников компании SigmaPhi, внесших важный вклад в создание и запуск установки, а также О. Б. Тарасова за ценные консультации и Д. Бьяаре за значительный вклад в создание АСУ установки.

Работа проводилась при частичной поддержке РФФИ (грант № 22-12-00054) и научной программы НЦФМ по направлению № 8 «Физика изотопов водорода».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. U400M Accelerator. FLNR JINR.
URL: <http://flerovlab.jinr.ru/u400m-accelerator-complex/>.
2. Facility for Rare Isotope Beams at Michigan State University.
URL: <https://frib.msu.edu/>.
3. SPIRAL 2 at GANIL. Caen, France. 2023. URL: <http://ganil-spiral2.eu/>.
4. RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science (RNC).
URL: <https://www.riken.jp/en/research/labs/rnc/>.
5. *Cuttone G., Celona L., Chines F., Cosentino G., Messina E., Re M., Rizzo D., Scuderi V., Tudisco F., Amato A., Calabretta L., De Luca G., Pappalardo A., Passarello S., Rifuggiato D., Rovelli A.* EXCYT: The RIB project at INFN-LNS // Nucl. Instr. Meth. B. 2007. V. 261, No. 1. P. 1040–1043. The Application of Accelerators in Research and Industry. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.142>.

6. *Gade A., Sherrill B.M.* NSCL and FRIB at Michigan State University: Nuclear Science at the Limits of Stability // *Phys. Scripta*. 2016. 4. V. 91, No. 5. P. 053003. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-8949/91/5/053003>.
7. *Lewitowicz M.* Physics with SPIRAL and SPIRAL 2 Status of the EURISOL Project // *Nucl. Phys. A*. 2004. V. 734. P. 645–653; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.01.118>.
8. *Dolégievicz P., Gillibert A., Mittig W., Mougeot X., Obertelli A., de Oliveira F., Ozille M., Robillard P., Roussel-Chomaz P., Savajols H.* A Cryogenic Target for Direct Reaction Studies with Exotic Beams // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2006. V. 564, No. 1. P. 32–37; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2006.03.027>.
9. *Rodin A., Stepansov S., Bogdanov D., Golovkov M., Fomichev A., Sidorchuk S., Slepnev R., Wolski R., Ter-Akopian G., Oganessian Y., Yukhimchuk A., Petrovichuk V., Vinogradov Y., Grischevkin S., Demin A., Zlatoustovskiy S., Kuryakin A., Fil'chagin S., Ilkaev R.* Status of ACCULINNA Beam Line // *Nucl. Instr. Meth. B*. 2003. V. 204. P. 114–118. 14th Intern. Conf. on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to Their Applications. URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01897-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01897-9).
10. *Григоренко Л.В., Головков М.С., Крупко С.А., Сидорчук С.И., Тер-Акопьян Г.М., Фомичев А.С., Худоба В.* Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ // *УФН*. 2016. Т. 186, № 4. С. 337–386. URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2016/4/a/>; <http://dx.doi.org/10.3367/ufne.0186.201604a.0337>.
11. *Fomichev A. S., Ter-Akopian G. M., Chudoba V., Daniel A. V., Golovkov M. S., Gorshkov V. A., Grigorenko L. V., Krupko S. A., Oganessian Y. T., Sidorchuk S. I., Slepnev R. S., Stepansov S. V., Wolski R., Ershov S. N., Lukyanov V. K., Danilin B. V., Korshennikov A. A., Goldberg V. Z., Mukha I. G., Pflutzner M., Simon H., Shchepunov V. A., Tarasov O. B., Timofeyuk N. K., Zhukov M. V.* Fragment Separator ACCULINNA-2. Letter of Intent. JINR Commun. E13-2008-168. Dubna, 2008.
12. SigmaPhi. URL: <http://www.sigmaphi.fr/>.
13. *Fomichev A. S., Ter-Akopian G. M., Bezbakh A. A., Chudoba V., Egorova I. A., Golovkov M. S., Gorshkov V. A., Grigorenko L. V., Kaminski G., Krupko S. A., Oganessian Y. T., Parfenova Y. L., Sidorchuk S. I., Slepnev R. S., Stepansov S. V., Sharov P. G., Wolski R., Ershov S. N., Lukyanov V. K., Korshennikov A. A., Goldberg V. Z., Mukha I. G., Pflutzner M., Simon H., Tarasov O. B., Timofeyuk N. K., Yukhimchuk A. A., Zhukov M. V.* Long-Range Plans for Research with Radioactive Ion Beams at JINR. JINR Commun. E7-2012-73. Dubna, 2012.
14. *Fomichev A. S., Grigorenko L. V., Krupko S. A., Stepansov S. V., Ter-Akopian G. M.* The ACCULINNA-2 Project: The Physics Case and Technical Challenges // *Eur. Phys. J. A*. 2018. V. 54, No. 6. P. 97. URL: <https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12528-0>.
15. *Kaminski G., Zalewski B., Belogurov S., Bezbakh A., Biare D., Chudoba V., Fomichev A., Gazeeva E., Golovkov M., Gorshkov A., Grigorenko L., Kostyleva D., Krupko S., Muzalevsky I., Nikolskii E., Parfenova Y., Plucinski P., Quynh A., Serikov A., Sidorchuk S., Slepnev R., Sharov P., Szymkiewicz P., Swiercz A., Stepansov S., Ter-Akopian G., Wolski R.* Status of the New Fragment Separator ACCULINNA-2 and First Experiments // *Nucl. Instr. Meth. B*. 2020. V. 463. P. 504–507; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.042>.

16. POLAND — Low Current Profile Measurement Readout System. Rep.: GSI-SR2013-FG-CS-13/GSI; Executor: S. Löchner, J. Adamczewski-Musch, H. Bräuning, J. Frühauf, N. Kurz, S. Linev, M. Minami, S. Witthaus. 2014; <http://dx.doi.org/10.15120/GR-2014-1-FG-CS-13>.
17. Yamada K., Motobayashi T., Tanihata I. RF Deflector System for Proton-Rich RI Beams in RIKEN // Nucl. Phys. A. 2004. V. 746. P. 156–160; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.09.064>.
18. Крупко С. А., Абакумов А. М., Белогуров С. Г., Безбах А. А., Головков М. С., Горшков А. В., Горшков В. А., Рымжанова С. А., Слепнев П. С., Фомичев А. С. Диагностика вторичного пучка на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 5. С. 1165–1180; <http://dx.doi.org/10.1134/S1547477123050485>.
19. ExpertRoot framework. URL: <http://er.jinr.ru/index.html>.
20. MBS Multi Branch System DAQ. URL: <http://www.gsi.de/mbs>.
21. Слепнев П. С., Безбах А. А., Головков М. С., Горшков А. В., Горшков В. А., Даниэль А. В., Каминьски Г., Крупко С. А., Мартынов А. С., Сидорчук С. И., Фомичев А. С., Худоба В. Система сбора данных в стандарте VME для многопараметровых измерений // ПТЭ. 2012. № 6. С. 41–46; <https://dx.doi.org/10.1134/S0020441212050065>.
22. Sharov P. G., Fomichev A. S., Bezbakh A. A., Chudoba V., Egorova I. A., Golovkov M. S., Golubkova T. A., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Knyazev A. G., Krupko S. A., Mentel M., Nikolskii E. Y., Parfenova Y. L., Pluchinski P., Rymzhanova S. A., Sidorchuk S. I., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Ter-Akopian G. M., Wolski R. Search for $2p$ Decay of the First Excited State of ^{17}Ne // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. P. 025807; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.96.025807>.
23. Безбах А. А., Белогуров С. Г., Wolski R., Газеева Э. М., Головков М. С., Горшков А. В., Каминьски Г., Козлов М. Ю., Крупко С. А., Музалевский И. А., Никольский Е. Ю., Овчаренко Е. В., Слепнев П. С., Тер-Акопян Г. М., Фомичев А. С., Худоба В., Шаров П. Г., Щетинин В. Н. Нейтронный спектрометр для проведения экспериментов с радиоактивными пучкам на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 // ПТЭ. 2018. № 5. С. 5–12; <http://dx.doi.org/10.1134/s0020441218050032>.
24. Nikolskii E. Y., Muzalevskii I. A., Bezbakh A. A., Chudoba V., Krupko S. A., Belogurov S. G., Biare D., Fomichev A. S., Gazeeva E. M., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Khirk M., Kiselev O., Kostyleva D. A., Kozlov M. Y., Maueyev B., Mukha I., Parfenova Y. L., Piatek W., Quynh A. M., Schetinin V. N., Serikov A., Sidorchuk S. I., Sharov P. G., Shulgina N. B., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Swiercz A., Szymkiewicz P., Ter-Akopian G. M., Wolski R., Zalewski B., Zhukov M. V. ^6H States Studied in the $^2\text{H} (^8\text{He}, ^4\text{He})$ Reaction and Evidence of an Extremely Correlated Character of the ^5H Ground State // Phys. Rev. C. V. 105. P. 064605; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.105.064605>.
25. Крупко С. А., Горшков А. В., Безбах А. А., Фомичев А. С., Тер-Акопян Г. М. Система криогенных физических мишеней установки ACCULINNA-2 // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 1. С. 56–67; <http://dx.doi.org/10.1134/S1547477124010084>.
26. Yukhimchuk A., Perevozchikov V., Apasov V., Aryutkin V., Vinogradov Y., Vikharev M., Ganchuk N., Golubkov A., Grishchkin S., Demin A., Zlatoustovskiy S., Karyakin G., Klish V., Kononenko A., Kukolkin A., Kuryakin A.,

- Lobanov V., Malkov I., Matveev S., Rozhkov V., Safronov V., Solyankin V., Travkin V., Tumkin D., Fil'chagin S., Oganessian Y., Rodin A., Bogdanov D., Golovkov M., Fomichev A., Sidorchuk S., Slepnev R., Stepantsov S., Ter-Akopian G., Wolski R. Tritium Target for Research in Exotic Neutron-Excess Nuclei // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 513, No. 3. P. 439–447; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2003.06.002>.
27. Bezbakh A. A., Belogurov S. G., Chudoba V., Fomichev A. S., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Khirk M. S., Knyazev A. G., Krupko S. A., Mauyey B., Muzalevskii I. A., Nikolskii E. Y., Quynh A. M., Sharov P. G., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Ter-Akopian G. M., Wolski R. Detector Array for the ${}^7\text{H}$ Nucleus Multi-Neutron Decay Study // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 4. P. 629–636; <http://dx.doi.org/10.1134/S154747712304009X>.
 28. Bezbakh A. A., Chudoba V., Krupko S. A., Belogurov S. G., Biare D., Fomichev A. S., Gazeeva E. M., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Kiselev O. A., Kostyleva D. A., Kozlov M. Y., Mauyey B., Mukha I., Muzalevskii I. A., Nikolskii E. Y., Parfenova Y. L., Piatek W., Quynh A. M., Schetinin V. N., Serikov A., Sidorchuk S. I., Sharov P. G., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Swiercz A., Szymkiewicz P., Ter-Akopian G. M., Wolski R., Zalewski B., Zhukov M. V. Evidence for the First Excited State of ${}^7\text{H}$ // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 022502; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.022502>.
 29. Muzalevskii I. A., Bezbakh A. A., Nikolskii E. Y., Chudoba V., Krupko S. A., Belogurov S. G., Biare D., Fomichev A. S., Gazeeva E. M., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Kiselev O., Kostyleva D. A., Kozlov M. Y., Mauyey B., Mukha I., Parfenova Y. L., Piatek W., Quynh A. M., Schetinin V. N., Serikov A., Sidorchuk S. I., Sharov P. G., Shulgina N. B., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Swiercz A., Szymkiewicz P., Ter-Akopian G. M., Wolski R., Zalewski B., Zhukov M. V. Resonant States in ${}^7\text{H}$: Experimental Studies of the ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He})$ Reaction // Phys. Rev. C. 2021. V. 103. P. 044313; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.103.044313>.
 30. FLUKA Multi-Purpose Code. URL: <https://fluka.cern>.
 31. Battistoni G., Boehlen T., Cerutti F., Chin P., Esposito L., Fassó A., Ferrari A., Lechner A., Empl A., Mairani A., Mereghetti A., Ortega P., Ranft J., Roesler S., Sala P., Vlachoudis V., Smirnov G. Overview of the FLUKA Code // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 82. P. 10–18; <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.11.007>.
 32. Iwasa N., Weick H., Geissel H. New Features of the Monte-Carlo Code MOCADI // Nucl. Instr. Meth. B. 2011. V. 269, No. 8. P. 752–758; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2011.02.007>.
 33. Ziegler J., Biersack J., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids Stopping and Ranges of Ions in Matter. Pergamon, 1985. ISBN: 9780080216034. URL: <https://books.google.ru/books?id=xclwQgAACAAJ>.
 34. Tarasov O. Analysis of Momentum Distributions of Projectile Fragmentation Products // Nucl. Phys. A. 2004. V. 734. P. 536–540; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.01.099>.

Получено 23 ноября 2023 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 31.01.2024.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 2,50. Тираж 130 экз. Заказ № 60811.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/