

ДИАГНОСТИКА ВТОРИЧНОГО ПУЧКА НА ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРЕ ACCULINNA-2

*С. А. Крупко¹, А. М. Абакумов, С. Г. Белогуров, А. А. Безбах,
М. С. Головков, А. В. Горшков, В. А. Горшков, С. А. Рымжанова,
Р. С. Слепнев, А. С. Фомичев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Диагностика вторичного пучка на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 осуществляется событийно детектором пучковых частиц (ДПЧ), позволяющим идентифицировать налетающий ион методом dE -ToF и определить его вектор скорости и локализацию на мишени. ДПЧ состоит из двух времяпролетных станций и двух многопроволочных пропорциональных газовых камер. Две идентичные времяпролетные станции образуют базу 12,35 м и расположены на прямолинейном участке фрагмент-сепаратора ACCULINNA-2. В каждой станции свет из тонкого органического сцинтиллятора регистрируется четырьмя симметрично расположенными компактными ФЭУ, направленными внутрь замкнутого объема. Многопроволочные пропорциональные газовые камеры представляют собой стационарные корпуса, помещаемые в вакуум при атмосферном давлении рабочего газа CF_4 . Каждая камера дает координаты XY с шагом 0,125 см. Рассматриваются конструкция, назначение и границы применения ДПЧ, его характеристики, логика работы, методы настройки и калибровки.

The secondary beam diagnostics at the ACCULINNA-2 fragment separator is implemented event-by-event by the beam particle detector allowing one to identify the projectile ion with the dE -ToF method and determine its velocity vector and position on the target. The detector comprises two ToF stations and a pair of multiwire proportional gas chambers (MWPCs). Two identical ToF stations located on the straight section of the ACCULINNA-2 fragment separator form a base of 12.35 m. In each station, light from a thin organic scintillator is detected with four compact PMTs directed symmetrically inside a closed volume. Multiwire proportional gas chambers are stationary shells designed to work in vacuum at atmospheric pressure of gas CF_4 . Each chambers provides XY coordinates with a pitch of 0.125 cm. The work studies the purpose and scope of application of the beam particle detector, its characteristics, layout, operation logic, as well as techniques of setting and calibration.

PACS: 29.38.Db; 29.40.Mc; 29.40.Cs

ВВЕДЕНИЕ

В ЛЯР ОИЯИ в 2017 г. была запущена новая установка ACCULINNA-2 — современный фрагмент-сепаратор [1, 2], работающий на пучках циклотрона У-400М [3]. Назначение установки — получение методом «на лету» (in-flight) [4], формирование

¹E-mail: krupko@jinr.ru

и очистка вторичных пучков короткоживущих ядер ($T_{1/2} > 100$ нс) для проведения ядерно-физических экспериментов с целью изучения экзотических ядер, находящихся вдали от долины стабильности [5]. Ведущаяся в настоящее время модернизация циклотрона У-400М обеспечит первичные пучки 35–53 МэВ/нуклон с зарядом $Z \leq 20$ и интенсивностями до $2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Фрагмент-сепаратор обладает запасом как по мощности, так и по жесткости первичного пучка.

Пучки радиоактивных ядер, получаемые методом «на лету», имеют следующие характерные особенности:

- большой разброс по импульсу $\delta p/p \simeq 2\text{--}8\%$;
- большой размер пучка на физической мишени $\varnothing 2\text{--}6$ см;
- высокую угловую расходимость пучка порядка $\sim 1^\circ$;
- наличие примесей других изотопов, которые могут составлять от единиц процента до более 99%;
- интенсивность пучков, как правило, не превышающую $10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Эксперименты с такими пучками обычно проводятся с пособытийной регистрацией каждого иона детектором пучковых частиц (ДПЧ), который позволяет измерить энергию частицы ($\delta E/E \sim 1\%$), определить место попадания на мишень (точность $\sim 0,1$ см) и угол падения (точность $\sim 0,1^\circ$). Кроме того, ДПЧ используется для контроля вторичного пучка, оптимальной настройки сепаратора и экспресс-анализа параметров пучка в сравнении с расчетами.

Рассмотрим различные реализации ДПЧ на аналогичных установках, работающих с пучками частиц при сравнимой энергии. В RIKEN (Япония) для диагностики пучка после 2000 г. используются плоскопараллельные лавинные счетчики РРАС, а энергия частиц определяется путем измерения времени пролета и потерь энергии, например, с помощью пластикового сцинтиллятора или кремниевого детектора (dE -ToF метод) [6, 7]. В GANIL (Франция) были специально разработаны детекторы CATS [8] — многопроволочные пропорциональные камеры низкого давления, обеспечивающие высокое координатное и временное разрешения, 400 мкм и 440 пс соответственно. Детекторы имеют почти 100%-ю эффективность регистрации при потерях энергии частиц более 10 кэВ.

Вторичные пучки на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 с энергией 15–45 МэВ/нуклон (ограниченной возможностями ускорителя) обладают широким угловым ($\Delta\Omega \leq 5,8$ мср) и импульсным ($\delta p \leq \pm 3,25\%$) разбросом, размер на физической мишени около $\varnothing 2,5$ см. Задача диагностики вторичного пучка на фрагмент-сепараторах ACCULINNA-1 и ACCULINNA-2 решается детектором пучковых частиц, позволяющим идентифицировать налетающий ион методом dE -ToF и определить его вектор скорости и позицию на мишени. ДПЧ состоит из двух времяпролетных станций и двух многопроволочных пропорциональных газовых камер. Схема установки ACCULINNA-2 с указанием расположения ДПЧ приведена на рис. 1.

Выбранные решения ДПЧ удовлетворяют следующим требованиям для работы на установке ACCULINNA-2:

- загрузка до $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ при частоте банчировки первичного пучка 14–18 МГц;
- настраиваемый динамический диапазон в пределах от 0,5 до 200 МэВ;
- внесение минимального энергетического и углового разброса пучка, толщина вещества на пути пучка по 50–250 мкм на устройство;
- высокая эффективность регистрации не менее 90% на детектор;

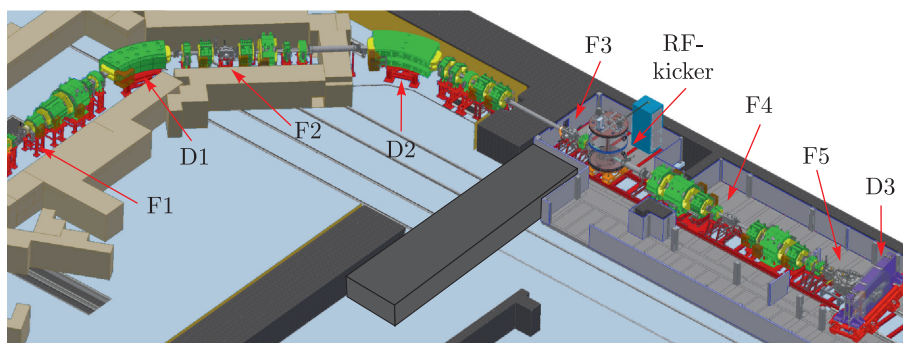


Рис. 1. Схема компоновки фрагмент-сепаратора ACCULINNA-2: F1–F5 — оптические фокусы линии вторичного пучка; F3 — первая станция времяпролетного детектора ToF; RF-kicker — ВЧ-фильтр вторичного пучка; F5 — физическая мишень, перед которой находятся вторая станция времяпролетного детектора ToF и далее две MWPC трекинговой системы; D3 — магнит спектрометра нулевого угла

- активная площадь 4,0–6,5 см в диаметре;
- возможность точной юстировки и калибровки.

Данная работа посвящена детальному описанию системы диагностики пучка установки ACCULINNA-2 и краткосрочным перспективам ее развития.

УСТРОЙСТВО И ЛОГИКА РАБОТЫ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ДЕТЕКТОРА

Измерения dE -ToF-методом осуществляются двумя идентичными станциями — детекторами, представляющими собой компактную сборку из четырех ФЭУ Hamamatsu R7600U-200, направленных внутрь замкнутого объема полого световода. Размещение и устройство детектора показаны на рис. 2.

Заряженные ионы вторичного пучка проходят сквозь тонкий сцинтиллятор времяпролетной системы с небольшой потерей энергии. Пластины органического сцинтиллятора EJ-212 или EJ-228 (аналог Viscon BC-418) подбираются по толщине от 25 до 250 мкм (2,6–26 мг/см²) в зависимости от задачи, их поверхность делается матовой с обеих сторон для повышения выхода света наружу. Кроме сцинтиллятора, на пути ионов находятся лишь два слоя отражателя из майлара, замыкающих объем светособирающей полости. Суммарное количество вещества на каждый детектор:

- майлар 3,5 мкм (0,5 мг/см²);
- сцинтиллятор X [мкм] ($X \cdot 0,1$ мг/см²), где X — толщина пластины;
- майлар 3,5 мкм (0,5 мг/см²).

Сборки ориентированы одинаково, с поворотом под 45° в плоскости сцинтиллятора вокруг оси пучка, для обеспечения возможности монтажа на фланец ISO-K dn160 при апертуре детектора \varnothing 6,6 см, вблизи фокуса F3 и непосредственно перед MWPC до F5, образуя базу 12,35 м. Конструкция хорошо масштабируется под разные задачи, например, модуль увеличенного размера с пластиком \varnothing 10 см применялся для регистрации продуктов реакции (d, p) с пучком ⁶He (29 МэВ/нуклон), вылетающих в узком переднем конусе.

Применение VME аналогово-цифровых преобразователей MQDC-32, MTDC-32 и дискриминатора MCFD-16 от компании Mesytec [9] позволило кардинально упростить логическую схему измерений в режиме посттриггера (рис. 3, 4), что дало следующие преимущества по сравнению с классической схемой использования ЗЦП (QDC), требующей последовательности триггер–ворота–сигнал:

- 1) отсутствие необходимости кабельных задержек по 300–500 нс, искажающих временной и амплитудный сигналы;
- 2) упрощение настройки синхронизации сигналов с временными воротами;

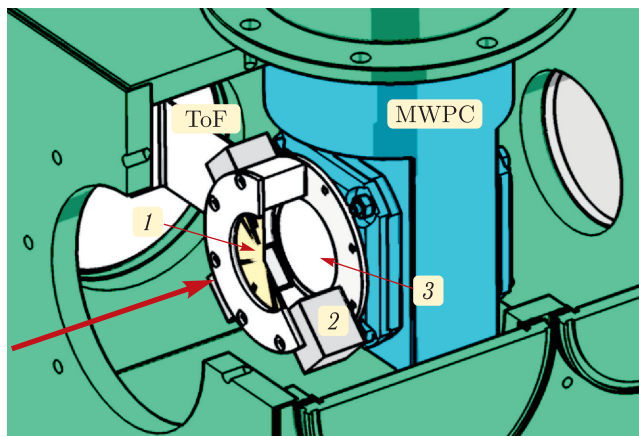


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Устройство времяпролетного детектора \varnothing 6,6 см установки ACCULINNA-2 на четырех ФЭУ R7600U-200, размещенного перед F5 внутри блока диагностики с поворотом на 45° вокруг оси пучка (большая красная стрелка). ToF — времяпролетный детектор в разрезе; 1 — входное окно из майлара; 2 — ФЭУ; 3 — выходное окно с тонким сцинтиллятором; MWPC — координатный газовый детектор

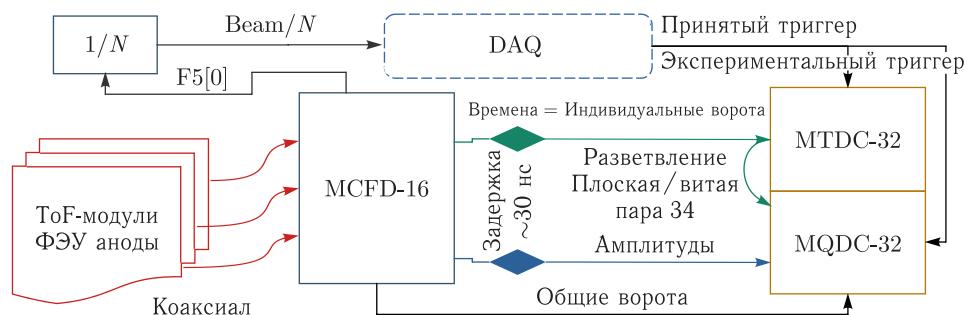


Рис. 3. Логическая схема организации измерений с применением блоков с поддержкой посттриггера, применяемая на установке ACCULINNA-2. Внутри MCFD-16 происходит выбор усиления амплитуд, формирование индивидуальных параметров логических сигналов, общих ворот и пучкового триггера Beam/N (каждый N -й сигнал из F5 становится триггером для системы сбора данных DAQ). Сигнал для записи события «Экспериментальный триггер» для MTDC-32 и MQDC-32 поступает от системы сбора данных в случае принятия ею любого триггера

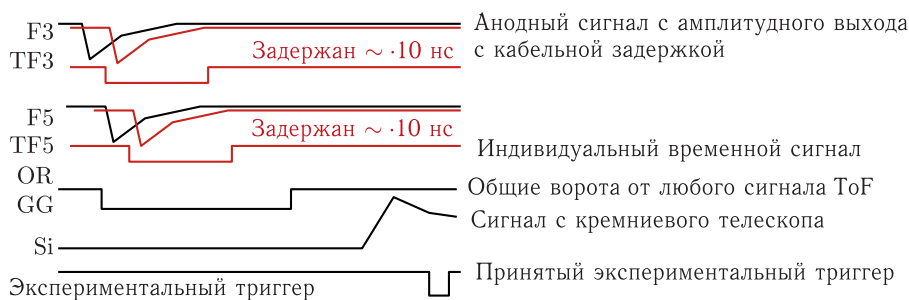


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Временная диаграмма сигналов организации измерений с применением блоков в режиме посттриггера, применяемая на установке ACCULINNA-2. Красным показаны те же сигналы после задержки. Масштаб необходимых задержек 10–50 нс в зависимости от настроек дискриминатора

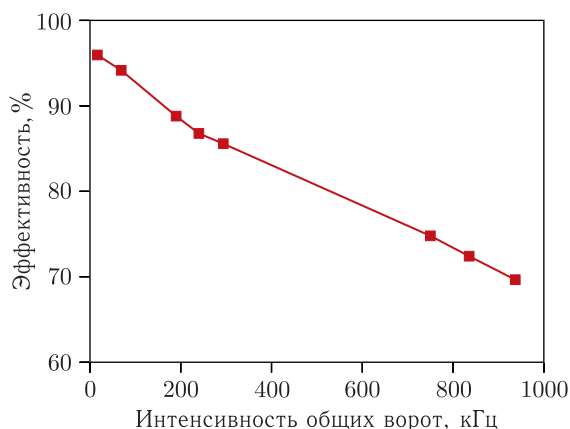


Рис. 5. Эффективность MQDC-32 в логике работы с посттриггером в зависимости от интенсивности общих ворот

3) возможность применения индивидуальных временных ворот (синхронизированных с самим сигналом) для оцифровки заряда сигналов.

Такая схема позволила повысить временное и амплитудное разрешения ценой снижения эффективности, так как MQDC-32 имеет просчеты, заметно возрастающие с нагрузкой, вызванные сочетанием мертвого времени и применения логики быстрого сброса (рис. 5).

КАЛИБРОВКА ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ДЕТЕКТОРА

Калибровка каждого временного канала проводится с использованием временного калибратора, например, с шагом 10 нс и диапазоном в сотни наносекунд для выявления интегральной нелинейности:

$$TF3_n[\text{нс}] = B_{F3_n} tdc F3_n, \quad (1)$$

где B_{F3_n} — коэффициент наклона в n -м канале станции F3 по результатам фитирования полиномом первой степени позиций пиков, за исключением крайних. Применяе-

мые МТДС-32 демонстрируют исключительную линейность и стабильность характеристик по всем каналам.

Время пролета определяется по формуле

$$\text{ToF}[\text{нс}] = \sum_{n=1}^4 \frac{\text{TF}5_n}{4} - \sum_{n=1}^4 \frac{\text{TF}3_n}{4} + D_0, \quad (2)$$

где времена TF3 и TF5 измеряются согласно калибровке временным калибратором по формуле (1), а задержка D_0 определяется из абсолютной калибровки. Использование в формулах времен из F5 обязательно, так как времена измеряются относительно триггерного сигнала, имеющего неприемлемо большую неопределенность по времени.

Для абсолютной калибровки времени пролета разработан следующий подход, в котором проводятся два измерения с различными базами, при стабильной скорости изотопов (без изменения настроек сепаратора) на достаточно чистом вторичном пучке с легко идентифицируемыми по ионизационным потерям изотопами.

Из соотношения баз можно рассчитать константу D_0 :

$$D_0[\text{нс}] = \frac{L_2[\text{см}]\text{ToF}_1[\text{нс}] - L_1[\text{см}]\text{ToF}_2[\text{нс}]}{L_1[\text{см}] - L_2[\text{см}]}, \quad (3)$$

где L_i — времяпролетная база (отрицательная при смене последовательности станций ToF на обратную) в данном i -м измерении; ToF_i — среднее время пролета, вычисленное по формуле (2) при зануленной константе D_0 .

Наиболее простым и надежным способом является проведение измерения на минимальной базе, но с перестановкой детекторов местами, тогда не требуется точное знание базы, важна только повторяемость. В этом случае среднее положение между

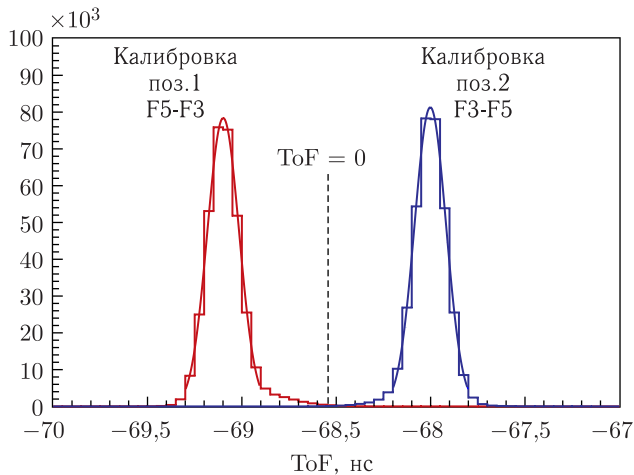


Рис. 6. Иллюстрация абсолютной калибровки времени пролета методом перестановки станций на малой дистанции для определения нулевого пролетного времени. Показаны спектры времен для обеих комбинаций перестановки: F5-F3 и F3-F5

измеренными временами соответствует нулевому времени пролета, что проиллюстрировано рис. 6. Желательно выполнить калибровку с отбором событий пролета частиц через центральную область детектора, что повышает точность.

Оценить разрешение времяпролетной системы можно сравнением измерений времен разных пар противостоящих ФЭУ (условно лево-право относительно верх-низ). Предположим, что все ФЭУ в станции работают с одинаковой точностью, тогда разрешение примет вид

$$\text{для } \Delta_{\text{TF3}} = \frac{\text{TF3L} + \text{TF3R}}{2} - \frac{\text{TF3U} + \text{TF3D}}{2}, \quad \sigma_{\Delta\text{TF3}}[\text{нс}] = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\sigma_{\text{F3}_i}}{2}\right)^2} = \sigma_{\text{F3}}, \quad (4)$$

где σ_{F3} — разрешение одного ФЭУ в станции F3.

Для формулы (2)

$$\sigma_{\text{ToF}}[\text{нс}] = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\sigma_{\text{F3}_i}}{4}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\sigma_{\text{F5}_i}}{4}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{\text{F3}}^2 + \sigma_{\text{F5}}^2}. \quad (5)$$

Для результатов, приведенных на рис. 7, ошибки измерения времени пролета составили для припороговых амплитуд ($dE_{\text{эН}} = 0,460$ МэВ) $\sigma_{\text{эН}} = 0,149$ нс и амплитуд в зоне надежного детектирования ($dE_{\text{эЛи}} = 4,16$ МэВ) $\sigma_{\text{эЛи}} = 0,071$ нс.

Конструкция детектора обладает хорошей симметрией, приводящей к взаимной позиционной и амплитудной компенсации. Улучшить временное разрешение различными коррекциями можно, но не более чем на 10%, что установлено при наложении дополнительного условия на позицию и амплитуды сигналов.

Алгоритм амплитудных калибровок следующий.

1. На идентификационном dE -ToF спектре необходимо выделить области, соответствующие изотопам, по которым будут определены индивидуальные амплитудные калибровки для каждого ФЭУ (условие 1).

2. В случае сильного смещения от центра детектора распределения позиций частиц пучка измеряемых изотопов желательно ограничить. Возможные способы: обратный трекинг из F5, уменьшение размера щели в F3, ограничение соотношения амплитуд при обработке (условие 2).

3. Для каждого применяемого изотопа при выделении зоны облучения в центральной области детектора (т.е. с условиями 1 и 2) необходимо определить положение центра тяжести распределений амплитуд для всех ФЭУ, а также действующего (измеренного) времени пролета.

4. Для определения индивидуальных калибровочных функций амплитуд ФЭУ необходимо рассчитать энерговыделение в сцинтилляторах на входе (F3) и выходе (F5), применяя измеренное время пролета согласно предыдущему пункту, см. рис. 8 в качестве примера.

5. Измеренные энергетические потери частиц пучка в мегаэлектронвольтах усредняются по всем ФЭУ станций F3 и F5. Сумма потерь по двум станциям демонстрирует более высокое разрешение, чем по отдельности.

Экспериментальное измерение энергии изотопов по описанной методике хорошо согласуется с данными магнитных измерений поворотного магнита D2, а также с мо-

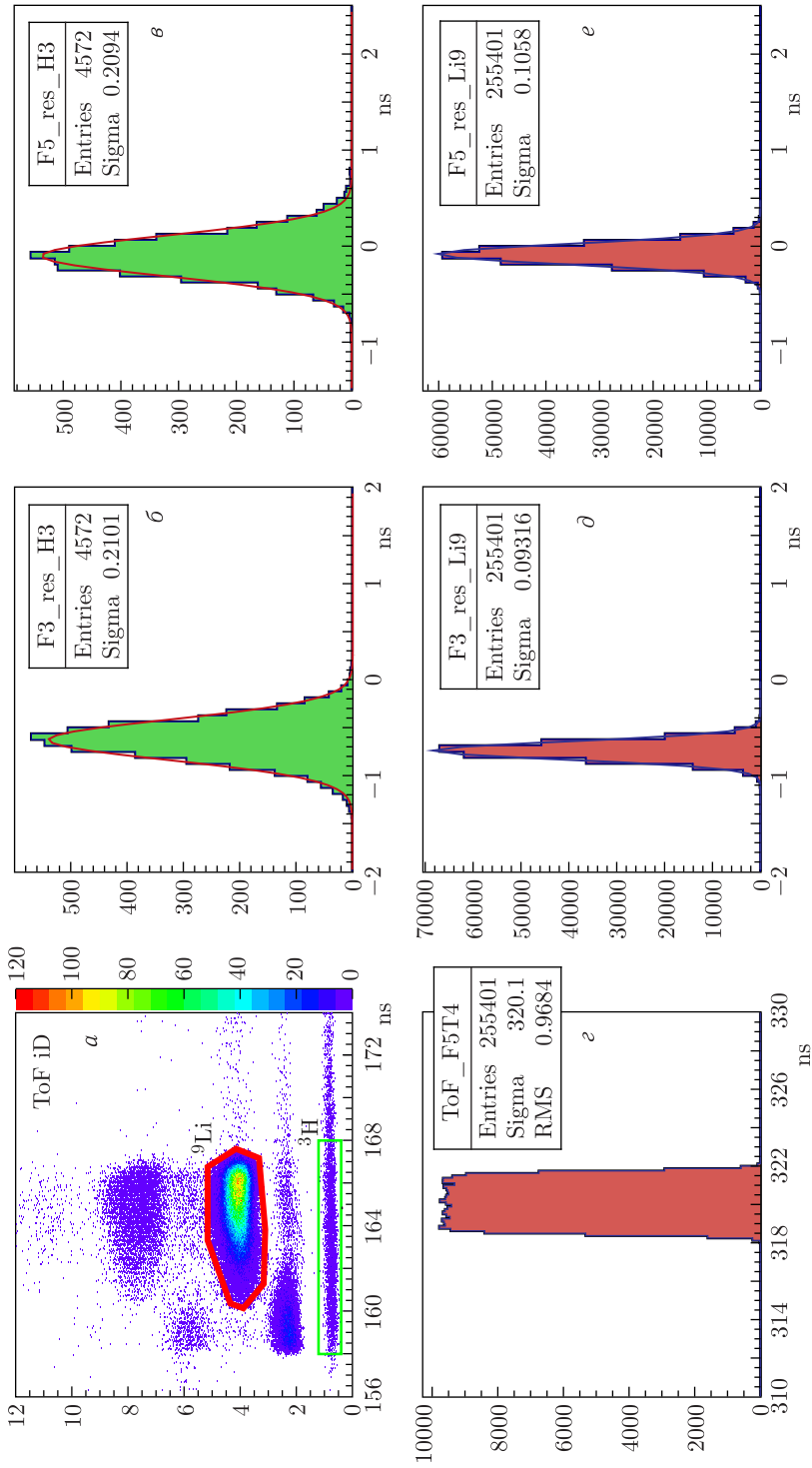


Рис. 7. Определение временного разрешения времяпролетной станции методом сравнения пар противостоящих ФЭУ. Сепаратор настроен на ${}^9\text{Li}$ с примесью ${}^6\text{He}$. а) Идентификационный dE -ToF спектр. Частицы ${}^9\text{Li}$ и ${}^3\text{H}$ выделены контурами. Ось Y — энергетические потери dE [МэВ]. Ось X — время пролета ToF [нс]. б, в) Временное разрешение для ${}^3\text{H}$; д, е) для ${}^9\text{Li}$. Ширина распределения TF5 (з) обусловлена тактом цифровых (FPGA) блоков DAQ

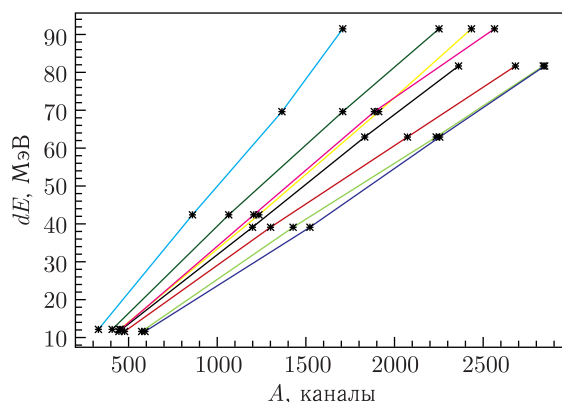


Рис. 8. Пример амплитудной калибровки каждого из восьми ФЭУ с применением линейной экстраполяции между точками на примере коктейля, получаемого из ^{32}S

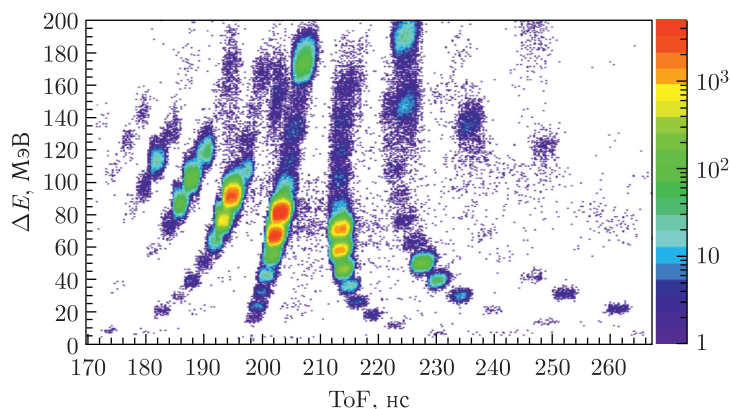


Рис. 9. Идентификационный dE -ToF спектр коктейля частиц вторичного пучка, получаемого из пучка ^{32}S при оптимизации магнитной оптики фрагмент-сепаратора на максимальный выход изотопа ^{27}S

делированием dE -ToF по LISE++. Качество работы ToF-детектора по идентификации хорошо иллюстрируется рис. 9 на примере коктейля при получении протонно-избыточного изотопа ^{27}S .

МНОГОПРОВОЛОЧНЫЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ КАМЕРЫ МВРС

Кроме измерения времени пролета и идентификации, выполняемой по методу dE -ToF, необходимо определение траектории (трекинг) падения частиц пучка на физическую мишень. Трекинг выполняется с помощью пары координатных газонаполненных детекторов, размещенных на расстоянии 81,5 и 27,0 см перед физической мишенью. Измерение должно происходить с высокой эффективностью регистрации (95–98% на плоскость) при загрузках до $2 \cdot 10^6$ Гц.

Каждый детектор представляет собой многопроволочную пропорциональную камеру (далее MWPC) в отдельном стационарном герметичном корпусе из нержавеющей стали. Камера оборудована тонкими окнами из каптона (12,7–25,4 мкм) и продувается газом CF_4 при атмосферном давлении.

В каждой камере размещены электродные сборки, состоящие из двух перпендикулярно ориентированных (X , Y) проволочных сеток, заключенных между тремя катодами из нержавеющей 6-мкм фольг с равным зазором 0,3 см. Индивидуальный съем сигнала осуществляется с вольфрамовых проволочек диаметром 20 мкм с шагом 0,125 см, количеством 32 шт. в каждой координатной плоскости.

Важную роль при определении траектории частиц перед мишенью играет также количество вещества детектора, что принципиально для ионов с зарядом $Z > 5$ (из-за многократного рассеяния увеличивается погрешность).

Материал каждой MWPC, находящейся на пути пучка (упрощенно):

- каптон 25,4 мкм (3,6 мг/см²);
- газ CF_4 8,2 см при 1 атм (30 мг/см²);
- нержавеющая фольга 3×6 мкм ($3 \times 4,8$ мг/см²);
- каптон 25,4 мкм (3,6 мг/см²).

Вследствие большого входного акцептанса фрагмент-сепаратора ACCULINNA-2 вторичные пучки имеют значительный поперечный размер при фокусировке на физическую мишень в F5, поэтому в дальнейшем будут использоваться новые уже изготовленные MWPC 48X на 48Y (активная площадь 6×6 см) с возможностью увеличения зазора для снижения давления, устройство показано на рис. 10. Конструкция выполнена максимально технологично с точки зрения эксплуатации: облегчение сборки и повторяемости при демонтаже и замене компонентов, включая фольги, точности позиционирования по направляющим и возможности юстировки, что направлено на обеспечение высокой точности при применении детектора.

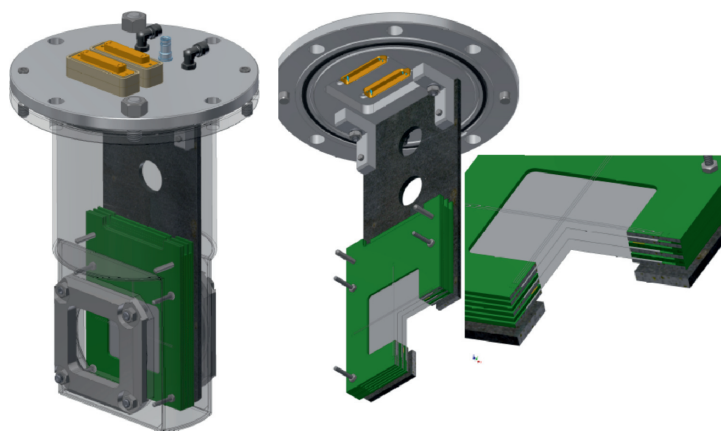


Рис. 10. Внешний вид и устройство новых многопроволочных пропорциональных камер 48X на 48Y (активная площадь 6×6 см). Перед фольгами катодов изображены проволочки для оптического юстирования камер

Немаловажную роль в применении MWPC играет их позиционирование в составе общей детектирующей системы установки. Кроме механических решений по обеспечению повторяемости, в камерах предусмотрены места установки отражателей лазер-трекера (референсные мишени). Юстировка камер проводится двумя методами с перекрестной проверкой результатов:

- определение положения проволочной структуры в сборе без корпуса относительно референсных мишеней на наружной стороне фланца сборки. Измерение положения камеры по референсным мишеням после установки на пучок;
- измерение положения окон камер после установки на пучковую линию, регистрация пучка с установленными диафрагмами на окнах, определение положения проволочных структур по результатам прохождения пучка через диафрагмы.

Коррекция позиции камер считается выполненной при условии соответствия координат измеренного центра тяжести распределения частиц пучка с положением диафрагм, определенных по положению окон оптическими методами.

Логическая схема обработки сигналов MWPC, унаследованная с ACCULINNA-1, построена по принципу самовзвода регистров с последующим самосбросом при отсутствии подтверждающего сигнала на запись события. Такая схема обладает неоспоримым преимуществом по мертвому времени, эффективности регистрации и минимальному объему передаваемых данных. Точность определения координат ограничена шагом проволочной структуры, время определяется одно на плоскость по самому раннему сигналу.

Сигнал с любого канала в плоскости запускает временное окно 80–100 нс на запись в регистр. По окончании окна входы закрываются на время ожидания триггера на запись. Если триггер не приходит в течение 300–500 нс, то система очищает регистр и открывает входы. При получении подтверждения на запись события регистры хранят состояние до момента чтения.

Таким образом, в регистре оказываются установлены биты, соответствующие сработавшим проволочкам в узком временном интервале в пределах одного банча пучка. Кластером считается одна или несколько соседних сработавших проволочек, координата берется по его центру. Позиция считается определенной, если зарегистрирован только один кластер, а время срабатывания данной плоскости MWPC соответствует основной частице по времени TF5. Иллюстрация работы MWPC в такой логике приведена на рис. 11.

Рассмотрим направления модернизации MWPC, учитывающей более высокие требования будущих экспериментов.

Применение современной электроники от компании Mesytec в цепочке MCFD–MQDC–MTDC дает возможность индивидуального измерения заряда и времени этими блоками в логике самосброса. Такая схема позволяет увеличить позиционное разрешение путем измерения распределения заряда между проволочками, а индивидуальные времена множественных срабатываний (MTDC имеет режим multihit, что позволяет измерение нескольких сигналов в заданном окне времени) повышают достоверность отбора событий с наложениями импульсов от ионов из соседних банчей пучка. С другой стороны, возрастает объем передаваемых данных и заметно понижается эффективность регистрации за счет мертвого времени MQDC-32.

Важным этапом в развитии рассматриваемых камер является переход на пониженное давление, так как это единственный путь сокращения количества вещества

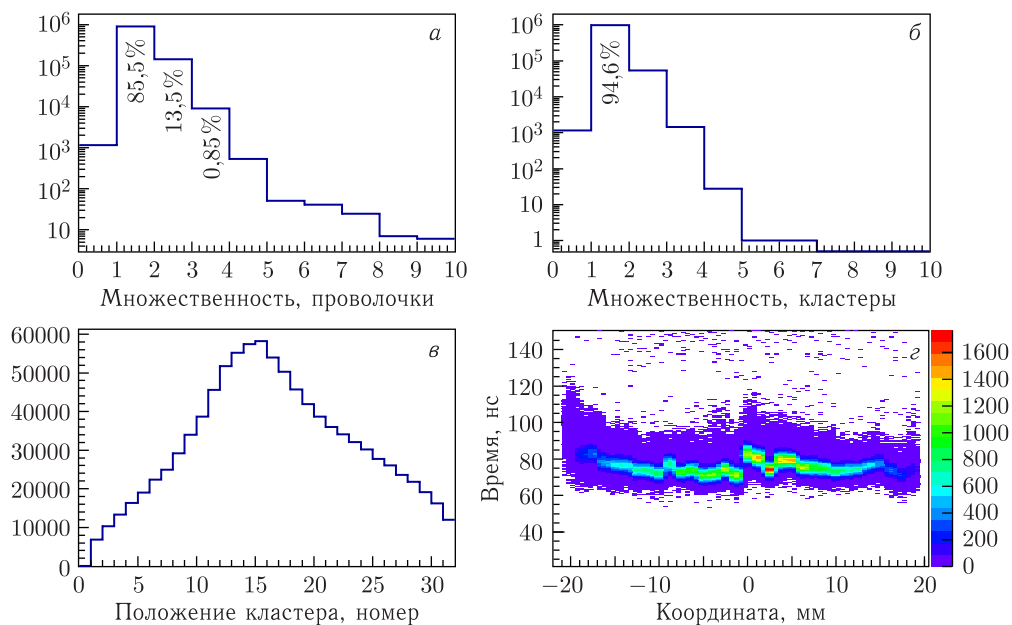


Рис. 11. Иллюстрация работы одной из плоскостей многопроволочных пропорциональных камер MWPC. а) Распределение по количеству сработавших проволочек в событии; б) распределение по множественности кластеров в событии; в) положение центра кластера по номерам проволочек; г) распределение времени в зависимости от места попадания

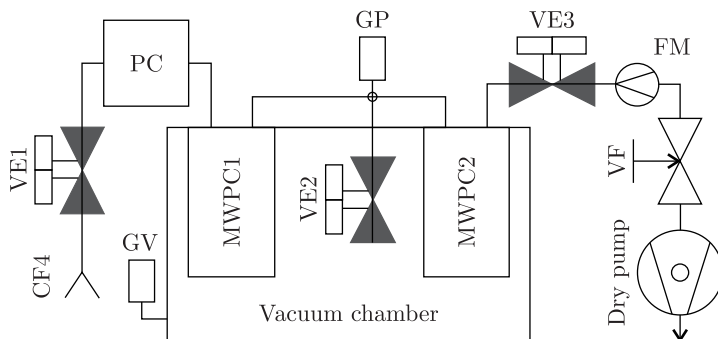


Рис. 12. Газовая схема для работы при пониженном давлении. Рабочий газ через отсечной вентиль VE1 подается на контроллер давления PC, откуда поступает последовательно в объем камер MWPC1 и MWPC2, затем через отсечной клапан VE3 откачивается сухим вакуумным насосом. Контроллер PC поддерживает заданное давление по датчику давления GP, регулировка расхода производится по датчику протока FM с помощью игольчатого клапана VF перед насосом. Через клапан VE2 происходит соединение с общим вакуумным объемом установки для откачки и в случае детектирования аварийного перепада давления по вакуумметру GV

по толщине газа и фольгам окон. Основная доля вещества приходится на входные окна размером $6,6 \times 6,6$ см из каптона по 25,4 мкм каждое, ограниченные необходимостью держать перепад атмосферного давления. При снижении давления до 250 мбар (0,025 МПа) фольги могут быть заменены на меньшую толщину 8 мкм.

Представленная на рис. 12 схема позволяет безопасно эксплуатировать камеры с продувкой при пониженном давлении, ограничивая перепад давления с разных сторон тонких окон. Откачка осуществляется через клапан совместно с вакуумным объемом установки, наполнение и продувка разрешена только при наличии вакуума, в аварийном случае объемы камер и установка соединяются.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРОВ ПУЧКОВЫХ ЧАСТИЦ

Моделирование выполнено в пакете ExpertRoot [10], предназначенном для моделирования прохождения частиц через детектирующую систему, сбора и анализа данных ядерно-физических экспериментов, основанном на ПО FairRoot [11] и использующем для транспорта частиц GEANT4 [12]. Детектор ToF выполнен в виде двух станций, представленных пластинами из органического сцинтиллятора. Каждая из двух MWPC смоделирована как ограниченный каптоновыми окнами газовый объем, в который погружены катодные плоскости и соответствующие координатным плоскостям массивы чувствительных газовых параллелепипедов, в центрах которых находятся анодные проволочки. При моделировании MWPC не учитывается диффузия заряда в газе.

Энергия пучка восстанавливается по времени пролета между двумя станциями ToF, координата вычисляется путем экстраполяции вектора скорости пучка, полученного из координат MWPC, на плоскость, проходящую через центр мишени. При срабатывании нескольких соседних проволочек координата пучка считается по центру такого кластера. При этом отбраковываются события с множественными кластерами, т.е. события, в которых сработали две (или больше) проволочки, не находящиеся рядом.

Для лучшей имитации экспериментальных данных для MWPC и ToF можно настроить пороги чувствительности и среднеквадратичные отклонения по энергии и времени.

В качестве примера был задан пучок ${}^8\text{He}$ с энергией $E = 21,5$ МэВ/нуклон, среднеквадратичное отклонение импульса 4% от полной величины, $\theta = 1^\circ$, $\sigma(\theta) = 4$ мрад, диапазон φ (0–45)°. Распределение координат x и y пучка в средней плоскости мишени ($z = 0$ см) задано равномерно от 0,7 до 0,8 см. Стартовая точка иона определялась продолжением траектории вдоль вектора импульса до плоскости $z = -1600$ см.

На рис. 13,а представлена разность смоделированной и восстановленной энергии пучка в средней плоскости мишени. Энергетическое разрешение составляет 0,28 МэВ (FWHM) для заданного пучка. 3% событий лежат вне распределения Гаусса. Основной вклад в погрешность вносит неопределенность точки взаимодействия внутри мишени.

На рис. 13,б показана разность смоделированной и восстановленной координаты x в средней плоскости мишени. Пространственное разрешение составляет 0,17 см (FWHM), при этом 6% событий лежат вне распределения Гаусса.

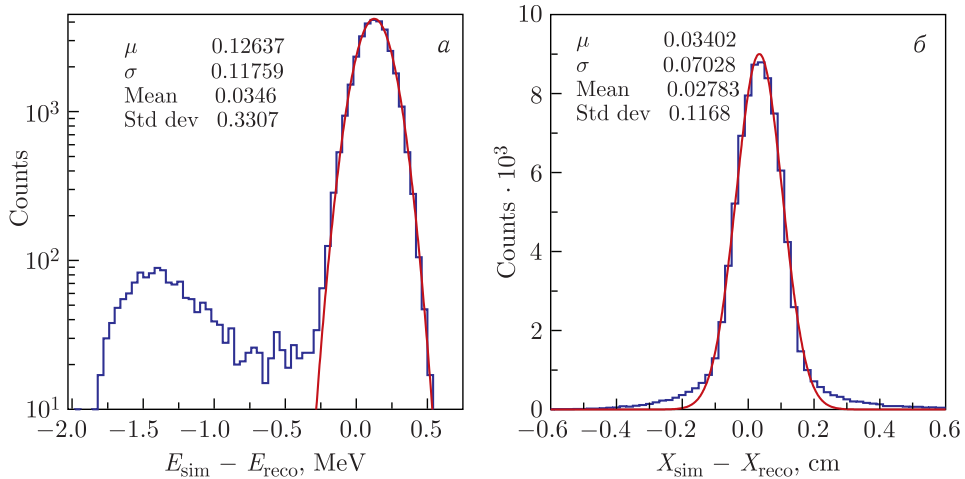


Рис. 13. Моделирование работы пучковых детекторов ToF и MWPC: а) разность смоделированной и восстановленной энергии пучка в средней плоскости мишени. Энергетическое разрешение составляет 0,28 МэВ (FWHM) для заданного пучка. б) Разность смоделированной и восстановленной координаты X частицы пучка на средней плоскости мишени. Приведены результаты фитирования распределения функцией Гаусса (две первых строки) и среднеквадратичное отклонение

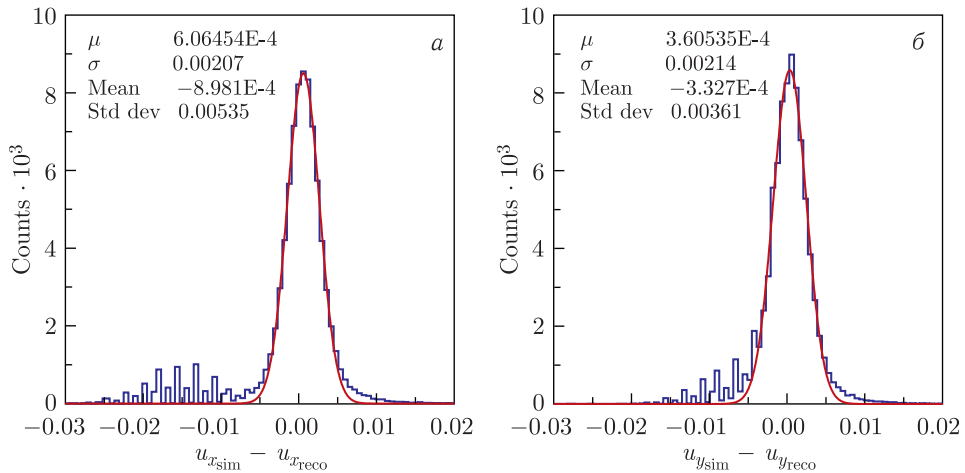


Рис. 14. Разность компонент смоделированного и восстановленного единичного вектора пучка u_x (а) и u_y (б) в средней плоскости мишени. Приведены результаты фитирования распределения функцией Гаусса (две первых строки) и среднеквадратичное отклонение

На рис. 14 представлены разности компонент смоделированного и восстановленного единичного вектора пучка u_x и u_y в средней плоскости мишени. Разрешение по компонентам единичного вектора составляет 0,005 (FWHM), при этом 12 и 10% событий лежат вне распределений Гаусса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика детектирования частиц вторичного пучка применяется на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 в исследовательских и методических экспериментах. Детекторы обеспечивают пособытийную идентификацию и траекторию частиц перед физической мишенью с заданной точностью при загрузках до $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ в широком диапазоне масс и энергий изотопов вторичного пучка, доступных на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2.

Детекторы вторичного пучка интегрированы в измерительную систему таким образом, что с применением абсолютных калибровок дают полную информацию о каждом налетающем ионе.

Работа выполнена в рамках сотрудничества с Национальным центром физики и математики (проект 8 «Физика изотопов водорода», тема 8.3 «Изучение свойств нейтронно-избыточных ядер, лежащих на границе нейтронной стабильности»). Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант № 22-12-00054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ACCULINNA-2, ACCULINNA Fragment Separator, FLNR, JINR. <http://aculina.jinr.ru/>.
2. *Fomichev A. S., Grigorenko L. V., Krupko S. A., Stepantsov 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; <https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12528-0>.
3. U400M Accelerator. <http://flerovlab.jinr.ru/u400m-accelerator-complex/>.
4. *Morrissey D., Sherrill B.* In-Flight Separation of Projectile Fragments // *The Euroschool Lectures on Physics with Exotic Beams.* V. I. Berlin; Heidelberg: Springer, 2004. V. 615. P. 113–135.
5. *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 Yu. Ts., Parfenova Yu. L., Sidorchuk S. I., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Sharov P. G., Wolski R., Ershov S. N., Lukyanov V. K., Korshennikov A. A., Goldberg V. Z., Mukha I. G., Pfitzner 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 Preprint E7-2012-73. Dubna, 2012.
6. *Kubo T., Ishihara M., Inabe N., Kumagai H., Tanihata I., Yoshida K., Nakamura T., Okuno H., Shimoura S., Asahi K.* The RIKEN Radioactive Beam Facility // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1992. V. 70, No. 1. P. 309–319; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X9295947P>.
7. *Kumagai H., Ozawa A., Fukuda N., Sümmerer K., Tanihata I.* Delay-Line PPAC for High-Energy Light Ions // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2001. V. 470, No. 3. P. 562–570.
8. *Ottini-Hustache S., Mazur C., Auger F., Musumarra A., Alamanos N., Cahan B., Gillibert A., Lagoyannis A., Maillard O., Pollacco E., Sida J., Riallot M.* CATS, a Low Pressure Multiwire Proportional Chamber for Secondary Beam Tracking at GANIL // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1999. V. 431, No. 3. P. 476–484.
9. Mesytec GmbH and Co. KG, Wernher-von-Braun-Str. 1, 85640 Putzbrunn, Germany. <https://www.mesytec.com/>.
10. ExpertRoot. <http://er.jinr.ru/>.
11. *Al-Turany M., Bertini D., Karabowicz R., Kresan D., Malzacher P., Stockmanns T., Uhlig F.* The FairRoot Framework // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2012. V. 396. P. 2001.

12. Allison J., Amako K., Apostolakis J., Arce P., Asai M., Aso T., Bagli E., Bagulya A., Banerjee S., Barrand G., Beck B., Bogdanov A., Brandt D., Brown J., Burkhardt H., Canal P., Cano-Ott D., Chauvie S., Cho K., Cirrone G., Cooperman G., Cortés-Giraldo M., Cosmo G., Cuttone G., Depaola G., Desorgher L., Dong X., Dotti A., Elvira V., Folger G., Francis Z., Galoyan A., Garnier L., Gayer M., Genser K., Grichine V., Guatelli S., Guèye P., Gumplinger P., Howard A., Hřivnáčová I., Hwang S., Incerti S., Ivanchenko A., Ivanchenko V., Jones F., Jun S., Kaitaniemi P., Karakatsanis N., Karamitros M., Kelsey M., Kimura A., Koi T., Kurashige H., Lechner A., Lee S., Longo F., Maire M., Mancusi D., Mantero A., Mendoza E., Morgan B., Murakami K., Nikitina T., Pandola L., Paprocki P., Perl J., Petrović I., Pia M., Pokorski W., Quesada J., Raine M., Reis M., Ribon A., Ristić Fira A., Romano F., Russo G., Santin G., Sasaki T., Sawkey D., Shin J., Strakovsky I., Taborada A., Tanaka S., Tomé B., Toshito T., Tran H., Truscott P., Urban L., Uzhinsky V., Verbeke J., Verderi M., Wendt B., Wenzel H., Wright D., Yamashita T., Yarba J., Yoshida H. Recent Developments in Geant4 // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 835. P. 186–225; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216306957>.

Получено 6 марта 2023 г.