

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 001.89:004.31+001.89:004.6

СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ В СТАНДАРТЕ VME
ДЛЯ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2012 г. Р. С. Слепнев*, А. А. Безбах*, М. С. Головков*, А. В. Горшков*, В. А. Горшков*,
А. В. Даниэль*, Г. Каминьски*, **, С. А. Крупко*, А. С. Мартьянов*,
С. И. Сидорчук*, А. С. Фомичев*, В. Худоба*. ***

*Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

**Институт ядерной физики ПАН, Краков, Польша

*** Университет Силезии, Институт физики, Опава, Чехия

Поступила в редакцию 08.12.2011 г.

После доработки 03.02.2012 г.

Описывается система сбора данных, основанная на электронике в стандарте VME и нацеленная на проведение физических экспериментов с измерением нескольких сотен различных параметров. Оборудование было апробировано на фрагмент-сепараторе Acculina (<http://aculina.jinr.ru/>) в опытах с пучками ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{18}\text{Ne}$ и ${}^{27}\text{S}$ в диапазоне энергий 20–35 МэВ/нуклон. Система включает в себя процессорный блок RIO-3 для чтения магистрали VME, связи с CAMAC- и FASTBUS-крейтами и передачи данных в персональный компьютер, триггерный блок TRIVA-5, стандартные аналого-цифровые, зарядово-цифровые и времяамплитудные преобразователи фирмы CAEN (модели V785, V792, V775), а также соответствующее программное обеспечение. Данная система сбора данных по сравнению с вариантом в стандарте CAMAC является более быстродействующей (фактор 10), а также имеет возможность работать с новыми типами блоков электроники, например дигитайзерами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования свойств ядерной материи на границе нуклонной стабильности являются актуальными в ядерной физике во всем мире и бурно развиваются в ведущих центрах GSI (Германия), RIKEN (Япония), GANIL (Франция) и MSU (США) за счет создания новых установок и методик. В ЛЯР ОИЯИ данные исследования успешно ведутся с 1996 г. на фрагмент-сепараторе Acculina [1], модернизированном последний раз в 2000 г. (<http://aculina.jinr.ru/>). Эта установка была по-

строена из имеющихся магнитооптических элементов, предназначенных для транспортировки первичных пучков ускорителя МЦ-400, вследствие чего она имеет весьма скромные характеристики по сравнению с зарубежными аналогами. В рамках семилетней программы ОИЯИ по созданию новых базовых установок принято решение к 2015 г. построить новый фрагмент-сепаратор Acculina-2 [2, 3], схематично показанный на рис. 1. Основные характеристики для аналогичных установок в мире приведены в таблице.

Основные характеристики функционирующих и строящихся фрагмент-сепараторов в мире

Характеристики	Acculina	Acculina-2	LISE	A1900	RIPS	BigRIPS	FRS	SuperFRS
	ЛЯР ОИЯИ		GANIL	MSU	RIKEN		GSI	
$\Delta\Omega$, мкр	0.9	5.8	1.0	8.0	5.0	8.0	0.32	5.0
δ_P , %	2.5	6.0	5.0	5.5	6.0	6.0	2.0	5.0
$P/\Delta P$, отн. ед.	1000	2000	2200	2915	1500	3300	8600	3050
$B\rho_{\text{макс}}$, Т · м	3.2	3.9	4.3	6.0	5.76	9.0	18	18
Длина, м	21	38	42	35	21	77	74	140
$E_{\text{мин}}$, МэВ/нуклон	10	5	40	110	50		220	
$E_{\text{макс}}$, МэВ/нуклон	40	50	80	160	90	350	1000	1500

Примечание. $\delta_P = \Delta P/P$ – импульсный акцептанс; $P/\Delta P$ – разрешение по импульсу первого порядка, полученное при размере изображения 1×1 мм в плоскости производящей мишени; $B\rho$ – магнитная жесткость.

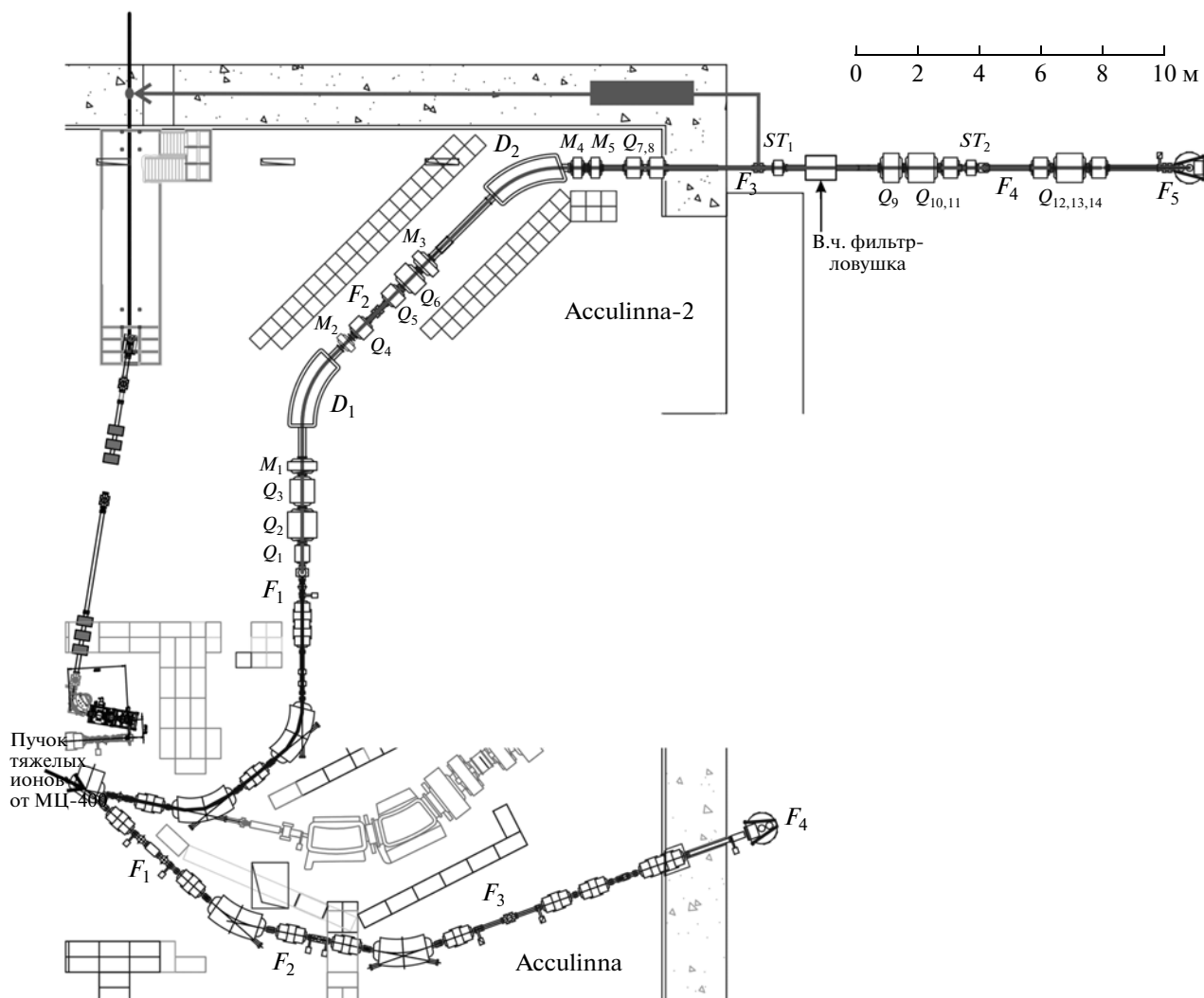


Рис. 1. Схема действующего и планируемого фрагмент-сепараторов Acculinna и Acculinna-2 на ускорителе тяжелых ионов МЦ-400. F – фокальные плоскости; Q – квадрупольные линзы; D – дипольные магниты; M – мультипольные магниты; ST – стиринги.

Из-за специфики получения радиоактивных пучков (энергетический разброс может составлять до 5%, а поперечный размер – несколько сантиметров) необходимо выполнение целого ряда методических условий. Во-первых, прежде всего необходимо обеспечить пособытийное измерение энергии пучка радиоактивных ядер (например, по времени пролета с точностью $\Delta E/E < 1\%$) и определить место попадания пучка на физическую мишень (например, с помощью пары координатных детекторов, обеспечивающих пространственную локализацию $\Delta X = \Delta Y \sim 1$ мм) в широком диапазоне энергий и интенсивностей (в нашем случае $E \sim 15\text{--}35$ МэВ/нуклон, $I \sim 10^2\text{--}10^7$ частиц/с).

Во-вторых, для получения новой информации о свойствах экзотических ядер нужны прецизионные корреляционные измерения (как правило, энергии и угла вылета продуктов распада исследуемых ядер), влекущие за собой регистрацию

большого количества параметров с высокой точностью. Наконец, для получения достоверной статистики часто измерения приходится проводить под малыми углами по отношению к направлению налетающей частицы, вследствие чего возникает проблема больших загрузок (несколько тысяч триггеров в секунду). Именно этим основным критериям должна отвечать современная система сбора данных (с.с.д.), нацеленная на решение подобных задач.

Типичная блок-схема экспериментов с пучками радиоактивных ядер на фрагмент-сепараторе Acculinna приведена на рис. 2. Как правило, с.с.д. включает в себя несколько (до 4-х) независимых триггеров, объединенных по схеме ИЛИ и, следовательно, помеченных специальным признаком. Во-первых, это признак пучка, берущийся от двух

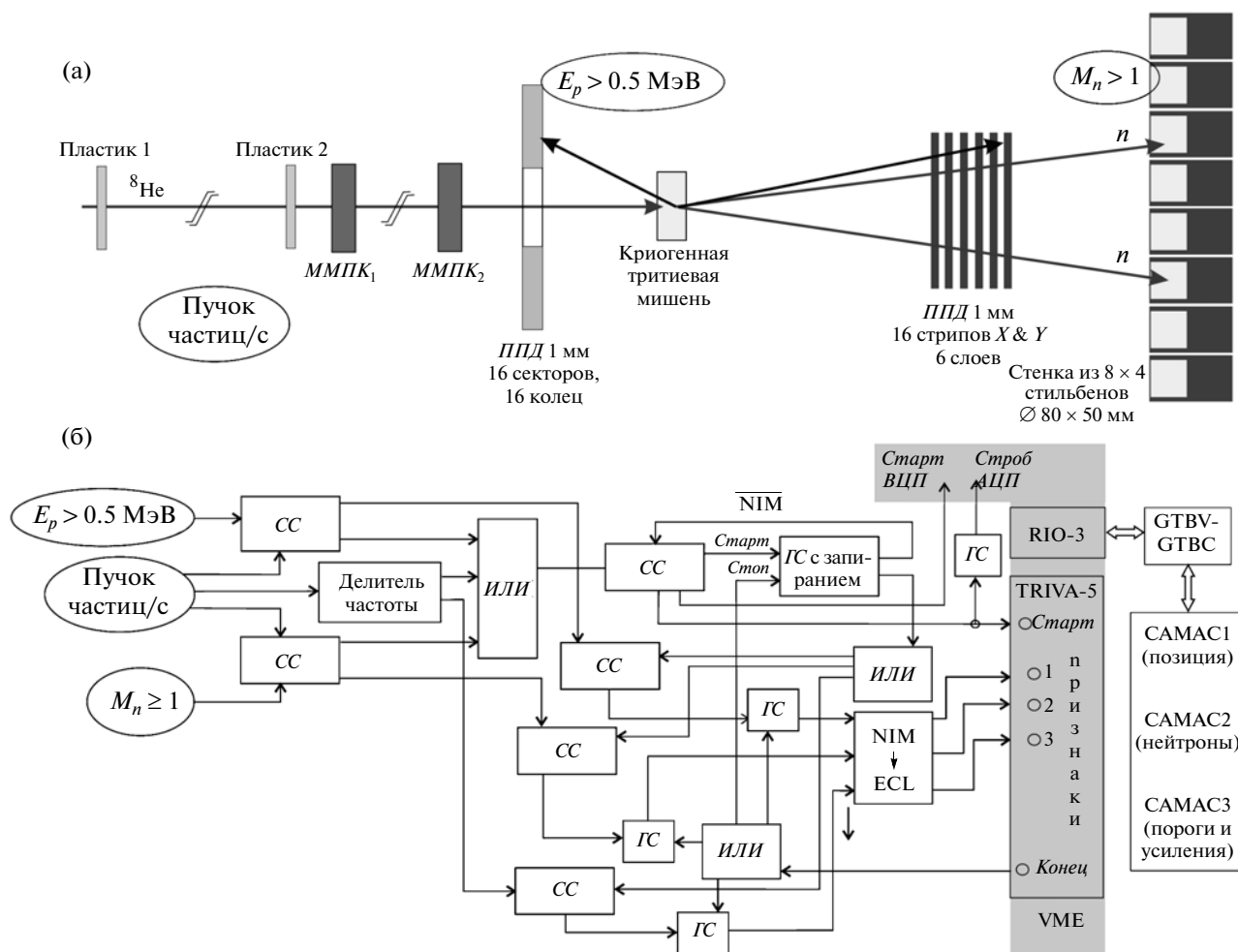


Рис. 2. Схематическое представление детекторной системы (а) и системы сбора данных (б) в эксперименте ${}^3\text{H}({}^8\text{He}, p){}^{10}\text{He}$. МППК – многопроволочная пропорциональная камера, ППД – полупроводниковый детектор, ВЦП – времяцифровой преобразователь, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, СС – схема совпадения, ГС – генератор стробов, TRIVA-5 – блок организации событий, RIO-3 – процессорный блок.

тонких (в нашем случае толщиной 0.2–0.5 мм в зависимости от сорта частиц и их энергии) пластиковых детекторов, расположенных на базе 8 мм и дающих информацию об энергии частиц по времени пролета. Во-вторых, это основной триггер, возникающий в результате совпадений сигналов от сборки кремниевых детекторов с сигналами от пластиковых детекторов, и, наконец, вспомогательный триггер, идущий, например, от совпадений нейтронных детекторов с тонкими пластиками.

Подобная с.с.д., функционирующая на установке Assulinna в стандарте САМАС более 15 лет, была заменена на более современную в стандарте VME. Новая с.с.д. успешно была испытана в эксперименте по изучению структуры ${}^{10}\text{He}$ в реакции ${}^3\text{H}({}^8\text{He}, p){}^{10}\text{He}$ при энергии пучка ${}^8\text{He}$ 22 МэВ/нуклон (см. рис. 2).

2. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ В СТАНДАРТЕ VME

Известно несколько распространенных стандартов, часто используемых в ядерно-физических экспериментах в качестве базиса для системы сбора данных: а) старый и наиболее простой САМАС, б) современные – FASTBUS, FERABUS, VXI, VME. Преимущества последних заключаются в быстродействии и способности работать с большими потоками данных.

С целью модернизации существующей на установке Assulinna с.с.д. в стандарте САМАС было решено использовать как архитектурный прототип [4] систему в стандарте VME, разработанную в GSI (Дармштадт, Германия) и успешно функционирующую более чем в 20 научных центрах мира. Данная с.с.д. базируется на процессоре семейства RIO фирмы CES [5] с операционной системой реального времени LynxOS, общедоступном про-

граммном обеспечении MBS (Multi Branch System, <http://www-win.gsi.de/daq/>) с возможностью объединения нескольких стандартов в одно целое, пакете программ Go4 (<http://www-win.gsi.de/go4/>), который необходим для визуализации информации в режиме on line, экспресс-анализа данных и их конвертации в формат для последующей обработки в среде ROOT (<http://root.cern.ch/drupal/>).

Первые опыты с использованием с.с.д. в стандарте VME [6, 7] продемонстрировали высокие потенциальные возможности этой системы, а именно: 1) работа с большими загрузками (при 5000 триггеров/с мертвое время составляло ~40%, в то время как с.с.д. в стандарте SAMAC имела такое же мертвое время при загрузке 400 триггеров/с); 2) оперативный анализ сложных двухмерных спектров в режиме on line; 3) эффективная обработка больших массивов данных объемом несколько гигабайт; 4) простая и удобная связь с SAMAC, позволяющая соединять к магистрали VME до 9 крейтов.

В эксперименте по исследованию резонансных состояний ^{10}He в реакции $^3\text{H}(^8\text{He}, p)^{10}\text{He}$ [7] кроме процессора RIO-3 были использованы блок организации триггерных сигналов TRIVA-5 [9] и электронные блоки в стандартах VME и SAMAC. Связь между крейтами VME и SAMAC осуществлялась через интерфейс контроллера GTBV, многожильный кабель и крейт-контроллер GTBC4 [8].

Нами использовались следующие VME-блоки электроники фирмы CAEN: аналого-цифровые (V785AC) и времяцифровые (V775AC) преобразователи — для кодирования амплитудных и временных сигналов с кремниевых стриповых детекторов, измеряющих потери энергии частиц и их позицию в пространстве, времяцифровые преобразователи V775NC — для кодирования временных сигналов от пластиковых сцинтилляторов, предназначенных для измерения времени пролета заряженных частиц, зарядово-цифровые преобразователи V792NC — для кодирования амплитуд с этих сцинтилляторов. Также использовались еще два вспомогательных блока: счетчик событий V560NC и преобразователь уровней NIM-ECL V558A.

Кроме того, к VME-крейту были подключены последовательно еще два SAMAC-крейта со своей электроникой. В первом из них находились дискриминаторы и регистры для сигналов, идущих от двух многопроволочных пропорциональных камер (МППК), которые необходимы для измерения позиции пучка на физической мишени (каждая камера имела 32×32 проволочки с шагом 1.25 мм, всего 128 трактов). Второй SAMAC-крейт обслуживал массив нейтронных детекторов — 32 модуля на основе кристаллов стибьбена $\varnothing 80$ и толщиной 50 мм, соединенных с фотоумножителями XP4312. В нем также находились зарядово-цифровые и времяцифровые преобразователи сигналов, модели

Phillips 7167 и 7186 соответственно. Дополнительный третий SAMAC-крейт был включен для программной установки индивидуальных порогов для каждого из каналов кремниевых детекторов, а также коэффициентов усиления всех спектрометрических усилителей (всего 192 тракта).

Опрос VME- и SAMAC-модулей и получение с них экспериментальной информации осуществлялись при помощи программы MBS, разработанной в GSI. При работе с ней использовались функции, написанные для каждого типа модуля на языке программирования C, а также основная программа, где содержалась процедура инициализации, опроса и т.д. Написанный на языке C код компилировался для операционной системы LynxOS, работающей в процессорном блоке RIO-3 и загружающейся по сети с внешнего компьютера, где установлен Scientific Linux. После корректной инициализации запускалась программа MBS под LynxOS и далее при помощи специальных команд в среде MBS запускался набор данных.

Для визуализации работы всей аппаратуры в режиме on line и построения корреляционных спектров использовался пакет программного обеспечения Go4. Для работы с ним создавался код в служебных подпрограммах пакета Go4, используя язык C++. Этот код использовался, чтобы расшифровать информацию, получаемую от программы MBS, а также чтобы создать структуру события (описав все электронные блоки и необходимые для визуализации гистограммы, двумерные матрицы) и написать алгоритм заполнения гистограмм.

Пример работы Go4 после компиляции подпрограмм в Scientific Linux показан на рис. 3. На экране отражены двумерные экспериментальные спектры, характеризующие качество пучка радиоактивных ядер. Верхний ряд демонстрирует профиль траекторий частиц по двум координатам X и Y (соответственно рис. 3а и 3б) с указанием места попадания пучка на мишень из данных от многопроволочных камер. Здесь вертикальные линии отражают линейные размеры камер и мишени (в мм) и их относительное расположение вдоль оси пучка (в см). Поперечный размер пучка после его прохождения через мишень определялся из данных от первых двух слоев кремниевых детекторов, сегментированных на 16 стрипов каждый (рис. 3в); цена одного деления на этом двумерном графике составляет 3.6 мм. Нижний ряд несет информацию о качестве радиоактивного пучка ^8He (наличие примесей, энергетический разброс, примерный размер пучка и положение центра тяжести относительно осевой линии), извлекаемую из данных с пластиковых сцинтилляторов на участке F_3-F_4 (см. рис. 1). Слева направо показаны зависимость потерь энергии в пластике F_4 от времени пролета на базе 8 м (рис. 3г), зави-

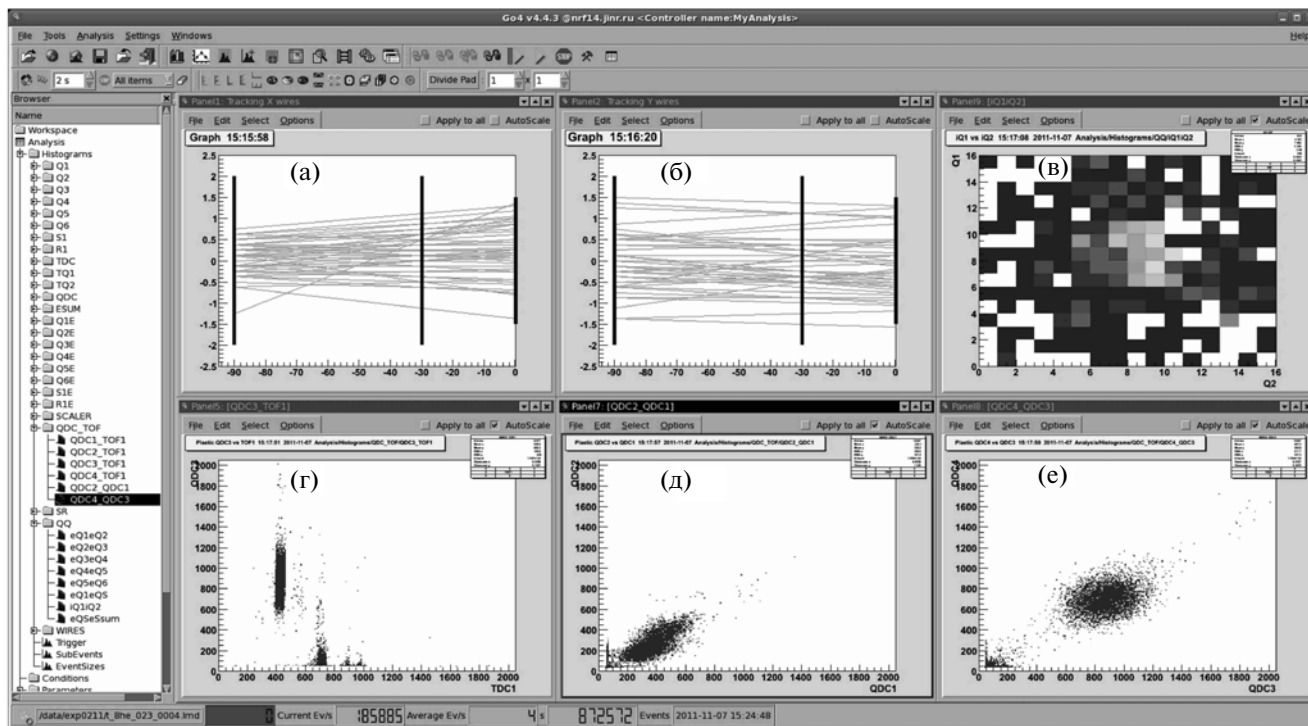


Рис. 3. Экран с on line-визуализацией экспериментальных данных о качестве вторичного пучка ^8Ne в эксперименте [7], полученный при помощи пакета Go4.

симось амплитуды сигнала с левого края пластикового сцинтиллятора от амплитуды сигнала с правого края в фокальных плоскостях F_3 и F_4 (рис. 3д и 3е соответственно).

3. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ С.С.Д.

Преимущества новой с.с.д. проявились также в ходе методического эксперимента по поиску оптимальной настройки фрагмент-сепаратора Acculina с целью получения интенсивного ($\sim 10^5$ частиц/с) вторичного пучка ^{18}Ne с минимальными примесями других побочных продуктов в реакции фрагментации ^{20}Ne (53 МэВ/нуклон) + ^9Be .

На рис. 4 приведен пример такой настройки. Процентное содержание ионов ^{18}Ne , определяемое отношением $I(^{18}\text{Ne})/I_{\text{полн}}$ (где $I(^{18}\text{Ne})$ – интенсивность ионов ^{18}Ne , а $I_{\text{полн}}$ – полная интенсивность пучка), составило 22%, что хорошо согласуется с расчетами по программе LISE++ [10]. Данный эксперимент показал возможность работы с.с.д. при нагрузках до 10^5 частиц/с и позволил получить радиоактивный пучок ^{18}Ne приемлемого качества для исследования реакции $^{18}\text{Ne}(p, d)^{17}\text{Ne}$ с целью определения вероятности испускания двух протонов с первого возбужденного уровня ^{17}Ne [11]. Было определено мертвое время системы ~ 40 и $\sim 80\%$ при нагрузках $5 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^4$ триггеров/с

соответственно (с.с.д. в стандарте SAMAC при таких нагрузках с числом параметров более 200 практически не работает).

Перспективным развитием с.с.д. в стандарте VME является использование новых блоков электроники, например дигитайзеров (Struck SIS3320

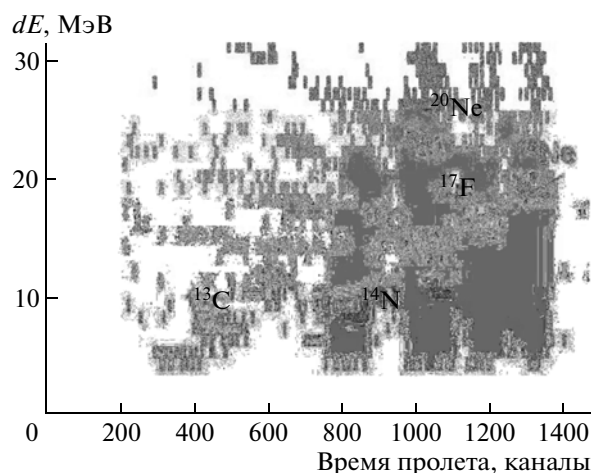


Рис. 4. Идентификация протоноизбыточных ядер из реакции ^{20}Ne (53 МэВ/нуклон) + Be (22 мг/см 2) по потерям энергии в кремниевом детекторе толщиной 68 мкм и времени пролета на базе 8.0 м при настройке сепаратора на ^{18}Ne . С.с.д. работала при нагрузке $5 \cdot 10^4$ триггеров/с.

или CAEN V1720), при помощи которых можно получить качественное n - γ -разделение и существенно упростить сбор данных от массива нейтронных детекторов [12]. Кроме того, эта система сбора данных позволяет присоединить крейты других стандартов (FASTBUS, VXI), что дает возможность использовать в наших экспериментах гамма-детекторы из сверхчистого германия с соответствующей электроникой [13].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке Acculinna (ЛЯР ОИЯИ) создана и апробирована система сбора данных в стандарте VME с использованием процессора RIO-3. Проведена модернизация этой с.с.д.: разработаны новые пользовательские функции для блоков электроники стандарта VME (Mesytec MADC-32, CAEN V775NC) и проведена работа по установке пакетов MBS и Go4 (в том числе и на 64-разрядной платформе Scientific Linux). Ведется работа по включению в созданную с.с.д. блоков электроники нового типа – дигитайзеров SIS3320-250, необходимых для работы с нейтронными детекторами. Поскольку формат накапливаемых файлов с данными может легко конвертироваться в формат ROOT (ЦЕРН), эта система используется для последующей обработки и анализа данных. Выполненная работа по модернизации с.с.д. позволяет проводить и планировать ядерно-физические эксперименты на мировом уровне.

Авторы признательны коллегам из GSI Н. Куртцу, С. Линеву, И. Мухе и Х. Симону за многочисленные и эффективные консультации, а

также С.Н. Дмитриеву и Г.М. Тер-Акопяну за постоянный интерес и поддержку данной работы. Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 11-02-00657-а) и программе сотрудничества ОИЯИ-ВМБФ “Сверхтяжелые элементы и экзотические ядра” за частичную финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rodin A.M., Stepantsov S.V., Bogdanov D.D. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods B. 2003. V. 204. P. 114.
2. *Fomichev A.S., Ter-Akopian G.M., Chudoba V. et al.* // JINR Communication E13-2008-168. Dubna, 2008.
3. *Fomichev A.S., Ter-Akopian G.M., Chudoba V. et al.* // Acta Phys. Pol. B. 2010. V. 41. № 2. P. 475.
4. <http://www.win.gsi.de/daq/>
5. <http://www.ces.ch/board-products/vme-single-board-computers>
6. *Fomichev A.S., Mukha I.G., Stepantsov S.V. et al.* // Int. J. Mod. Phys. E. 2011. V. 20. № 6. P. 1491.
7. *Ter-Akopian G.M., Bezbakh A.A., Wolski R. et al.* // Yadro-2011. Book of Abstracts. Sarov, Russia, 26–30 September 2011. P. 88.
8. <http://www.gsi.de/on-TEAM/grafik/1130845854/gtbc4.pdf>
9. <http://www.gsi.de/on-TEAM/grafik/1130845854/triva5.pdf>
10. LISE++ Version 9.1.23: <http://groups.nsl.msu.edu/lise/lise.html>
11. *Grigorenko L.V., Parfenova Yu.L., Zhukov M.V.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. 051604.
12. *Ambers S.D., Flaska M., Pozzi S.A.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2011. V. 638. P. 116.
13. <http://www.phy.anl.gov/gammasphere/doc/>