УДК 539.1.075

Аппаратурнопрограммный комплекс для измерения энергетических и угловых распределений заряженных частиц, образующихся в ядерных реакциях

Представлен аппаратурно-программный комплекс для проведения измерений энергетических и угловых распределений заряженных частиц, образующихся в ядерных реакциях. Изложены аппаратурная и программная структуры комплекса, описан базовый комплект модульной ядернофизической аппаратуры многоканальной системы регистрации на основе ΔE -E телескопов кремниевых детекторов, описано программное обеспечение (ПО) системы сбора, накопления и обработки экспериментальных данных.

- О. П. Вихлянцев, Л. Н. Генералов,
- А. В. Курякин, И. А. Карпов, Н. Е. Гурин,
- А. Д. Тумкин, С. В. Фильчагин

Введение

Исследование взаимодействия заряженных частиц с ядрами лития, бериллия и бора до сих пор представляет собой значительный научный и практический интерес. С этой целью на ионных пучках (p, d, t) ускорителя ЭГП-10 [1] для измерения энергетических и угловых распределений заряженных частиц, образующихся в ядерных реакциях, создан аппаратурно-программный комплекс. Он разрабатывался с использованием полусферической вакуумной камеры рассеяния (рис. 1), в которой ранее (в 1990-е гг.) были выполнены масштабные измерения дифференциальных сечений основных двухчастичных реакций, протекающих при взаимодействии дейтрона с ядром ⁹Be [2–4]: данные по реакциям ⁹Be(d, d_0), ⁹Be(d, p_0,p_1,p_{2+3},p_{4+5}), ⁹Be(d, t_0), ⁹Be(d, $a_{0,1}$), ⁹Be(d, x)¹⁰Be представлены в библиотеке Exfor. В энергетическом интервале налетающих дейтронов от 3 до 11 МэВ результаты этих измерений и сейчас остаются наиболее полными в мире, используются (через библиотеку SABA [5]) в различных расчетах, востребованы для извлечения были проведены методом, когда спектры заряженных частиц регистрировались без разделения

[©] Ядерная физика и инжиниринг. 2016. Т. 7, № 4. С. 326–335.

их сорта, поэтому имели потерю спектрометрической информации и вследствие этого остались не исследованными некоторые важные многочастичные каналы реакции.

В связи с этим созданный комплекс был разработан с использованием методики, в которой применяется хорошо известный метод идентификации заряженных частиц – ΔE -E. Он основан на одновременном измерении кинетической энергии регистрируемой частицы и ее удельных потерь энергии. Наиболее просто и компактно этот метод реализуется в кремниевых полупроводниковых детекторах, где обычно используются два детектора. В первом, называемом ΔE детектором, частица теряет небольшую долю своей энергии, а основная часть кинетической энергии обычно регистрируется во втором детекторе, называемом E-детектором. Эти детекторы обычно работают в режиме регистрации совпадающих по времени событий. Из-за своей простоты, компактности и высокого энергетического разрешения, достигающего ~10 кэВ, ΔE -E телескопы из кремния получили широкое распространение.

Наша методика включает в себя шесть ΔE -E телескопов из кремниевых детекторов, помещенных в полусферическую камеру рассеяния, модульной ядерно-физической аппаратуры в стандарте КАМАК и NIM, программно-управляемых устройств по смене мишеней и угловых положений телескопов, ПО для сбора и хранения экспериментальных данных, ПО для обработки полученных данных. Созданный аппаратурно-программный комплекс реализован для многодатчиковой системы регистрации заряженных частиц. Кратко о работе комплекса уже сообщалось [6].

Полусферическая камера рассеяния

На рис. 1 представлена схема полусферической (диаметром 490 мм) вакуумной камеры рассеяния (ВКР), в которой шесть ΔE -E телескопов заряженных частиц размещаются на платформе, вращением которой изменяются их угловые положения относительно ионного пучка ускорителя. Корпус ВКР имеет два цилиндрических патрубка – входной и выходной, которыми камера присоединяется к ионопроводу ускорителя и изолированному цилиндру Фарадея (ЦФ). Перед ЦФ находится диафрагма 9, на которую подается потенциал –300 В относительно ЦФ, что предотвращает вылет вторичных электронов из цилиндра. На дне ЦФ, во входном, выходном патрубках и месте расположения мишени установлены кварцевые экраны, используемые для проводки пучка. Наблюдение за положением пучка на этих экранах осуществляется с помощью телекамер. Пучок на поверхности мишени формируется системой магнитных линз и двумя диафрагмами. Первая формирующая диафрагма располагается на расстоянии 50 см от второй – антирассеивающей (диаметр ≈ 5 мм), установленной непосредственно на входе ВКР и защищающей от попадания на оправку мишени частиц из ореола пучка, который появляется после прохождения пучком формирующей диафрагмы.

Мишенное устройство, с возможностью установки восьми мишеней, представляет собой рейку, закрепленную на полусферическом корпусе ВКР. Плоскость рейки составляет угол 45° относительно направления пучка.

Вращение платформы, на которой размещаются детекторы заряженных частиц, управление кварцевыми экранами и смена мишеней выполняются системой электродвигателей дистанционно.

Для управления мишенной камерой используется блок автоматики, позволяющий управлять кварцевыми экранами, вращением платформы и сменой мишеней как вручную, так и с компьютера.



Рис. 1. Схема вакуумной камеры рассеяния: 1, 3, 7, 8 – кварцевые экраны; 2 – формирующая диафрагма; 4 – антирассеивающая диафрагма; 5 – привод; 6 – место для установки детектора-монитора; 9 – подавляющая диафрагма; 11, 12, 14 – электроприводы; 10, 13 – телекамеры; 15 – мишень

Состав аппаратурно-программного комплекса

Аппаратурный комплекс реализован на базе высокопроизводительного промышленного компьютера модели iROBO, модулей ядерно-физической электроники в КАМАК и NIM стандартах и модулей аналогового и дискретного ввода/вывода серии I-7000 фирмы ICP-DAC. Для сохранения больших объемов многопараметрических данных к компьютеру по сети Ethernet подключен файловый сервер с сетевыми накопителями большого объема.

Программный комплекс разработан с использованием инструментального пакета CRW-DAQ [7]. Пакет содержит набор средств для создания графических интерфейсов, средства для программирования алгоритмов контроля и управления (язык DAQ Pascal), драйверы для работы с модулями серии I-7000, а также библиотеку для работы с КАМАК и NIM модулями.

При проектировании ПО ставилась задача построения модульной и отказоустойчивой к аппаратурным и программным сбоям системы, обеспечивающей при этом высокую скорость регистрации, записи и обработки данных. Поскольку требования отказоустойчивости и высокой производительности в значительной мере противоречивы, система имеет сложную структуру. Она разработана с учетом принципов построения отказоустойчивого ПО, включающих модульность, автономность, параллелизм, иерархию и изоляцию процессов, обмен сообщениями, а также общую память для ускорения обмена данными между процессами.

В состав аппаратурно-программного комплекса входят система сбора, накопления и обработки экспериментальных данных и система по смене мишеней и угловых положений телескопов. Каждая из систем состоит из аппаратурной части и программной.

Система сбора, накопления и обработки информации

Для проведения экспериментов с использованием многодатчиковых систем полупроводниковых детекторов создана система сбора, накопления и обработки экспериментальных данных. Она включает в себя аппаратуру для регистрации импульсов с шести телескопов ΔE -E и ПО.

Система сбора, накопления и обработки данных обеспечивает:

– спектрометрию вторичных заряженных частиц под различными углами вылета по отношению к пучку ионов с помощью ΔE -E телескопов из полупроводниковых детекторов;

– автоматизацию процесса измерений, с возможностью установки параметров для аппаратуры, выбором различных режимов измерений (таких как длительность измерений по времени или по событиям, режим совпадения или нет и т. д.) и внесение краткой информации об условиях работы (таких как энергия и тип пучка и т. п.);

 – отображение промежуточных результатов измерений на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхем, текстовых сообщений и спектров;

– сохранение полученных многопараметрических данных в специально разработанном формате LMD (List Mode Data) для ядерно-физических данных, собираемых в режиме List Mode (список событий);

– обработку сохраненных данных, с возможностью работы с двумерными спектрами, т. е. зависящих от двух независимых аргументов, для выделения «локусов» («локус» – область на плоскости аргументов E и ΔE , содержащая полезные сигналы).

Аппаратура системы сбора, накопления и обработки информации

Система реализована на базе высокопроизводительного промышленного компьютера iROBO-200-4045 и модулей ядернофизической электроники в КАМАК и NIM стандартах. Ядернофизическая модульная КАМАК-аппаратура размещалась в КАМАКкрейте фирмы WIENER (Германия), установленном в 19" стойке. Модульная аппаратура NIM стандарта размещалась в корзине типа 4001А фирмы ORTEC, которая устанавливалась в этой же стойке. Для обмена данными между КАМАК-аппаратурой и персональным компьютером в измерениях на ускорителе ЭГП-10 используется крейт-контроллер ПКК4. Для согласования сигналов контроллера ПКК4 с системной шиной ISA-16 компьютера используется адаптер связи ПКК4/ПК. Контроллер и адаптер были разработаны в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Аппаратура работала под управлением программы, установленной на персональном компьютере.

В качестве детекторов использовалось шесть телескопов ТК-ДЕ-15-1000 фирмы ООО «ТехИнвест» (г. Дубна). Конструктивно телескоп представляет собой сборку (рис. 2) из трех полупроводниковых детекторов. У входного окна телескопа находится ΔE -детектор толщиной порядка 10–12 мкм. За ним расположены два детектора *E*1 и *E*2, каждый толщиной 525 мкм, объединенные в один канал регистрации посредством простого суммирования аналоговых сигналов (*E*-детектор).



Рис. 2. Конструкция телескопа ТК-ДЕ-15-1000

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В состав аппаратуры системы сбора, накопления и обработки входят следующие основные модули (рис. 3):

-16-канальные предварительные зарядочувствительные усилители PA16-100 и PA16-500 для предварительного усиления сигналов с ΔE и E детекторов соответственно (ООО «ТехИнвест», г. Дубна);



Рис. 3. Структурная схема измерения с использованием шести телескопов и установленными предусилителями внутри камеры рассеяния

– одноканальный предварительный зарядочувствительный усилитель PA-m1 для предварительного усиления сигналов с мониторного детектора (ООО «ТехИнвест», г. Дубна);

- модуль IP-SYS для питания предусилителей (ООО «ТехИнвест», г. Дубна);

– высоковольтный источник питания модели 710 фирмы ORTEC для подачи напряжения смещения на детекторы;

– быстрые 16-канальные спектрометрические усилители Sa16.1 для усиления и формирования спектрометрических сигналов после предусилителей и стробирующего сигнала для АЦП (ООО «ТехИнвест», г. Дубна);

 – 16-канальные 12-разрядные аналого-цифровые преобразователи ADC16, предназначенные для регистрации амплитуды спектрометрических сигналов (ООО «ТехИнвест», г. Дубна);

– цифровой токовый интегратор модели 439 фирмы ORTEC, обеспечивающий преобразование входного тока в частоту от 0 до 10 кГц;

– сдвоенный стробируемый 24-разрядный счетчик импульсов модели 420A фирмы POLON, предназначенный для счета импульсов с выхода интегратора тока.

Стоит отметить, что спектрометрическая аппаратура фирмы ООО «ТехИнвест» широко используется в экспериментах, проводимых в Объединенном институте ядерных исследований [8].

Программное обеспечение для сбора, накопления и обработки экспериментальных данных

ПО для сбора, накопления, обработки измеренных данных имеет сложную, многокомпонентную структуру, изображенную на рис. 4. ПО многофункционально и включает поддержку нескольких методик (PIXE, RBS и других), которые отличаются параметрами и небольшими фрагментами кода, в то время как основная часть ПО остается единой. Такой подход позволил существенно сократить трудовые затраты на разработку и сопровождение ПО. Здесь рассматривается структура ПО на примере методики измерения дифференциальных по углу сечений реакций образования $p, d, t, {}^{3}$ He, ⁴He при взаимодействии дейтронов с ⁶Li, условно называемых lit6.



Рис. 4. Структурная схема программного обеспечения

В состав рабочего ПО входит несколько программных пакетов, совместно решающих поставленные задачи сбора и обработки данных:

1. За Пакет CRW-DAQ [7, 9, 10], созданный в РФЯЦ-ВНИИЭФ специально для разработки автоматизированных измерительных систем и систем управления. В нем реализованы основные функции по управлению экспериментом, регистрации и сбору, анализу данных.

2. Такет ROOT [11], созданный в Европейском центре ядерных исследований (CERN) для решения расчетных задач в области физики элементарных частиц. В нем реализованы функции по анализу накопленных данных: расчет 2- и 3-мерных спектров, выделение и анализ «локусов».

3. X Пакет UnixUtils [12], собранный в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе свободно распространяемого ПО – пакетов Cygwin [13], Lua [14, 15] и ряда других – для решения вспомогательных задач, возникающих при обработке данных. Этот пакет содержит большое число консольных утилит для работы с файлами, текстами, процессами на уровне операционной системы и служит связующим

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

звеном, своего рода «клеем», необходимым для организации совместной работы разнородных, независимо разработанных программных модулей как единого целого.

Внешний вид ПО системы сбора, накопления и обработки данных представлен на рис. 5. ПО обеспечивает:

- запуск набора данных с возможностью ограничения либо по времени, либо по количеству событий;

 отображение промежуточных результатов измерений на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхем, текстовых сообщений и спектров;

 ввод и сохранение дополнительной информации (номер мишени, толщина мишени, энергия пучка, тип частиц и т. д.);

- установку фильтра, позволяющего выбрать способ регистрации (например, можно выбрать режим совпадения, когда оба детектора в телескопе обязаны сработать одновременно);

- выбор режима работы ADC системы и установку порогов дискриминатора нижнего и верхнего уровней;

 – непрерывное сохранение данных в файлах на жестком диске управляющего компьютера в формате LMD;

– возможность отключения процесса сохранения данных для проведения отладочных работ.



Рис. 5. Графический интерфейс программы сбора данных

Формат LMD (List Mode Data) разработан с целью записи одного или нескольких потоков многопараметрических событий, имеющих фиксированную в пределах файла структуру (число полей события и их содержание), вместе с сопроводительной информацией об условиях измерений и сопутствующими данными. Он предполагает инкрементный характер записи, когда данные поступают порциями в реальном времени из одного или нескольких источников данных. Файлы данных LMD предназначены для долговременного хранения многопараметрических событий в ядерно-физических экспериментах, проводимых на электростатическом ускорителе ионов ЭГП-10 в режиме непрерывного сбора данных List Mode.

Система смены мишеней и угловых положений телескопов

Система смены мишеней и угловых положений телескопов или система для управления камерой рассеяния является вспомогательной для проведения измерений энергетических и угловых распределений заряженных частиц в ядерных реакциях. Она «автоматизирует» процесс работы с камерой рассеяния и обеспечивает дистанционное управление элементами камеры, а именно:

 – дистанционную установку выбранной оператором мишени с помощью управляющей программы;

– дистанционную установку кварцевых экранов при проводке ионного пучка ускорителя на мишень;

– дистанционное включение и выключение освещения внутри камеры рассеяния при визуальном наблюдении через смотровое окно (обычно используются видеокамера и монитор для удаленного просмотра) за положением ионного пучка;

– дистанционную установку угла $\Delta E \cdot E$ телескопов по отношению к пучку ионов с помощью токового датчика угла поворота серии RP и RP-M фирмы WayCon (RP-M-180-420A-KA, максимальные отклонения от измеряемой величины по паспорту: +0,17 %, -0,22 %).

Система реализована на модулях аналогового и цифрового ввода/вывода серии I-7000 фирмы ICP DAS. Модули объединяются в локальную сеть по двухпроводной линии связи в стандарте RS-485 на скорости 115200 бод и питаются от блока питания с напряжением +24 В.

ПО системы выбора мишени базируется на пакете CRW-DAQ [7], обеспечивает работу с модулями аналогового и цифрового ввода/вывода серии I-7000, позволяет отображать измеряемые данные в текстовой и графической форме в реальном времени, а также строить пользовательский интерфейс для управления программой в удобной для оператора форме в виде мнемосхем. Для отображения состояний основных параметров разработан графический интерфейс, основанный на активной графической мнемосхеме (рис. 6). Управляемые элементы схемы имеют объемный вид. Графический интерфейс обеспечивает пользователю удобство управления.

ЭГП-камера рассеяния							
Управление		Кварц «Передний»					
Ручн.	Прог.	Двигатель	Свет				
Выбор устройства		Кварц «Задний»					
Мишень	Детект.	Двигатель	Свет				
Двигатель	арование аства Свет	Текущий [угол Заданный [точная установка -49.75				
		угол Двигатель поворота					
		Старт	Стоп				
		По час.	Пр. час.				

Рис. 6. Мнемосхема системы для управления камерой рассеяния

Обработка двумерных спектров

Обработка экспериментальных данных выполняется с помощью редактора «локусов» «locus_editor», входящего в состав системы сбора, накопления и обработки информации. Редактор создан для обработки двумерных спектров (с математическими координатами X и Y) или «локусов», содержащих события, представляющие интерес. Эти события представляют собой двумерные гистограммы. Редактор, написанный на языке C++ в пакете ROOT, работает во встроенном в ROOT интерпретаторе CINT и включает в себя файлы: locus_editor.C – главный файл, lmd_reader.h – класс для чтения файлов в формате LMD, locus_editor.h – файл с процедурами, необходимыми для работы locus editor.C.

Исходными данными для редактора обработки «локусов» служат LMD-файлы, содержащие запись многопараметрических событий регистраторов. Эти файлы генерируются системой сбора и регистрации данных во время измерений. Программа обработки запускается из среды пакета CRW-DAQ.

Перед запуском редактора «locus_editor» задаются параметры обработки в окне диалога задания параметров (рис. 7). Важную роль при наборе гистограммы играет число ячеек (bins). Сначала задается базовое число ячеек (поле «ADC num. of Bins», рис. 7), которое обычно определяется разрядностью используемого ADC. Затем для одномерных (1D) и двумерных (2D) гистограмм задается параметр сжатия (поле «Rebin», рис. 7), который задает коэффициент сжатия гистограмм, когда каждые Rebin ячеек объединяются в одну. В результате число ячеек N каждой гистограммы с размерностью D будет

$$N = \left(\frac{ADCnum.of Bins}{\text{Rebin}}\right)^D.$$

АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ...

Ладно Хотмена			E celdhuatian				
DC num of Bins 8192	Rebin 1D 1	→ 2D 128 →	dE0Tet 0	▼ 3.418	-	☑ Обработать dE0,E0	-
Удалять ROOT session	Q Factor	1 -	EOTel 0	▼ 3 418	-	□ Oбработать dE1,E1	100
Открывать Lister SPD	ROI E0 0	- 0 -	dE1Tel 0	- 3.418	-	🗆 Обработать dE2,E2	
Искать+запускать ЕХЕ	ROI E1 0	• 0 •	EiTel 0	• 3.418	•	🗌 Обработать dE4,E4	
Нормировать́ по QBeam	ROI E2 Ø	• 0 •	dE2Tel 0	▼ 3 418	•	□Oñpañorar⊾ dES ES	
ROI E3 0	ROI E3 0	• 0 •	E2Tel 0	- 3.418	-		
			dE3Tet 0	• 3.418	-		
)I X(0 0 • 0	▼ Y0 0	• 0 •	E3Tel 0	▼ 3.418	•		
IX1 0 ▼ 0	- Y1 0	• 0 •	dE4Tet 0	▼ 3.418	-		
·I X2 0 ▼ 0		• 0 •	E4Tel 0	▼ 3.418	*		
ROI X3 0 • 0	Y3 0	• 0 •	dE5Tel 0	▼ 3.418	-		
			ESTEL 0	- 3.418	-		
			EMon a	• 3 418	•		
			E0Pixe 0	• 3.418	-		
			EIPIX0 0	• 3.418	-		
			EAKOS 0	▼ 3.418	T		
			EOKDS 0	- 3.418	-		

Рис. 7. Окно задания параметров обработки

Сжатие гистограмм, особенно размерности 2D, необходимо для экономии памяти. Например, при размере каждой ячейки size of (double) = 8 байт и базовом числе ячеек 8192, каждая 2D гистограмма занимает $8129 \cdot 8192 \cdot 8 = 536870912$ байт = 512 M6, в то время как при сжатии в два раза этот объем снижается в четыре раза до 128 M6. Таким образом, сжатие 2D гистограмм позволяет избежать переполнения памяти. Это сжатие, конечно, огрубляет первоначальную информацию. Поэтому необходимо подбирать компромиссное число Rebin, позволяющее проводить обработку с приемлемым качеством и потреблением ресурсов ПК. Для представления признаков событий в физических единицах, в случае X = E и $Y = \Delta E$ спектров, выраженных в энергетических единицах (кэВ или МэВ), можно задать коэффициенты калибровки двумерных спектров. После представления осей ΔE и E в энергетических единицах в окончательной обработке двумерные спектры отображаются в координатах ΔE и $E + \Delta E$ (ось полной энергии).

После задания имени файла и параметров обработки запускается редактор локусов. По желанию можно открыть окна с одномерными (рис. 8,*a*) и двумерными спектрами (рис. 8,*б*).



Рис. 8. Спектры для обработки программой «locus editor»

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Далее с помощью мыши выделяется и укрупняется интересующая область спектра и помечаются верхняя и нижняя границы интересующего локуса (рис. 9,*a*). После выделения верхней и нижней границ клавиатурной командой «L» (locus) выполняется вырезание локуса. Для этого в цикле для каждой ячейки гистограммы находится центр ячейки и определяется, попадает ли он в границы локуса. Ячейки, попавшие в границы локуса, остаются заполненными, а остальные ячейки гистограммы очищаются в ноль. Таким образом, после выполнения команды выделения локуса ненулевыми остаются только ячейки с центром в границах локуса (рис. 9, δ).





а

б Рис. 9. Выделения локуса

При вырезании локуса также рассчитываются некоторые его характеристики:

– Number of bins – число ячеек, попавших в локус, т. е. тех, центр которых находится между границами локуса;

- Sum area of bins - суммарная площадь ячеек, попавших в локус;

– Integral – интеграл, т. е. сумма значений всех ячеек, попавших в локус, или суммарный счет событий в локусе.

После вырезания локуса можно выполнить клавиатурную команду «Х», которая проецирует локус на «горизонтальную» ось OX. В результате в каждой ячейке одномерной гистограммы накапливается сумма событий ячеек двумерной гистограммы с одинаковым значением Х. Полученный одномерный спектр используется для дальнейшей обработки. Можно сделать проекцию и на ось OY. На рис. 10 показаны данные обработки тритонного локуса, обусловленного реакцией ⁹Be(d, xt).



Рис. 10. Проекция тритонного локуса на ось полной энергии тритона при энергии дейтронов 5,5 МэВ и угле регистрации 85°; о – эксперимент

Заключение

На ускорителе ЭГП-10 [1] (РФЯЦ-ВНИИЭФ) создан аппаратурно-программный комплекс для проведения измерений энергетических и угловых распределений заряженных частиц, образующихся в ядерных реакциях, что является существенным расширением экспериментальной базы и методических возможностей ядерно-физических исследований.

С помощью этого комплекса выполнены исследования парциальных каналов реакций 6,7 Li+d, 9 Be+d. На рис. 11 показаны измеренные дифференциальные сечения реакции 6 Li(d, α) 4 He.



Рис. 11. Дифференциальные сечения реакции ⁶Li(*d*, α)4Не при энергии дейтронов 6,25 МэВ: • – эксперимент, — – описание

Список литературы

1. Абрамович С. Н. Технические возможности ВНИИЭФ для исследований в области ядерной спектроскопии // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997. ТИЯС-ХІ. Спец. выпуск. С. 4.

2. Абрамович С. Н., Генералов Л. Н, Гужовский Б. Я. и др. Оптико-модельное описание упругого рассеяния дейтронов на ядрах ⁹Ве // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1993. Т. 57, № 1. С. 179.

3. Генералов Л. Н., Абрамович С. Н, Звенигородский. Сечения реакций ⁹Be(d, p0,1) и ⁹Be(d, t₀) // Там же. 2000. Т. 65, № 3. С. 440.

4. Генералов Л. Н., Абрамович С. Н., Звенигородский А. Г. Сечения образования радиоактивных ядер ¹⁰Ве в реакции ⁹Ве(*d*, *p*)¹⁰Ве // Сб. мат. конф. по ядер. спектр. и структуре ядра «Ядро-2001». Саров, 2001. С. 186.

5. Zvenigorodskij A. G., Zherebtsov V. A., Lazarev V. A. et al. The library of evaluated and experimental data on charged particles for fusion application // IAEA-NDS-191, Dec. 1999.

6. Генералов Л. Н., Виноградов Ю. И., Карпов И. А. и др. // Сб. мат. конф. по ядер. спектр. и структуре ядра «Ядро-2013». Москва, 2013.

7. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ): Св-во РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г., www.crw-daq.ru.

8. Цыганов Ю. С. Автоматизация экспериментов на газонаполненном сепараторе // ФЭЧАЯ. 2016. Т. 47. Вып. 1. С. 138.

9. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 80–90.

10. Курякин А. В. Автоматизация физических экспериментов на тритиевых комплексах исследовательских установок ТРИТОН, АКУЛИНА и ПРОМЕТЕЙ: Автореферат дис. на соискание степени канд. физ.-мат. наук. Capob, 2010. http://ftp.jinr.ru/dissertation/Kuryakin.pdf.

11. http://root.cern.ch.

- 12. http://www.crw-daq.ru/download/bin/.
- 13. http://www.cygwin.com/.
- 14. http://lua.org.
- 15. http://github.com/rjpcomputing/luaforwindows.

Hardware-Software Complex for Measuring Energy and Angular Distributions of Charged Particles Produced in Nuclear Reactions

O. P. Vikhlyantsev, L. N. Generalov, A. V. Kuryakin, I. A. Karpov, N. E. Gurin, A. D. Tumkin, S. V. Fil'chagin

A hardware-software complex aimed at measuring energy and angular distributions of charged particles produced in nuclear reactions is presented. There are described hardware and software structures of the complex, basic kit of modular nuclear physics hardware for a multi-channel detecting system on the base of ΔE -E telescopes of silicon detectors, software for the system of experimental data acquisition, accumulation and processing.