

С. М. Пиядин<sup>1,\*</sup>, Т. А. Васильев<sup>1</sup>, Ю. В. Гурчин<sup>1</sup>,  
А. Ю. Исупов<sup>1</sup>, Ю.-Т. Карачук<sup>1,2</sup>, В. А. Краснов<sup>1</sup>,  
А. К. Курилкин<sup>1</sup>, П. К. Курилкин<sup>1</sup>, В. П. Ладыгин<sup>1</sup>,  
А. Н. Ливанов<sup>1</sup>, Г. Мартинска<sup>3</sup>, С. Г. Резников<sup>1</sup>,  
А. К. Семенов<sup>4</sup>, А. Е. Туманов<sup>4</sup>, А. Н. Хренов<sup>1</sup>, М. Янек<sup>1,5</sup>

$\Delta E-E$ -ДЕТЕКТОР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПРОТОНОВ  
В РЕАКЦИИ БЕЗМЕЗОННОГО РАЗВАЛА ДЕЙТРОНА  
НА ВНУТРЕННЕЙ МИШЕНИ НУКЛОТРОНА-М

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Исследовательский институт электротехники, Бухарест, Румыния

<sup>3</sup> Университет П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

<sup>4</sup> Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматике

<sup>5</sup> Физический факультет, Университет г. Жилина, 010 26 Жилина, Словакия

\* E-mail: piyadin@jinr.ru

$\Delta E-E$ -детектор для регистрации протонов  
в реакции безмезонного развала дейтрона  
на внутренней мишени нуклотрона-М

Представлена конструкция  $\Delta E-E$ -детектора для изучения реакции развала дейтрона на внутренней мишени нуклотрона-М в интервале энергии дейтрона 300–500 МэВ. Кратко описана система высоковольтного питания ФЭУ-63 на базе модуля Wenzel Elektronik, управляемого от компьютера. Рассматривается светодиодная система мониторинга работы  $\Delta E-E$ -детектора. Представлены результаты тестирования  $\Delta E-E$ -детектора как на космических мюонах, так и на пучках дейтронов нуклотрона.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

$\Delta E-E$  Detector for the Registration of the Protons  
from the Deuteron Nonmesonic Breakup Reaction  
at Internal Target at Nuclotron-M

The design of  $\Delta E-E$  detector for study of the deuteron breakup reaction at the internal target at Nuclotron-M in the deuteron energy interval 300–500 MeV is presented. The high voltage power system for PMTs-63 that is managed by Wenzel Elektronik module with the computer control is shortly described. The light-emitting diode monitoring of the  $\Delta E-E$  detector's work is considered. The results of the  $\Delta E-E$  detector tests with cosmic muons and deuterons at Nuclotron are presented.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

## ВВЕДЕНИЕ

Главная цель проекта DSS (Deuteron Spin Structure) — расширение энергетического и углового диапазонов в измерениях различных наблюдаемых для процессов, включающих трехнуклонные системы. Целью экспериментальной программы проекта DSS является получение информации о спинзависимой части трехнуклонных сил из двух процессов:  $dp$ -упругого рассеяния и  $dp$ -развала с регистрацией двух протонов при промежуточных и высоких энергиях.

Экспериментальные данные по дифференциальному сечению и дейтронным анализирующим способностям для широкого диапазона фазового пространства были получены при энергии 130 МэВ в KVI [1]. Результаты показывают чувствительность поперечного сечения к спиновой структуре трехнуклонных сил. Теоретические расчеты для реакции безмезонного развала дейтрона, выполненные при энергии 400 МэВ [2], предсказывают, что дифференциальное сечение и тензорная анализирующая способность для различных кинетических конфигураций также чувствительны к вкладу трехнуклонных сил.

Целью данной работы была разработка  $\Delta E-E$ -детектора на основе пластических сцинтилляторов и ФЭУ для изучения реакции развала дейтрона с энергией до 500 МэВ. В работе приведены конструкция детектора, схема делителя напряжения для ФЭУ-63, а также результаты тестирования детекторов на космических мюонах и пучке.

### 1. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ $\Delta E-E$ -ДЕТЕКТОР

Для изучения реакции развала дейтрона с регистрацией двух протонов будут использоваться восемь детекторов  $\Delta E-E$ -типа. Схематический вид детектора приведен на рис. 1, б.

Детектор  $\Delta E-E$  состоит из двух сцинтилляторов  $\Delta E$  и  $E$ . Первый имеет цилиндрическую форму с высотой 10 мм и диаметром 80 мм. Данный сцинтиллятор просматривается двумя ФЭУ-85, расположенными друг

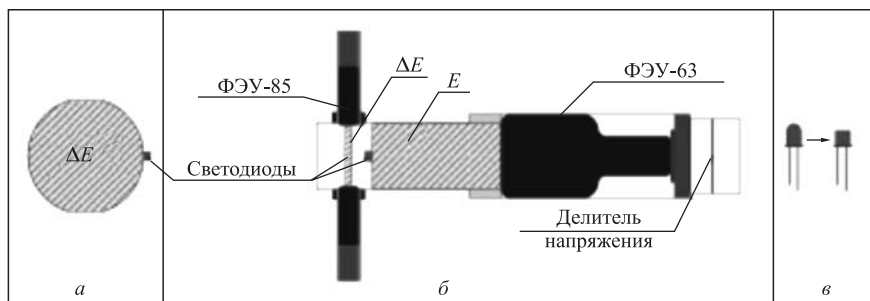


Рис. 1. а) Вид пластикового сцинтиллятора  $\Delta E$ -детектора. б) Общий вид  $\Delta E$ – $E$ -детектора для изучения реакции  $dp$ -развала. в) Модификация светодиода

напротив друга. Для увеличения площади соприкосновения фотокатода каждого из ФЭУ-85 на сцинтиляторе были сделаны проточки, которые потом были отполированы (рис. 1, а).  $\Delta E$ -сцинтилятор покрыт белой бумагой.  $E$ -сцинтилятор также имеет цилиндрическую форму высотой 200 мм и диаметром 100 мм. В качестве светоприемника для  $E$ -сцинтилятора был использован ФЭУ-63, обладающий необходимым для эксперимента размером фотокатода (100 мм) и хорошими временными и амплитудными свойствами.  $E$ -сцинтилятор также был обернут белой бумагой. Торцевая часть сцинтиллятора, примыкающая к  $\Delta E$ -сцинтилятору, была покрыта черной бумагой, чтобы исключить возможность попадания света от одного сцинтиллятора к другому.

Все элементы представленного счетчика расположены в светонепроницаемом металлическом кожухе. Все ФЭУ и делители установлены на пружинах, что позволяет достичь хорошего контакта ФЭУ со сцинтилляторами.

Для достижения надежной корреляции амплитуд  $\Delta E$ - и  $E$ -детекторов необходимо обеспечить стабильность коэффициента усиления ФЭУ и исключить влияние шумов, возникающих в множителе [3,4].

## 2. ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ФЭУ-63

Для эффективной регистрации сигналов с фотоэлектронного умножителя необходимо обеспечить высокую стабильность напряжений питания катода и динодов ФЭУ. Обычно в схемах питания применяются делители на линейных резисторах или нелинейных элементах (стабилитронах или транзисторах). В случае использования линейных резисторов средняя частота повторения выходных импульсов ограничивается величиной среднего тока динодов на уровне 30–40 от тока делителя [3,5].

Недостатками использования нелинейных элементов является необходимость подбора стабилитронов, а также непропорциональность изменения



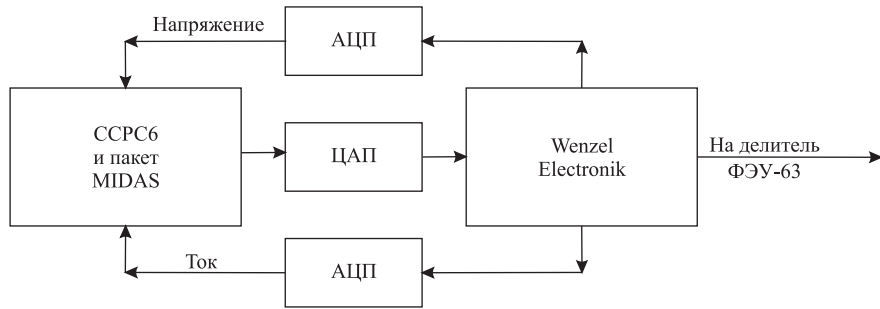


Рис. 3. Блок-схема системы высоковольтного питания ФЭУ-63 на базе модулей «Wenzel Electronik»: ЦАП — 8-канальный 12-разрядный цифроаналоговый преобразователь (8DAC-12). АЦП — 8-канальный 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь (8ADC-14)

высоковольтного питания ФЭУ-63 основана на модуле Wenzel Electronik, напряжение которого управляется и контролируется с помощью ЦАП и двух АЦП-модулей КАМАК [8] (рис. 3). Использование двух модулей АЦП позволило контролировать как напряжение, так и ток, проходящий через делитель ФЭУ-63. Для управления и контроля высоким напряжением модуля Wenzel Electronik в режиме on-line был использован пакет MIDAS [9].

#### 4. СВЕТОДИОДНАЯ СИСТЕМА $\Delta E-E$ -ДЕТЕКТОРА

Для мониторинга работы  $\Delta E-E$ -детектора в конструкцию счетчика введена светодиодная импульсная система мониторинга работы детекторов на базе генератора ГСД-712. Светодиодный генератор ГСД-712 разработан в ЛФВЭ ОИЯИ. На рис. 4 представлены амплитуды сигналов ФЭУ-63, полученные с помощью светодиода и от космических мюонов соответственно. Можно видеть, что распределения амплитуд импульсов от светодиода и от минимально ионизирующей частицы близки по форме. Для каждого сцинтиллятора был использован индивидуальный светодиод, линза которого была сточена и отполирована для увеличения площади соприкосновения его со сцинтиллятором (рис. 1, в).

С помощью светодиодной системы были измерены вольт-амплитудные зависимости для ФЭУ-85 и ФЭУ-63 (рис. 5). Данные были получены при изменении напряжения с шагом 10 В для ФЭУ-85 и 25 В — для ФЭУ-63. Для каждой точки по напряжению полученные распределения амплитуды фитировались распределением Гаусса для определения наиболее вероятного значения амплитуды. На рис. 5, а видно, что при значениях напряжения выше 1000 В ФЭУ-85 работают в режиме насыщения. Во время набора данных на пучке дейтронов для ФЭУ используются напряжения ниже данного значения.

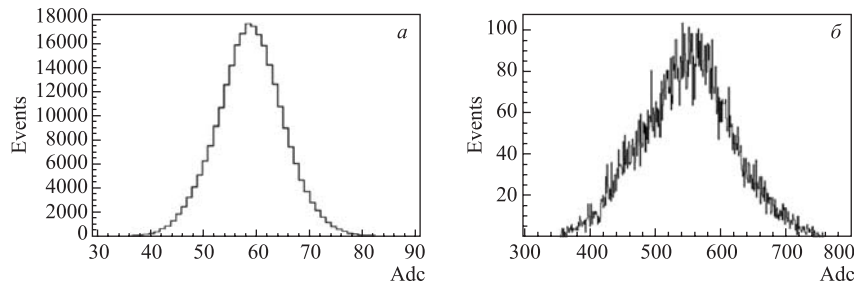


Рис. 4. Амплитуды сигнала ФЭУ-63, полученные с помощью светодиода (а) и от космических мюонов (б) соответственно

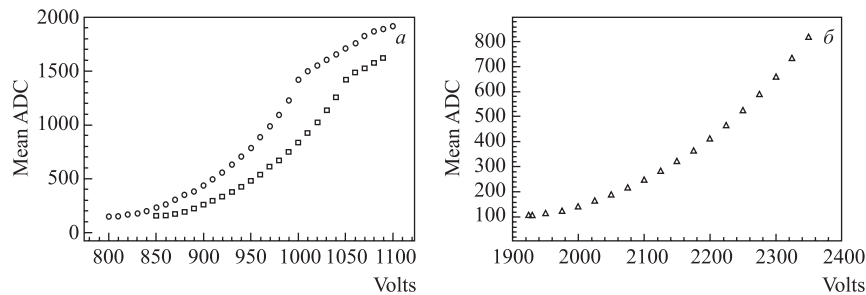


Рис. 5. а) Результаты, полученные на светодиодах для двух ФЭУ-85, б) — для ФЭУ-63

Разработанная светодиодная система эффективно использовалась для настройки и мониторинга стабильности работы  $\Delta E-E$ -детектора во время набора данных.

## 5. ТЕСТИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРОВ $\Delta E-E$ НА КОСМИЧЕСКИХ МЮОНАХ

При тестировании на космических лучах  $\Delta E-E$ -детектор был расположен вертикально. Снизу от него был установлен дополнительный детектор со сцинтиллятором цилиндрической формы, диаметр и высота которого составляли 100 и 20 мм соответственно. Для съема информации с данного сцинтиллятора был использован ФЭУ-85. Блок-схема установки для тестирования представлена на рис. 6.

Сформированные сигналы с двух ФЭУ-85 (один из которых является стартом для ВЦП) заведены на одну схему совпадений, сигнал с выхода которой поступает на вход триггерного модуля LT320D. Сигналы с ФЭУ-63 и дополнительного детектора также были заведены на вход схемы совпадений, сигнал с выхода которой поступал на второй триггерный вход модуля LT320D.

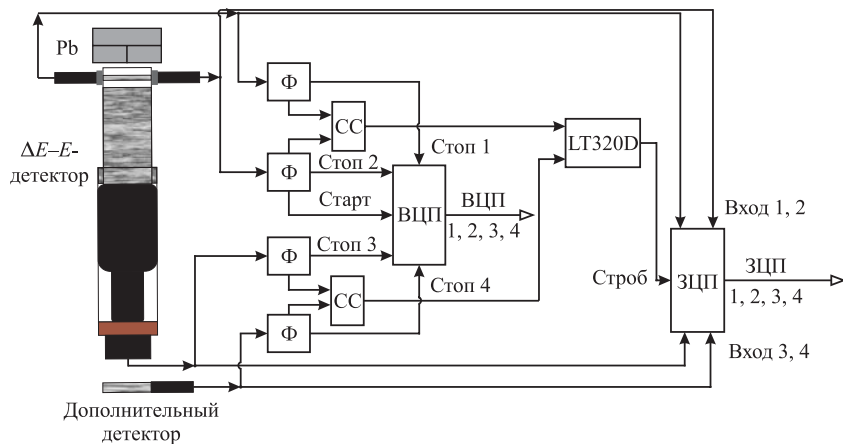


Рис. 6. Блок-схема установки для тестирования  $\Delta E-E$ -детектора на космических мюонах: Ф — формирователь сигнала 4Ф-115, СС — схема совпадения 2СС-1511. ВЦП — четырехканальный ВЦП-369, АЦП — четырехканальный ЗЦП-397, LT320D — триггерный модуль

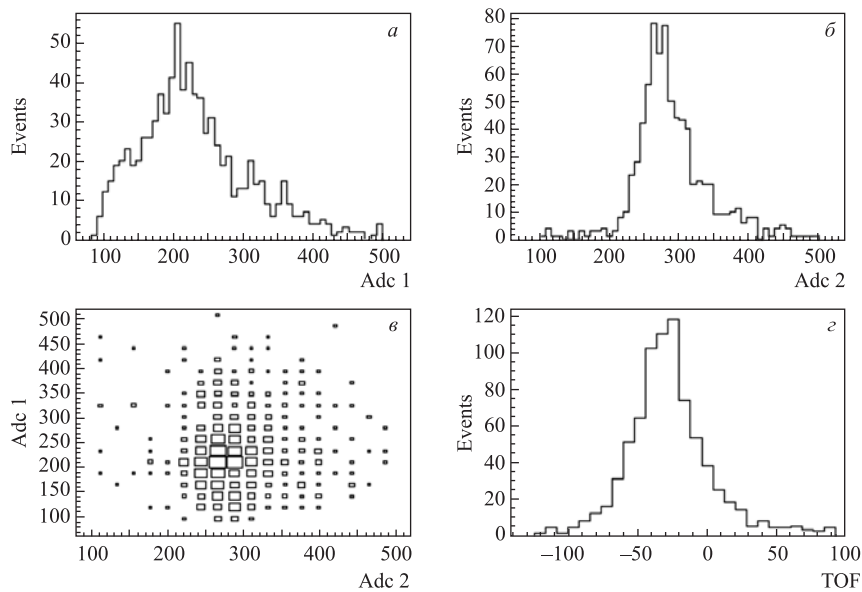


Рис. 7. Результаты тестирования  $\Delta E-E$ -детектора на космических мюонах: а) амплитуда с одного из ФЭУ-85  $\Delta E-E$ -детектора; б) амплитуда с ФЭУ-63; в) корреляция этих двух амплитуд; г) разница времен прихода сигналов для ФЭУ-85 и ФЭУ-63



Модуль LT320D позволяет управлять мажоритарной схемой совпадений в режиме on-line. Данный модуль разработан в ЛФВЭ ОИЯИ. Использование дополнительного детектора позволило полностью избавиться от мюонов, траектория которых проходила через боковую поверхность  $E$ -сцинтиллятора.

Амплитуды сигналов с ФЭУ-85, ФЭУ-63 и корреляция этих амплитуд, полученные на космических мюонах, представлены на рис. 7.

## 6. ТЕСТИРОВАНИЕ $\Delta E-E$ -ДЕТЕКТОРОВ НА ПУЧКЕ ДЕЙТРОНОВ

На рис. 8 представлена блок-схема установки для включения  $\Delta E-E$ -детектора в экспериментах с пучками дейтронов.

В эксперименте использовали два  $\Delta E-E$ -детектора, расположенных с внутренней и с внешней стороны ионопровода нуклотрона. В сеансе использовалась система сбора данных стандарта КАМАК, основанная на триггерном модуле LT320D [10]. Результаты тестирования  $\Delta E-E$ -детекторов, полученные на внутренней мишени на пучке дейтронов с энергией 2 ГэВ, представлены на рис. 9.

В 40-м сеансе нуклотрона при импульсе дейтронов 3,5 ГэВ/с на углеродной мишени был проведен набор данных с использованием четырех  $\Delta E-E$ -детекторов, расположенных под различными углами друг к другу.

Определение кинематических переменных для реакции развала дейтрона показано на рис. 10. Плоскость  $XZ$  — горизонтальная плоскость, в которой находится налетающий дейтрон. Плоскость  $XY$  перпендикулярна импульсу налетающего дейтрона. На данном рисунке не изображена траектория вылетающего нейтрона.  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  являются полярными углами двух протонов в

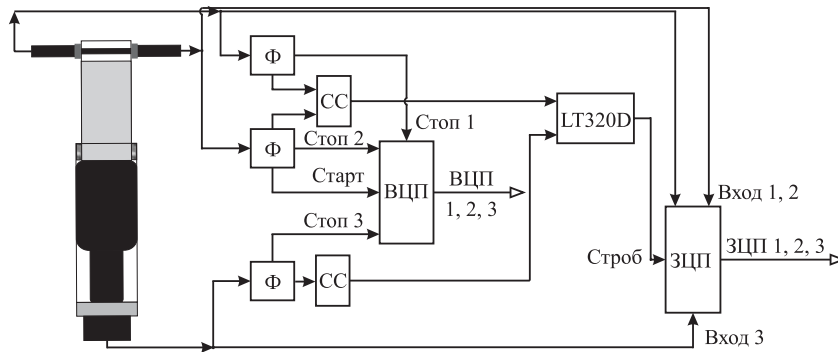


Рис. 8. Схема сбора информации в экспериментах с пучками дейтронов на нуклотроне с  $\Delta E-E$ -детектора: Ф — формирователь сигнала 4Ф-115, СС — схема совпадения 2СС-1511, ВЦП — четырехканальный ВЦП-369, АЦП — четырехканальный ЗЦП-397, LT320D — триггерный модуль

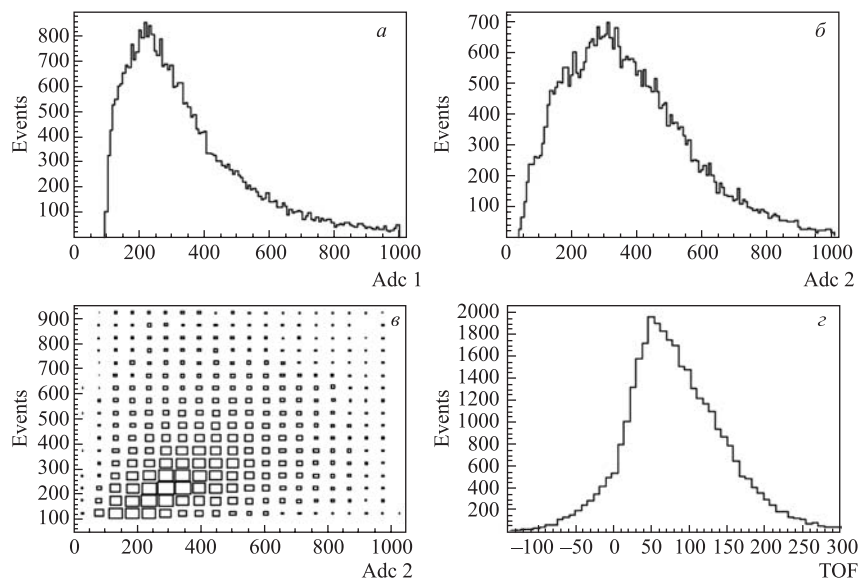


Рис. 9. Результаты тестирования  $\Delta E-E$ -детектора на пучке дейтронов: а) амплитуда с одного из ФЭУ-85; б) амплитуда с ФЭУ-63; в) корреляция этих двух амплитуд; г) разница времен между ФЭУ-85 и ФЭУ-63

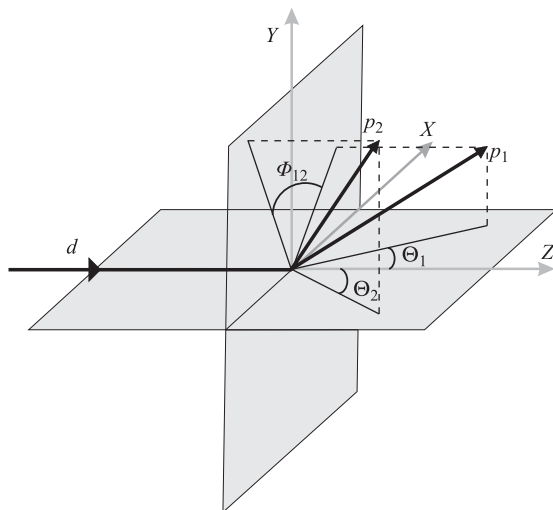


Рис. 10. Определение кинематических переменных для реакции развала дейтрона

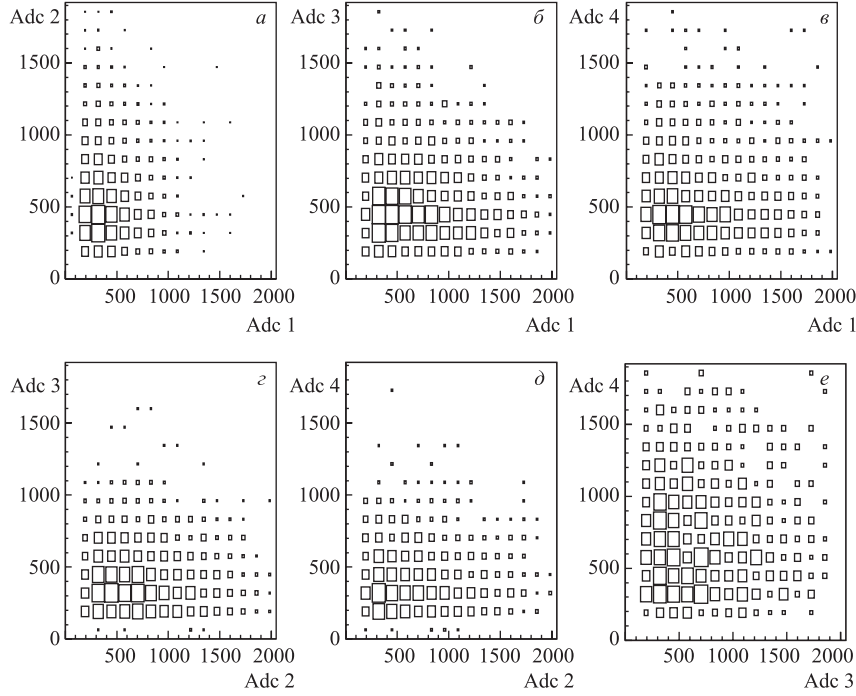


Рис. 11. Корреляция амплитуд  $E$ -детекторов для четырех различных кинематических конфигураций  $\Delta E$ - $E$ -детекторов. *a)*  $\Theta_1 = 19^\circ$ ,  $\Theta_2 = 28^\circ$ ,  $\Phi_{12} = 180^\circ$ ; *б)*  $\Theta_1 = 19^\circ$ ,  $\Theta_2 = 41^\circ$ ,  $\Phi_{12} = 35^\circ$ ; *в)*  $\Theta_1 = 19^\circ$ ,  $\Theta_2 = 55^\circ$ ,  $\Phi_{12} = 142^\circ$ ; *з)*  $\Theta_1 = 28^\circ$ ,  $\Theta_2 = 41^\circ$ ,  $\Phi_{12} = 145^\circ$ ; *д)*  $\Theta_1 = 28^\circ$ ,  $\Theta_2 = 55^\circ$ ,  $\Phi_{12} = 38^\circ$ ; *е)*  $\Theta_1 = 41^\circ$ ,  $\Theta_2 = 55^\circ$ ,  $\Phi_{12} = 107^\circ$

продольной плоскости  $XZ$ , а  $\Phi_{12}$  — угол между  $P_{1\perp}$  и  $P_{2\perp}$  в поперечной плоскости.

Набор данных осуществлялся с помощью системы сбора данных на базе VME-стандарта. Результаты по корреляциям амплитуд  $E$ -детекторов представлены на рис. 11. Наблюдаемая четкая корреляция всех четырех  $\Delta E$ - $E$ -детекторов различных кинематических конфигураций свидетельствует о их надежной работе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и создан  $\Delta E$ - $E$ -детектор для изучения реакции развала дейтрона.

В конструкции  $\Delta E$ - $E$ -детектора использована система светодиодного мониторинга работы счетчика.

Выполнен ряд тестов  $\Delta E-E$ -детекторов как на космических мюонах, так и на пучке дейтронов нуклотрона.

Продемонстрирована надежная работа детектирующей аппаратуры для эксперимента по изучению безмезонного развала дейтрона.

Работа была частично поддержана грантом для молодых ученых ОИЯИ и грантами РФФИ (№ 07-02-00102а и № 10-02-00087а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Kistryn St. et al.* Systematic Study of Three-Nucleon Force Effects in the Cross Section of the Deuteron-Proton Breakup at 130 MeV // *Phys. Rev.* 2005. V. C72. P. 044006.
2. *Kuros-Zolnierczuk J. et al.* Three-Nucleon Force Effects in Nucleon Induced Deuteron Breakup. 1. Predictions of Current Models // *Phys. Rev.* 2002. V. C66. P. 024003.
3. *Цитович А. П.* Ядерная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. *Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. *Басиладзе С. Г., Иванов В. И.* Питание ФЭУ для работы с частотой 100 МГц. Сообщение ОИЯИ 13-9172, Дубна, 1975.
6. *Атанасов И. Х., Русанов И. Р.* Источник высоковольтного напряжения для питания ФЭУ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2000. № 3[100]. С. 62–67.
7. <http://hvsys.dubna.ru>
8. *Pilyar A. V.* Multichannel High Voltage System for the Detection System of LNS-Project // *NEC2009 — XXII International Symposium on Nuclear Electronics and Computing*, Varna. E10,11-2010-22, Dubna, 2009. P. 186–191.
9. <http://midas.psi.ch>
10. *Isupov A. Yu.* Upgrade of the DAQ Systems for the LHE Polarimeters to Support Vector-Tensor Polarimeter on the Nuclotron Internal Target // *Czech. J. Phys. Suppl.* 2006. V. C56. P. 385–392.

Получено 22 июня 2010 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 09.08.2010.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 325 экз. Заказ № 57060.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)