

P1-2013-13

С. М. Пиядин<sup>1,\*</sup>, М. Янек<sup>1,2</sup>, Б. Трпишова<sup>2</sup>,  
Т. А. Васильев<sup>1</sup>, Ю. В. Гурчин<sup>1</sup>, А. Ю. Исупов<sup>1</sup>,  
Ю. -Т. Карачук<sup>1,3</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>4</sup>, С. Г. Резников<sup>1</sup>, А. Н. Хренов<sup>1</sup>

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИИ  $dp \rightarrow ppn$   
НА ВНУТРЕННЕЙ МИШЕНИ НУКЛОТРОНА  
ПРИ ЭНЕРГИИ ДЕЙТРОНА 500 МэВ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

---

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

<sup>2</sup> Физический факультет, Университет Жилины, Жилина, Словакия

<sup>3</sup> Исследовательский институт электротехники, Бухарест

<sup>4</sup> Университет П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

\* E-mail: piyadin@jinr.ru

Пиядин С. М. и др.

P1-2013-13

Изучение реакции  $dp \rightarrow ppn$  на внутренней мишени нуклотрона при энергии дейтрона 500 МэВ

Представлены результаты обработки данных по изучению реакции безмезонного развала дейтрона при энергии 500 МэВ. Описан эксперимент на внутренней мишени нуклотрона, показан алгоритм выделения полезных событий, относящихся к реакции развала дейтрона при регистрации двух протонов.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Piyadin S. M. et al.

P1-2013-13

The Study of the  $dp \rightarrow ppn$  Reaction at the Internal Target Station at Nuclotron at Deuteron Energy of 500 MeV

The results of data processing for the study of the deuteron breakup reaction at energy of 500 MeV are presented. The set-up at the Internal Target Station at Nuclotron is described, the algorithm of the useful events selection for the deuteron breakup reaction with the registration of two protons is demonstrated.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение нуклон-нуклонного взаимодействия является одним из наиболее важным направлений ядерной физики. Точное знание характеристик двух-нуклонных систем должно обеспечить естественную основу для понимания свойств и взаимодействия ядер. Это предположение должно быть проверено моделями взаимодействия двух нуклонов, чтобы описывать свойства много-ядерных систем с возрастающей сложностью. Очевидно, что наименее сложной нетривиальной средой является трехнуклонная система.

Главной целью проекта DSS (Deuteron Spin Structure) является 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 [1].

К настоящему времени получено новое поколение  $NN$ -потенциалов (AV-18 [2], CD-Bonn [3], Nijmegen [4] и др.), которые с хорошей точностью воспроизводят данные  $NN$ -рассеяния вплоть до 350 МэВ. Однако эти модели  $2N$ -сил не воспроизводят экспериментальные значения энергии связи для малонуклонных систем. Кроме того, данные для  $dp$ -упругого рассеяния и реакции развала дейтрона не описываются должным образом.

Получение дополнительных поляризационных данных  $dp$ -взаимодействия в широком диапазоне энергий очень важно для изучения спиновой структуры  $2N$ - и  $3N$ -сил [5]. Чтобы исследовать детали  $3N$ -систем, в дополнение к данным по нуклон-дейтронному упругому рассеянию, необходимы данные для реакции развала дейтрона, которые покрывают широкий диапазон фазового пространства.

Динамика трехнуклонной системы может быть наиболее тщательно изучена посредством реакции дейтронного распада. Конечное состояние, ограниченное только общими законами сохранения, обеспечивает богатый источник информации. Это особенно важно, когда компоненты моделей учитывают тонкие эффекты, подобно вкладу трехнуклонных сил. В настоящее время точные предсказания для трехнуклонной системы могут быть получены из

точного решения уравнений Фаддеева для любого нуклон-нуклонного взаимодействия, даже с включением модели трехнуклонных сил [6].

Экспериментальные данные по дейтронным анализирующим способностям для широкого диапазона фазового пространства были получены при энергии 130 МэВ в KVI [6]. Анализирующие способности  $A_y$ ,  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$  в реакции развала дейтрона будут получены на внутренней мишени нуклотрона [7] при 300–500 МэВ [1]. Теоретические расчеты для реакции безмезонного развала дейтрона, выполненные при энергии 400 МэВ [8], предсказывают, что дифференциальное сечение и тензорная анализирующая способность для различных кинетических конфигураций также чувствительны к вкладу трехнуклонных сил.

Целью данной работы является обработка экспериментальных данных, полученных на внутренней мишени нуклотрона, и оптимизация алгоритма выделения событий для реакции  $dp \rightarrow ppn$  при энергии дейтрона 500 МэВ.

## 1. УСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения реакции развала дейтрона с регистрацией двух протонов будут использоваться восемь детекторов  $\Delta E-E$ -типа (рис. 1).

Детектор  $\Delta E-E$  состоит из двух органических 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 напротив друга.  $E$ -сцинтиллятор также имеет цилиндрическую форму высотой 200 мм и диаметром 100 мм. В качестве светоприемника для  $E$ -сцинтиллятора был использован ФЭУ-63, обладающий необходимым для эксперимента размером фотокатода (100 мм) и хорошими временными и амплитудными свойствами. Более подробно конструкция данного детектора описана в [9].

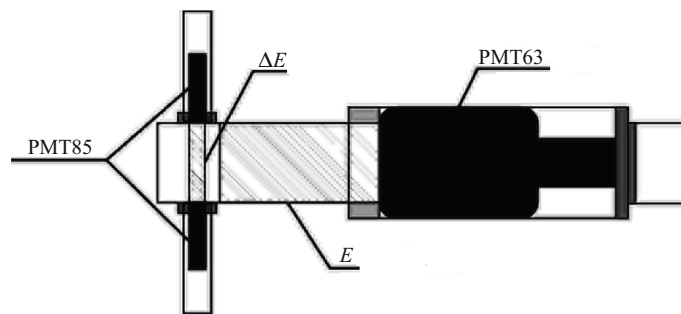


Рис. 1. Общий вид  $\Delta E-E$ -детектора для изучения реакции  $dp$ -развала

Управление высоковольтным напряжением цифровых делителей ФЭУ-85 осуществляется с помощью модуля, соединенного с компьютером через шину RS232. Этот модуль был разработан в ЛФВЭ ОИЯИ [10]. Система высоковольтного питания для ФЭУ-63 основана на модуле «Wenzel Electronik», напряжение которого управляется и контролируется с помощью ЦАП- и АЦП-модулей САМАС. Для управления и контроля высоковольтным напряжением модуля «Wenzel Electronik» в режиме on-line был использован пакет MIDAS [11].

Для съема информации с фотоумножителей  $\Delta E-E$ -детекторов используется система сбора данных, основанная на модулях стандарта VME. Данная система состоит из четырех модулей TQDC и одного триггерного модуля. Каждый модуль TQDC рассчитан на 16 входных каналов [12].

Набор данных был выполнен на внутренней мишени нуклотрона при энергии дейтронов 500 МэВ с использованием четырех  $\Delta E-E$ -детекторов. В эксперименте использовались как полиэтиленовая ( $\text{CH}_2$ ), так и углеродная ( $^{12}\text{C}$ ) мишени. Схема расположения детекторов представлена на рис. 2, где  $\theta_{\text{гор}}$  означает угол отклонения детектора от горизонтальной плоскости ионопровода нуклотрона. В данном случае все четыре  $\Delta E-E$ -детектора располагались в горизонтальной плоскости вместе с ионопроводом. Наличие четырех  $\Delta E-E$ -детекторов позволило получить шесть различных кинематических комбинаций (табл. 1). Анализ данных выполнялся для трех комбинаций детекторов а)  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 29,3^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ ; б)  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 46,4^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ ; в)  $\theta_1 = 29,3^\circ$ ,  $\theta_2 = 45,7^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$  (строки 1, 3, 4 в табл. 1).

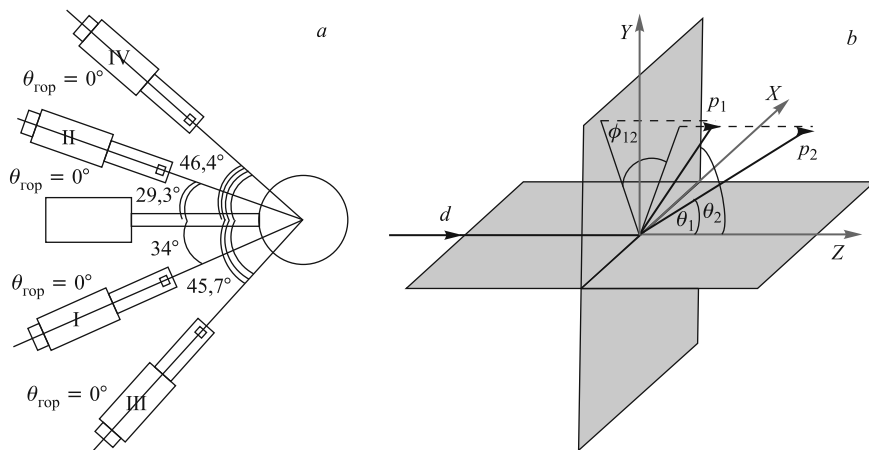


Рис. 2. Схема расположения детекторов в эксперименте на внутренней мишени нуклотрона и определение углов при регистрации двух протонов в реакции развала дейтрона

**Таблица 1. Возможные комбинации из четырех  $\Delta E-E$ -детекторов**

№	Комбинация детекторов	$\theta_1, ^\circ$	$\theta_2, ^\circ$	$\phi_{12}, ^\circ$
1	I + II	34	29,3	180
2	I + III	34	45,7	0
3	I + IV	34	46,4	180
4	II + III	29,3	45,7	180
5	I + IV	34	46,4	0
6	III + IV	45,7	46,4	180

**Таблица 2. Калибровочные коэффициенты для четырех  $\Delta E-E$ -детекторов**

Номер детектора	ФЭУ-85 (МэВ/канал АЦП)	ФЭУ-63 (МэВ/канал АЦП)	ФЭУ-63 (МэВ/канал АЦП)
I	$9 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$12,1 \cdot 10^{-2}$
II	$10 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$12,9 \cdot 10^{-2}$
III	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-2}$
IV	$11 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$17,6 \cdot 10^{-2}$

Калибровка данной установки производилась на космических мюонах. Для этого детекторы были размещены в специальной стойке, которая предназначена для установки и одновременной калибровки восьми  $\Delta E-E$ -детекторов. Набор на мюонах проводился при тех же напряжениях и кабелях, что и набор данных в ходе сеанса нуклотрона. Расположение детекторов в данной стойке позволило размещать их друг под другом. Размещение детекторов и требование совпадений сигналов с одного из верхних сигналов и одного из нижних счетчиков позволило избавиться от мюонов, проходящих через боковую поверхность  $E$ -сцинтиллятора. Энерговыделение от мюонов в тонком и толстом сцинтилляторах составило соответственно 2 и 40 МэВ. В табл. 2 приведены калибровочные коэффициенты для четырех  $\Delta E-E$ -детекторов, которые использовались при обработке результатов данного эксперимента.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Так как в данном эксперименте используется информация о выделении энергии двух протонов в реакции  $dp \rightarrow ppn$ , то необходимо знать, при какой начальной энергии протоны будут всю ее оставлять в сцинтилляторе. С этой целью было проведено моделирование энергетических потерь протонов в сцинтилляторе от их полной энергии с помощью пакета GEANT4 (рис. 3) [13].

Пролетая через сцинтиллятор, частица отдает часть своей энергии, в основном, на ионизацию. На рис. 3, а показана зависимость энергетиче-

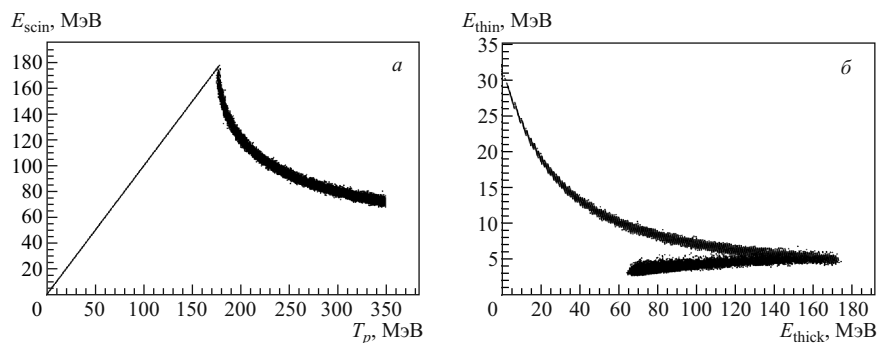


Рис. 3. Энергетические потери: а) в сцинтиляторе в зависимости от энергии протона; б) в тонком сцинтиляторе в зависимости от потерь в толстом

ских потерь в сцинтиляторе (который имеет общую длину в данном детекторе 21 см) от кинетической энергии протона. Из рисунка видно, что суммарной длины  $\Delta E$ - и  $E$ -сцинтилляторов хватает для полного поглощения протона с энергией не больше 183 МэВ. Так как при увеличении энергии протона (свыше 183 МэВ) амплитуда сигнала будет падать, то трудно будет различить частицы с малыми и большими энергиями. Для выделения рабочего энергетического разрешения данных детекторов будем использовать корреляцию  $\Delta E$  с  $E$  (рис. 3). Из рис. 3, б видно, что, накладывая условия на энергетические потери в  $\Delta E$ - и  $E$ -сцинтилляторах, мы будем выделять протоны с энергией меньше 183 МэВ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

После получения калибровочных констант для каждого канала ADC амплитуды сигналов были переведены в эВ. В итоге для каждого детектора энергия с  $E$ -сцинтиллятора суммировалась с энергией с  $\Delta E$ -сцинтиллятора, полученной как полусумма энергий с двух ФЭУ-85. На рис. 4 показаны корреляции энергий для различных кинематических конфигураций четырех  $\Delta E$ – $E$ -детекторов.

В ходе дальнейшей обработки данных на распределения по энергии накладывались следующие условия:  $\Delta E > 5$  МэВ и  $0 < E < 178$  МэВ. Данные условия накладывались для каждого сигнала, чтобы выделить протоны с энергией меньше 183 МэВ (рис. 2).

Для того чтобы выделить события, относящиеся к реакции  $dp \rightarrow ppn$ , для каждой пары детекторов был получен спектр недостающей массы нейтрона (рис. 5). Данный спектр был получен из закона сохранения энергии

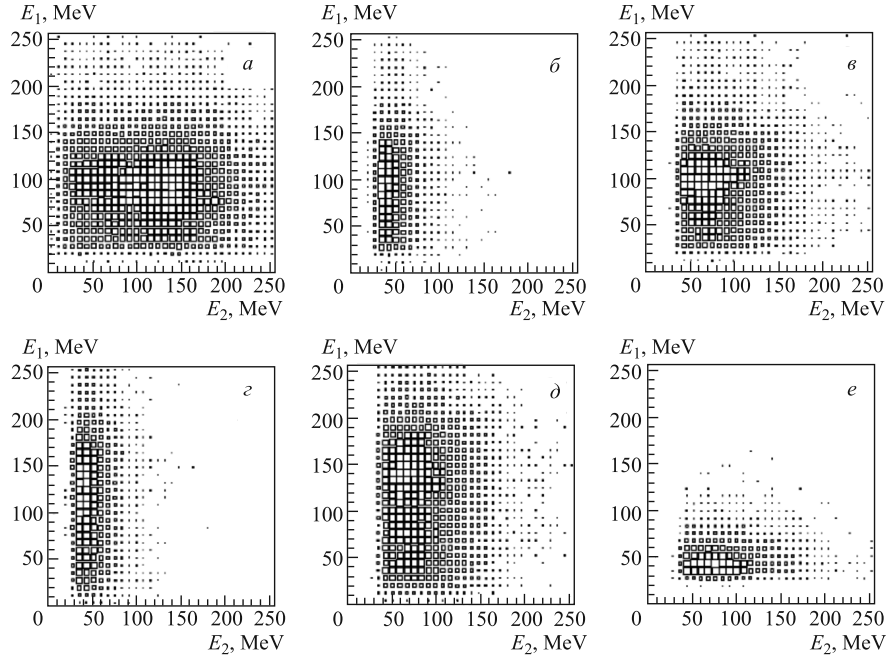


Рис. 4. Корреляция энергий для различных кинематических конфигураций четырех  $\Delta E$ - $E$ -детекторов в МэВ: а)  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 29,3^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ ; б)  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 45,7^\circ$ ,  $\phi_{12} = 0^\circ$ ; в)  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 46,4^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ ; г)  $\theta_1 = 29,3^\circ$ ,  $\theta_2 = 45,7^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ ; д)  $\theta_1 = 29,3^\circ$ ,  $\theta_2 = 46,7^\circ$ ,  $\phi_{12} = 0^\circ$ ; е)  $\theta_1 = 45,7^\circ$ ,  $\theta_2 = 46,4^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ . Данные получены на  $\text{CH}_2$ -мишени

и закона сохранения импульса. Зная начальную энергию дейтрона до взаимодействия, энергии и углы двух протонов, можно восстановить параметры третьей частицы, которой в данной реакции является нейтрон. После наложения условия  $m_n \pm 15$  МэВ были получены кинематические локусы для трех кинематических конфигураций данной реакции (рис. 6).

Кинематика реакции  $dp \rightarrow ppn$  определяется девятью составляющими импульсов трех вылетающих частиц. С помощью четырех уравнений (одного — закона сохранения энергии и трех — сохранения импульса) задача кинематически полного измерения сводится к зависимости от пяти переменных. Зная одну энергию и решая квадратное уравнение, можно получить кинематический локус для реакции  $dp \rightarrow ppn$ . На рис. 6 черные линии представляют локусы для трех комбинаций углов при энергии налетающего дейтрона, равной 500 МэВ. Из рис. 6 видно неплохое согласие экспериментальных данных с расчетом, полученным из кинематики процесса.



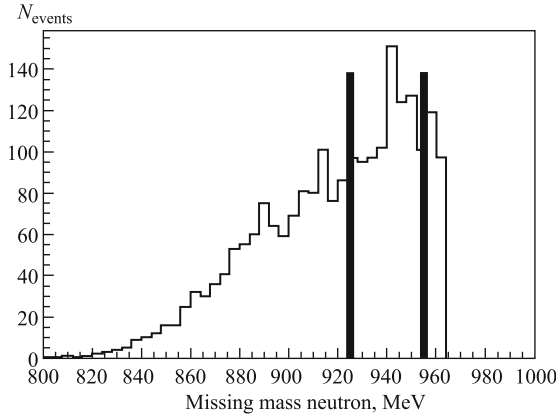


Рис. 5. Спектр недостающей массы нейтрона, полученный из экспериментальных данных для конфигурации  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 46,4^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$

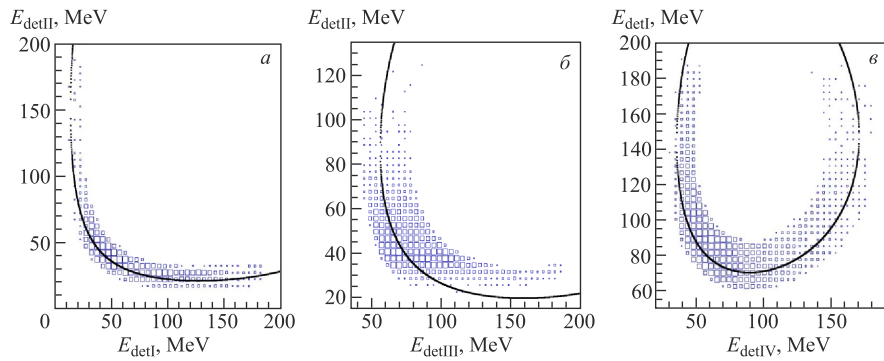


Рис. 6. Кинематические локусы для реакции  $dp \rightarrow ppn$  при энергии 500 МэВ: а)  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 29,3^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ ; б)  $\theta_1 = 29,3^\circ$ ,  $\theta_2 = 45,7^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$ ; в)  $\theta_1 = 34^\circ$ ,  $\theta_2 = 46,4^\circ$ ,  $\phi_{12} = 180^\circ$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены первые результаты по изучению реакции развала дейтрона на внутренней мишени нуклотрона при энергии 500 МэВ. В этом эксперименте использовались четыре  $\Delta E-E$ -детектора, что позволило получить шесть различных кинематических комбинаций для реакции  $dp \rightarrow ppn$ .

Выполнена процедура калибровки  $\Delta E-E$ -сцинтилляционных детекторов на космических мюонах.

Проведено моделирование с помощью пакета GEANT4 энергетических потерь протонов в сцинтилляторе длиной 21 см, что соответствует длине

сцинтиллятора в детекторе  $\Delta E-E$  для изучения реакции развала дейтрона. Результат моделирования показал, что данная конструкция детектора позволяет регистрировать протоны с энергией не больше 183 МэВ.

Приведен алгоритм выделения полезных событий, относящихся к реакции  $dp \rightarrow ppn$ , когда регистрируются два протона. Показано надежное выделение процесса  $dp \rightarrow ppn$ .

Работа была частично поддержана грантами РФФИ (№ 13-02-00101а и № 10-02-00087а).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ladygin V. P. et al.* Short-Range Correlations Studies in Collisions of Polarized Nuclei at Nuclotron-M // EPJ Web Conferences 3, 2010. V. 3. P. 04004.
2. *Wiringa R. B., Stoks V. G. J., Schiavilla R.* An Accurate Nucleon–Nucleon Potential with Charge Independence Breaking // Rhys. Rev. 1995. V. C51. P. 38.
3. *Machleidt R.* The High Precision, Charge Dependent Bonn Nucleon–Nucleon Potential (CD-Bonn) // Phys. Rev. 2001. V. C63. P. 024001.
4. *Stoks V. G. J. et al.* Construction of High Quality NN Potential Models // Rhys. Rev. 1994. V. C49. P. 2950.
5. *Uesaka T. et al.* Proposal on the Measurements of  $dpp$  Elastic Scattering Analyzing Powers at 0.3–2.0 GeV at the Internal Target Station of the Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2006. V. 3. P. 305.
6. *Kistryn St. et al.* Systematic Study of Three-Nucleon Force Effects in the Cross Section of the Deuteron–Proton Breakup // Phys. Rev. 2005. V. C72. P. 044006.
7. *Malakhov A. I. et al.* Potentialities of the Internal Target Station at the Nuclotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 440. P. 320.
8. *Kuros-Zolnierczuk J. et al.* Three-Nucleon Force Effects in Nucleon Induced Deuteron Breakup: Predictions of Current Models (I) // Phys. Rev. 2002. V. C66. P. 024003.
9. *Пилядин С. М. и др.*  $\Delta E-E$ -детектор для регистрации протонов в реакции без-мезонного развала дейтрона на внутренней мишени нуклотрона-М. // Письма в ЭЧАЯ, 2011. Т. 2. P. 182–191.
10. <http://hvsys.dubna.ru>
11. <http://midas.psi.ch>
12. <http://afi.jinr.ru>
13. *Agostinelli S. et al.* GEANT4 — a Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506, No. 3. P. 250–303.

Получено 13 февраля 2013 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 10.04.2013.

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

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,83. Тираж 305 экз. Заказ № 57956.

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/)