

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.172.13

МУШИНСКИ Я<sub>Н</sub>

**Исследование зарядово-обменных процессов  
в дейтрон-протонных взаимодействиях**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2010

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий  
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Глаголев Виктор Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Литвиненко Анатолий Григорьевич

доктор физико-математических наук  
Сокол Гарри Арсентьевич

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
ядерной физики МГУ, г. Москва

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 720.001.02 при Лаборатории физики высоких  
энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединённого института ядер-  
ных исследований, 141980, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Арефьев В.А.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

В теории нуклон-нуклонного рассеяния фундаментальное значение имеет извлечение (восстановление) комплексных амплитуд матрицы рассеяния. Для получения всех амплитуд необходимо проводить так называемый полный опыт, в результате которого должен быть получен такой набор экспериментальных наблюдаемых, который позволяет провести исчерпывающее описание процесса. Полный эксперимент включает в себя измерения с поляризованными частицами-снарядами, а также с поляризованными мишенями. Это весьма большая и трудоёмкая задача.

Однако, в некоторых случаях возможно определить отдельные амплитуды матрицы рассеяния, либо их совокупность, путём выбора специальных экспериментальных условий. Одной из таких возможностей является изучение реакции перезарядки на дейтроне, которая при некоторых допущениях определяется только зависящими от спина компонентами амплитуд нейтрон-протонного упругого рассеяния. Эта идея была формализована математически в целом ряде теоретических работ. Важно то, что появилась возможность извлечь спин-зависящую часть амплитуды  $np$ -рассеяния с использованием неполяризованных протонов и неполяризованных дейтронов в реакциях перезарядки на дейтроне. Экспериментально такую серию работ пытались выполнить на пучках сепарированных или квази-монохроматических нейтронов от стриппинга ускоренных дейтронов.

На синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ был проведён эксперимент с использованием водородной пузырьковой камеры, в котором ускоренные дейтроны падали на протонную мишень. При такой постановке опыта дейтроны монохроматичны, а два вторичных протона (продукты реакции перезарядки дейтрона на протоне) являются быстрыми и вылетают в переднем направлении под малыми углами. До начала наших исследований другие эксперименты с пучком дейтронов практически отсутствовали.

Анализ экспериментальных данных оправдал ожидания, и по мере развития детектирующей техники и систем сбора данных, позволил сформулировать требования к решению задачи электронными методами. Была

создана установка СТРЕЛА, которая начала функционировать на пучке дейтронов, ускоренных на Нуклотроне ЛФВЭ ОИЯИ.

### Цель диссертационной работы

- Проведение анализа реакции перезарядки  $dp \rightarrow (pp)n$  в дейтрон-протонных взаимодействиях на водородной пузырьковой камере для определения спин-зависящей части амплитуды  $np \rightarrow pn$  рассеяния.
- Предложение электронного эксперимента (установка СТРЕЛА) с целью исследования зарядово-обменных процессов на пучке дейтронов. Испытание элементов установки, в том числе дрейфовых камер в качестве трековых приборов высокой разрешающей способности.
- Создание систем программного обеспечения для работы во время облучения установки СТРЕЛА на пучке ускоренных дейтронов и восстановления треков в дрейфовых камерах.

### Научная новизна

- Проведён анализ  $dp$ -взаимодействий, полученных с помощью 100-сантиметровой водородной пузырьковой камеры ЛФВЭ ОИЯИ при импульсе 3.35 ГэВ/с. Оценены потери в упругом рассеянии и получены значения поперечных сечений отдельных каналов  $dp$ -взаимодействий. Качество экспериментальной информации свидетельствует о её пригодности для последующего физического анализа.
- Впервые в эксклюзивной постановке исследована безмезонная реакция  $dp \rightarrow ppn$ . Определено дифференциальное сечение реакции перезарядки  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} |_{t=0} = 30.2 \pm 4.1$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup>.
- Впервые на пучке дейтронов получено отношение  $R_{np \rightarrow pn}$  дифференциальных сечений перезарядки при  $t = 0$  в реакциях  $dp \rightarrow (pp)n$  и  $np \rightarrow pn$ . В рамках импульсного приближения полученное значение  $R_{np \rightarrow pn} = 0.55 \pm 0.08$  свидетельствует о преобладающем вкладе спин-зависящей части сечения  $np \rightarrow pn$  рассеяния и согласуется с данными других экспериментов в области близких энергий.

- При использовании результатов исследований, полученных на водородной пузырьковой камере, был подготовлен проект электронного эксперимента для изучения реакции перезарядки на дейтроне в области энергий выше 1 ГэВ. Рассмотрена возможность определения спин-зависящей части амплитуды элементарной перезарядки  $np \rightarrow pn$  на основе прямого измерения дифференциального сечения  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n}$  при  $t = 0$ .
- При активном участии диссертанта была создана установка СТРЕЛА — одноплечевой магнитный спектрометр, основными элементами которой являются блоки дрейфовых камер в качестве координатных детекторов. Впервые проведено облучение установки в пучке дейтронов импульса 3.5 ГэВ/с на ускорительном комплексе Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ.
- В процессе создания и усовершенствования установки СТРЕЛА были разработаны и реализованы комплексы программ обработки и анализа экспериментальных данных. Полученное значение пространственного разрешения дрейфовых камер лежит в диапазоне 90–120 мкм, что позволяет осуществить исследования зарядово-обменных процессов во взаимодействиях дейтронов с протонами.

### **Практическая значимость**

Выполненная работа является частью программы исследований мало-нуклонных систем в рамках проблемно-тематического плана ОИЯИ. Использование слабосвязанной системы двух нуклонов, какой является дейтрон, в совокупности с его квантовыми числами, позволяет в рамках простых предположений (импульсное приближение) с применением принципа Паули получить сведения о вкладе спин-зависящей части амплитуды  $np \rightarrow pn$  рассеяния, не прибегая к сложным поляризационным исследованиям. При таком подходе достаточно изучить дифференциальные поперечные сечения зарядово-обменных процессов в  $dp$  и  $np$ -взаимодействиях при малых переданных импульсах. Полученные результаты могут быть использованы для фазового анализа, а при продвижении в область более высоких энергий, позволяют проверить и усовершенствовать имеющиеся модели сильного взаимодействия нуклонов.

Важным является совершенствование экспериментальной установки путём применения современных методов исследований и соответствующего программного обеспечения. Полученные результаты могут быть использованы при планировании новых экспериментов, направленных на углублённое исследование взаимодействий элементарных частиц и атомных ядер.

#### **На защиту выносятся следующие основные результаты**

- Результаты анализа экспериментальных данных по взаимодействиям дейтронов импульса 3.35 ГэВ/с с протонами, полученных на водородной пузырьковой камере.
- Результаты изучения реакции  $dp \rightarrow ppn$ , выделение канала перезарядки  $dp \rightarrow (pp)n$  и получение дифференциального сечения этого канала при нулевом переданном импульсе.
- Оценка вклада спин-зависящей части амплитуды  $np$ -рассеяния из процесса перезарядки на дейтроне в рамках импульсного приближения.
- Результаты методических исследований, направленных на развитие установки СТРЕЛА на Нуклотроне, и создание программного обеспечения, необходимого для анализа полученных экспериментальных данных.

#### **Апробация работы и публикации**

Результаты исследований, включённых в диссертацию, опубликованы в виде статей в научной периодике, а также докладывались на ряде международных конференций и семинаров. В том числе, на международных совещаниях «Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ» в Стара Лесна (Словакия — 2000 и 2009 г.) и Модра Гармония (Словакия — 2006 г.), на рабочем совещании по протон-дейтронным взаимодействиям (Дубна — 2002 г.), на международном семинаре по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика» (Дубна — 2000, 2002 и 2006 г.) и семинарах ЛФВЭ ОИЯИ.

Список публикаций, содержащих основные результаты диссертации, приведён в конце автореферата [1–12].

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объём составляет 112 страниц машинописного текста, включая список литературы из 92 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность выполненных исследований, сформулирована цель и научная новизна диссертационной работы. Кратко изложена структура диссертации.

**В первой главе** обсуждены идеи, впервые высказанные в работах Померанчука и Чу, указавшие на возможность использования зарядово-обменных процессов на дейтроне для определения вклада спин-зависящей части амплитуды  $np$ -упругого рассеяния.

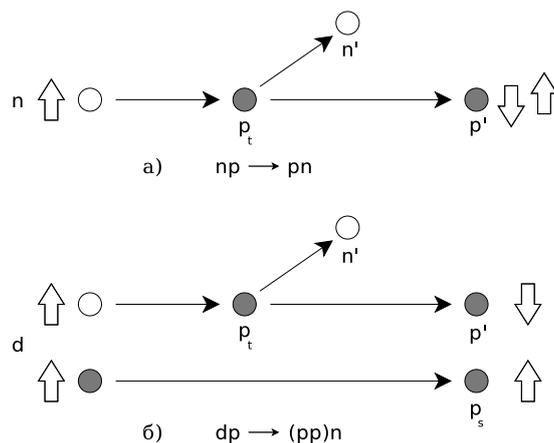


Рис. 1. Схематическое изображение а) элементарной реакции перезарядки нейтрона на протоне и б) перезарядки дейтрона на протоне-мишени.

На рис. 1 схематически изображены два процесса: элементарная реакция перезарядки нейтрона на протоне  $np \rightarrow pn$  и реакция перезарядки дейтрона на протоне-мишени  $dp \rightarrow (pp)n$ . Здесь в скобках два протона, связанные с падающим дейтроном, а именно, протон-спектатор и протон от

квази- $np$  перезарядки, т.е. перезарядки нейтрона (связанного в дейтроне) на протоне-мишени. Вертикальными стрелками обозначены направления спинов нуклонов относительно произвольной оси квантования.

В случае реакции перезарядки нейтрона на протоне (рис. 1а) возможны оба направления спина рассеянного протона. В процессе перезарядки дейтрона на протоне (рис. 1б) образуется симметричная по заряду система из двух протонов с малым относительным импульсом. В силу принципа Паули (статистика Ферми—Дирака для полуцелых спинов) при сохранении пространственной симметрии, антисимметричность полной волновой функции двух протонов будет достигаться только в случае переворота спина рассеянного протона. Дейтрон в данном случае выступает как «спиновый фильтр», а спин-зависящая часть амплитуды элементарной  $np$ -перезарядки проявляется через вероятность реакции перезарядки на дейтроне.

Математический формализм, используемый для определения вклада спин-зависящей части амплитуды  $np$ -рассеяния из процесса перезарядки на дейтроне, был развит в работах Дина и др. Дифференциальное поперечное сечение  $np \rightarrow pn$  рассеяния может быть представлено в виде суммы спин-независящей (индекс  $SI$ ) и спин-зависящей (индекс  $SD$ ) частей

$$(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn} = (d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{SI} + (d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{SD}, \quad (1)$$

где  $t$  — квадрат четырёхмерного переданного импульса.

В рамках импульсного приближения соотношение между дифференциальными сечениями перезарядки дейтрона на протоне  $dp \rightarrow (pp)n$  и элементарной перезарядки  $np \rightarrow pn$  можно записать как

$$(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} = [1 - F_d(t)] (d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{SI} + [1 - 1/3 F_d(t)] (d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{SD}, \quad (2)$$

где  $F_d(t)$  обозначает формфактор дейтрона. При нулевом переданном импульсе ( $t = 0$ ), когда  $F_d(0) = 1$ , дифференциальное поперечное сечение перезарядки на дейтроне будет равно

$$(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} = 2/3 (d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{SD}. \quad (3)$$

Таким образом, имеется возможность определения части взаимодействия нейтрона и протона, которая полностью зависит от спина. Реакция перезарядки неполяризованного дейтрона на неполяризованном протонем-мишени при нулевой передаче импульса определяется спин-зависящей частью перезарядки нейтрона на протоне. Анализ процесса  $dp \rightarrow (pp)n$  при малых переданных импульсах, близких к нулю, позволяет оценить вклад спин-зависящей части амплитуды реакции перезарядки  $np \rightarrow pn$ .

В конце главы обсуждены избранные исследования с дейтронами. Рассмотрение экспериментальных данных по определению спин-зависящей части амплитуды  $np \rightarrow pn$  перезарядки показало, что в настоящее время существует более или менее полная картина в интервале энергий до сотен МэВ. В области энергий 1 ГэВ и выше экспериментальная информация скудна и продолжение исследований в этой области энергий остаётся весьма актуальным.

**Вторая глава** посвящена изучению зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных взаимодействиях. Экспериментальный материал был получен с помощью 100-см водородной пузырьковой камеры на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Камера была облучена выведенным из ускорителя пучком дейтронов с импульсом 3.35 ГэВ/с. После стандартной процедуры просмотра, измерений и идентификации каналов в условиях  $4\pi$ -геометрии была получена лента суммарных результатов (DST), которая содержит почти четверть миллиона событий.

Приблизительно половину всех событий дейтрон-протонных столкновений составляла реакция безмезонного развала дейтрона  $dp \rightarrow ppn$ . Эта реакция может идти как  $dp \rightarrow (pp)n$  — реакция перезарядки с изменением зарядового состояния протона-мишени, или  $dp \rightarrow (pn)p$  — реакция прямого развала дейтрона с сохранением заряда. Разделение этих двух классов событий можно видеть на рис. 2, где приводятся их распределения по величине квадрата переданного четырёхмерного импульса  $t$ . К перезарядке отнесены события, в которых самым быстрым из вторичных нуклонов в системе покоя дейтрона являлся нейтрон. Число таких событий равно 17512, что соответствует поперечному сечению  $(5.85 \pm 0.05)$  мб.

При этом миллибарн-эквивалент события определялся исходя из полного сечения  $dp$ -взаимодействий с учётом потерь событий упругого рассеяния  $dp \rightarrow dp$ . Систематическая ошибка, связанная с оценкой потерь событий в упругом  $dp$ -рассеянии, составляла около 4 %.

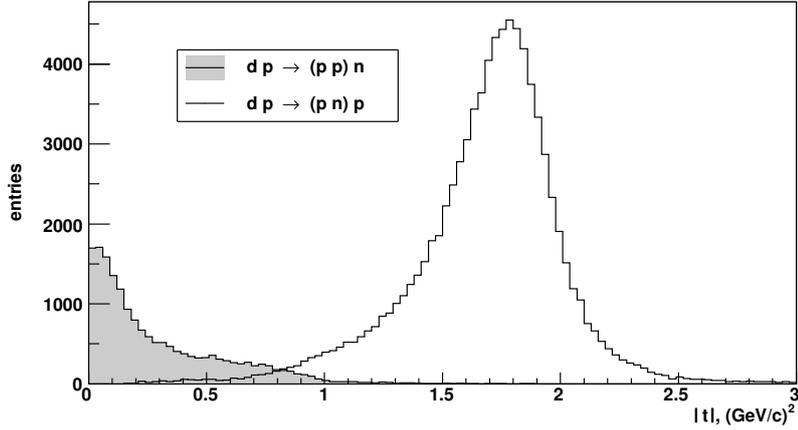


Рис. 2. Распределения событий реакции  $dp \rightarrow ppn$  по квадрату четырёхмерного переданного импульса  $|t|$  от протона-мишени к нейтрону.

Формулы (2) и (3) выведены в определённых предположениях. Чтобы воспользоваться этими выражениями, мы должны выполнить по крайней мере два условия, а именно, работать в области малых переданных импульсов квази-упругого  $np$ -рассеяния и принять справедливость импульсного приближения. В работе показано, что при релятивистских энергиях эти предположения оправданы.

Условие импульсного приближения предполагает подавление взаимодействия в конечном состоянии (ВКС). При экспериментальном исследовании механизма ВКС наблюдалось, что этот эффект сильно проявляется в асимметрии распределений по углу  $\alpha = \arccos((\vec{p}_s \vec{q})/(|\vec{p}_s| |\vec{q}|))$ , где  $\vec{p}_s$  — импульс спектатора, а  $\vec{q}$  — трёхмерная передача импульса от налетающего нуклона к рассеянному. В области малых переданных импульсов  $|t| < 0.1$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> и импульсов спектаторов, меньших приблизительно 0.1 ГэВ/с, асимметрии по углу  $\alpha$ , вызванные ВКС, практически отсутствуют (близки

к нулю). Это хорошо видно из рис. 3, как для прямого развала дейтрона (сплошные кружки), так и для развала дейтрона с перезарядкой (пустые кружки), где асимметрия менее выразительна и становится ненулевой при заметно больших значениях импульса спектатора. Такое поведение асимметрии по углу  $\alpha$  указывает на возможность применения импульсного приближения в интересующей нас области малых переданных импульсов и малых импульсов спектаторов.

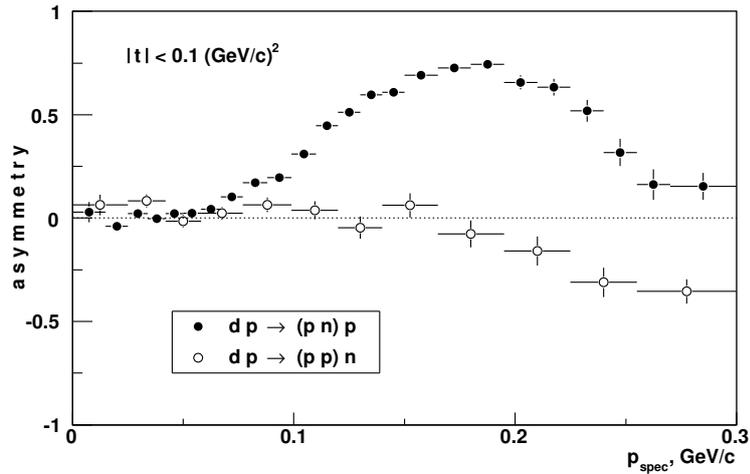


Рис. 3. Зависимость асимметрии по углу  $\alpha$  от импульса спектатора  $p_{spec}$  в системе покоя дейтрона.

Вышеуказанным условиям можно одновременно удовлетворить, отбирая такие события, для которых в лабораторной системе координат (быстрый дейтрон падает на покоящуюся протонную мишень) два быстрых протона из реакции перезарядки  $dp \rightarrow (pp)n$  вылетают под малыми углами по отношению к падающему дейтрону и с импульсами близкими к половине импульса дейтрона. При этом они могут быть надёжно зарегистрированы и хорошо измерены. Заметим, что поставленная задача может быть экспериментально выполнена только при наличии ускоренных дейтронов. В случае падающего быстрого протона на покоящуюся дейтронную мишень, вторичные протоны из такой реакции перезарядки  $pd \rightarrow n(pp)$  будут слиш-

ком медленными, чтобы их зарегистрировать, а сама реакция не может быть идентифицирована. Преимущество изучения дейтрон-протонных взаимодействий (так называемая обратная геометрия) является очевидным в отличие от протон-дейтронных взаимодействий.

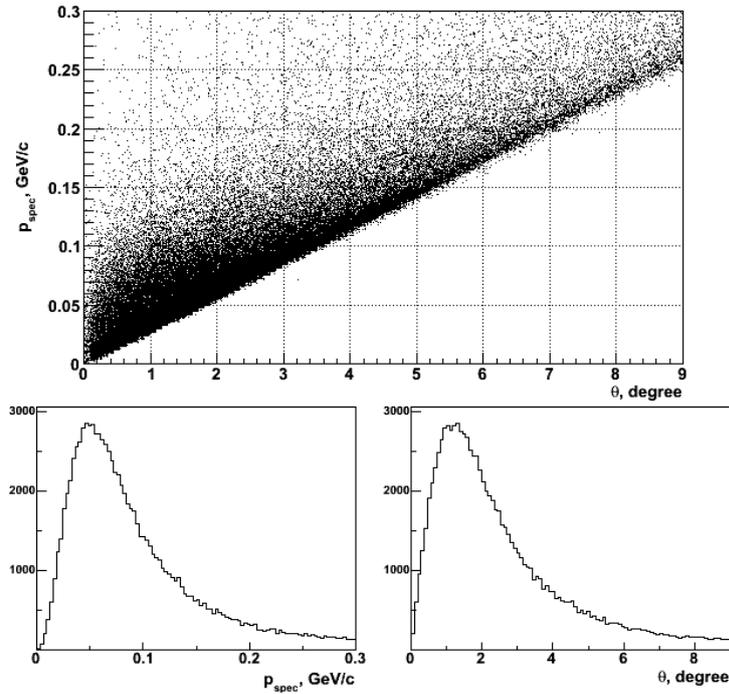


Рис. 4. Зависимость полярного угла вылета  $\theta$  нуклона-спектатора от его импульса  $p_{spec}$  из реакции развала дейтрона на протоне. Нижние распределения — проекции на соответствующие оси.

На рис. 4 показана кинематическая зависимость (и её проекции) между полярным углом вылета нуклона-спектатора в лабораторной системе координат и его импульсом в системе покоя дейтрона. Видно, что при углах меньших  $\sim 5^\circ$ , или при импульсе спектатора меньше  $\sim 0.15$  ГэВ/с, лежит основная часть событий, соответствующих квази-нуклонному рассеянию. В случае, когда передача четырёхмерного импульса стремится к нулю  $|t| \rightarrow 0$ , два быстрых протона из реакции перезарядки в лаборатор-

ной системе координат имеют практически одинаковые импульсы близкие к половине импульса дейтрона  $p_{p_1} \simeq p_{p_2} \simeq (1/2) p_d$ .

Для набора пар протонов, попадающих в конус с раствором меньше  $5^\circ$ , строилось распределение сечения  $d\sigma/dt$  с учётом миллибарн-эквивалента события и поправки, равной отношению полного числа спектаторных нуклонов к числу спектаторов в выбранном конусе. Дифференциальное поперечное сечение  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n}$  изучаемой реакции перезарядки на дейтроне при малых значениях  $|t|$  и импульсе дейтрона 3.35 ГэВ/с приведено на рис. 5. Распределение аппроксимировалось и экстраполировалось к  $t = 0$ , что дало значение  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} |_{t=0} = 30.2 \pm 4.1$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup>.

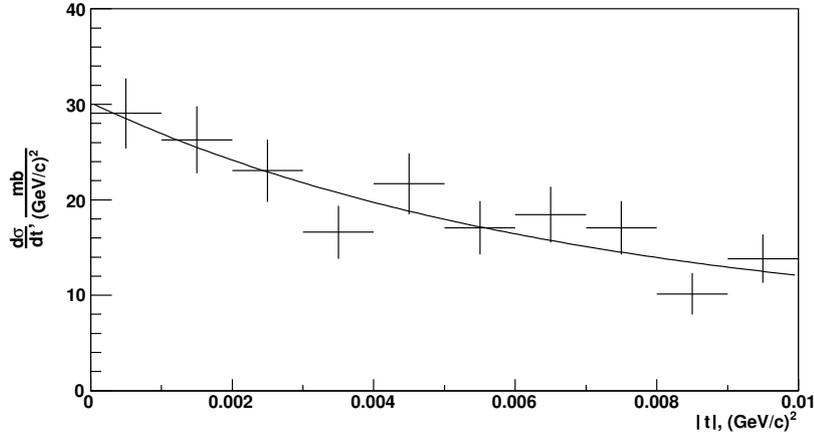


Рис. 5. Распределение дифференциального поперечного сечения реакции с обменом заряда  $dp \rightarrow (pp)n$  при малых значениях  $|t|$ .

Проведённый анализ экспериментальных данных по реакции перезарядки дейтрона на протоне-мишени, даёт возможность получить информацию о спиновой зависимости обменного  $np$ -рассеяния. Для ответа, на интересующий нас вопрос о вкладе спин-зависящей части амплитуды элементарного  $np \rightarrow pn$  процесса, необходимо кроме измеренного дифференциального поперечного сечения  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} |_{t=0}$ , привлечь и результаты экспериментов по измерению дифференциального сечения  $(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}$  реакции элементарной перезарядки  $np \rightarrow pn$  при  $|t| = 0$ . В работе было по-

казано, что среди имеющихся в литературе экспериментальных данных для  $np$ -рассеяния, измерения сделанные Бизардом и др. на ускорителе Сатурн являются наиболее корректными и самыми близкими по энергии. На их основе, для импульса 1.675 ГэВ/с на нуклон, была получена величина  $(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn} |_{t=0} = 54.7 \pm 0.2$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup>.

Введём отношение  $R_{np \rightarrow pn}$  дифференциальных сечений для реакции перезарядки на дейтроне  $dp \rightarrow (pp)n$  и элементарной перезарядки  $np \rightarrow pn$

$$R_{np \rightarrow pn} = \frac{(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n}}{(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}}. \quad (4)$$

При нулевом переданном импульсе  $|t| = 0$  отношение  $R_{np \rightarrow pn}$ , исходя из формулы (3), определяет вклад спин-зависящей части амплитуды перезарядки нейтрона на протоне и его можно записать как

$$R_{np \rightarrow pn} = \frac{2}{3} \frac{(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{SD}}{(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}}. \quad (5)$$

Если бы дифференциальное поперечное сечение перезарядки на дейтроне при  $|t| = 0$  равнялось 2/3 от дифференциального сечения элементарной  $np \rightarrow pn$  перезарядки при  $|t| = 0$ , то это бы означало, согласно выше приведённым формулам, что амплитуда элементарной перезарядки являлась бы полностью спин-зависящей. Однако на эксперименте такой закономерности не наблюдается.

Из измеренного нами  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} |_{t=0} = 30.2 \pm 4.1$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup> и  $(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn} |_{t=0} = 54.7 \pm 0.2$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup>, определённого на основе данных Бизарда и др., получаем значение отношения дифференциальных поперечных сечений

$$R_{np \rightarrow pn} = 0.55 \pm 0.08, \quad (6)$$

свидетельствующее о преобладающем вкладе спин-зависящей части амплитуды  $np \rightarrow pn$  рассеяния. На рис. 6 показана зависимость величины  $R_{np \rightarrow pn}$  от кинетической энергии нейтрона в сравнении с результатами других экспериментов. Видно, что полученное нами значение находится в согласии, как с более ранними, так и с недавно опубликованными результатами группы Дельта-Сигма при более высоких энергиях.

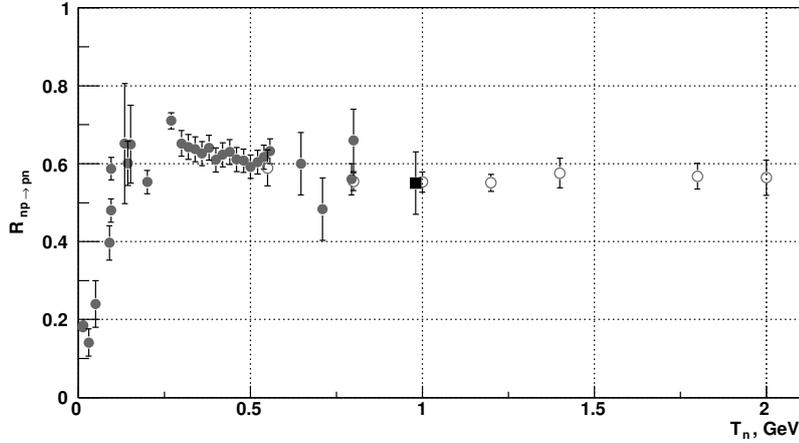


Рис. 6. Зависимость величины  $R_{np \rightarrow pn}$  от кинетической энергии нейтрона  $T_n$ . Сплошные кружки представляют значения, полученные в более ранних экспериментах, квадратик ( $T_n = 0.98$  ГэВ) — определённое нами значение, пустые кружки — недавно опубликованные результаты эксперимента Дельта-Сигма.

Это первая и единственная работа выполненная на пучке дейтронов. Следует отметить, что все более ранние работы на эту тему были выполнены на пучках нейтронов довольно широкого импульсного спектра, полученных коллимированием вторичных нейтронов. Позже, в эксперименте Дельта-Сигма, где использовались квази-монохроматические нейтроны от стриппинга выведенных из ускорителя монохроматических дейтронов, удалось существенно сузить спектр такого нейтронного пучка.

**В третьей главе** подробно описывается экспериментальная установка СТРЕЛА, предназначенная для исследования зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных столкновениях в области энергий выше 1 ГэВ. Анализ  $dp$ -взаимодействий, полученных с помощью камерной методики, позволил предложить схему электронного эксперимента. Появилась возможность изучения интересующего нас процесса на большой статистике событий при использовании выведенного пучка ускоренных дейтронов на Нуклотроне ЛФВЭ ОИЯИ.

Была предложена довольно простая (изучение процесса с малой множественностью вторичных частиц и предсказуемой кинематикой) схема эксперимента, а именно — одноплечевой спектрометр с достаточно узкой апертурой (рис. 7). Пучок дейтронов падает на мишень, анализирующий магнит разводит в пространстве вторичные заряженные частицы (протоны) и не взаимодействовавшие дейтроны. Предлагаемая схема электронного эксперимента позволяет регистрировать пары протонов с малым углом раствора, имеющие импульс равный приблизительно половине импульса дейтрона. Этим обеспечивается отбор событий под нулевым углом по отношению к первичному пучку, что соответствует малому переданному импульсу ( $t \simeq 0$ ). Таким образом, реализуются необходимые условия для выделения изучаемого процесса.

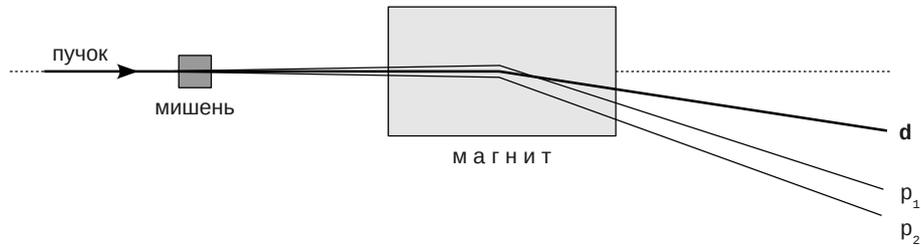


Рис. 7. Схема эксперимента с использованием одноплечевого спектрометра, обеспечивающая отбор событий с вылетом из мишени двух протонов с близкими импульсами в переднем направлении.

Выбор конкретной геометрии эксперимента был выполнен на основе расчётов методом Монте—Карло генерации с помощью программного пакета GEANT. Опираясь на данные по  $dp$ -взаимодействиям, полученные на водородной пузырьковой камере, был промоделирован вариант эксперимента для спектрометра, используя в качестве входных данных реальные события.

В результате была создана экспериментальная установка СТРЕЛА. Основными элементами установки являются блоки дрейфовых камер в качестве координатных детекторов, электроника считывания информации,

сцинтилляционные счётчики, используемые для запуска установки и анализирующий магнит. На рис. 8 приведена схема расположения всех элементов установки.

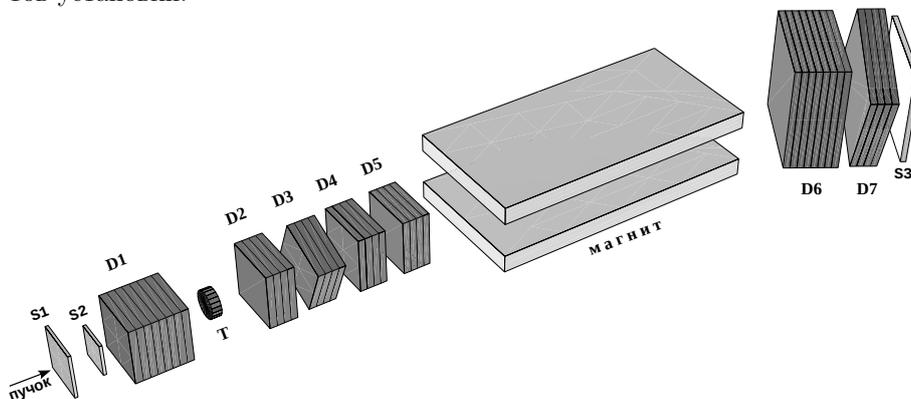


Рис. 8. Экспериментальная установка СТРЕЛА. D1–D5 — блоки «маленьких» дрейфовых камер с размером рабочей области  $12.5 \times 12.5 \text{ см}^2$ , D6–D7 — блоки «больших» камер с размером  $25.0 \times 25.0 \text{ см}^2$ , S1–S3 — сцинтилляционные счётчики, Т — мишень.

В настоящее время используется 36 плоскостей дрейфовых камер, объединённых в 7 блоков. Каждый блок состоит из четырёх или восьми плоскостей дрейфовых камер с различной ориентацией проволочек. Длина дрейфового промежутка во всех камерах равна 21 мм. Камеры в блоке располагаются таким образом, что сигнальные проволочки в соседних плоскостях сдвинуты относительно друг друга на 21 мм в направлении перпендикулярном оси пучка. Такое расположение проволочек позволяет устранить лево-правую неоднозначность в определении пространственных координат треков частиц. В данной главе подробно освещены принципы работы и конструкции используемых дрейфовых камер, как наиболее важных элементов установки.

Число всех регистрируемых сигналов с проволочек составляет 162. На каждой камере установлены платы с микросхемами, в которых осуществляется усиление, формирование и дискриминация входных сигналов от сиг-

нальных проволочек дрейфовых камер. Сформированные сигналы поступают на входы TDC модулей для оцифровки. Полученная информация передаётся по оптической линии в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

На установке СТРЕЛА, для организации системы сбора экспериментальных данных применяется несколько модулей быстрой электроники в формате стандарта VME. Данный стандарт предполагает создание высокопроизводительных вычислительных систем модульного типа на основе унифицированной магистрали и обладает достаточной универсальностью и расширяемостью. Упрощённая блок-схема системы сбора данных установки показана на рис. 9.

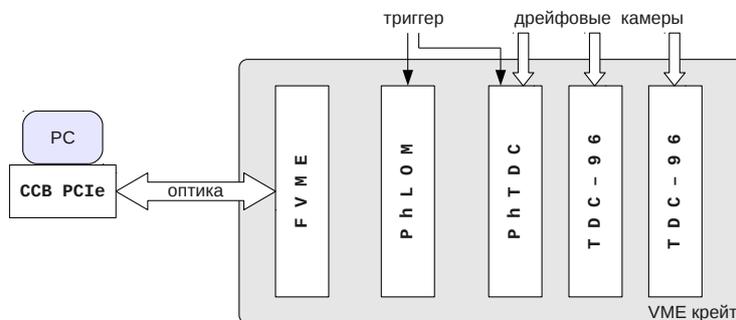


Рис. 9. Блок-схема системы сбора данных на установке. Сформированные сигналы с дрейфовых камер оцифровываются в модулях время-цифрового преобразования TDC-96 и PhTDC. Триггерный сигнал поступает на модули PhLOM и PhTDC. Интерфейсный FVME контроллер обеспечивает связь VME с удалённым компьютером по высокоскоростной оптической линии.

Система запуска (триггер) установки должна обеспечить набор событий реакции развала дейтрона. В нашем случае регистрируются однопротонные события из реакции прямого развала дейтрона  $dp \rightarrow (pn)p$  и два протона с близкими импульсами и малым углом раствора из реакции перезарядки дейтрона на протоне  $dp \rightarrow (pp)n$  (развал дейтрона с зарядовым обменом). Запуск установки осуществлялся с помощью трёх триггерных сцинтилляционных счётчиков S1–S3 (рис. 8), которые определяют акцеп-

танс установки и вырабатывают сигнал для открытия временного окна регистрации сигналов с дрейфовых камер и запуска системы сбора данных.

Изучение характеристик блоков дрейфовых камер экспериментальной установки СТРЕЛА было проведено при облучении полиэтиленовой мишени коллимированным пучком дейтронов с импульсом 3.5 ГэВ/с на канале ВП-1 ускорительного комплекса Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ. Аппаратура установки проверялась в течение почти двух суток. В результате облучения было набрано несколько миллионов триггеров для последующего анализа.

**В четвёртой главе** представлены алгоритмы для восстановления треков в дрейфовых камерах. Разработан и протестирован на реальных событиях полный комплекс программ обработки и анализа экспериментальных данных. Исходный код программ написан полностью на языке C++ с использованием библиотек ROOT, что делает их универсальными и модульными.

Выбор дрейфовых камер в качестве координатных детекторов спектрометра на установке СТРЕЛА обусловлен необходимостью получения высокого пространственного разрешения. Применение дрейфовых камер требует определения соотношения между измеренным временем дрейфа  $t$  проходящей частицы и его преобразованием в расстояние  $r$  относительно данной сигнальной проволоки, так называемая  $r(t)$ -зависимость. Неравномерность напряжённости электрического поля вдоль траектории дрейфа электронов приводит к изменению величины скорости дрейфа, и соответственно, к дифференциальной нелинейности  $r(t)$ -зависимости. Это возможно в конструкции используемых дрейфовых камер, где напряжённость электрического поля вдоль траектории дрейфа задаётся резистивной сборкой, резисторы которой имеют разброс в несколько процентов.

Получение правильного соотношения между измеренным временем дрейфа и его преобразованием в расстояние является одной из важнейших задач при восстановлении треков в камерах. В ходе подготовки эксперимента была разработана итеративная процедура определения  $r(t)$ -зависимости с использованием трековой информации, называемая автокалибровкой. С

каждой итерацией получается новая, подправленная функция преобразования времени дрейфа в расстояние, с которой вновь выполняется реконструкция трека.

Пространственное разрешение дрейфовых камер определяется шириной распределения трекового остатка  $\Delta r$  данной камеры. Трековый остаток (residual) — это разница между расстоянием полученным преобразованием времени дрейфа  $r(t)$ -зависимостью, и расстоянием восстановленного трека от сигнальной проволоочки камеры. Ожидаемое среднее значение  $\Delta r = 0$ . Как меняется распределение трекового остатка в зависимости от номера итерации автокалибровки, показано на рис. 10. Видно, что с ростом номера итерации  $\Delta r$  стремится к нулю, а ширина распределения уменьшается.

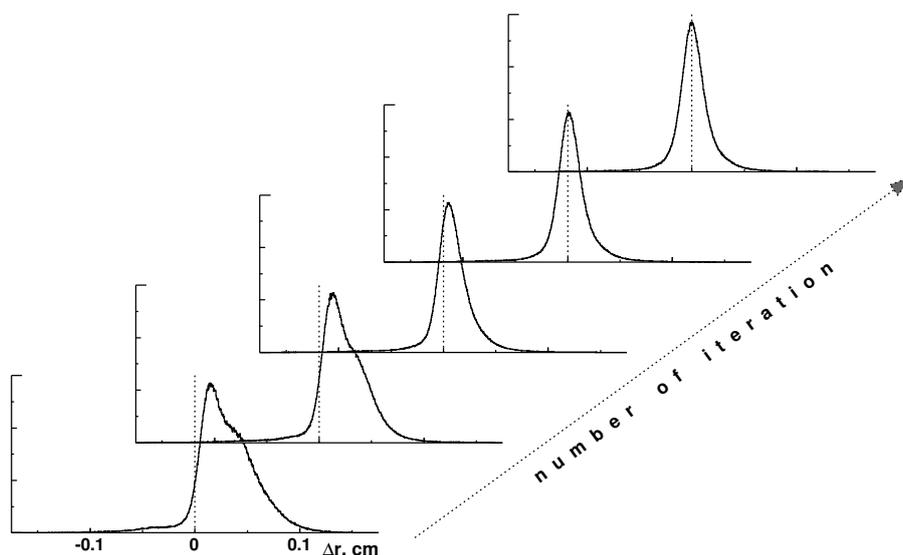


Рис. 10. Изменение распределения трекового остатка  $\Delta r$  в зависимости от номера итерации автокалибровки в дрейфовой камере.

Созданная процедура автокалибровки улучшает пространственное разрешение дрейфовых камер, доводя его среднее значение до 90–120 мкм. Полученные характеристики трековых детекторов позволяют осуществить

исследования зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных взаимодействиях на установке СТРЕЛА.

**В заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

### Список публикаций по теме диссертации

1. Глаголев В. В., ..., Мушински Я. и др. Оценка вероятности спинзависящей амплитуды  $np \rightarrow pn$  процесса при исследовании реакции перезарядки с участием дейтрона // Письма в ЭЧАЯ. 2000. Т. 100, № 3. С. 67–73.
2. Bushuev Yu. P., ..., Mušínský J. et al. Charge Exchange Processes on the Deuteron // Proc. of the Intern. Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV, Slovak Republic, Stara Lesna, June 26–July 1 2000. 2001. Pp. 234–245.
3. Bushuev Yu. P., ..., Mušínský J. et al. Deuteron as a Spin Flip Amplitude Analyzer // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XV Intern. Baldin Seminar on HEP Problems, Dubna, 25–29 September 2000. 2000. Pp. 110–115.
4. Glagolev V. V., ..., Mušínský J. et al. Determination of spin-dependent contribution to the amplitude of the  $np \rightarrow pn$  scattering from the reaction  $dp \rightarrow (pp)n$  // Proc. 12th Conf. Slovak Physicists, Smolenice, 3–5 September 2001, Bratislava: Slovak Physical Society. 2002. Pp. 38–39.
5. Glagolev V. V., ..., Mušínský J. et al. Spin-dependent  $np \rightarrow pn$  amplitude estimated from  $dp \rightarrow ppn$  // Eur. Phys. J. A. 2002. Vol. 15. Pp. 471–475.
6. Arefiev V. A., ..., Mušínský J. et al. Investigation of Charge Exchange Reaction in Deuteron-Proton Interaction at the Nuclotron // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVI Intern. Baldin Seminar on HEP Problems, Dubna, 10–15 June 2002. Vol. 1. 2004. Pp. 247–253.
7. Glagolev V. V., ..., Mušínský J. et al. The charge exchange reaction  $dp \rightarrow (pp)n$  // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVIII Intern. Baldin Seminar on HEP Problems, Dubna, 25–30 September 2006. Vol. 2. 2008. Pp. 281–288.
8. Глаголев В. В., ..., Мушински Я. и др. Реакция перезарядки  $dp \rightarrow (pp)n$  // Сообщения ОИЯИ P1-2006-112, Дубна. 2006.

9. Glagolev V. V., . . . , Mušínský J. et al. Break-up of Light Nuclei at Intermediate Energies // Proc. of the 9th Intern. Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV, Slovakia, Modra-Harmonia, May 22–27 2006. 2006. Pp. 272–281.
10. Glagolev V. V., . . . , Mušínský J. et al. The charge exchange reaction  $dp \rightarrow (pp)n$  // Cent. Eur. J. of Phys. 2008. Vol. 6, no. 4. Pp. 781–785.
11. Глаголев В. В., . . . , Мушински Я. и др. Поиск и реконструкция трека в дрейфовых камерах на установке СТРЕЛА // Сообщения ОИЯИ P13-2008-165, Дубна. 2008.
12. Glagolev V. V., . . . , Mušínský J. et al. The  $dp \rightarrow (pp)n$  Charge Exchange Channel // Proc. of the Intern. Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV, Slovak Republic, Stara Lesna, June 5–11 2009. 2010. Pp. 164–174.