

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

Физический факультет

На правах рукописи

Леонтьев Владимир Викторович

Высокоточное восстановление импульса  
малоэнергетических продуктов рп-взаимодействия в области  
энергий единиц ГэВ микроstriповыми детекторами

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре физики элементарных частиц физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель: **Меркин Михаил Моисеевич**

доктор физико-математических наук  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
заведующий лабораторией

Официальные оппоненты: **Воробьев Александр Павлович**

доктор физико-математических наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Государственный научный центр Российской Федерации -  
Институт физики высоких энергий»,  
начальник лаборатории

**Голубков Дмитрий Юрьевич**

кандидат физико-математических наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Государственный научный центр Российской Федерации -  
Институт теоретической и экспериментальной физики»,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу:  
119991, Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, корпус 19, ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ г.

Ученый секретарь совета Д501.001.77  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Страхова С.И.

## ***Общая характеристика работы.***

### ***Актуальность темы.***

В настоящий момент исследования спиновой адронной физики являются одним из приоритетных направлений, поскольку развитие этой области науки позволит вывести знания человечества о структуре материи на новый уровень. Проводимые и планируемые исследования спиновой физики нуклон-нуклонного взаимодействия в области энергий несколько ГэВ, изучение околопорогового рождения мезонов и барионов, спин-фильтрационные исследования на ускорителях требуют регистрации малоэнергетических продуктов реакций, в частности, протонов и дейтронов с кинетической энергией от 0,5 до 200 МэВ. Существенная часть этих исследований требует не только восстановления треков и идентификацию типа частиц, но и получения всего комплекса энергетической, временной, пространственной информации о них с высокой точностью.

Работа является частью проекта создания системы детектирования малоэнергетических частиц, состоящей из нескольких двусторонних микростриповых полупроводниковых детекторов (ППД). Отличительной особенностью такой системы кремниевых трековых телескопов (КТТ) является значительное число энергетических и временных каналов измерения. Компактность модулей системы (размер сборки из трех детекторов с электроникой -  $12 \times 12 \times 30 \text{ см}^3$ ) позволяет поместить их в вакууме в непосредственной близости от мишени. Это обеспечивает полноту восстановления наблюдаемых величин продуктов реакций с малым пробегом и дает возможность обеспечить точность реконструкции физического сигнала и самоконтроль системы.

Создание методики калибровки и анализа первичных данных для всей совокупности энергетических, временных и пространственных каналов информации повышает эффективность реконструкции физического сигнала установки, использующей трековые ППД до качественно нового уровня. Существенно возрастает точность измерения дифференциальных сечений и возможность анализа реакций  $pd \rightarrow pp(n)$ ,  $pd \rightarrow pp(\Delta^0)$  с регистрацией пары протонов с малыми энергиями, упругого рассеяния  $pd \rightarrow pd$  с малыми углами и регистрацией дейтрона с малой энергией.

Именно этими задачами определяется актуальность настоящей работы.

### ***Цель работы.***

Целью работы является получение в системе КТТ максимальной, близкой к аппаратурному пределу, точности энергетических и временных измерений, применение их совместно с восстановлением треков частиц для расчета кинематических параметров продуктов исследуемых реакций, и максимальное расширение области определения этих параметров. Вторым направлением является изучение перспектив применения таких характеристик системы в будущих экспериментах.

### ***Научная новизна работы.***

Разработана и протестирована в эксперименте ANKE методика преобразования информации со всех каналов системы кремниевых трековых телескопов в экспериментальные наблюдаемые величины изучаемых реакций с высокой точностью.

1. Разработана и применена оригинальная методика тестирования микростриповых детекторов и электроники считывания (front-end). Впервые в рамках этой методики использована комбинация электронной калибровки и регистрации излучения радиоактивных источников, что позволило выявить и скомпенсировать ряд неизвестных до этого нерегулярностей функции отклика детекторной системы такого типа [1].

2. Разработана и экспериментально подтверждена методика кросс калибровки системы кремниевых трековых телескопов на основе комбинации данных, полученных от радиоактивных источников в лаборатории и данных по регистрации продуктов опорной реакции (упругого рассеяния протонов) в условиях научного эксперимента [1].

3. Разработан и использован в эксперименте метод восстановления начальной энергии малоэнергетических продуктов реакции с высокой точностью, для протонов с кинетической энергией  $1 \div 40$  МэВ относительная погрешность измерения составила менее 1%. При этом повышена верхняя граница области определения энергии в два раза, с 35 до 70 МэВ [1,2].

4. Проработан метод измерения времени пролета частиц, впервые для полупроводниковых детекторов получена погрешность измерения временных интервалов менее 0,54 нс (в лабораторных условиях). Тем самым продемонстрирована возможность использования системы кремниевых трековых телескопов для время-пролетных измерений, а также для идентификации частиц, остановленных в детекторе, по их пробегу. Этот метод позволил снизить нижнюю границу области измерения энергии частиц с 5,5 МэВ до 1,5 МэВ [2].

5. Исследованы возможности системы кремниевых трековых телескопов для расширения научной программы ANKE-PAX по изучению спинового протон-нейтронного взаимодействия [3,4], в частности, для измерения дифференциальных сечений реакций  $pd \rightarrow pp(n)$ ,  $pd \rightarrow pp(\Delta^0)$  с регистрацией системой кремниевых трековых телескопов пары протонов с малой энергией возбуждения ( $\sim$ МэВ), а также для изучения упругого рассеяния на малые углы с регистрацией низкоэнергетического дейтрона [2].

### ***Научно-практическая значимость работы.***

Автор внес вклад в создание компактной системы детектирования протонов и дейтронов малых энергий в условиях вакуума в непосредственной близости от мишени. В результате система кремниевых трековых телескопов обеспечила получение всего комплекса энергетической, временной, пространственной информации с высокой точностью в экспериментах на ANKE-COSY. Как результат проведены исследования развала дейтрона и деполяризации пучка спин-флипом.

Полученные по разработанной методике характеристики системы кремниевых трековых телескопов, а также ее модульность и быстрая расширяемость обеспечивают условия успешного применения этой системы в планируемых экспериментах, таких как, например, PAX-FAIR.

Полученные в работе результаты экспериментальных и модельных оценок точности измерения и области определения кинематических параметров позволили обосновать использование системы КТТ для расширения научной программы ANKE-PAX.

Разработанный по теме диссертации инструментарий используется автором в лабораторном практикуме и спецкурсах кафедры физики элементарных частиц физического факультета МГУ.

### ***Положения, выносимые на защиту.***

1. Высокоточный метод восстановления векторной величины импульса протонов и дейтронов, как малоэнергетических продуктов реакций, регистрируемых для изучения спинового рп-взаимодействия.
2. Применение высокоточного метода измерения времени для идентификации протонов и дейтронов, как по длине пробега внутри единичного детектора, так и по времени пролета.

3. Методика тестирования и кросс калибровки системы КТТ, обеспечивающая достижение максимально высокой точности измерения.
4. Предложения для расширения научной программы ANKE-PAX по изучению протон-нейтронного взаимодействия.

### ***Личный вклад автора.***

Автором лично в рамках данной работы были получены следующие результаты:

1. Создан комплекс программ анализа первичных данных калибровки микростриповых детекторов и электроники считывания (front-end). Испытаны все модули электроники при помощи тестового оборудования, введенного в эксплуатацию автором. Создана процедура коррекции выявленных в испытаниях нерегулярностей.
2. Разработаны методы высокоточной калибровки системы кремниевых трековых телескопов на основе анализа данных набора радиоактивных источников, а также продуктов референсной реакции. Разработана процедура высокоточного восстановления кинематических параметров малоэнергетических продуктов реакций. Созданы методы расширения области определения системы кремниевых трековых телескопов на основе экстраполяции кинематических параметров для пролетных частиц. Разработан метод идентификации типа частицы одним микростриповым детектором по измерению времени и величины энерговыделения.
3. При определяющем вкладе автора проведен анализ результатов научного эксперимента и сравнение с результатами численного моделирования, что позволило оценить точность и область определения экспериментальных наблюдаемых для ряда перспективных исследований спинового нуклон-нуклонного взаимодействия в области энергий порядка нескольких ГэВ.

### ***Апробация работы.***

Результаты работ, на которых основана диссертация, были представлены лично автором и обсуждались на международной конференции «Nucleus-2013» (МИФИ, Москва), на семинарах Института ядерной физики Исследовательского центра Юлих (FZ Juelich), на рабочих совещаниях коллаборации ANKE (в FZ и в ОИЯИ), на ежегодных конференциях немецкого физического общества DPG (Кельн, 2005; Мюнхен, 2006; Гиссен,

2007), на конференции «Ломоносов» (физический факультет МГУ, Москва, 2008), на конференции «ОМУС» (ОИЯИ, Дубна, 2010).

Основные результаты опубликованы в 3 статьях в российских и зарубежных рецензируемых журналах ВАК, в том числе, высокорейтинговых.

Достоверность результатов подтверждается экспериментальными результатами, полученными на установке ANKE-COSY.

### ***Объем и структура диссертации.***

Диссертационная работа состоит из настоящего введения, шести глав, выводов, четырех приложений и списка литературы. Работа содержит 140 страниц, 15 таблиц и 95 иллюстраций.

### ***Содержание диссертации***

Во введении обосновывается актуальность работы, кратко излагается история развития исследований по выбранному направлению. Формулируется цель работы и задачи исследований. Описывается научная новизна и практическая ценность работы. Рассматривается общая структура диссертации.

**Первая глава** описывает экспериментальное окружение и предназначение системы Кремниевых Трековых Телескопов. Детекторная система Кремниевых Трековых Телескопов (Silicon Tracking Telescopes, КТТ) была разработана для установки ANKE, расположенной на внутреннем пучке ускорителя COSY, а также будет применяться в экспериментах PAX@FAIR. При разработке детекторной системы КТТ ставились задачи измерения степени поляризации пучка ускорителя, контроля светимости, а также получения пространственной информации о вершине реакции. Данные задачи можно решить, регистрируя низкоэнергетические продукты опорных реакций. Путем измерения ионизационных потерь частиц и определения места и времени их попадания в детекторы была проведена идентификация продуктов искомых реакций, восстановление треков частиц, а также подавление фоновых событий.

**Вторая глава** содержит описание системы КТТ, а также описание исследований детекторов, считывающей электроники и единичного модуля

системы. В экспериментах спиновой физики промежуточных энергий зачастую необходимо изучать продукты реакций (протоны, дейтроны) с кинетической энергией от 0,5 до 200 МэВ, у которых длины пробега порядка нескольких миллиметров. Для решения данной задачи были выбраны двусторонние микростриповые детекторы. Важным аспектом является квалифицированное применение коммерчески доступных компонентов, использование которых обеспечивает существенное снижение стоимости и продолжительности разработки для экспериментов небольшого масштаба. Самодостаточным модулем КТТ системы является т.н. телескоп (Рисунок 1), который состоит из следующих компонентов:

- 1) последовательность детекторов (обычно из трех), расположенных друг за другом относительно мишени на расстоянии порядка 2 см от нее (в сверхвысоком вакууме ускорителя);

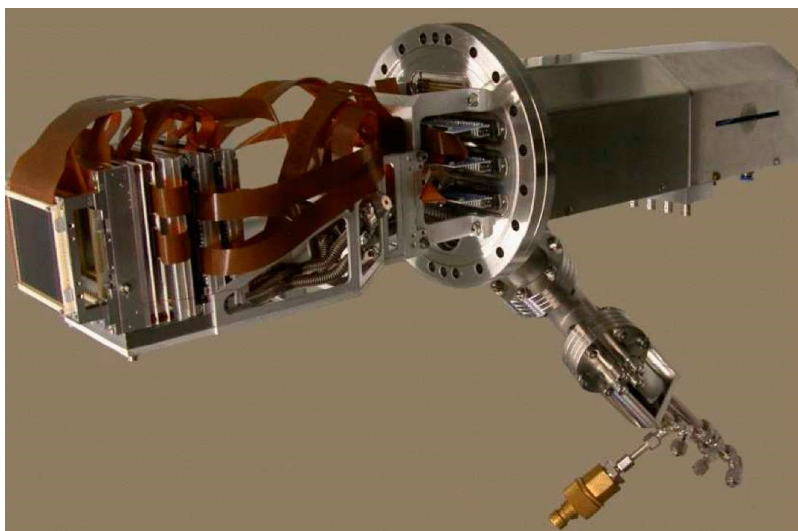


Рисунок 1: Фотография одного КТТ модуля. Показан телескоп из трех детекторов, вакуумная часть электроники и атмосферная часть (в кожухе), разделенные фланцем. Виден фланец системы температурной стабилизации.

- 2) считывающая электроника, размещаемая рядом с детекторами;
- 3) электроника считывания стандарта VME, которая размещается на платформе ANKE электроники в зале ускорителя.

**Третья глава** содержит описание процедуры калибровки и анализа первичных данных энергетических каналов системы. Описаны методики



калибровки единичного чувствительного элемента; единичного детектора; целого модуля системы для того, чтобы восстановить первоначальную энергию идентифицируемого продукта реакции. В мировой практике точность около 20 кэВ при измерении потерь энергии в падовых кремниевых детекторах при комнатной температуре является надежным результатом. Новшеством, полученным в системе КТТ, является обеспечение точности такого уровня для микростриповых детекторов с двусторонним считыванием сигнала, а также обеспечение этой точности в широком динамическом диапазоне. В данной работе показано, что при измерении энергии телескопом из таких детекторов полезно включить в рассмотрение факт идентификации типа частицы и параметры ее трека. Эта информация позволяет определить не только значения потерь энергии внутри чувствительных слоев, но и значение начальной энергии частицы.

В Разделе 3.1 описывается измерение при помощи одного канала электроники, подключенного к сегменту считывания детектора, составляющих базовый элемент измерения. Для того, чтобы откалибровать каждый элемент, сначала исследуется отклик от серии импульсов тестовых сигналов, возможность генерации которых предусмотрена в считывающей электронике. Далее, измерения на лабораторной экспериментальной установке с применением радиоактивных источников обеспечивают, с одной стороны, улучшение точности функции отклика, с другой стороны, определение толщины и структуры мертвого слоя на поверхности детекторного сегмента (Рисунок 2). Оценка энергетического разрешения измерительного элемента составила 30 кэВ для протонов.

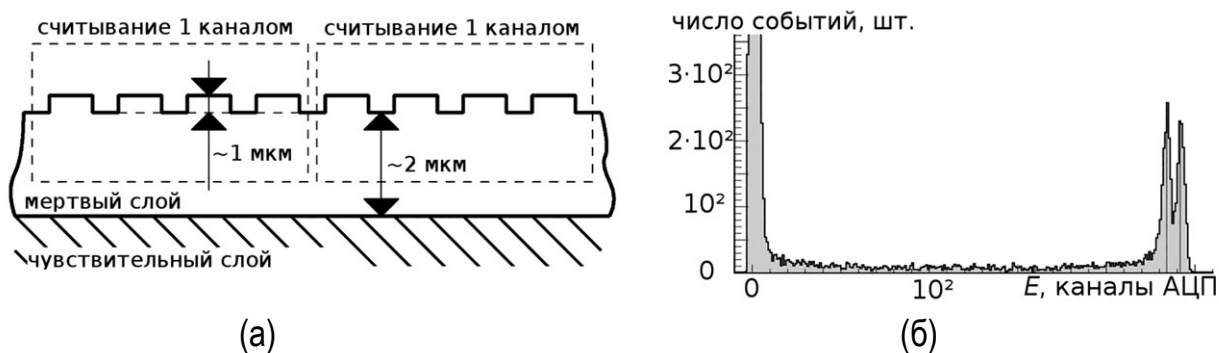


Рисунок 2: а) Схема мертвого слоя детектора; б) спектр  $\alpha$ -источника, расщепление пика (146 кэВ) в результате потерь в двухуровневом мертвом слое.[1]

В Разделе 3.2 описан способ получения величины ионизационных потерь энергии в чувствительном слое одного детектора при анализе и перекрестной проверке сигналов с отдельных измерительных элементов. Описан ряд систематических отклонений, возникающих в измерениях базовых элементов. Выявление этих отклонений, получаемое в результате исследования корреляций показаний базовых элементов (Рисунок 3), и их компенсация значительно увеличивают точность измерения энергии.

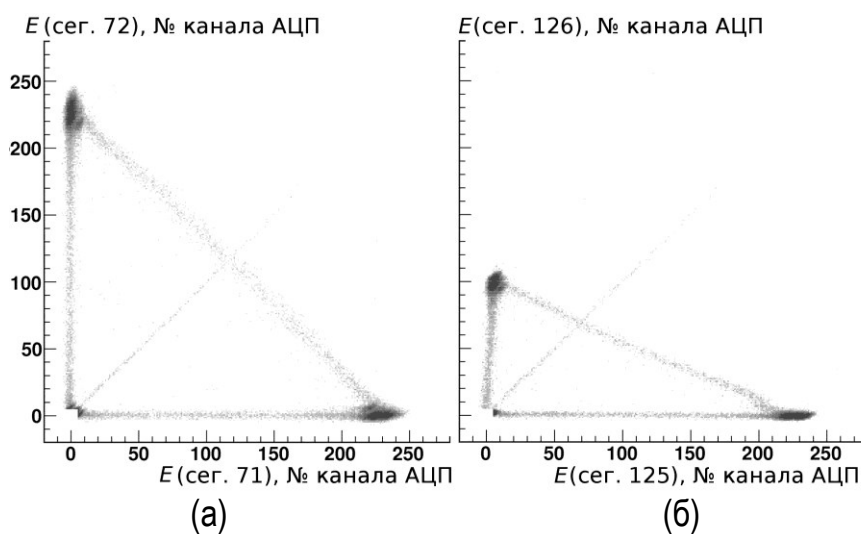


Рисунок 3. Сравнение сигналов от  $\alpha$ -частицы на соседствующих сегментах детектора: а) два стандартных сегмента; б) один стандартный, один с т.н. сигналом «половинной амплитуды».[1]

Далее в Разделе 3.3 описывается процедура определения начальной энергии продуктов реакций, которая суммирует информацию со всех детекторов телескопа. Поскольку выстроенный из детекторов телескоп способен

обеспечить идентификацию типа частицы и измерение угла наклона ее трека, то возникает возможность рассчитать ионизационные потери частицы в мертвых слоях установки, если толщины этих слоев заранее определены. Аналогично рассчитывается уносимая часть энергии для пролетных протонов. Дано описание разработанной процедуры, оценки ее точности и эффективности.

В Разделе 3.4 описывается заключительный этап калибровки для регистрации продуктов изучаемых реакций по экспериментальным данным от опорной реакции упругого рассеяния дейтронов на протонах. Показаны энергетические характеристики системы КТТ, полученные в ходе экспериментов на установке ANKE, проведено сравнение с лабораторными измерениями. Проведена проверка метода определения начальной энергии частицы, а также проверка применяемого метода идентификации остановленных протонов, дейтронов и других частиц. Для четкого формального разделения частиц по типам был выбран так называемый PID (или  $\Delta x/\alpha$ ) критерий, основанный на эмпирическом правиле, что для сравнительно тяжелой и медленной частицы средняя длина ее пробега в веществе пропорциональна величине ее начальной кинетической энергии в степени  $1.76 \pm 0.01$ . Рисунок 4 показывает зависимость энергетического разрешения, т.н. расстояния между пиками распределения событий по PID величине для разных типов частиц. Показано, что частицы уверенно идентифицируются, разрешение в рабочем диапазоне не менее  $5\sigma$ .

Как было показано в этой главе, система КТТ уже на этапе проведенной тестовыми импульсами калибровки обеспечивает измерение энергии с погрешностью не более 5%. Этап исследований с  $\alpha$ -источниками позволил изучить особенности процесса считывания сигнала с детекторов. Было выяснено, что использовании полученных настроек системы считывания и соответствующем анализе данных может быть достигнута относительная точность восстановления начальной энергии продукта реакции на уровне 1% (Рисунок 5). Также было показано, что данное значение является

принципиальным пределом точности системы, устанавливаемым многократным кулоновским рассеянием частиц в веществе детекторов.

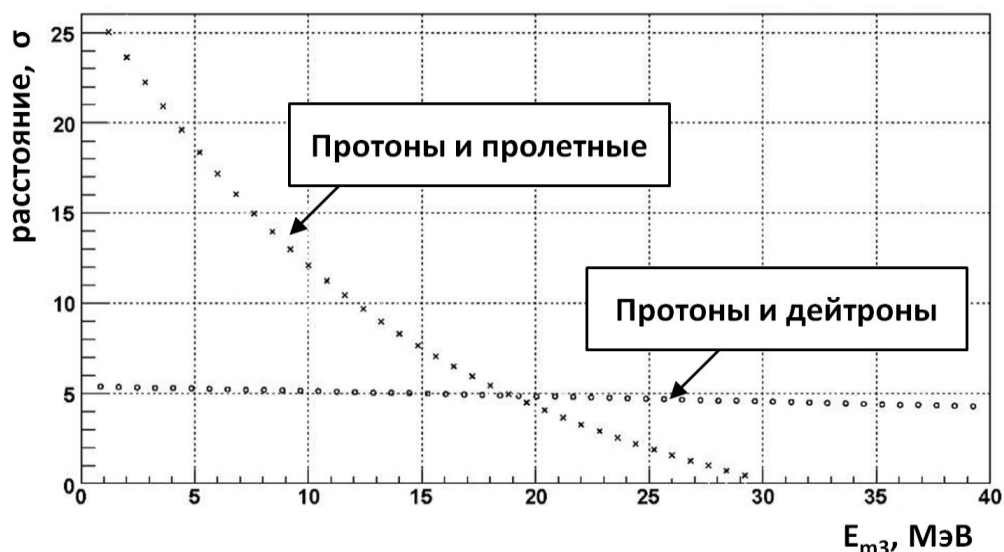


Рисунок 4: Зависимость разрешающей способности между пиками дейтронов, протонов и пролетных частиц на PID графике от  $E_{m3}$  (измерение энергии третьим детектором).

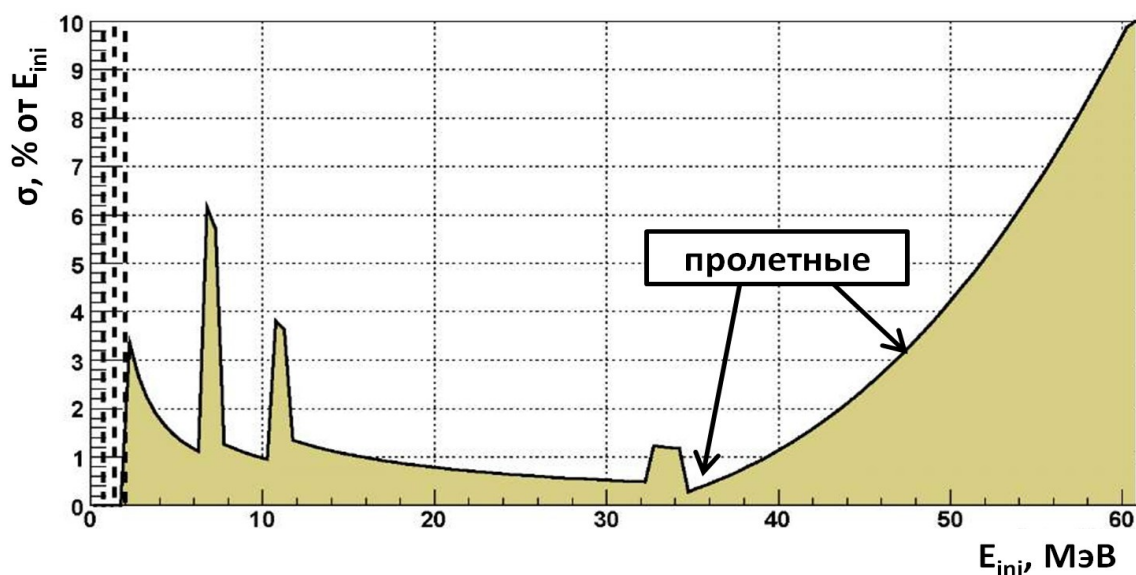


Рисунок 5: Зависимость совокупной относительной погрешности восстановления кинетической энергии вылета  $E_{ini}$  протона от ее значения (углы вылета  $\theta=70^\circ\pm 9^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ\pm 9^\circ$ ). [1]

**Четвертая глава** содержит описание процедуры калибровки и анализа первичных данных каналов измерения времени и их связи с измерением энергии. Анализируются возможности измерения времени для применения в эксперименте. Исследованы характеристики точности временных отметок

сигналов считывающей электроники ППД, изучены ее отклики на тестовые сигналы генератора. Помимо проведения аналогичных измерений, впервые проведены исследования на сигналах от реальных частиц, это обеспечило изучение тонкостей работы всего тракта детектор–электроника.

В Разделе 4.1 описывается методика получения временных отметок, формируемых электроникой на базе серийных плат с установленными микросхемами VA32TA2. В лабораторных условиях данные получены при помощи источников  $\alpha$ -частиц. Изучено статистическое отклонение временной метки (Рисунок 6.б), которое интерпретируется как разрешение измерения времени, измеренная величина оказалась стабильной в рабочем диапазоне амплитуд входных сигналов и равной 0,54 нс (сигма). Вторым показателем является величина систематического смещения временной отметки в зависимости от амплитуды сигнала, определенная сравнением временных отметок с двух сторон детектора. Эта величина хорошо описывается монотонной функцией, содержащей обратную экспоненциальную зависимость от амплитуды:  $-4.8 + e^{(3.1 - 0.54 * E)}$  [нс], Рисунок 6.а. В методе коррекции влияния такого смещения (т.н. эффекта time walk) к данным применялась функция, обратная полученной.

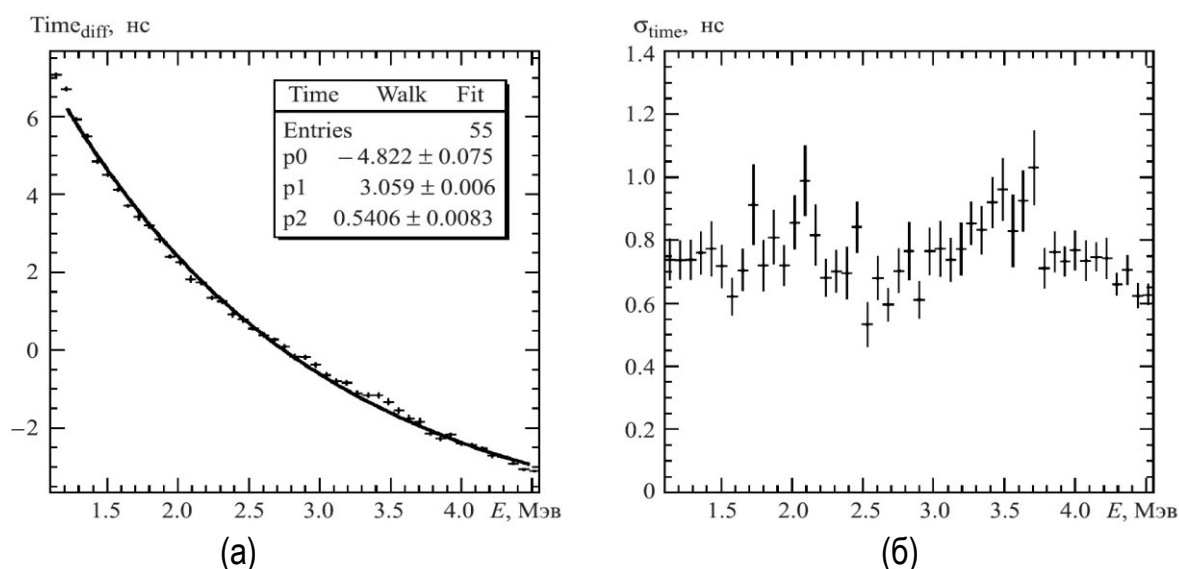


Рисунок 6: а) Зависимость среднего положения временной отметки от энергетического эквивалента амплитуды сигнала; б) зависимость ширины распределения от амплитуды.[2]

В Разделе 4.2 описывается исследование прототипа печатной платы с МАТЕЗ микросхемой. Для этого была модифицирована лабораторная установка, дополнительно введен  $\beta$ -источник и два сцинтилляционных счетчика для выработки сигнала запуска.

Исследования при помощи радиоактивных источников позволили изучить и скомпенсировать нежелательное влияние ряда эффектов, проявляющихся в тракте детектор-электроника, таких как time walk эффект, поверхностные эффекты распределения заряда на детекторах, эффект дифференциальной нелинейности время-цифрового преобразователя. В результате разрешающая способность измерения времени составила около 0,5 нс ( $\sigma$ ).

В Разделе 4.3 показано, что наилучшие характеристики могут быть достигнуты путем применения комбинации VA32TA2 и МАТЕЗ вариантов считывающей электроники и совокупного анализа данных с нескольких детекторов телескопа. Рассмотрены два направления применения.

- Первое направление, времяпролетная идентификация частиц, а именно отделение дейтронов от протонов с импульсами около 2.5-2.7 ГэВ/с, регистрируемых системой FD ANKE, при этом от системы КТТ требуется стартовая отметка времени. В результате анализа данных, полученных во время эксперимента ANKE, было показано, что процедура корректна, корреляции временных и энергетических измерений соответствуют модельным, однако добиться необходимой для идентификации точности пока не удалось в результате сохраняющегося рассогласования временных каналов КТТ.

- Для второго направления, идентификации типа частиц первым детектором, был разработан метод выделения протона, дейтрона или тритона остановленного одним (передним) детектором КТТ телескопа, по информации только с него одного. Метод использует измерение разницы между двумя временными отметками от прихода сгенерированных частицей зарядов на разные стороны детектора. Показано, что при соответствующей настройке эта

разница фактически составляет промежуток времени между моментом попадания частицы в детектор (начало сбора заряда на переднюю сторону детектора) и моментом прихода заряда от заключительной части трека на заднюю сторону детектора, что позволяет рассчитать координату конца трека в детекторе. Данная информация определяет длину пробега частицы в детекторе, корреляция которой с измеренной детектором величиной энергии частицы и обеспечивает ее идентификацию (Рисунок 7.а). Метод был проверен на эксперименте ANKE#172: уверенно, с критерием  $3\sigma$ , идентифицируется факт остановки протона в 5 мм детекторе (Рисунок 7.б).

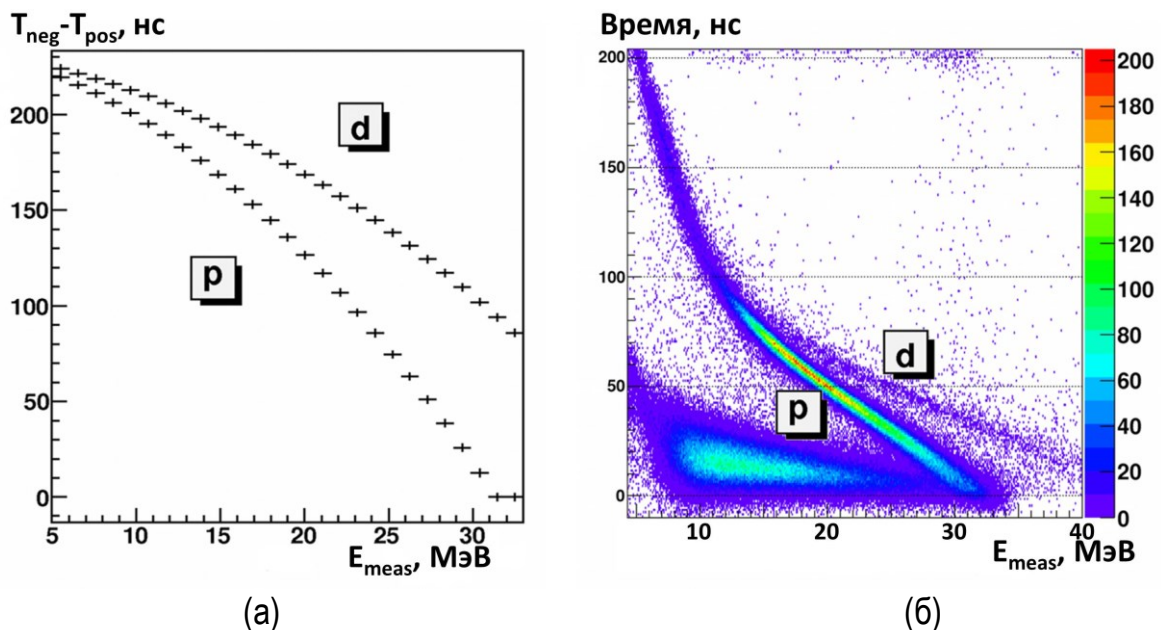


Рисунок 7: Зависимость временного интервала регистрации частицы разными сторонами детектора от зарегистрированной энергии: а) моделирование, разделение протонов и дейтронов; б) данные эксперимента (не оптимизирован для измерения времени).[2]

**В пятой главе** рассматривается процедура восстановления треков, связь получаемых пространственных данных с измерениями системой энергии, описание внедренного метода восстановления вершины реакции по парным трекам. Процедура определения трека продукта реакции включает в себя построение уравнения линии трека (в частном случае прямой линии такое построение фактически означает определение углов направления трека или углов вылета частицы), а также определение координат начала трека

(вершины реакции). Определение углов вылета нужно для того, чтобы, располагая информацией об энергии идентифицированной частицы, восстанавливать векторную величину импульса малоэнергетических продуктов реакций, регистрируемых КТТ системой. Информация о вершине требуется, по крайней мере, для обеспечения необходимой точности определения импульса при помощи магнитного спектрометра ANKE летящих вперед быстрых продуктов реакций. Кроме того, реконструкция треков вносит вклад в подавление фона, а также позволяет сканировать профиль пучка в накопительной ячейке газовой мишени, что полезно при настройке пучка и юстировке накопительной ячейки.

Применяемая в данной работе процедура реконструкции трека по координатам сработавших сегментов была разработана [1.1] для эксперимента с кластерной мишенью и телескопом, состоящим из тонкого (300 мкм) и толстого (5 мм) детектора. В настоящей работе на данных эксперимента с протяженной накопительной ячейкой газовой мишени показано, что использование двух тонких (300 мкм), детекторов позволило существенно уменьшить неопределенность, возникающую в результате кулоновского многократного рассеяния внутри детектора.

Описывается применяемый метод реконструкции угловых параметров трека. Представлены результаты изучения характеристик метода, полученные во время работы системы в рамках эксперимента #172.0, а также оценки теоретических пределов точности их восстановления. Так, разрешение по полярному углу составило  $\sigma_\theta=1.14^\circ$ , а по азимутальному углу  $\sigma_\phi=2.6^\circ$  (при повороте телескопа на  $90^\circ$  произойдет обмен значениями), что близко к оценкам пределов, задаваемых ненулевой величиной шага считывания. На эксперименте #172.0 метод восстановления вершин реакций по единичному зарегистрированному треку был применен для полной конфигурации телескопа впервые, был восстановлен профиль пучка в газе мишени в



нескольких плоскостях (Рисунок 8). При этом было показано, что погрешность восстановления профиля находится на уровне одного-двух миллиметров.

Для события с регистрацией в КТТ двух продуктов от одной реакции был использован новый метод, в котором вершина определяется как геометрическое место точек наибольшего сближения двух треков в пространстве. Для быстрой обработки событий используется аналитическое стереометрическое решение. Под искомым геометрическим местом подразумевается отрезок между линиями двух треков, лежащий на их общем перпендикуляре. Для решения систем уравнений использованы классы TVector3 и TMatrix библиотек ROOT, подключаемых в программу анализа событий эксперимента.

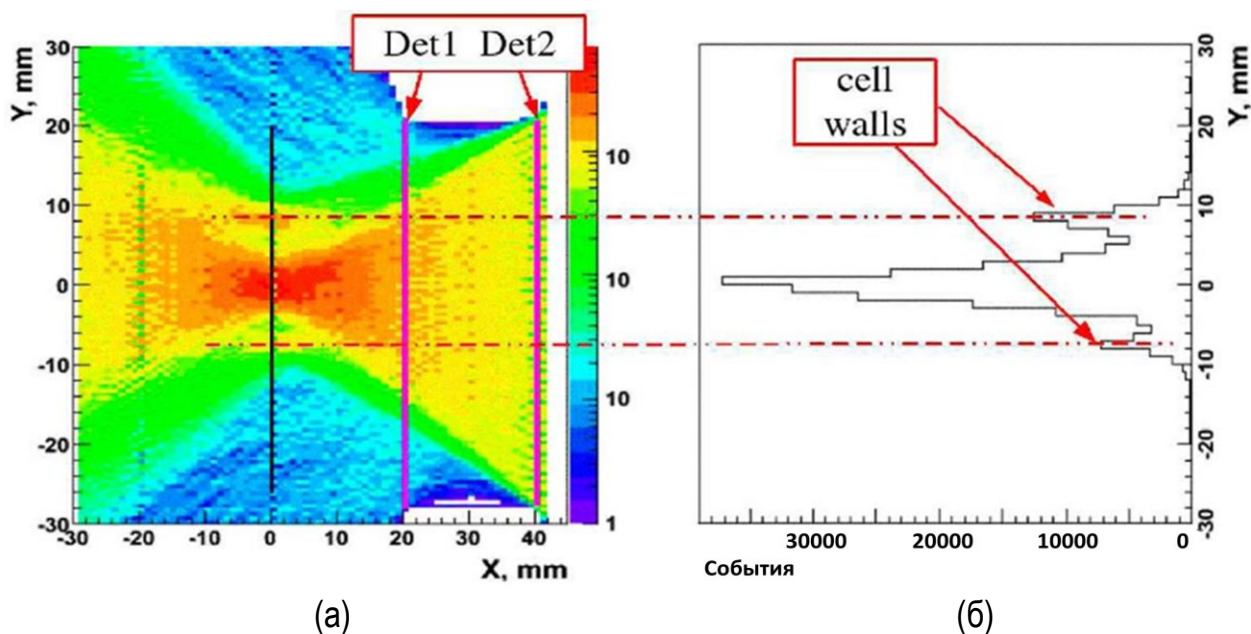


Рисунок 8: а) Распределение проекций линий треков на плоскость XY. б) Сечение распределения (а) вдоль оси OX в окрестности  $X = 1,2$  мм.[2]

Экспериментальная проверка работы метода на твердотельной мишени проиллюстрирована на Рисунке 9. Подтверждено, что разработанный метод способен определять координаты вершины с точностью единиц миллиметров, для восстановления X координаты это улучшение точности на порядок.

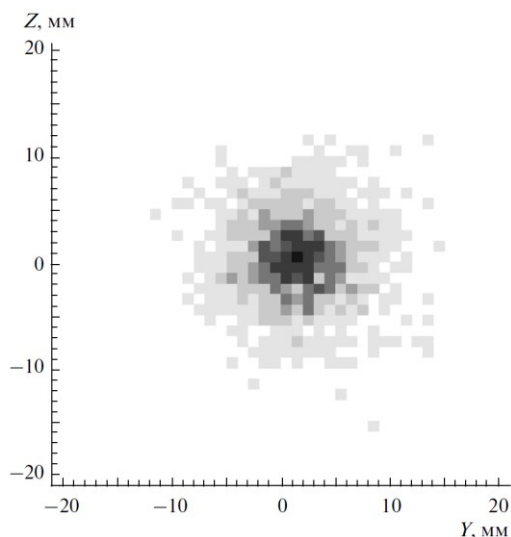


Рисунок 9: Проверка метода восстановления вершины реакции по двум трекам на данных с условно точечной мишенью. Разрешение ( $\sigma$ ) равно 4 мм.[1]

**В шестой главе** рассматривается мотивация для расширения текущей научной программы с применением КТТ и описывается анализ перспектив применения улучшенных характеристик КТТ.

В Разделе 6.1 описывается текущая научная программа применения Кремниевых Трековых Телескопов. В Разделе 6.2 описывается мотивация для расширения научной программы и формулируется список связанных с этим расширением список повышенных требований к характеристикам системы КТТ. Ситуация с экспериментальными данными протон-нейтронного взаимодействия (нуклон-нуклонное взаимодействие с фазовым сдвигом изоспина  $I=0$ ) является в целом удовлетворительной для энергий взаимодействия ниже 515 МэВ. Выше этой энергии вплоть до 800 МэВ был получен лишь один достаточно полный набор данных [1.2]. Текущие работы коллаборации ANKE позволили впервые получить данные с энергиями взаимодействия выше 800 МэВ (изучение  $\vec{p}\vec{d} \rightarrow p_{spec}p(n)$  [1.3],  $\vec{p}\vec{d} \rightarrow p_{spec}p(n)$ [1.4]), а также впервые получить данные для событий, когда энергия возбуждения пары результирующих протонов  $E_{pp} < 50$  МэВ. Однако в проведенных работах проявляются ограничения области чувствительности (акцептанса) установки ANKE, а именно: азимутальный угол регистрации

провзаимодействовавших, «неспектаторных» протонов  $|\theta_p^{lab}|$  менее  $12^\circ$ , а для второго направления исследования энергия пучка не более 1.17 ГэВ. Данные ограничения были обусловлены тем, что провзаимодействовавшие протоны регистрировались исключительно магнитным спектрометром ANKE.

Предлагаемое изучение реакции  $\vec{p}\vec{d} \rightarrow p_{spec}pn$  с регистрацией и спектаторного, и провзаимодействовавшего протона системой КТТ позволяет расширить аксептанс установки (область определения угла  $\theta_p^{lab}$  до  $\sim 110^\circ$ , энергии взаимодействия, по меньшей мере, до 2 ГэВ), и определять при этом величину  $E_{pp}$  в области малых значений с достаточной точностью, что крайне желательно [4, стр. 33]. С целью изучения этих возможностей было проведено PLUTO моделирование регистрации пары протонов системой из двух КТТ телескопов, один из результатов которого показан на Рисунке 10. Было найдено наиболее оптимальное взаимное расположение телескопов с точки зрения определения  $E_{pp}$  и модуля переданного импульса, было показано, что их границы определения задаются, прежде всего, областью определения  $E_{ini}$  идентифицированных продуктов.

Эксперименты по изучению  $\vec{p}\vec{d} \rightarrow p_{spec}pn$  можно провести одновременно с исследованием реакции  $\vec{p}\vec{d} \rightarrow p_{spec}pn$ . Такое исследование даст информацию о влиянии канала  $NN \leftrightarrow N\Delta$  на нуклон-нуклонное взаимодействие, что необходимо для описания данного взаимодействия при энергиях в области порога рождения пиона [4]. Представляет значительный интерес получение информации о величинах анализирующей способности  $A_y$ ,  $C_{nn}$ ,  $C_{ss}$  и о дифференциальном сечении реакции. Кроме того, с точки зрения кварковой модели преобразование  $N \leftrightarrow \Delta$  является переверотом спина (spin-flip) одного из составных кварков в нуклоне без изменения его орбитального углового момента; изучение этого явления представляет самостоятельный интерес.

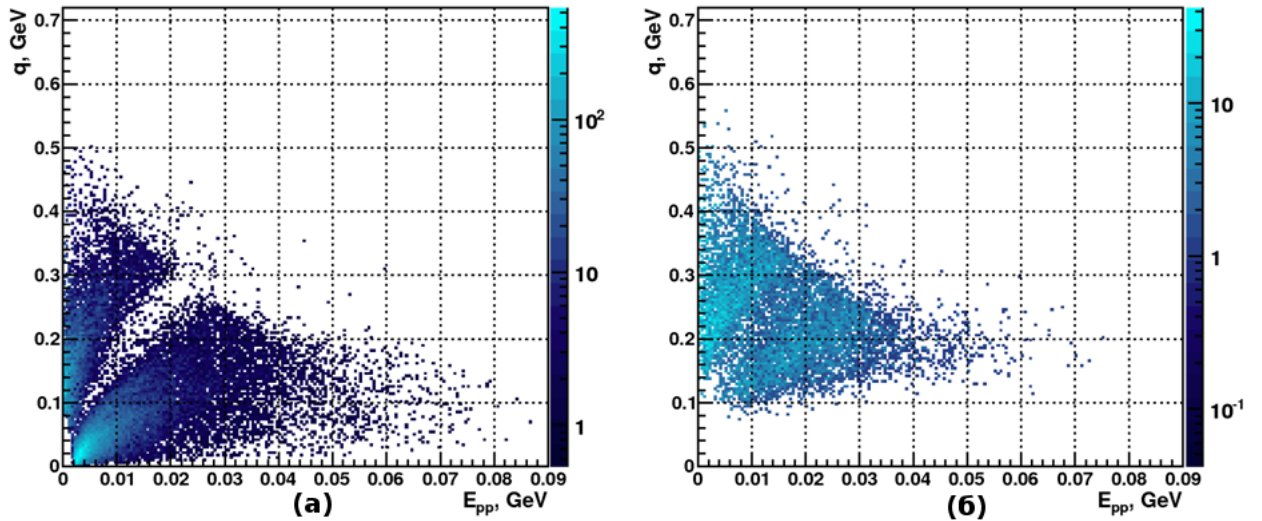


Рисунок 10: Пример моделирования аксептанса КТТ по модулю переданного импульса  $q$  и энергии возбуждения пары протонов  $E_{pp}$ . Импульс пучка 3 ГэВ/с.

а) реакция  $\vec{p}\vec{d} \rightarrow p_{spec}pn$ ; б) реакция  $pd \rightarrow pp_{spec}\Delta^0$ [4]

Одновременно с этими измерениями можно проводить исследование упругого рассеяния  $\vec{p}\vec{d} \rightarrow pd$  на малые углы с регистрацией медленного дейтрона системой КТТ, при этом для лучшей идентификации данной реакции удобно регистрировать быстрый протон системой FD. Поскольку наблюдаемые этой реакции сильно зависят от амплитуды обмена изоспина  $I=0$  (то есть, от суммы амплитуд  $pn$  и  $pp$  взаимодействий), то определение сечения и величин  $A_y$ ,  $C_{nn}$ ,  $C_{ss}$  позволит провести качественно независимую взаимную проверку описания фазовых сдвигов путем удаления амплитуды однопионного обмена [2, стр.35]. Для обеспечения возможности проведения исследований упомянутых реакций (в частности, для измерения малых значений  $E_{pp}$  с точностью не хуже единиц десятых долей МэВ) по отношению к характеристикам КТТ были сформулированы следующие требования [2]:

- обеспечение восстановления начальной кинетической энергии  $E_{ini}$  продуктов реакции с высокой точностью ( $\sim 1\%$ );
- расширение области определения  $E_{ini}$  идентифицированных продуктов с  $\{5.5 \text{ МэВ}, 32 \text{ МэВ}\}$  до  $\{\sim 1 \text{ МэВ}, \sim 70 \text{ МэВ}\}$ , хотя, в интересах создания

теории взаимодействия было бы крайне желательно опустить нижнюю границу определения еще ниже;

- восстановление импульсов пары результирующих протонов (погрешность восстановления углов на уровне  $1^\circ$ ), и, как следствие, высокоточное восстановления всех трех координат вершины реакции.

В Разделе 6.3 проведен анализ перспектив применения улучшенных характеристик КТТ. Пользуясь полученными оценками пространственного разрешения и точности восстановления  $E_{ini}$  протонов, при помощи программного пакета PLUTO был проведен модельный анализ точности восстановления  $E_{pp}$ . Результаты [2], показанные на Рисунке 11, говорят о том, что удовлетворение комплекса требований, сформулированных в Раздела 6.1, позволяет обеспечить получение экспериментальных данных с точностью и областью определения, достаточной для заявленной области исследования нуклон-нуклонного взаимодействия. Уточненное восстановление положения вершины реакции по трекам двух ее продуктов позволяет подавить фон от взаимодействия гало пучка со стенками ячейки мишени.

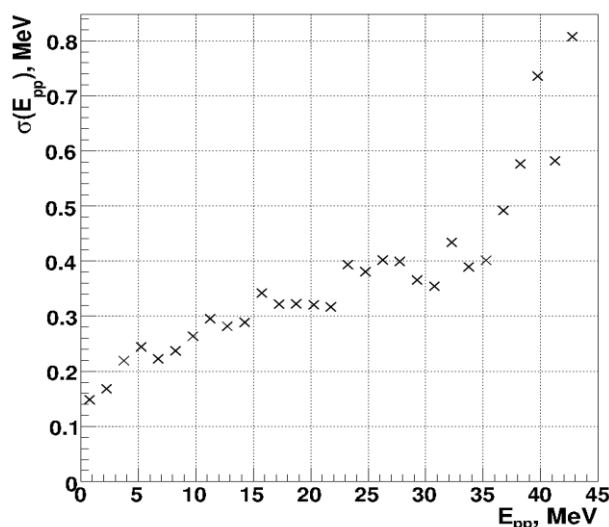


Рисунок 11: Зависимость точности восстановления энергии возбуждения пары протонов  $E_{pp}$  от ее значения; реакция  $pd \rightarrow pp_{spec} \Delta^0$ , импульс 3 ГэВ/с[2]

В Разделе 6.4 описана экспериментальная проверка метода измерения кинематических параметров пары протонов, идентифицированных системой

КТТ. Измерения были затруднены тем, что подготовленный для эксперимента единственный телескоп КТТ был серьезно поврежден в результате внезапного нарушения сверхвысокого вакуума ускорителя COSY. В данной ситуации, была предпринята попытка, по крайней мере, продемонстрировать на экспериментальных данных возможности КТТ системы исследовать реакции типа  $pd \rightarrow pp_{spec}X$  с одновременной регистрацией двух протонов малых энергий. Погрешность восстановления вершины реакции по двум трекам составила 4 мм вдоль поперечной оси. Был построен спектр недостающих масс, описываемый единственным пиком в области удвоенной массы нейтрона (1,879 ГэВ), что указывает на обнаружение ожидаемой реакции  $dd \rightarrow pp_{spec}nn$ . Для каждого идентифицированного события данной реакции был рассчитан модуль переданного импульса  $q$  и энергия возбуждения зарегистрированной пары протонов  $E_{pp}$ . Распределение корреляции этих величин сравнивалась с их теоретическим распределением, задаваемым фазовым объемом, которое было получено путем моделирования при помощи программного пакета PLUTO. Рисунок 12 демонстрирует полное совпадение экспериментальных и теоретических границ области определения  $\{q, E_{pp}\}$ , что говорит о корректности обоих совершенно независимых подходов и применимости разработанных методов для расширенной научной программы.

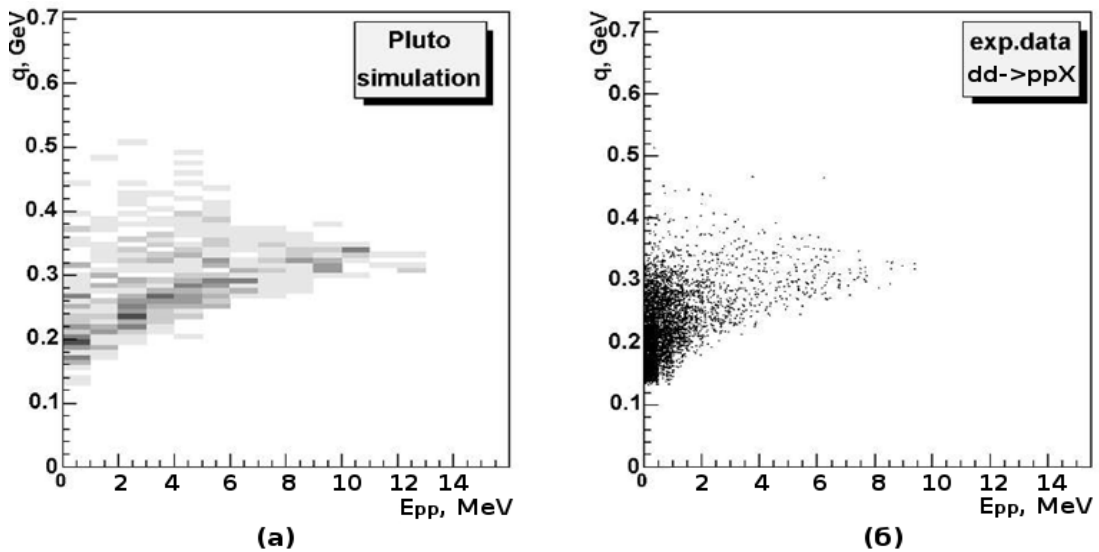


Рисунок 12: Корреляция  $q$  и  $E_{pp}$ . а) моделирование; б) эксперимент.



Показано, что результаты экспериментальных и модельных оценок точности измерения и области определения позволяют говорить о пригодности разработанных методов для расширенной научной программы, и нет необходимости в доработке экспериментальной аппаратуры.

**В заключении** формулируются основные выводы работы.

**В приложения** вынесен ряд фактических материалов, а также детализация технических расчетов.

### **Список основных публикаций.**

1. *Леонтьев В. В.* Высокоточное измерение микрополосковыми детекторами импульса протонов с энергиями от 2 до 70 МэВ // *Известия РАН. Серия физическая.* — 2014. — Т. 75, № 5. — С. 627–634. – DOI: [10.3103/S1062873814050256](https://doi.org/10.3103/S1062873814050256).
2. *Леонтьев В. В.* Возможности применения Кремниевых Трековых Телескопов STT с улучшенными характеристиками для изучения рп-взаимодействия // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* — 2012. — № 6. — С. 55–62. – DOI: [10.3103/S0027134912060100](https://doi.org/10.3103/S0027134912060100).
3. *S. Barsov, M. Büscher, M. Hartmann, V. Hejny, A. Kacharava, I. Keshelashvili, A. Khoukaz, V. Koptev, P. Kulesa, A. Kulikov, I. Lehmann, V. Leontyev, G. Macharashvili, Y. Maeda, T. Mersmann, S. Merzliakov, S. Mikirtychyants, A. Mussgiller, D. Oellers, H. Ohm, F. Rathmann, R. Schleichert, H. Seyfarth, H. Ströher, S. Trusov, Y. Valdau, P. Wüstner, S. Yaschenko, and C. Wilkin* Study of  $\omega$ -meson production in pp collisions at ANKE // *European Physical Journal A.* — 2007. — Vol. 31, No. 1. — P. 95–104. – DOI: [10.1140/epja/i2006-10161-2](https://doi.org/10.1140/epja/i2006-10161-2).
4. *A. Kacharava, F. Rathmann, and C. Wilkin for the ANKE Collaboration: S. Barsov, V.G. Baryshevsky, M. Buescher, M. Capiluppi, J. Carbonell, G. Ciullo, D. Chiladze, M. Contalbrigo, P.F. Dalpiaz, S. Dymov, A. Dzyuba,*

R. Engels , P.D. Eversheim , A. Garishvili, A. Gasparyan, R. Gebel , V. Glagolev, K. Grigoriev , A. Gussen, D. Gussev , J. Haidenbauer , C. Hanhart, M. Hartmann , V. Hejny , P. Jansen , I. Keshelashvili , V. Kleber , F. Klehr, H. Kleines, A. Khoukaz, V. Koptev , P. Kravtsov , A. Lehrach , P. Lenisa , **V. Leontiev** , B. Lorentz , V. Komarov , A. Kulikov , V. Kurbatov , I. Lehmann, G. Macharashvili , Y. Maeda , S. Martin , T. Mersmann, I. Meshkov , M. Mielke, M. Mikirytchians , S. Mikirytchians , U.-G. Meißner , S. Merzliakov , A. Mussgiller , M. Nekipelov , N.N. Nikolaev , M. Nioradze, D. Oellers , H. Ohm , Z. Oragvelidze, M. Papenbrock, D. Prasuhn , T. Rausmann, M. Rentmeester, J. Sarkadi , R. Schleichert , V. Serdjuk , H. Seyfarth , A. Smirnov , M. Stancari , M. Statera , E. Steffens , H. Stroehler , A. Sydorin , M. Tabidze, P. Engblom-Thoerngren, S. Trusov , Yu. Uzikov , Yu. Valdau , A. Vassiliev , M. Wang , S. Yaschenko , and I. Zychor Spin Physics from COSY to FAIR // *ArXiv e-prints* – 2005. – arXiv: [nucl-ex/0511028](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0511028).

#### **Список цитируемой литературы.**

- 1.1. A. Mussgiller Identification and Tracking of low Energy Spectator Protons', // *Ph.D. Thesis*. –2005. – *Universitat zu Koln, Hamburg*. – URL: <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/theses.shtml>
- 1.2. R. A. Arndt, W. J. Briscoe, R. L. Workman, and I. I. Strakovsky Nucleon Nucleon // *Data analysis Center* – 2016. – URL: [http://gwdac.phys.gwu.edu/analysis/nn\\_analysis.html](http://gwdac.phys.gwu.edu/analysis/nn_analysis.html) .
- 1.3. B. Gou *et al.* Study of the  $pd(pol) \rightarrow n\{pp\}$  charge-exchange reaction using a polarised deuterium target // *Phys. Lett. B* – 2015. – Vol.741– P.305. – ArXiv: [nucl-ex/1408.1909](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/1408.1909) .
- 1.4. S. Дымов *et al.* Analysing powers and spin correlations in deuteron-proton charge exchange at 726 MeV // *Phys. Lett. B* – 2015. – Vol.744– P.391. – ArXiv: [nucl-ex/1503.00514](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/1503.00514) .