

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
ВОРОБЬЁВА Александра Павловича на диссертацию
ЛЕОНТЬЕВА Владимира Викторовича

**«Высокоточное восстановление импульса малоэнергетических
продуктов pp-взаимодействия в области энергий единиц ГэВ
микростриповыми детекторами»**

представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук
по специальности : 01.04.16 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

В настоящее время кремниевые полупроводниковые детекторы являются неотъемлемой частью почти всех экспериментальных установок на ускорителях частиц для проведения экспериментов в области физики атомного ядра и элементарных частиц. Проводимые и планируемые исследования взаимодействия частиц в области энергий несколько ГэВ, изучение околорогового рождения мезонов и барионов в этих реакциях, требуют регистрации малоэнергетических продуктов реакций, в частности, протонов и дейтронов с кинетической энергией от 0,5 до 200 МэВ. При этом необходимо восстанавливать не только траекторию движения частиц и определять их тип, но и получать энергетические, временные, пространственные характеристики частиц с высокой точностью. Полупроводниковые координатные детекторы наиболее подходят для этих целей. Диссертация Леонтьева В.В. посвящена актуальной теме, разработке новых методов определения характеристик ядерных реакций в экспериментах при низких энергиях (меньше 2,5 ГэВ налетающего протона) с использованием полупроводниковых детекторов. Актуальность выполненной работы состоит в том, что все разработки ориентированы на создание аппаратуры для уже проводимых на ускорителях частиц экспериментов и используются в обработке экспериментальных данных.

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

Во введении обосновывается актуальность работы, кратко излагается история развития исследований по выбранному направлению. Формулируется цель работы и задачи исследований, положения, выносимые на защиту. Описывается научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе диссертации представлена, выполняемая с применением Кремниевых Трековых Телескопов (КТТ), научная программа для установки ANKE, расположенной на внутреннем пучке ускорителя COSY (Юлих, Германия). При выполнении этой программы КТТ обеспечивает измерение степени поляризации пучка ускорителя, контроль светимости, а также измерение пространственных координат точек взаимодействия первичных частиц в исследуемых реакциях, позволяет определить кинематические характеристики вторичных частиц и идентифицировать продукты реакций.

Во второй главе диссертации приводятся: описание системы КТТ, характеристики полупроводниковых детекторов, считывающей электроники и конструкции единичного модуля системы. Автором описаны, выполненные с его участием, разработки программного обеспечения для тестирования кремниевых п/п детекторов, входящих в состав КТТ, результаты самих испытаний детекторов на стенде с источником радиоактивного излучения, позволившие выполнить соответствующую отбраковку детекторов и учесть их характеристики при обработке данных реального эксперимента. Подробно описана настройка параметров многоканальных микросхем первичной обработки сигналов с п/п детекторов, испытания блоков электроники, с использованием соответствующего специально подготовленного программного обеспечения. Полученные данные показали необходимость изучения влияния температуры на характеристики КТТ системы, а также необходимость стабилизации температуры вакуумной части электроники и детекторов. Было показано, что термостабилизация снимает проблему дрейфа пьедесталов и коэффициента передачи сигналов во время работы КТТ системы.

В третьей главе диссертации описаны процедуры калибровки и анализа первичных данных энергетических каналов КТТ системы. Рассмотрена методика работы на уровне одного чувствительного элемента, одного детектора и модуля системы в целом для восстановления первоначальной энергии идентифицируемого продукта реакции. В главе рассмотрена энергетическая калибровка измерительного тракта с использованием серии импульсов тестовых сигналов. Далее, используя радиоактивные альфа источники, была разработана процедура улучшения электронной калибровки, учитывающая наличие нечувствительных к ионизирующему излучению слоёв в п/п кремниевом детекторе. Разработан соответствующий математический аппарат и подготовлено необходимое программное обеспечение. Всё это позволило получить энергетическое разрешение единичного п/п детектора для альфа частиц (энергия ~ 5 МэВ) равное ~ 30 КэВ, что само по себе является хорошим результатом. Подробно исследован вклад различных источников в это энергетическое разрешение, которое

показывает, что полученное разрешение единичного детектора близко к возможному пределу, которое равно ~ 20 КэВ. В главе подробно рассмотрены: корректировки уровней сигналов, которые необходимо вводить в каналы электроники, из-за наличия перекрёстных наводок в каналах регистрации для одного измерительного элемента; корректировки перекрёстных наводок в сегментах детекторов; корректировки базовой линии. В главе рассмотрена процедура восстановления кинетической энергии протонов и дейтронов в КТТ системе. Используя Монте Карло моделирование, проанализированы возможные источники ошибок в определении кинетической энергии и способы их учёта. По результатам моделирования относительная точность восстановления начальной кинетической энергии для протонов и дейтронов с кинетической энергией < 60 КэВ прогнозируется не хуже, чем 1%. При более высоких энергиях частиц метод восстановления начальной энергии продолжает работать с понижением точности. Разработанный метод восстановления кинетической энергии был проверен в условиях реального эксперимента ANKE (Университет Юлих, Германия). Для абсолютной энергетической калибровки КТТ системы, были выполнены измерения реакции упругого рассеяния протонов и дейтронов при энергии $\sim 2,4$ ГэВ. В диссертации подробно описана методика такой калибровки, которая позволяет сохранить точность измерения кинетической энергии протонов на 1% уровне, проанализированы возможные ошибки измерений. Сравнение распределений ионизационных потерь энергии одной частицы в разных детекторах одного телескопа лежит в основе эффективно применяемого для системы КТТ метода идентификации типа частиц и для проверки корректности энергетической калибровки. Гистограммы сравнения ионизационных потерь в разных детекторах позволяют хорошо разделить протоны и дейтроны. Для четкого формального разделения частиц по типам был выбран так называемый PID критерий, основанный на эмпирическом правиле, что для тяжелых медленных частиц (протон, дейтрон) средняя длина пробега в веществе пропорциональна величине их начальной кинетической энергии, в степени 1.76 ± 0.01 . В диссертации подробно описан сам метод, в приложении к конкретной конструкции КТТ, проанализированы возможные ошибки с использованием как расчётов по программным пакетам, так и результатов измерения опорной реакции упругого рассеяния протонов на дейтронах. PID метод обеспечил простой и надежный критерий идентификации остановленных протонов и дейтронов, а также факта пролета частицы всех детекторов КТТ. Таким образом, в данной главе было показано, что величина около 1% является тем принципиальным пределом, к которому можно приблизиться для используемой в эксперименте системы КТТ. Это ограничение задаётся многократным кулоновским рассеянием частиц в веществе детекторов. Экспериментально также продемонстрировано, что наряду с определением значений кинетической энергии продуктов реакции, измерения энергии частиц обеспечивают высокоточную независимую идентификацию протонов и дейтронов.

В четвёртой главе диссертации дано описание процедур калибровки и анализа данных каналов измерения времени в КТТ и их связи с измерением энергии. В главе подробно рассматриваются возможности для измерения времени, используемых в КТТ, специализированных многоканальных микросхем первичной обработки сигналов, описана лабораторная калибровка радиоактивными источниками временных каналов электроники до монтажа КТТ в экспериментальную установку. Для лабораторных условий разработана методика и выполнены оценки разрешающей способности измерения времени в КТТ для каждой из специализированных микросхем: определена зависимость ошибки (стандартного отклонения) опорной временной метки от её амплитуды; измерено смещение положения пика временных отметок от амплитуды регистрируемого сигнала. Проведённые лабораторные исследования позволили предложить оптимальную комбинацию двух вариантов применяемой в системе электроники и обеспечить значительное улучшение характеристик КТТ. Полученные, по измерениям в лабораторных условиях, характеристики КТТ были использованы в программе GEANT для моделирования эксперимента ANKE. Моделирование эксперимента показало, что при таких характеристиках системы возможна идентификация протонов и дейтронов в исследуемых в эксперименте реакциях по обычной время - пролётной методике. Однако при проведении реального эксперимента эти надежды не оправдались. Разделить протоны и дейтроны по данной методике не удалось. К сожалению в диссертации нет анализа причин этому факту, которые могут быть в систематических ошибках время – пролётного метода в условиях конкретного эксперимента. В диссертации предложен другой способ определения типа частиц - по измерению времени дрейфа заряда в полупроводниковом кремниевом детекторе при остановке частицы в этом детекторе. Новый метод был подробно проанализирован расчётным путём, и его работоспособность была продемонстрирована на экспериментальных данных эксперимента ANKE. Данный метод использует измерение разницы между двумя временными метками, вырабатываемыми электроникой в результате прихода образованных частицей зарядов на разные стороны детектора. Было показано, что при соответствующей настройке электроники эта разница фактически составляет промежуток времени между моментом попадания частицы в детектор (начало собирания заряда на переднюю сторону детектора) и моментом прихода заряда от места остановки частицы в детекторе. Данная информация определяет длину пробега частицы в детекторе, корреляция которой с измеренной КТТ либо отдельным детектором величиной энергии частицы и обеспечивает идентификацию типа частицы.

В пятой главе диссертации рассматривается процедура восстановления координат треков, связь получаемых пространственных данных о треках с измерениями в КТТ системе энергиями частиц, даётся описание используемого в эксперименте метода восстановления вершины реакции по

парам реконструированных треков. Процедура построения трека частицы реакции включает в себя определение углов вылета частицы и вершины взаимодействия. Определение углов вылета было использовано для того, чтобы, располагая информацией об энергии идентифицированной частицы, восстанавливать величину импульса малоэнергетических продуктов реакций, регистрируемых КТТ системой. Информация о вершине взаимодействия позволила обеспечить необходимую точность определения импульса частиц при помощи магнитного спектрометра ANKE для летящих вперед быстрых продуктов реакций. Кроме того, реконструкция треков реакций дала возможность значительно подавить фон и измерять профиль пучка в накопительной ячейке газовой мишени, что было использовано в эксперименте при настройке пучка и для юстировки рабочей области газовой мишени. Используемый в работе метод реконструкции угловых параметров треков позволил получить точность восстановления угловых параметров близкую к теоретическому пределу. Для события с регистрацией в КТТ двух продуктов от одной реакции был применён новый для данного эксперимента метод, в котором вершина взаимодействия определяется как геометрическое место точек наибольшего сближения двух треков в координатном пространстве. Для быстрой обработки событий используется аналитическое стереометрическое решение. Было подтверждено экспериментально, что разработанный метод позволяет определять координаты вершины с точностью единиц миллиметров, а в поперечной плоскости он улучшает точность восстановления координат вершины взаимодействия ещё на порядок.

В шестой главе диссертации, основываясь на достигнутых успехах, повышения точности определения характеристик продуктов реакций в экспериментах на установке ANKE, описанных в диссертации, рассматриваются возможности расширения программы экспериментальных исследований реакций взаимодействия протонов и дейтронов с использованием КТТ на ускорителях COSY и FAIR. В диссертации рассматривается текущее состояние дел, по исследуемым на установке ANKE реакциям с поляризованными пучками протонов и поляризованными дейтериевыми мишенями, где изучаются поперечные сечения реакций и коэффициенты спиновых корреляций. Малоэнергетические протоны, включающие в себя спектаторный протон от развала дейтрона, при этом регистрируются системой КТТ, а быстрые улетающие вперед продукты реакций – спектрометром ANKE. Проводится моделирование ряда реакций в экспериментальной установке. Показано, что достигнутые высокие аппаратные характеристики системы КТТ способны обеспечить не только решение тех задач, которые ставились при разработке системы, но и улучшить точность определения кинематических параметров продуктов реакций до качественно нового уровня. В результате, появилась возможность решения самостоятельных задач изучения спинового нуклон-нуклонного взаимодействия, таких как измерение дифференциальных сечений и

анализирующих способностей реакций с регистрацией КТТ системой пары низкоэнергетичных, менее 100 МэВ, протонов. Одновременно с проведением этих исследований, программа изучения рп-взаимодействия может быть расширена, путём изучения малоуглового упругого рассеяния протонов на дейтронах. Показано, что результаты экспериментальных и модельных оценок точности измерения и области определения характеристик реакций позволяют говорить о пригодности разработанных методов для расширенной научной программы, без доработки экспериментальной аппаратуры.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Актуальность и новизна полученных результатов не вызывает сомнения. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, в том числе из списка ВАК. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Следует особо отметить научно-практическую значимость данной работы. Полученные результаты, несомненно, будут и далее использованы при проведении экспериментальных исследований по физике ядерных взаимодействий и элементарных частиц при низких энергиях.

Диссертация не содержит серьёзных смысловых погрешностей, написана ясно и достаточно полно отражает содержание проделанной работы.

Признавая, безусловно, высокий уровень работы в целом, имеется ряд замечаний:

1. Общее замечание – название диссертации не полностью отражает суть представленного к защите материала. Диссертация охватывает значительно более широкую область исследований и разработок, а не только высокоточное определение импульсов продуктов реакций рп – взаимодействия.
2. На ряде рисунков есть несоответствие в обозначениях: на рисунках - обозначения английскими символами, а в подписях и тексте – буквами русского алфавита (см., например, рис.3.1-рис.3.10 и т.д.).
3. Стр.33. Выбор калибровочной функции отклика (3.1) в виде полинома 4-й степени не подтверждается качеством фита (χ^2 , NDF). Поэтому выглядит несколько произвольным.
4. Стр.42. В диссертации нет обоснования, почему пороги для отбора хитов по энерговыделению выбраны 3σ (нижний) и 5σ (верхний).
5. Стр.68. Отсутствует рис.3.30, тогда как в тексте диссертации он обсуждается.

В целом диссертация Леонтьева Владимира Викторовича является законченным исследованием, выполнена на хорошем уровне и свидетельствует о высокой квалификации автора, защищаемые положения и выводы являются полностью обоснованными.

Диссертация удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор, Леонтьев Владимир

Викторович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук
главный научный сотрудник ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

А.П. Воробьёв

«10» января 2017 г.

Подпись А.П. Воробьёва удостоверяю

Учёный секретарь ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»



Н.Н. Прокопенко

Александр Павлович Воробьёв

Доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.

Федеральное государственное бюджетное учреждение

Государственный научный центр Российской Федерации

Институт физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт»,

главный научный сотрудник Отдела экспериментальной физики

142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1

телефон: (4967) 713289

e-mail: vorobiev@ihep.ru