

ОТЗЫВ

официального оппонента Голубкова Дмитрия Юрьевича
на диссертационную работу Леонтьева Владимира Викторовича
**“Высокоточное восстановление импульса малоэнергетических продуктов
рп-взаимодействия в области энергий единиц ГэВ микростриповыми детекторами”**,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация посвящена развитию основанной на микростриповых детекторах системы Кремниевых Трековых Телескопов (КТТ), разработанной и проверенной в рамках эксперимента ANKE (ускоритель COSY в Юлихском исследовательском центре, Германия) и исследованию перспектив применения такой системы в экспериментах по низкоэнергичному нуклон-нуклонному рассеянию. Основной упор в работе сделан на достижение максимально возможных энергетического и временного разрешения системы, разработку прецизионных методов восстановления треков протонов и дейтронов низких энергий и методах их идентификации.

Многоканальные кремниевые полупроводниковые детекторы широко применяются в современных экспериментах по физике атомного ядра и элементарных частиц. **Тема работы является актуальной**, поскольку диссертационная работа посвящена развитию методики применения микростриповых полупроводниковых детекторов, повышению их характеристик и разработке прецизионной детектирующей системы на их основе.

Автором были разработаны методы прецизионной калибровки системы КТТ, приближающие разрешение к аппаратному пределу (для протонов с кинетической энергией в 1-40 МэВ было достигнуто энергетическое разрешение $\sim 1\%$). Отдельно следует отметить разработку метода измерения времени в системе КТТ, позволившего достичь чрезвычайно малого для полупроводниковых детекторов временного разрешения ~ 0.5 нс (!). Используя полученное впечатляющее временное разрешение, был разработан метод идентификации остановленных внутри детектора протонов и дейтронов по корреляции измеренной детектором энергии с длиной пробега частицы, измеренной по разности между временами прихода сигнала на разные стороны тонкого полупроводникового детектора.

Достижение процентной точности энергетического разрешения для низкоэнергичных продуктов взаимодействия при достаточно хорошем угловом разрешении системы КТТ, является важным условием для успешного осуществления экспериментом ANKE физической программы по исследованиям спинового нуклон-нуклонного взаимодействий в области энергий порядка нескольких ГэВ. Таким образом, **практическая полезность** проделанной работы **не вызывает сомнения**.

Научная новизна работы заключается в комбинировании стандартной “электронной” калибровки тестовыми импульсами с лабораторной калибровкой микростриповых детекторов при помощи альфа-источника а также с данными опорной реакции (упругого рассеяния дейтронов на протонах). Разработанный в диссертации метод восстановления начальной энергии частиц позволил значительно расширить границы высокоточного измерения энергии низкоэнергичных частиц системой КТТ. Также разработанный метод измерения времени в системе КТТ позволил получить в лабораторных условиях рекордное для полупроводниковых детекторов временное разрешение. Кроме того, в работе обосновывается возможное расширение физической программы эксперимента ANKE, в частности, демонстрируется возможность решения самостоятельных задач спиновой физики,

таких как измерение дифференциальных сечений и анализирующих способностей на примере реакций $pd \rightarrow pp(n)$, $pd \rightarrow pp(\Delta^0)$ с регистрацией системой КТТ пары низкоэнергичных протонов с кинетическими энергиями < 100 МэВ.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели работы, её научная новизна и научно-практическая значимость, перечисляются положения, выносимые на защиту, описывается личный вклад диссертанта и приводится список конференций, на которых автором были представлены материалы работы.

Первая глава содержит краткое описание ускорителя COSY (COoler Cychnotron) и эксперимента ANKE (The Apparatus for Studies of Nucleon and Kaon Ejectiles), в рамках которого была разработана и испытана описываемая в работе система КТТ. Первоначально при разработке системы КТТ ставились задачи измерения степени поляризации пучка ускорителя, контроля светимости, а также определения положения вершины реакции. Основными требованиями к системе КТТ являлось восстановление треков низкоэнергичных частиц, их идентификация и прецизионное измерение энергии. Описанная в диссертации работа посвящена дальнейшему развитию данной системы, улучшению её характеристик и исследованию возможностей для расширения научной программы ANKE с применением системы КТТ.

Во второй главе описывается устройство системы КТТ, плат считывающей электронники и съёма данных, описываются процедуры проверки работоспособности микростриповых детекторов и электронных плат, а также настройка электронных плат и контроль стабильности их работы.

Следует отметить, что по результатам тестирования детекторов при помощи α -источника (как сказано в конце раздела 2.2.1), «результаты вместе с вольт-амперными характеристиками были предоставлены разработчику, компании Micron Semiconductor. Эти данные были основой для последующих обсуждений по улучшению технологии производства следующих поколений детекторов для системы КТТ». Улучшение технологии производства является **заметным научно-практическим вкладом** (пусть и побочным в рамках данной работы) в развитие технологии изготовления микростриповых детекторов, что можно отнести к перечню **научно-практической значимости работы**.

В третьей главе подробно, в мельчайших деталях описывается процедура энергетической калибровки системы и реализованный dE/E метод идентификации частиц при помощи КТТ. Для достижения прецизионной точности измерения энергии микростриповыми детекторами, была разработана комбинация электронной калибровка при помощи серии тестовых импульсов и лабораторных исследований с применением двух различных α -источников (^{241}Am и ^{244}Cm). Использование комбинации источников с различающимися энергиями позволило учесть влияние обнаруженного в ходе работы двухуровневого нечувствительного слоя на поверхности кремниевых детекторов (с разницей толщины между уровнями в ~ 1 мкм, что приводило к расщеплению квази-моноэнергетической линии источника ~ 160 кэВ) и достичь разрешения ~ 30 кэВ для α -частиц с энергией ~ 5 МэВ, что для кремниевых микростриповых детекторов является очень хорошим результатом. Детально был проанализирован вклад различных источников в энергетическое разрешение. Проведена коррекция перекрёстных наводок между каналами и коррекция сдвига базовой линии.

На данных эксперимента ANKE, используя информацию с предварительно откалиброванной системы переднего детектора (ANKE FD) и связь между кинематическими параметрами реакции упругого рассеяния дейтронов на протонах, была выполнена абсолютная энергетическая привязка системы КТТ. Показано, что достигнутая относительная точность восстановления начальной энергии протонов составляет $\sim 1-2\%$, что уже вплотную подходит к пределу, который может быть в принципе достижим для данной конфигурации детекторов

и электроники.

После проведения энергетической калибровки системы КТТ, для неё был реализован метод идентификации частиц, основанный на корреляции между измерениями энергии в отдельных детекторах системы КТТ. В реализованном методе использовалась эмпирическая параметризация зависимости средней длины пробега тяжелых медленных частиц в веществе от их начальной энергии. На экспериментальных данных было продемонстрировано, что при использовании данного метода система КТТ обеспечивает качественную идентификацию остановленных протонов и дейтронов (и, судя по рис. 3.26, возможно также и тритонов) и отделение остановленных в детекторе частиц от пролётных.

Четвертая глава подробно описывает процедуры калибровки каналов измерения времени и их связи с измерением энергии. Были проведены лабораторные исследования при помощи радиоактивных альфа- и бета-источников. Это позволило изучить и скомпенсировать влияние ряда эффектов, таких как зависимость момента выработки временной метки от амплитуды входящего сигнала, поверхностные эффекты распределения заряда в детекторах и дифференциальные нелинейности считывающей электроники. В результате работы по улучшению характеристик системы была достигнута точность измерения времени микростриповым детектором ~ 0.5 нс. Используя достигнутое высокое временное разрешение был разработан метод идентификации типа частицы по информации с одиночного детектора, в котором она была остановлена. Метод использует измерение разницы между временными метками сигналов с разных сторон детектора, по которой определяется длина пробега частицы в детекторе. В свою очередь, корреляция длины пробега остановленной в детекторе частицы с измеренной детектором энергией обеспечивает идентификацию типа частицы. Разработанный метод идентификации низкоэнергичных частиц прошел успешную проверку на эксперименте ANKE.

В пятой главе описывается процедура реконструкции треков частиц и определения точки взаимодействия пучка с мишенью. Информация о вершине требуется, по крайней мере, для обеспечения необходимой точности определения импульса при помощи магнитного спектрометра ANKE для летящих вперед быстрых продуктов реакции. Также реконструкция треков вносит вклад в подавление фона и позволяет сканировать профиль пучка в накопительной ячейке газовой мишени. Кроме того, как будет далее показано в главе 6, реконструкция треков системой КТТ позволяет проводить с её помощью самостоятельные физические измерения.

На основе экспериментальных данных, было измерено угловое разрешение для треков, восстановленных КТТ. Полученные величины углового разрешения ($\sigma_\theta \sim 1.1^\circ$, $\sigma_\phi \sim 2.6^\circ$) оказались близки к пределам, определяемым величиной шага считывания использованных детекторов (оцененным при помощи моделирования).

При восстановлении вершин реакций по пересечениям одиночных треков с плоскостью пучка, было показано, что погрешность восстановления профиля пучка находится на уровне одного-двух миллиметров. Для восстановления вершины взаимодействия по парам зарегистрированных КТТ треков, был разработан метод, использующий аналитическое решение системы линейных уравнений. Экспериментально продемонстрировано, что уже при использовании одного телескопа системы КТТ, данный метод обеспечивает миллиметровую точность событийной реконструкции вершины взаимодействия.

Шестая глава посвящена изучению возможности решения самостоятельных задач по исследованию спинового нуклон-нуклонного взаимодействия, таких как измерение дифференциальных сечений и анализирующих способностей реакций $pd \rightarrow pp(n)$, $pd \rightarrow pp(\Delta^0)$ с регистрацией системой КТТ пары низкоэнергичных (< 100 МэВ) протонов, а также проводить измерение малоуглового упругого рассеяния $pd \rightarrow pd$ с регистрацией низкоэнергичных дейтронов (в том числе для измерения поляризации мишени).

Описаны результаты экспериментальных и модельных оценок точности измерения и области определения кинематических параметров. Показано, что достигнутые высокие аппаратные характеристики системы КТТ способны обеспечить проведение рассмотренных экспериментальных измерений.

В заключении формулируются основные результаты, полученные диссертантом.

Замечания по представленной работе следующие:

1) в гл. 1 эксперимент ANKE описан очень коротко, без упоминания физической программы;

2) в разделе 3.1.1 (стр. 39) упомянуто, что при калибровке альфа-источником для сегментов с номером > 86 угол наклона треков оказался слишком велик, что искажало форму спектра. Но из описания осталось неясным, что именно было сделано для оставшихся каналов: проведён новый набор данных с изменённым положением источника или заданы средние значения для данного детектора, ввиду их малого разброса, показанного на рис 3.7?

3) в гл. 4 (стр. 98) рисунок 4.24 повторяет рис 3.31 со стр. 68 — на глаз разделение между остановленными и пролётными протонами согласно рис. 4.23 должно тянуться почти вплоть до 30 МэВ (как это и упомянуто на стр. 97);

4) в гл. 5 (стр. 102) присутствует терминологически не совсем корректная формулировка: «существуют несколько факторов, приводящих к тому, что реальный трек это не прямая линия. Одним из факторов является кулоновское многократное рассеяние частицы в материале стенки накопительной ячейки мишени и в детекторах...» Общепринято, что трек - это след частицы в детекторе, поэтому в данном контексте вместо «трек» правильнее было бы говорить «траектория», т. к. стенка накопительной ячейки находится до точки первого измерения;

5) в гл. 5 (стр. 109) из текста остаётся неясным, как в одотрековом случае было оценено разрешение по Z . Сказано, что «Погрешность при восстановлении координаты Z как следует из рис. 5.8.б, менее сантиметра», однако на рис 5.8.б показан только Y -профиль взаимодействия пучка с мишенью и стенками; про Z -погрешность можно сделать вывод только по 5.8.а, где при 60 мм по-видимому видна торцевая стенка накопительной мишени;

6) в гл. 6 (стр. 113) при утверждении о том, что «... исследования реакций вида $pd \rightarrow p_{\text{spec}} K^+ X$ способны предоставить необходимые экспериментальные данные для определения длины рассеяния нуклон-гиперон $n\Lambda$ », было бы желательно дать соответствующую ссылку (хотя бы на работу [4]).

В тексте встречаются отдельные стилистические неточности и опечатки. Общая беда современного профессионального языка — англицизмы, напр., «на ANKE эксперименте», «КТТ электроника», «печатная плата с VA32TA2 микросхемами» - скорее всего кальки с английского, по-русски обычно говорят «на эксперименте ANKE» и т. п.; также «референсная реакция» (стр. 55) - по русски - «контрольная» или «опорная». В то же время, ещё не устоявшийся но удобный термин «хит» для обозначения точки срабатывания в детекторе, введён безупречно.

Упомянутые выше отдельные замечания не отражаются на основном содержании и не влияют на общую высокую оценку диссертации. Результаты, представленные в диссертации, имеют несомненную **научную и практическую ценность**, они достоверны и заслуживают самой **высокой оценки**.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации **твёрдо обоснованы**, подкреплены детальными экспериментальными исследованиями и не вызывают сомнений в своей правильности. **Достоверность** работы подтверждается согласием результатов, полученных независимыми методами в ходе лабораторных исследований и в ходе экспериментов на установке ANKE (а также согласуются с результатами моделирования при помощи стандартных пакетов).

В заключение, **на основе изучения диссертации и публикаций автора по теме диссертации**, хотелось бы ещё раз отметить высокое качество представленного для защиты материала. Работа выполнена добротнo, с тщательной проработкой и описанием всех существенных деталей. Текст диссертации написан простым, ясным языком, работа хорошо структурирована (в том числе загромождающие изложение результаты различных проверок вынесены в объёмные приложения).

Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Все основные результаты работы своевременно опубликованы в известных российских и зарубежных рецензируемых журналах, а также доложены автором на международных и российских конференциях и семинарах.

Считаю, что диссертация полностью **соответствует требованиям ВАК**, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её **автор**, Владимир Викторович Леонтьев, **безусловно заслуживает** присвоение учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Д.Ю. Голубков

Подпись официального оппонента **заверяю**
Учёный секретарь



В.В. Васильев

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики» (НИИЦ «КИ» ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»)

20 января 2017 г.