

На правах рукописи

БУЗЫКАЕВ Алексей Рафаилович

**РАЗРАБОТКА ЧЕРЕНКОВСКИХ СЧЁТЧИКОВ
АШИФ ДЛЯ ДЕТЕКТОРА КЕДР**

**01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ОНУЧИН
Алексей Павлович — доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, профессор.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЛУБСАНДОРЖИЕВ
Баярто Константинович — доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник,

ЛИТВИНЕНКО
Анатолий Григорьевич — доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна, старший научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ: — Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино.

Защита диссертации состоится « 20 » _____ декабря 2017 г.

в « 16 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « 18 » _____ октября 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П. А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В экспериментах по физике элементарных частиц задача идентификации типа частицы всегда остаётся актуальной. Наличие специализированной системы идентификации частиц в эксперименте КЕДР делает возможным расширить программу исследований в области энергии ψ - и Υ -мезонов по изучению свойств частиц, содержащих тяжёлые кварки и определяющихся свойствами сильного взаимодействия.

Достигнутые параметры качества разделения π - и K -мезонов в рабочем диапазоне импульсов на системе идентификации, разработанной для детектора КЕДР по уникальной схеме АШИФ, находятся на уровне лучших в мире систем идентификации частиц в экспериментах на встречных пучках.

Цель работы. Основной целью работы была разработка и создание системы идентификации на основе аэрогелевых черенковских счетчиков АШИФ для детектора КЕДР и проведение необходимых для этого исследований.

Личный вклад автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании системы счетчиков АШИФ детектора КЕДР, её проверке как на прототипах, так и в составе детектора. Он является соавтором универсальной программы моделирования светосбора LSE, явившейся основным инструментом проведённых работ. Им также разработан метод измерения длины поглощения света в аэрогеле.

Научная новизна работы. Создана система идентификации частиц на основе аэрогелевых черенковских счетчиков, построенных по оригинальной схеме АШИФ, предложенной и разработанной в ИЯФ СО РАН. Получены первые результаты по качеству идентификации частиц системы в условиях детектора КЕДР.

Впервые при разработке системы аэрогелевых счетчиков для моделирования светосбора был применён метод Монте-Карло. Использование этого метода стало возможным благодаря универсальной программе моделирования LSE, в разработку которой автор внёс существенный вклад.

Впервые был предложен и реализован новый метод измерения длины поглощения света в аэрогеле, которая определяет светосбор в счётчиках с диффузным собиранием света.

Научная и практическая ценность результатов. В последующей серии экспериментов с детектором КЕДР установленная и введенная в

эксплуатацию система счетчиков АШИФ позволит измерять вероятности распадов Ψ - и Υ -мезонов, идентифицируя π - и K -мезоны в конечном состоянии. Методические наработки и технологии, появившиеся при разработке системы, могут быть использованы при проектировании систем регистрации частиц для новых детекторов и модернизации уже существующих в разных научных центрах: ИЯФ СО РАН (Новосибирск), ОИЯИ (Дубна), ИФВЭ (Протвино), ИЯИ (Москва) и за рубежом: J-Lab (США), CERN (Швейцария – Франция), ИФВЭ АН КНР (Пекин, Китай) и уже использованы при разработке системы идентификации детектора СНД.

Универсальные детекторы в экспериментах со встречными пучками заряженных частиц — это, как правило, сложные и дорогостоящие установки, предназначенные для проведения экспериментов в течение десяти и более лет. Одной из основных задач при проектировании аэрогелевых черенковских счётчиков является точное определение величины световых выходов от пролёта заряженной частицы, задающего качество идентификации. Возможным решением является изготовление большого количества прототипов счётчиков с дорогостоящими фотоприёмниками и прямого измерения этой величины на них. Использование компьютерного Монте-Карло моделирования позволило ускорить процесс проектирования и значительно сократить затраты на исследовательское оборудование и производство системы.

Благодаря разработанному автором методу надёжного измерения длины поглощения света в аэрогеле впервые был получен аэрогель с рекордной длиной поглощения и созданы счётчики с высоким качеством идентификации частиц.

В настоящее время оптические параметры аэрогеля, производимого в Новосибирске, являются одними из лучших в мире. Он используется в детекторах СНД на ВЭПП-2000, КЕДР на ВЭПП-4М и AMS-02 на Международной космической станции.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Разработка универсальной программы моделирования светосбора методом Монте-Карло в сложных оптических системах с учётом переизлучения фотонов, названная LCE.
- 2) Разработка оригинального метода измерения длины поглощения света в аэрогеле с использованием программы LCE.
- 3) Оптимизация конструкции счётчиков АШИФ для детектора КЕДР на основе переизлучателя ВВQ и ФЭУ с микроканальными пластинами и мультищелочным фотокатодом.

- 4) Подтверждение высокого качества идентификации системы счётчиков АШИФ в составе детектора КЕДР.
- 5) Оптимизация конструкции системы счётчиков АШИФ для детектора СНД, где с её помощью удалось провести прецизионное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в области энергии от 1050 до 2000 МэВ.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на конференциях и симпозиумах: СHER-97 (г. Берлин, 1997); ISA-5 (г. Монпелье, Франция, 1997); INSTR-99 (КЕК, Tsukuba, Япония, 1999); INSTR-02 (ИЯФ, г. Новосибирск, 2002); на сессиях-конференциях секции ядерной физики ОФН (ИТЭФ, г. Москва, 2004, МИФИ г. Москва, 2012); на международной конференции X Pisa Meeting (Isola del ELba, Италия, 2006); INSTR08 (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, 2008); INSTR14 (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, 2014); XIII Pisa Meeting (Isola del ELba, Италия, 2015); на экспериментальных семинарах ИЯФ СО РАН.

Исследования поддержаны грантами РФФИ: № 96-02-19379, № 97-02-18516, № 97-03-32471а, № 99-02-16712-а (1999-2001), № 02-02-16321-а (2002-2004), № 05-02-16798-а (2005-2007).

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, из них 8 – в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Объём диссертации составляет 86 страниц, из которых 8 страниц занимает список литературы, состоящий из 67 наименований. В диссертации были использованы 58 иллюстраций и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе представлен обзор аэрогелевых черенковских пороговых счётчиков в экспериментах на встречных пучках. Рассмотрены как реализованные системы идентификации, так и проработанные, но не осуществлённые проекты.

Во второй главе описываются основные подходы и принципы, лежащие в основе программы Монте-Карло моделирования LCE, разработанной с существенным участием автора. Рассмотрены основные физические процессы, влияющие на световой выход в аэрогелевом черенковском счётчике — ламбертовское отражение от стенок, закон Френеля на границе двух сред, взаимодействие фотона с веществом: рассеяние, поглощение, переизлучение. Теоретически обоснован и описан принятый в LCE алгоритм моделирования фотона.

Третья глава посвящена разработке метода АШИФ (Аэрогель ШИФтер Фотоумножитель) при построении черенковских счётчиков. Суть метода заключается в использовании для увеличения светосбора переизлучателей света, выполненных в виде световодов, присоединённых к фотоумножителю. Проведено сравнение с методом прямого сбора света, в котором фотоумножитель присоединён к аэрогелю.

Рассмотрены методы измерения оптических характеристик аэрогеля: показателя преломления, длины рассеяния и поглощения. При проектировании счётчиков с диффузным собиранием света выделена задача, определяющая светосбор, — измерение длины поглощения света в аэрогеле. Обоснован и подробно описан метод измерения длины поглощения в аэрогеле, приведены результаты измерений и сравнение аэрогеля, произведённого в г. Новосибирске совместно Институтом Катализа СО РАН с ИЯФ СО РАН, с аэрогелем, использованном в японском центре физики высоких энергий КЕК для детектора Belle.

Описаны основные технические требования к фотоумножителям для построения системы аэрогелевых черенковских счётчиков для детектора КЕДР. Рассмотрены сеточные ФЭУ производства НАМАМАТСУ и ФЭУ с микроканальными пластинами (МКП) производства АООТ «Катод» г. Новосибирск. Приведены результаты измерения относительного коэффициента усиления в зависимости от величины магнитного поля и угла поворота оси ФЭУ к его направлению, а также зависимость коэффициента сбора фотоэлектронов от напряжения между фотокатодом и МКП.

Рассмотрены переизлучатели производства НИИ Полимеров имени В.А. Каргина (г. Дзержинск), разработанные совместно с ИЯФ СО РАН на основе органического стекла «плексиглас» (полиметилметакрилат) с добавлением различных сместителей спектра. Определена методика измерения основных параметров готовых изделий — шифтеров. Эти параметры пригодны для сравнения качества шифтеров между собой и моделирования шифтеров в программе LCE. Приведено сравнение переизлу-

чателей, оптимизированных для квантовой эффективности ФЭУ с бищелочным и мультищелочным фотокатадами.

В этой же главе рассмотрены диффузные отражатели, устанавливаемые на внутренних стенках, оптимальные для использования в пороговых аэрогелевых счётчиках. Приведено сравнение различных типов и толщин отражателей в виде коэффициента отражения в зависимости от длины волны. Обоснованно использование пористого тефлона (PTFE) производства компании Tetratex.

В четвёртой главе рассмотрен проект аэрогелевых счётчиков для детектора ВаВаг. Группой сотрудников из ИЯФ с участием автора была предложена и доведена до прототипа четырёхслойная система аэрогелевых счётчиков для торцевой (forward) части детектора. Прототип был протестирован на выведенном пучке в ЦЕРНе. Было показано, что можно получить около 10 фотоэлектронов от заряженной релятивистской частицы и достичь уровня разделения π - и K -мезонов около 3.5σ . Моделирование на LSE подтвердило полученные результаты. Это было первое сравнение эксперимента с моделированием на LSE, показавшее успешность используемого подхода.

В пятой главе описан универсальный детектор КЕДР, который был разработан и построен в ИЯФ СО РАН для проведения экспериментов на коллайдере ВЭПП-4М со встречными электрон-позитронными пучками в области энергий $2\div 11$ ГэВ в системе центра масс. В состав детектора КЕДР, изображённого на рисунке 1, входят следующие системы: вакуумная камера, вершинный детектор, дрейфовая камера, аэрогелевые черенковские счётчики, сцинтилляционные счётчики, калориметр на основе жидкого криптона, торцевой CsI-калориметр и мюонная система, встроенная в ярмо сверхпроводящей магнитной катушки с полем 0.6 Т. Детектор также включает систему регистрации рассеянных электронов для исследования двухфотонных процессов. Для оперативного измерения светимости используются два калориметра, состоящие из чередующихся пластин сцинтилляционной пластмассы и свинца, регистрирующие γ -кванты однократного тормозного излучения и находящиеся по обе стороны от места встречи.

Основными особенностями детектора КЕДР являются:

- Жидкокриптоновый калориметр со стриповой структурой, предложенный и разработанный в ИЯФ, который позволяет измерять координату точки конверсии фотона с энергией 100 МэВ с точностью около 1 мм, что на порядок точнее, чем получают на кристаллических калориметрах.

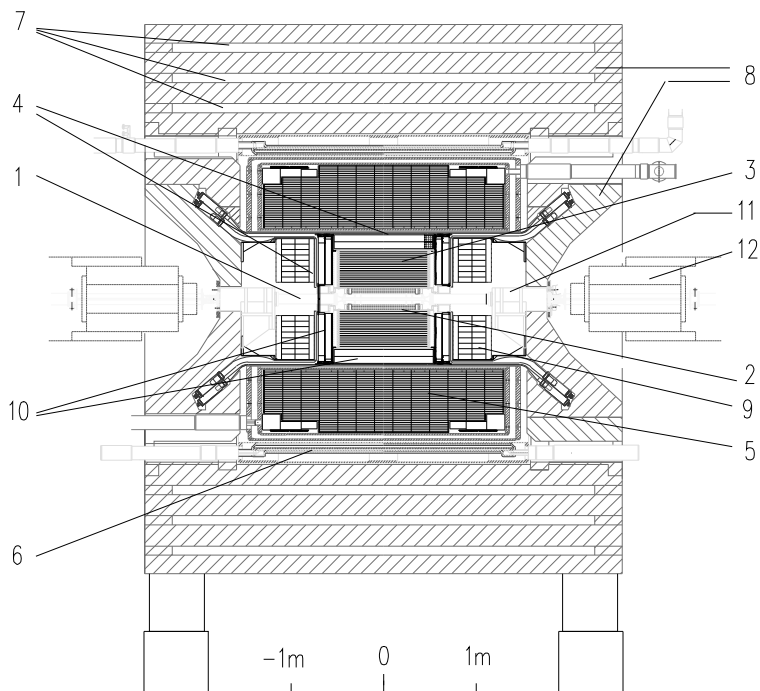


Рис. 1. Схема детектора КЕДР (продольный разрез).

Обозначения: 1 – вакуумная камера, 2 – вершинный детектор, 3 – дрейфовая камера, 4 – время-пролётная система, 5 – цилиндрический LKг калориметр, 6 – обмотка магнита, 7 – мюонная система, 8 – ярмо магнита, 9 – торцевой CsI калориметр, 10 – аэрогелевые черенковские счётчики, 11 – компенсирующий соленоид, 12 – элементы магнитной системы коллайдера ВЭПП-4М.

- Система регистрации рассеянных электронов под малыми углами вылета, предложенная и разработанная в ИЯФ, для изучения двухфотонных процессов.
- Система идентификации частиц на основе черенковских счётчиков АШИФ (Аэрогель ШИФтер Фотоумножитель), предложенных в ИЯФ в 1992 году. Она позволяет разделять π - и K -мезоны на уровне $\sim 4\sigma$ в области импульсов от 600 до 1500 МэВ/с.

Шестая глава содержит подробное описание системы счётчиков АШИФ для детектора КЕДР (см. рисунок 2). Приведены основные требования к системе. Обоснован выбор показателя преломления 1.05 требованием идентификации π - и K -мезонов в диапазоне от 600 до 1500 МэВ/с, тип переизлучателя, его размеры, расположение его на фотокатоде, размеры счётчиков и расположение в них шифтеров (см. рисунок 3 и рисунок 4).

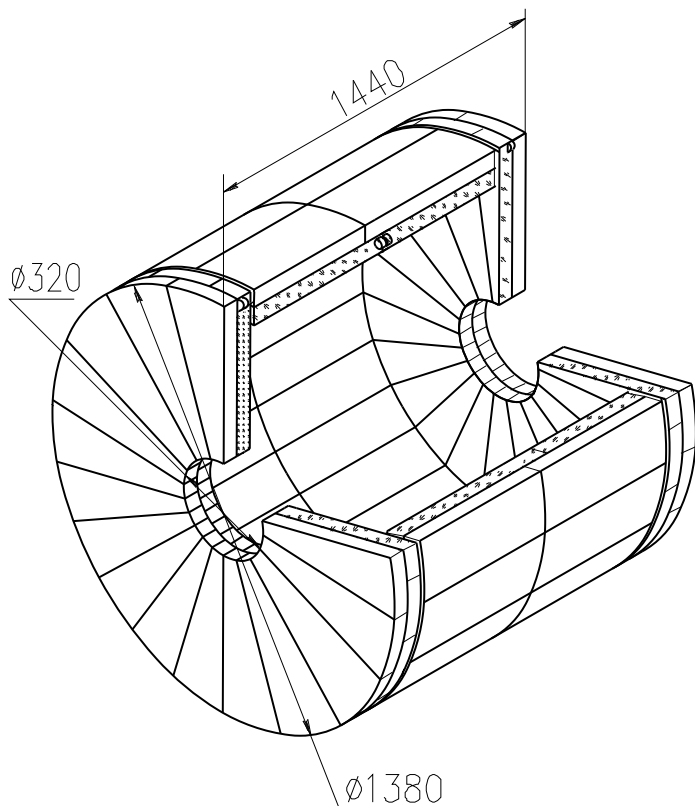


Рис. 2. Вид системы аэрогелевых черенковских счётчиков для детектора КЕДР.

Использование переизлучателей предоставило дополнительную свободу при проектировании системы счётчиков. Благодаря высокому коэффициенту сбора света на шифтеры, по сравнению с прямым светосбором на

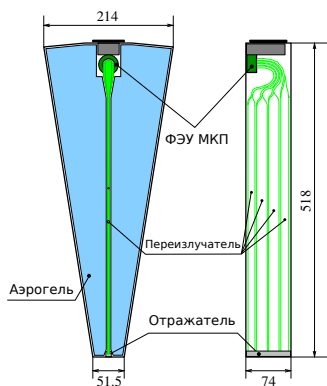


Рис. 3. Схема торцевого счётчика для детектора КЕДР.

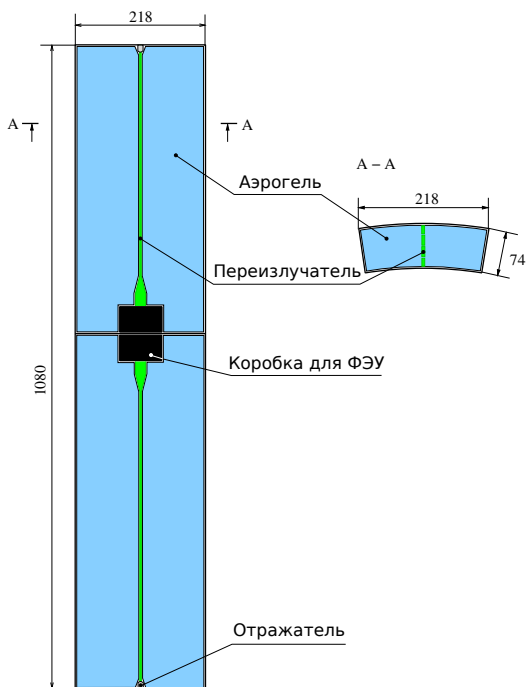


Рис. 4. Схема двух баррельных счётчиков для детектора КЕДР, совмещённых в одном корпусе.

фотокатод ФЭУ, можно делать плоские и тонкие счётчики. При попадании частицы в шифтер возможность её идентификации исчезает. Этот недостаток был преодолен за счёт использования двух слоёв счётчиков так, что при прохождении частицы в одном слое не через аэрогель (световод, фотоприёмник, электронику или стык двух соседних счётчиков), во втором слое на треке этой частицы находился бы точно аэрогель. При этом учитывался радиус поворота в магнитном поле, так что даже частица с минимальным импульсом (600 МэВ/с) проходит без попадания в шифтер хотя бы в одном из слоёв счётчиков. Такая «герметичность» важна в условиях, когда нужно обеспечить высокую эффективность к π -мезонам, поскольку их количество в несколько раз превышает количество К-мезонов. При этом в значительном числе случаев частица может быть

идентифицирована в обоих слоях, что существенно улучшает качество идентификации.

Описан вариант системы на основе ФЭУ Hamamatsu R6150 с бищелочным фотокатодом и переизлучателя КН-18, обозначенный как «синий» вариант, который был доведён до прототипа и проверен на выведенном пучке в ЦЕРНе. В детекторе был реализован вариант с ФЭУ с МКП с мультищелочным фотокатодом и шифтером на основе переизлучателя ВВQ, обозначенный как «зелёный». На рисунке 2 показан общий вид системы АШИФ. Конструкция торцевого и баррельного счётчиков представлена на рисунке 3 и рисунке 4. Полная система из двух слоёв в сборе представляет собой 160 счётчиков и содержит около 1000 литров аэрогеля. Метод АШИФ позволил на порядок уменьшить суммарную площадь фотокатодов по сравнению с вариантом системы счётчиков с прямым светосбором.

Торцевые счётчики (см. рисунок 3) были проверены на космических частицах и на выведенном пучке из протонного синхротрона ОИЯИ с энергией 10 ГэВ в г. Дубна. Результаты показали высокое качество идентификации для разделение π - и К-мезонов с импульсом 1.2 ГэВ/с: коэффициент подавления π -мезонов – 1300 при 90% эффективности регистрации К-мезонов, что соответствует разделению на уровне 4.5σ для систем с гауссовой формой параметра разделения.

В составе детектора было проверено качество идентификации с использованием космических мюонов, где в качестве π - и К-мезонов использовались мюоны с той же скоростью. Поскольку каждая частица пересекает два слоя системы, можно рассматривать следующие комбинации для определения эффективности идентификации:

- «И» – одновременное срабатывание в обоих слоях.
- «Или» – срабатывание хотя бы в одном слое.
- «Сумма» – срабатывание считается исходя из суммарной амплитуды по обоим слоям.

Зависимость от импульса для эффективности регистрации К-мезонов и для вероятности ложной идентификации π -мезонов приведена на рисунке 5.

Сравнение с системами идентификации других детекторов представлено в таблице 1: система идентификации Belle, также построенная на основе аэрогеля, время-пролётная система детектора BES-III, который работает в данное время в той же области энергии, что и детектор КЕДР,

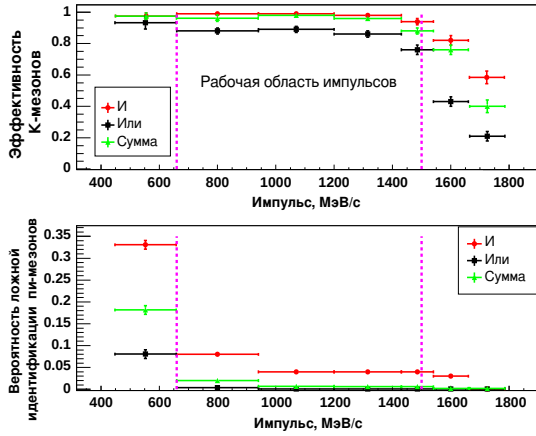


Рис. 5. Зависимость от импульса для эффективности регистрации К-мезонов и для вероятности ложной идентификации π -мезонов. Показаны три случая использования обоих слоёв системы: для случаев «И» и «Или» был выбран порог в 0.5 фотоэлектрона, а для случая «Сумма» – 2.0 фотоэлектрона. Вертикальные пунктирные линии соответствуют порогам черенковского излучения в аэрогеле для π - и К-мезонов.

и система DIRC детектора BaBar, которая считается образцом систем идентификации частиц.

Таблица 1. Сравнение степени разделения (PID) систем идентификации детекторов Belle, BES-III и КЕДР в двух точках по импульсу: 0.9 и 1.2 ГэВ/с.

| Система идентификации | Импульс, ГэВ/с | | | | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|---------------|---------------------|---------------------------|---------------|
| | 0.9 | | | 1.2 | | |
| | ε_K , % | $1 - \varepsilon_\pi$, % | PID, σ | ε_K , % | $1 - \varepsilon_\pi$, % | PID, σ |
| BES-III ToF | 97 | 10 | 3.2 | 90 | 16 | 2.3 |
| Belle ACC | 92±2 | 7±1.5 | 2.9±0.1 | 86±2 | 7±1.5 | 2.6±0.1 |
| BaBar DIRC | 98.5 | 0.4 | 4.8 | 99.2 | 1.3 | 4.6 |
| КЕДР АЧС «И» | 99±1 | 5.2±0.4 | 4.0±0.2 | 98.5±1 | 2.5±0.3 | 4.1±0.2 |
| КЕДР АЧС «Или» | 91±2 | 0.5±0.1 | 3.9±0.1 | 89.5±2 | 0.09±0.07 | 4.4±0.2 |
| КЕДР АЧС «Сумма» | 96±2 | 2.1±0.3 | 3.8±0.2 | 96.5±1 | 0.6±0.1 | 4.3±0.1 |

Обозначения: ε_K – эффективность регистрации К-мезонов, $1 - \varepsilon_\pi$ – вероятность ложной идентификации для π -мезонов.

В седьмой главе рассматривается система счётчиков АШИФ для детектора СНД, который работает на коллайдере ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН. Проектирование данной системы было произведено с учётом опыта разработки счётчиков АШИФ для детектора КЕДР. В частности, был использован тот же переизлучатель (шифтер), ФЭУ с МКП и внутреннее светоотражающее покрытие – тефлон (PTFE).

Детектор представляет в своей основе сферический трёхслойный калориметр на основе NaI(Tl). Внутренний диаметр сферы составляет около 350 мм, где наряду с дрейфовой камерой размещается система аэрогелевых черенковских счётчиков, покрывающая около 60% телесного угла из места встречи (см. рисунок 6).



Рис. 6. Размещение системы аэрогелевых черенковских счётчиков (АШИФ) в детекторе СНД.

Система счётчиков АШИФ представляет собой цилиндр с внутренним радиусом 106 мм, разделённый на 9 счётчиков. Толщина каждого счётчика равна 31 мм, а длина – 226 мм (см. рисунок 7). Одна полоска шифтера толщиной 3 мм проходит через весь счётчик и присоединяется к ФЭУ с МКП. Столь тонкая система идентификации (35 мм) стала возможной только благодаря использованию метода АШИФ.

Экспериментально достигнуто разделение π - и К-мезонов на уровне 3σ , а также коэффициент подавления e/K до 4400 при эффективности регистрации события K^+K^- на уровне 80% для аэрогеля с $n=1.13$. Для аэрогеля с $n=1.05$ коэффициент подавления e/μ достигает 500 при эффективности регистрации события e^+e^- 95.5%.

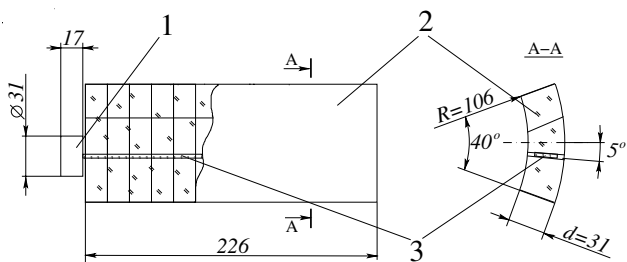


Рис. 7. Схема счётчика детектора СНД. Обозначения: 1 – фотоумножитель, 2 – аэрогель, 3 – переизлучатель.

В 2015–2016 годах были получены результаты обработки эксперимента с использованием данной системы. В частности, с её помощью удалось провести прецизионное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в области энергии от 1050 до 2000 МэВ.

В заключении приведены основные научные результаты работы, выносимые на защиту:

- 1) Впервые разработана универсальная программа моделирования светосбора методом Монте-Карло в сложных оптических системах с учётом переизлучения фотонов, названная LCE.

Она использовалась для расчёта основных параметров счётчиков АШИФ, предложенных в Институте ядерной физики в 1992 году.

- 2) Разработан оригинальный метод измерения длины поглощения света в аэрогеле с использованием программы LCE.

Применение этого метода позволило освоить технологию производства аэрогеля с большой длиной поглощения, определяющей коэффициент светосбора в счётчиках с диффузным сбором света.

В настоящее время оптические параметры аэрогеля, производимого в Новосибирске, являются одними из лучших в мире. Он используется в детекторах СНД на ВЭПП-2000, КЕДР на ВЭПП-4М и AMS-02 на Международной космической станции.

- 3) Оптимизирована конструкция счётчиков АШИФ для детектора КЕДР на основе переизлучателя ВВQ и ФЭУ с микроканальными пластинами и мультищелочным фотокатодом.

Система состоит из 160 счётчиков, расположенных в два слоя, и содержит 1000 литров аэрогеля. Метод АШИФ позволил на порядок

уменьшить суммарную площадь фотокатодов по сравнению с вариантом системы счётчиков с прямым светосбором.

В 2000 году проведено испытание торцевого счётчика на выведенном пучке в Дубне. Измеренное число фотоэлектронов согласуется с расчётным значением.

Разделение π - и K -мезонов при импульсе 1.2 ГэВ/с составляет 4.5σ .

- 4) С 2013 года система счётчиков АШИФ работает в составе детектора КЕДР. Впервые определено качество идентификации двухслойной системы АШИФ.

С помощью космических мюонов найдена степень разделения π - и K -мезонов. При импульсе 1.2 ГэВ/с уровень разделения составляет 4σ , что выше уровня разделения на время-пролётной системе детектора BES-III, на аэрогелевой системе детектора Belle и сравнимо с системой DIRC детектора BaBar.

- 5) С помощью программы LCE произведён расчёт светосбора счётчиков АШИФ для детектора СНД. На основании расчёта была оптимизирована конструкция системы счётчиков. В результате удалось создать счётчики с рекордно малой толщиной, необходимой для установки в детекторе. Система счётчиков АШИФ используется в экспериментах с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000 с 2009 года. В частности, с её помощью удалось провести прецизионное измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в области энергии от 1050 до 2000 МэВ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1) A.G. Shamov, A.R. Buzykaev.
LCE, Light collection efficiency simulation tool // Proceedings, 9th International Conference on Computing in High-Energy Physics (CHEP 1997). Berlin, 1997. April. URL: <http://www.ifh.de/CHEP97/paper/212.ps>.
- 2) A. Onuchin, A. Shamov, Yu. Skovpen et al.
The Aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and phototubes // Nucl. Instr. and Meth. 1992. Vol. A315. P. 517-520.
- 3) A. R. Buzykaev, S. F. Ganzhur, E. A. Kravchenko et al.
Measurement of optical parameters of aerogel // Nucl. Instr. and Meth. 1999. Vol. A433. P. 396-400.

- 4) F. Giovacchini, коллаборация AMS-02.
Performance in space of the AMS-02 RICH detector // Nucl. Instr. and Meth. 2014. Vol. A766. P. 57-60.
- 5) M.Yu. Barnykov, A.R. Buzykaev, A.F. Danilyuk et al.
Development of aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and phototubes // Nucl. Instr. and Meth. 1998. Vol. A419, P. 584-589.
- 6) A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al.
ASHIPH counters for the KEDR detector // Nucl. Instr. and Meth. 2002. Vol. A494, no. 1-3. P. 424-429.
- 7) A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al.
Operation and performance of the ASHIPH counters at the KEDR detector // Nucl. Instr. and Meth. 2016. Vol. A824. P. 79-82.
- 8) K. I. Beloborodov, M. Y. Barnykov, A. R. Buzykaev et al.
Development of threshold aerogel Cherenkov counters ASHIPH for the SND detector // Nucl. Instr. and Meth. 2002. Vol. A494, no. 1-3. P. 487-490.
- 9) Achasov, M. N. ..., A. R. Buzykaev et al.
Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \mathbf{K}^+\mathbf{K}^-$ cross section in the energy range $\sqrt{s} = 1.05 - 2.0$ GeV // Phys. Rev. 2016. Vol. D94, no. 11. P. 112006.

БУЗЫКАЕВ Алексей Рафаилович

**Разработка черенковских счётчиков АШИФ для детектора
КЕДР**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 06.10.2017 г.

Подписано в печать 09.10.2017 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.