

Аэрогелевые черенковские детекторы в экспериментах на встречных пучках

А.Ф. Данилюк, С.А. Кононов, Е.А. Кравченко, А.П. Онучин

Рассмотрено применение аэрогелевых черенковских детекторов в экспериментах на встречных пучках. Такие детекторы используются для идентификации заряженных частиц в диапазоне скоростей, где другие методы не эффективны. Дано описание технологии производства аэрогеля и методов измерения его оптических параметров. Приведены данные о пороговых счётчиках с прямым светосбором и со сбором света с помощью переизлучателя спектра. Представлены данные о детекторах черенковских колец с однослойным и с многослойным фокусирующим аэрогелевым радиатором.

Ключевые слова: встречные пучки, идентификация частиц, черенковское излучение, черенковские детекторы, аэрогель

PACS numbers: 29.20.D-, 29.40.Ka, 33.20.Fb, **81.07.-b**

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505k.0540

Содержание

1. Введение. Излучение Вавилова – Черенкова (540).
 2. Аэрогель (541).
 - 2.1. Технология производства аэрогеля.
 - 2.2. Основные параметры аэрогеля.
 3. Аэрогелевые пороговые черенковские счётчики (542).
 - 3.1. Аэрогелевые черенковские счётчики с прямым светосбором.
 - 3.2. Аэрогелевые черенковские счётчики АШИФ.
 4. Детектор черенковских колец с аэрогелевыми радиаторами (545).
 5. Заключение (547).
- Список литературы (547).

А.Ф. Данилюк. Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 5, 630090 Новосибирск, Российская Федерация;
Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: danilyuk@catalysis.ru

С.А. Кононов, Е.А. Кравченко. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск, Российская Федерация;

Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: S.A.Kononov@inp.nsk.su, E.A.Kravchenko@inp.nsk.su

А.П. Онучин. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск, Российская Федерация;
Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация;
Новосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса 20, 630073 Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: A.P.Onuchin@inp.nsk.su

Статья поступила 1 марта 2015 г.

1. Введение. Излучение Вавилова – Черенкова

Излучение Вавилова – Черенкова — это излучение, возникающее в среде в случае, когда заряженная частица движется со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде. Излучение было открыто П.А.Черенковым в 1934 г. и исследовано им под руководством С.И. Вавилова [1–3]. Теория излучения была разработана И.Е. Таммом и И.М. Франком [4] в 1937 г. В 1958 году П.А. Черенков, И.Е. Тамм и И.М. Франк были удостоены Нобелевской премии по физике "за открытие и истолкование эффекта Черенкова".

Рассмотрим основные характеристики излучения.

- Фотоны излучаются под углом Θ относительно направления движения частицы. Так как среда имеет дисперсию показателя преломления, угол излучения различен для разных длин волн излучаемого света. Черенковский угол определяется формулой

$$\cos \Theta(\lambda) = \frac{1}{\beta n(\lambda)}, \quad (1)$$

где $\beta = v/c$ (v — скорость частицы), $n(\lambda)$ — показатель преломления среды, λ — длина волны излучённого фотона.

- Интенсивность и спектр излучения описываются формулой

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha z^2 \sin^2 \Theta(\lambda) \frac{1}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где N — число излучённых фотонов, x — расстояние, z — заряд частицы, $\alpha \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры.

Таблица 1. Квантовая эффективность фотонного детектора в максимуме QE_{\max} и коэффициент N_0 ($LC = 1$)

Фотокатод	QE_{\max} , %	N_0 , см ⁻¹
Бищелочной с боросиликатным окном (Hamamatsu)	24	150
Мультищелочной с боросиликатным окном (Hamamatsu)	19	104
GaAs(Cs)	31	190
Кварцевый ФЭУ (ЗАО ЦПТА*)	42	165

* Закрытое акционерное общество "Центр перспективных технологий и аппаратуры" (Москва).

• Среднее число зарегистрированных фотонов черенковского излучения N_{pe} зависит от коэффициента сбора фотонов на фотодетектор $LC(\lambda)$ и эффективности регистрации (квантовой эффективности) фотонного детектора $QE(\lambda)$:

$$\frac{dN_{pe}}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \int LC(\lambda) QE(\lambda) \sin^2 \theta(\lambda) \frac{1}{\lambda^2} d\lambda. \quad (3)$$

Формулу (3) удобно записать в виде

$$\frac{dN_{pe}}{dx} = z^2 N_0 \sin^2 \bar{\theta}, \quad (4)$$

где введён параметр

$$N_0 = 2\pi\alpha \int \frac{LC(\lambda) QE(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda,$$

а угол $\bar{\theta}$ рассчитан для некоторой эффективной длины волны. В таблице 1 представлены значения N_0 для некоторых типов фотонных детекторов при $LC = 1$ [5].

• Черенковское излучение линейно поляризовано, степень поляризации 100 %. Вектор электрического поля лежит в плоскости, в которой находятся вектор скорости частицы и волновой вектор излучения.

• Черенковское излучение практически не имеет времени высвечивания. Длительность вспышки излучения определяется временем пролёта частицы через радиатор и временем сбора света на фотонный детектор.

2. Аэрогель

Аэрогель — это классический наноматериал, который представляет собой пористое вещество с размером пор, меньшим длины волны света в видимом диапазоне. Наиболее широко распространены аэрогели диоксида кремния, хотя известны и аэрогели на основе оксидов металлов, углерода, желатина и других веществ.

Аэрогель диоксида кремния имеет сложную структуру. Он состоит из сфер аморфного кварца диаметром несколько нанометров, соединённых в цепочки, образующие хаотическую трёхмерную конструкцию. Размер пор 20–100 нм. Поры аэрогеля заполнены воздухом. Плотность аэрогеля диоксида кремния может варьироваться в широких пределах, от 0,003 до 0,7 г см⁻³.

Первые аэрогели были получены в 1931 г. Стивеном Кистлером [6]. Вот как он описывает основной принцип производства аэрогеля: "Очевидно, что, для того чтобы получить аэрогель, надо заменить жидкость внутри геля воздухом с помощью каких-нибудь методов, при которых не образуется разделительной поверхности жидкость–воздух. В условиях, когда жидкость постоянно

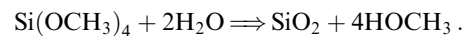
находится под давлением, большим, чем давление насыщенных паров, и температура повышается, жидкость при достижении критической температуры перейдёт в газ, не находясь в двух фазах состояния ни в какой момент времени".

Описанный выше процесс называется сверхкритической сушкой. Данный этап является критическим звеном в технологии производства аэрогеля. Если сушку проводить при нормальных условиях, то при образовании границы раздела жидкость–пар внутри пор аэрогеля возникающие капиллярные силы вызовут сильную усадку геля и приведут к деформациям и растрескиванию блока. В результате получится непрозрачный продукт с неоднородной плотностью — ксерогель.

2.1. Технология производства аэрогеля

Кратко опишем основные этапы производства аэрогелей.

1. *Синтез алкогеля.* Первые аэрогели для черенковских детекторов производили по "одностадийной" технологии. Алкогель синтезируется при взаимодействии тетраметоксисилана с водой. В результате реакции образуются кремнезём и спирт:



Во время реакции в гомогенном растворе тетраметоксисилана, воды и катализатора в метиловом спирте образуются частицы золя нерастворимого диоксида кремния диаметром в несколько нанометров. Эти частицы по мере накопления взаимодействуют между собой с образованием разветвлённой структуры твёрдой фазы, которая заполняет весь объём. В порах геля остаётся растворитель, образовавшийся в ходе реакции спирт, присутствуют также остатки воды и катализатора. Визуально это наблюдается как превращение жидкого раствора в твёрдое тело — гель. Плотность производимого аэрогеля регулируется концентрацией алкоксида кремния в исходном растворе.

Дальнейший прогресс в синтезе аэрогелей связан с развитием так называемой двухстадийной методики [7]. В этом случае вместо тетраметоксисилана используется смесь олигомеров алкоксидного производного. На предварительной стадии проводится синтез олигомеров при реакции алкоксида кремния (тетраметоксисилана или тетраэтоксисилана) с недостаточным количеством воды в условии кислотного катализа. Переход к двухстадийной технологии производства обусловил значительное улучшение прозрачности аэрогелей.

2. *Старение.* Целью данного этапа является подготовка алкогеля к удалению растворителя. Во время старения происходят укрепление структуры алкогеля и некоторая усадка геля по размеру. Периодически производится замена спирта для удаления из алкогеля воды и катализатора.

3. *Сверхкритическая сушка.* Удаление органического растворителя из алкогеля для получения аэрогеля производится в автоклаве в сверхкритических для используемого растворителя условиях. Для спиртов сверхкритические температуры превышают 240 °С при давлениях выше 60 атм. Это наиболее сложный и ответственный этап производства аэрогеля, его длительность составляет несколько суток.

Для получения аэрогеля используют также так называемую низкотемпературную сверхкритическую сушку.

Для этого алкоголь в автоклаве под давлением промывают сжиженным углекислым газом для замещения им растворителя. Затем проводят сверхкритическую сушку CO_2 (критические параметры $T_{\text{cr}} = 31^\circ\text{C}$, $P_{\text{cr}} = 73$ атм). Низкотемпературная сверхкритическая сушка используется для производства гидрофобных аэрогелей.

4. *Отжиг*. Полученный аэрогель отжигается на воздухе при температурах 400–600 °С для удаления спиртовых групп, химически связанных с поверхностью аэрогеля, органических примесей и воды с целью повышения прозрачности.

2.2. Основные параметры аэрогеля

Показатель преломления. Зависимость показателя преломления от плотности можно описать формулой $n^2 = 1 + \alpha\rho$, где ρ — плотность. Чаще всего значение показателя преломления приводится для длины волны 400 нм. Для аэрогеля, производимого в Новосибирске, $\alpha = 0,44 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ [8]. Данная формула применима для плотностей в диапазоне от 0,05 до 0,6 г см^{-3} . В некоторых случаях используется упрощённая формула: $n = 1 + k\rho$. В этом случае для обычных SiO_2 -аэрогелей производители приводят значение k от 0,21 до 0,25 $\text{см}^3 \text{ г}^{-1}$ [9, 10]. Для гидрофобного аэрогеля значение k изменяется от 0,25 до 0,30 $\text{см}^3 \text{ г}^{-1}$ [11]. Данное различие объясняется тем, что гидрофобный аэрогель содержит значительное количество триметилсилоксильных групп. Дисперсия показателя преломления для SiO_2 -аэрогеля была измерена группой из Университета Милана [12].

Длина рассеяния света. Как сказано выше, аэрогель состоит из наносфер аморфного кварца. Этот факт определяет физическую природу рэлеевского рассеяния света в аэрогеле. В связи с тем что длина поглощения света в аэрогеле гораздо больше длины рассеяния, значение последней может быть получено из измерений прозрачности блока аэрогеля в параллельном пучке света:

$$T(\lambda) = A \exp\left(-\frac{d}{L_{\text{sc}}(\lambda/400)^4}\right) = A \exp\left(-\frac{Cd}{\lambda^4}\right), \quad (5)$$

где d — толщина образца, λ — длина волны света в нанометрах, L_{sc} — длина рассеяния света для $\lambda = 400$ нм, A — коэффициент рассеяния на поверхности блока. В некоторых работах вместо длины рассеяния приводится коэффициент C (clarity). Длина рассеяния света в современных аэрогелях обычно составляет 35–50 мм на длине волны 400 нм.

Длина поглощения света. Величина длины поглощения света имеет важное значение для разработки пороговых аэрогелевых черенковских счётчиков. Метод точного измерения длины поглощения света в аэрогеле был разработан в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) [9, 13, 14]. Идея метода состоит в том, что, измерив светосбор в тестовом объёме с аэрогелем и без него, можно восстановить длину поглощения света в аэрогеле с помощью расчёта по методу Монте-Карло, основываясь на данных по конфигурации тестового объёма, длине рассеяния света в аэрогеле и коэффициенту отражения света на внутренней поверхности тестового объёма. Для описания процессов светосбора была использована специальная программа, разработанная в ИЯФ СО РАН [13, 15–17]. Результаты измерений длин поглощения света в аэрогеле SAN-96,

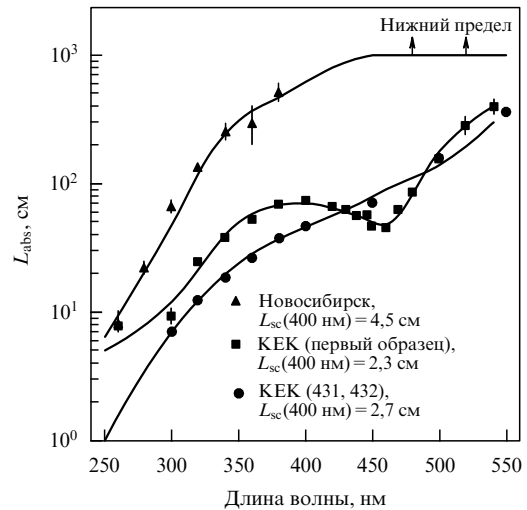


Рис. 1. Длина поглощения света в аэрогелях, произведённых в Новосибирске (SAN-96) и в КЕК.

произведённом в Новосибирске, и в гидрофобном аэрогеле производства Национальной лаборатории физики высоких энергий (Koh Ene Ken — КЕК) (Япония) представлены на рис. 1.

3. Аэрогелевые пороговые черенковские счётчики

Рассмотрим использование пороговых черенковских счётчиков для идентификации частиц в экспериментах на встречных пучках. В таких экспериментах чаще всего требуется идентифицировать (разделить) пионы и каоны. Физические основы данного метода заключаются в следующем.

- Определение импульса частицы. Импульс измеряется трековой системой по искривлению трека частицы в магнитном поле.

- Частицы с разной массой при одинаковом импульсе движутся с разной скоростью. Так как черенковское излучение в среде имеет пороговую зависимость от скорости, существуют диапазоны импульсов частиц, в которых более лёгкая частица излучает, а более тяжёлая — не излучает. Пороговый импульс возникновения черенковского излучения в веществе с показателем преломления n для частицы массой m определяется формулой $P_{\text{thr}} = mc/\sqrt{n^2 - 1}$. Регистрация вспышки в детекторе или отсутствие таковой позволяют идентифицировать частицу, сделав выбор между двумя массовыми гипотезами. На рисунке 2 представлена зависимость интенсивности черенковского излучения от импульса для пионов и каонов в среде с показателем преломления 1,05.

- Достоверность идентификации частиц в пороговых черенковских счётчиках зависит от эффективности регистрации "лёгкой" частицы, которая движется со скоростью выше пороговой, и от допороговой эффективности регистрации "тяжёлой" частицы, которая движется со скоростью ниже пороговой.

В пороговых черенковских счётчиках для регистрации света чаще всего используются высокоэффективные фотоэлектронные умножители (ФЭУ), способные регистрировать вспышки малой интенсивности, вплоть до одного фотона. Эффективность регистрации определяется сред-

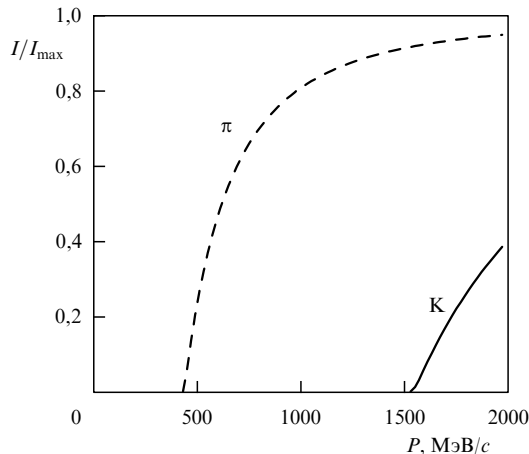


Рис. 2. Зависимость интенсивности черенковского излучения от импульса для пионов и каонов в среде с показателем преломления 1,05.

ним числом зарегистрированных фотонов N_{pe} от частицы и условием, налагаемым на амплитуду регистрируемого сигнала. Если порог регистрации мал, то эффективность регистрации одиночных фотоэлектронов близка к 100 %, а если светосбор достаточно однороден, то эффективность регистрации частицы составляет $\varepsilon = 1 - \exp(-N_{pe})$.

Допороговая эффективность регистрации зависит от нескольких эффектов. Приведём основные из них:

1) образование δ -электронов частицей как в самом черенковском счётчике, так и в веществе перед ним. Скорость рождённого δ -электрона может быть выше пороговой, и в этом случае он излучает сам;

2) сцинтилляции от частицы как в самом радиаторе, так и в отражателе;

3) наличие черенковского света из отражателя. Диффузный отражатель имеет показатель преломления, как у твёрдых веществ, и чаще всего более высокий, чем у материала радиатора в счётчике;

4) присутствие темновых шумов ФЭУ.

В диапазоне импульсов до 600 МэВ/с пионы и каоны идентифицируют по измерению времени пролёта с помощью сцинтилляционных счётчиков или по измерению плотности ионизации в трековой системе. Для разделения пионов и каонов при импульсах выше 600 МэВ/с можно использовать пороговые черенковские счётчики. В этом случае в качестве радиатора излучения требуется применять вещество с пороговым импульсом пионов в диапазоне 400–500 МэВ/с, что соответствует показателю преломления 1,035–1,060. В природе при нормальных условиях таких веществ практически не существует. Показатель преломления света в жидкостях и твёрдых веществах превышает 1,3. Показатель преломления газов при атмосферном давлении не выше 1,002. В качестве радиатора излучения в пороговом счётчике можно использовать газы под давлением [18, 19]. Такие счётчики имеют серьёзные недостатки: большое количество вещества, техническая сложность, повышенные требования к безопасности эксплуатации. Для сравнения в табл. 2 приведены показатели преломления и пороговые импульсы пионов и каонов для разных веществ, используемых в качестве радиатора излучения в пороговых черенковских счётчиках.

Единственным веществом, которое обладает требуемым показателем преломления света, является аэрогель.

Таблица 2. Показатели преломления и пороговые импульсы пионов и каонов для различных веществ

Вещество	n	P_{π} , МэВ/с	P_K , МэВ/с
Плавленый кварц	1,458	132	465
Вода	1,33	159	563
Фреон 114, 1 атм	1,0014	2640	9330
CO ₂ , 1 атм	1,00043	4760	16800
CO ₂ , 10 атм	1,0043	1500	5320
C ₂ H ₄ , 25 атм	1,02	700	2460
Аэрогель	1,13–1,007	265–1180	940–4165

Использовать аэрогель в качестве радиатора излучения в пороговом счётчике впервые предложили М. Cantin с соавторами [10] в 1974 г.

3.1. Аэрогелевые черенковские счётчики с прямым светосбором

Конструкция аэрогелевых счётчиков определяется оптическими свойствами аэрогеля. Длина рассеяния света в аэрогеле, которая составляет несколько сантиметров, значительно меньше размеров счётчика. Это определяет выбор диффузного способа сбора света на фотодетектор при разработке счётчиков. Аэрогелевый счётчик с прямым светосбором представляет собой наполненный аэрогелем объём, просматриваемый ФЭУ. Внутренняя поверхность объёма покрыта диффузным отражателем. Светосбор в такой системе определяется коэффициентом диффузного отражения от стен R , отношением площади фотодетектора к полной внутренней поверхности объёма $k = S_{ph}/S_{\Sigma}$, длинами поглощения и рассеяния света в аэрогеле. При отсутствии поглощения и рассеяния коэффициент сбора света можно оценить как $LC = k/[1 - R(1 - k)]$. Наиболее сильно коэффициент сбора света зависит от длины поглощения света. В связи с этим именно качество аэрогеля (большая длина поглощения света) определяет размеры и конструкцию черенковского счётчика. Зависимость сбора света от длины рассеяния света слабая.

На встречных e^+e^- -пучках аэрогель впервые использовался в эксперименте TASSO (Two Arm Spectrometer SOlenoid) на ускорителе PETRA (Positron-Electron Tandem Ring Accelerator) [20]. В детекторе использовался аэрогель с показателями преломления 1,020–1,026 в объёме 2000 л. Счётчики с прямым светосбором имели большой размер — $0,35 \times 1,0 \times 1,5$ м³. Для регистрации света в каждом из 32 счётчиков было установлено шесть ФЭУ диаметром 5 дюймов (RCA Quantacon). Данные ФЭУ не могли работать в магнитном поле детектора, и поэтому они устанавливались достаточно далеко от аэрогеля — места излучения. Среднее число зарегистрированных фотонов от релятивистской частицы равнялось 3,9. Данный проект показал возможность крупномасштабного использования аэрогеля в черенковских счётчиках.

Следующий крупномасштабный проект разработки системы пороговых аэрогелевых черенковских счётчиков связан с разработкой универсального детектора "Кедр" для проведения экспериментов на коллайдере ВЭПП-4М ВЭПП — встречные электрон-позитронные пучки) в ИЯФ СО РАН в Новосибирске. В ходе данных работ было разработано несколько проектов системы счётчиков. В первом проекте системы предполагалось использовать прямой светосбор на расположенные рядом с

аэрогелем два ФЭУ [21]. Так как система располагалась внутри детектора в области сильного магнитного поля, планировалось применение микросеточных ФЭУ фирмы Hamamatsu (Япония). Показатель преломления используемого в счётчиках аэрогеля равен 1,035. Был создан и испытан прототип счётчика: амплитуда сигнала от релятивистской частицы составила 6,3 фотоэлектрона [15]. Полное число ФЭУ в данном проекте — 360. Однако этот проект не был принят в связи с его высокой стоимостью.

При разработке детектора ВаВаг для экспериментов на В-фабрике в SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) (США) было предложено использовать аэрогелевые пороговые счётчики для идентификации частиц в торцевой области детектора. Для обеспечения разделения пионов и каонов в диапазоне импульсов от 0,6 до 4 ГэВ/с предполагалось создать двухслойную систему с показателями преломления слоёв 1,05 и 1,007. Группами из США, Италии, Франции и России было разработано несколько проектов системы [22]. Прототипы счётчиков с прямым сбором света на ФЭУ были успешно протестированы на пучке в ЦЕРНе (Швейцария) [23–25]. Во всех прототипах было зарегистрировано более 10 фотоэлектронов от релятивистской частицы.

Ярким примером применения аэрогеля в черенковских счётчиках является система идентификации детектора Belle на В-фабрике в КЕК [26]. В данном детекторе использовался гидрофобный аэрогель с показателями преломления от 1,01 до 1,028. Полный объём аэрогеля составил 2000 л. Толщина системы в баррельной части детектора равнялась 30 см. Для регистрации черенковского света в счётчиках с прямым светосбором применялись сеточные фотоумножители диаметром от 51 до 76 мм производства фирмы Hamamatsu. Число ФЭУ составляло 1800. Характерный размер счётчиков $12 \times 12 \times 12$ см³. Величина амплитуды сигнала от релятивистской частицы в счётчиках варьировалась от 10 до 30 фотоэлектронов в зависимости от показателя преломления аэрогеля в счётчике и его расположения. Высокий световыход в счётчиках обеспечил хорошую достоверность π/K -идентификации в эксперименте — на уровне $2,6\sigma$ — при импульсе 1,2 ГэВ/с [27].

3.2. Аэрогелевые черенковские счётчики АШИФ

В 1992 г. в ИЯФ СО РАН был предложен новый тип пороговых аэрогелевых черенковских счётчиков, названных авторами АШИФ (аэрогель — шифтер — фотоумножитель) [13]. Черенковский свет собирается на переизлучатель-световод (шифтер). Световод изготовлен из плексигласа, в котором содержится переизлучатель ВВQ (7H-benzimidazo[2,1-a]benz[de]isoquinoline-7-one). Этот переизлучатель имеет узкий спектр излучения с максимумом на длине волны 500 нм. Черенковские фотоны поглощаются и переизлучаются с эффективностью, близкой к 100%. Примерно половина излучённых фотонов попадает в условия полного внутреннего отражения и транспортируется к фотоумножителю, который расположен на конце световода, на противоположном конце стоит диффузный отражатель. Коэффициент светосбора на шифтер в данном случае достаточно велик, так как шифтер, который располагается недалеко от точки излучения, имеет большую боковую поверхность. Длина поглощения переизлучённого света составляет несколько десятков сантиметров, в связи с чем продольный размер счётчика может достигать 50 см.

В качестве фотонных детекторов используются ФЭУ на основе микроканальных пластин, которые промышленно производятся в Новосибирске [28]. Диаметр фотокатода 18 мм, тип фотокатода — мультищелочной. Данный тип фотокатода хорошо согласуется со спектром излучения переизлучателя. Отличительной особенностью этого фотоумножителя является слабая чувствительность к магнитному полю. Так, в продольном магнитном поле величиной 15 кГс коэффициент усиления уменьшается всего в два раза.

3.2.1. Система АШИФ детектора "Кедр". Система АШИФ детектора "Кедр" состоит из 160 счётчиков, расположенных в двух слоях [29–34]. Полная толщина системы 14 см. Геометрия и расположение счётчиков выбраны таким образом, чтобы при прохождении частицы через шифтер в одном слое она пересекала второй слой в "рабочей" области — только через аэрогель. В 80% случаев частица пересекает оба слоя в "рабочей" области, что значительно повышает качество идентификации. В детекторе используется 1000 л аэрогеля с показателем преломления 1,05. Аэрогель с рекордно большими длинами поглощения и рассеяния света производился по двухстадийной технологии [35, 36].

Отметим, что метод АШИФ позволил на порядок уменьшить суммарную площадь фотокатода фотоумножителей по сравнению с таковой в проекте системы с прямым светосбором. Это существенно снизило стоимость системы черенковских счётчиков.

При разработке счётчиков АШИФ успешно применялось моделирование методом Монте-Карло для расчёта сбора черенковского света на шифтеры и оптимизации конструкции счётчиков. Конструкции торцевого и баррельного счётчиков представлены на рис. 3. Прототипы счётчиков были успешно протестированы на пучке адронов в Объединённом институте ядерных исследований (Дубна). Число зарегистрированных фотоэлектронов от пионов с импульсом 1,2 ГэВ/с равно 9, коэффициент подавления пионов равен 1300, допороговая эффективность регистрации каонов — 10%. Это соответствует разделению π - и K -мезонов в детекторе на уровне $4,5\sigma$ [29].

Система АШИФ в полном объёме была установлена в детектор в 2013 г. В настоящее время система работает по программе экспериментов с детектором "Кедр" [37].

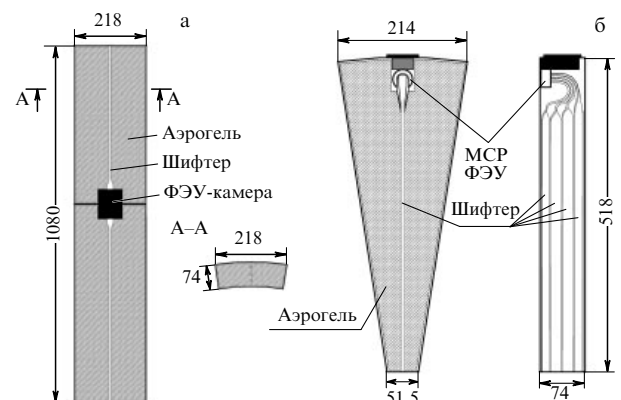


Рис. 3. Конструкция баррельного (а) и торцевого (б) счётчиков АШИФ детектора "Кедр". МСП — Micro-Channel Plate (микроканальная пластина). Размеры даны в миллиметрах.

3.2.2. Система АШИФ сферического нейтрального детектора (СНД). Метод АШИФ был использован при создании системы идентификации детектора СНД [38–41]. Для идентификации пионов и каонов с энергиями до 1 ГэВ были разработаны черенковские счётчики АШИФ с показателем преломления аэрогеля 1,13. Такой аэрогель был получен методом спекания при температуре порядка 1000 °С из аэрогеля с показателем преломления 1,05. Всего в системе АШИФ детектора СНД содержится девять счётчиков, полный объём аэрогеля 6 л. Толщина счётчиков 30 мм, длина 230 мм. Создание системы с такими малыми габаритами оказалось возможным только при использовании метода АШИФ. Система успешно работает с 2009 г. Амплитуда сигнала от релятивистских частиц равна 6–8 фотоэлектронам.

4. Детектор черенковских колец с аэрогелевыми радиаторами

Если измерить угол черенковского излучения, то точность определения массы частицы (идентификация) будет выше, чем в пороговых счётчиках. Идея такого детектора впервые была предложена А. Roberts [42] в 1960 г. и развита J. Seguinot и Т. Ypsilantis [43] в 1977 г. Данные детекторы получили название Ring Imaging Cherenkov detector (RICH). В русскоязычной научной литературе при описании таких детекторов используются термины ДЧК (детектор черенковских колец) или РИЧ (транслитерация от RICH).

Принцип работы детектора РИЧ заключается в следующем: частица, пролетая через радиатор с конечной толщиной, рождает черенковские фотоны; на выходе из радиатора фотоны распространяются вдоль поверхности конуса и регистрируются координатным фотонным детектором. Конус на плоскости регистрации создаёт изображение в виде кольца, которое называют черенковским. В случае газовых радиаторов для создания изображения используется дополнительное фокусирующее зеркало.

В 1980-х–1990-х годах был создан целый ряд таких детекторов для идентификации частиц в экспериментах по физике высоких энергий. В качестве радиаторов излучения использовались твёрдые вещества (SiO_2 [44], LiF [45]), а также жидкости (C_6F_{14} [46, 47]) и газы (C_4F_{10} [46, 48], C_5F_{12} [46, 47]). Для регистрации черенковских фотонов использовались проволочные газовые детекторы с фоточувствительными добавками (ТМАЕ (тетраakis(диметиламин)-этилен) [46, 47], ТЕА (триэтиламин) [45]) или CsI-фотокатодом [48], а также вакуумные фотоумножители [44].

В качестве примера приведём систему идентификации DIRC (Detector of Internally Reflected Cherenkov light) детектора BaBar, которая успешно работала на В-фабрике в SLAC [44, 49]. Радиатором излучения служили пластины из синтетического кварцевого стекла сечением $17,25 \times 35$ мм и длиной 4,9 м. Особенность детектора заключается в том, что используется изображение той части черенковского конуса, которая захватывается в угол полного внутреннего отражения. Черенковские фотоны, выходя из торца пластины, попадают в специальный объём, заполненный водой, и регистрируются массивом из 11000 фотоумножителей с диаметром фото катода 26 мм. Среднее число регистрируемых фотонов от релятивистской частицы изменяется от 20 до 60 в зависимости от направления и координаты прохож-

дения частицы. Качество π/K -разделения составило 4σ при импульсе 1,2 ГэВ/с и 2,6 σ при импульсе 3,0 ГэВ/с [49].

Детекторы РИЧ с твёрдыми, жидкими и газообразными радиаторами имеют ограничение — они не обеспечивают надёжной идентификации пионов и каонов в диапазоне импульсов от 4 до 10 ГэВ/с. Для решения данной проблемы было предложено использовать в качестве радиатора аэрогель.

Долгое время считалось, что аэрогель нельзя применять в детекторах РИЧ из-за сильного рассеяния света, которое делает невозможным измерение угла черенковского излучения. Дополнительной проблемой являлась высокая стоимость координатных фотонных детекторов для видимой области спектра.

Впервые использовать аэрогель в качестве радиатора в детекторе РИЧ было предложено D.E. Fields с соавторами [50] в 1994 г. Годом позднее Т. Ypsilantis и J. Seguinot предложили создать детектор РИЧ с аэрогелевым радиатором для идентификации частиц в эксперименте LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) [51]. Ими было выработано требование к длине рассеяния света в аэрогеле: параметр C должен быть не более $0,01 \text{ мкм}^4 \text{ см}^{-1}$, что соответствует длине рассеяния света 26 мм на длине волны 400 нм. Толчком к данным работам послужило первое экспериментальное наблюдение черенковского кольца из аэрогеля с помощью фотоплёнки, проведённое в 1991 г. А.И. Воробьёвым, В.П. Зреловым и Я. Ружичкой [52]. С разработкой двухстадийной технологии производства аэрогеля в 1995–1996 гг. связан значительный прогресс в улучшении прозрачности аэрогеля (см. раздел 2). Длина рассеяния света в производимых образцах превысила 40 мм, что обеспечило заметное увеличение сбора света в разрабатываемых системах.

Преимущества аэрогелевых радиаторов состоят в следующем.

- Несмотря на то что максимальный черенковский угол возрастает с увеличением показателя преломления, разность черенковских углов частиц с разными массами при одинаковом импульсе больше для радиаторов с меньшим показателем преломления. Например, разность углов пионов и каонов при импульсе 2 ГэВ/с в кварце ($n = 1,47$) равна 25 мрад, а в аэрогеле ($n = 1,05$) — 100 мрад (рис. 4).

- Один из основных вкладов в погрешность измерения черенковского угла в детекторах РИЧ обусловлен дисперсией показателя преломления. Дисперсия в аэрогеле в несколько раз меньше, чем в других твёрдых радиаторах излучения. В таблице 3 представлены показатели преломления различных веществ на длинах волн 350 и 700 нм и разность черенковских углов на этих длинах волн.

Первый РИЧ с аэрогелевым радиатором был создан для эксперимента HERMES (High-Energy Radiation

Таблица 3. Показатели преломления различных веществ на длинах волн 350 и 700 нм и разность черенковских углов на этих длинах волн

Вещество	n_{350}	n_{700}	$\Theta_{350} - \Theta_{700}$, мрад	Литература
Плавленый кварц	1,4769	1,4553	13,7	[53]
Вода	1,3495	1,3305	15,9	[54]
NaF	1,3359	1,3236	10,5	[55]
LiF	1,4028	1,3902	9,2	[55]
Аэрогель	1,0295	1,0282	5,0	[12]

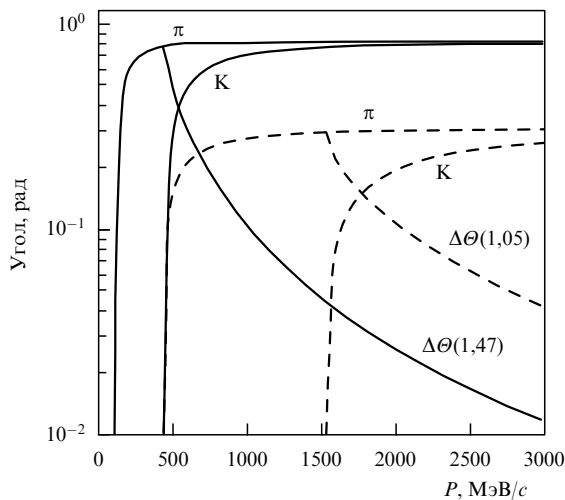


Рис. 4. Зависимость угла черенковского излучения от импульса для пионов и каонов в кварце (сплошные кривые) и в аэрогеле с $n = 1,05$ (штриховые кривые). Разность углов черенковского излучения пионов и каонов в кварце ($\Delta\theta(1,47)$) и в аэрогеле ($\Delta\theta(1,05)$).

Megavolt Electron Source) (Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Германия) в 1998 г. Для идентификации частиц использовались два радиатора: аэрогель ($n = 1,03$) и газ C_4F_{10} ($n = 1,00137$). Аэрогель был произведён фирмой Matsushita (Япония), длина рассеяния света составляла 27 мм [56]. Аэрогелевый радиатор состоял из блоков размером $11,5 \times 11,5 \times 1,0 \text{ см}^3$, блоки собирались в стопки по пять штук для получения суммарной толщины 5 см. Сбор черенковского света из аэрогеля и газового радиатора осуществлялся с помощью фокусирующего зеркала. В качестве фотонного детектора использовался массив ФЭУ с диаметром фотокатода 23,3 мм. Число зарегистрированных фотонов от релятивистской частицы в аэрогеле (газе) равнялось 10 (12). Качество π/K -разделения при импульсе 5 ГэВ/с составило $4,5\sigma$ [57].

Дальнейший прогресс в методике детекторов РИЧ с аэрогелевым радиатором связан с разработкой системы идентификации для эксперимента LHCb. В настоящее время в этом детекторе работают два детектора РИЧ. В одном из них используются два радиатора: аэрогель ($n = 1,03$) и газ C_4F_{10} [58, 59], а в другом используются газ CF_4 . Аэрогель был произведён в Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ИК СО РАН) совместно с ИЯФ СО РАН; длина рассеяния света составила 50 мм. Аэрогелевый радиатор состоит из блоков рекордно большого размера — $20 \times 20 \times 5 \text{ см}^3$. Сбор черенковского света из аэрогеля и газового радиатора производится с помощью двух зеркал — фокусирующего и планарного. В качестве фотонных детекторов используются координатно-чувствительные гибридные фотоумножители фирмы Photonis-DEP с диаметром фотокатода 72 мм. Число зарегистрированных фотонов от релятивистской частицы в аэрогеле равно пяти [60].

Система РИЧ с аэрогелевым радиатором успешно используется для идентификации частиц в детекторе AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer 02), который проводит измерение космического излучения на Международной космической станции [61]. В качестве радиаторов в детекторе используются 92 блока аэрогеля с показателем преломления 1,05 размером $11,5 \times 11,5 \times 2,5 \text{ см}^3$ и

16 пластин NaF размером $8,5 \times 8,5 \times 0,5 \text{ см}^3$. Аэрогель был произведён в ИК СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН; длина рассеяния света составила 42 мм. В качестве фотонных детекторов используются координатно-чувствительные фотоумножители R7600-00-M16 фирмы Hamamatsu. Число зарегистрированных фотонов от релятивистской частицы в аэрогеле в среднем равно 6,2. Особенностью данного эксперимента является возможность определять заряд космической частицы [62]. Так как интенсивность черенковского излучения квадратично зависит от заряда частицы, в детекторе РИЧ можно определить заряд по числу зарегистрированных фотонов на кольце. Точность измерения заряда составляет 0,3 для α -частиц ($Z = 2$) и плавно изменяется до 0,5 для ядер кремния ($Z = 14$). Точность измерения скорости α -частиц $\sigma(v/c) = 0,8 \times 10^{-3}$ [63].

Детектор черенковских колец на основе фокусирующего аэрогеля. В 2004 г. группой физиков из коллаборации Belle (КЕК) [64, 65] и независимо группой из ИЯФ СО РАН и ИК СО РАН [66] было предложено в качестве радиатора в детекторах черенковских колец использовать несколько слоёв аэрогеля. Возможны два варианта подбора показателей преломления и толщин слоёв аэрогеля. В первом случае они подбираются таким образом, чтобы изображения черенковских колец из каждого слоя перекрывались в плоскости детектирования (рис. 5а). В другом случае черенковские кольца от разных слоёв не перекрываются, так что можно определить, из какого слоя произошёл зарегистрированный фотон (рис. 5б). В обоих вариантах удаётся уменьшить вклад толщины радиатора в погрешность измерения угла черенковского излучения. Такой аэрогелевый радиатор был назван фокусирующим, а детектор получил имя ФАРИЧ (от англ. Focusing Aerogel RICH — FARICH).

Однокольцевой вариант ФАРИЧ имеет преимущество перед многокольцевым вариантом благодаря меньшей площади изображения кольца в плоскости фотодетектора, что выгодно с точки зрения получения лучшего соотношения сигнал–фон при наличии фоновых срабатываний (рассеянные фотоны, темновой ток фотодетектора, фон от других частиц). Недостаток однокольцевого варианта состоит в расфокусировке кольца при отклонении скорости частицы от оптимальной, для которой спроектирован радиатор, а также при отклонении угла прохождения частицы через радиатор от нормального. Однокольцевой вариант также требует соблюдения большей точности показателя преломления при изготовлении аэрогеля. Новосибирской группой были прове-

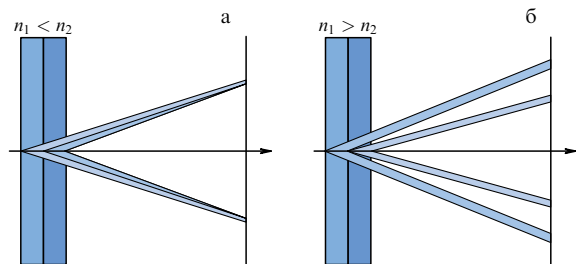


Рис. 5. Иллюстрация идеи использования радиатора из "фокусирующего" аэрогеля в ФАРИЧ с одним кольцом (а) и с двумя кольцами (б).

дены расчёты для оптимизации фокусирующего радиатора [67, 68].

Аэрогелевый фокусирующий радиатор может состоять из отдельных блоков-слоёв аэрогеля с различными показателями преломления либо представлять собой монолитные блоки многослойного аэрогеля [66] или аэрогелевые блоки с плавным изменением показателя преломления по толщине [69]. Последний вариант предпочтителен, так как он позволяет достичь наилучшей фокусировки кольца при заданном размере детектора. Кроме того, такой аэрогель исключает возникновение области переходов между слоями, которая в существующих многослойных аэрогелях имеет более высокий показатель преломления, чем у смежных слоёв, что значительно ухудшает разрешение ФАРИЧ по черенковскому углу.

Детекторы черенковских колец с фокусирующим аэрогелевым радиатором были предложены для идентификации частиц в экспериментах Belle II (КЕК, Япония) [64, 65], SuperB (Италия) [70], для модернизации детектора ALICE (A Large Ion Collider Experiment) (ЦЕРН), для системы Forward RICH детектора PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) (FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), Германия) и, наконец, для системы идентификации детектора для Супер-чарм-тау-фабрики [71, 72].

Для торцевой системы аэрогелевого РИЧ-детектора Belle II используются фокусирующий радиатор из двух слоёв аэрогеля толщиной 2 см и новая разработка Hamamatsu и КЕК — гибридный лавинный фотонный детектор HAPD (Hybrid Avalanche PhotoDetector) с размером пикселя 5 мм. Расстояние между радиатором и ФЭУ составляет 200 мм. Для прототипа системы на пучке электронов [73] было продемонстрировано разрешение по черенковскому углу 15,8 мрад на один фотон и среднее число фотоэлектронов 8,6 на трек, что соответствует π/K -разделению (4,4 σ) для импульса 4 ГэВ/с.

В 2012 г. был создан и протестирован на пучке прототип детектора ФАРИЧ на основе цифрового фотонного детектора DPC (Digital Photon Counting), производства Philips Digital Photon Counting, с четырёхслой-

ным аэрогелем [74]. Пиксель фотодетектора DPC имеет размер 3,2 × 3,9 мм. В эксперименте был достигнут один из лучших результатов для кремниевых ФЭУ по временному разрешению для одиночных фотонов — 48 пс (среднее квадратичное отклонение). Число зарегистрированных фотонов для релятивистской частицы составило 12. Было получено разделение π - и K -мезонов на уровне 7,6 σ при импульсе 4 ГэВ/с, а также μ/π -разделение на уровне 5,3 σ при импульсе 1 ГэВ/с. На рисунке 6 показано экспериментальное и расчётное π/K -разделение в зависимости от импульса.

5. Заключение

Рассмотрены аэрогелевые черенковские детекторы и их применение в экспериментах по физике высоких энергий. Такие детекторы используются для идентификации заряженных частиц в том диапазоне скоростей, где другие черенковские радиаторы не работают. Аэрогель впервые был применён в пороговых черенковских счётчиках с разными вариантами светосбора (TASSO, "Кедр", Belle и т.д.). Вскоре он получил применение также в детекторах черенковских колец (HERMES, LHCb и AMS-02). Возможность изготавливать аэрогель с разным показателем преломления была использована в концепции детектора ФАРИЧ, которая дала начало проектам систем идентификации для Belle-2, PANDA и Супер-чарм-тау-фабрики.

Благодарности. Авторы благодарят А.Ю. Барнякова, М.Ю. Барнякова, В.Е. Блинова, В.С. Бобровникова, А.Р. Бузыкаева, А.И. Воробьева, И.А. Куянова, И.В. Овтина, В.А. Родякина, Ю.И. Сквонья, В.А. Таюрского, А.Г. Шамова за участие в работах по аэрогелевым черенковским детекторам. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-2479.2014.2, Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 14-02-00984-а, 14-02-01011-а, 15-02-03114-а), интеграционного гранта СО РАН 103.

Список литературы

1. Черенков П А *ДАН СССР* **2** 451 (1934); Cherenkov P A *C.R. Acad. Sci. USSR* **2** 451 (1934); Черенков П А *УФН* **93** 385 (1967)
2. Вавилов С И *ДАН СССР* **2** 457 (1934); Vavilov S I *C.R. Acad. Sci. USSR* **2** 457 (1934); Вавилов С И *УФН* **93** 383 (1967)
3. Cherenkov P A *Phys. Rev.* **52** 378 (1937)
4. Тамм И Е, Франк И М *ДАН СССР* **14** 107 (1937); Tamm I E, Frank I M *C.R. Acad. Sci. USSR* **14** 107 (1937); Тамм И Е, Франк И М *УФН* **93** 388 (1967)
5. Онучин А П *Экспериментальные методы ядерной физики* (Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010)
6. Kistler S S *J. Phys. Chem.* **36** 52 (1931); Kistler S S "Method of producing aerogels", US Patent 2,093,454 Sept. 21 (1937)
7. Hrubeshah L W, Tillotson T M, Poco J F "Characterization of ultralow-density silica aerogels made from a condensed silica precursor" *MRS Proc.* **180** 315 (1990); Preprint UCRL-Ext.Abs. 102518 (1990)
8. Danilyuk A F et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **494** 491 (2002)
9. Buzykaev A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **379** 465 (1996)
10. Cantin M et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **118** 177 (1974)
11. Tabata M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **668** 64 (2012)
12. Bellunato T et al. *Eur. Phys. J. C* **52** 759 (2007)
13. Onuchin A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **315** 517 (1992)
14. Buzykaev A R et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 396 (1999)
15. Onuchin A P et al. "Development of aerogel Cherenkov counters for KEDR detector", in *Instrumentation for Colliding Beam Physics*.

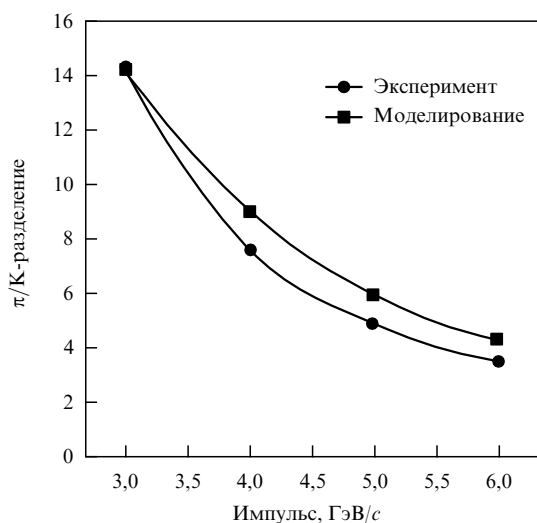


Рис. 6. Разделение π - и K -мезонов в зависимости от импульса, полученное в эксперименте (кружки) и при моделировании (квадраты) [70].

- Proc. of the 5th Intern. Conf., Novosibirsk, USSR, March 15–21, 1990* (Ed. E P Solodov) (Singapore: World Scientific, 1990) p. 208
16. Buzykaev A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **379** 453 (1996)
 17. Shamov A G, Buzykaev A R "LCE, Light Collection Efficiency simulation tool", in *Proc. of the Intern. Conf. on Computing in High Energy Physics, CHEP'97, 7–11 April 1997, Berlin, Germany*; <http://www.ifh.de/CHEP97/paper/212.ps>
 18. Harnew N, Meyer D I *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **186** 513 (1981)
 19. Baru S E et al. *Phys. Rep.* **267** 71 (1996)
 20. Burkhardt H et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **184** 319 (1981)
 21. Аксенов В А и др., в сб. *Труды международного симпозиума по координациям детекторам в физике высоких энергий, Дубна, 22–25 сентября 1987 г.* (Дубна: Изд-во ОИЯИ, 1988) с. 313
 22. Arisaka K et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **379** 460 (1996)
 23. Arisaka K et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **385** 74 (1997)
 24. Boutigny D et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 1621 (1997)
 25. Arisaka K et al. *J. Non-Cryst. Solids* **225** 375 (1998)
 26. Iijima T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **453** 321 (2000)
 27. Abashian A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **479** 117 (2002)
 28. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **567** 17 (2006)
 29. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **478** 353 (2002)
 30. Buzykaev A R et al. *J. Non-Cryst. Solids* **225** 381 (1998)
 31. Barnyakov M Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **419** 584 (1998)
 32. Barnyakov M Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **453** 326 (2000)
 33. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **494** 424 (2002)
 34. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **518** 597 (2004)
 35. Danilyuk A F et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 406 (1999)
 36. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **598** 166 (2009)
 37. Barnyakov A Yu et al. *JINST* **9** C09005 (2014)
 38. Beloborodov K I et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **494** 487 (2002)
 39. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **598** 163 (2009)
 40. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **623** 336 (2010)
 41. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **732** 330 (2013)
 42. Roberts A *Nucl. Instrum. Meth.* **9** 55 (1960)
 43. Seguinot J, Ypsilantis T *Nucl. Instrum. Meth.* **142** 377 (1977)
 44. Adam I et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 121 (1999)
 45. Mountain R J et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 77 (1999)
 46. Albrecht E et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 47 (1999)
 47. Va'vra J, The CRID Collab. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 59 (1999)
 48. Abbon P et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **639** 15 (2011)
 49. Aubert B et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **479** 1 (2002)
 50. Fields D E et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **349** 431 (1994)
 51. Ypsilantis T, Seguinot J *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **368** 229 (1995)
 52. Vorobiov A I, Zrelov V P, Ruzicka J, in *Proc. of the Workshop on Physics and Detectors for DAPHNE, The Frascati Phi Factory, 9–12 April 1991, Frascati, Italy* (Ed. G Pancheri) (Frascati: Lab Naz. Frascati, 1991) p. 551
 53. Malitson I H *J. Opt. Soc. Am.* **55** 1205 (1965)
 54. Daimon M, Masumura A *Appl. Opt.* **46** 3811 (2007)
 55. Li H H *J. Phys. Chem. Ref. Data* **5** 329 (1976)
 56. Ryckbosch D *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 98 (1999)
 57. Jackson H E *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **553** 205 (2005)
 58. Braem A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 153 (1999)
 59. Matteuzzi C *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **494** 409 (2002)
 60. Matteuzzi C, The LHCb RICH Collab. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **766** 245 (2014)
 61. Pereira R, The AMS RICH Collab. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **639** 37 (2011)
 62. Bu'enerd M, The AMS-RICH Collab. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **553** 264 (2005)
 63. Giovacchini F, The AMS02-RICH Collab. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **766** 57 (2014)
 64. Iijima T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **548** 383 (2005)
 65. Korpar S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **553** 64 (2005)
 66. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **553** 70 (2005)
 67. Barnyakov A Yu et al., in *Proc. of the Intern. Symp. on Detector Development for Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiation Experiments, SNIC 2006, April 3–6, 2006, Stanford, Calif., USA* (SLAC-R-842:C0604032) (Stanford, Calif.: Stanford Linear Accelerator Center, 2006) p. 0045; <http://www.slac.stanford.edu/econf/C0604032/papers/0045.PDF>
 68. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **595** 100 (2008)
 69. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **766** 235 (2014)
 70. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **598** 169 (2009)
 71. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **639** 290 (2011)
 72. Anashin V V et al. "Super Charm–Tau Factory", Conceptual Design Report (Novosibirsk: Budker Inst. of Nuclear Physics); https://ctd.inp.nsk.su/docs/ScTau_CDR_en/CDR_en_ScTau.pdf
 73. Nishida S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **766** 28 (2014)
 74. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **732** 352 (2013)

Aerogel Cherenkov detectors in colliding beam experiments

A.F. Danilyuk. *Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva 5, 630090 Novosibirsk, Russian Federation; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation*
E-mail: danilyuk@catalysis.ru

S.A. Kononov, E.A. Kravchenko. *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation*
E-mail: S.A.Kononov@inp.nsk.su, E.A.Kravchenko@inp.nsk.su

A.P. Onuchin. *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation; Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation; Novosibirsk State Technical University, prosp. K. Marksa 20, 630073 Novosibirsk, Russian Federation*
E-mail: A.P.Onuchin@inp.nsk.su

This review discusses the application of aerogel Cherenkov detectors in colliding beam experiments. Such detectors are used for charged particle identification at velocities at which other methods are ineffective. The paper examines aerogel production technology and how the aerogel optical parameters are measured. Data on threshold Cherenkov counters with direct light collection and on those using wavelength shifters are presented. Also presented are data on Ring Image Cherenkov detectors with single and multilayer focusing aerogel radiators.

Keywords: colliding beams, particle identification, Cherenkov radiation, Cherenkov counters, aerogel

PACS numbers: 29.20.D–, 29.40.Ka, 33.20.Fb, **81.07.–b**
Bibliography — 74 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (5) 540–548 (2015)

DOI: 10.3367/UFN.0185.201505k.0540
Received 1 March 2015
Physics–Uspekhi **58** (5) (2015)