

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОГЕЛЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В ЧЕРЕНКОВСКИХ СЧЕТЧИКАХ

Ю. Н. Харжеев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	271
ИЗГОТОВЛЕНИЕ АЭРОГЕЛЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ	275
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОГЕЛЯ	280
ПОРОГОВЫЕ АЭРОГЕЛЬНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ СЧЕТЧИКИ	288
ЧЕРЕНКОВСКИЕ СЧЕТЧИКИ КОЛЬЦЕВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	299
РІСН-ДЕТЕКТОРЫ С КВАЗИФОКУСИРОВКОЙ	309
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	319
ПРИЛОЖЕНИЕ	320
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	321

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОГЕЛЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В ЧЕРЕНКОВСКИХ СЧЕТЧИКАХ

Ю. Н. Харжеев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В черенковских счетчиках широкое применение нашли радиаторы из аэрогеля диоксида кремния (аэрогель), представляющего собой легкое прозрачное вещество, которое занимает промежуточное положение по величине показателя преломления n между газовыми ($n < 1,001$) и твердотельными радиаторами ($n > 1,3$). В обзоре рассматриваются различные факторы, влияющие на идентификацию частиц в черенковских счетчиках: хроматическая aberrация, количество фотоэлектронов, пропускающая способность оптической системы. Кратко приводятся основные способы изготовления аэрогеля, оптические и физические характеристики образцов аэрогеля, их прозрачность, длины рассеяния и поглощения, количество фотоэлектронов, а также его производители. Рассматриваются примеры использования аэрогелей в пороговых черенковских счетчиках на таких установках, как BELLE (KEK), TASSO (DESY), KEDR (VEPP-4M). В последние годы проведено множество исследовательских работ на различных прототипах черенковских счетчиков на протонном синхротроне ЦЕРН. В обзоре затронуты некоторые из них. Успехи, достигнутые в изготовлении высококачественных образцов аэрогеля, в том числе многослойных, и результаты их испытаний способствовали использованию их в черенковских счетчиках кольцевого изображения RICH на установке HERMES, развитию черенковских счетчиков с квазифокусировкой, а также планированию применения RICH в проекте LHCb на кольцевом коллайдере в ЦЕРН и на α -магнитном спектрометре международной космической станции.

Silica aerogel has been widely used as a radiator for Cherenkov detectors. It is a highly porous, low-density and transparent matter with a refractive index (n) covering the range between the condensed phase ($n \sim 1.3$) and gases ($n < 1.001$). The review is devoted to the consideration of various aspects concerning aerogel: its production methods, optical and physical properties, including transparency, absorption, and scattering lengths, the number of photoelectrons and also factors affecting the accuracy of particle identification. The use of silica aerogel in various threshold Cherenkov counters including some of its prototypes and such modern and complex spectrometers as BELLE KEK, KEDR (Novosibirsk), the Alpha Magnetic Spectrometer on International Space Station (AMS) is described. Over the last years, two or more layers of monolytic and nonmonolytic aerogel blocks with different refractive indices were used in the proximity focusing RICH. The high optical quality of the up-to-date aerogel samples was favourable for using these samples in RICH (Ring Imaging Cherenkov counter) at HERMES (DESY), LHCb (CERN), AMS and some aspects of their application are described, too.

PACS: 29.40.Ka

ВВЕДЕНИЕ

С ростом энергии взаимодействующих частиц и множественности вторичных частиц, число которых может достигать от нескольких десятков до сотен, идентификация частиц становится все более сложной задачей. Среди

множества детекторов, призванных решать эту задачу, особая роль отводится черенковским счетчикам (ЧС), в которых в качестве радиатора используется аэрогель диоксида кремния (далее — аэрогель).

В последние годы достигнуты значительные успехи в технологии изготовления аэрогелей, обладающих высокими оптическими и физическими свойствами. Это способствовало использованию аэрогелей в ЧС кольцевого изображения и счетчиках с квазифокусировкой. В связи с этим появилось много публикаций, но практически очень мало обзорных материалов [1]. Настоящий обзор посвящен особенностям применения аэрогеля в ЧС. Обзор состоит из введения, 5 разделов и заключения. В разд. 1 вкратце рассматриваются некоторые вопросы изготовления аэрогеля, разд. 2 посвящен оптическим свойствам аэрогеля, разд. 3 — пороговым аэрогельным счетчикам, разд. 4 — черенковским счетчикам кольцевого изображения (RICH — Ring Imaging Cherenkov detector), разд. 5 — ЧС с квазифокусировкой (Proximity focusing RICH), в которых используются 2 и более аэрогелей с разными показателями преломления. В приложении приведены некоторые сводные данные по ФЭУ, использованным в аэрогельных ЧС.

Принцип работы черенковских счетчиков и основные соотношения [2].

В основе работы ЧС лежит открытое в 1934 г. П. А. Черенковым явление, названное впоследствии его именем. Суть этого явления, объясненная позже на основе классической электромагнитной теории И. Е. Таммом и И. М. Франком, заключается в том, что любая заряженная частица, проходящая через прозрачную среду (радиатор) с показателем преломления n , со скоростью β , превышающей фазовую скорость света в данной среде c/n , испускает фотоны под углом θ , косинус которого равен

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

а их интенсивность N пропорциональна

$$N(\lambda) \propto \frac{1 - 1/(\beta n)^2}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где λ — длина волны испускаемых фотонов, а интеграл берется по всей рассматриваемой области длин волн. Количество фотонов, испускаемых на 1 см твердых и жидких радиаторов, составляет 300–400, а для газовых — не более 10.

Величиной n определяется также значение пороговой энергии частицы с массой m :

$$E_{\text{пор}} = \frac{mn}{\sqrt{(n^2 - 1)}}. \quad (3)$$

Количество регистрируемых фотоэлектронов N_e можно выразить формулой

$$N_e = N_0 L \sin^2 \theta, \quad (4)$$

где N_0 — добротность счетчика — параметр, определяющий качество как его оптики, так и фотодетектора; L — длина радиатора.

$$N_0 = 2\pi\alpha Z^2 \int k(\lambda)\varepsilon(\lambda)\frac{d\lambda}{\lambda^2}, \quad (5)$$

где $k(\lambda)$ и $\varepsilon(\lambda)$ — соответственно квантовая эффективность фотокатода и коэффициент светопропускания оптической системы; α — постоянная тонкой структуры; Z — заряд частицы, а интеграл берется по всей рассматриваемой области длин волн.

Основными элементами ЧС являются радиатор, в котором заряженная частица испускает фотоны; сферическое или иное зеркало, фокусирующее излучение; позиционно-чувствительный фотоприемник; ФЭУ. В зависимости от назначения и принципа действия черенковские счетчики делятся на пороговые, дифференциальные и кольцевого изображения (RICH-детекторы).

Принцип действия пороговых ЧС основан на регистрации всех частиц со скоростью большей, чем пороговая, т. е. $\beta > \beta_{\text{пор}} = c/n$ в интервале углов от 0 до $\theta_{\text{макс}} = \arccos(1/n)$.

Принцип действия дифференциальных ЧС основан на регистрации всех частиц, скорость которых лежит в интервале от β_0 до $\beta_0 + \Delta\beta$, чему соответствует интервал по углам от θ_0 до $\theta_0 + \Delta\theta$.

В последние годы широкое распространение получают RICH-детекторы, принцип действия которых заключается в том, что в фокальной плоскости их оптической системы воспроизводится кольцевое изображение, радиус которого определяется углом θ , т. е. скоростью частицы, а его центр — направлением ее движения.

Основными измеряемыми величинами в ЧС являются угол θ , количество фотоэлектронов N_e , радиус кольца и направление движения. Важнейшими характеристиками ЧС являются его эффективность, разрешение по скорости и факторы, влияющие на точность восстановления скорости.

Эффективность ЧС оценивается формулой

$$\epsilon = 1 - \exp(-N_e). \quad (6)$$

Разрешение ЧС по скорости определяется по формуле

$$\left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)^2 = \frac{(\text{tg } \theta \Delta\theta)^2 + (\Delta n/n)^2}{N_0 L \sin^2 \theta}. \quad (7)$$

Основные факторы, влияющие на точность измерения

1. Хроматическая абберрация $(\Delta\theta/\theta)_{\text{хром}}$ — изменение показателя преломления в зависимости от длины волны регистрируемых фотонов — вносит

заметный вклад в погрешность измерения β , так как она приводит к размытию угла черенковского излучения (ЧИ). Для газовых и других радиаторов, у которых величина $n - 1$ мала,

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\theta}\right)_{\text{хром}} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta n}{(n-1)}, \quad (8)$$

т. е. угловой разброс равен половине относительного разброса показателя преломления в детектируемой области длин волн.

2. Пространственное разрешение фотодетектора

$$\Delta\theta_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{пр}}}{f}, \quad (9)$$

где f — фокусное расстояние; $\sigma_{\text{пр}}$ — пространственное разрешение, определяемое линейными размерами пикселей.

3. Неточное знание направления движения первичной частицы, определяемого трековой системой.

4. Оптические аберрации, обусловленные различием направления лучей на фотодетектор, испускаемых из различных точек траектории частицы.

5. Неточное знание показателя преломления радиатора.

6. Влияние магнитного поля.

Конкретно вклады этих факторов будут проанализированы ниже при рассмотрении отдельных установок.

Аэрогель как радиатор черенковского счетчика. В качестве радиатора в ЧС использовались многие вещества. В табл. 1 приведены показатели преломления некоторых жидких и газообразных радиаторов, а также твердого кварца (азот под давлением 50 атм, водород — жидкий).

Таблица 1. Показатели преломления некоторых радиаторов

Радиатор	Кварц	Вода	Водород	Азот	CF ₄	C ₄ F ₁₀	Аэрогель
n	1,458	1,33	1,0097	1,0139	1,000488	1,00141	1,006–1,25

При решении многих физических задач в 1980–1990-х гг., особенно при исследовании CP -асимметрии, возникала необходимость в радиаторах, показатель преломления которых n принимал бы значения, промежуточные между n жидких и газовых радиаторов, и, как мы покажем ниже, потребность в таких радиаторах с тех пор только возрастает.

Такое вещество — аэрогель диоксида кремния SiO₂ — было произведено в 1974 г. [3]. В [3] была также показана возможность его применения в качестве радиатора в ЧС.

Аэрогель из диоксида кремния представляет собой легкое высокопористое вещество. Структуру его образуют небольшие сферические кластеры из SiO_2 размерами до 10 нм, соединенные между собой в цепочки, составляющие 3-мерную сетку, поры которой заполнены воздухом (рис. 1, а) [4]. Размеры пор могут достигать от нескольких десятков до сотен нм. Получены аэрогели с плотностью от 0,03 до 0,55 г/см³, чему соответствует интервал n от 1,007 до 1,11.

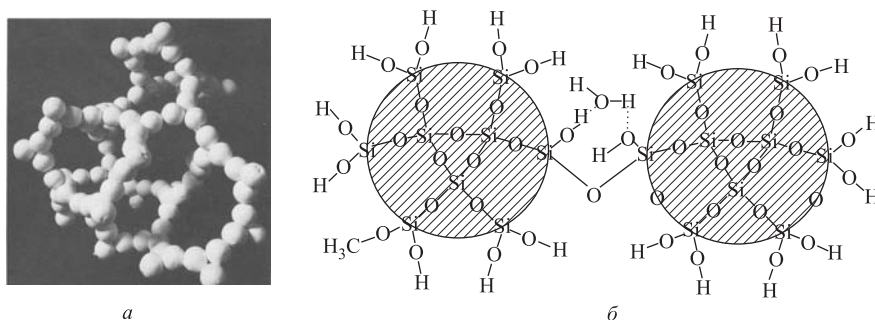


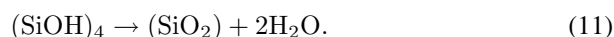
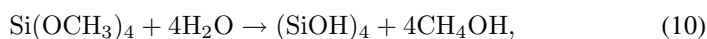
Рис. 1. а) Модель структуры аэрогеля [4]; б) связь между двумя коллоидными частицами [4]

Таким образом, аэрогели прочно заняли промежуточное место между такими радиаторами, как сжатые газы и криогенные жидкости, обладая при этом несомненными преимуществами перед ними: нет необходимости в высоких давлениях, они удобны и просты в эксплуатации, весьма компактны, что очень важно в современных сложных спектрометрических установках.

1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АЭРОГЕЛЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Известны 3 способа (метода) изготовления аэрогеля.

1. *Одноступенчатый метод.* Этот метод впервые был описан в работе [3] и использован во многих научных организациях: в лаборатории DESY [4], фирме «Airglass» (Швеция) [5], Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН [6], ОИЯИ [7, 8]. Исходным моментом в приготовлении аэрогеля является гидролиз и конденсация тетраметаксилана $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$, что осуществляется при растворении его в метиловом спирте в присутствии кислотного катализатора:



В результате этих процессов, имеющих место в одном и том же контейнере, происходит образование алкогеля — вещества, состоящего из коллоидных частиц — сферических кластеров из SiO_2 размерами около 5 нм, соединенных между собой силоксановой Si-O-Si и гидроксильной (ОН) связями в виде трехмерной сетки, см. рис. 1, б, на котором изображены связи между двумя коллоидными частицами [5].

После 7–10 дней выдержки (старения) алкогель подвергают сушке для удаления воды и растворителя (метанола), которыми заполнены поры между кластерами. Поэтому сушка осуществляется в результате плавного повышения температуры T и давления P в специальном автоклаве до значений, превышающих критические величины для метанола ($T_{\text{кр}} \approx 240^\circ\text{C}$ и $P_{\text{кр}} \approx 120$ атм).

После сушки образцы аэрогеля подвергают отжигу при $T \approx 400^\circ\text{C}$ для окончательного удаления остатков воды и органических соединений. В результате этой операции повышается и прозрачность образцов.

Плотность и вместе с тем и показатель преломления n зависят от количества растворителя (метанола). С увеличением концентрации растворителя при получении низких значений n происходит обратная реакция, поэтому нельзя получить этим методом аэрогели с более низкими значениями n , чем 1,02, и с высокой прозрачностью. Недостатком этого метода является то, что аэрогели получаются гидрофильными, т. е. водопоглощающими.

Этим методом изготавливались аэрогели с $n \approx 1,03$ –1,05. Например, в DESY — с $n = 1,024$, размер образцов составлял $170 \times 170 \times 2,3$ см [4].

Одноступенчатый способ использовался также при изготовлении аэрогелей в ОИЯИ. Изготавливались аэрогели двух размеров и форм [7]. Образцы больших (малых) размеров имели форму диска диаметром 214 (70) мм, а также параллелепипеда в сечении с размерами 170×170 (60×60) мм с показателями преломления соответственно 1,064 (1,05) и 1,030 (1,02). Толщина пластин составляла 30 мм.

2. *Двухступенчатый метод*, изобретенный в Lawrence Livermore Laboratory (LLL) [9]. На первой ступени готовится частично гидролизованное и частично конденсированное кремниевое масло, из которого алкоголь выводится путем дистилляции. Полученный раствор, называемый *precurcor*, смешивается с безалкогольным растворителем, например, CO_2 . Затем проводят полимеризацию с помощью щелочного катализатора (вместо кислотного в случае одноступенчатого метода). Такая замена способствовала уменьшению размеров пор SiO_2 -кластеров.

Гель, содержащий в порах на первой стадии алкоголь, на второй содержит CO_2 , критическая температура и давление которого составляют 31°C и 80 атм, что намного ниже, чем у метанола. Это значительно упрощает сушку, и к тому же этот метод намного безопаснее — нет взрывоопасности, как в случае с метанолом. Этим методом практически можно получить аэрогели с очень низкими значениями n и более прозрачные, чем с помощью

одноступенчатого метода. Кроме того, что очень важно, изготовленные аэрогели обладают гидрофобными свойствами, т. е. водоотталкивающими. Для этого перед процедурой сушки силанольные группы, имеющиеся на поверхности SiO_2 -кластеров, заменяют на $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ с добавкой гидрофобных агентов, например, гексаметилдицилана (hexamethyldizilane), в этиловом спирте (рис. 2) [13].

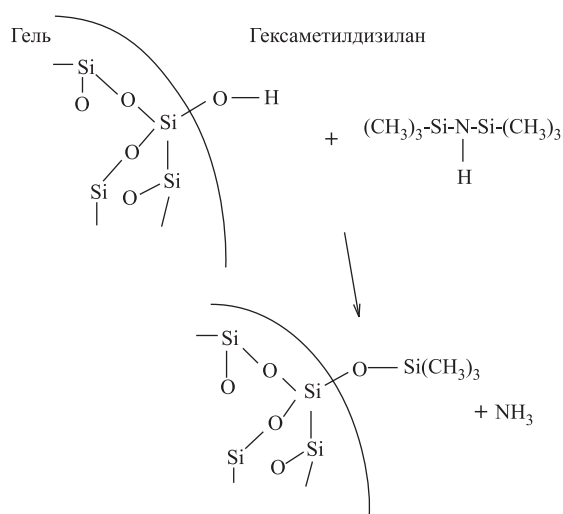


Рис. 2. Схема замены силанольных групп на гидрофобные [13]

Вариант двухступенчатого метода использовался в более поздних работах новосибирской группы ученых в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН и Институте катализа им. Г. К. Борескова СО РАН [10–12]. На первой стадии синтезируется *олигомер* в реакции $(\text{SiOC}_2\text{H}_5)_4$ с водой в присутствии кислотного катализатора. Раствор олигомера при избыточном количестве воды используется для синтеза алкогеля на следующей стадии. Были произведены аэрогели с показателями преломления $n = 1,006–1,130$, с размерами образцов, доходящими до $200 \times 200 \times 50$ мм. На рис. 3 изображен один из этих образцов с $n = 1,038$ [12]. Отметим, что аэрогели с $n = 1,13$ изготавливались в результате спекания при высокой температуре.

3. *Метод КЕК*. Ученые КЕК вместе со специалистами MEW (Matsushita Electric Work, Япония) изобрели новый метод [13, 14]. Исходным моментом являются два раствора в этиловом спирте: раствор *олигомера* (метил силикат 51) и дистиллированная вода. В объединенный раствор добавляется щелочной катализатор, способствующий образованию маленьких и однородных пор. Так же, как и в предыдущем методе, проводится замена силанольных

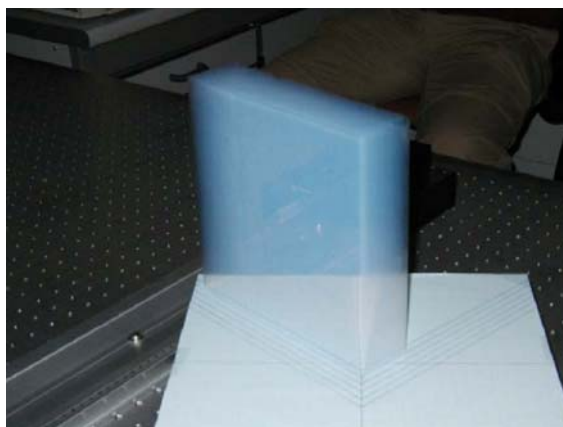


Рис. 3. Фотография образца аэрогеля с размером $200 \times 200 \times 50$ мм и $n = 1,038$ [12]

групп на гидрофобные. Перед сушкой этиловый спирт заменяется на двуокись углерода. Были изготовлены аэрогели со значениями $n = 1,010–1,030$, обладающие стабильными и хорошими оптическими характеристиками.

Было замечено также, что замена гидрофильных групп на гидрофобные способствует сохранению объема образцов аэрогеля после их сушки при сверхкритических условиях, так как за наблюдаемую усушку гидрофильного аэрогеля ответственны силы электрического притяжения между собой силанольных групп, а также этих групп с другими ионами. Этот метод реализуют также с использованием метилового спирта вместо этилового [14]. Причем, как указывалось в данной работе, это привело к увеличению передающей длины аэрогеля в 1,2 раза при 500 нм.

Этим методом было изготовлено около 2 м^3 аэрогеля для спектрометра BELLE КЕК с размерами образцов $120 \times 120 \times 24$ мм и $n = 1,01–1,03$ [14], обладающих высокой прозрачностью и радиационной стойкостью — при облучении образцов аэрогеля γ -квантами от источника ^{60}Co до 9,8 Мрад не было обнаружено изменений ни в прозрачности, ни в показателе преломления.

Однако изготовленные этим методом аэрогели с $n > 1,03$ быстро ухудшали свои оптические свойства. В работе [15] эту проблему удалось решить путем использования дополнительного растворителя диметилформамида (di-methyl-formamide), который вводился во время образования коллоидных частиц.

Были получены аэрогели с $n = 1,05$, обладающие не только улучшенными оптическими, но и гидрофобными и механическими свойствами. С помощью водоструйного пистолета авторам работы [15] удалось с очень высокой точ-

ностью вырезать из прямоугольных образцов с размерами $100 \times 100 \times 10$ мм образцы шестиугольной формы. Это очень интересный результат, так как при сборке радиаторов больших площадей возникает проблема плотной беззазорной упаковки, как по площади, так и по толщине. Слой радиатора, собранный из семи таких образцов шестиугольной формы, практически не имел никаких щелей (рис. 4). При вырезании образцов шестиугольной формы удаляются и мениски, обычно имеющиеся по периферии внешней поверхности готового образца аэрогеля.



Рис. 4. Слой радиатора, составленный из семи аэрогельных пластин шестиугольной формы с $n = 1,050$ [15]

В этой же работе сообщалось об изготовлении и испытании монолитных двухслойных аэрогельных блоков с разными показателями преломления. Сначала производится алкогель нижнего слоя, обычно с большим n , и после нескольких минут, когда гелеобразование станет стабильным, заливается второй слой с меньшим n . Все дальнейшие процедуры — старение и ввод гидрофобных добавок — проводятся стандартным способом.

В изготовлении монолитных многослойных аэрогельных блоков значительных успехов достигла новосибирская группа ученых. Они впервые в мире получили аэрогельные блоки, состоящие из 4 слоев с разными показателями преломления [16].

Аэрогели с большими величинами показателя преломления изготавливали путем спекания при высокой температуре аэрогелей с более низкими n . В работе [17] получали аэрогели с $n = 1,1-1,25$, используя в качестве исходных аэрогели с $n = 1,05$ и размерами $195 \times 195 \times 30$ мм. Спекание проводилось при температуре около 1000°C в течение примерно 10 ч.

2. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОГЕЛЯ

Аэрогели, изготовленные разными методами, обладают отличающимися оптическими свойствами (прозрачностью, длиной поглощения и рассеяния), способностью поглощения воды, количеством испускаемых фотонов, а также разными механическими (размерами, наличием или отсутствием трещин, обработкой поверхности) и радиационными свойствами.

Показатель преломления. Величина n определяется традиционным способом — измерением угла наименьшего отклонения лазерного луча (рис. 5) [18]. Обычно измерения проводятся по четырем углам, и результат усредняется:

$$n = \frac{\sin(\theta_{\min} + \beta/2)}{\sin(\beta/2)}, \quad (12)$$

обозначения видны на рис. 5.

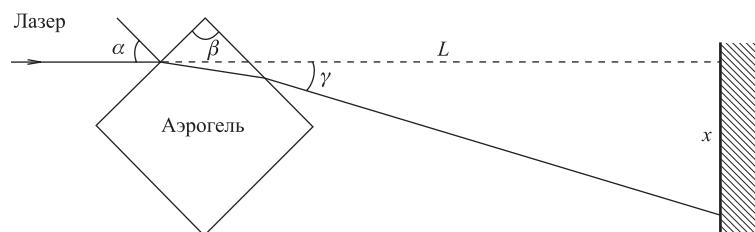


Рис. 5. Схема измерения показателя преломления методом угла наименьшего отклонения

Основной вклад в ошибку измерения n вносит размер светового пятна, и соответствующая величина σ_n составляет около 0,0005 [10]. Известно, что n аэрогеля пропорциональна его плотности:

$$n = 1 + k\rho, \quad (13)$$

где значение k обычно полагают равным 0,21. Однако величина k зависит от λ . Измерения, проведенные в работе [18], показывают, что при $\rho = 0,01 \text{ г/см}^3$ $k = 0,199 \pm 0,003$, а при $\rho = 0,2-0,3 \text{ г/см}^3$ $k = 0,206 \pm 0,003$.

В табл. 2 приведены измеренные величины k в зависимости от λ [19].

Таблица 2. Зависимость коэффициента k от длины волны λ

λ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700
k , 10^4	2196	2155	2127	2107	2092	2081	2073	2066	2061

В изготовленном образце аэрогеля могут иметь место неоднородности в показателе преломления по объему образца, которые влияют на точность

восстановления черенковского угла. Измерения неоднородностей в n были проведены с помощью He–Ne лазерного луча на образце аэрогеля размером $53 \times 53 \times 24,5$ мм, с $n = 1,05$ [18] и с помощью пучка электронов на образце размером $100 \times 100 \times 40$ мм, с $n = 1,03$ [12]. Аэрогели были изготовлены в Новосибирске. Измерения дали совпадающие результаты. Максимальная величина в изменении n составила 0,003, и она приходилась на крайние области образцов.

В работе [20] проведены измерения хроматической аберрации на образцах аэрогеля [13, 14] с $n = 1,030$ в диапазоне длин волн 325–650 нм с помощью различных лазерных лучей: He–Ne-лазер при 633 нм; ионный аргоновый лазер при 514, 496 и 458 нм и He–Cd при 425 и 325 нм.

Расходимость лучей составила 1 мрад в первом лазере и 1,5 мрад в двух других. Результаты измерения фитировались феноменологической формулой:

$$n = B + \frac{B_1}{\lambda^a}, \quad (14)$$

где $a = 1,2 \pm 0,2$; B и B_1 — константы, значения которых, к сожалению, в работе не приведены.

Экспериментальные данные сравнивались также с $n(\lambda)$, полученными:

а) на основе известных зависимостей $n(\lambda)$ для кварца и воздуха [21];

б) на основе теории Лорентц–Лоренца [22].

Как видно из рис. 6, эти две гипотезы неплохо описывают экспериментальные точки. Были получены средние величины n и Δn при длине волны $\lambda = 633$ и 400 нм. Для двух групп исследованных образцов (для HERMES и LHCb) они оказались равными, соответственно, $n = 1,0306$, $\Delta n = 0,0008$ и $n = 1,0308$, $\Delta n = 0,0010$. Значения n , усредненные по всем образцам, равны: $n_{\text{ср}} \pm \sigma_n = 1,03120 \pm 0,00046$ и $1,03140 \pm 0,00066$ для этих двух групп.

В работе [19], используя гипотезу а), получили простую формулу зависимости $n(\lambda)$:

$$n(\lambda) = 1 + (n_q(\lambda) - 1) \frac{\rho}{\rho_q}, \quad (15)$$

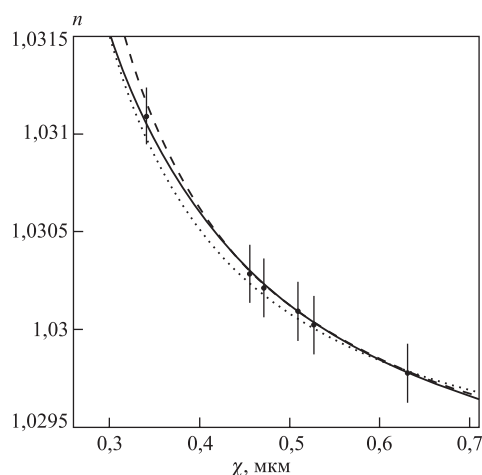


Рис. 6. Зависимость показателя преломления n от длины волны. Сплошная кривая соответствует (14); штриховая взята из [21]; точечная — из [22]

где n_q , ρ_q — показатель преломления и плотность кварца, а ρ — плотность аэрогеля. Для проверки формулы (15) были проведены измерения n при различных длинах волн. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3. Измеренные и рассчитанные по формуле (15) величины n

λ , нм	435,8	491,6	546,1	578,0
$n_{\text{изм}}$	1,0623	1,0618	1,0614	1,0610
$n_{\text{расч}}$	1,0621	1,0616	1,0612	1,0610

Как видно, расчетные и измеренные величины хорошо согласуются друг с другом.

Вклад хроматической аберрации в угловом разрешении RICH получается из соотношения

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\theta}\right)_{\text{хром}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_n / (n_{\text{ср}} - 1)}{\sqrt{N_e}}, \quad (16)$$

где N_e — среднее значение фотоэлектронов, а $n_{\text{ср}}$ и σ_n — среднее значение показателя и его среднеквадратическое отклонение.

Для спектрометра HERMES экспериментально было найдено, что $N_e = 9$ и, следовательно, $(\Delta\theta/\theta)_{\text{хром}} = 0,26\%$ [20].

Пропускающая способность аэрогеля. Одной из основных характеристик аэрогеля является его пропускающая способность $T(\lambda)$, определяемая как доля света, испускаемого из аэрогеля вперед. Она хорошо описывается формулой [23]:

$$T(\lambda) = A \exp\left(-\frac{Ct}{\lambda^4}\right), \quad (17)$$

где t — толщина аэрогеля в см; A и C — параметры, характеризующие поглощение и прозрачность аэрогеля; λ — длина волны света в нм. Величина C обычно выражается в $\text{мкм}^4/\text{см}$.

Из-за пористой структуры аэрогеля при прохождении через него света доминирующим процессом является рэлеевское рассеяние на частицах с размерами много меньшими, чем длина волны света. Оно особенно значительно в области коротких длин волн, так как его зависимость от длины волны выражается как $1/\lambda^4$.

Измерения $T(\lambda)$ обычно проводят на спектрофотометре. Ниже приведены результаты измерений пропускающей способности образцов аэрогеля, произведенных в различных институтах:

1) ИЯФ, ИК, Новосибирск, — размеры образца $200 \times 200 \times 50$ мм, $n = 1,0308$; рис. 7 [12];

2) МЭУ — размеры образца $110 \times 110 \times 10$ мм, $n = 1,030$; рис. 8 [24];

3) КЕК — размеры двухслойного образца 100×100 мм, толщина каждого слоя 7 мм, $n_1 = 1,050$, $n_2 = 1,055$; рис. 9 [15].

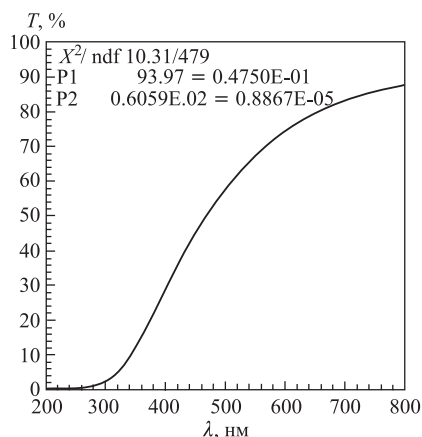


Рис. 7. Зависимость T от λ для образца аэрогеля размером $200 \times 200 \times 50$ мм

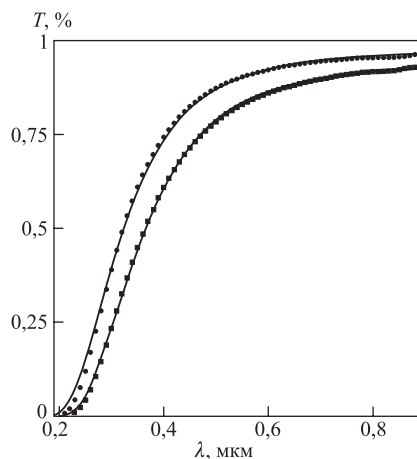


Рис. 8. Зависимость $T(\lambda)$ для образца аэрогеля размером $100 \times 100 \times 10$ мм [24]

На рис. 7 приведены данные, полученные впервые на таких толстых монокристаллических образцах аэрогеля, изготовленных новосибирской группой [12]. Приведенные данные свидетельствуют об их высокой прозрачности. Так, при $\lambda = 500$ нм пропускающая способность T составила около 60%. Для такого толстого образца (5 см) это довольно хороший результат.

На рис. 8 приведены результаты измерения $T(\lambda)$ образцов, изготовленных в MEW для установки HERMES в DESY [24]. Верхняя кривая соответствует наилучшей, а нижняя — наихудшей пропускающей способности 200 измеренных образцов. Кривые — результат фита по формуле (16).

На рис. 9 приведены результаты, полученные на впервые изготовленном двухслойном моноблоке аэрогеля с различными показателями преломления в слоях. Как видно, прозрачность моноблока весьма высокая. Открывается хорошая перспектива для использования многослойных аэрогелей.

Отметим, что монокристаллические аэрогелевые блоки имеют определенные преимущества перед многослойными, собранными из двух и более слоев при

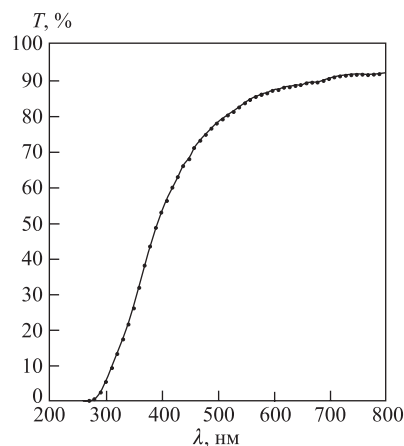


Рис. 9. Зависимость T от длины волны λ для двухслойного образца аэрогеля размером $100 \times 100 \times (7 + 7)$ мм с $n = 1,050$ и $1,055$ [15]

одной и той же толщине. Они свободны от возможных неоднородностей в показателе преломления, имеющих место в разных блоках, и от рассеяний на соприкасающихся поверхностях этих блоков. Отметим, что блоки аэрогеля толщиной до 5 см и особенно больших площадей будут, по-видимому, наиболее востребованы. Известно, что на боковых стыках соприкасающихся кусков аэрогеля, собираемых для формирования больших площадей, возникают неоднородности в выходе фотонов.

В работе [25] исследовали относительные выходы фотонов из двух слоев аэрогеля, в каждом из которых стыки кусков аэрогеля были смещены относительно $x = 0$ на -12 и $+11$ мм. Приведенные на рис. 10 результаты измерений показывают на провалы в выходе фотонов около этих стыков.

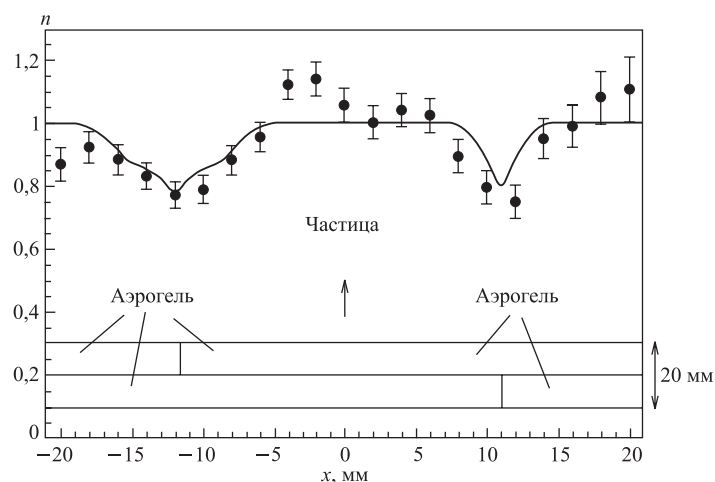


Рис. 10. Зависимость относительного числа фотонов, зарегистрированных на черенковском кольце, от места попадания заряженной частицы в радиатор, составленный из двух слоев с $n = 1,05$ и толщиной каждого слоя 1 см [25]

Таблица 4. Величины A и C в зависимости от толщины образцов аэрогелей, изготовленных разными производителями

Производитель	t , см	A	C , мкм ⁴ /см	n	Ссылка
Airglass	2	0,96	0,018	1,030	[4]
LLL	2	0,96	0,012	1,030	[27]
КЕК	2	0,96	0,011	1,029	[26]
ИЯФ, ИК, Новосибирск	4	0,96	0,006	1,030	[30]
MEW	1	0,964	0,009	1,030	[24]

В формуле (17) величина $1 - A$ описывает поглощение света в аэрогеле. Для высококачественных образцов аэрогеля величины A и C близки соответ-

ственно к 1 и 0. В табл. 4 приведены величины A и C для образцов аэрогеля, произведенных разными производителями.

Как видно из этой таблицы, лучшей пропускающей способностью обладают образцы, изготовленные новосибирской группой.

В работе [24] в рамках программы HERMES проведены масштабные исследования оптических свойств аэрогеля. Испытывались изготовленные в MEW образцы аэрогеля с размерами $11 \times 11 \times 1$ см и $n = 1,030$. На рис. 11, *a* наряду с $T(\lambda)$ приведено также $TF(\lambda)$, где TF — свет, испускаемый из аэрогеля во все стороны, т. е. весь свет, излученный в объеме аэрогеля за вычетом поглощенного. На рис. 11, *б* приведены зависимости распределения длин поглощения Λ_A и рассеяния Λ_S от длины волны λ , полученные по данным предыдущего рисунка. TF и T непосредственно связаны, соответственно, с длиной поглощения Λ_A и длиной затухания Λ , т. е. $1/\Lambda = 1/\Lambda_S + 1/\Lambda_A$:

$$TF = \exp\left(-\frac{t}{\Lambda_A}\right), \quad (18)$$

$$T = \exp\left(-\frac{t}{1/\Lambda_S + 1/\Lambda_A}\right) \quad (19)$$

или

$$T = \exp\left(-\frac{t}{\Lambda}\right). \quad (20)$$

Из рис. 11, *б* четко видно, что рассеяние доминирует в области длин волн до 600 нм ($\Lambda_S < \Lambda_A$), а поглощение доминирует при $\lambda > 600$ нм ($\Lambda_A < \Lambda_S$), оставаясь постоянным начиная примерно от 300 нм. Поглощение в области

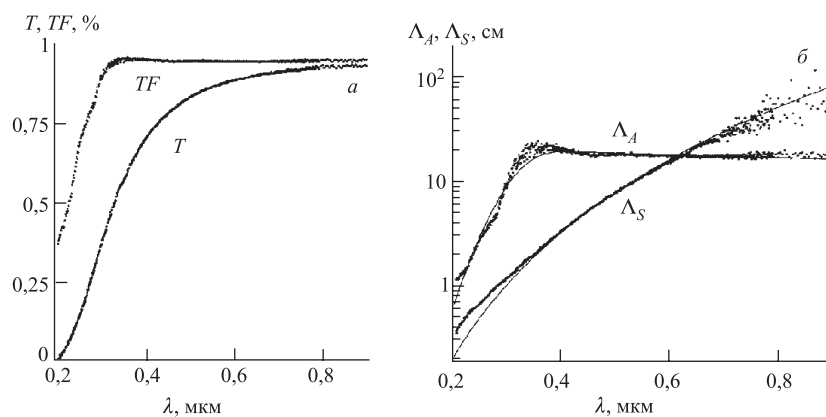


Рис. 11. Зависимости $TF(\lambda)$ и $T(\lambda)$ (*a*) и $\Lambda_A(\lambda)$ и $\Lambda_S(\lambda)$ (*б*) для образца с размером $110 \times 110 \times 10$ мм [24]

λ около 250 нм фитуруется λ^8 -зависимостью, а рассеяние при $\lambda > 350$ нм хорошо фитуруется λ^4 -зависимостью.

Измерения T были проведены с помощью спектрофотометра LAMDA-3B, а TF — с помощью интегрирующих сфер (рис. 12, а) в интервале длин волн $\lambda = 200\text{--}900$ нм с шагом 1 нм. С помощью интегрирующих сфер измерялось также обратное рассеяние (рис. 12, б).

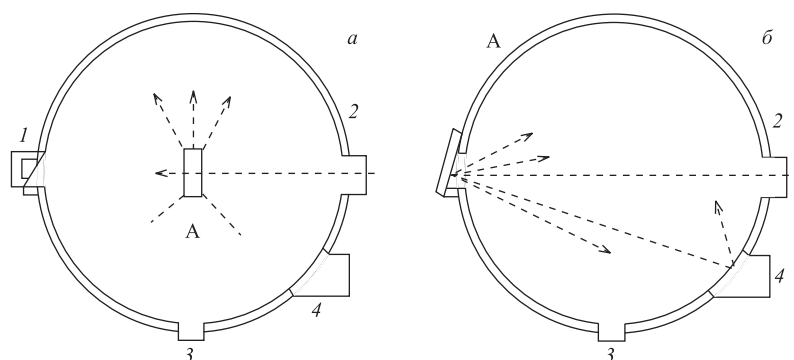


Рис. 12. Интегрирующие сферы: А — аэрогель; 1 — выходная заглушка; 2 — входное окно; 3 — отверстие для ФЭУ; 4 — отверстие для специальной заглушки

Знание процессов рассеяния очень важно, в особенности при проектировании RICH-детекторов, так как рассеянный свет попадает на фотодетектор под другим углом, чем не рассеянный, и при этом кольцо получается размытым. Поэтому высокоэнергетические фотоны, имеющие большую вероятность рэлеевского рассеяния, стараются убрать с помощью разных фильтров, например, в HERMES сразу за аэрогелем был установлен люцитовый экран толщиной 3,2 мм, который поглощал примерно половину рассеянного света [43] и при этом лишь незначительно влиял на не рассеянный свет.

Пропускающую длину аэрогеля Λ получают на основе результатов измерений пропускающей способности T (20). В табл. 5 приведены величины, полученные с использованием аэрогелей, изготовленных разными производителями.

Таблица 5. Зависимость пропускающей длины (в см) от показателя преломления

Показатель преломления	Литература						
	[4]	[13]	[14]	[15]	[26]	[27]	[28]
n	1,024	1,013	1,028	1,050–1,056	1,034	1,058	1,058
$\lambda = 400$ нм	—	2,2	4,6	4,1	2,5	1,5	1,38
$\lambda = 440$ нм	2,64	3,2				2,0	

В работе [32] измеряли длину поглощения Λ_A на образцах аэрогеля с $n = 1,050$, произведенных новосибирской группой, и с $n = 1,03$, произведенных в КЕК [15], в зависимости от длины волны (рис. 13, а). Как видно, изготовленные новосибирской группой аэрогели имеют очень большие Λ_A в широкой области λ .

Длина поглощения измерялась также в работе [11] на аэрогелях, произведенных в 1996 г. (SAN-96) и 2001 г. (SAN-01), при разных значениях показателя преломления: при $n = 1,008$ и $n = 1,050$ в области длин волн 250–400 нм и при $n = 1,13$ в области длин волн 250–550 нм (рис. 13, б). Как видно, данные при $n = 1,008$ и $1,050$ при $\lambda > 320$ нм мало отличаются друг от друга. Исключение составляют данные, полученные на аэрогеле с $n = 1,13$, который был изготовлен другим методом — спеканием при высокой температуре (около 1000 °С).

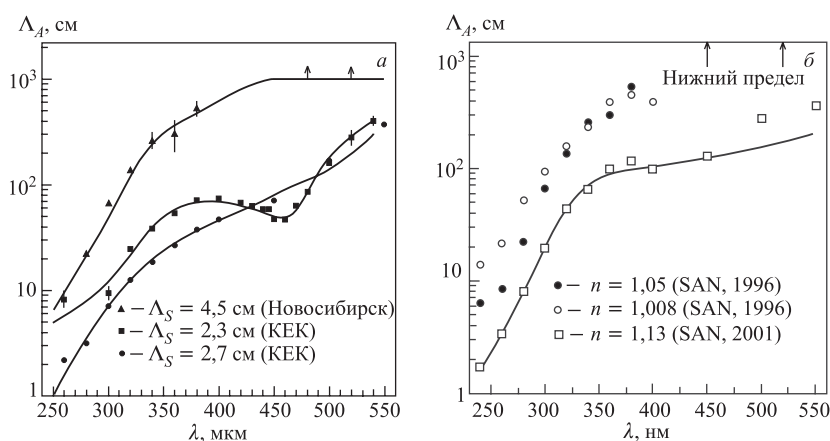


Рис. 13. Зависимость Λ_A от λ : а) при $\Lambda_S = 4,5; 2,3$ и $2,7$ см [32]; б) при $n = 1,05; 1,008$ и $1,13$ [11]

В этой же работе приведены длины рассеяния Λ_S при $\lambda = 400$ нм (табл. 6), полученные на основе результатов измерений пропускающей способности. Так как длина поглощения значительно больше длины рассеяния, то зависимость $T(\lambda)$ может быть выражена формулой рэлеевского рассеяния:

$$T(\lambda) = A \exp\left(-\frac{t}{\Lambda_S} \left(\frac{\lambda}{400}\right)^4\right) = A \exp\left(-\frac{Ct}{\lambda^4}\right). \quad (21)$$

Таблица 6. Зависимость длины рассеяния от показателя преломления [11]

n	1,008	1,03	1,05	1,08	1,13
Λ_S , мм	42	54	55	44	19

Эти результаты так же, как и приведенные позже $\Lambda_A = 5-7$ м, $\Lambda_S = 74$ мм [30], значительно отличаются от тех, что получены на аэрогелях КЕК [24]. Авторы [30] объясняют это различием как в технологиях изготовления аэрогеля, так и исходных материалов.

3. ПОРОГОВЫЕ АЭРОГЕЛЬНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ СЧЕТЧИКИ

Как отмечалось выше, аэрогели по величине своего показателя преломления заняли промежуточное положение между твердыми (жидкими) и газообразными веществами, поэтому они нашли широкое применение как радиаторы в ЧС для идентификации частиц в области энергии примерно от 1 до 10 ГэВ. В табл. 7 приведены пороговые энергии π -, K -мезонов и протонов как в аэрогелях, так и в некоторых других широко используемых радиаторах.

Таблица 7. Пороговые энергии (в ГэВ) для π -, K -мезонов и протонов в разных радиаторах

Радиатор	n	π -мезон	K -мезон	Протоны
N ₂	1,000296	5,7	20,3	38
CO ₂	1,000410	4,9	17,3	32
CF ₄	1,000488	4,5	15,8	30
C ₄ F ₁₀	1,001410	2,6	9,3	18
Аэрогель	1,010	1,0	3,5	7
Аэрогель	1,030	0,6	2,1	4
Аэрогель	1,050	0,5	1,6	3,1
Вода	1,330	0,2	0,8	1,4
Кварц	1,458	0,2	0,7	1,3

Аэрогели широко использовались и используются в пороговых ЧС, включая как небольшие тестовые, так и крупные экспериментальные установки на ускорителях [4, 6, 7, 13, 14, 19, 26, 32–36] и в космосе [37].

Эффективность счетчиков напрямую зависит от количества собираемых фотоэлектронов N_e (см. (6)). Она определяется не только оптическими свойствами аэрогеля (величиной n) и его толщиной (t), но и конкретной системой сбора света. Ниже мы рассмотрим системы сбора света, примененные в некоторых работах.

Пороговый аэрогельный черенковский счетчик использовался для разделения π - и K -мезонов в области импульсов 1,0–2,5 ГэВ/с в работе [13]. Исследовалась зависимость N_e от толщины аэрогеля, конфигурации счетчиков и фотоумножителей (ФЭУ) на аэрогельных блоках с размерами $16 \times 16 \times 2$ см

и $n = 1,013$ на пучках π -мезонов с импульсами 1,5 и 4 ГэВ/с. На рис. 14, *a* и *б* приведены распределения N_e в зависимости от толщины аэрогеля (t). Как видно, N_e с увеличением t плавно растет, достигая насыщения примерно при $t \approx 12$ см. При этом N_e равен 4 и 3 соответственно для π -мезонов с импульсом 4 и 1,5 ГэВ/с.

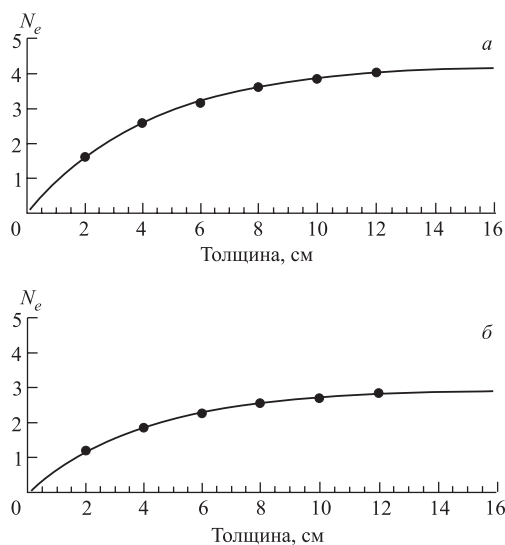


Рис. 14. Зависимость среднего числа фотоэлектронов N_e от толщины радиатора при импульсе 4 ГэВ/с (*a*) и 1,5 ГэВ/с (*б*)

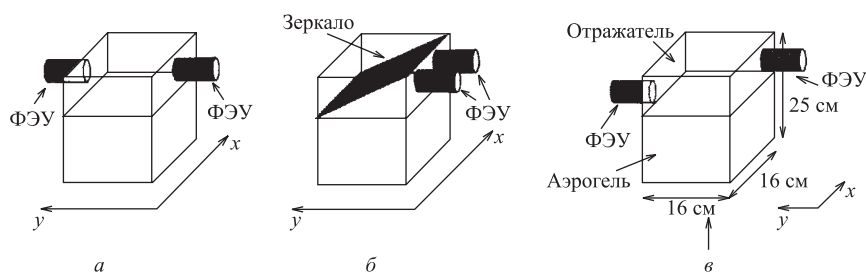


Рис. 15. Варианты сбора света, использованные в [13]

Были рассмотрены 3 варианта сбора света (рис. 15), в двух из которых собирается диффузно отраженный свет (варианты *a* и *в*), а в третьем (вариант *б*) собирается прямой свет, отраженный от зеркала. Аэрогелевые блоки помещались в непрозрачный черный ящик ($16 \times 16 \times 25$ см), в котором они

занимали активный объем, $16 \times 16 \times 14$ см. Внутренняя поверхность ящика в вариантах *a* и *в* покрывалась миллипоровым отражателем. Два двухдюймовых ФЭУ типа R3241, способных выделять одноэлектронные пики, были вставлены в специальные отверстия в верхней части ящика: симметрично относительно друг друга — вариант *a*, расположены рядом друг с другом в варианте с зеркалом — *б* и разнесены относительно серединной линии — вариант *в*. Использовалось плоское стеклянное зеркало, на которое напылялся тонкий слой из алюминия и MgF_2 . Больше всего фотоэлектронов собиралось в варианте с зеркалом, но здесь наблюдался их большой разброс в зависимости от места прохождения пучка. В варианте *a* N_e несколько ниже, чем в варианте *б*, но нет зависимости его от положения пучка. Хуже всего сбор света в варианте *в*.

Затем в варианте *в* ФЭУ R3241 были заменены на ФЭУ R2490-05 с динодами из мелкоструктурных сеток. Полученные при этом средние числа фотоэлектронов N_e приведены в табл. 8 в скобках. Как видно, они оказались примерно на 60 % меньше значений, полученных с помощью ФЭУ R3241.

Таблица 8. Среднее число фотоэлектронов N_e

P , ГэВ/с	Вариант <i>a</i>	Вариант <i>в</i>	Вариант <i>б</i>
1,5	$3,53 \pm 0,01$	$3,18 \pm 0,01$ ($1,95 \pm 0,05$)	$3,96 \pm 0,13$
4,0	$4,70 \pm 0,01$	$4,57 \pm 0,01$ ($2,74 \pm 0,08$)	$4,77 \pm 0,17$

В табл. 8 приведены средние числа фотоэлектронов, полученные в этих трех вариантах сбора света при импульсах π -мезонов 1,5 и 4,0 ГэВ/с. Однако этого количества N_e может быть недостаточно для четкого разделения частиц, поэтому надо либо увеличивать n , либо производить еще более прозрачные аэрогели с тем, чтобы можно было наращивать стопку из нескольких кусков аэрогеля.

В эксперименте E325 в КЕК [26] исследовались взаимодействия протонов с энергией 12 ГэВ с ядрами, в которых образующиеся ϕ -мезоны распадались на K^+K^- -мезоны и e^+e^- . Для отделения K -мезонов от π -мезонов в области импульсов 0,5–2,0 ГэВ/с использовался пороговый черенковский счетчик с радиатором из аэрогельных пластин с $n = 1,034$ и размерами $283 \times 200 \times 21$ мм. Счетчик был составлен из 16 сегментов с размерами 160×706 мм и охватывал активную площадь 2640×706 мм. Суммарная толщина радиатора равнялась 125 мм (6 пластин).

Для выбора оптимальной системы сбора света были исследованы различные варианты (рис. 16). Испытания проводились на пучке π -мезонов с импульсом 0,7 ГэВ/с.

Вариант *a* — обычная диффузная коробка, покрытая изнутри белой миллипоровой бумагой (М) с отражательной способностью лучше 93 %.

Вариант *b* имеет плоское зеркало (З), покрытое алюминизированным майларом и MgF_2 . Отражательная способность зеркала лучше 89 % для длин волн больше 200 нм. Эти два типа являются простейшими, но для их реализации требуются по два 5-дюймовых ФЭУ R1584-03. Для уменьшения количества ФЭУ были рассмотрены варианты *в* и *г*, использующие цилиндрические зеркала.

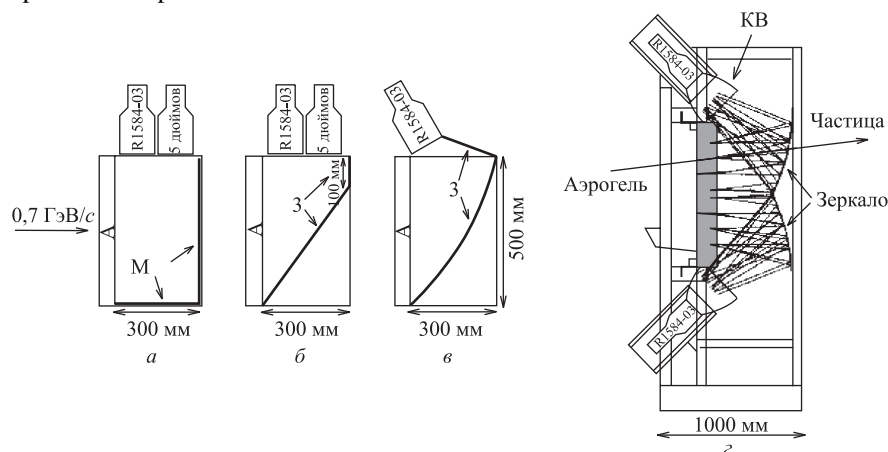


Рис. 16. Различные варианты сбора света, использованные в работе [26]: А — аэрогель; З — зеркало; М — миллипоровая бумага; КВ — конус Винстона; R1584-03 — 5-дюймовый ФЭУ

Вариант *a* дает наименьший сбор, возможно, также из-за того, что он не был адекватен геометрии данного эксперимента. Вариант *b* был бы приемлем, но здесь требуются два ФЭУ. Вариант *в* характеризуется спадом в области x около 300 мм, вызванным тем, что центр черенковского кольца находился за пределами ФЭУ. Окончательный выбор — вариант *г*, в котором геометрия оптики была оптимизирована для устранения указанного недостатка в варианте *в*, и, кроме того, для лучшего сбора света здесь были использованы конусы Винстона.

На рис. 17 приведены распределения по N_e в зависимости от места прохождения частицы через радиатор для разных типов сбора света.

В этой же работе [26] было обнаружено почти линейное увеличение N_e в зависимости от толщины радиатора t . Измерения были проведены при $t = 90$ и $t = 150$ мм. Благодаря выбранной системе сбора света и образцам аэрогеля с большой пропускающей длиной была достигнута 99-процентная эффективность отсечения π^+ -мезонов.

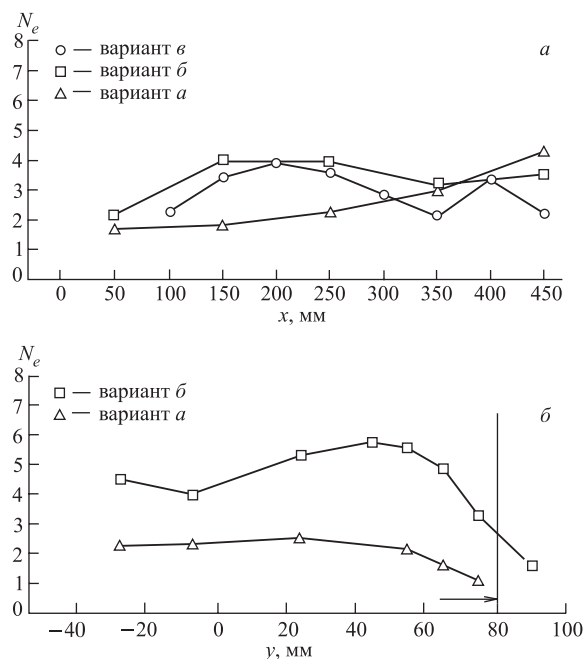


Рис. 17. Зависимость числа фотоэлектронов от места прохождения частицы N_e через аэрогельный блок с толщиной 90 мм

Впервые в крупном масштабе аэрогели были использованы в эксперименте TASSO в DESY [4], где кроме аэрогеля использовались также два газовых счетчика, заполненных газами C_4F_{10} и CO_2 и расположенных непосредственно за аэрогельным. Аэрогельный счетчик с сечением 110×35 см комплектовался из аэрогельных блоков с $n = 1,024$ и размерами $17 \times 17 \times 2,3$ см. Использование такой комбинированной системы черенковских счетчиков с разными энергетическими порогами для π^- , K^- -мезонов и протонов (см. табл. 7) в сочетании с времяпролетной техникой позволило эффективно разделять эти частицы.

Крупной установкой, где в большом количестве использовался аэрогель, был спектрометр BELLE в КЕК (Япония) [14]. На рис. 18, а изображен общий вид спектрометра, состоящего из 960 модулей в центральной ее части и 360 модулей в торцевой части.

Единичный модуль представлен на рис. 18, б. В соответствии с поставленной задачей — надежным разделением π^- и K^- -мезонов в области до 4 ГэВ/с — в рамках экспериментов по B -физике в КЕК были произведены и использованы около 2 м^3 аэрогеля с $n = 1,010; 1,015; 1,028; 1,030$, с размерами

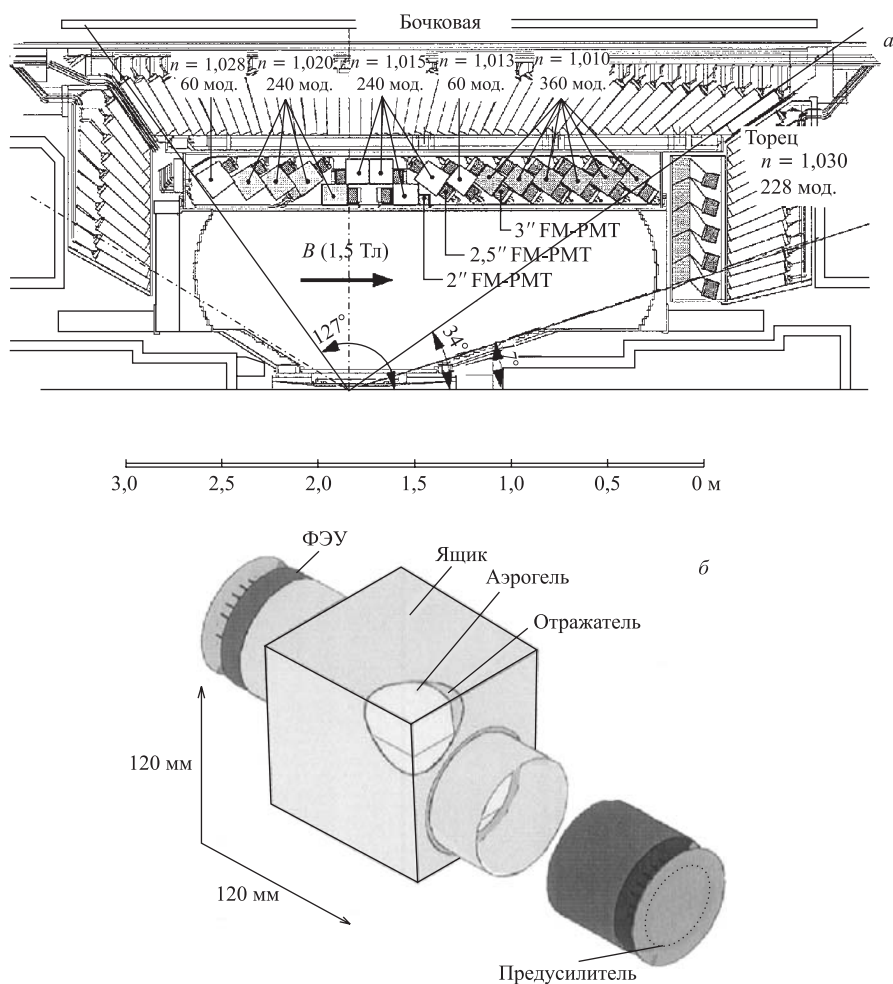


Рис. 18. Схемы спектрометра (а) и единичного модуля спектрометра (б) BELLE KEK [14]

120 × 120 × 24 мм. Такой диапазон n был продиктован необходимостью надежного разделения π - и K -мезонов во всей кинематической области, и расположение модуля с конкретным значением n определялся полярным углом (рис. 18, а).

Каждый единичный модуль был изготовлен из тонкого алюминиевого ящика, в котором были уложены пять слоев аэрогеля. Внутренние стенки

ящика покрывались диффузным отражателем (горетексный экран). Сбор света осуществлялся одним или двумя ФЭУ, диоды которых сделаны из мелкоструктурных параллельных сеток. Эти ФЭУ находились в оптическом контакте с аэрогельными блоками. Использовались ФЭУ разных диаметров: 3''(R6683), 2,5''(R6682) и 2''(R6681).

Выбор таких ФЭУ был обусловлен сильным магнитным полем, до 1,5 Тл, в котором они должны были работать. Эти ФЭУ с 19 диодами и большими окнами обеспечивают весьма высокий коэффициент усиления — порядка 10^8 . Количество фотоэлектронов N_e , полученное при тестировании единичного модуля на пучке π -мезонов с энергией 3,5 ГэВ/с, тоже было достаточно большим — так, на аэрогельных образцах с $n = 1,01, 1,015$ и $1,02$ оно равнялось, соответственно, 18,2, 20,3 и 20,3. Это позволило четко отделять пионы от протонов на уровне выше, чем на 3σ . Такая степень разделения сохранилась и при работе этих ФЭУ в сильных магнитных полях (1,5 Тл).

Новосибирской группой [29–33] была выполнена большая программа по использованию аэрогеля в пороговом черенковском счетчике ASHIPH на установке КЕДР на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4. Счетчик предназначался для разделения π - и K -мезонов в области импульсов 0,6–1,5 ГэВ/с. По ходу реализации программы ученые развивали технологию изготовления аэрогеля, улучшали его оптические свойства, совершенствовали систему сбора света. Изготовленные ими блоки аэрогеля являются сегодня не только наиболее крупными — $20 \times 20 \times 5$ см, но и лучшими по прозрачности. Некоторым их недостатком является гидрофильность. В начале работ предполагалось проводить сбор света напрямую с помощью ФЭУ фирмы «Hamamatsu», диоды которых выполнены из мелкоструктурных параллельных сеток. Однако нужно было большое количество таких ФЭУ. Учитывая их дороговизну, авторы разработали систему сбора света с помощью шифтеров, позволившую существенно уменьшить необходимое количество ФЭУ, а также давшую возможность удлинить размеры счетчика и использовать ФЭУ с малыми размерами фотокатода.

На рис. 19, *a* изображен общий вид системы ASHIPH. Спектрометр ASHIPH состоит из двухслойных центральной (цилиндрической) и двух торцевых частей, каждая из которых составлена из индивидуальных счетчиков. Всего 160 счетчиков, в том числе 80 в центральной и 80 в торцевых частях. На рис. 19, *б* представлен один из этих счетчиков, используемых в торцевой части. Между двумя аэрогельными пластинами с $n = 1,05$ помещались спектросмещающие пластины (ССП) на основе ВВQ, которые переизлучали свет с длинами волн $\lambda = 260$ – 420 нм в волны с максимумом в спектре при $\lambda = 500$ нм, что хорошо соответствовало используемому ФЭУ на микроканальных пластинах с мультищелочным фотокатодом. Система могла работать в магнитном поле до 1,5 Тл. Среднее число фотоэлектронов оказалось равным приблизительно 8.

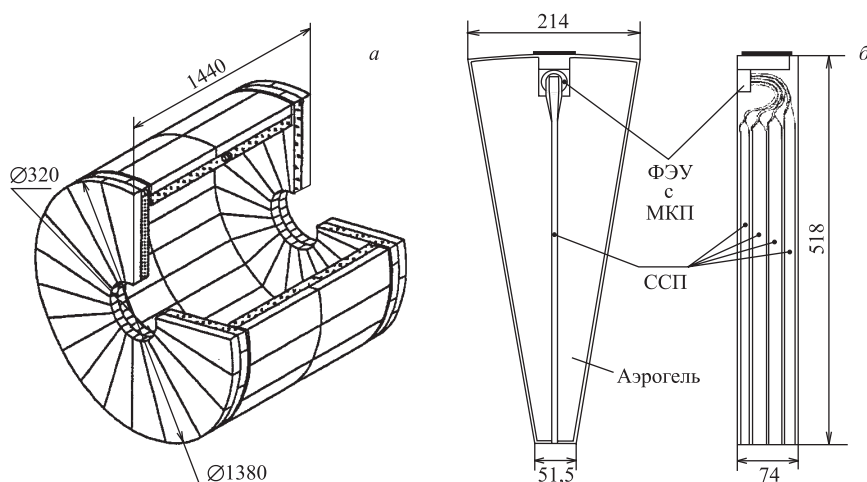


Рис. 19. а) Схема ASHIPH KEDR [32]; б) счетчик торцевой части [32]

Удалось надежно разделять π - и K -мезоны с импульсами 0,6–1,5 ГэВ/с. Так, при импульсе $P = 1,2$ ГэВ/с уровень их разделения составил $4,5\sigma$, а при $P = 0,86$ ГэВ/с — $4,7\sigma$. Общий объем аэрогеля 1000 л.

Пороговый черенковский счетчик с радиатором из аэрогеля, изготовленным в ЛЯП ОИЯИ, был испытан на космических частицах [8] и на пучках заряженных частиц с импульсами в интервале 0,4–2,5 ГэВ/с [19]. На рис. 20, а приведена схема аэрогелевого счетчика, использованного в обоих случаях.

Исследовались образцы аэрогеля с $n = 1,054$ и $1,02$ с размерами $6 \times 6 \times 3$ см (в форме параллелепипеда) и диаметром 7 см при толщине 2–3 см (в форме диска). Измерения показали, что пропускающая длина для аэрогеля с $n = 1,054$ $\Lambda \approx 3,9$ см, а среднее число фотоэлектронов N_e с $n = 1,054$ и толщиной $t = 6$ см (два образца) равно 6,3, а для аэрогеля с $n = 1,02$ $N_e = 4,7$. Этого количества фотоэлектронов было достаточно для регистрации частиц с $\beta \rightarrow 1$ с эффективностью 95,5%. С помощью такого счетчика в области промежуточных энергий можно разделять близкие по массе частицы (пионы и мюоны).

В работе [19] была измерена эффективность регистрации пионов и протонов в зависимости от их импульсов начиная с импульсов, близких к порогу регистрации π -мезонов (рис. 20, б). Как видно, эффективность регистрации пионов с $P > 1$ ГэВ/с составила около 97%, а протонов с $P = 1,3$ и 2,5 ГэВ/с составила, соответственно, 4 и 4,5%. Такая ненулевая эффективность в подпороговой области наблюдается и в других работах (см., например, ссылки

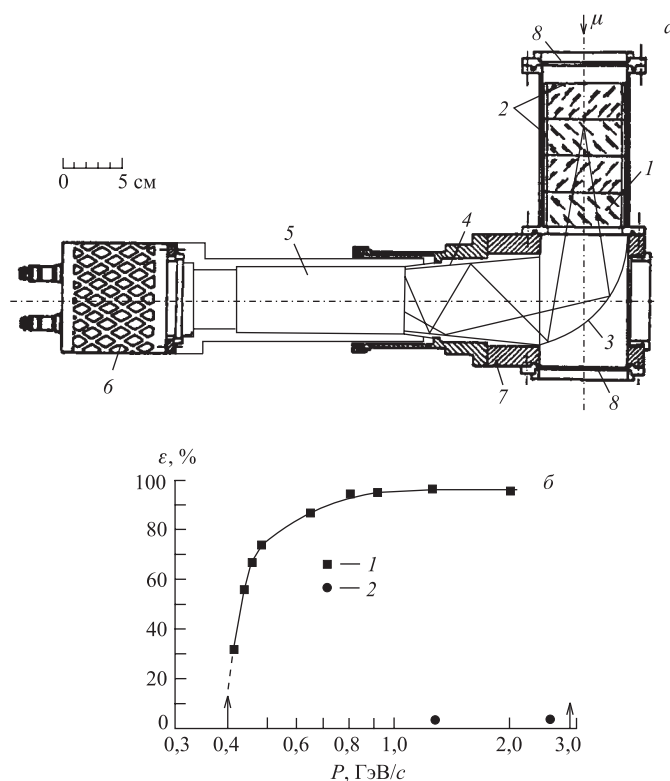


Рис. 20. *a)* Аэрогельный пороговый черенковский счетчик: 1 — аэрогель; 2 — алюминизированный майлар; 3 — цилиндрическое зеркало с радиусом 92 мм; 4 — коническое зеркало; 5 — ФЭУ ХР4222В в работе [8] и ХР2020 в работе [19]; 6 — делитель напряжения; 7 — корпус; 8 — входное и выходное окна. *б)* Эффективность регистрации пионов (1) и протонов (2) в зависимости от их импульсов. Стрелками указаны пороговые значения импульсов этих частиц

на них в работе [19]). Наличие отсчетов ниже порога связывают со сцинтилляциями в аэрогеле, δ -электронами, черенковским излучением из материалов, оказавшихся, кроме аэрогеля, на пути регистрируемых частиц.

Пороговый аэрогельный черенковский счетчик использовался на установке PHENIX в RHIC Брукхейвенской национальной лаборатории (БНЛ), США, международной коллаборацией в составе БНЛ, ЛВЭ ОИЯИ и Института физики Университета Тцукува, Япония [34, 35]. Он был необходим наряду с времяпролетной системой и RICH-детекторами для расширения области идентификации частиц на установке. Из аэрогелевого радиатора была

составлена стенка площадью $\approx 1 \times 4$ м, состоящая из 160 модулей. Окончательный вариант счетчика определялся после проведения большого комплекса работ, включающего в себя выбор оптимальной системы сбора света; аэрогеля, изготовленного разными производителями — КЕК; ИЯФ и ИК, Новосибирск; ЛЯП ОИЯИ; показателя преломления в интервале 1,045–1,007; ФЭУ; типа отражателя.

В результате для сбора света был выбран вариант с интегрирующим ящиком с двумя ФЭУ типа 3''6233-01Н с квантовой эффективностью $\approx 30\%$ при длине волны 420 нм, небольшим темновым током и высоким коэффициентом сбора, $\approx 10^7$, а в качестве радиатора был выбран аэрогель с $n \approx 1,012$, изготовленный в МЭУ [13, 14]. Прототипы счетчиков испытывались на пучках нуклотрона ЛВЭ ОИЯИ [34] и протонного синхротрона КЕК [35]. Схемы прототипов представлены на рис. 21, а и б. На схеме рис. 21, а ФЭУ находились в непосредственном контакте с аэрогелем (как на спектрометре BELLE), а на рис. 21, б — в интегрирующем ящике [37], внутренняя поверхность которого покрывалась горетексным отражателем.

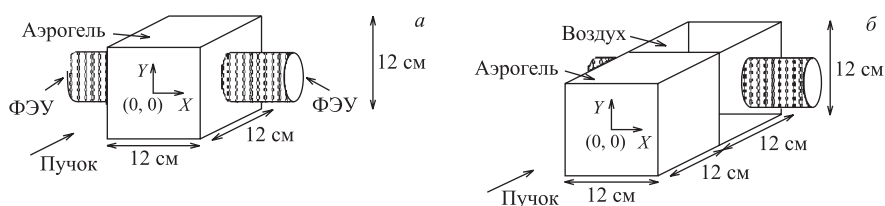


Рис. 21. а) Схема прототипа с ФЭУ в непосредственном контакте с аэрогелем; б) схема прототипа с ФЭУ в интегрирующем ящике

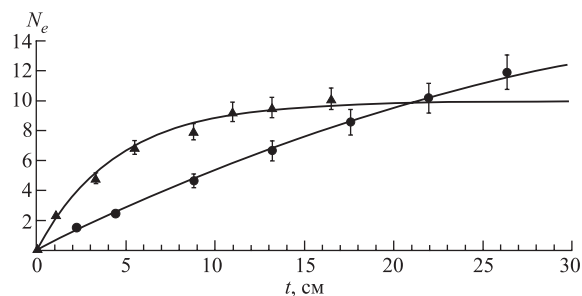


Рис. 22. Зависимость среднего числа фотоэлектронов N_e от толщины аэрогелевого блока

Результаты измерений числа фотоэлектронов N_e в зависимости от толщины аэрогелевых блоков приведены на рис. 22, где кружки — данные, полученные по схеме рис. 21, а, а треугольники — данные, полученные по схеме

рис. 21, б. При этих измерениях использовались аэрогели с $n = 1,017$, и толщина аэрогелевого блока t могла увеличиваться вдоль пучка до 26 см. Как видно, N_e в варианте *a* пропорционально толщине аэрогелевого блока, а в варианте *б* достигает насыщения при $t \approx 13$ см. В окончательном варианте $t = 12$ см.

Проводилась проверка на однородность световых выходов из аэрогеля в зависимости от места попадания пучка в аэрогель. Суммарный сбор света от обоих ФЭУ менялся в пределах не более 15%. Испытания, проведенные в ЛВЭ ОИЯИ, показали также высокий выход фотоэлектронов, его хорошую однородность по апертуре.

Использование аэрогелевой стенки позволит расширить область идентификации K -мезонов почти до 5 ГэВ/с, тогда как в существующей установке область идентификации π -, K -мезонов доходила до ≈ 2 ГэВ/с.

Пороговый аэрогелевый счетчик в составе альфа-магнитного спектрометра (АМС-01) был использован на космическом корабле «Шаттл» во время его 10-дневного полета [37]. Во многом он, как и весь спектрометр, рассматривался как тестовый, подготовительный перед запуском основного спектрометра АМС-02, который запланирован на 2007 г. и должен работать в течение длительного времени в космосе.

Одной из главных задач, поставленных перед АМС, является поиск антиматерии, в том числе антипротонов и антиядер. При этом поиск антипротонов будет проводиться на фоне большого числа электронов. Ожидаемое соотношение числа электронов к числу антипротонов составляет около 10^2 . Основной задачей АМС-01 было расширение области разделения электронов и протонов до более высоких энергий, поэтому был выбран аэрогелевый черенковский счетчик с $n = 1,036$ с порогом для регистрации антипротонов при 3,5 ГэВ/с.

На рис. 23, а изображена схема одного из модулей счетчика [37]. Он представлял собой блок из 8 аэрогелевых пластин размером $110 \times 110 \times 11$ мм, обернутых тремя слоями тефлона. Всего было 168 модулей. Из них были составлены два слоя по 8×10 и 8×11 ячеек. Чтобы уменьшить потери света из-за рэлеевского рассеяния и поглощения, в середине каждого блока помещался шифтер, позволявший трансформировать фотоны с короткими длинами волн около 300 нм в фотоны с длинами волн, максимум которых приходился на 420 нм, что соответствовало максимуму эффективности использованных ФЭУ R-5900. Применение шифтера позволило увеличить сбор фотоэлектронов на $\approx 40\%$. Во избежание прямого контакта шифтера с аэрогелевыми пластинами шифтер заворачивался полиэтиленовой пленкой толщиной 25 мкм. Для увеличения сбора света использовался конус Винстона (КВ). Во время тестовых испытаний счетчика средняя пороговая чувствительность каждого модуля составляла $0,37 \pm 0,16$ фотоэлектронов. Измеренное число фотоэлектронов по слоям оказалось равным $4,02 \pm 0,02$ и $3,51 \pm 0,02$. На рис. 23, б приведено

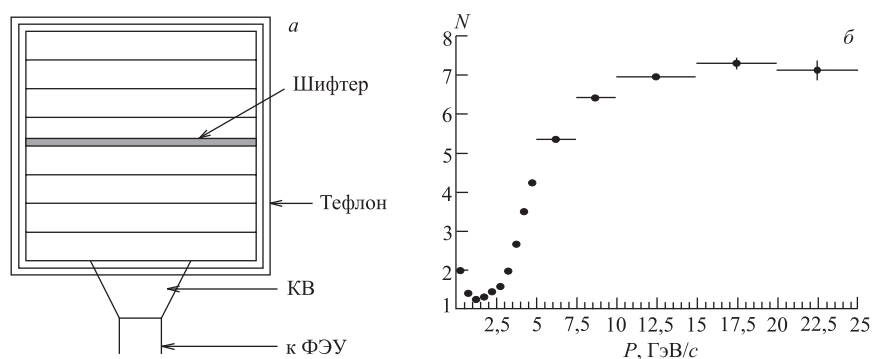


Рис. 23. а) Схема одного из модулей аэрогелевого счетчика АМС-01 [37]. б) Зависимость числа срабатываний N АМС-01 от импульса протонов [52]

распределение числа срабатываний счетчика от протонов N в зависимости от импульсов протонов [52]. Выше порога (для протонов $\approx 3,5$ ГэВ/с) характер кривой такой, как и должен быть, т. е. $N \sim 1 + (m/p)^2$.

Ниже порога вклад в N_e дают, как отмечалось выше, сигналы от сцинтилляций в аэрогеле, δ -электронов, черенковского излучения в шифтере и фотоумножителе, и, по оценке авторов [52], он составляет в среднем 0,5 фотоэлектрона на модуль.

4. ЧЕРЕНКОВСКИЕ СЧЕТЧИКИ КОЛЬЦЕВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Впервые возможность использования аэрогелевых радиаторов в дифференциальных счетчиках Черенкова экспериментально была показана в работе [38]. На рис. 24 изображена схема специальной черенковской камеры, с помощью которой были получены фотографии колец ЧИ на аэрогеле.

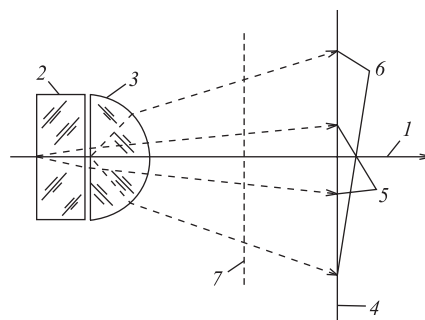


Рис. 24. Схема специальной черенковской камеры: 1 — пучок электронов (ядер); 2 — аэрогель; 3 — фокусирующая линза; 4 — пленка; 5 — кольцо ЧИ от аэрогеля; 6 — кольцо ЧИ от линзы (3); 7 — поляризационный фильтр

Фотографии колец черенковского излучения на аэрогеле с $n = 1,068$ были получены с использованием коллимированных пучков ядер углерода с энергией 3,6 ГэВ/нуклон на синхрофазотроне ОИЯИ (рис. 25, *а*) и пучков электронов с энергией 350 МэВ в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера на пучке ВЭПП-3 (рис. 25, *б*). Аэрогели имели толщину 2–3 см и $n = 1,025–1,070$. На рисунках четко видны кольца ЧИ как от электронов, так и от ядер углерода (кольца от линз здесь не приведены), а также центральные круги от пучка ядер углерода (рис. 25, *а*) и от пучка электронов (рис. 25, *б*). Интегральный поток ядер углерода через аэрогель составлял около 10^9 , а поток электронов — около 10^{11} .

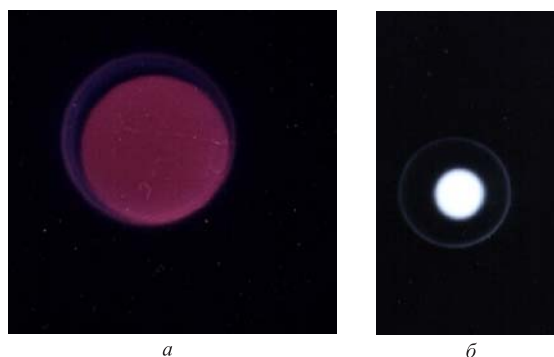


Рис. 25. Кольцо ЧИ, полученное на аэрогеле: *а*) с $n = 1,068$ от ядер углерода с энергией 3,6 ГэВ/нуклон; *б*) с $n = 1,050$ от электронов с энергией 350 МэВ

В работе [38] дана аналитическая связь между показателем преломления аэрогеля n и длиной волны, полученная с использованием измеренной величины n аэрогеля при $\lambda = \lambda_0$ и известных зависимостей $n(\lambda)$ составляющих аэрогеля, т. е. кварца SiO_2 и воздуха. Вычисленная величина дисперсии Δn в диапазоне 360–720 нм составила $\Delta n = 1,6 \cdot 10^{-3}$, что находится в согласии с более поздними и точными измерениями (см., например, рис. 6).

В работе [39] показана реальность использования аэрогеля для получения черенковских колец в RICH-детекторе. На рис. 26, *а* приведена схема установки для измерения черенковских колец от аэрогеля с $t = 2$ см и $n = 1,029$ на пучке π -мезонов ЦЕРН с импульсом 10 ГэВ/с. Аэрогель, зеркало (З) и фотоприемник помещались в алюминиевый ящик, внутренняя поверхность которого была зачернена. Ящик продувался азотом. Фотоны, выходящие из аэрогеля, с помощью сферического зеркала направлялись на фотоприемник. Зеркало имело фокусное расстояние 45 см, поэтому на фокальной плоскости зеркала ожидалось два кольца ЧИ: одно диаметром 11 см от аэрогеля,

а другое — диаметром около 2 см от слоя азота между зеркалом и фотоприемником.

Свет собирается либо единичным ФЭУ ЕМІ 9223 с бищелочным фотокатодом (рис. 26, *а*), либо матрицей из 114 ФЭУ (R268) (рис. 26, *б*). Оба типа ФЭУ имели диаметр 1 дюйм. Для повышения эффективности сбора фотоэлектронов ФЭУ ЕМІ 9223 был заменен на 46-мм ФЭУ Н1332Q, у которого квантовый выход выше, чем у первого ФЭУ.

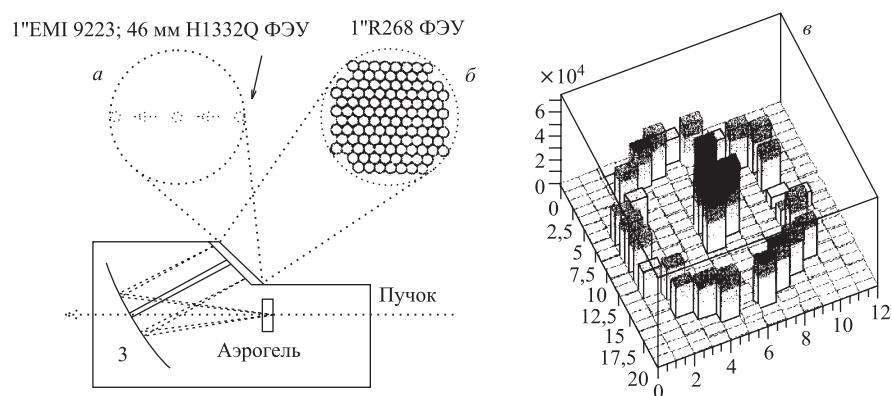


Рис. 26. Схема установки для измерения колец ЧИ [39]: *а*) единичный ФЭУ типа 1"ЕМІ 9223 или 46-мм Н1332Q; *б*) матрица из 114 ФЭУ типа 1"R268. *в*) Распределение ЧИ: внешнее кольцо — от аэрогеля; группировка в центре — от азота [39]

На рис. 26, *в* показаны распределения колец, видны кольцо от аэрогеля (по периферии) и группировка от азота (в центре). На основе этих распределений были получены средние величины радиусов колец, равные 11,4 см, и числа фотоэлектронов $N_e = 14,9$ от аэрогеля. Такого количества фотоэлектронов в принципе достаточно для экспериментов на LHCb и HERMES, и это послужило основанием для принятия коллективами ученых HERMES и LHCb решения в пользу аэрогельных RICH.

Спектрометр HERMES [40–43] является установкой, в которой впервые полномасштабно функционировали RICH-детекторы, использующие в качестве радиатора аэрогель. Программой исследований предусматривалось изучение спиновой структуры нуклонов в процессах глубоконеупругого рассеяния поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах на электронном кольце HERA с энергией 27,5 ГэВ. На спектрометре должны были регистрировать события с рассеянным электроном/позитроном в совпадении с адроном. Требовалось надежное разделение π - и K -мезонов в традиционно трудной для идентификации частиц области энергий 1–20 ГэВ. Частицы

с энергией выше 10 ГэВ идентифицировались с помощью RICH-детектора с газовым радиатором, а в области нескольких ГэВ — наиболее интересной части импульсного спектра частиц на спектрометре HERMES — как нельзя лучше подходил аэрогель. Вследствие этого на спектрометре были использованы два радиатора: аэрогель с $n = 1,03$ и тяжелый газ C_4F_{10} с $n = 1,0014$. На спектрометре использовались 2 симметричных RICH-детектора, один из которых изображен на рис. 27.

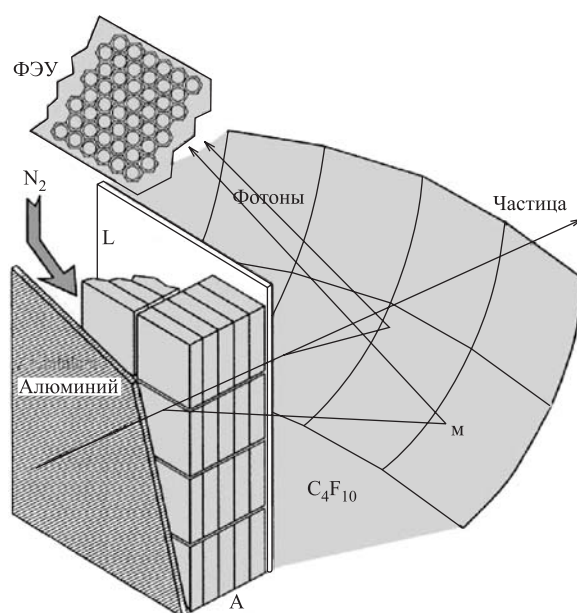


Рис. 27. Схема установки RICH-детектора HERMES [41]: А — аэрогель; L — люцитовый экран; ФЭУ — матрица из 1934 ФЭУ типа XP-1911/UV с активным размером фотокаатода 15 мм; М — зеркало

Ко времени проектирования установки HERMES уже были достигнуты большие успехи в изготовлении высокопрозрачных гидрофобных образцов аэрогеля [13] и была продемонстрирована возможность регистрации черенковских колец электронными методами [39].

Аэрогельный радиатор был составлен из аэрогельных пластин с размерами $11,4 \times 11,4 \times 1$ см, произведенных фирмой MEW [14]. Каждый радиатор состоял из 5 таких образцов, сгруппированных в блоки по 5 столбцов и 17 рядов. Радиатор помещался в контейнер, изготовленный из тонкого алюминиевого листа толщиной 1 мм, который служил также входным окном. На обратной стороне радиатора устанавливался люцитовый экран толщиной 3,2 мм,

который поглощал примерно половину высокоэнергетических рассеянных фотонов и был прозрачным для фотонов с $\lambda > 290$ нм (см. рис. 27) [43]. Свободное пространство за аэрогелевым радиатором заполнялось газом C_4F_{10} . Фотоны от обоих радиаторов с помощью 8 сферических зеркал (общей площадью около 250×80 см²) с радиусом 2,2 м собирались на фотодетектор, составленный из плотно упакованных ФЭУ-Филипс ХР 1911-UV/A размером 3/4 дюйма с активным фотокатодом диаметром 15 мм, продвинутым в зеленую область. Размеры пикселей составили 23,3 мм и, соответственно, однофотонное угловое разрешение — около 6 мрад. Всего — около 4000 ФЭУ на всю RICH-систему. Каждый ФЭУ для уменьшения мертвой зоны снабжался конусом Винстона из алюминизированного майлара с отражательной способностью 90 %.

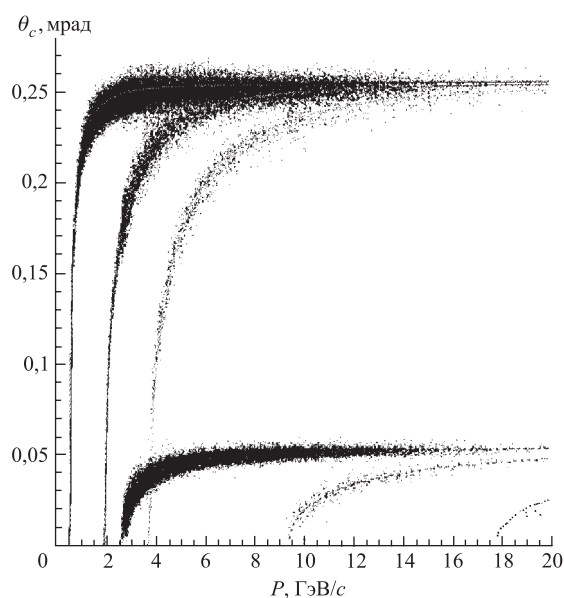


Рис. 28. Распределения по восстановленным углам ЧИ θ_c на RICH-детекторах HERMES в зависимости от импульсов π -, K -мезонов и протонов

На рис. 28 приведены распределения по восстановленным углам ЧИ в зависимости от импульсов π -, K -мезонов и протонов. Верхние 3 контура соответствуют событиям на аэрогелевом радиаторе, а нижние — на газовом. Контуров слева направо соответствуют π -, K -мезонам и протонам [42].

Были отобраны такие события, в которых имелся только одиночный рассеянный электрон или адрон с импульсом $P < 2,8$ ГэВ/c. На рис. 29, а и б

изображены распределения колец ЧИ от одиночных электронов и адронов ($P < 2,8$ ГэВ/с) соответственно. На рис. 29, *а* видны кольца от аэрогельного (внешнее кольцо) и газового (внутреннее кольцо) радиаторов, а на рис. 29, *б*, естественно, видно только кольцо от аэрогеля [42].

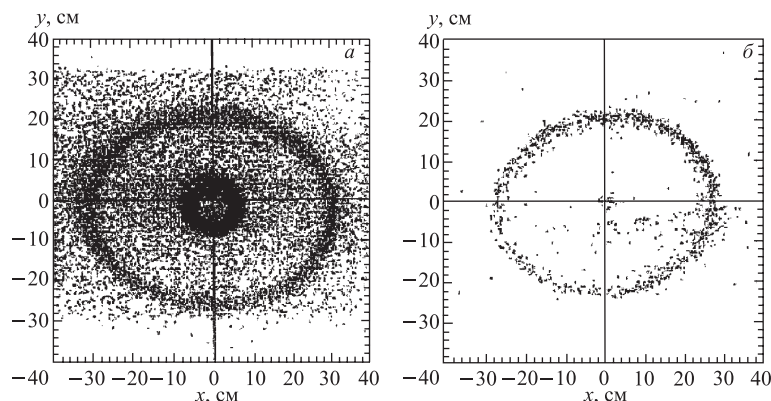


Рис. 29. Распределения колец ЧИ от одиночных электронов (*а*) и адронов (*б*) с импульсом $P < 2,8$ ГэВ/с [43]. Размеры по осям даны в см

Измеренное однофотонное разрешение составило около 7 мрад. При ожидаемых количествах сработавших ФЭУ на кольцо, равных 8 и 12 соответственно для аэрогельного и газового радиаторов, угловое разрешение на трек составило 2,4 и 1,6 мрад. Расчеты показали, что наибольший вклад в разрешение вносят конечные размеры пикселей (5,3 мрад); рассеяния внутри аэрогеля, вызванные локальными неоднородностями и несовершенством поверхности (2,7 мрад); отличающиеся величины n в соседних образцах аэрогеля (2,7 мрад). Хроматическая дисперсия составила 1,4 и 0,6 мрад соответственно для аэрогельного и газового радиаторов [43]. Авторы [43] надеются улучшить угловое разрешение детектора за счет использования аэрогелей больших размеров, более толстых и прозрачных, а также пикселей с лучшим разрешением и 1/2-дюймовых ФЭУ.

РICH-детекторы спектрометра ЛНСб. На большом адронном коллайдере ЦЕРН предусмотрено скруплезное исследование CP -асимметрии в распадах B -частиц на большой статистике. Для этого специально создается одноплечевой передний спектрометр ЛНСб (рис. 30) [44]. Ключевым моментом при изучении распадов B -частиц является надежная идентификация продуктов их распада — π - и K -мезонов, различные аспекты которой были рассмотрены в работах [45].

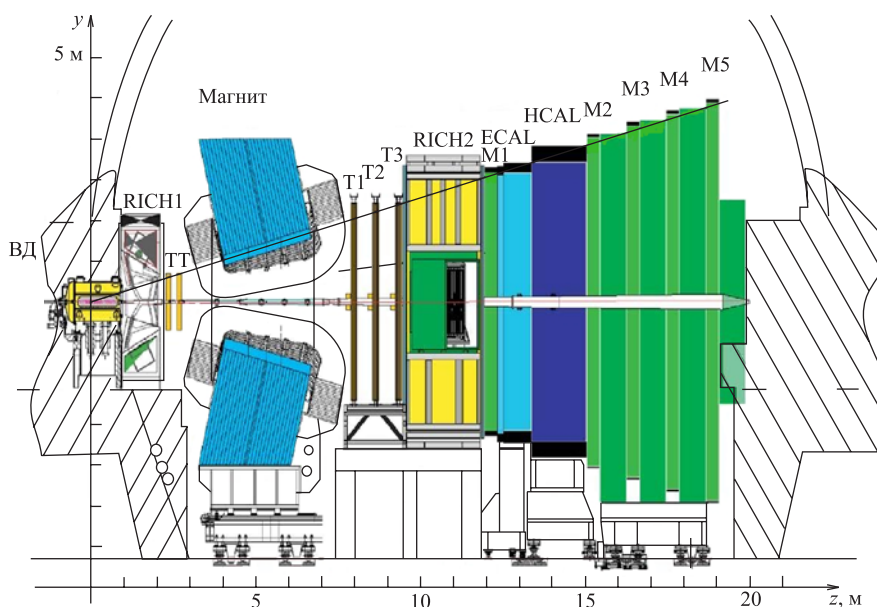


Рис. 30. Схема спектрометра LHCb: ВД — вершинный детектор; RICH1 и RICH2 — черенковские счетчики кольцевого изображения; ТТ, Т1, Т2, Т3 — трековые станции; M1–M5 — мюонные стенки; HCAL и ECAL — адронный и электромагнитный калориметры соответственно

Для разделения π - и K -мезонов в широкой области импульсов от 1 до ≈ 100 ГэВ/с были выбраны два RICH-детектора. Детектор RICH1 будет использовать 2 радиатора: аэрогель с $n = 1,030$ и газ C_4F_{10} с $n = 1,0014$, а RICH2 — газ CF_4 с $n = 1,0005$. Схематично RICH1 и RICH2 изображены, соответственно, на рис. 31, а и б [44].

RICH1 с его телесным углом 300 мрад (по горизонтали) \times 250 мрад (по вертикали) будет охватывать большинство низкоэнергетических частиц, а RICH2 с его телесным углом 120 мрад (по горизонтали) \times 100 мрад (по вертикали) — высокоэнергетические частицы.

Аэрогельный радиатор позволяет идентифицировать π -, K -мезоны в области до 10 ГэВ/с, C_4F_{10} — 70 ГэВ/с, а CF_4 — 100 ГэВ/с (рис. 32) [46].

В RICH1 будут использоваться аэрогельные блоки с $n = 1,030$, произведенные новосибирской группой [12], обладающие уникальными оптическими свойствами. Так, например, параметр C , характеризующий прозрачность аэрогеля (см. (16)), равен $0,006$ мкм⁴/см. Они обладают также рекордно большими размерами: $200 \times 200 \times 50$ мм. Такие толстые образцы нигде еще не производили. Эти аэрогельные блоки являются и радиационно стойкими, что

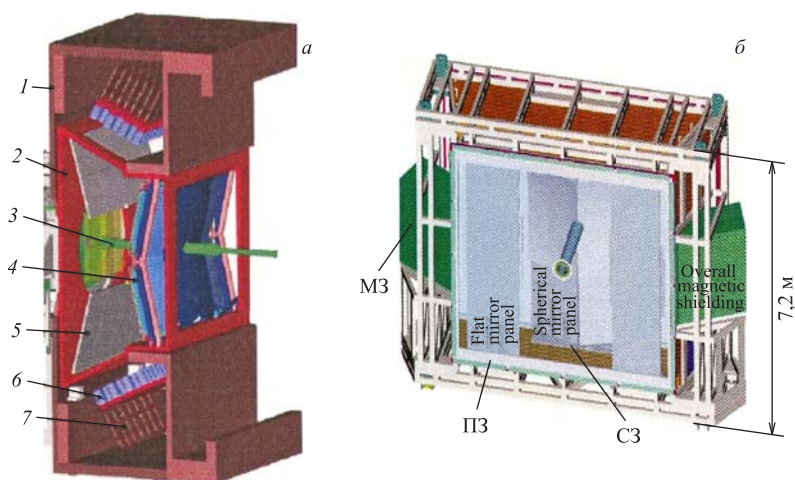


Рис. 31. Схемы детекторов RICH1 (а) и RICH2 (б): 1 — магнитная защита; 2 — газовый объем; 3 — канал пучка; 4 — сферическое зеркало; 5 — плоское зеркало; 6 — фотодетекторы; 7 — считывающая электроника, ПЗ и СЗ — плоское и сферическое зеркала; МЗ — магнитная защита

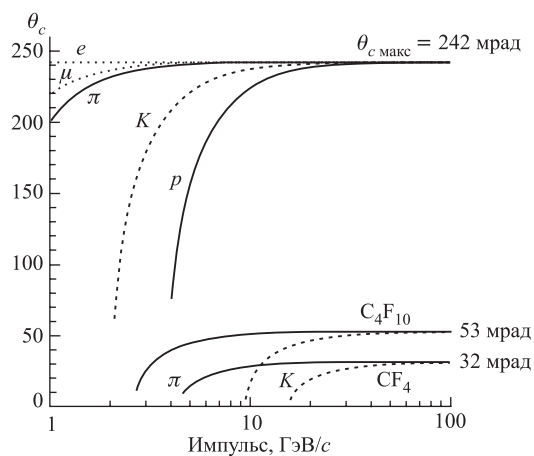


Рис. 32. Зависимость углов ЧИ от импульсов e , μ , π -, K -мезонов и протонов (p) в трех различных радиаторах [46]

очень важно в условиях работы спектрометра ЛНСб. При накопленной дозе радиации до $5,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ нейтронов (или протонов) или γ -квантов с дозой до $\approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ Гр}$ никаких изменений в прозрачности не было обнаружено [44].

Таблица 9. Свойства радиаторов, планируемых на RICH LHCb [44]

Свойства	Радиатор		
	Аэрогель	C ₄ F ₁₀	CF ₄
Длина радиатора, мм	50	850	1960
Показатель преломления	1,03	1,0014	1,0005
Число фотоэлектронов/трек	6,8	31	23
Угловое разрешение, мрад	2,6	1,6	0,7
Интервал импульсов, ГэВ/с	2–10	< 65	< 100

В табл. 9 приведены свойства трех радиаторов RICH LHCb.

Аэрогелевые блоки толщиной 50 мм имеют несомненные преимущества перед собранными из нескольких слоев с такой же суммарной толщиной. Так как аэрогелевые блоки, изготовленные новосибирской группой, являются гидрофильными, были проведены специальные их испытания для изучения влияния поглощенной влаги на их оптические свойства. Испытания показали, что поглощение влаги несколько ухудшает прозрачность аэрогеля (при этом выход фотоэлектронов за 3 года уменьшился на 18% [31]). Но также было показано, что первоначальная прозрачность полностью восстанавливается после отжига блоков аэрогеля при температуре около 500 °С. В процессе эксплуатации аэрогелевых радиаторов на LHCb будут приниматься специальные меры для устранения воздействия влаги на радиаторы.

Для сбора света в RICH1 будут использоваться плоская и сферическая системы зеркал, имеющие по 8 сегментов. Сферические зеркала с размерами 410 × 600 мм, с радиусом кривизны 2700 мм были изготовлены с основой из Ве толщиной 3 мм, покрытой тонким слоем (0,3 мм) стекла. Выбор Ве был продиктован его малым атомным номером, что было необходимо для минимизации вторичных взаимодействий в спектрометре. На основу зеркал наносилось специальное покрытие из Al, SiO₂ и HFO₂ [47]*.

В обоих RICH в качестве фотодетекторов будут использоваться многопиксельные гибридные фотодетекторы (ГФД) с обратной фокусировкой, которые были разработаны и изготовлены для регистрации фотонов с длинами волн в области 200–600 нм в ЦЕРН совместно с известной голландской фирмой DEP [44].

ГФД состоит из вакуумной трубки с кварцевым окном толщиной 7 мм, внутренняя поверхность которого покрыта мультищелочным фотокатодом

*Известен простой и быстрый способ изготовления легких и прочных сферических зеркал из майларовой пленки с основой из тонкого слоя эпоксидной смолы, на которую наносится быстротвердеющая пена — пенополиуретан [59]. Такие зеркала были использованы в 8-канальном газовом черенковском счетчике спектрометра ГИПЕРОН [60].

S20 с диаметром 80 мм. Фотоэлектроны, ускоренные электростатическим полем (20 кВ) со скрещенными силовыми линиями, попадают на матрицу с 1024 пикселями, размеры которых составляют $2,5 \times 2,5$ мм (рис. 33).

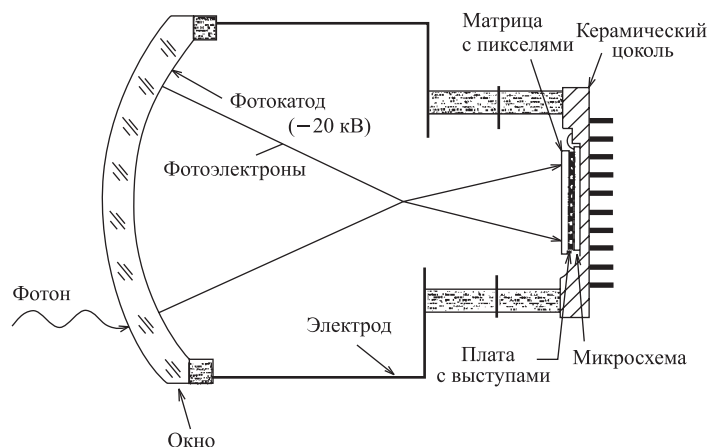


Рис. 33. Схема гибридного фотонного детектора

До того как ГФД были приняты для использования на ЛНСб, они прошли серию всесторонних испытаний и моделирования, их результаты были приемлемыми для ЛНСб. Квантовая эффективность ГФД при 270 нм составила 25%, количество фотоэлектронов — около 8. Была обеспечена защита ГФД от магнитного поля на уровне 25 Гс. Для этого каждый ГФД будет экранирован μ -металлическим цилиндром и, кроме того, вся система ГФД будет окружена магнитной защитой (см. рис. 30).

В работе [31] были проведены исследования ГФД на аэрогелях, произведенных новосибирской группой, с $n = 1,03$ и толщиной 4, 6, 8 см при импульсах π^+ -, π^- -мезонов и протонов 6, 8, 9, 10 ГэВ/с на PS ЦЕРН. Среднее число фотоэлектронов составило для аэрогелей толщиной 4 см $9,7 \pm 1,0$ и $6,3 \pm 0,7$ соответственно при измерениях без фильтра и с фильтром. В табл. 10 приведены восстановленные углы ЧИ (θ) и их разрешение, рассчитанное на трек (σ') в мрад и стандартные отклонения $N_\sigma = (\theta_\pi - \theta_p) / \sigma'_\pi$,

Таблица 10. Восстановленные углы ЧИ протонов и π^+ -мезонов (θ), рассчитанного на трек, их угловое разрешение (σ') и стандартные отклонения (N_σ)

Импульс частицы, ГэВ/с	θ_p , мрад	σ'_p , мрад	θ_π , мрад	σ'_π , мрад	N_σ
6	194,0	7,8	243,6	2,9	17,1
8	216,4	4,1	244,3	2,8	9,9
10	224,8	3,0	242,8	2,3	7,8

полученные при измерениях, проведенных на смешанных пучках π^+/P при разных импульсах на аэрогелях толщиной 4 см. Для уменьшения рэлеевского рассеяния использовался фильтр D263, который поглощал фотоны с энергией больше 3 эВ.

Как видно, угловое разрешение позволяет хорошо разделять π^+ -мезоны и протоны.

5. RICH-ДЕТЕКТОРЫ С КВАЗИФОКУСИРОВКОЙ

RICH-детектор с многослойными аэрогельными радиаторами. Идея использования RICH с многослойными аэрогельными радиаторами появилась в связи с задачами, возникшими на спектрометре BELLE [48]. Необходимо было решить две проблемы: улучшить разрешение π -, K -мезонов с импульсами около 4 ГэВ/с, вылетающих в переднюю область спектрометра, и разместить детектор в весьма ограниченном пространстве в спектрометрическом комплексе. Для решения первой проблемы необходимо было улучшить угловое разрешение единичного фотона σ_θ и увеличить выход числа фотонов N_γ , что могло быть достигнуто наращиванием толщины радиатора t . Однако с увеличением t растет неопределенность в определении точки эмиссии фотонов, что в свою очередь приводит к ухудшению σ_θ .

Решить эти противоречивые проблемы удалось с помощью RICH-детектора с квазифокусировкой, в котором используются многослойные аэрогельные радиаторы с показателями преломления в интервале 1,01–1,07. Особенностью этих RICH-детекторов является то, что в них не требуются громоздкие системы из зеркал и фокусировка черенковских колец на фотодетектор производится автоматически, путем подбора и расположения аэрогельных блоков с разными n в различных слоях. Фотодетектор располагается параллельно плоскости радиатора на небольшом расстоянии от него.

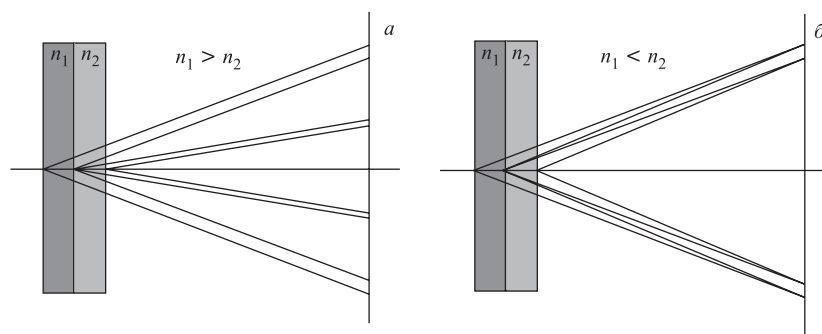


Рис. 34. Конфигурации двухслойного аэрогельного радиатора: а) дефокусирующий вариант; б) фокусирующий вариант; здесь и далее n_1 — показатель преломления аэрогеля со стороны, ближней к входу пучка

Фокусирующее (дефокусирующее) действие многослойных радиаторов иллюстрируется на рис. 34, *a* и *б* на примере 2-слойного радиатора с показателями преломления n_1 и n_2 . В фокусирующем случае аэрогель с большим n_2 располагается дальше от входа частицы, чем аэрогель с меньшим n_1 [49].

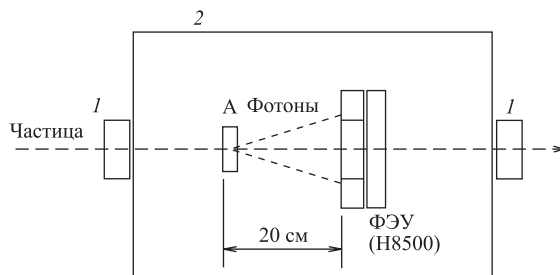


Рис. 35. Схема установки для проведения исследований на двухслойном радиаторе: 1 — многопроволочные пропорциональные камеры; 2 — светонепроницаемая коробка; А — аэрогель

На рис. 35 приведена схема установки для проведения исследований на двухслойном аэрогелевом радиаторе [49]. Аэрогелевый радиатор и фотодетектор помещались в светонепроницаемый ящик. Две многопроволочные

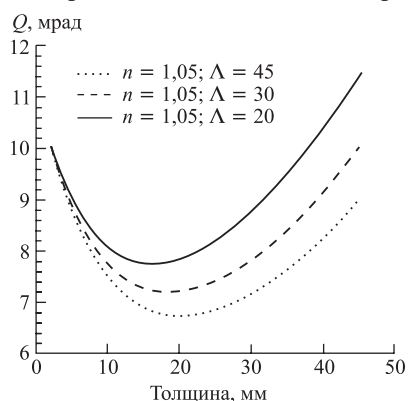


Рис. 36. Зависимость углового разрешения Q для единичного трека от толщины однослойного радиатора при $n = 1,05$ и разных длинах затухания Λ

пропорциональные камеры измеряли направление движения заряженной частицы. Фотодетектор, расположенный на расстоянии 20 см от радиатора, представлял собой 4×4 матрицу из 64-канальных позиционно-чувствительных ФЭУ типа Н8500. Пиксели с размерами 6×6 мм вносили в угловое разрешение фотонов неоднородность, равносильную той, которую может внести аэрогель толщиной 2 см в неопределенность при определении точки испускания фотонов. Оптимальной является такая толщина однородного радиатора, при которой разрешение черенковского угла минимально (рис. 36).

На рис. 37, *a–в* приведены кольца черенковского излучения, полученные на 2-слойном аэрогелевом радиаторе на пучке π -мезонов с импульсом 3 ГэВ/с [49]. Четко видны результаты дефокусирующего (рис. 37, *a*, $n_2 = 1,027 < n_1 = 1,057$) и фокусирующего действия (рис. 37, *б*, $n_1 = 1,046 <$

$n_2 = 1,056$). На рис. 37, *в* приведено кольцо черенковского излучения, полученное на однородном радиаторе толщиной 4 см. Наблюдается заметное уширение кольца по сравнению со случаем двухслойного радиатора в фокусирующем варианте при той же толщине (рис. 37, *б*).

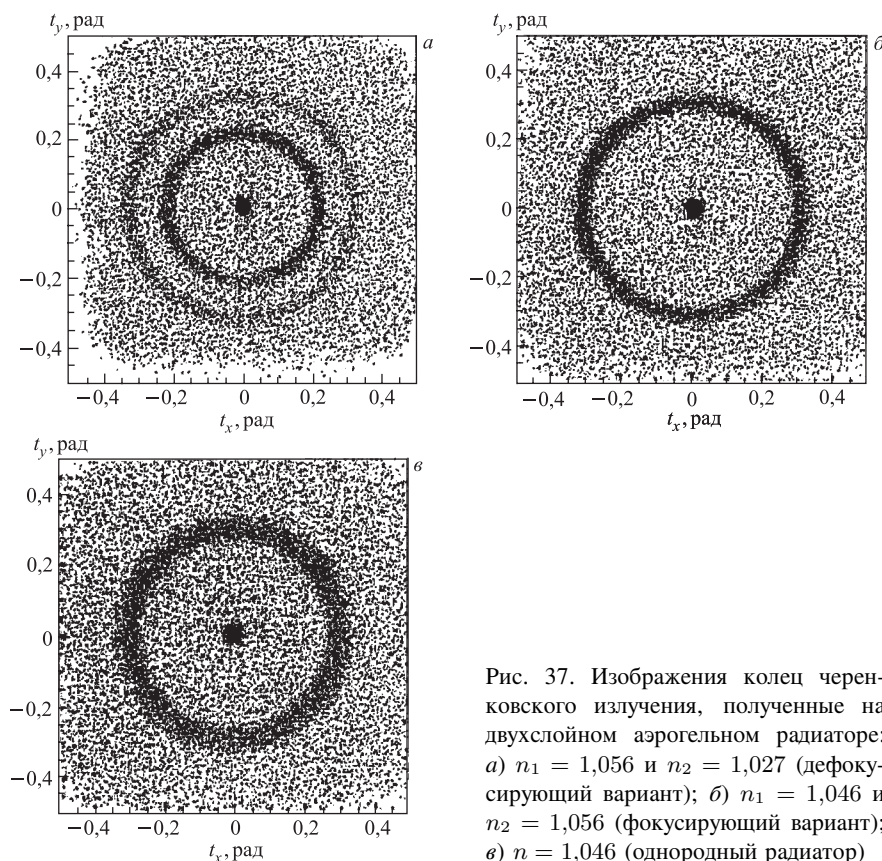


Рис. 37. Изображения колец черенковского излучения, полученные на двухслойном аэрогелевом радиаторе: *а*) $n_1 = 1,056$ и $n_2 = 1,027$ (дефокусирующий вариант); *б*) $n_1 = 1,046$ и $n_2 = 1,056$ (фокусирующий вариант); *в*) $n = 1,046$ (однородный радиатор)

Угловое разрешение для единичного фотона оказалось равным 14,3 и 20,7 мрад, соответственно, для фокусирующего варианта и варианта с однородным радиатором, а угловое разрешение для трека $\sigma = 4,6$ мрад, что позволяет разделять π - и K -мезоны на уровне 5σ .

Для оптимального выбора детектора в фокусирующем варианте были исследованы влияния различных параметров радиатора, таких, как различие в показателях преломления в разных слоях Δn , их толщины t и длины пропускания Λ , на угловое разрешение частиц σ_θ при заданном импульсе [50].

Результаты измерений сравнивались с расчетными, выполненными на основе простой модели.

Было показано, что в распределении $\sigma_\theta(\Delta n)$ имеется широкий минимум — около 0,009 (двухслойный радиатор), а в распределении $\sigma(t)$ также имеется широкий несимметричный минимум вблизи $t \approx 2$ см, при котором σ_θ трека частицы равно 5,4 мрад (однородный радиатор), что хорошо согласуется с экспериментальным [50]. Наблюдалось также заметное улучшение σ_θ с увеличением длины пропускания. Интересно отметить, что увеличение расстояния между радиатором и фотодетектором на 5 см дает такой же эффект в уменьшении σ_θ , какой наблюдался бы в случае совершенно прозрачного аэрогеля ($\Lambda = \infty$).

На рис. 38, *a, б* приведены угловые распределения фотонов, полученные на двухслойном радиаторе, составленном из аэрогельных образцов толщиной 4 см каждый для варианта с фокусирующим расположением образцов с $n_1 = 1,046$ и $n_2 = 1,056$ (рис. 38, *a*) и для варианта с однородными слоями с $n = 1,046$ (рис. 38, *б*) [50]. Разница в угловом разрешении существенная — в первом случае $\sigma_\theta = 14,3$ мрад, а во втором — 20,7 мрад.

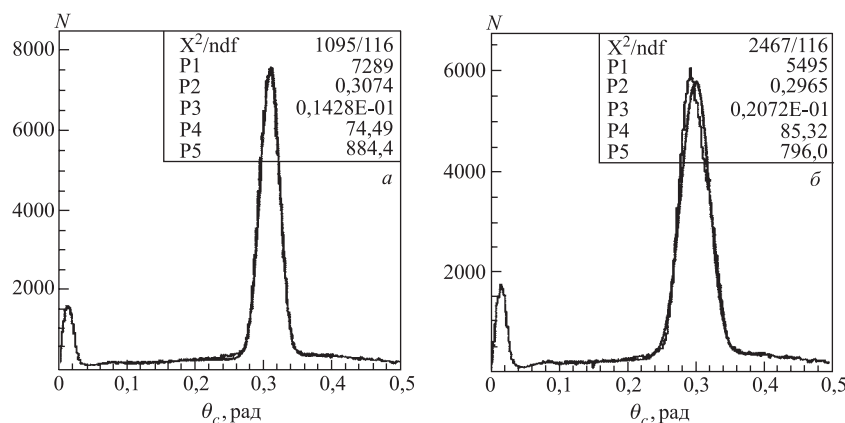


Рис. 38. Распределения по углам ЧИ для фокусирующего варианта с $n_1 = 1,046$ и $n_2 = 1,056$ (*a*) и для однородного радиатора с $n = 1,046$ (*б*). Толщины радиаторов в обоих случаях одинаковы

Как видно, использование двухслойных радиаторов в фокусирующем варианте заметно улучшает угловое разрешение детектора, например, при суммарной толщине радиатора $t = 3$ см оно составляет около 4,5 мрад, чему соответствует разделение π - и K -мезонов при 4 ГэВ/с на уровне 5σ .

RICH-детекторы с многослойными монокристаллическими аэрогельными радиаторами. При идентификации частиц с помощью аэрогельных RICH-де-

текторов с квазифокусировкой одним из факторов, заметно влияющих на угловое разрешение восстановленных треков, является толщина радиатора t . Хотя с увеличением t растет число испускаемых фотонов, но одновременно с этим возрастают ширина черенковского кольца и неопределенность в определении точек испускания фотонов. Решением этой проблемы занялись 2 группы исследователей [16, 49], и обе группы достигли положительных результатов.

На рис. 39 приведены распределения углового разрешения частицы Q в зависимости от толщины радиатора. Кружками обозначены экспериментальные данные [51], причем светлые кружки соответствуют однородному радиатору, а темные — неоднородному двухслойному (2×1 см) и трехслойному (3×1 см) радиаторам. Прямые линии — расчет. Расчетные линии хорошо согласуются с экспериментальными данными.

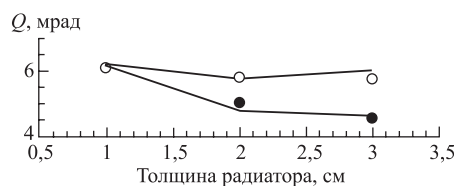


Рис. 39. Угловое разрешение трека Q в зависимости от толщины радиатора

Новосибирской группой были изготовлены и исследованы четырехслойные монолитные аэрогелевые блоки с разными показателями преломления в слоях [16]. В табл. 11 приведены вычисленные n_v и измеренные величины $n_{изм}$ показателей преломления в одном из таких блоков (фокусирующий вариант) и толщины слоев t .

Таблица 11. Показатели преломления n_v и $n_{изм}$ и толщины слоев t в четырехслойном блоке аэрогеля

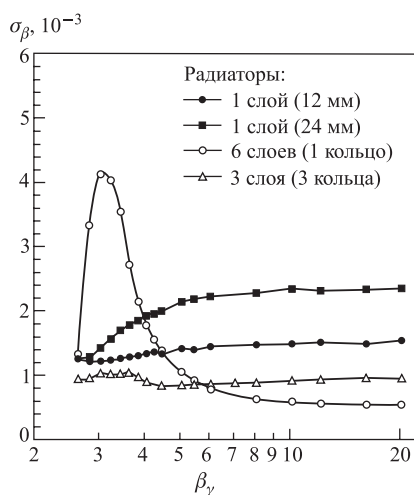
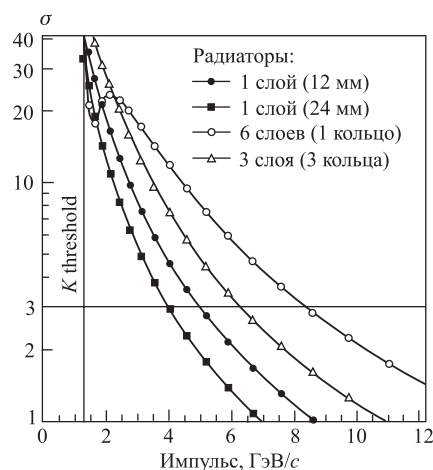
Номер слоя	t , мм	n_v	$n_{изм}$
1	6,0	1,030	$1,0297 \pm 0,0003$
2	6,3	1,027	$1,0268 \pm 0,0005$
3	6,7	1,024	$1,0234 \pm 0,0003$
4	7,0	1,022	$1,0213 \pm 0,0003$

Было проведено моделирование методом Монте-Карло при различных вариантах радиатора: однослойный радиатор с толщиной 12 и 24 мм, трехслойный и фокусирующий шестислойный радиатор. В табл. 12 приведены толщины и показатели преломления этих блоков.

На рис. 40 приведены распределения по σ_β (разрешение по скорости β) в зависимости от величины β_γ . При больших энергиях наилучшее разрешение по скорости получилось при шестислойном фокусирующем варианте, что дает возможность расширить диапазон импульсов для разделения π - и K -ме-

Таблица 12. Показатели преломления в каждом слое 6- и 3-слойного радиаторов и толщины каждого слоя

Кол-во слоев	Номер слоя	Толщина слоя, мм	Показатель преломления
6	1	4,0	1,070
	2	4,2	1,064
	3	4,4	1,059
	4	4,6	1,054
	5	4,8	1,050
	6	5,0	1,046
3	1	10,0	1,070
	2	10,0	1,037
	3	10,0	1,070

Рис. 40. Разрешение по скорости в зависимости от величины β_γ при различных вариантах радиатораРис. 41. Уровень разделения π - и K -мезонов в зависимости от импульсов при различных вариантах радиатора

зонов до 8,5 ГэВ/с на уровне $\geq 3\sigma$, что иллюстрирует рис. 41, на котором приведены распределения по стандартным отклонениям степени разделения π - и K -мезонов в зависимости от импульсов частиц.

Как полагают авторы работы [16], такой вариант RICH-детектора с шестислойным монолитным радиатором может быть использован для идентификации частиц в супердетекторе ВаВар на проектируемой супер В-фабрике.

Альфа-магнитный спектрометр-02 (АМС-02). После 10-дневной успешной испытательной работы порогового аэрогелевого счетчика в составе альфа-магнитного спектрометра (АМС-01) на борту космического аппарата «Шаттл» [38] были развернуты работы по созданию АМС-02 с обширной физической программой по поиску и исследованию антиматерии и темного вещества в космосе. Она включает прежде всего поиск антипротонов, позитронов, изотопов с Z до 25 с импульсами P до примерно 13 ГэВ/с в течение продолжительного времени (более трех лет).

В соответствии с этой программой АМС-02 был дополнен сверхпроводящим электромагнитом, времяпролетной системой, силиконовым детектором, вето-счетчиками, детекторами переходного излучения, электромагнитным калориметром и RICH-детектором (рис. 42) [52].

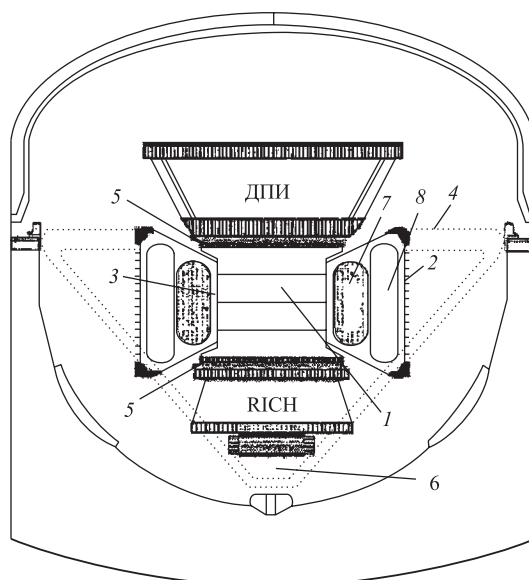


Рис. 42. Схема спектрометра АМС-02 [52]. ДПИ — детектор переходного излучения; 1 — трековая система; 2 — вакуумная камера; 3 — камеры вето; 4 — поддерживающий каркас; 5 — времяпролетная техника; 6 — электромагнитный калориметр; 7 — магнит; 8 — He-сосуд

Успехи, достигнутые в изготовлении аэрогелей с высокими оптическими свойствами и использовании их в черенковских счетчиках кольцевого изображения, в том числе с квазифокусировкой, а также поставленные физические задачи способствовали выбору черенковского счетчика кольцевого изображения с квазифокусировкой. Такой счетчик является очень простым по

геометрической конфигурации, не требует сложных фокусирующих зеркальных систем и не вносит большого количества вещества. Радиатор счетчика и плоскость фотодетектора разнесены относительно друг друга на некоторое расстояние. Такая конфигурация благоприятна для счетчиков, требующих большого геометрического акцептанса. Так, для АМС-02 последний составил $0,5 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$.

Учитывая необычные условия эксплуатации спектрометра и длительность эксперимента, к радиатору так же, как и всем другим составляющим спектрометра, предъявлялись повышенные требования. Применительно к радиатору они сводились к высокой прозрачности, к получению по возможности большего количества фотоэлектронов и, следовательно, к высокому разрешению по скорости и заряду.

В качестве радиатора были выбраны NaF с $n \approx 1,33$, толщиной 5 мм и аэрогель с $n = 1,03-1,05$, толщиной 2,7 см. При выборе NaF в качестве радиатора учитывалось также, что ранее такой радиатор использовался в космосе в эксперименте CAPRICE [53]. Фотоны, возникающие в NaF, попадают на плоскость фотодетектора, тогда как фотоны из аэрогеля, рождающиеся в тех же местах, попадали бы в проем, сделанный для размещения электромагнитного калориметра.

Использование комбинации из этих двух радиаторов позволило расширить область идентификации частиц в счетчике. Радиатор NaF дает возможность идентифицировать частицы с малыми импульсами (в области кинетической энергии 0,5–4 ГэВ на нуклон), а аэрогели — в области энергии $4 < E < \approx 12$ ГэВ. Радиатор NaF занимает в центральной области радиатора площадь 35×35 см, а остальную часть — аэрогель. Фотоны будут

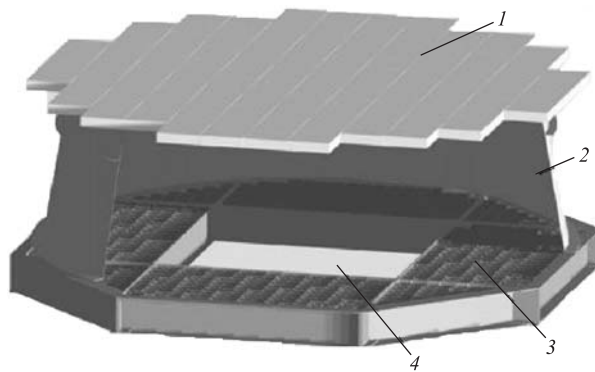


Рис. 43. Схема RICH-спектрометра АМС-02 [54]: 1 — радиатор; 2 — коническое зеркало; 3 — фотодетекторы; 4 — проем для электромагнитного калориметра (64×64 см)

собираться на матрицу из 680 многопиксельных (4×4) ФЭУ типа R7600-M16. Размеры пикселей $4,5 \times 4,5$ мм. Так как эти ФЭУ чувствительны к магнитному полю, то предусмотрена защита от последнего. Весь счетчик заключался внутрь конической системы с хорошей отражательной способностью (рис. 43), что позволяет максимально увеличить геометрический акцептанс детектора [54].

Выбору окончательного варианта детектора предшествовали моделирование [55] и экспериментальные исследования на двух прототипах [56–58], проведенных на космических частицах и на SPS CERN.

Испытывались аэрогели, произведенные в MEW и Новосибирске, с показателями преломления $n = 1,03$ и $1,05$. Выбор был сделан в пользу аэрогелей Новосибирска с $n = 1,05$, толщиной 25 мм, так как они давали больший выход фотонов — ≈ 15 фотонов по сравнению с 9 фотонами от аэрогелей MEW с $n = 1,05$ и толщиной 22 мм.

Идентификация частицы в спектрометре требует измерения ее скорости β с помощью RICH-детектора и импульса P с помощью трековой системы. Следовательно, точность, с которой восстанавливается масса частицы m , определяется погрешностями в измерении β и P :

$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 = \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \gamma^4 \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2, \quad (22)$$

где γ — лоренц-фактор. Ошибки в измерении импульсов частиц зависят от величины их импульсов и по оценкам составят $< 1\%$ при $P < 10$ ГэВ/с и $< 3\%$ при P около 100 ГэВ/с.

Ошибки в восстановлении скорости определяются погрешностями в измерении углов испускания фотонов ЧИ и числом зарегистрированных фотонов $N\gamma$: $(\Delta\beta/\beta) \sim 1/\sqrt{N\gamma}$. Основными факторами, влияющими на восстановление углов, являются хроматическая абберация, размеры пикселей и толщина радиатора. Измерения, проведенные на прототипе спектрометра, дали, соответственно, следующие вклады: 0,85, 1,1 и 1,15 в единицах 10^{-3} , а суммарная величина $\Delta\beta/\beta \approx 2,2 \cdot 10^{-3}$ /фотон или $1,2 \cdot 10^{-3}$ /событие [58].

На рис. 44 приведены распределения по $\Delta m/m$ в зависимости от импульсов частиц на нуклон [52]. При условии разделения частиц на уровне 3σ электроны от протонов могут отделяться до импульсов 10–12 ГэВ/с, тогда как ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$ и ${}^9\text{Be}$ – ${}^{10}\text{Be}$ — до ~ 7 –8 ГэВ/с.

На прототипе АМС-02 были проведены измерения зарядов вторичных ядер, образованных на пучках вторичных ионов с импульсами 20 и 158 ГэВ/с на SPS CERN [58]. На рис. 45, *a, б* приведены данные, полученные на пучках ионов Pb (In) с импульсом 20 ГэВ/с/нуклон (158 ГэВ/с/нуклон). В качестве радиатора в обоих случаях использовался аэрогель с $n = 1,03$, произведенный новосибирской группой.

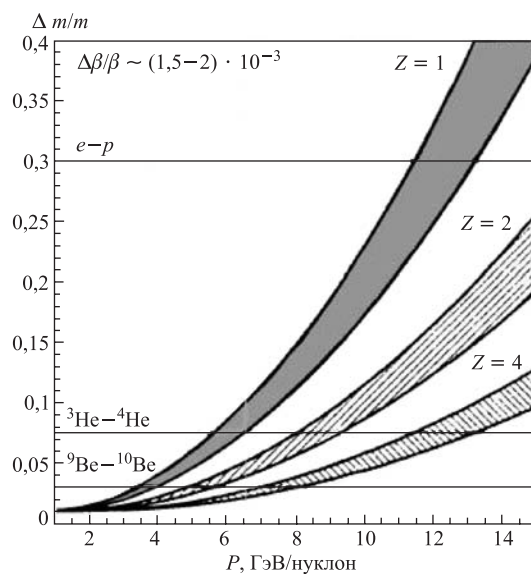
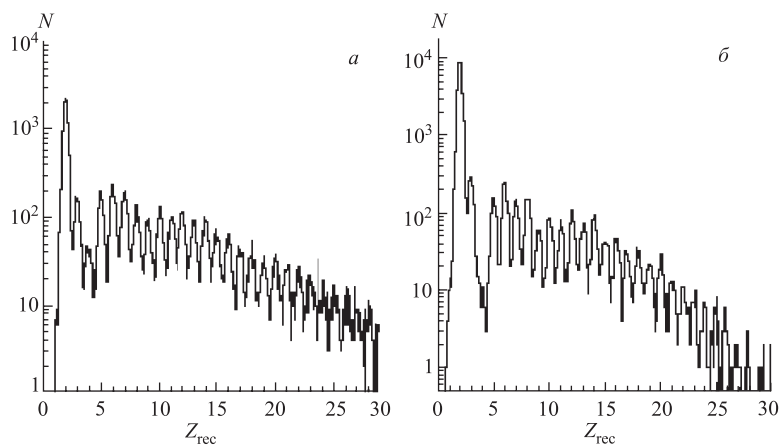


Рис. 44. Зависимость относительной ошибки в массах от импульсов на нуклон [52]

Рис. 45. Восстановленные спектры зарядов Z_{rec} по измерениям, проведенным в 2002 г. (а) и 2004 г. (б)

Достигнутое высокое разрешение по скорости $\delta\beta/\beta = (0,7-1) \cdot 10^{-3}$, а в асимптотическом пределе по Z $\delta\beta/\beta = (0,4-0,6) \cdot 10^{-4}$ позволило провести разделение изотопов до $Z = 26$ (Fe) с разрешением по заряду $\sigma(Z)/Z \simeq 0,2$ [58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аэрогели диоксида кремния благодаря ряду уникальных свойств — легкости, прозрачности, величине показателя преломления, радиационной стойкости — играли и продолжают играть важную роль в качестве радиатора в черенковских счетчиках в экспериментах по физике высоких энергий. За последние годы выросла технология изготовления аэрогелей, позволившая значительно улучшить их оптические, физические и механические свойства.

Производятся аэрогели, обладающие:

- показателем преломления $n = 1,006–1,245$ [11, 13, 17];
- малой плотностью, достигающей величины ρ до $0,03$ г/м³;
- высокой прозрачностью полученных образцов (коэффициент прозрачности $C \leq 0,006$ мкм⁴/см [32], пропускающая способность $T > 70\%$ при $\lambda > 400$ нм [24]);
- рекордно большими размерами ($200 \times 200 \times 50$ мм [12]);
- высокой радиационной стойкостью (при накопленной дозе радиации до $5,5 \cdot 10^{13}$ см⁻² нейтронов (протонов) или γ -квантов с дозой до $\sim 2,5 \cdot 10^5$ Гр никаких изменений в прозрачности аэрогеля не было обнаружено [44]);
- улучшенными физико-механическими свойствами (образцы аэрогеля, вырезанные водоструйным пистолетом, не теряли свои оптические характеристики) [15]).

Изготавливаются монолитные многослойные аэрогели с количеством слоев до 4 [16] с различными показателями преломления в разных слоях. Использование в счетчиках кольцевого изображения с квазифокусировкой многослойных как монолитных, так и собранных из разных кусков аэрогелей позволило одновременно с увеличением числа фотонов улучшить и угловое разрешение счетчиков [16, 51].

Значительно расширяется область применения аэрогельных счетчиков, она выходит за пределы существующих ускорителей. Аэрогельные счетчики кольцевого изображения будут использоваться на большом адронном коллайдере ЦЕРН в составе спектрометра ЛНСб и в космосе на альфа-магнитном спектрометре АМС-02. Проведенные исследования на прототипах показывают хорошие результаты, например, прототип АМС-02 продемонстрировал возможность эффективного разделения изотопов до $Z \leq 26$ [58], а угловое разрешение на RICH1 ЛНСб составило 2,6 и 1,6 мрад соответственно для аэрогелевого и газового (C₄F₁₀) радиаторов [45].

Автор благодарен доктору физ.-мат. наук В. П. Зрелову за обсуждение рукописи и ценные советы, кандидату физ.-мат. наук Ю. И. Давыдову за помощь в оформлении материалов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 13. ФЭУ, использованные в аэрогельных черенковских счетчиках

ФЭУ (кол-во)	Диаметр фото- катада	Фото- катод	Пиксель, мм (кол-во)	Аэрогель		N_e	$Q, \%$	Экспе- римент, ссылка
				n	Размеры, мм (кол-во)			
RCA 8854 (192)	5''	б/щ		1,024	170×170×23 (1700 л)	4 $t = 13-18$	≈ 15	TASSO [4]
R1584-03 (64)	5''	б/щ		1,034	283×200×21 (500 л)	5,4 $t = 90$		КЕК325 [26]
R3241 R2490-05	2'' 2''	б/щ		1,013	160×160×20 (22)	4,7 $t = 140$		КЕК [13]
R6681-2-3 (960)	2'', 3'' 2,5''	б/щ		1,01- 1,03	120×120×24 (2 м ³)	18-20 $t = 120$	≈ 25	BELLE [14]
МКП (160)	18 мм	м/щ б/с		1,05	(1000 л)	7,8	23	КЕДР ASIPH [32]
XP4222B (1)	44 мм	S20		1,058	60×60×30 (2)	6,3 $t = 60$	28	Акимов Ю. К. и др. [19]
6233-01H (320)	3''	б/щ б/с		1,012	120×120×11 $t = 120$	9 $t = 120$	30	RHIC PHENIX [36]
R5900 (168)	18×18	б/с б/щ		1,036	110×110×11 (1344)	≈ 4 $t = 88$	20- 25	AMC-01 [52]
EMI 9223(1) R268(114) H1332Q(1)	1'' 1'' 46 мм	б/щ, с.о. б/с б/щ, к.с.		1,029	$t = 20$	14,9 $t = 25$	14- 28	Leo R. De et al. [39]
Philips XP 1911-UV (3868)	3/4''	б/щ продв. в зел.об.	23,3	1,03	114×114×10 (850)	9 $t = 50$	≈ 25	HERMES [40]
R7600-M16 (680)	18×18	б/с б/м/щ	4,5×4,5 (16)	1,050	$t = 27$	14,7 $t = 25$	≈ 20	AMC-02 [58]
ГФД (196)	80 мм	к.с. S20	2,5×2,5 (1024)	1,030	200×200×51	6,8 $t = 51$	≈ 25	LHCb [45]
H8500 (16)	50×50 мм	б/с, б/щ	6×6 (64)	1,01- 1,06	$t = 40 + 40$ (2)	6 $t = 20$	≈ 24	Proximity [50]

Примечание. б/щ — бищелочной; м/щ — мультищелочной; б/м/щ — би- и мультищелочной; б/с — боросиликатное стекло; к.с. — кварцевое стекло; с.о. — сапфировое окно; t — толщина аэрогеля в мм; N_e — среднее число фотоэлектронов при разных t ; Q — квантовая эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов Ю. К.* Области применения аэрогелей // ПТЭ. 2003. № 3. С. 5–19.
2. *Зрелов В. П.* Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968.
3. *Cantin M. et al.* Silica Aerogels Used as Cherenkov Radiators // Nucl. Instr. Meth. 1974. V. 118. P. 177.
4. *Burkhardt H. et al.* The TASSO Gas and Aerogel Cherenkov Counters // Nucl. Instr. Meth. 1981. V. 184. P. 319–331;
Poelz G., Reithmuller R. Preparation of Silica Aerogel for Cherenkov Counters // Nucl. Instr. Meth. 1982. V. 195. P. 491;
Poelz G. Aerogel Cherenkov Counters at DESY // Nucl. Instr. Meth. A. 1986. V. 248. P. 118–119.
5. *Henning S., Svenson L.* Production of Silica Aerogel // Physica Scripta. 1981. V. 23. P. 697–702.
6. *Aksenov V. L. et al.* // Proc. of the Intern. Symp. on Position Detectors in High Energy Phys., Dubna, 1988. P. 313–315;
Onuchin A. P. et al. // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Instrumentation for Colliding Beams Physics, Novosibirsk, 1990. Singapore, 1990. P. 208–213.
7. *Филиппов А. И. и др.* Сообщ. ОИЯИ P13-96-165. Дубна, 1996;
Акимов Ю. К. и др. Изготовление больших образцов аэрогеля диоксида кремния в 37-литровом автоклаве и исследование его оптических свойств // Письма в ЭЧАЯ. 2000. № 1. С. 48–57.
8. *Акимов Ю. К. и др.* Испытание порогового аэрогелевого черенковского счетчика на космических частицах // Крат. сообщ. ОИЯИ. 1998. № 5[91]. С. 11.
9. *Tillotson T. M., Hrubesh L. W.* UCRL — Ext.-102517. 1990.
10. *Busykaev A. R. et al.* Measurement of Optical Parameters of Aerogel // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 379. P. 465.
11. *Danilyuk A. F. et al.* Synthesis of Aerogel Tiles with High Light Scattering Lengths // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 433. P. 406–407;
Danilyuk A. F. et al. Recent Results on Aerogel Development for Use in Cherenkov Counters // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 491–494.
12. *Matteuzzi C. A.* RICH with Aerogel for a Hadron Collider // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 553. P. 356–363.
13. *Adachi I. et al.* Study of a Threshold Cherenkov Counter Based on Silica Aerogels with Low Refractive Indices // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 355. P. 390–398.
14. *Sumiyoshi T. et al.* Silica Aerogel Cherenkov Counter for the KEK B-Factory Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 433. P. 385–391.
15. *Adachi I. et al.* Study of Highly Transparent Silica Aerogel as a RICH Radiator // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 533. P. 146–151.

16. *Barnyakov A. Yu. et al.* Focusing Aerogel RICH (FARICH) // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 553. P. 70–75.
17. *Rasmussen I. L.* Use of SiO₂ Aerogels with $n = 1.05–1.25$ as Radiator of Cherenkov Detectors // Rev. de Phys. Applique C4. 1989. T. 24. P. 221.
18. *Buzykaev A. R.* Measurement of Optical Parameters of Aerogel // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 379. P. 396–400.
19. *Акимов Ю. К. и др.* Аэрогельный пороговый черенковский счетчик // ПТЭ. 2002. № 5. С. 55–61.
20. *Leo R. De et al.* Chromatic Aberration and Forward Scattering of Light in Silica Aerogel // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 457. P. 52–63.
21. *Vorobiev V. I. et al.* // Proc. of the Workshop on Physics and Detectors for DAPHNE. Rep. INFN. Frascati, 1991.
22. *Born M., Wolf E.* Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999.
23. *Hrubesh L. W.* UCRL Rep. No. 53794. 1987.
24. *Aschenauer E. et al.* Optical Characterization of $n = 1.03$ Silica Aerogel Used as Radiator in the RICH of HERMES // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 440. P. 338–347.
25. *Pestotnik R. et al.* Proximity Focusing RICH with Flat Panel PMT (Hamamatsu H8500) as Photon Detector and Aerogel Radiator // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 525. P. 158–168.
26. *Ishino M. et al.* Mass Production of Hydrophobic Silica Aerogel and Readout Optics of Cherenkov Light // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 457. P. 581–587.
27. *Yasumi S. et al.* KEK Report 83-25. 1983.
28. *Kawai M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1985. V. 228. P. 314.
29. *Danilyuk A. F. et al.* Recent Results on Aerogel Development for Use in Cherenkov Counters // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 491–494.
30. *Barnyakov A. Yu.* Development of Aerogel Cherenkov Detectors at Novosibirsk // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 553. P. 125–129.
31. *Bellunato T. et al.* Performance of Aerogel as Cherenkov Radiator // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 519. P. 493–507.
32. *Barnyakov M. Yu. et al.* Aerogel Cherenkov Counters for the KEDR Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 453. P. 326–330.
33. *Barnyakov A. Yu. et al.* ASHIPH Counters for the KEDR Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 424–429;
Barnyakov A. Yu. et al. The Status of the KEDR ASHIPH System // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 518. P. 597–601.
34. *Afanasiev S. et al.* Test of the Prototype for the Cherenkov Aerogel Counter Wall for PHENIX Setup at RHIC // Proc. of the 7th Intern. Workshop, Stara Lesna, Slovak Republic, Aug. 25–30, 2003. Dubna, 2003. P. 251–258.

35. *Kistenev E.* Particle Identification in the PHENIX Experiment at RHIC (Present and Future) // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 518. P. 593–596.
36. *Perrino R. et al.* Performances of the Aerogel Threshold Cherenkov Counter for the Jefferson Lab Hall A Spectrometers in the 1–4 GeV/c Momentum Range // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 457. P. 571–580;
Lagamba L. et al. Silica Aerogel Threshold Cherenkov Counters for the JLab Hall A Spectrometers: Improvements and Proposed Modifications // Ibid. V. 471. P. 325–332.
37. *Aguilar M. et al.* // Phys. Rep. 2002. V. 366, Issue 6. P. 331–405.
38. *Vorobiev A. I., Zrelov V. P., Ruzicka J.* On Specific Features of the Vavilov–Cherenkov Radiation in Aerogels // Proc. of the Workshop on JINR C-tau Factory. Dubna, 1992. P. 176–189.
39. *Leo R. De et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 401. P. 187–205.
40. *Ackerstaff K. et al.* The HERMES Spectrometer // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 417. P. 230–265.
41. *Carter P.* The Aerogel Radiator for the HERMES RICH // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 433. P. 392–395.
42. *Jackson H. E.* The HERMES Dual Radiator RICH – Performance and Impact // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 533. P. 205–209.
43. *Ryckbosh D.* The HERMES RICH Detector HERMES Collaboration // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 433. P. 98–103.
44. *Harnew N.* Particle Identification with the LHCb RICH System // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 563. P. 326–332.
45. *Ypsilantis T., Seguinot J.* Particle Identification for LHC-B: a Dedicated Collider B at the LHC // Nucl. Instr. Meth. 1995. V. 368. P. 229–233;
Esso S. Development of the RICH Detectors in LHCb // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 502. P. 46.
46. *Esso S.* Overview of LHCb RICH Detector Development // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 553. P. 333–338.
47. *Joran C. et al.* Metal-Dielectric Mirror Coating for Cherenkov Detectors. Poster Session // Proc. of RICH 2004, Playa del Carmen, Mexico, Nov. 2004.
48. *Matsumoto T. et al.* Studies of Proximity Focusing RICH with an Aerogel Radiator Using Flat-Panel Multi-anode PMTs (Hamamatsu H8500) // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 521. P. 367–377;
Iijima T. et al. A Novel Type of Proximity Focusing RICH Counter with Multiple Refractive Index Aerogel Radiator // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 548. P. 383–390.
49. *Korpar S. et al.* RICH with Multiple Aerogel Layers of Different Refractive Index // Ibid. V. 553. P. 64–65.
50. *Korpar S. et al.* A Novel Type of Proximity Focusing RICH Counter with Multiple Refractive Index Aerogel Radiator // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 572. P. 429–431.
51. *Krizan P., Korpar S., Iijima T.* Study of Nonhomogeneous Aerogel Radiator in a Proximity Focusing RICH Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 565. P. 457–462.

-
52. *Barao F.* Cherenkov Detectors in the Alpha Magnetic Spectrometer // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 454. P. 174–179;
Barao F. et al. AMS Note-99-38, ISN 99.84, LAPP-EXP-99.06. 1999.
 53. *Carlson P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 349. P. 577.
 54. *Buernerd M.* The RICH Counter of the AMS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 502. P. 158–162.
 55. *Buernerd M., Ren Z.* Simulation Study of a Proximity Focusing Cherenkov Counter for the AMS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 454. P. 476–496.
 56. *Thuiller T. et al.* Experimental Study of a Proximity Focusing Cherenkov Counter Prototype for the AMS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 491. P. 83–97.
 57. *Barao F.* AMS — Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 535. P. 134–138.
 58. *Aguayo P. et al.* Prototype Study of the Cherenkov Imager of the AMS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 560. P. 291–302.
 59. *Будагов Ю. А. и др.* Фокусирующие зеркала с основой из быстротвердеющей пены // ПТЭ. 1987. № 3. С. 211–212.
 60. *Антохов В. А. и др.* Спектрометр ГИПЕРОН — установка для высоких энергий на 76 ГэВ-протонном синхротроне // ПТЭ. 1985. № 5. С. 35–42.