

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ АЭРОГЕЛЯ В ИЯФ СО РАН

*А. Ю. Барняков * от имени новосибирской аэрогелевой группы***

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Работы по производству аэрогеля в Новосибирске начались в 1986 г. в рамках разработки проекта черенковских пороговых счетчиков для детектора КЕДР. Производимый в Новосибирске аэрогель является лучшим по оптическим параметрам. На его основе успешно функционируют системы черенковских счетчиков в эксперименте СНД (e^+e^- -коллайдер ВЭПП-2000), в детекторе КЕДР (e^+e^- -коллайдер ВЭПП-4М) и в эксперименте AMS-02 на Международной космической станции. В данной работе представлен обзор разработанных в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера систем идентификации частиц на основе аэрогеля и описан принцип нового типа детектора черенковских колец на основе фокусирующего аэрогеля (ФАРИЧ).

The works on aerogel production started in Novosibirsk in 1986 as a part of the project of the threshold Cherenkov counters development for the KEDR detector. Aerogel produced in Novosibirsk has excellent optical parameters. There are several systems of Cherenkov counters based on aerogel produced in Novosibirsk which are under operation for the moment: the systems of Cherenkov threshold counters for the SND detector at VEPP-2000 e^+e^- -collider and for the KEDR detector at VEPP-4M e^+e^- -collider and RICH counter for the AMS-02 experiment at International Space Station. In the paper the descriptions of the particle identification systems developed in Budker Institute of Nuclear Physics based on aerogel are presented. The principal description of the new type of RICH detector based on focusing aerogel (FARICH) is given.

PACS: 29.40.Ka

ВВЕДЕНИЕ

Аэрогель представляет собой пористое вещество с размером пор меньше длины волны света в видимом диапазоне. Аэрогель диоксида кремния со-

*E-mail: a.yu.barnyakov@inp.nsk.su

**А. Ю. Барняков, М. Ю. Барняков, В. С. Бобровников, А. Р. Бузыкаев, А. А. Катцин, С. А. Кононов, Д. В. Корда, Е. А. Кравченко, И. А. Куянов, И. В. Овтин, А. П. Онучин, Н. А. Подгорнов, В. Г. Присекин (ИЯФ СО РАН, НГУ), А. Ф. Данилюк, С. А. Лопатин, А. Ю. Придвин, Р. С. Проценко (ИК СО РАН).

стоит из сфер аморфного кварца диаметром несколько нанометров, соединенных в цепочки, образующие хаотическую трехмерную конструкцию. Размер пор — 20–100 нм. Поры аэрогеля заполнены воздухом. Плотность аэрогеля диоксида кремния может варьироваться в широких пределах от 0,003 до 0,7 г/см³, что позволяет получать аэрогель с показателями преломления $n = 1,006–1,13$. Такой диапазон значений показателя преломления в совокупности с хорошей прозрачностью в оптическом диапазоне позволяет применять аэрогель в качестве радиатора черенковского излучения в различных экспериментах по физике элементарных частиц.

Аэрогель, производимый в Новосибирске с 1986 г. совместно Институтом катализа им. Г. К. Борескова СО РАН и Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, стал основой систем идентификации частиц ряда экспериментов по всему миру: системы пороговых счетчиков АШИФ детектора КЕДР (e^+e^- -коллайдер ВЭПП-4М) [1] и системы счетчиков АШИФ детектора СНД (e^+e^- -коллайдер ВЭПП-2000) [2] в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), детектора черенковских колец в эксперименте LHCb (Большой адронный коллайдер, ЦЕРН, Женева) [3], детектора черенковских колец эксперимента AMS02 (Международная космическая станция) [4] и детектора черенковских колец в эксперименте CLAS12 (JLab, Ньюпорт-Ньюс, США) [5]. Также для будущих экспериментов по физике элементарных частиц и ядерных взаимодействий PANDA (FAIR, Дармштадт, Германия) [6] и СуперЦтау фабрика (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) [7] активно разрабатывается новый тип детектора черенковских колец, или РИЧ-счетчиков (транслитерация от RICH — Ring Image Cherenkov counters), на основе фокусирующего аэрогеля (ФАРИЧ) [8].

1. ПОРОГОВЫЕ АЭРОГЕЛЕВЫЕ СЧЕТЧИКИ АШИФ

Работы по созданию аэрогелевых черенковских счетчиков для детектора КЕДР начаты в 1986 г. Первый проект был с прямым светосбором на ФЭУ. В 1991 г. в ИЯФ началась разработка счетчиков АШИФ (Аэрогель, ШИФтер, Фотоумножитель) для детектора КЕДР [1]. Светосбор в таких счетчиках происходит с помощью переизлучателей спектра. Черенковский свет из аэрогеля собирается на переизлучатели, сделанные в виде световодов, переизлучается и частично оказывается в условиях полного внутреннего отражения. Эта часть переизлученного света транспортируется к фотоумножителю, где регистрируется. Коэффициент светосбора на шифтер в данном случае достаточно велик, так как шифтер располагается недалеко от точки излучения и имеет большую боковую поверхность. Длина поглощения переизлученного света составляет десятки сантиметров, в связи с этим продольный размер счетчика может достигать 50 см и более.

Сегодня в детекторе КЕДР на ВЭПП-4М и в детекторе СНД на ВЭПП-2000 для идентификации частиц используются системы счетчиков АШИФ.

1.1. Счетчики АШИФ детектора КЕДР. Метод АШИФ позволил существенно уменьшить число ФЭУ и использовать ФЭУ с меньшей площадью фотокатода, чем в проекте с прямым светосбором, в котором планировалось использовать 400 фотоумножителей типа fine-mesh с фотокатодом \varnothing 150 мм, тогда как современная система счетчиков АШИФ включает в себя 160 ФЭУ с микроканальными пластинами и фотокатодом \varnothing 18 мм. Таким образом, метод АШИФ позволил существенно уменьшить не только стоимость системы, но и количество материала перед калориметрами. Система АШИФ включает в себя 160 счетчиков (80 баррельных и 80 торцевых), распределенных в два слоя, смещенных относительно друг друга так, чтобы частица из места встречи проходила через аэрогель хотя бы в одном слое. Показатель преломления аэрогеля был выбран 1,05, для того чтобы надежно идентифицировать π - и K -мезоны в диапазоне импульсов от 0,6 до 1,5 ГэВ/с. Система перекрывает 97 % телесного угла, количество вещества в счетчиках — 24 % радиационной единицы (два слоя при перпендикулярном пролете частицы). Для системы, запущенной в эксплуатацию в 2013 г., получены следующие параметры [9]:

— амплитуда сигнала от релятивистских частиц составляет 6–10 фотоэлектронов;

— достоверность π/K -разделения на уровне 4σ ;

— фактор подавления событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \geq 600$.

1.2. Счетчики АШИФ детектора СНД. Система состоит из 9 счетчиков с объемом аэрогеля 9 л и прикрывает примерно 60 % телесного угла. Особенностью данной системы является то, что она вписана в очень узкий зазор, равный 35 мм, между трековой системой и калориметром. Для экспериментов с детектором СНД было создано два комплекта счетчиков АШИФ: один на основе аэрогеля с показателем преломления $n = 1,13$ (полученного спеканием) для разделения π - и K -мезонов с импульсами до 870 МэВ/с и другой с показателем преломления аэрогеля $n = 1,05$ для e/π -разделения с импульсами до 450 МэВ/с. В зависимости от целей эксперимента в детектор устанавливается тот или иной комплект счетчиков АШИФ. Конструкция детектора позволяет снять и поставить счетчики АШИФ в течение одного дня. Для счетчиков АШИФ с показателем преломления $n = 1,13$ получены следующие параметры [10]:

— амплитуда сигнала от релятивистских частиц составляет 6–8 фотоэлектронов;

— эффективность регистрации релятивистских электронов 99,7 %;

— фактор подавления пионов > 100 .

Для счетчиков АШИФ с показателем преломления $n = 1,05$ [11]:

- амплитуда сигнала от релятивистских частиц средняя по системе — 3,5 фотоэлектрона;
- эффективность регистрации релятивистских электронов 95,5 %;
- фактор подавления событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \approx 500$.

2. ДЕТЕКТОРЫ ЧЕРЕНКОВСКИХ КОЛЕЦ

Принцип работы детекторов черенковских колец (ДЧК), или РИЧ-детекторов, заключается в следующем: частица, пролетая через радиатор конечной толщины, рождает черенковские фотоны; на выходе из радиатора фотоны распространяются вдоль поверхности конуса и регистрируются координатным фотонным детектором. Конус на плоскости регистрации создает изображение в виде кольца, которое называют черенковским. ДЧК с твердыми, жидкими и газообразными радиаторами не обеспечивают надежную идентификацию пионов и каонов в диапазоне импульсов от 4 до 10 ГэВ/с. Для решения данной проблемы было предложено использовать в качестве радиатора аэрогель.

В настоящее время в детекторе LHCb работают два счетчика РИЧ. В RICH1 используются два радиатора: аэрогель ($n = 1,03$) и газ C_4F_{10} [3]. В детекторе RICH2 применяется газ CF_4 . Аэрогель был произведен в Институте катализа СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН, длина рассеяния света $L_{sc}(400 \text{ нм}) \geq 50$ мм. Аэрогелевый радиатор состоит из блоков с рекордным размером $20 \times 20 \times 5$ см. Сбор черенковского света из аэрогеля и газового радиатора происходит с помощью двух зеркал — фокусирующего и плоского. В качестве фотонных детекторов используются координатно-чувствительные гибридные фотоумножители производства фирмы Photonis-DEP с диаметром фотокатода 72 мм. Число зарегистрированных фотонов от релятивистской частицы в аэрогеле равно 5 [12].

Система РИЧ с аэрогелевым радиатором успешно применяется для идентификации частиц в детекторе AMS-02, который проводит измерения космических излучений на Международной космической станции [4]. В качестве радиаторов в детекторе используется 92 блока аэрогеля с показателем преломления 1,05, размером $11,5 \times 11,5 \times 2,5$ см и 16 пластин NaF размером $8,5 \times 8,5 \times 0,5$ см. ИЯФ СО РАН совместно с ИК СО РАН произвел аэрогель для данной системы с длиной рассеяния света $L_{sc}(400 \text{ нм}) \geq 42$ мм. В качестве фотонных детекторов используются координатно-чувствительные фотоумножители производства фирмы Hamamatsu R7600-00-M16. Число зарегистрированных фотонов от релятивистской частицы в аэрогеле в среднем равно 6,2. В данном эксперименте с помощью детектора черенковских колец планируется восстанавливать заряд космической частицы [4]. Погрешность измерения заряда составляет 0,3 для α -частиц ($Z = 2$) и плавно увеличивается

до 0,5 для ядер кремния ($Z = 14$). Точность измерения скорости α -частиц равна $\sigma_\beta = 0,8 \cdot 10^{-3}$ [13].

В настоящее время ведется сборка и запуск системы идентификации на основе аэрогелевого детектора черенковских колец для эксперимента CLAS12 на комплексе СЕБАФ в Национальной ускорительной лаборатории им. Т. Джефферсона (Ньюпорт-Ньюс, США). В этом проекте планируется вести эксперименты на мишени (водород) с интенсивным непрерывным пучком электронов с энергией 12 ГэВ. Аэрогелевый РИЧ необходим для надежного $\pi/K/p$ -разделения в диапазоне импульсов от 3 до 8 ГэВ/с, при этом π/K -разделение должно быть на уровне 4σ , чтобы подавлять пионы более чем в 500 раз. Детектор состоит из шести секторов: в четырех планируется использовать газовый РИЧ, а в двух аэрогелевый. На сегодняшний день в Новосибирске для данного проекта произведено более 2 м² аэрогелевого радиатора в виде блоков с поперечными размерами 20 × 20 см и толщинами 2 и 3 см [5].

3. ФАРИЧ

Для получения необходимого углового разрешения при измерении в детекторах черенковских колец используется система фокусирующих зеркал. Это не всегда возможно в условиях ограниченного пространства, например, в экспериментах на встречных пучках. В 2004 г. в ИЯФ СО РАН [8] и независимо в КЕК (Япония) [14] было предложено использовать фокусирующий аэрогелевый радиатор. В ИЯФ СО РАН такие счетчики называют ФАРИЧ (Фокусирующий Аэрогелевый РИЧ). Идея ФАРИЧ заключается в использовании нескольких слоев аэрогеля с разными показателями преломления. Показатели преломления и толщины слоев подбираются так, чтобы изображения черенковских колец из каждого слоя перекрывались в плоскости детектирования. Существуют два подхода к производству фокусирующего аэрогелевого радиатора: создание нескольких слоев из отдельных блоков с необходимыми толщинами и показателями преломления или синтез многослойного моноблока с заданными толщинами и показателями преломления в слоях. При количестве слоев больше двух-трех второй вариант кажется более предпочтительным, так как при этом отсутствуют дополнительные потери черенковских фотонов за счет рассеяния и отражения на границе раздела сред аэрогель–воздух. Первый многослойный блок аэрогеля был получен в Институте катализа СО РАН в 2004 г. [8]. Согласно данным моделирования, с помощью ФАРИЧ можно измерять скорость частицы с относительной погрешностью порядка 10^{-3} [15]. Это обстоятельство может помогать не только идентифицировать частицы, но и впоследствии уточнять импульс этой частицы. Особенно это актуально для частиц, летящих под малым углом (в торец), где точность измерения импульса в трековой системе обычно ухудшается.

В 2011 г. впервые было проведено испытание прототипа ФАРИЧ на установке «Выведенные пучки» комплекса ВЭПП-4М [16]. Для первого прототипа использовались 32 кремниевых фотоумножителя производства компании ЦПТА с размерами чувствительной площадки $2,1 \times 2,1$ мм, 16-канальные дискриминаторы со встроенными предусилителями и 64-канальный многохитовый ВЦП V1190В производства CAEN с дискретностью временных отсчетов 100 пс. На выведенном пучке электронов с энергией 1,5 ГэВ/с было измерено однофотонное разрешение по черенковскому углу для четырехслойного образца аэрогеля и продемонстрирован эффект фокусировки по сравнению с однослойным образцом [17].

В 2012 г. на адронном пучке в ЦЕРН было измерено качество идентификации частиц в прототипе ФАРИЧ [17, 18]. В качестве черенковского радиатора в прототипе использовался четырехслойный блок аэрогеля с максимальным показателем преломления $n_{\max} = 1,046$ и размерами $115 \times 115 \times 37,5$ мм, а в качестве фотонного детектора — матрица 200×200 мм — 24×24 кремниевых «цифровых» фотосенсора DPC3200-22-44 Philips [19], каждый сенсор состоит из 4 пикселей размерами $3,2 \times 3,9$ мм (всего 2304 пикселя). Для μ/π -разделения при импульсе 1 ГэВ/с была получена достоверность на уровне $5,3\sigma$ и π/K -разделение лучше $3,5\sigma$ до импульсов 6 ГэВ/с.

На сегодняшний день известны три эксперимента, в которых планируется использовать систему идентификации на основе фокусирующего аэрогеля.

- В детекторе Belle-II на e^+e^- -коллайдере Super KEK-b (Япония), сборка которого активно ведется, в торце используется черенковский счетчик с радиатором из двух слоев аэрогеля японского производства. Толщина каждого слоя 2 см, показатели преломления 1,045 и 1,055 обеспечивают оптимальное перекрытие (фокусировку) черенковских колец в плоскости фотонного детектора на расстоянии 20 см. Результаты испытаний на заряженных частицах находятся в хорошем согласии с расчетом [20].

- В эксперименте PANDA (FAIR, Германия) в небольшом полярном угле вперед планируется установить детектор черенковских колец (Forward RICH) на основе трехслойного фокусирующего аэрогеля новосибирского производства с максимальным показателем преломления 1,05 и фокусировкой на расстоянии 60 см. Общая площадь радиатора ~ 6 м² [6].

- Для проекта СуперЦТай фабрики в Новосибирске также планируется создать систему идентификации на основе четырехслойного фокусирующего аэрогеля с максимальным показателем преломления 1,07 и фокусировкой на расстоянии 20 см. Общая площадь радиатора в этом проекте составит 14 м² [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже более 30 лет в Новосибирске ведутся работы по производству аэрогеля для разрабатываемых как в Новосибирске, так и в других научных

центрах по всему миру систем идентификации на основе аэрогелевого черенковского радиатора. На сегодняшний день аэрогель новосибирского производства обладает самой лучшей прозрачностью среди аэрогелей других производителей: «Matsushita-Panasonic Electric Works» (Япония) и «Aspen Aerogels» (США). Сегодня в Новосибирске Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера совместно с Институтом катализа им. Г. К. Борескова активно осваивается технология производства фокусирующих аэрогелей. Прорабатываются два подхода: многослойные аэрогели и аэрогели с непрерывно меняющимся по толщине показателем преломления («градиентные»). Первые образцы аэрогелей с заданным градиентом оптической плотности были произведены в 2012 г. [17, 21]. Пока технология производства таких блоков остается сложнее, чем у многослойных. Но в перспективе развития микропиксельных фотонных детекторов преимущество «градиентных» аэрогелей очевидно, так как с ними можно практически убрать вклад от аэрогеля в угловое разрешение при измерении черенковского угла. Разрешение будет полностью определяться размером пикселя фотодетектора или дисперсией света в аэрогеле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Onuchin A., Shamov A., Skovpen Yu., Vorobov A., Danilyuk A., Gorodetskaya T., Kuznetsov V.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 315. P. 517.
2. *Beloborodov K. I., Barnykov M. Yu., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Golubev V. B., Kravchenko E. A., Kononov S. A., Minakov G. D., Onuchin A. P., Serednyakov S. I.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 487.
3. *Matteuzzi C. (for the LHCb Collab.)* // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 409.
4. *Buenerd M. (for the AMS-RICH Collab.)* // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 553. P. 264.
5. *Contralbrigo M.* // Conf. "RICH 2016", Bled, Slovenija, 2016.
6. *Beloborodov K.* <https://www.uni-giessen.de/fbz/fb07/fachgebiete/physik/einrichtungen/2pi/ag/ag-dueren/aktuelles/DIRC2015/slides/beloborodov>.
7. *Anashin V. V. et al. (Super Charm-Tau Factory Collab.)*. https://ctd.inp.nsk.su/docs/ScTau_CDR_en/CDR_en_ScTau.pdf.
8. *Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Kirillov V. L., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Onuchin A. P.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 553. P. 70.
9. *Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Katcin A. A., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Kuyanov I. A., Onuchin A. P., Ovtin I. V., Rodiakin V. A.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 79.
10. *Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Beloborodov K. I., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Golubev V. B., Gulevich V. V., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Onuchin A. P., Martin K. A., Serednyakov S. I., Vesenev V. M.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 732. P. 330.

11. Барняков А. Ю., Барняков М. Ю., Белобородов К. И., Бобровников В. С., Бузыкаев А. Р., Весенев В. М., Голубев В. Б., Кононов С. А., Кошуба С. В., Кравченко Е. А., Мартин К. А., Онучин А. П., Середняков С. И. // ПТЭ. 2015. № 1. С. 1–6.
12. Matteuzzi C. (for the LHCb Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 245.
13. Giovacchini F. (AMS02-RICH Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 57.
14. Iijima T., Korpar S., Adachi I., Fratina S., Fukushima T., Gorisek A., Kawai H., Konishi M., Kozakai Y., Krizan P., Matsumoto T., Mazuka Y., Nishida S., Ogawa S., Ohtake S. // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 548. P. 383.
15. Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Gulevich V. V., Kirillov V. L., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Onuchin A. P., Porosev V. V. // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 595. P. 100.
16. Abramov G. N., Ahmetshin R. R., Barnyakov A. Yu., Blinov V. E., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Grigoriev D. N., Kazanine V. F., Kravchenko E. A., Kononov S. A., Kudryavtsev V. N., Kaminsky V. V., Shekhtman L. I., Onuchin A. P., Zhilich V. N. // JINST. 2016. V. 11. P. 03004.
17. Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Basok I. Yu., Blinov V. E., Bobrovnikov V. S., Borodenko A. A., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Degenhardt C., Dorscheid R., Finogeev D. A., Frach T., Gulevich V. V., Karavicheva T. L., Kasyanenko P. V. // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 88.
18. Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Degenhardt C., Dorscheid R., Finogeev D. A., Frach T., Gulevich V. V., Karavicheva T. L., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Kurepin A. B., Kuyanov I. A., Muelhens O. // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 732. P. 352.
19. Frach T., Prescher G., Degenhardt C., de Gruyter R., Schmitz A., Ballizany R. // IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record. 2009. N. 28-5.
20. Nishida S., Adachi I., Hamada N., Hara K., Iijima T., Iwata S., Kakuno H., Kawai H., Korpar S., Križan P., Ogawa S., Pestotnik R., Šantelj L., Seljak A., Sumiyoshi T. // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 28.
21. Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Gulevich V. V., Danilyuk A. F., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Kuyanov I. A., Lopatin S. A., Onuchin A. P., Ovtin I. V., Podgornov N. A., Porosev V. V., Predein A. Yu. // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 235.