

Аэрогелевый радиатор для Супер Чарм–Тау фабрики

А. А. Катцин^{1,3,*}, А. Ю. Барняков^{1,2,†}, М. Ю. Барняков^{1,2,‡}, В. С. Бобровников^{1,3}, А. Р. Бузыкаев¹, А. Ф. Данилюк⁴, С. А. Кононов^{1,3}, Е. А. Кравченко^{3,1}, И. А. Куянов¹, И. В. Овтин^{1,3}, Н. А. Подгорнов^{1,3}, А. С. Шалыгин⁴

¹Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 11.

²Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет

Россия, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, корпус 4

³Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2.

⁴Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Россия,

630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 5

(Поступила в редакцию 23.10.2022; подписана в печать 29.11.2022)

Для будущих экспериментов на Супер Чарм–Тау фабрике (Россия) рассматривается система идентификации частиц на основе Фокусирующего Аэрогелевого РИЧ (ФАРИЧ) детектора. В 2020–2021 гг. изготовлены новые образцы фокусирующих 4-слойных аэрогелей с максимальным показателем преломления 1,065. Результаты испытаний на пучке релятивистских электронов демонстрируют однофотонное разрешение $9 \div 10$ мрад. По результатам моделирования аэрогели с таким однофотонным разрешением способны обеспечить μ/π -разделение на уровне более 3 стандартных отклонений для треков с импульсами до 1,5 ГэВ/с и π/K -разделение на том же уровне во всём рабочем диапазоне импульсов.

PACS: 29.40.Ka, 41.60.Bq, 61.43.Gt.

УДК: 539.1.074.4.

Ключевые слова: аэрогель, радиатор черенковского излучения, ФАРИЧ.

ВВЕДЕНИЕ

Аэрогель представляет собой пористое вещество с размером пор меньше длины волны света в видимом диапазоне. Аэрогель диоксида кремния состоит из сфер аморфного кварца диаметром несколько нанометров, соединенных в цепочки, образующие хаотическую трехмерную конструкцию. Размер пор — $20 \div 100$ нм. Поры аэрогеля заполнены воздухом. Плотность аэрогеля диоксида кремния может варьироваться в широком диапазоне от 0,003 до 0,7 г/см³, что позволяет получать аэрогель с показателями преломления $n = 1.006 \div 1.13$. 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 (ИК СО РАН) и Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН), является основой для систем идентификации частиц ряда экспериментов по всему миру: системы пороговых счетчиков АШИФ детектора КЕДР на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М (аэрогель $n = 1.05$, $V \sim 1000$ литров) [1] и система счетчиков АШИФ детектора СНД на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000 (аэрогель $n = 1.13$, $V \sim 9$ литров) [2] в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), де-

тектора черенковских колец в эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН Женева) (аэрогель $n = 1.03$, $S \sim 0,5$ м²) [3], детектора черенковских колец эксперимента AMS02 (Международная космическая станция) (аэрогель $n = 1.05$, $S \sim 1$ м²) [4] и детектора черенковских колец в эксперименте CLAS12 (JLab, Ньюпорт-Ньюс, США) (аэрогель $n = 1.05$, $S \sim 6$ м²) [5]. Также для будущих экспериментов по физике элементарных частиц СуперЦТФ фабрика [6] активно разрабатывается новый тип детектора черенковских колец или РИЧ-счетчиков (транслитирация от RICH—Ring CHerenkov counters), на основе фокусирующего аэрогеля (ФАРИЧ) [7].

1. СУПЕР ЧАРМ–ТАУ ФАБРИКА

Супер Чарм–Тау фабрика (СЧТФ) — электрон–позитронный коллайдер с энергией пучков $2E$ от 2 до 7 ГэВ, высокой светимостью $\sim 10^{35}$ см⁻²с⁻¹ и продольной поляризацией электронов в области взаимодействия [6]. Основной целью экспериментов на Супер Чарм–Тау фабрике является поиск эффектов СР-нарушения в распадах очарованных частиц, проверка Стандартной модели в распаде тау-лептона, поиск и изучение совершенно новой формы материи: глюониев, гибридных мезонов и т.д. [6].

Для проекта «Супер Чарм–Тау фабрика» планируется создать систему идентификации на основе РИЧ-счетчиков с четырёхслойным фокусирующим аэрогелем (ФАРИЧ) с $n_{max} = 1,07$ [6]. Общая площадь аэрогелевого радиатора составит ~ 17 м². Согласно моделированию такой детектор способен обеспечить высокое разделение ($\geq 3\sigma$) μ/π в диапазоне импульсов от 0.5

* A.A.Katitsin@inp.nsk.su

† A.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su

‡ M.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su

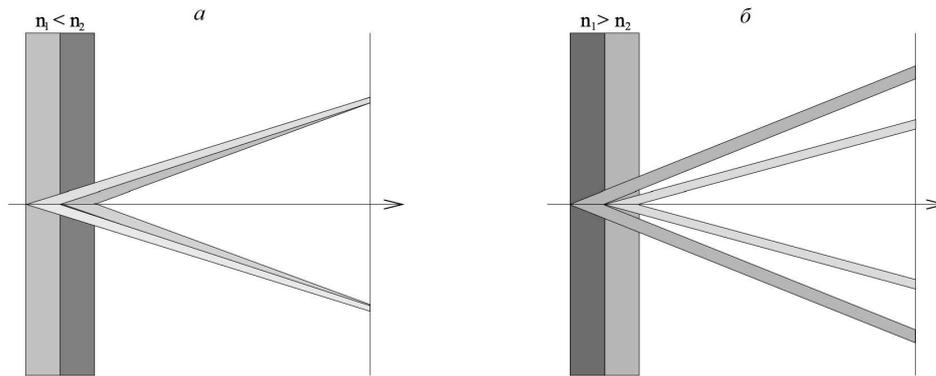


Рис. 1. Иллюстрация идеи использования радиатора из фокусирующего аэрогеля в РИЧ-детекторе с одним кольцом (слева, *a*) и несколькими кольцами (справа, *б*)

до 1.2 ГэВ/с, а также отличное разделение (на уровне $\geq 4\sigma$) π/K до импульсов (3.5 ГэВ/с) [8].

2. ФАРИЧ

В РИЧ-счетчиках с близкой прямой фокусировкой одним из основных факторов, ограничивающих разрешение по черенковскому углу, является конечная толщина радиатора. В работах [7, 9, 10] для преодоления этого ограничения было предложено использовать радиатор, состоящий из нескольких слоев аэрогеля с разными показателями преломления. Показатель преломления и толщина каждого слоя выбираются таким образом, чтобы кольца всех слоев совпадали в плоскости регистрации фотонов. Другая возможность состоит в том, чтобы иметь несколько отдельных колец рис. 1. Оба варианта позволяют уменьшить неопределенность точки испускания фотона. Мы называем детектор, использующий этот метод, фокусирующим аэрогелевым РИЧ-детектором (ФАРИЧ).

2.1. Производство аэрогеля

Первый образец многослойного аэрогеля в Новосибирске был получен в 2004 г. [7]. В 2012 г. была экспериментально продемонстрирована возможность при помощи метода ФАРИЧ разделять μ и π -мезоны на уровне 5 стандартных отклонений при импульсе 1 ГэВ/с [8]. В настоящее время ведется разработка системы ФАРИЧ для проекта «Супер Чарм-Тау фабрика».

Для выполнения физической программы СЧТФ необходимо обеспечить μ/π разделение от 0,2 ГэВ/с, тогда как аэрогель с показателем преломления $n = 1.05$ позволяет регистрировать мюоны с импульсами только выше 0.33 ГэВ/с. В 2020–2021 годах в Новосибирске Институтом катализа им. Борескова в тесном сотрудничестве с Институтом ядерной физики им.

Будкера было изготовлено и протестировано несколько многослойных фокусирующих аэрогелевых радиаторов с повышенными показателями преломления [11]. На рис. 2 представлены профили показателя преломления для нескольких образцов аэрогеля, изготовленных в 2020 г. Все образцы аэрогеля, представленные на этом рисунке (рис. 2), имеют поперечные размеры 10×10 см.

Максимальный показатель преломления $n = 1.065$ был достигнут за счет добавления в процессе синтеза небольшого количества диметилформамида (ДМФА) (~5% моль). Это привело к увеличению показателя преломления с 1.06 до 1.065 и длины рэлеевского рассеяния света с 32 мм до 40 мм при длине волны 400 нм. Ожидается дальнейшее развитие этого подхода для повышения показателя преломления и прозрачности аэрогеля. Показатель преломления $n = 1.065$ соответствует черенковскому пороговому импульсу для мюонов около 0.28 ГэВ/с, для обнаружения мюонов с импульсом 0.2 ГэВ/с требуется показатель преломления $n = 1.13$. Поэтому в Новосибирске также разрабатывается другой подход к увеличению показателя преломления аэрогелей путем добавления небольшого количества ZrO_2 в аэрогели на основе диоксида кремния. Это позволило впервые изготовить и испытать образцы аэрогеля с показателем преломления $n = 1.12$ и длиной рэлеевского рассеяния света более 30 мм на длине волны 400 нм (рис. 3) [12]. При традиционном способе изготовления аэрогеля с высоким показателем преломления спеканием не удастся получить длину рэлеевского рассеяния света более 20 мм.

На рис. 4 показана зависимость показателя преломления от плотности для блоков аэрогеля ZrO_2-SiO_2 с содержанием ZrO_2 3 и 6 моль % (красные точки и зелёные квадраты соответственно). Кроме того, на рис. 4 приведен показатель преломления для традиционного аэрогеля SiO_2 разной плотности по формуле (1)

$$n^2 = 1 + \alpha\rho, \quad (1)$$

где ρ — плотность аэрогеля на основе диоксида кремния, α — эмпирический коэффициент, рав-

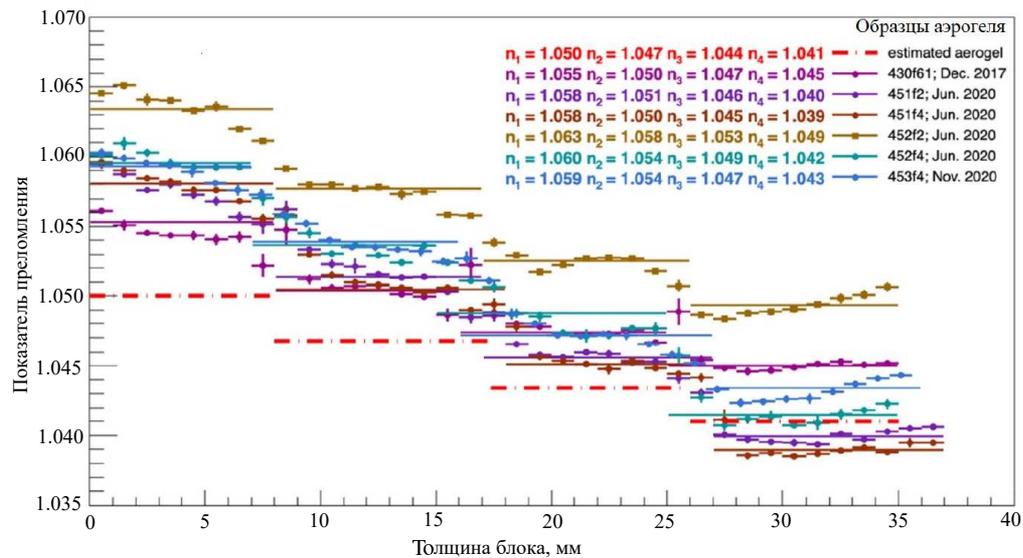


Рис. 2. Профили показателя преломления в зависимости от толщины образцов аэрогеля, изготовленных в 2020 г. Пунктирная линия показывает «идеальный» профиль показателя преломления аэрогеля, оптимизированный для $n_{max} = 1.05$

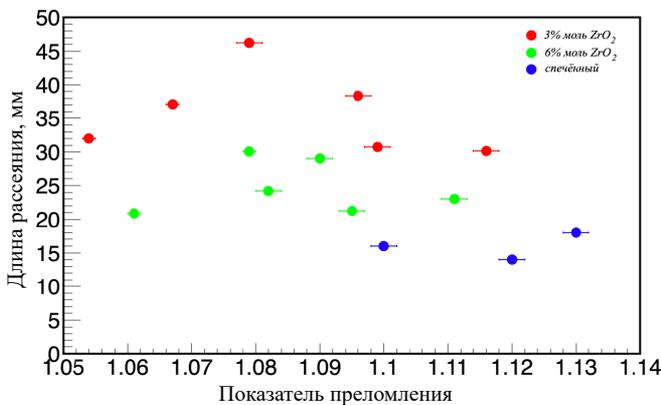


Рис. 3. Зависимость длины рэлеевского рассеяния света от показателя преломления аэрогелей ZrO_2-SiO_2 с содержанием ZrO_2 3 и 6 моль % (красные и зелёные точки соответственно), синие точки – аэрогель с высоким показателем преломления, полученный традиционным способом

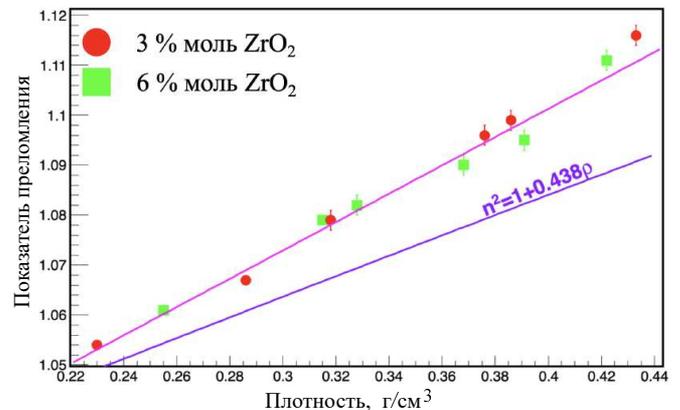


Рис. 4. Зависимость показателя преломления от плотности для аэрогелей ZrO_2-SiO_2 с содержанием ZrO_2 3 и 6 моль % (круглый маркер и квадратный маркер). Пурпурная линия – зависимость показателя преломления от плотности для блоков аэрогеля на основе диоксида кремния без добавления ZrO_2 [13]

2.2. Испытание аэрогеля на пучке электронов

ный $0,438 \text{ см}^3/\text{г}$ для SiO_2 аэрогеля (фиолетовая линия) [13]. Значения изменения показателя преломления с изменением плотности для аэрогелей ZrO_2-SiO_2 существенно отличаются от значений для аэрогелей на основе диоксида кремния, изготовленных ранее [13]. Введение ZrO_2 в аэрогель на основе диоксида кремния увеличивает показатель преломления без увеличения плотности блоков аэрогеля. Этот результат открывает возможность достижения высоких показателей преломления при производстве блоков аэрогеля для черенковских детекторов. Что, в свою очередь, позволит регистрировать мюон с импульсом ниже 0.33 ГэВ/с .

Практически все образцы аэрогелей, представленные на рис. 2, были испытаны в прототипе ФАРИЧ № 3 с релятивистскими электронами на установке «Выведенные пучки» в ИЯФ СО РАН на комплексе ВЭПП-4М [14] в 2021 г. Подробное описание прототипа ФАРИЧ № 3 можно найти в статье [15]. Ниже приведены основные особенности эксперимента на установке «Выведенные пучки» в 2021 г.

- На линии пучка электронов размещены три 2-х координатных детектора на основе ГЭУ (Газовый

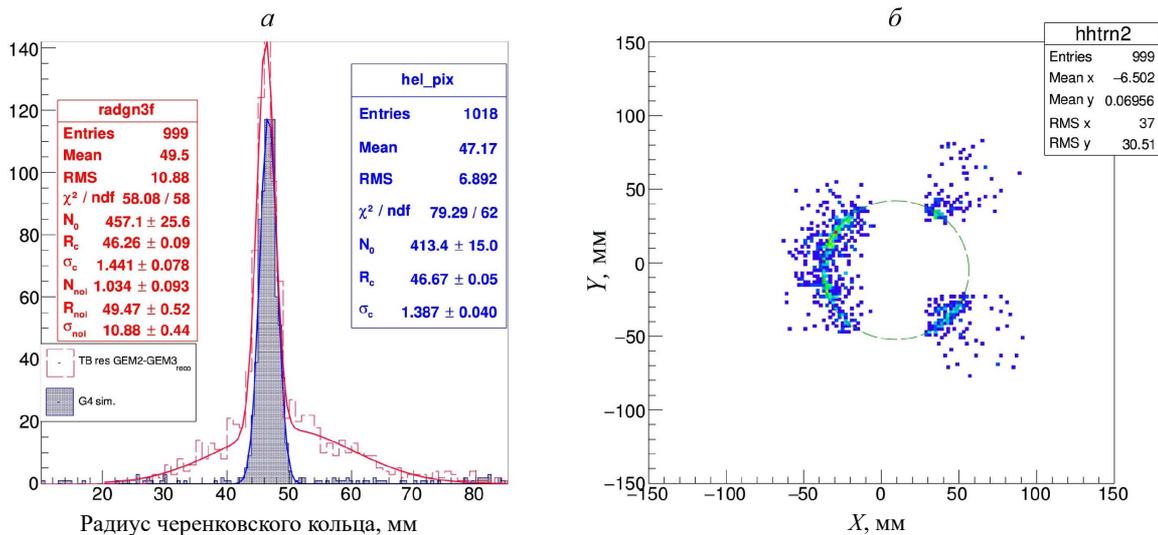


Рис. 5. Результаты испытания на пучке электронов и моделирования в Geant4 для четырехслойного образца аэрогеля 453f4 на фокусном расстоянии 160 мм. Распределение черенковских фотонов по радиусу находится слева (а): незаштрихованная красная гистограмма — результаты эксперимента на пучке, закрашенная синяя гистограмма — результаты моделирования в Geant4. Карта регистрации черенковских фотонов находится на правом графике (б)

Электронный Умножитель) с собственным пространственным разрешением около $50 \mu\text{м}$, позволяющих восстановить координаты и треки. Два детектора перед прототипом и один после. Детектор, установленный после прототипа, позволяет учитывать эффекты многократного кулоновского рассеяния в аэрогелях и других материалах прототипа.

- Для регистрации черенковских фотонов используется 4 многоанодных плоскопанельных ФЭУ H12700 (Hamamatsu), на которые накладываются различные маски ($\varnothing 1 \text{ мм}$ и $\square 3 \text{ мм}$), центрированные на каждом пикселе, для разделения вклада аэрогеля и размера пикселя в общее угловое разрешение ФАРИЧ.

На рис. 5 представлены результаты испытаний на пучке релятивистских электронов ($E = 2 \text{ ГэВ}$) и моделирования в GEANT4 для образца аэрогеля 453f4. На левом графике представлены распределения черенковских фотонов по радиусу: красная гистограмма без заливки — результаты эксперимента на пучке электронов, а синяя закрашенная гистограмма демонстрирует результаты моделирования. Обе гистограммы аппроксимируются функциями Гаусса. Для экспериментальных данных использовалась сумма двух функций Гаусса. Более широкий Гаусс используется для учета шумов ФЭУ и шумов электроники, а при моделировании эти эффекты не учитывались, и распределение хорошо описывается одним Гауссом. Хорошее соответствие результатов испытаний пучка и моделирования достигается при подавлении эффектов многократного рассеяния электронных треков в прототипе до уровня ≤ 2 мрад, что соответствует нашим предварительным

оценкам эффекта многократного рассеяния в аэрогеле с $n = 1.05$ и толщиной 4 см (1.6 мрад). Дополнительными источниками многократного рассеяния помимо аэрогеля являются стенки темного бокса ФАРИЧ, рамка детектора ГЭУ и воздух. Разрешение по одному фотону радиуса черенковского кольца, полученное в испытаниях на пучке электронов с ослабленным многократным рассеянием на уровне 2 мрад, составляет $\sigma_{\text{чер}}^{\text{эксп}} = 1.44 \pm 0.08 \text{ мм}$ (соответствует однофотонному разрешению = 9 мрад), из моделирования $\sigma_{\text{чер}}^{\text{мод}} = 1.39 \pm 0.04 \text{ мм}$. Без уменьшения многократного рассеяния было получено $\sigma_{\text{чер}}^{\text{эксп}} = 1.63 \pm 0.03 \text{ мм}$ (соответствует однофотонному разрешению = 10 мрад). Однофотонные разрешения, полученные в ходе экспериментов на установке «Выведенные пучки» в 2021 г., очень близки к расчётам для «идеального» профиля показателя преломления фокусирующего 4-слойного аэрогеля с $n_{\text{max}} = 1.05$, оптимизированного для размера пикселя $3 \times 3 \text{ мм}$.

По результатам моделирования аэрогели с таким однофотонным разрешением способны обеспечить μ/π — разделение на уровне более 3 стандартных отклонений для треков с импульсом 1.5 ГэВ/с [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод ФАРИЧ является перспективной опцией для системы идентификации проекта «Супер Чарм-Тау фабрика». В 2020–2021 годах в Новосибирске изготовлено несколько образцов фокусирующего 4-слойного аэрогеля для прототипа ФАРИЧ. Основными параметрами образцов являются:

- поперечные размеры $10 \times 10 \text{ см}$ и толщина 3.5 см;

- монолитный блок аэрогеля с 4 слоями и максимальным показателем преломления до $n_{max} = 1.065$;
- фокусное расстояние 16 см;
- длина рэлеевского рассеяния света на длине волны 400 нм более 4 см.

Эти образцы аэрогеля были испытаны с помощью пучков релятивистских электронов ($E = 2$ ГэВ). Получено черенковское угловое разрешение около $9 \div 10$ мрад на один фотон. Результаты эксперимента на установке «Выведенные пучки» и результаты моделирования хорошо согласуются. Моделирование показывает, что детектор ФАРИЧ на основе таких аэрогелей и фотонных детекторов с размером пикселя 3×3 мм способен обеспечить надежное μ/π -разделение в диапазоне импульсов от 0.4 до 1.5 ГэВ/с.

Рассмотрена возможность получения высокопрозрачных аэрогелевых блоков ZrO_2-SiO_2 с различным содержанием и плотностью ZrO_2 . Зависимость показателя преломления от плотности аэрогеля показывает, что введение ZrO_2 в аэрогель SiO_2 увеличивает показатель преломления аэрогеля без увеличения плотности. Аэрогели с добавкой ZrO_2-SiO_2 имеют более крутую зависимость показателя преломления от плотности аэрогеля и при этом обладают лучшей прозрачностью по сравнению с образцами, полученными методом спекания. Этот результат открывает возможность достижения высоких показателей преломления при производстве блоков аэрогеля для метода ФАРИЧ.

В Новосибирске (ИК СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН) ведутся работы по разработке технологии производства фокусирующих аэрогелевых радиаторов больших поперечных размеров ($\sim 20 \times 20$ см).

- [1] Onuchin A., Shamov A., Skoupen Yu., Vorobov A., Danilyuk A., Gorodetskaya T., Kuznetsov V. // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. **315**. P. 517.
- [2] Beloborodov K.I., Barnyakov 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. **494**. P. 487.
- [3] Matteuzzi C. (for the LHCb Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. **494**. P. 409.
- [4] Buenerd M. (for the AMS-RICH Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. **553**. P. 264.
- [5] Contralbrigo M. // Conf. ©RICH 2016a, Bled, Slovenija, 2016.
- [6] SCT collaboration. https://sct.inp.nsk.su/media/cdr/sct_cdr_vol_1.pdf.
- [7] 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. **553**. P. 70.
- [8] Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Degenhardt C., Dorscheid R., Finogeev D. A., Frach T., Gulevich V. V. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2013. **732**. P. 352.
- [9] Iijima T., Korpar S., Adachi I., Fratina S., Fukushima T., Gorišek A., Kawai H., Konishi H., Kozakai Y., Križan P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2005. **548**. P. 383.
- Križan P., Adachi I., Fratina S., Fukushima S., Gorišek A., Iijima T., Kawai H., Konishi H., Korpar S., Kozakai Y. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2008. **595**. P. 100.
- Križan P., Korpar S., Iijima T. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2006. **565**. P. 457.
- [10] 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. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2005. **553**. P. 64.
- [11] Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Düren M., Hayrapetyan A., Katcin A. A., Kayan H., Kononov S. A. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2022. **1039**. P. 167044.
- [12] Shalygin A. S., Katcin A. A., Barnyakov A. Yu., Danilyuk A. F., Martyanov O. N. // Ceram. Int. 2021. **47**. P. 9585.
- [13] Danilyuk A., Kirillov V., Savelieva M., Bobrovnikov V., Buzykaev A., Kravchenko E., Latorov A., Onuchin A. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. **494**. P. 491.
- [14] 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. et al. // J. Instrum. 2016. **11**. P. P03004.
- [15] Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Bykov A. V., Danilyuk A. F., Kasyanenko P. V., Katcin A. A., Kononov S. A., Kravchenko E. A. // J. Instrum. 2016. **15**. P. C10014.

Aerogel radiator for the Super Charm-Tau Factory

A. A. Katcin^{1,3,a}, A. Yu. Barnyakov^{1,2,b}, M. Yu. Barnyakov^{1,2}, V. S. Bobrovnikov^{1,3}, A. R. Buzykaev¹, A. F. Danilyuk¹, S. A. Kononov^{1,3}, E. A. Kravchenko^{3,1}, I. A. Kuyanov¹, I. V. Ovtin^{1,3}, N. A. Podgornov^{1,3}, A. S. Shalygin¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics. Novosibirsk 630090, Russia

²Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk 630073, Russia

³Novosibirsk State University. Novosibirsk 630090, Russia

⁴Boreshkov Institute of Catalysis. Novosibirsk 630090, Russia

E-mail: ^aA.A.Katcin@inp.nsk.su, ^bA.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su, ^cM.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su

Particle identification system based on Focusing Aerogel RICH (FARICH) detector is considered as an option for the future experiments at the Super Charm-Tau Factory (Russia). New samples of focusing 4-layer aerogels with maximal refractive index 1.065 were produced in 2020–2021. First beam test results with relativistic electrons demonstrate single photon resolution (SPR) of $9 \div 10$ mrad. According to simulation results, the aerogels with such SPR are able to provide μ/π -separation at the level of more than 3 standard deviations for tracks with momentum 1.5 GeV/c.

PACS: 29.40.Ka, 41.60.Bq, 61.43.Gt.

Keywords: aerogel, radiator of Cherenkov radiation, FARICH.

Received 23 October 2022.

Сведения об авторах

1. Катцин Александр Андреевич — мл. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-48-55, e-mail: A.A.Kattsin@inp.nsk.su.
2. Барняков Александр Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-48-55, e-mail: A.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su.
3. Барняков Михаил Юрьевич — науч. сотрудник; тел.: (383) 329-46-35, e-mail: M.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su.
4. Бобровников Виктор Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-42-27, e-mail: V.S.Bobrovnikov@inp.nsk.su.
5. Бузыкаев Алексей Рафаилович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-41-37, e-mail: A.R.Buzykaev@inp.nsk.su.
6. Данилюк Александр Фёдорович — канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (383) 326-95-74, e-mail: danilyuk@catalysis.ru.
7. Кононов Сергей Анатольевич — науч. сотрудник; тел.: (383) 329-49-34, e-mail: S.A.Kononov@inp.nsk.su.
8. Кравченко Евгений Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, зав. учебно-научной лабораторией; тел.: (383) 329-49-33, e-mail: E.Kravchenko@nsu.ru.
9. Куянов Иван Алексеевич — науч. сотрудник; тел.: (383) 329-46-35, e-mail: I.A.Kuyanov@inp.nsk.su.
10. Овтин Иван Валерьевич — науч. сотрудник; тел.: (383) 329-49-34, e-mail: I.V.Ovtin@inp.nsk.su.
11. Подгорнов Николай Анатольевич — мл. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-48-55, e-mail: N.A.Podgornov@inp.nsk.su.
12. Шалыгин Антон Сергеевич — канд. хим. наук, науч. сотрудник; тел.: (383) 326-95-74, e-mail: shas@catalysis.ru.