

ОПЦИЯ ФАРИЧ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD

А. Ю. Барняков^{1,2,*}, *В. С. Бобровников*^{1,3},
А. Р. Бузыкаев^{1,3}, *А. Ф. Данилюк*⁴, *А. А. Катцин*¹,
С. А. Кононов^{1,3}, *Е. А. Кравченко*^{1,3}, *И. А. Куянов*^{1,2,3},
И. В. Овтин^{1,3}, *К. Г. Петрухин*¹, *Н. А. Подгорнов*¹,
А. В. Чепелев^{1,2} *от имени коллаборации SPD*

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

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

Для эксперимента SPD (Spin Physics Detector) на коллайдере NICA ведется разработка универсального детектора элементарных частиц. В качестве специализированной системы идентификации предложено разработать счетчик ФАРИЧ (фокусирующий аэрогелевый радиатор излучения Черенкова). Представлена концепция счетчика ФАРИЧ для детектора SPD, обсуждаются современные результаты расчетов и испытаний прототипа, а также достижения в производстве черенковских аэрогелевых радиаторов в Новосибирске.

A universal elementary particle detector for the SPD (Spin Physics Detector) experiment at the NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) collider is being developed. As a specialized identification system, it is proposed to develop a FARICH (Focusing Aerogel Rich Imaging CHerenkov) counter. The concept of the FARICH counter for the SPD detector is presented, the current results of calculations and tests of the prototype, as well as the achievements in the production of Cherenkov aerogel radiators in Novosibirsk, are discussed.

PACS: 29.40.Ka

ВВЕДЕНИЕ

SPD — эксперимент второй очереди на коллайдере NICA, проект разряда мегасайенс, который готовится в ОИЯИ (Дубна). Основная цель эксперимента — изучение спиновой структуры нуклонов при столкновениях поляризованных протонов и дейтронов, а также других неполяризованных явлений при энергиях взаимодействия до 27 ГэВ и светимостью до $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В рамках данного эксперимента планируется исследовать

* E-mail: A.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su

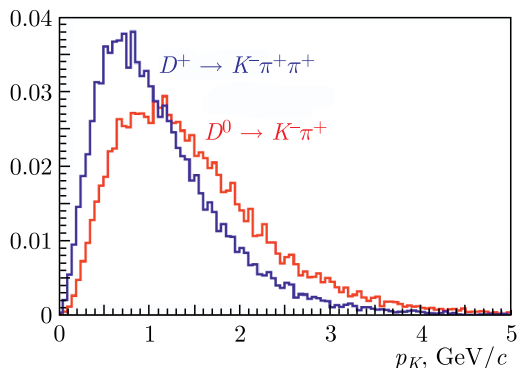


Рис. 1. Импульсный спектр каонов из распада D -мезонов (моделирование) [1]

довать внутреннюю глюонную структуру протонов и дейтронов посредством изучения параметров в основном трех типов производных частиц: чармония (J/ψ -мезон), открытого чарма (D - и D^* -мезоны) и быстрых фотонов.

Для эффективной реализации физической программы эксперимента разрабатывается детектор элементарных частиц. Одной из основных систем детектора является система идентификации, которая должна надежно разделять π - и K -мезоны в диапазоне импульсов до нескольких ГэВ/с. Согласно предварительным оценкам в торцевых частях детектора импульсы π - и K -мезонов могут достигать значений более 3 ГэВ/с (см. рис. 1 из [1]). Для эффективного π/K -разделения в таком диапазоне импульсов в условиях ограниченного пространства, характерного для экспериментов на встречных пучках, хорошо подойдет детектор черенковских колец на основе ФАРИЧ.

1. МЕТОД ФАРИЧ

Методика ФАРИЧ была предложена в 2004 г. двумя независимыми группами исследователей: новосибирской группой (исследователи из Института ядерной физики им. Г. И. Будкера совместно с коллегами из Института катализа им. Г. К. Борескова) [2] и группой из КЕК (Исследовательский ускорительный центр, Япония) [3]. Основная идея метода заключается в том, чтобы создать многослойный аэрогелевый радиатор с такими показателями преломления и толщинами в слоях, чтобы черенковские кольца от каждого слоя накладывались в одной области на плоскости фотодетектора. Схематически идея представлена на рис. 2.

Следующим значительным этапом в развитии техники ФАРИЧ стала успешная демонстрация надежного разделения π/K до 6 ГэВ/с и μ/π до 1,5 ГэВ/с на смешанном адронном пучке в ЦЕРН в 2012 г. [4].

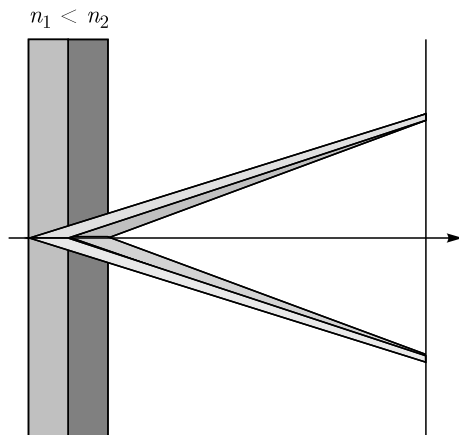


Рис. 2. Схематическое представление идеи метода ФАРИЧ

В 2017 г. система идентификации частиц ФАРИЧ для эксперимента Belle II на коллайдере Super KEKb e^+e^- (Япония), на основе двухслойного фокусирующего аэрогелевого радиатора, была введена в эксплуатацию и с тех пор участвует в наборе экспериментальных данных. Ее параметры и качество разделения частиц соответствуют ожиданиям [5].

Самые крупные в мире фокусирующие аэрогелевые образцы с четырьмя слоями были изготовлены в Новосибирске в 2022–2023 гг. Их габаритные размеры составляют $230 \times 230 \times 35$ мм (рис. 3). Эти блоки обладают хорошей прозрачностью (длина рассеяния света Рэлея при 400 нм составляет $L_{sc}(400 \text{ нм}) = (60 \pm 2)$ мм), а также имеют «правильный» (необходимый для фокусировки) профиль распределения показателя преломления по толщине. Они были детально исследованы с помощью

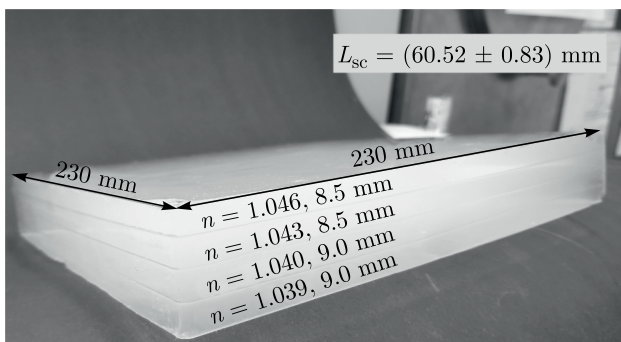


Рис. 3. Крупнейший четырехслойный фокусирующий аэрогелевый радиатор черенковского излучения

релятивистских электронов на специализированной установке в ИЯФ СО РАН [6]. Некоторые результаты этих испытаний приведены в следующем разделе.

2. СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС РАЗВИТИЯ МЕТОДИКИ ФАРИЧ

На рис. 4 представлены X, Y -распределения зарегистрированных черенковских фотонов от нескольких тысяч треков релятивистских электронов (2,5 ГэВ/с), набранных на установке «Выведенные пучки ком-

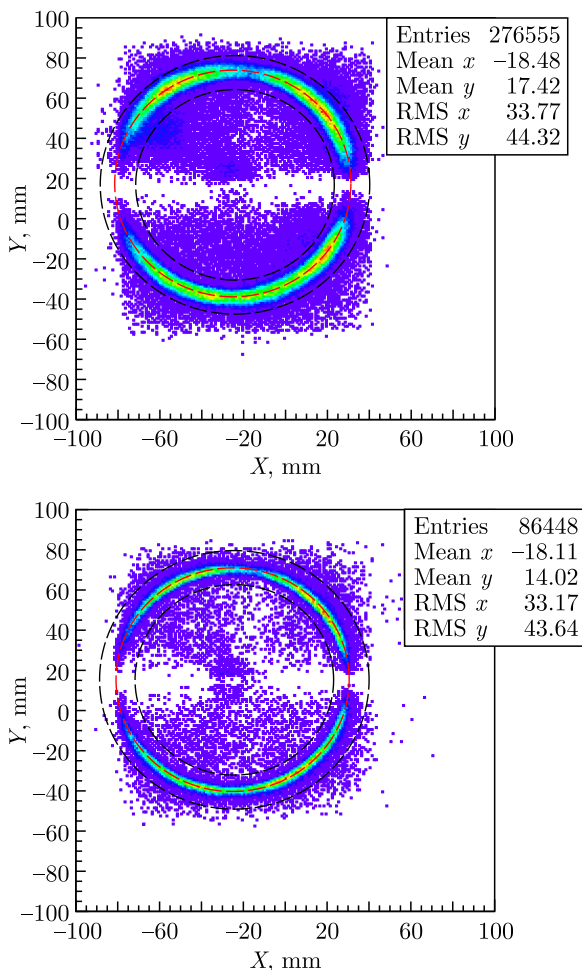


Рис. 4. X, Y -распределения зарегистрированных черенковских фотонов от нескольких тысяч треков релятивистских электронов (2,5 ГэВ/с) при разных размерах пикселя фотодетектора: 6×6 мм (сверху) и 3×3 мм (снизу)

плекса ВЭПП-4М» в ИЯФ СО РАН с разным размером пикселей фотонного детектора: 6×6 мм и 3×3 мм. В этом эксперименте размер пикселя изменялся при помощи затеняющей маски, как описано в [7]. Среднее число зарегистрированных фотонов на трек релятивистских электронов для 6-мм пикселя (ФЭУ Н12700 от Hamamatsu без маски) в этом эксперименте составило $N_{\text{pe}} \approx 16$, для 3-мм $N_{\text{pe}} \approx 4$. По полученным данным можно оценить ожидаемое однофотонное (когда на один трек заряженной частицы регистрируется в среднем один фотон) разрешение по черенковскому углу (SPR), которое зависит в основном от качества радиатора, геометрии оптической системы и фотонного детектора следующим образом:

$$\text{SPR} = \sqrt{\frac{\Delta_{\text{pix}}^2}{(\sqrt{12}Ln)^2} + \sigma_{\text{tr}}^2 + \sigma_{\text{aer}}^2},$$

где Δ_{pix} — линейный размер пикселя фотонного детектора; L — дистанция от входной поверхности аэрогеля до плоскости фотодетектора; n — показатель преломления аэрогеля; σ_{tr} — погрешность, связанная с многократным рассеянием трека в аэрогеле и других материалах на линии пучка (в наших экспериментальных условиях этот эффект составляет порядка 1 мрад), и σ_{aer} — это погрешность, определяемая свойствами аэрогеля, такими как толщина слоев и распределение показателя преломления в них, дисперсия показателя преломления и т. д. Таким образом, однофотонное разрешение по черенковскому углу составляет 13,5 мрад для случая с 6-мм пикселем и 7 мрад — для 3-мм. На основе полученных экспериментальных данных можно оценить качество π/K -разделения в числе стандартных отклонений (n_σ):

$$n_\sigma = \frac{\Theta_C^\pi - \Theta_C^K}{\text{SPR}} \sqrt{N_{\text{pe}}},$$

где Θ_C^π и Θ_C^K — черенковские углы пиона и каона при одинаковом импульсе соответственно. Таким образом, несложно сосчитать, что с данным четырехслойным фокусирующим аэрогелем и пикселем 6×6 мм при регистрации 16 фотонов от релятивистской частицы $n_\sigma \geq 3$ до импульса $P = 6$ ГэВ/с, а при пикселе 3×3 мм и 16 зарегистрированных фотонах — до 8 ГэВ/с.

3. ПРОЕКТ СИСТЕМЫ ФАРИЧ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD-NICA

На основании недавних успехов в развитии методики ФАРИЧ и технологии производства больших четырехслойных фокусирующих аэрогелевых радиаторов был разработан проект системы идентификации для эксперимента SPD-NICA на основе детектора черенковских ко-

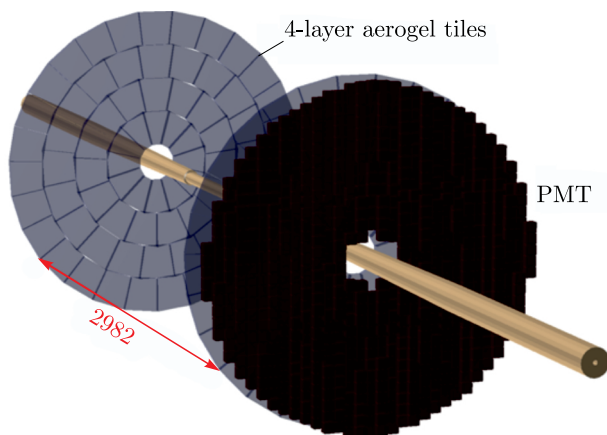


Рис. 5. Концептуальный проект системы ФАРИЧ для эксперимента SPD-NICA

лец с многослойным фокусирующим аэрогелевым радиатором (система ФАРИЧ) [1]. На рис.5 схематически представлен проект системы ФАРИЧ детектора SPD с основным габаритным размером и центральной вакуумной камерой. Предлагаемая система состоит из двух торцевых дисков, размещенных вдоль линии пучков сразу за трековой системой, внутренний радиус дисков (активной области системы) составляет 150 мм, внешний радиус — 800 мм; фокусное расстояние (от входной поверхности аэрогеля до плоскости фотоприемников) — 200 мм; под позиционно-чувствительные фотоприемники и считывающую электронику, систему механической поддержки с системой термостабилизации и охлаждения фотоприемников и электроники отводится по 100 мм с каждого торца. В качестве базовой опции черенковского радиатора рассматривается четырехслойный аэрогель с суммарной толщиной 35 мм и распределением показателя преломления по слоям, как в случае ранее описанного блока, прошедшего испытания на пучке электронов (см. рис.3). Общее количество аэрогелевых блоков — 74 на каждый торец. Форма блоков — трапецевидная, всего 4 различных формы блоков на всю систему по числу концентрических колец, составляющих диск черенковского радиатора, высота каждой трапеции 185 мм. В качестве базовой опции позиционно-чувствительного фотонного детектора предлагается рассмотреть ФЭУ на основе микроканальных пластин (МКП) N6021 производства китайской фирмы NNVT (North Night Vision Technology). Данный прибор имеет внешние размеры 51×51 мм и 64 (8×8) анодов с размером $5,9 \times 5,9$ мм. Для всей системы потребуется $2 \times 550 = 1100$ таких приборов. Для считывания этих приборов идеально подходит плата время-цифровых преобразователей, реализованная на базе программируемых интегральных схем (FPGA-TDC) DiRICH с интерфейсом TRB-3 [9], разработанная

в GSI (Германия). Тем не менее для укомплектовки всей системы ФАРИЧ эксперимента SPD-NICA считывающей электроникой предполагается начать в ближайшем будущем разработку отечественного аналога этой электроники. Также стоит отметить, что в рамках разработки системы ведется поиск и разработка отечественных аналогов позиционно-чувствительных фотонных детекторов на основе МКП в тесном сотрудничестве с высокотехнологическими коммерческими предприятиями, такими как ВТЦ «Баспик» [10] и ООО «Экран ФЭП» [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитии методики ФАРИЧ в 2022–2023 гг. произошли заметные успехи:

- произведено несколько четырехслойных фокусирующих аэрогелевых радиаторов с размерами $230 \times 230 \times 35$ мм;
- испытания этих блоков на пучке релятивистских электронов продемонстрировали отличный эффект фокусировки, совпадающий с расчетами.

Данные успехи позволили предложить для эксперимента SPD на коллайдере NICA систему ФАРИЧ для надежного π/K -разделения в области импульсов до 6 ГэВ/с. В конце 2023 г. проект такой системы был разработан и стал частью технического проекта эксперимента SPD [1]. Сегодня активно ведется разработка нового прототипа детектора ФАРИЧ на основе ФЭУ с МКП китайского и (в перспективе) отечественного производства с возможностью регистрации полного черенковского кольца, чтобы продемонстрировать надежное π/K -разделение в диапазоне импульсов, ожидаемых в эксперименте SPD на коллайдере NICA (ОИЯИ, Дубна).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *SPD Collab.* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. arXiv:2404.08317 [hep-ex].
2. *Barnyakov A. Yu. et al.* Focusing Aerogel RICH (FARICH) // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 553. P. 70.
3. *Iijima T. et al.* A Novel Type of Proximity Focusing RICH Counter with Multiple Refractive Index Aerogel Radiator // Ibid. V. 548. P. 383.
4. *Barnyakov A. Yu. et al.* Beam Test of FARICH Prototype with Digital Photon Counter // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 732. P. 352.
5. *Iwata S. et al.* Particle Identification Performance of the Prototype Aerogel RICH Counter for the Belle II Experiment // Prog. Theor. Exp. Phys. 2016. V. 502. P. 033H01.
6. *Abramov G. N. et al.* Measurement of the Energy of Electrons Extracted from the VEPP-4M Accelerator // J. Instrum. 2016. V. 11. P. P03004.
7. *Barnyakov A. Yu. et al.* PID System Based on Focusing Aerogel RICH for the Super C- τ Factory // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 952. P. 162247.

8. *Barnyakov A. Yu. et al.* Progress and Perspectives of FARICH R&D for the Super Charm-Tau Factory Project // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1039. P. 167044.
9. *Uğur C., Korcyl G., Michel J., Penschuk M., Traxler M.* 264 Channel TDC Platform Applying 65 Channel High Precision (7.2 ps RMS) FPGA Based TDCs // IEEE Nordic-Mediterranean Workshop on Time-to-Digital Converters (NoMe TDC). 2013. P. 1–5.
10. <https://baspik.com>
11. <https://ekranfep.ru/ru/>