

АЭРОГЕЛЕВЫЙ РАДИАТОР ДЛЯ СУПЕР С-ТАУ ФАБРИКИ

Катцин Александр,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
25-29 июль 2022 г. НЦФМ, МГУ (Саров)
Летняя научная школа «Супер с-тау фабрика»

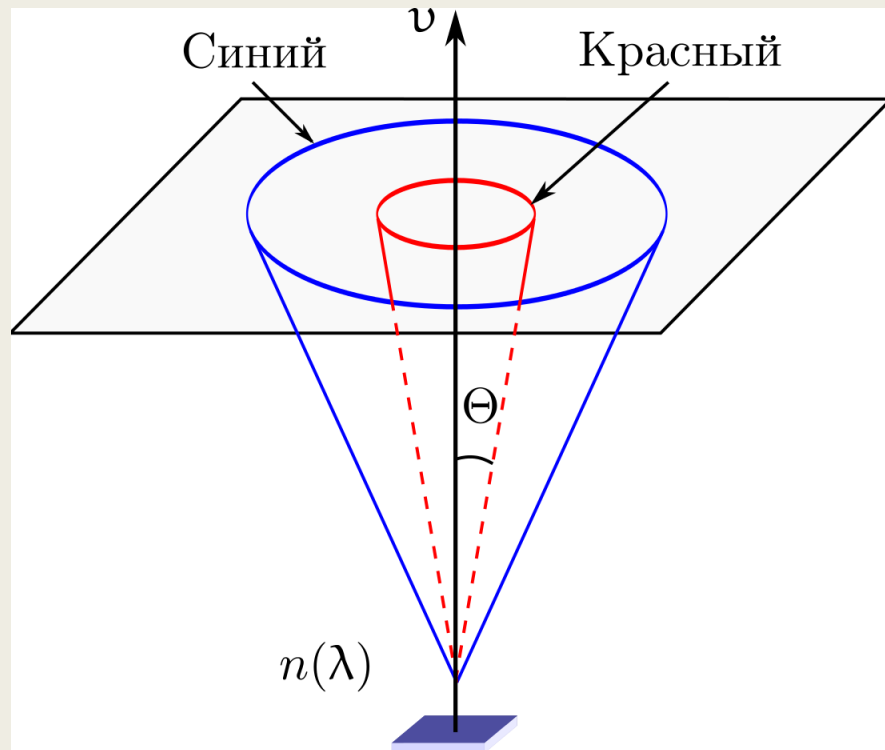
Черенковское излучение

1934 год — Павел Алексеевич Черенков, исследуя флюоресценцию жидкостей, наблюдает новое явление: чистая серная кислота испускает свечение под действием радиоактивного излучения.

Условие возникновения излучения — скорость частицы должна быть больше скорости света в среде $v > \frac{c}{n}$.

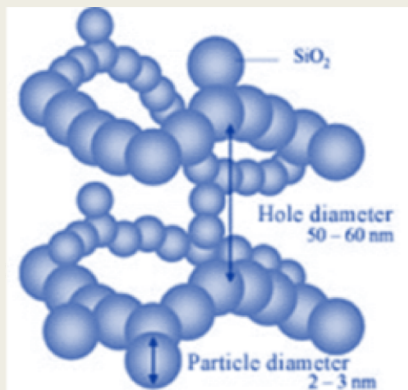
Направление свечения, направлено по движению частицы под определенным углом θ к направлению скорости частицы.

$$\cos\theta = \frac{c}{nv} = \frac{1}{\beta n}$$



Аэрогель

Аэрогель – наноматериал, который представляет собой пористое вещество с размером пор меньше длины волны света в видимом диапазоне.



Аэрогель диоксида кремния состоит из сфер аморфного кварца диаметром несколько нм, 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. Показатель преломления от 1,003 до 1,26.

$$n = \sqrt{1 + \alpha \rho \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]}$$

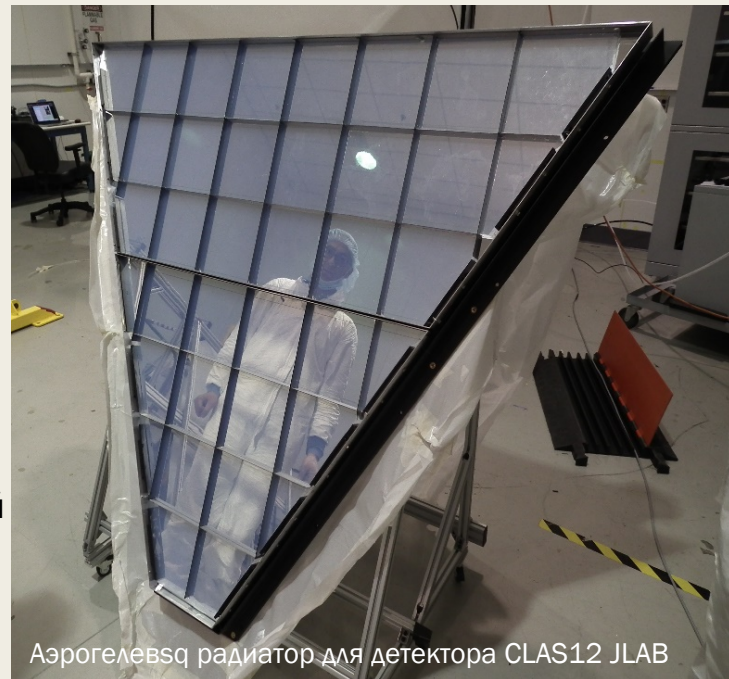
В Новосибирске ИЯФ и ИК совместно производят аэрогели с уникальными оптическими параметрами:

- ✓ Показатель преломления $n = 1,008 \div 1,13$;
- ✓ Длина рассеяния $L_{sc}(400 \text{ нм}) \geq 40 \text{ мм}$;
- ✓ Длина поглощения $L_{abs}(400 \text{ нм}) \geq 1000 \text{ мм}$;
- ✓ Разрабатывается технология синтеза «фокусирующего» аэрогеля.



Новосибирский аэрогель в экспериментах

- Система АШИФ детектора КЕДР (ВЭПП-4М – ИЯФ):
 - π/K -разделение от 0,6 до 1,5 ГэВ/с.
 - Аэрогель $n = 1,05$ ($V \sim 1000$ литров).
- Система АШИФ детектора СНД (ВЭПП-2000 – ИЯФ):
 - π/K -разделение от 300 до 870 МэВ/с.
 - Аэрогель $n = 1,13$ ($V \sim 9$ литров).
- Детектор DIRAC-II (PS – CERN):
 - π/K -разделение от 5,5 до 8,0 ГэВ/с.
 - Аэрогель $n = 1,008$ ($V \sim 9$ литров).
- ДЧК детектор эксперимента AMS-02 (МКС):
 - Поиск антиматерии, изучение космических лучей
 - Аэрогель $n = 1,05$ ($S \sim 1$ м²).
- ДЧК детектор эксперимента LHCb (LHC – CERN):
 - π/K -разделение от 5,5 до 8,0 ГэВ/с.
 - Аэрогель $n = 1,03$ ($S \sim 0,5$ м²), размер блоков 20x20x5 см³.
- ДЧК детектор эксперимента CLAS-12 (J-Lab):
 - π/K - и K/p -разделение на уровне 4σ при импульсах несколько ГэВ/с.
 - Аэрогель $n = 1,05$ ($S \sim 6$ м²), размер блоков 20x20x2-3 см³.

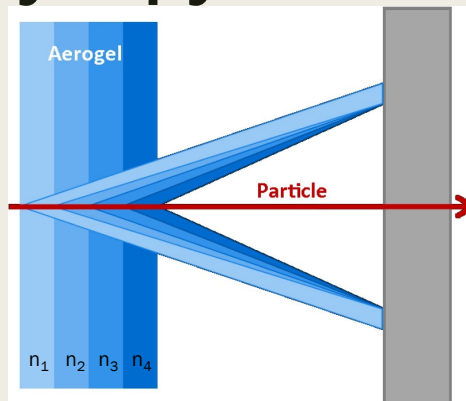


Аэрогелевый радиатор для детектора CLAS12 JLAB

Многослойный фокусирующий аэрогель

1) 2004г. - предложен метод ФАРИЧ в Новосибирске (ИЯФ+ИК СО РАН) и в коллаборации КЕК (Япония), ([NIMA548\(2005\)383](#));

2) 2004г. - первый многослойный блок аэрогеля произведен в Новосибирске, ([NIMA553\(2005\)70](#));

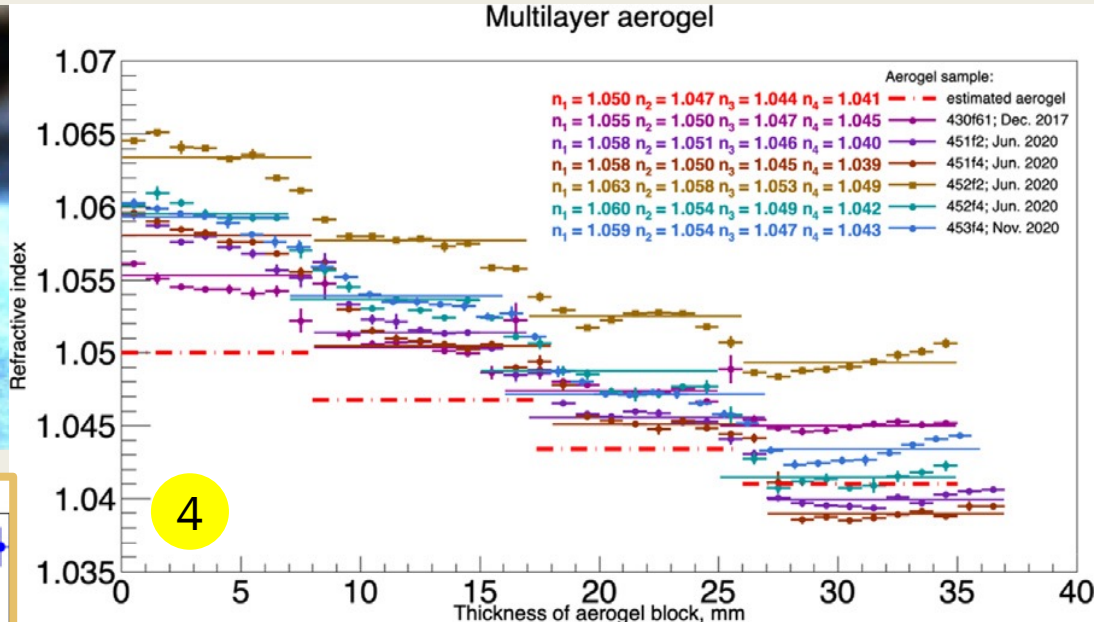
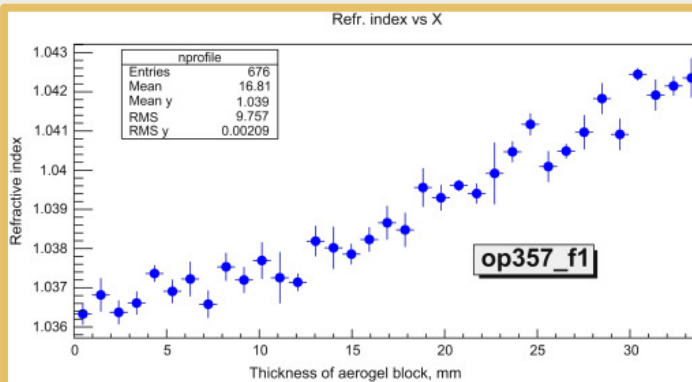
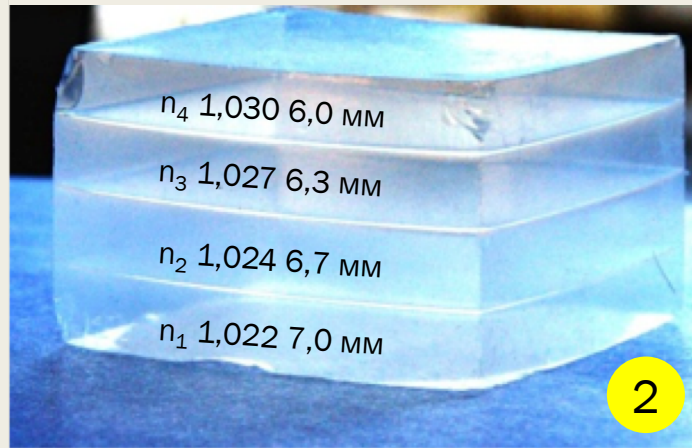


3) 2011г. - произведено испытание прототипа ФАРИЧ на установке «Выведенные пучки электронов и гамма-квантов комплекса ВЭПП-4»: продемонстрирован эффект фокусировки, ([NIMA766\(2014\)88](#));

4) 2012г. - продемонстрирована возможность при помощи метода ФАРИЧ разделять μ и π -мезоны на уровне 5 стандартных отклонений при импульсе 1 ГэВ/с, ([NIMA732\(2013\)352](#));

5) 2022г. - в ИЯФ СО РАН ведется разработка системы ФАРИЧ для проекта СЦТФ: отрабатывается технология производства 4-х слойных фокусирующих аэрогелей с поперечными размерами не менее, чем 100x100 мм и максимальным показателем преломления $\geq 1,05$, ([NIMA1039\(2022\)167044](#)).

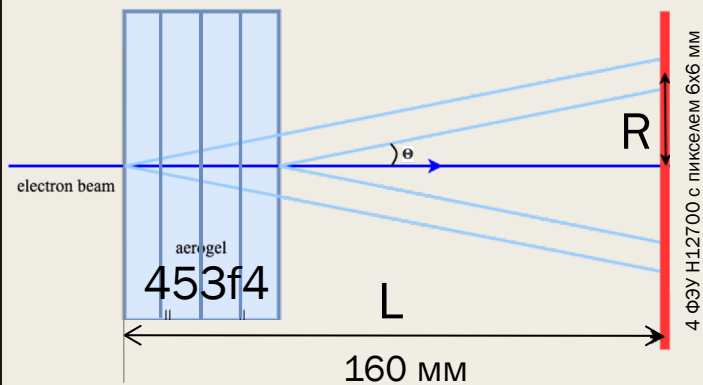
Многослойный фокусирующий аэрогель



Профили показателя преломления в зависимости от толщины образцов аэрогеля, произведенных в 2020 году.

Опробован метод производства «градиентного» аэрогеля с непрерывным градиентом плотности (показателя преломления) от толщины блока.

Многослойный фокусирующий аэрогель (эксперименты на пучке электронов 2021-2022 гг.)



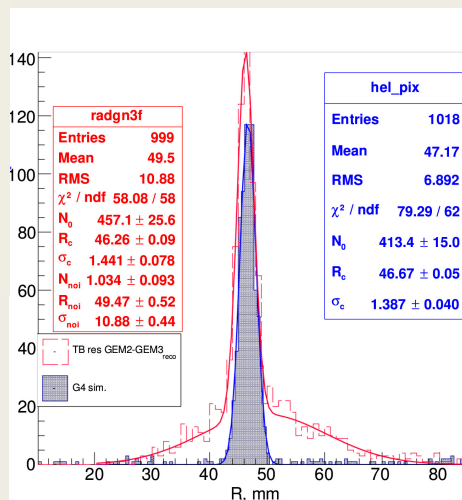
$$\sigma_{R_{ideal}} = 1,2 \text{ мм};$$

$$\sigma_{R_{sim}} = 1,39 \pm 0,08 \text{ мм};$$

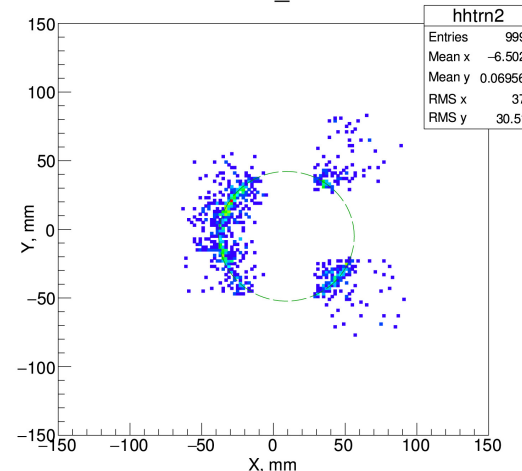
$$\sigma_{R_{exp}} = 1,44 \pm 0,08 \text{ мм}.$$

Моделирование показывает, что детектор FARICH на основе таких аэрогелей и фотонных детекторов с размером пикселя 3×3 мм способен обеспечить μ/π -разделение на уровне $\geq 3\sigma$ с импульсами до 1,5 ГэВ/с.

ЛНШ НЦФМ 27.07.2022



Track GEM_TB-GEM3



Результаты испытаний на установке «Выведенные пучки» и моделирования в Geant4 для 4-слойного аэрогелевого образца 453f4 при фокусном расстоянии 160 мм.

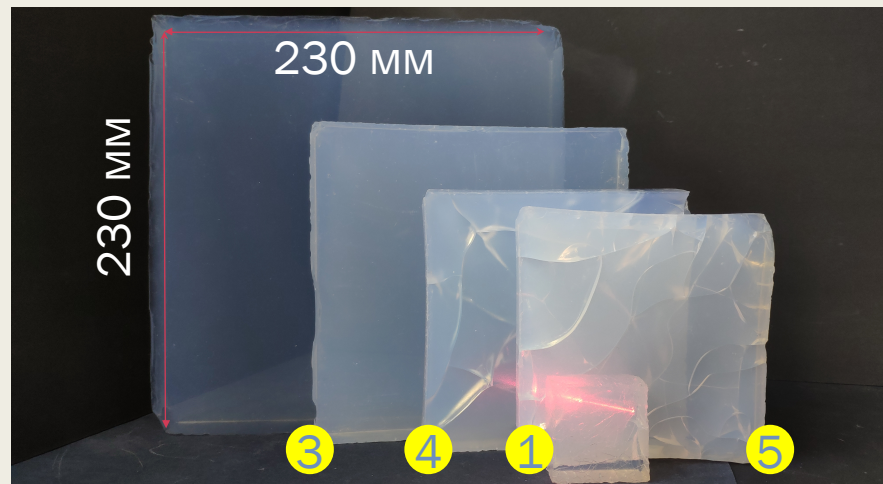
Распределение черенковских фотонов по радиусу - слева: красная гистограмма - результаты испытаний, заполненная синяя гистограмма - результаты моделирования Geant4. Карта попаданий черенковских фотонов - справа.

[NIMA1039\(2022\)167044](#)

Прозрачные аэрогели с высоким показателем преломления

Основным недостатком метода FARICH является относительно высокий пороговый импульс для μ/π -разделения (примерно 0,4 ГэВ/с). Для обеспечения μ/π -разделения в интервале 0,2 - 0,4 ГэВ/с можно использовать детектор FARICH с аэрогелевым радиатором с высоким показателем преломления.

Рассматривается новая технология производства высокопрозрачных аэрогелей с высокой оптической плотностью, основанная на малой добавке диоксида циркония в аэрогель SiO_2 .

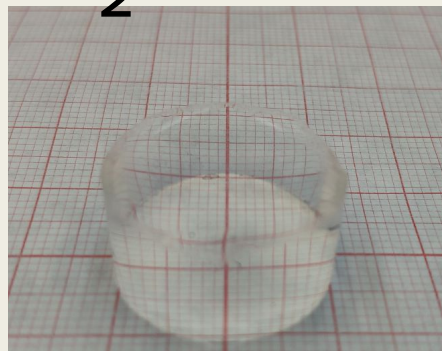


	Год	Показатель преломления	Длина рассеяния, мм
1	2007	1,13	18
2	2022	1,10	16
3	2022	1,12	14
4	2022	1,20	10
5	2022	1,25	7

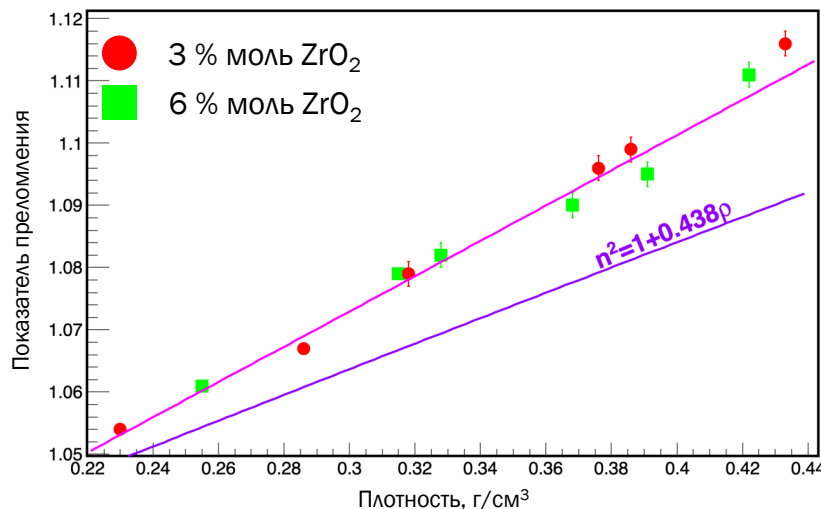
Циркониевый аэрогель $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$



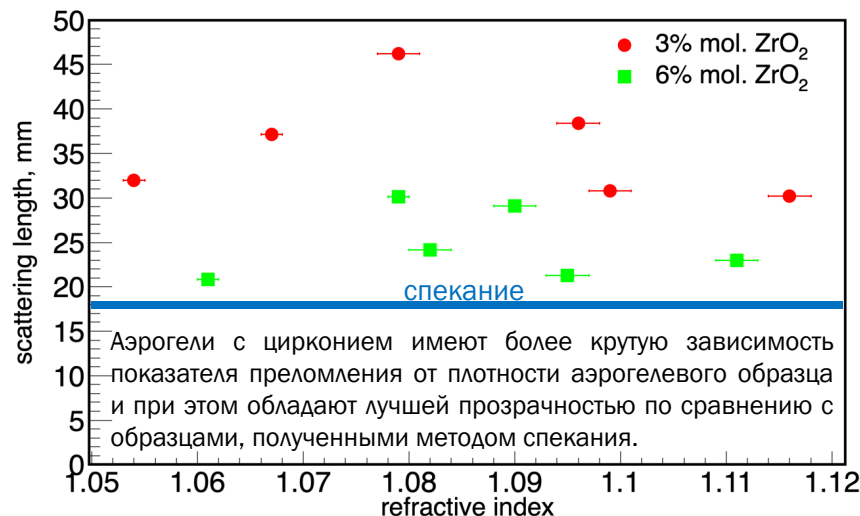
Проведена серия экспериментов на пучке электронов для определения показателя преломления “новых” аэрогелей по радиусу черенковского кольца.



Refractive index

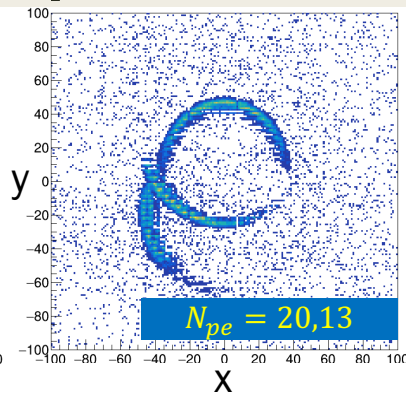
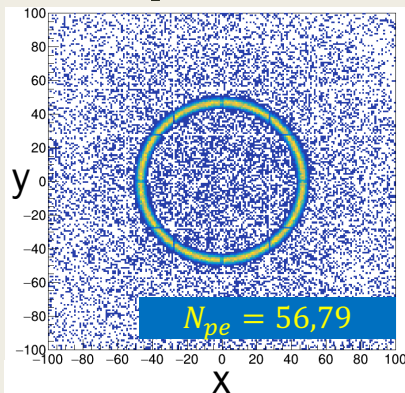


The scattering length of aerogels with zirconium

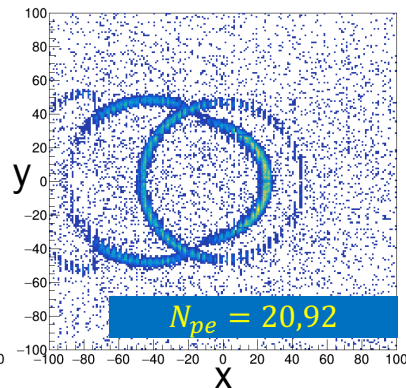
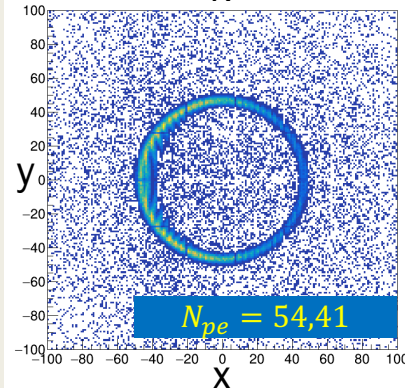


Зачем нужны аэрогелевые радиаторы большого размера?

Центр блока (перпендикулярно)

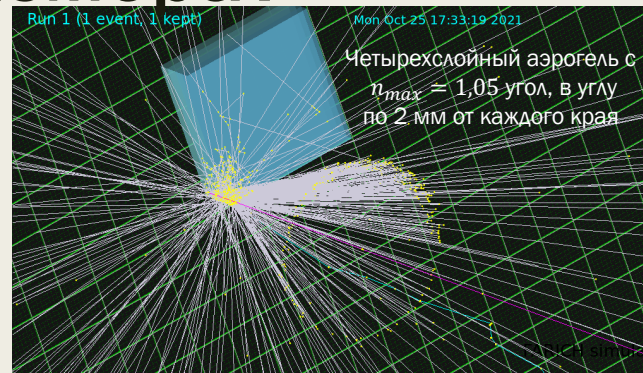


2 мм от края посередине (перпендикулярно)



В углу по 2 мм от каждого края (перпендикулярно)

В углу по 2 мм от каждого края (7 градусов, -7 градусов относительно ОУ)

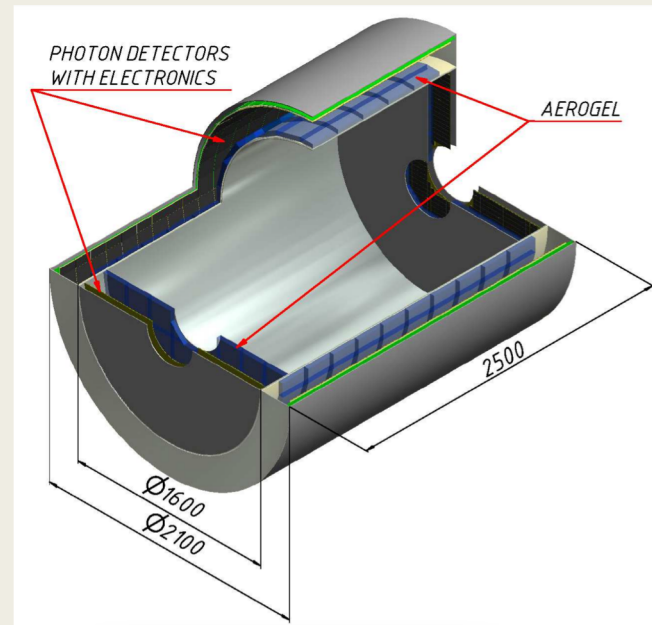


- Для событий на краю существенно усложняется процедура восстановления черенковского кольца и, соответственно, черенковского угла.
- Число зарегистрированных фотонов для треков в углу блока уменьшается примерно в 56/20 раз, что будет приводить к ухудшению точности восстановления черенковского угла примерно в $\sqrt{56/20}$ раз.

Аэрогель для СЧТФ

➤ ФАРИЧ для проекта Супер Чарм-Тау фабрики:

- μ/π -разделение от 0,2 до 1,2 ГэВ/с на уровне 4σ ;
- π/K -разделение от 0,6 до 3,5 ГэВ/с лучше 4σ ;
- позиционно-чувствительный фотонный детектор с размером пикселя $3 \times 3 \text{ мм}^2$, площадь 21 м^2 ;
- около 1,8 млн. каналов электроники;
- расстояние между входной поверхностью радиатора и фотонным детектором 20 см;
- Аэрогелевый фокусирующий радиатор:
 - четырёхслойный с $n_{max} = 1,05$;
 - толщина 36 мм;
 - поперечные размеры $\geq 100 \times 100 \text{ мм}$ (цель - $200 \times 200 \text{ мм}$);
 - общая площадь 17 кв. м. ($S \sim 17 \text{ м}^2$).

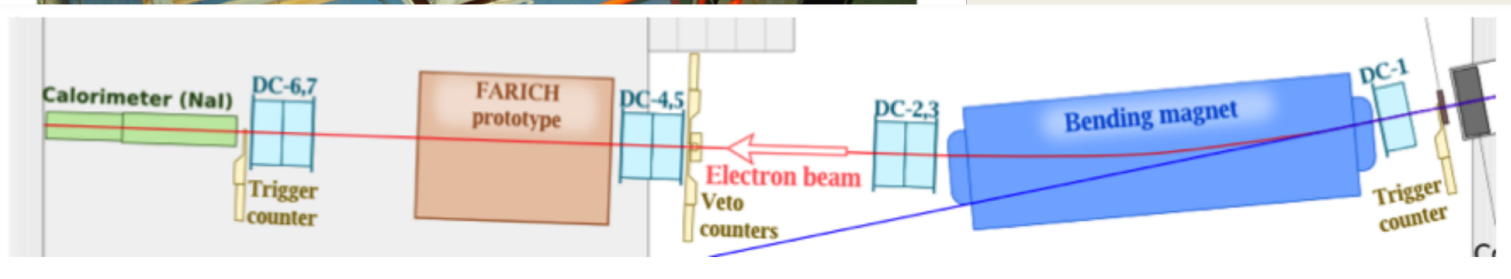
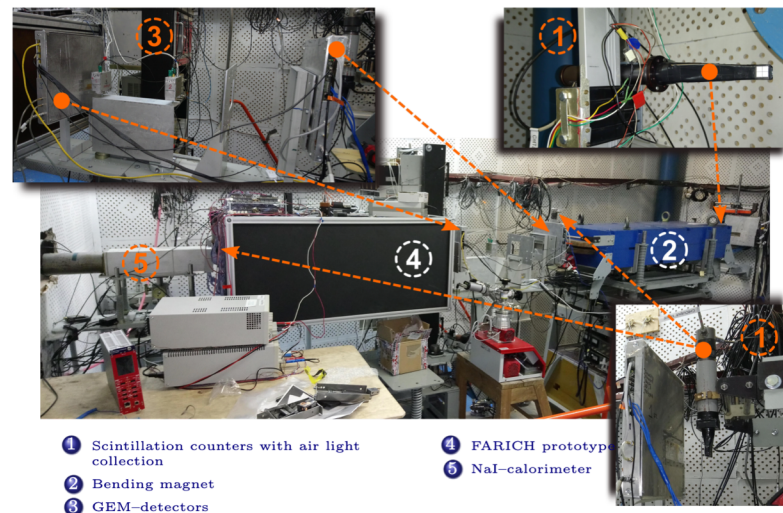
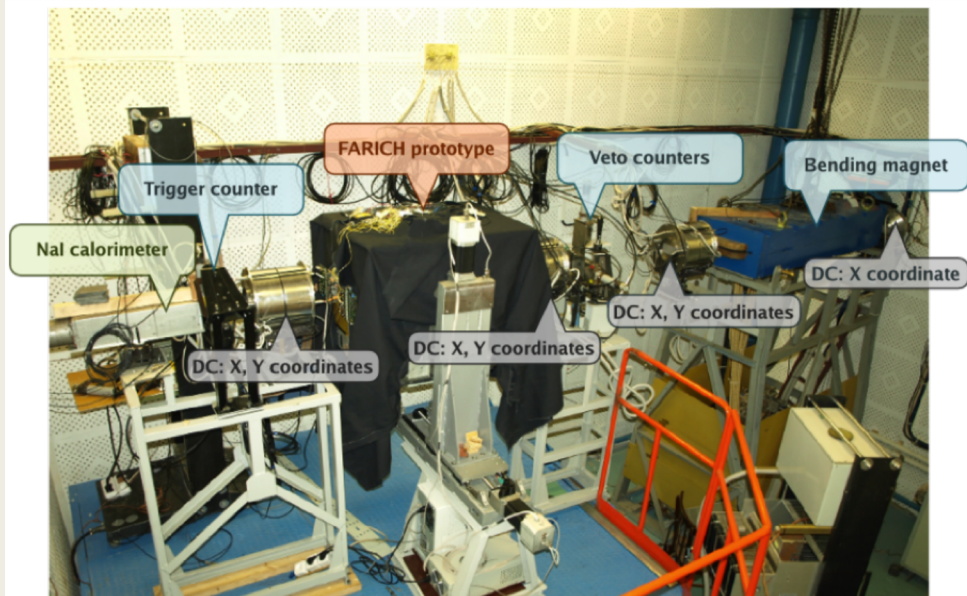


Заключение

- В Новосибирске ИК и ИЯФ СО РАН разрабатывают черенковские счетчики на основе аэрогеля с 1986 года.
- Реализовано несколько успешных проектов: аэрогель новосибирского производства используется во многих экспериментах по всему миру и даже в космосе (AMS02, МКС).
- С 2004 года ведутся работы по производству фокусирующих аэрогелей.
- Для успешной реализации системы ФАРИЧ проекта СЦТФ нужно разработать технологию и развить производство больших аэрогелевых фокусирующих радиаторов (200x200x36 мм).
- На сегодняшний день есть опыт производства больших однослойных блоков с размерами 200x200x30 мм (6 м² для CLAS-12) и 4-х слойных фокусирующих блоков с размерами 100x100x36 мм.
- Планируется в ближайшем будущем перейти к производству фокусирующих 4-х слойных блоков с поперечными размерами 200x200x36 мм.
- Ведутся работы по производству высокопрозрачных аэрогелей с большим показателем преломления ($n \geq 1,1$) для расширения диапазона μ/π -разделения в область малых импульсов ≤ 330 МэВ/с.

BACKUP

Выведенный пучок электронов



Прозрачные аэрогели с высоким показателем преломления

Возможность разделения частиц для двойного радиатора RICH на основе 4-слойного фокусирующего аэрогеля с максимальным показателем преломления $n_{max} = 1,05$ в сочетании с аэрогелем с $n = 1,1$ была исследована с помощью моделирования в GEANT4.

Распределение черенковских фотонов в FARICH с двойным аэрогелевым радиатором: результаты пучкового теста с релятивистскими электронами (слева); результаты моделирования в GEANT4 (справа).

