

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

БУЗЫКАЕВ Алексей Рафаилович

**Разработка черенковских счётчиков АШИФ для  
детектора КЕДР**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Научный руководитель

Онучин Алексей Павлович

доктор физ.-мат. наук, профессор

НОВОСИБИРСК – 2017

# Оглавление

<b>Введение</b> . . . . .	5
<b>Глава 1. Аэрогелевые черенковские пороговые счётчики в экспериментах на встречных пучках</b> . . . . .	9
1.1. Детектор TASSO . . . . .	10
1.2. Вариант прямого светосбора для детектора КЕДР . . . . .	11
1.3. Детектор Belle . . . . .	12
1.4. Вариант торцевой системы для детектора ВаВаг . . . . .	15
1.5. Детектор КЕДР . . . . .	17
1.6. Детектор СНД . . . . .	18
<b>Глава 2. Программа моделирования светосбора методом Монте-Карло</b> . . . . .	20
2.1. История создания программы . . . . .	20
2.2. Модель основных процессов . . . . .	22
2.2.1. Поляризация . . . . .	22
2.2.2. Ламбертовское отражение от стенок счётчика . . . . .	23
2.2.3. Закон Френеля на границе двух сред . . . . .	23
2.2.4. Взаимодействие с веществом . . . . .	24
<b>Глава 3. Разработка метода АШИФ</b> . . . . .	29
3.1. Методы сбора света в аэрогелевых черенковских счётчиках . . . . .	29
3.1.1. Особенности распространения света в аэрогеле . . . . .	29
3.1.2. Метод прямого сбора света . . . . .	29
3.1.3. Аэрогелевые счётчики на основе переизлучателей и ФЭУ (АШИФ) . . . . .	30
3.2. Аэрогель . . . . .	31

3.2.1.	Основные характеристики аэрогеля и технология производства . . . . .	31
3.2.2.	Методы измерения показателя преломления . . . . .	32
3.2.3.	Метод измерения длины рассеяния . . . . .	33
3.2.4.	Метод измерения длины поглощения . . . . .	34
3.2.5.	Прогресс в производстве высокопрозрачных аэрогелей	37
3.3.	Фотоумножители . . . . .	40
3.3.1.	Основные технические требования к ФЭУ . . . . .	40
3.3.2.	Сеточные ФЭУ фирмы HAMAMATSU . . . . .	40
3.3.3.	ФЭУ на основе микроканальных пластин . . . . .	41
3.3.3.1.	Основные характеристики и принцип работы	41
3.3.3.2.	Коэффициент усиления в магнитном поле .	42
3.3.3.3.	Коэффициент сбора фотоэлектронов . . . . .	42
3.4.	Переизлучатели света . . . . .	44
3.4.1.	Основные характеристики переизлучателей . . . . .	45
3.4.2.	Сравнение переизлучателей на основе РОРОР и ВВQ .	48
3.5.	Отражатели на стенках счётчиков . . . . .	49
3.5.1.	Коэффициент отражения и выбор отражателя . . . . .	49
<b>Глава 4.</b>	<b>Проект аэрогелевых счётчиков для детектора ВаВаг</b>	<b>51</b>
4.1.	Четырехслойный вариант . . . . .	52
4.2.	Проверка на выведенном пучке в ЦЕРНе . . . . .	53
<b>Глава 5.</b>	<b>Детектор КЕДР . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>Глава 6.</b>	<b>Система счётчиков АШИФ для детектора КЕДР . .</b>	<b>58</b>
6.1.	Основные требования к системе . . . . .	58
6.2.	Проект системы . . . . .	59
6.2.1.	Выбор показателя преломления аэрогеля . . . . .	59
6.2.2.	Выбор переизлучателя . . . . .	59

6.2.3.	Выбор размеров счётчиков . . . . .	60
6.2.4.	Прототип счётчика на основе «синего» переизлучателя . . . . .	61
6.2.5.	Основные параметры системы . . . . .	64
6.3.	Сравнение эксперимента на космических частицах с моделированием счётчика методом Монте-Карло . . . . .	64
6.4.	Проверка счётчиков на пучке в Дубне, $\pi/K$ разделение . . . . .	66
6.5.	Проверка качества идентификации . . . . .	68
6.6.	Статус системы . . . . .	73
<b>Глава 7.</b>	<b>Система счётчиков АШИФ для детектора СНД . . . . .</b>	<b>74</b>
7.1.	Размеры счётчиков и показатель преломления . . . . .	75
7.2.	Результаты Монте-Карло моделирования . . . . .	76
7.3.	Статус системы . . . . .	76
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>. . . . .</b>	<b>77</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>. . . . .</b>	<b>80</b>

## Введение

Универсальный магнитный детектор КЕДР разработан для экспериментов на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М на энергию  $2E=2\div 11$  ГэВ в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН. Уникальной особенностью коллайдера ВЭПП-4М, наряду с широким диапазоном энергии, является наличие двух систем прецизионного измерения энергии пучка:

- система измерения энергии с точностью на уровне  $10^{-6}$  методом резонансной деполяризации, предложенным и разработанным в ИЯФ [1];
- система лазерной калибровки на основе измерения энергии фотонов при обратном комптоновском рассеянии, которая позволяет мониторировать энергию с точностью около  $10^{-5}$  одновременно с набором данных детектором [2, 3]. Для коллайдеров этот метод впервые реализован на ВЭПП-4М.

Основными особенностями детектора КЕДР являются:

- Жидкокриптоновый калориметр со стриповой структурой, предложенный и разработанный в ИЯФ, который позволяет измерять координату точки конверсии фотона с энергией 100 МэВ с точностью  $\sim 1$  мм, что на порядок точнее, чем получают на кристаллических калориметрах [4].
- Система регистрации рассеянных электронов под малыми углами вылета, предложенная и разработанная в ИЯФ, для изучения двухфотонных процессов [5].
- Система идентификации частиц на основе черенковских счётчиков АШИФ (Аэрогель ШИФтер Фотоумножитель), предложенных в ИЯФ в 1992 году, для [6, 7, 8, 9, 10].

Основные результаты, полученные в экспериментах с детектором КЕДР, включают измерения с рекордной точностью масс резонансов  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$  [11, 12],  $\tau$ -лептона [13, 14] и заряженных  $D$ -мезонов [15], основных параметров

$\psi(3770)$  [16], а также произведения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ ,  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$  для  $J/\psi$ -мезона [17],  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{hadr}/\Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$  для  $\psi(2S)$ -мезона [18, 19]. Измерена также вероятность распада  $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$  [20]. Получены наиболее точные значения величины  $R$  в области энергии  $3.1 \div 3.7$  ГэВ [21, 22], существенные для расчёта величины аномального магнитного момента мюона  $(g - 2)_\mu$ .

В 2013 году система аэрогелевых счётчиков АШИФ была установлена в детектор КЕДР. Измерения показали высокое качество идентификации частиц [9, 10], что позволит расширить программу исследований с детектором КЕДР в области энергии  $\psi$ - и  $\Upsilon$ -мезонов.

Диссертация посвящена разработке системы счётчиков АШИФ для детектора КЕДР. Особенностью этих счётчиков является то, что черенковский свет из аэрогеля собирается на шифтер (световод с переизлучателем), присоединённый к фотоумножителю. Выбор системы аэрогелевых счётчиков для КЕДР был сделан на основе анализа альтернативных проектов. Опыт, накопленный при реализации счётчиков для детектора КЕДР, позволил создать систему счётчиков АШИФ для детектора СНД.

### Основные научные результаты работы, выносимые на защиту:

1. Впервые разработана универсальная программа моделирования светосбора методом Монте-Карло в сложных оптических системах с учётом переизлучения фотонов, названная LCE.

Она использовалась для расчёта основных параметров счётчиков АШИФ, предложенных в Институте ядерной физики в 1992 году.

2. Разработан оригинальный метод измерения длины поглощения света в аэрогеле с использованием программы LCE.

Применение этого метода позволило освоить технологию производства аэрогеля с большой длиной поглощения, определяющей коэффициент светосбора в счётчиках с диффузным собиранием света.

В настоящее время оптические параметры аэрогеля, производимого в Новосибирске, являются одними из лучших в мире. Он используется в детекторах СНД на ВЭПП-2000, КЕДР на ВЭПП-4М и AMS-02 на Международной космической станции.

3. Оптимизирована конструкция счётчиков АШИФ для детектора КЕДР на основе переизлучателя ВВQ и ФЭУ с микроканальными пластинами и мультищелочным фотокатодом.

Система состоит из 160 счётчиков, расположенных в два слоя, и содержит 1000 литров аэрогеля. Метод АШИФ позволил на порядок уменьшить суммарную площадь фотокатодов по сравнению с вариантом системы счётчиков с прямым светосбором.

В 2000 году проведено испытание торцевого счётчика на выведенном пучке в Дубне. Измеренное число фотоэлектронов согласуется с расчётным значением.

Разделение  $\pi$ - и  $K$ -мезонов при импульсе 1.2 ГэВ/с составляет  $4.5\sigma$ .

4. С 2013 года система счётчиков АШИФ работает в составе детектора КЕДР. Впервые определено качество идентификации двухслойной системы АШИФ.

С помощью космических мюонов найдена степень разделения  $\pi$ - и  $K$ -мезонов. При импульсе 1.2 ГэВ/с уровень разделения составляет  $4\sigma$ , что выше уровня разделения на время-пролётной системе детектора BES-III, на аэрогелевой системе детектора Belle и сравнимо с системой DIRC детектора BaBar.

5. С помощью программы LSE произведён расчёт светосбора счётчиков АШИФ для детектора СНД. На основании расчёта была оптимизирована конструкция системы счётчиков. В результате удалось создать счётчики с рекордно малой толщиной, необходимой для установки в детекторе. Система счётчиков АШИФ используется в экспериментах с детек-

тором СНД на коллайдере ВЭПП-2000 с 2009 года. В частности, с её помощью удалось провести прецизионное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в области энергии от 1050 до 2000 МэВ.

## Глава 1

# Аэрогелевые черенковские пороговые счётчики в экспериментах на встречных пучках

Черенковские детекторы давно и хорошо известны в физике частиц. Пороговая зависимость количества черенковского света от скорости частицы служит удобным средством для идентификации частиц. Одной из частых проблем в экспериментах на встречных пучках является разделение  $\pi$ - и  $K$ -мезонов в распадах  $D$ - и  $B$ -мезонов. От спектра импульсов распадных  $\pi$ - и  $K$ -мезонов зависит выбор показателя преломления черенковского радиатора. Требуемый в этом случае показатель преломления обычно лежит в районе  $1.01 \div 1.1$ , что и определило применение в качестве радиатора аэрогеля, являющимся твёрдым веществом при низкой плотности, характерной для газов под давлением. Физически аэрогель представляет собой наночастицы ( $2 \div 5$  нм) диоксида кремния, разделённые воздушными порами размером около 100 нм (подробнее см. главу 3.2). Заметим, что такая структура приводит к сильному эффекту рассеяния света в аэрогеле.

Обычно систему черенковских детекторов организуют в виде разделённых по свету счётчиков таким образом, что свет, появившийся в одном счётчике, не сможет быть зарегистрирован в другом. Одной из основных характеристик, определяющих качество идентификации, является среднее число фотоэлектронов  $\langle N \rangle$ , регистрируемых фотоприёмником вследствие пролёта релятивистской частицы через черенковский счётчик. Вероятность получения в данном измерении нулевого числа фотоэлектронов, что будет означать принятие такой частицы за допороговую, определяется по распределению Пуассона как  $e^{-\langle N \rangle}$ . Число фотоэлектронов определяется квантовой эффективностью фотоприёмника и количеством света, так что одна из основных задач при постро-

ении аэрогелевых черенковских счётчиков — сбор света в условиях сильного рассеяния в аэрогеле.

Далее в этой главе рассматриваются как реализованные системы идентификации, так и проработанные но не реализованные проекты.

## 1.1. Детектор TASSO

Одно из первых применений аэрогеля как черенковского радиатора имело место в детекторе TASSO, работавшего на ускорителе PETRA в Германии [23]. Использовался аэрогель с показателем преломления 1.025. Площадь одного счётчика, покрытая аэрогелем, составляла 35 на 100 см при толщине 13.5 см (см. рис. 1.1). Всего в детекторе имелось 32 счётчика.

Средняя длина рассеяния в аэрогеле была около 2.4 см на 436 нм, а длина поглощения не измерялась, а лишь грубо оценивалась. Каждый счётчик просматривался шестью фотоумножителями диаметром 15 см. Эти ФЭУ были выведены за пределы телесного угла счётчика, а для сбора света использовался белый диффузный отражатель из бумаги Millipore на стенках счётчика. Размер счётчика в направлении движения частиц превышал один метр. Было изготовлено несколько прототипов для выбора окончательной конструкции счётчиков. Коэффициент светосбора оценивался по измеренному коэффициенту отражения по аналитической формуле справедливой только для сферы. Среднее число фотоэлектронов в счётчике полученное на эксперименте составило  $\langle N \rangle = 3.9 \pm 0.2$  для релятивистской частицы.

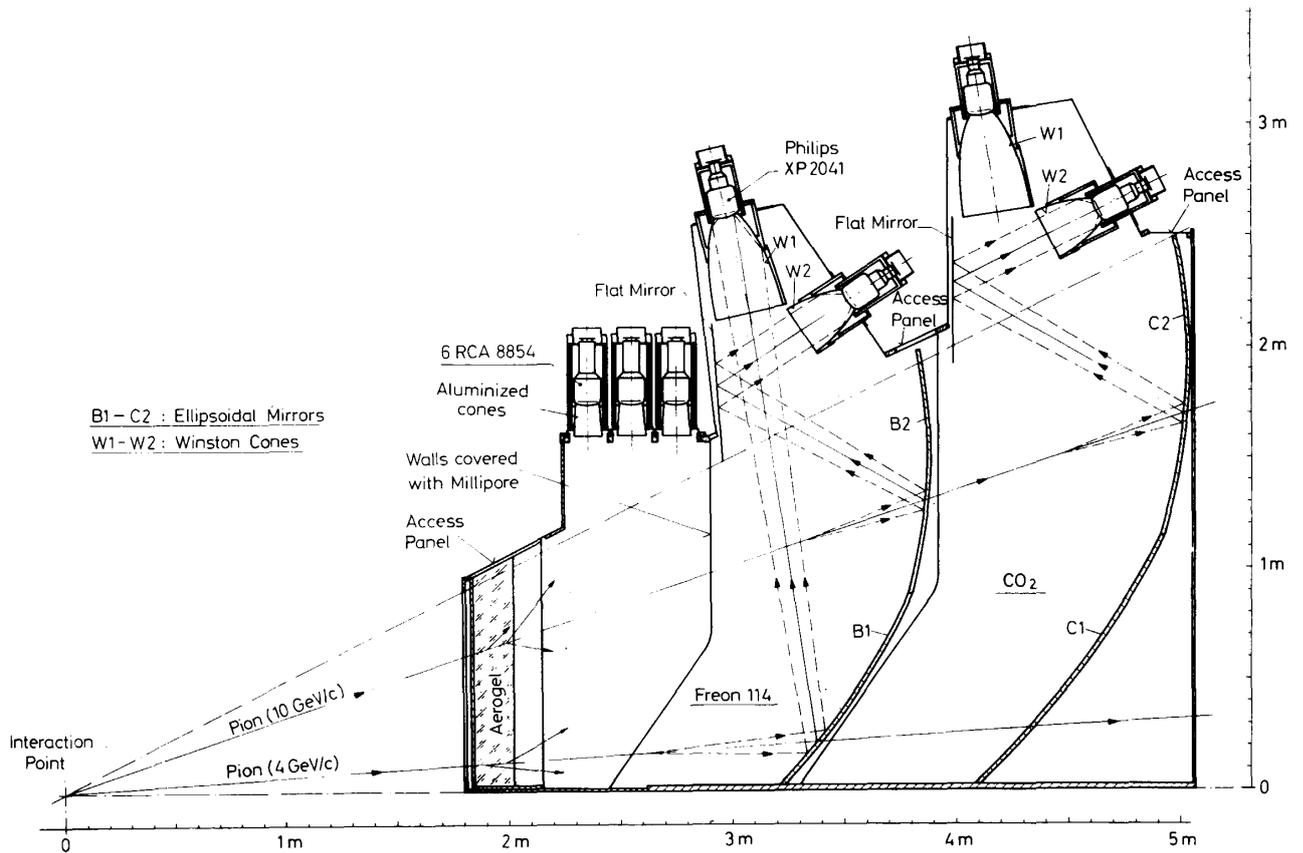


Рис. 1.1. Вид черенковских счётчиков детектора TASSO. (Оригинальная версия рисунка из [23]).

Обозначения: Interaction Point – точка взаимодействия пучков, Pion – трек  $\pi$ -мезона, Aerogel – аэрогель в счётчике, Access Panel – стенка для доступа внутрь счётчика, Walls covered with Millipore – стенки покрыты светоотражающим покрытием Millipore, Ellipsoidal Mirrors – эллипсоидальные зеркала, Winston Cones – конусы Винстона, Aluminized cones – алюминизированные конусы, 6 RCA 8854 – 6 ФЭУ RCA 8854, Flat Mirror – плоское зеркало, Freon 114 – фреон 114, Philips XP 2041 – ФЭУ Philips XP 2041.

## 1.2. Вариант прямого светосбора для детектора КЕДР

В варианте системы счётчиков для детектора КЕДР с прямым светосбором [24, 6] была выбрана конструкция, когда над аэрогелем с показателем преломления 1.035 было оставлено свободное пространство для улучшения сбора света. Поскольку в КЕДРе на систему идентификации отведено всего 15 см по толщине, решено было оставить 5 см на воздушный зазор в счётчике и просматривать такой счётчик ФЭУ диаметром 5 см. В качестве ФЭУ предполагалось использовать сеточные Hamamatsu R2490-01, испытанные в магнитном поле до

2 Т. Измерения на прототипе и расчёты показали, что можно получить в среднем  $4.5 \pm 0.2$  фотоэлектрона на счётчик. Размеры и конструкция счётчика была выбрана исходя из оценочных данных о длине поглощения в аэрогеле. Всего в системе предполагалось использовать 64 баррельных счётчика по 4 ФЭУ в каждом, и 16 счётчиков в каждом торце по 5 ФЭУ на счётчик, т.е. всего 416 ФЭУ, при покрытии  $0.9 \times 4\pi$  телесного угла детектора. Высокая стоимость фотоумножителей явилось препятствием для реализации этого проекта, поэтому было принято решение искать вариант системы с меньшим количеством ФЭУ.

### 1.3. Детектор Belle

Основной особенностью системы аэрогелевых пороговых счётчиков на детекторе Belle [25] является переменный показатель преломления в зависимости от угла с осью пучков (см. рис. 1.2). Это связано с асимметричностью В-фабрики КЕКВ (Япония): энергия пучка позитронов составляет 3.5 ГэВ, а электронов – 8 ГэВ. Для более полного охвата импульсного спектра идентифицируемых частиц сделаны 4 области углов с одинаковым показателем преломления в баррельной части и 5-я – в торцевой. Благодаря большому объёму для размещения системы — около 30 см по радиусу в баррельной части и 35 см по оси z в торце — счётчики представляют собой примерно кубические блоки размером около  $12 \times 12 \times 12$  см (см. рис. 1.3), заполненные аэрогелем, которые просматриваются одним или двумя ФЭУ с диаметрами 5.2, 6.4 и 7.6 см (в зависимости от показателя преломления: 1.020, 1.015, 1.010 в баррельной и 1.030 в торцевой части). Счётчики размещены под переменным углом наклона для уменьшения вероятности прохождения частицей двух соседних счётчиков. Число фотоэлектронов для релятивистской частицы превышает 10 в баррельной части и более 25 в торцевой части системы. На рис. 1.4 приведены экспериментальные данные по идентификации  $\pi$ - и  $K$ -мезонов для всей системы.

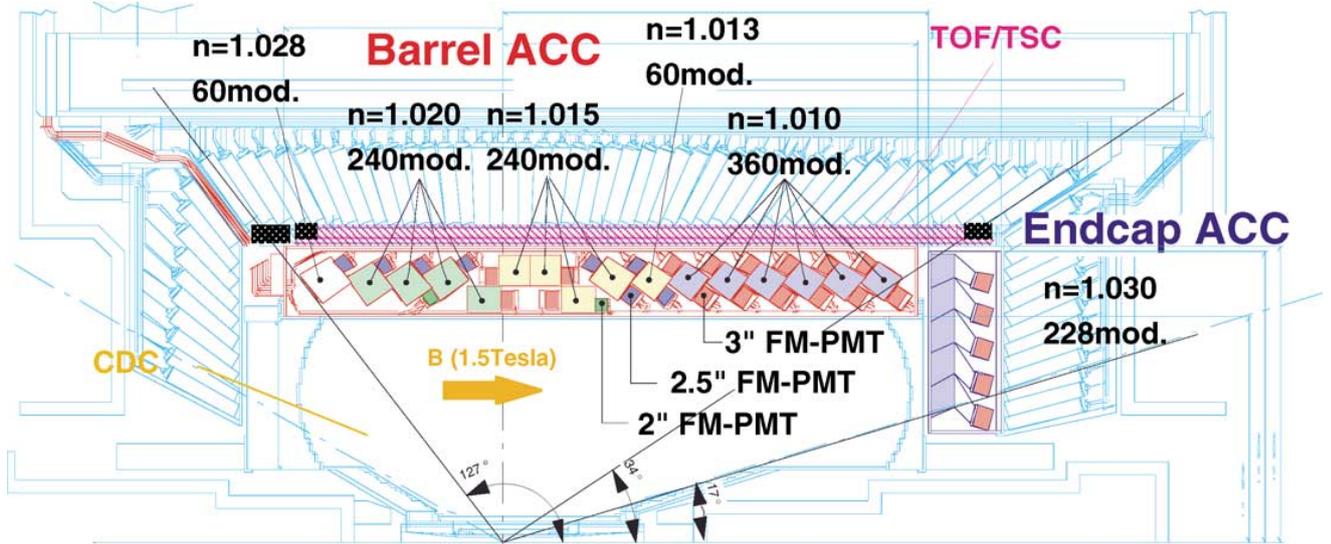
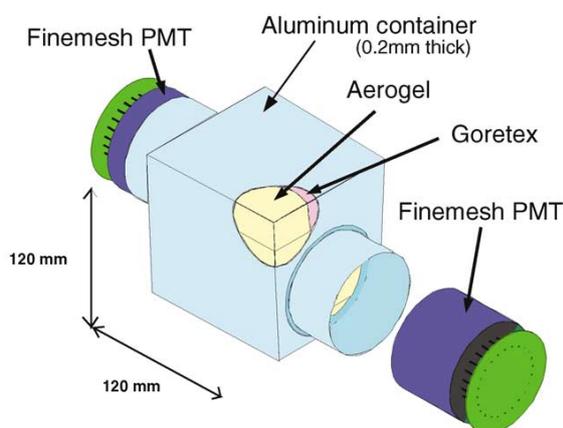


Рис. 1.2. Расположение аэрогелевых черенковских счётчиков в детекторе Belle. (Оригинальная версия рисунка из [25]).

Обозначения: FM PMT – Fine Mesh Photomultiplier (ФЭУ с тонкими сеточными динодами), ACC – Aerogel Cherenkov Counters (аэрогелевые черенковские счётчики), Barrel ACC – цилиндрическая часть системы аэрогелевых черенковских счётчиков, Endcap ACC – торцевая часть системы аэрогелевых черенковских счётчиков,  $n$  – показатель преломления аэрогеля, mod. – модуль (один аэрогелевый счётчик), TOF – Time Of Flight (время-пролётные счётчики), TSC – Trigger Scintillation Counters (триггерные сцинтилляционные счётчики). CDC – Central Drift Chamber (центральная дрейфовая камера),  $B (1.5\text{Tesla})$  – магнитное поле 1.5 Тесла.

a) Barrel ACC Module



b) Endcap ACC Module

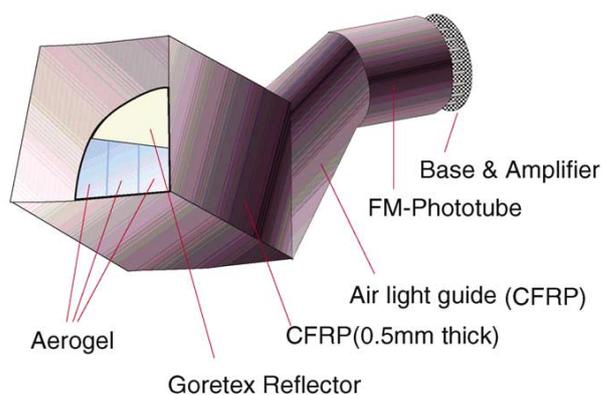


Рис. 1.3. Схематичное представление баррельного и торцевого счётчика детектора Belle. (Оригинальная версия рисунка из [25]).

Обозначения: Barrel ACC Module – аэрогелевый черенковский счётчик для цилиндрической части системы, Endcap ACC Module – аэрогелевый черенковский счётчик для торцевой части системы, Finemesh PMT – ФЭУ с тонкими сеточными диодами, Aluminum container (0.2mm thick) – алюминиевый контейнер с толщиной стенок 0.2 мм, Aerogel – аэрогель, Goretex Reflector – светоотражающее покрытие Goretex, CFRP(0.5mm thick) – Carbon fiber reinforced polymer (углепластик, толщиной 0.5мм), Air light guide CFRP – светонаправляющая полость из углепластика, FM-Phototube – Фотоумножитель (ФЭУ), Base & Amplifier – основа крепления для ФЭУ и усилитель сигнала.

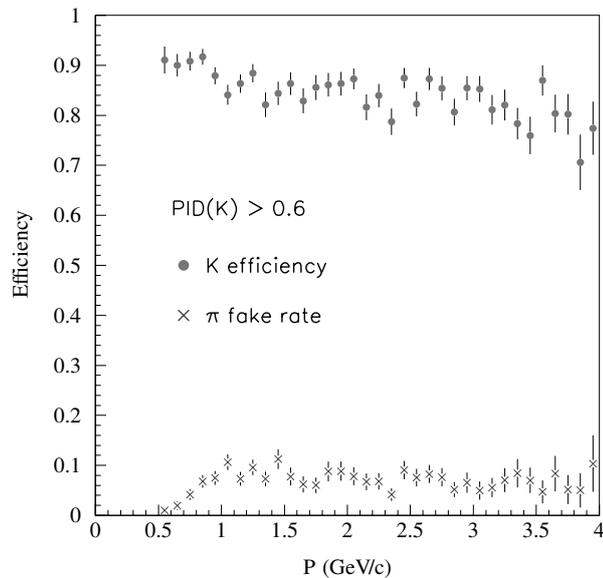


Рис. 1.4. Эффективность  $\pi/K$  разделения системы черенковских счётчиков детектора Belle. (Оригинальная версия рисунка из [25]).

Обозначения: Efficiency – эффективность регистрации, P (GeV/c) – импульс (ГэВ/c),  $PID(K) > 0.6$  – условие отбора K-мезонов, ● K efficiency – эффективность регистрации K-мезонов, ×  $\pi$  fake rate – вероятность принять  $\pi$ -мезон за K-мезон.

## 1.4. Вариант торцевой системы для детектора BaBar

Группа разработчиков черенковских счётчиков детектора КЕДР принимала участие в разработке системы идентификации для детектора BaBar [26]. Было предложено несколько вариантов конструкции, в том числе 4-х слойный для торцевой части [27]. Система представляла собой 2 слоя спаренных счётчиков с показателями преломления 1.008 и 1.05, так что ФЭУ одного слоя стояли напротив аэрогеля во втором слое, и тем самым необходимый телесный угол был перекрыт для каждого показателя преломления (см. рис. 1.5). Прототип (см. рис. 1.6) был испытан на пучке в ЦЕРНе, получено около 10 фотоэлектронов для каждого показателя преломления. Эти данные хорошо согласуются (см. рис. 1.7) с результатами Монте-Карло моделированием, проведённым соискателем на основе измеренных параметров: длин поглощения и рассеяния в аэрогеле, коэффициента поглощения на стенках отражателя.

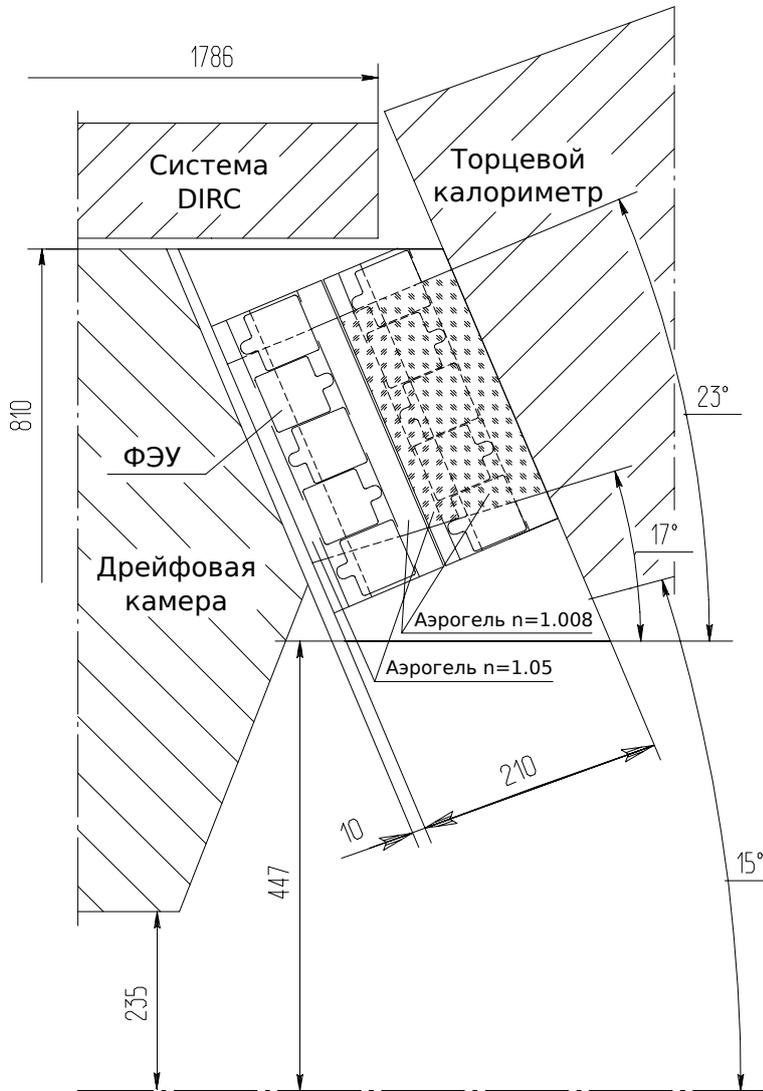


Рис. 1.5. Проект торцевой системы аэрогелевых черенковских счётчиков для детектора BaBar.

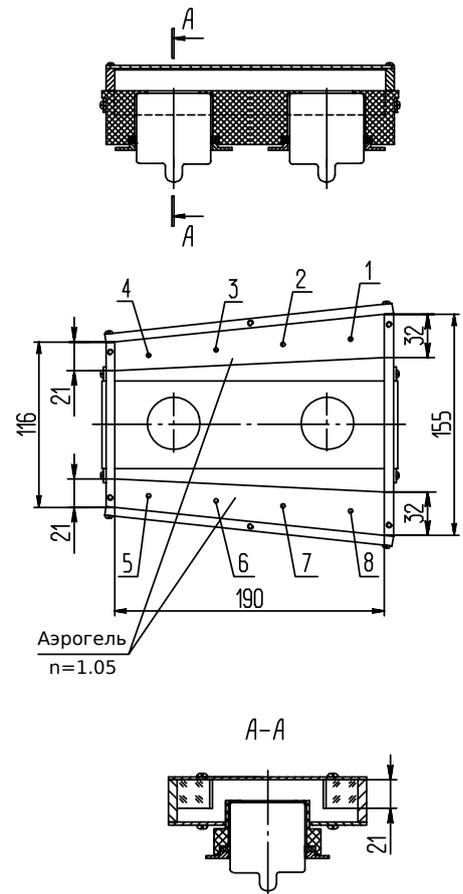


Рис. 1.6. Прототип счётчика для детектора BaBar с показателем преломления 1.05.

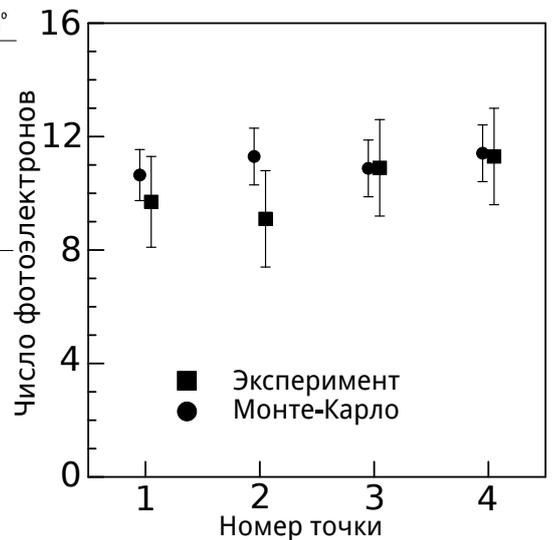


Рис. 1.7. Число фотоэлектронов в четырёх точках по счётчику. Расположение точек указано на рис. 1.6.

## 1.5. Детектор КЕДР

Реализованный вариант системы аэрогелевых пороговых черенковских счётчиков для детектора КЕДР будет подробно рассмотрен в главе 6. Система состоит из 160 счётчиков, расположенных в два слоя, и содержит 1000 литров аэрогеля с показателем преломления 1.05 (см. рис. 1.8). Основная особенность

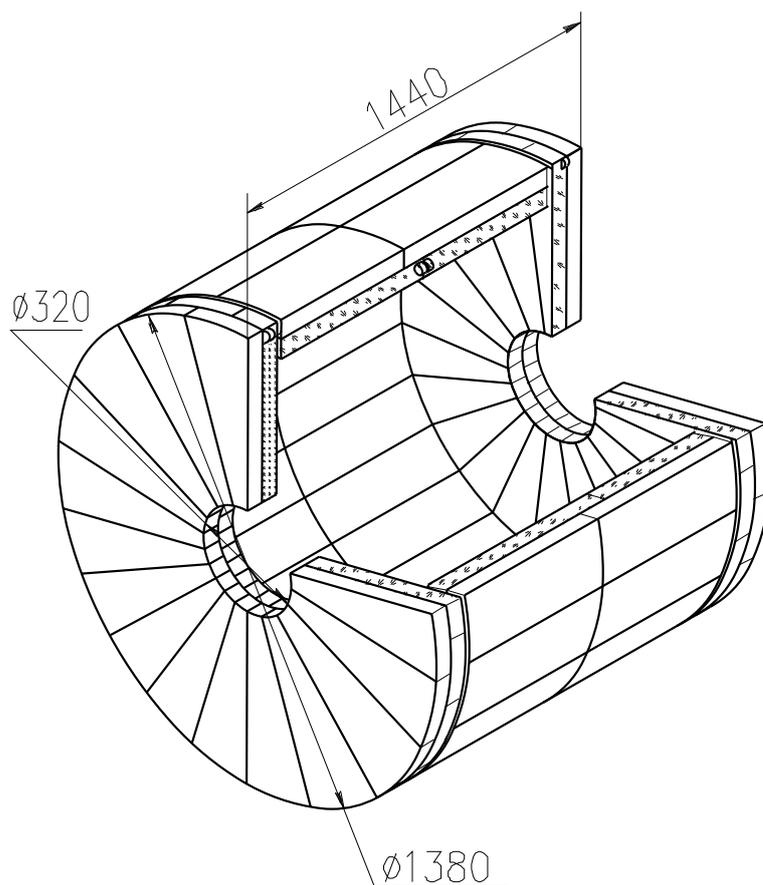


Рис. 1.8. Вид системы аэрогелевых черенковских счётчиков для детектора КЕДР.

заключается в использовании переизлучателей спектра, выполненных в виде световодов, сведённых на ФЭУ (см. рис. 1.9, 1.10), что позволило уменьшить требуемую площадь фотокатодов на единицу площади покрываемой счётчиком. На прототипе торцевого счётчика получено 10.6 фотоэлектронов [7], что хорошо согласуется с Монте-Карло моделированием [28]. На космических мюонах измерено разделение  $\pi$ - и  $K$ -мезонов для нескольких вариантов использования

двух слоёв системы. Для импульса 1.2 ГэВ/с степень разделения превышает  $4\sigma$  [9, 10].

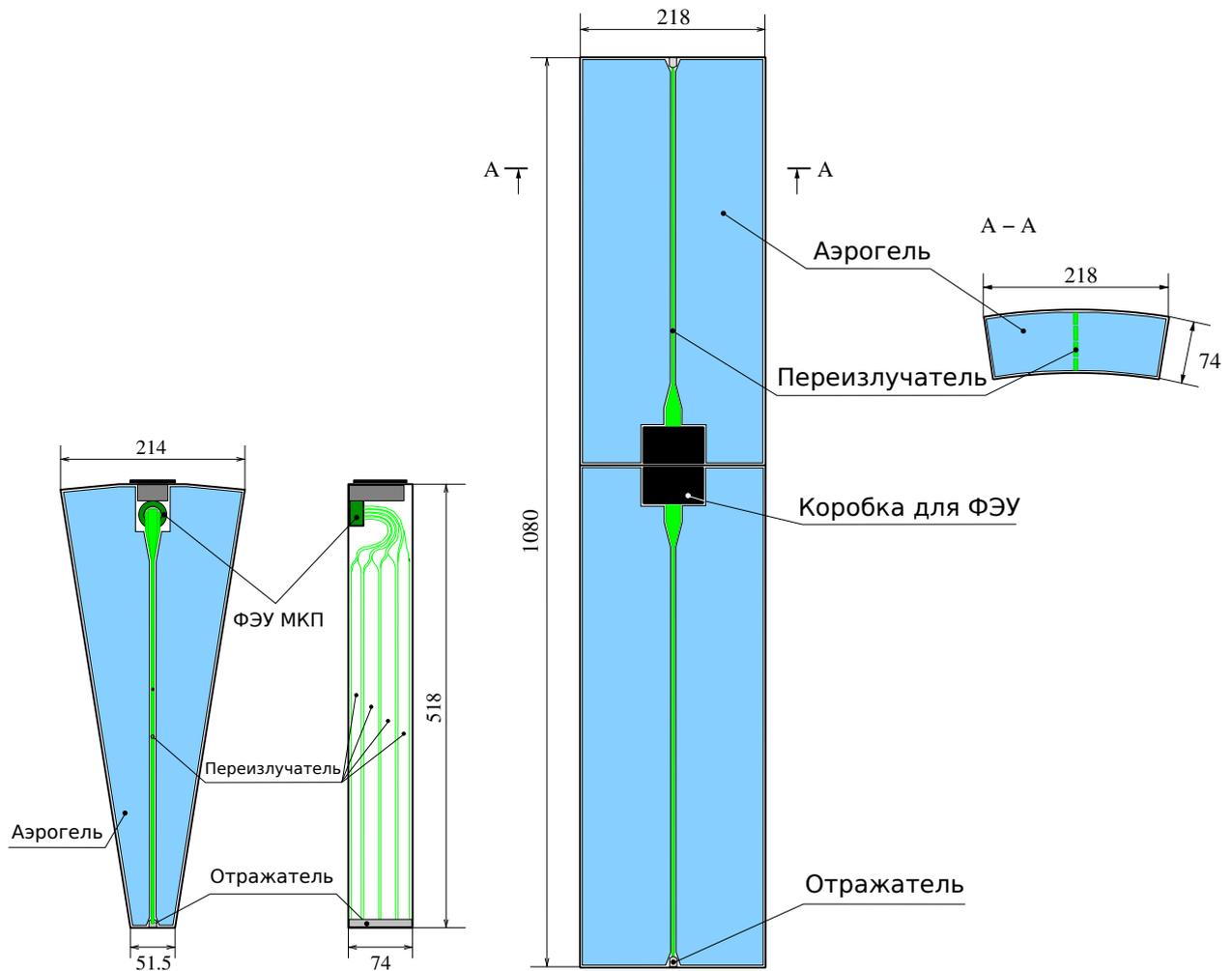


Рис. 1.9. Схема торцевого счётчика для детектора КЕДР.

Рис. 1.10. Схема баррельного счётчика для детектора КЕДР.

## 1.6. Детектор СНД

В детекторе СНД (Сферический Нейтральный Детектор) имеется полость сферической формы с диаметром около 350 мм для установки дрейфовой камеры и системы идентификации частиц (см. рис. 1.11). Благодаря использованию метода АШИФ удалось создать уникальную систему из 9 аэрогелевых счётчиков, покрывающих около 60% телесного угла и уместающаяся при этом в зазоре величиной 31 мм (см. рис. 1.12). Используемый аэрогель с показателем

преломления 1.13 также является уникальным для черенковских детекторов. Имеется второй комплект счётчиков с показателем преломления 1.05 для разделения  $e/\pi$  при работе на энергии ниже порога рождения К-мезонов. Подробно эта система рассматривается в главе 7. Получено около 10 фотоэлектронов в счётчике с показателем преломления 1.13 от релятивистской частицы [29, 30], что также согласуется с Монте-Карло моделированием [31]. В 2015–2016 годах была проведена обработка эксперимента с использованием данной системы [32, 33, 34] — измерены сечения процессов:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $K^+K^-$ .

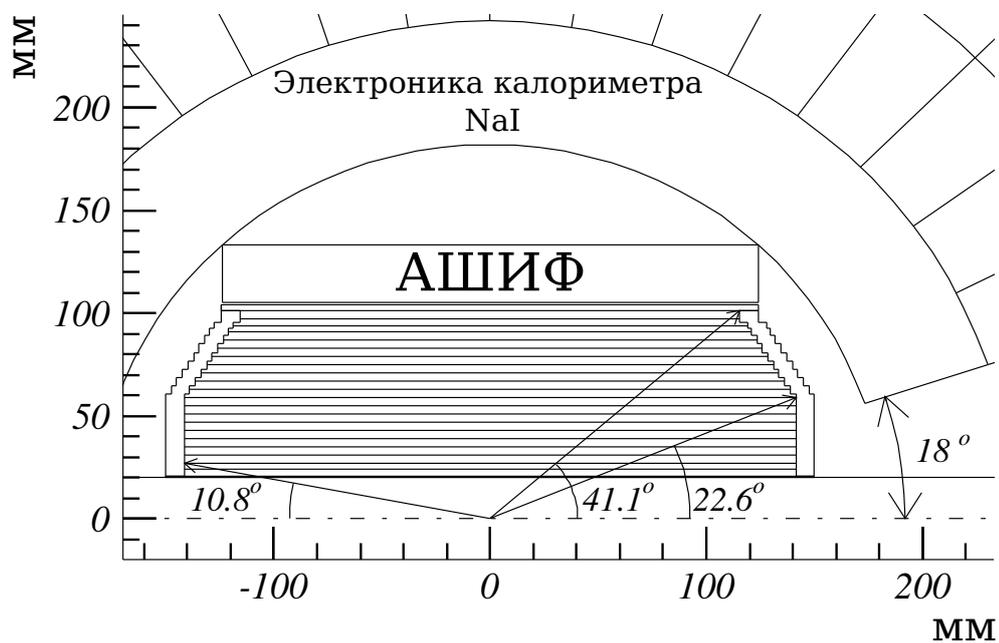


Рис. 1.11. Размещение системы аэрогелевых черенковских счётчиков (АШИФ) в детекторе СНД.

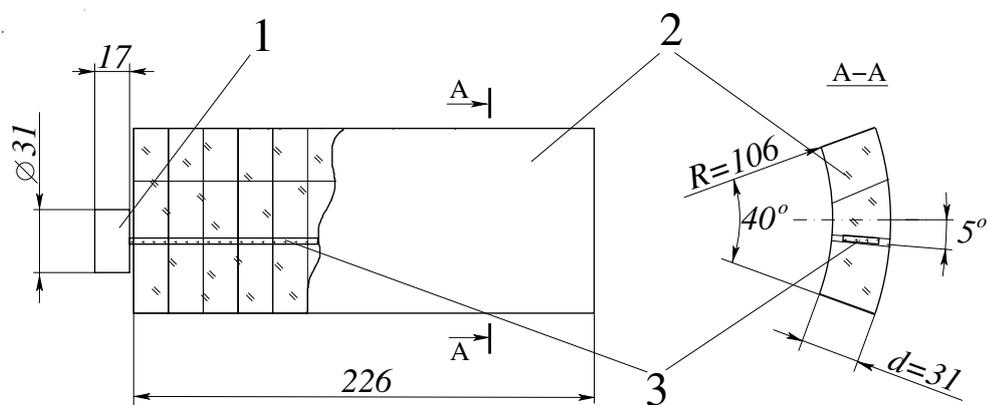


Рис. 1.12. Схема счётчика детектора СНД. Обозначения: 1 – фотоумножитель, 2 – аэрогель, 3 – переизлучатель.

## Глава 2

# Программа моделирования светосбора методом Монте-Карло

### 2.1. История создания программы

Как было замечено ранее, при заданном типе фотоприёмников величина световыхода в счётчике является определяющей для идентификации частицы. Аналитический расчёт светосбора в счётчике реалистической конструкции необходимый для проектирования не представляется возможным. Особенно велики трудности расчёта в случае аэрогелевых счётчиков. При распространении в аэрогеле свет испытывает сильное рассеяние, т.е. траектория распространения каждого излучённого черенковского фотона при каждом рассеянии отклоняется на произвольный угол по закону Релея [35], кроме того, наиболее эффективный светосбор достигается в счётчиках с диффузным отражением, внутренние стенки которых покрыты слоем вещества, от которого происходит отражение света по закону Ламберта [36] в широком диапазоне углов.

Возможен способ проектирования системы, при котором для выбора оптимального размера и конструкции счётчика изготавливается серия прототипов, которые испытываются на заряженных частицах, однако, он весьма трудоёмок и требует больших затрат.

В данной работе для проектирования системы аэрогелевых счётчиков был впервые применён метод компьютерного Монте-Карло моделирования. Была разработана специальная компьютерная программа, позволяющая задавать в принятой системе координат расположение стенок счётчика, внутренний объём, вариант его заполнения аэрогелем, а также систему регистрации света, включающую переизлучатели и световоды для вывода света на фотокатод фотоумножителя. Свет может также выводиться на фотокатод напрямую. Про-

грамма позволяет моделировать образование черенковского фотона, прохождение его через среду с аэрогелем с учетом таких физических эффектов, как рассеяние и поглощение, отражение от стенок счётчика, причём, при пересечении границы раздела двух сред выполняется закон Френеля [35]. Результатом работы программы является число зарегистрированных фотонов для определённой конструкции черенковского счётчика. Их доля от числа изначально излучённых есть *коэффициент светосбора*.

Исходная версия программы Монте-Карло моделирования светосбора была разработана А.Г. Шамовым в ИЯФе в 1988 году. В то время в институте использовались ЕС ЭВМ только в «пакетном» режиме. Результат можно было получить только когда задание выполнится до конца. В 1993 году А.Г. Шамовым с участием соискателя фортрановский код программы был перенесён на платформу VAX/VMS и дополнен возможностями гибкого описания взаимодействия света с компонентами черенковского счётчика и способов регистрации света, появилась возможность моделировать процесс переизлучения света. С этого времени программа стала называться LCE (Light Collection Efficiency) версии 2 [37], где соискатель уже был соавтором. Также в LCE был добавлен интерфейс пользователя в виде среды с интерпретатором фортрано-подобного языка OPAL (Open Physics Analysis Language) [38], разработанный А.Г. Шамовым для систем сбора данных детекторов КЕДР и КМД-2. Новые средства, предоставляемые VMS, средой с OPAL и гибкими возможностями описания прохождения фотона, послужили мощным толчком для развития программного кода, описывающего конфигурацию черенковского счётчика, и для проверки различных принципов и подходов в проектировании счётчиков.

Альтернативой LCE для расчёта светосбора мог быть пакет GEANT [39], однако в 1993 году моделирование распространения оптических фотонов в нём было в стадии разработки. Имеется и принципиальное отличие от GEANT в способе описания геометрических объектов, состоящее в том, что простейшая единица описания в GEANT есть *блок* из одного из предусмотренных в па-

кете форм, а в LCE — *стенка*. Понятие *блока* в LCE появляется как некий объём с постоянными оптическими свойствами, ограниченный набором *стенок*, при этом допустимо вложение *блоков* в друг друга. Система стенок может быть незамкнутой, что позволяет моделировать системы сбора света с фокусирующими зеркалами, как в детекторе TASSO (см. рис. 1.1). Такой подход представляется более адекватным и эффективным для реализации в коде в применении к задаче оптимизации геометрических параметров системы аэрогелевых счётчиков.

## 2.2. Модель основных процессов

Рассмотрим, как описаны в LCE основные физические процессы, влияющие на световой выход в аэрогелевом черенковском счётчике.

### 2.2.1. Поляризация

Как известно, черенковский свет [40] имеет линейную поляризацию — вектор электрического поля лежит в плоскости, образованной направлением движения частицы и направлением вылета фотона. Поляризация фотона влияет на процесс взаимодействия с границей двух сред по закону Френеля [35].

Поскольку в счётчике после первого рассеяния фотона в аэрогеле направление его поляризации меняется случайным образом и среднее число рассеяний для большинства фотонов составляет несколько десятков, для любого фотона, пересекающего границу двух сред под определённым углом, все направления поляризации равновероятны. Поэтому для описания закона Френеля был использован коэффициент отражения и прохождения, усреднённый по всем поляризациям. С учетом этого, в модели, заложенной в LCE, поляризация черенковского фотона не моделируется.

### 2.2.2. Ламбертовское отражение от стенок счётчика

Для моделирования используется генератор псевдослучайных чисел, предоставляемый функцией RANF [41] пакета CERNLIB [42], которая возвращает число с плавающей точкой, равномерно распределённое в интервале (0;1). Эта функция используется для производства всех случайных величин в коде LCE. Если полученное случайное число меньше, чем коэффициент отражения, то фотон считается отражённым, в противном случае — поглощённым на стенке.

Закон Ламберта [36] для света, отраженного от стенки, описан следующим образом. Предполагается, что отражение света от стенки, покрытой отражающим материалом, происходит в той же самой точке, что и падение. Если единичный вектор падающего фотона обозначить как  $\mathbf{k}$ , а отраженного фотона обозначить как  $\mathbf{k}'$ , то

$$\mathbf{k}' = \frac{\mathbf{n} + \mathbf{r}}{|\mathbf{n} + \mathbf{r}|}, \quad (2.1)$$

где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор нормали к отражающей поверхности, направленный всегда «во внутрь» объёма, где происходит распространение света, т.е. всегда выполняется  $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{n}) < 0$ , а  $\mathbf{r}$  — случайный единичный вектор с равномерным распределением по всему телесному углу.

Для общности и удобства оценки систематических ошибок в LCE предусмотрено задание пользователем произвольного закона отражения для данной стенки — построения вектора  $\mathbf{k}'$  исходя из векторов  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{n}$ .

### 2.2.3. Закон Френеля на границе двух сред

Как уже было сказано, в коде LCE предполагается усреднение по всем возможным поляризациям, поэтому закон Френеля [35] выглядит следующим образом. Коэффициент отражения вычисляется усреднением двух составляющих:

$$R = \frac{R_m + R_e}{2}. \quad (2.2)$$

Здесь

$$R_m = \left( \frac{\cos(\phi_1) - r \cdot \cos(\phi_2)}{\cos(\phi_1) + r \cdot \cos(\phi_2)} \right)^2, \quad (2.3)$$

$$R_e = \left( \frac{r \cdot \cos(\phi_1) - \cos(\phi_2)}{r \cdot \cos(\phi_1) + \cos(\phi_2)} \right)^2, \quad (2.4)$$

где

$$r = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\phi_2)}{\sin(\phi_1)} \quad (2.5)$$

есть отношение показателей преломления при переходе света из среды с  $n_1$  в среду с  $n_2$ , а  $\phi_1$  и  $\phi_2$  — соответствующие углы направления света по отношению к нормали поверхности. Для определения того, какой из двух эффектов, отражение или прохождение, имеет место, снова используется генератор псевдослучайных чисел RANF. Если полученное значение меньше чем  $R$ , то моделируется прохождение, иначе — зеркальное отражение, при котором угол отражения равен углу падения.

#### 2.2.4. Взаимодействие с веществом

Под актом взаимодействия фотона с веществом в какой-либо точке пространства внутри этого вещества понимается один из двух процессов: изменение направления движения (процесс рассеяния) или прекращение существования данного фотона (процесс поглощения). Прекращение существования может означать, что фотон поглотился в веществе, и он дальше не рассматривается, либо поглощение стало причиной эффекта флуоресценции [43], и произошла конверсия в фотон большей длины волны. Последний эффект, также называемый переизлучением, будет рассмотрен позже. Отдельно хотелось бы упомянуть, что в качестве одного из взаимодействий с веществом может выступать процесс регистрации, когда результатом процесса поглощения фотона стал акт его регистрации. Кроме того, регистрация может происходить в специально обозначенных областях стенок с регистрирующей поверхностью.

Рассмотрим движение фотона в некотором *блоке* вещества вдоль оси  $x$ . Для начала ограничимся случаем, когда имеется только один тип взаимодействия. Предположим, что фотон в некоторый момент времени достиг точки  $x$ , тогда очевидно, что вероятность  $dp$  провзаимодействовать при движении на интервале от  $x$  до  $x + dx$  будет равна

$$dp = \frac{dx}{l}, \quad (2.6)$$

где  $l$  величина размерности длины. Будем считать, что вещество в данном *блоке* является однородным по всему объёму *блока*, тогда величина  $l$  не должна зависеть от координаты  $x$  и является характеристикой взаимодействия данного вещества с фотоном определенной длины волны. Будем называть эту величину  $l$  *длиной взаимодействия*.

Предположим, что в начальный момент времени фотон находится в точке с координатой  $x = 0$ , и обозначим вероятность, что он не провзаимодействует вплоть до точки  $x$ , как  $P(x)$ . Тогда вероятность достичь точку  $x$  и провзаимодействовать на интервале от  $x$  до  $x + dx$  будет равна

$$dP(x) = -P(x) \frac{dx}{l}. \quad (2.7)$$

Откуда получаем, что

$$P(x) = \exp\left(-\frac{x}{l}\right). \quad (2.8)$$

Теперь рассмотрим случай, когда имеется несколько типов взаимодействия. По физической природе все рассматриваемые типы взаимодействий в аэрогеле можно считать независимыми. Рассеяние света по закону Релея обусловлено наличием неоднородностей показателя преломления в аэрогеле на масштабе длины волны. Поглощение света в аэрогеле связано, в основном, с наличием примесей тяжелых металлов и воды. Это было показано соискателем с соавторами в работах [44, 45, 46]. Аналогичная ситуация имеет место

в переизлучающих световодах (шифтерах), где поглощение света связано с независимым существованием добавок флуоресцирующего вещества и других примесей. Это позволяет представить вероятность произойти какому-либо взаимодействию из ряда возможных в виде суммы:

$$dP(x) = \sum dP_i(x). \quad (2.9)$$

Подставляя сюда выражение для каждой вероятности из (2.8), получаем

$$\frac{P(x)}{l_0} = \sum \frac{P_i(x)}{l_i}, \quad (2.10)$$

при  $x = 0$  получаем

$$\frac{1}{l_0} = \sum \frac{1}{l_i}. \quad (2.11)$$

Здесь как  $l_0$  обозначена длина, на которой произойдёт какое-либо взаимодействие из рассматриваемого ряда. Согласно (2.6), вероятность каждого выбранного взаимодействия  $P'_i$  будет пропорциональна  $\frac{1}{l_i}$ . Тогда, с учётом нормировки полной вероятности  $\sum P'_i = 1$ , получаем

$$P'_i = \frac{l_0}{l_i}. \quad (2.12)$$

Алгоритм моделирования прохождения фотона через вещество выглядит следующим образом:

1. По заданной для данного вещества  $l_0$  с помощью (2.8) определяем длину вдоль направления движения фотона до точки взаимодействия как

$$l' = -l_0 \cdot \ln r, \quad (2.13)$$

где  $r$  - псевдослучайное число от RANF.

2. Определяем, находится ли полученная точка внутри того же самого *блока*, т.е. то, что траектория фотона не пересекает ни одну из стенок.
- Если есть пересечение и выход в другой *блок*, имеют место обсуждавшиеся ранее пограничные эффекты, которые описываются законами Френеля и Ламберта. Либо, если есть попадание в область стенки с регистрирующей поверхностью, счётчик зарегистрированных фотонов увеличивается на единицу, и данный фотон далее не моделируется.
  - Если точка взаимодействия находится внутри того же самого блока, то, получив ещё одно псевдослучайное число  $r$ , определяем какое из взаимодействий в данном случае имеет место. Для этого находим минимальное число  $j$ , удовлетворяющее неравенству

$$\sum_{i=1}^j P'_i < r < \sum_{i=1}^{j+1} P'_i. \quad (2.14)$$

Оно и будет искомым номером взаимодействия.

3. Если выпало рассеяние, то текущая координата фотона переводится в полученную точку взаимодействия, а направление последующего движения меняется случайным образом с угловым распределением по закону Релея [35]:

$$I(\theta) \propto 1 + \cos^2(\theta), \quad (2.15)$$

где  $\theta$  – угол, отсчитываемый от первоначального направления движения. В LSE закон рассеяния для данного *блока* может быть переопределён пользователем. После этого цикл для данного вещества повторяется.

4. Если типом взаимодействия было переизлучение, то методом Неймана моделируется спектр излучения по функции  $f(\lambda)$ , заданной в интервале  $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ . Для этого используются два псевдослучайных числа  $r_1$  и  $r_2$ , вычисляется  $\lambda_{MC} = \lambda_1 + r_1 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)$  и, если условие  $r_2 \cdot \max(f(\lambda)) <$

$f(\lambda_{MC})$  не выполняется, процедура повторяется до тех пор, пока это условие не станет верным. Полученная таким образом длина волны  $\lambda_{MC}$  будет как раз иметь  $f(\lambda)$  в качестве функции распределения.

За направление движения вновь полученного фотона берётся случайный вектор с равномерным распределением по всему телесному углу.

5. Если произошло поглощение фотона, счётчик числа поглощённых фотонов увеличивается на единицу.
6. Если произошла регистрация в объёме, счётчик зарегистрированных фотонов увеличивается на единицу.

## Глава 3

# Разработка метода АШИФ

### 3.1. Методы сбора света в аэрогелевых черенковских счётчиках

#### 3.1.1. Особенности распространения света в аэрогеле

Основной особенностью аэрогеля, которую необходимо учитывать при разработке пороговых черенковских счётчиков, является сильное рассеяние света. Длина рассеяния  $L_{sc}$  составляет всего несколько сантиметров, и зависимость от длины волны  $\lambda$  очень сильная:  $\propto \lambda^4$ . При этом длина поглощения  $L_{abs}$  порядка нескольких метров, а её зависимость от длины волны в интересующем нас диапазоне ещё более сильная,  $\propto e^\lambda$  (подробнее см. главу 3.2). Черенковский свет, излучаемый по сторонам конуса от трека частицы, уже на расстоянии нескольких сантиметров от него будет иметь хаотическое направление, и распространение света будет носить диффузный характер. Глубина проникновения света, определяемая как  $\sqrt{L_{sc} \cdot L_{abs}}$ , будет вести себя как  $\propto \lambda^2 e^{\lambda/2}$ . Но известно, что количество излучаемого черенковского света зависит от длины волны  $\propto \lambda^{-2}$ . По этим причинам при выборе конструкции счётчика желательно установить светочувствительные элементы максимально близко к треку частицы в аэрогеле.

#### 3.1.2. Метод прямого сбора света

Одним из простейших методов сбора света является метод прямого светосбора, заключающийся в установке ФЭУ с максимально большим фотокатодом, просматривающий минимально возможный объём аэрогеля. Естественным ограничением тут служит размер ФЭУ с необходимой электроникой, так как требуется обеспечить перекрытие этого пассивного, с точки зрения иден-

тификации, вещества аэрогелем другого счётчика. Иначе будет потеря эффективности идентификации по телесному углу. Варианты прямого светосбора для детекторов КЕДР, Belle и BaBar, которые были рассмотрены ранее в разделах 1.2, 1.3 и 1.4, соответственно.

### **3.1.3. Аэрогелевые счётчики на основе переизлучателей и ФЭУ (АШИФ)**

Известно, что имеется ряд веществ, обладающих эффектом флуоресценции, который заключается в поглощении света определённой длины волны и переизлучении его на большей длине волны [43]. Такие переизлучатели (сместители спектра или шифтеры) можно использовать для задачи повышения эффективности сбора света в аэрогеле. Самым простым предложением было бы сделать добавку такого вещества при производстве самого аэрогеля, но при этом появятся значительные сцинтилляции от этой добавки, что сведёт на нет сам принцип использования черенковского света для идентификации. По этой причине переизлучатель следует сосредоточить в виде неких пластин, занимающих минимальный телесный угол относительно места встречи пучков. Свет, попавший в такие пластины, поглощается и переизлучается. Примерно половина переизлученного света выходит наружу, но другая половина захватывается в режим полного внутреннего отражения, и, распространяясь как по световоду, может достичь фотокатода ФЭУ (см. рис. 3.1). Данный метод получил название АШИФ — Аэрогель ШИфтер Фотоумножитель. Соискателю с коллегами удалось получить переизлучатели нужного спектрального диапазона, оптимальные для квантовой чувствительности выбранного ФЭУ, с большой длиной ослабления, что существенно увеличивает длины счётчиков, просматриваемых одним ФЭУ. Следует отметить, что использование шифтеров приводит к некоторому усложнению конструкции счётчиков и обработке данных эксперимента.

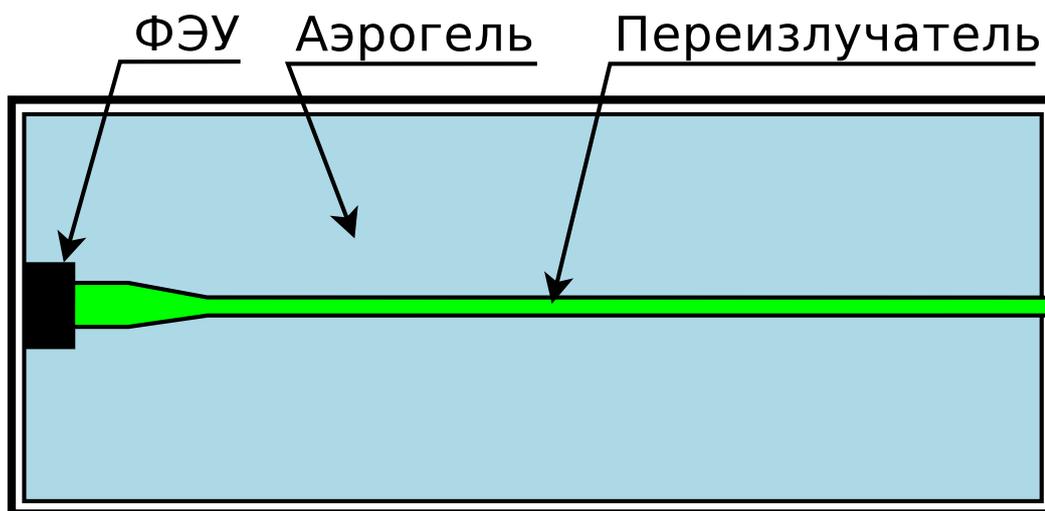


Рис. 3.1. Схема метода АШИФ (Аэрогель ШИФтер (переизлучатель) Фотоумножитель).

## 3.2. Аэрогель

### 3.2.1. Основные характеристики аэрогеля и технология производства

Совместные работы Института катализа СО РАН имени Г.К. Борескова и Института ядерной физики СО РАН имени Г.И. Будкера по освоению производства аэрогеля и измерению его параметров начались в 1986 году в связи с разработкой аэрогелевых черенковских счётчиков для детектора КЕДР. Во второй половине 90-х годов для синтеза монолитных блоков аэрогеля была освоена двухстадийная технология обработки тетраэтоксисилана  $\text{Si}(\text{OEt})_4$  с последующей высокотемпературной, сверхкритической сушкой с использованием органического растворителя [44, 45, 46].

Аэрогель представляет собой сильно пористое вещество, состоящее из аморфного диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  в виде наночастиц размером  $2\div 5$  нм и пор, заполненных воздухом, размером около 100 нм. Характерный диапазон плотностей аэрогелей, производимых в Институте катализа:  $0.04\div 0.6$  г/см<sup>3</sup>.

Плотность аэрогеля можно задавать заранее при производстве, что позволяет получать аэрогель с нужным показателем преломления, так как он прямо связан с плотностью.

Впервые аэрогель был синтезирован в 1931 году Стивеном Кистлером (Steven Kistler) [47].

Пористая структура аэрогеля на размерах гораздо меньших длины волны видимого и ближнего ультрафиолетового света приводит к эффекту рэлеевского рассеяния света [35]. Этот эффект является определяющим процессом при распространении света в аэрогеле, поэтому одной из важных характеристик аэрогеля является длина рассеяния света.

Примеси тяжёлых металлов, которые в незначительных количествах заносятся в аэрогель при производстве, определяют степень поглощения света. Принято характеризовать эту степень величиной длины поглощения света. Длина поглощения света является определяющей в черенковских счётчиках с диффузным сбором света.

### 3.2.2. Методы измерения показателя преломления

Показатель преломления блока аэрогеля измеряется классическим методом (см. рис. 3.2) пропускания пучка света через угол блока и измерением угла отклонения от первоначального направления света [45]. В работе [46] соискателя с соавторами было показано, что для зависимости показателя преломления аэрогеля  $n$  от его плотности  $\rho$  выполняется стандартная формула:  $n^2 = 1 + \alpha\rho$ , где  $\alpha = 0.438 \pm 0.001$  – коэффициент, полученный из данных по дисперсии кварца, а  $\rho$  в г/см<sup>3</sup>. На практике показатель преломления определяют по плотности, измеряя массу и объём блока.

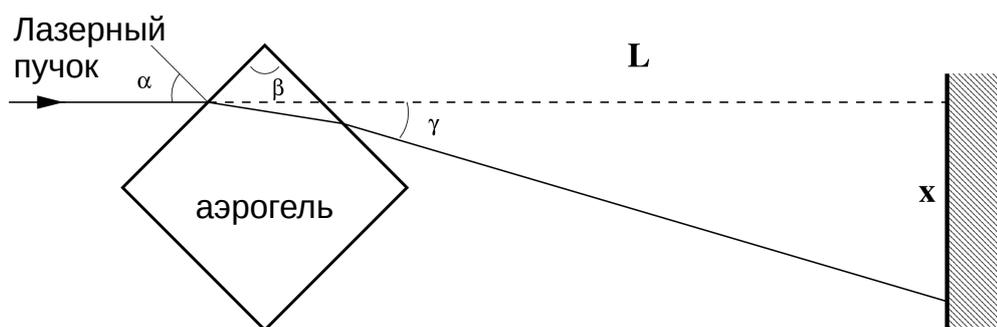


Рис. 3.2. Схема измерения показателя преломления.

### 3.2.3. Метод измерения длины рассеяния

Измеряемый образец аэрогеля с плоскопараллельными гранями и измеренной толщиной просвечивается параллельным пучком света. Коэффициент пропускания света подгоняется следующей зависимостью от длины волны:

$$T(\lambda) = \frac{I_{aer}}{I_0} = A \cdot e^{-\frac{d}{L_{sc} \cdot (\lambda/400)^4}} = A \cdot e^{-\frac{C \cdot d}{\lambda^4}}, \quad (3.1)$$

где  $I_{aer}$  – ток, измеренный на ФЭУ при прохождении света через образец аэрогеля,  $I_0$  – ток, измеренный при прохождении света напрямую,  $d$  – толщина образца,  $\lambda$  – длина волны света в нанометрах,  $L_{sc}$  – длина рассеяния света на 400 нм,  $A$  – коэффициент рассеяния на поверхности. Пример подгонки с  $L_{sc} = 5.4 \text{ см}$  и  $A = 0.93$  представлен на рис. 3.3. При таком методе измере-

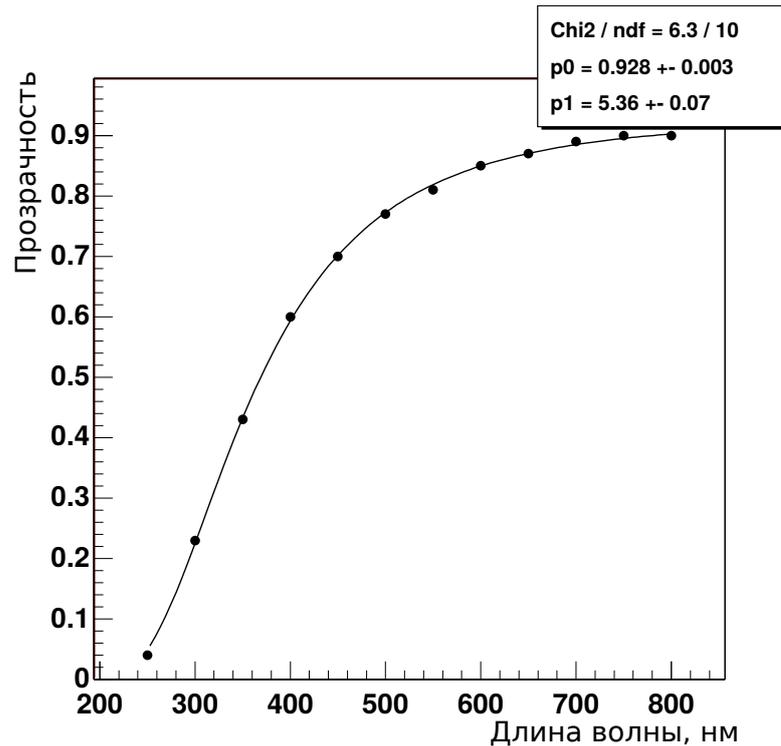


Рис. 3.3. Коэффициент пропускания (прозрачность) блока аэрогеля. Толщина 2.4 см.

ния предполагается, что длина рассеяния  $L_{sc}$  много меньше длины поглощения  $L_{abs}$ , что всегда выполняется для образцов пригодных к использованию.

### 3.2.4. Метод измерения длины поглощения

Описанный метод был предложен соискателем в ИЯФ в 1993 году. Идея метода точного измерения длины поглощения в аэрогеле, в зависимости от длины волны, основана на измерении коэффициента светосбора в боксе с аэрогелем и без него. Наивно можно было бы предположить, что одного бокса достаточно, однако пучок света от монохроматора, входящий в бокс, обычно узкий (около 5 мм) и слабо расходящийся по углам, а регистрирующую площадь поверхности ФЭУ желательно иметь большую (в нашем случае около 25 мм), кроме того, имеется зависимость квантовой эффективности фотокаатода ФЭУ от точки и угла попадания фотона. По этой причине возникает необходимость в дополнительной рассеивающей полости, которая будет создавать некое «стандартное» угловое распределение фотонов, попадающих как на фотокаатод, так и в измерительный бокс (см. рис. 3.4).

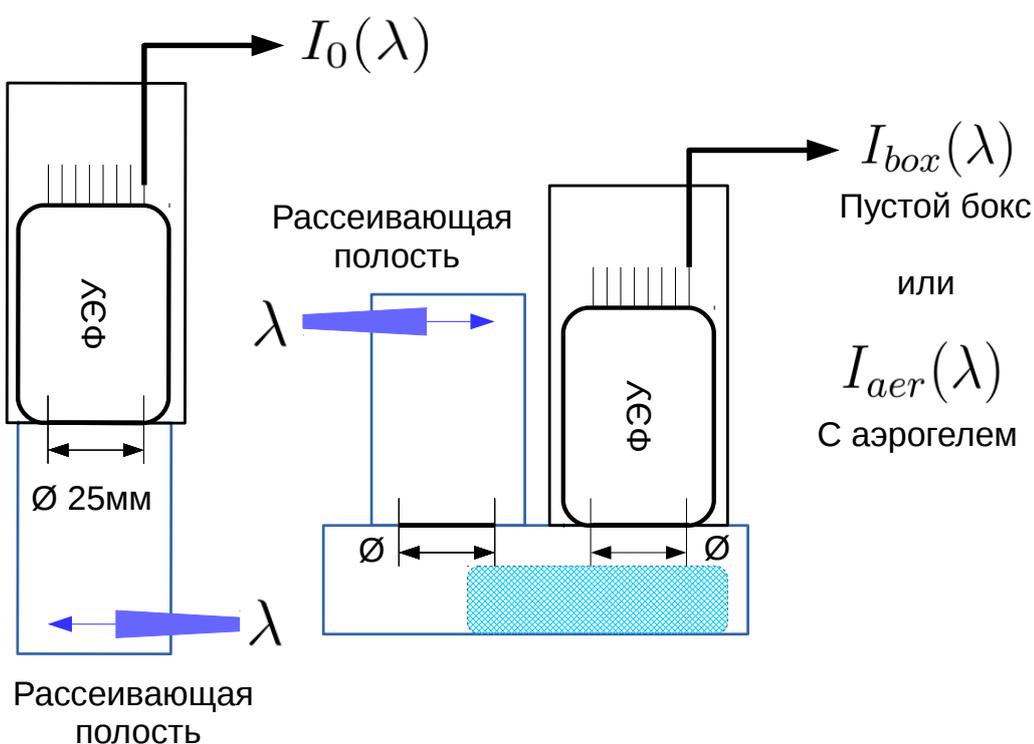


Рис. 3.4. Упрощённая схема измерения длины поглощения. Диаметры выходного окна рассеивающей полости и входного окна ФЭУ одинаковы. Более подробные чертежи приведены на рис. 3.5 и 3.6.

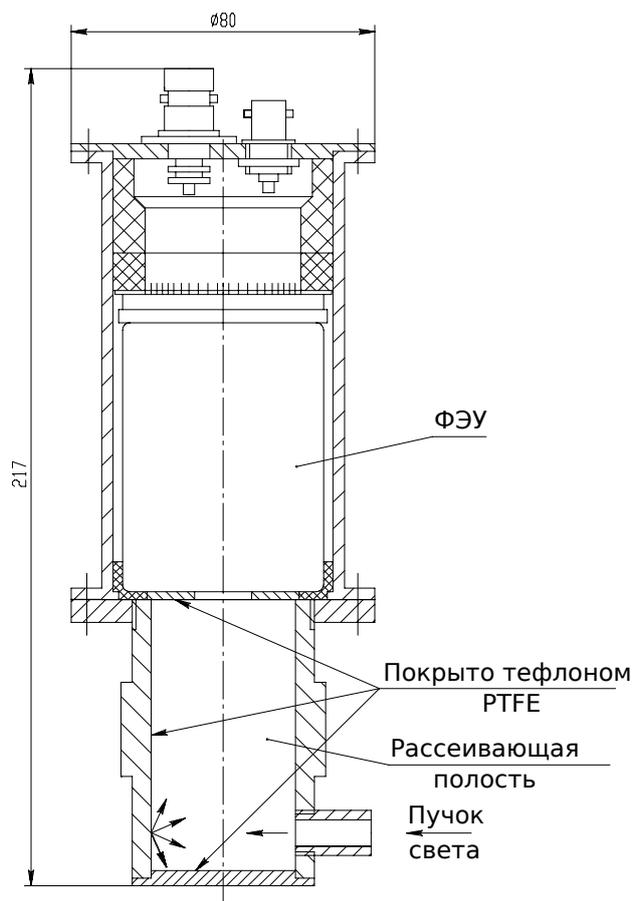


Рис. 3.5. Этап измерения с рассеивающей полостью.

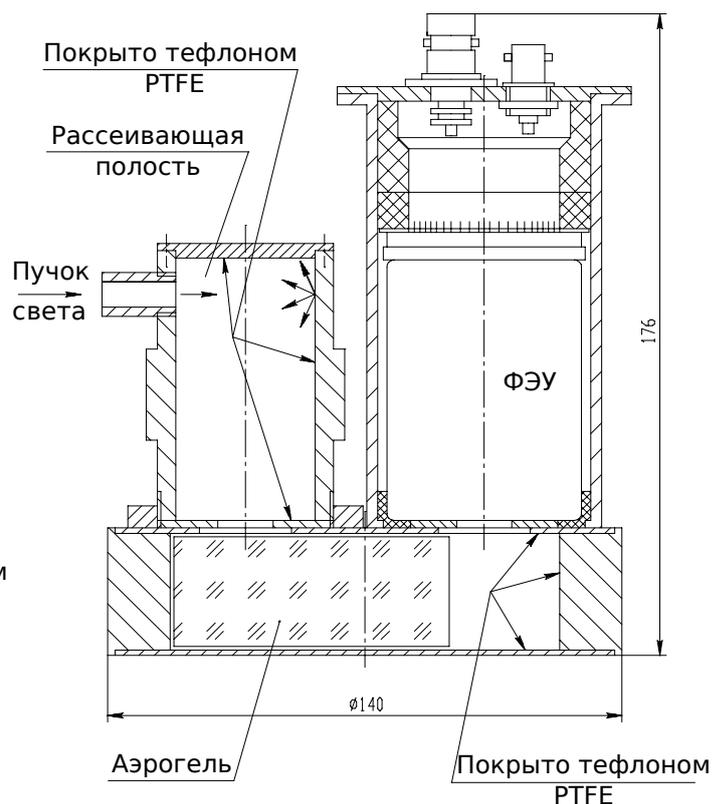


Рис. 3.6. Этап измерения с боксом с аэрогелем.

Перед началом измерений все внутренние поверхности как рассеивающей полости так и бокса покрываются одинаковым, свежим слоем светоотражающей пленки – тефлоном PTFE (см. далее главу 3.5). Производятся измерения тока ФЭУ в зависимости от длины волны света ( $\lambda$ ), выставленной на монохроматоре, в следующих комбинациях:

- только рассеивающая полость –  $I_0(\lambda)$ ,
- рассеивающая полость и пустой бокс –  $I_{box}(\lambda)$ ,
- рассеивающая полость и бокс с образцом аэрогеля –  $I_{aer}(\lambda)$ .

Все геометрические параметры легко получить и заложить в программу Монте-Карло моделирования LCE. Далее, считая, что квантовая эффективность ФЭУ не меняется заметно в течение всего данного цикла измерений, можно полу-

чить следующее равенство:

$$\frac{I_{box}(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \frac{LC_{box}(w_{abs})}{LC_0(w_{abs})}, \quad (3.2)$$

где  $LC_0$  – коэффициент светосбора только в рассеивающей полости,  $LC_{box}$  – в рассеивающей полости и пустом боксе,  $w_{abs}$  – вероятность поглощения на стенках (параметр, который задаётся в LCE). В левой части (3.2) стоит измеряемая величина в зависимости от длины волны света, а в правой – величина, полученная из моделирования при данной  $w_{abs}$ . Поскольку геометрические параметры бокса и рассеивающей полости фиксированы, то правую часть можно получить для широкого набора вероятностей поглощения на стенках и *один* раз построить функцию

$$w_{abs} \left( \frac{LC_{box}}{LC_0} \right)$$

методом интерполяции. Тогда, подставляя в неё левую часть (3.2), можно получить искомую величину  $w_{abs}(\lambda)$ . Теперь, имея известную величину  $w_{abs}(\lambda)$ , можно проделать аналогичную процедуру для случая с образцом аэрогеля:

$$\frac{I_{aer}(\lambda)}{I_{box}(\lambda)} = \frac{LC_{aer}(L_{abs})}{LC_{box}}, \quad (3.3)$$

где  $LC_{aer}(L_{abs})$  – коэффициент светосбора для рассеивающей полости и бокса с образцом аэрогеля. Здесь предполагается, что наличие аэрогеля не влияет на угловое распределение фотонов, падающих на фотокатод, что легко контролируется при моделировании. Вероятность поглощения на стенках  $w_{abs}$  измерена на предыдущем шаге, длина рассеяния  $L_{sc}$  также измерена ранее по описанной методике, геометрические параметры образца аэрогеля несложно измеряются и могут быть заложены в программу LCE. Получаем, что в правой части (3.3) в  $LC_{aer}(L_{abs})$  единственной неопределённой величиной является длина поглощения  $L_{abs}$ . Сложность на этом этапе заключается в том, что невозможно *один*

раз заранее построить интерполяционную функцию

$$L_{abs} \left( \frac{LC_{aer}}{LC_{box}} \right),$$

поскольку геометрические параметры и  $L_{sc}$  аэрогеля меняются от образца к образцу,  $w_{abs}$  также не является стабильной величиной от одной серии измерений к другой. Поэтому для каждого образца аэрогеля необходимо делать моделирование в ЛСЕ для текущих параметров, причём сама величина  $L_{abs}$  определяется методом секущих (хорд) [48]. Очевидно также, что функция  $LC_{aer}(L_{abs})$  является монотонно возрастающей, что гарантирует однозначное нахождение корня функции — искомой величины  $L_{abs}$ :

$$F(L_{abs}) = LC_{aer}(L_{abs}) - \frac{I_{aer}(\lambda)}{I_{box}(\lambda)} LC_{box} = 0 \quad (3.4)$$

Что даёт искомую зависимость  $L_{abs}(\lambda)$ . На каждом шаге итерации значение светосбора  $LC_{aer}$  определяется Монте-Карло моделированием. Для уменьшения времени решения уравнения 3.4 количество разыгрываемых фотонов выбирается в зависимости от величины невязки  $F(L_{abs})$ .

### 3.2.5. Прогресс в производстве высокопрозрачных аэрогелей

Благодаря развитой методике измерения длины поглощения аэрогеля, стало возможным контролировать с хорошей точностью качество производимого аэрогеля. А с развитием технологии двухстадийного производства в конце 90-х годов качество аэрогеля заметно улучшилось. Было проведено сравнение оптических параметров образцов аэрогеля марок SAN-95, SAN-96 [45] и SAN-01 [46] (SAN – Silica Aerogel Novosibirsk, см. рис. 3.7, рис. 3.8) Института катализа СО РАН и аэрогеля использованного в детекторе Belle [25] (см. раздел 1.3) в КЕК [28, 49] (Япония). Было показано, что на длине волны  $\lambda = 400$  нм длина рассеяния в образце SAN-96 в 1.8 раза превышает длину рассеяния аэрогеля из

КЕК при на порядок большей длине поглощения. Результаты измерений представлены на рис. 3.9. Аэрогель, производимый в Новосибирске, по оптическим параметрам является одним из лучших в мире. Он используется в детекторах СНД на ВЭПП-2000, КЕДР на ВЭПП-4М и AMS-02 на Международной космической станции.

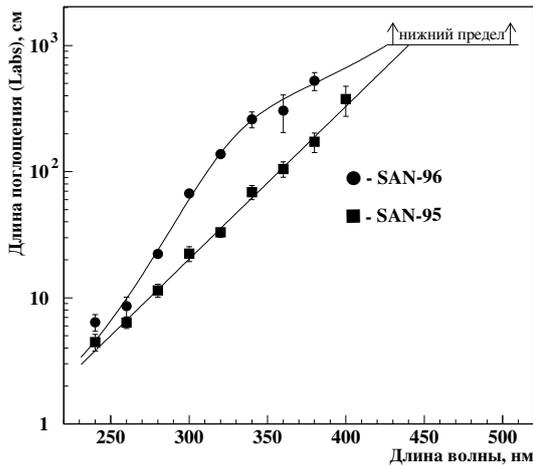


Рис. 3.7. Сравнение длины поглощения новосибирских аэрогелей SAN-95 и SAN-96.

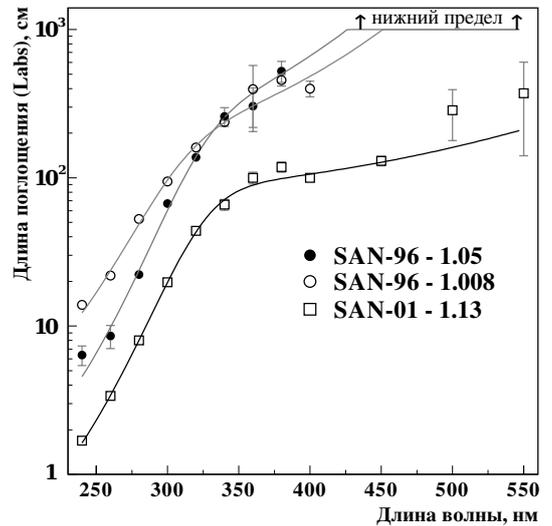


Рис. 3.8. Сравнение длины поглощения новосибирских аэрогелей SAN-96, SAN-01.

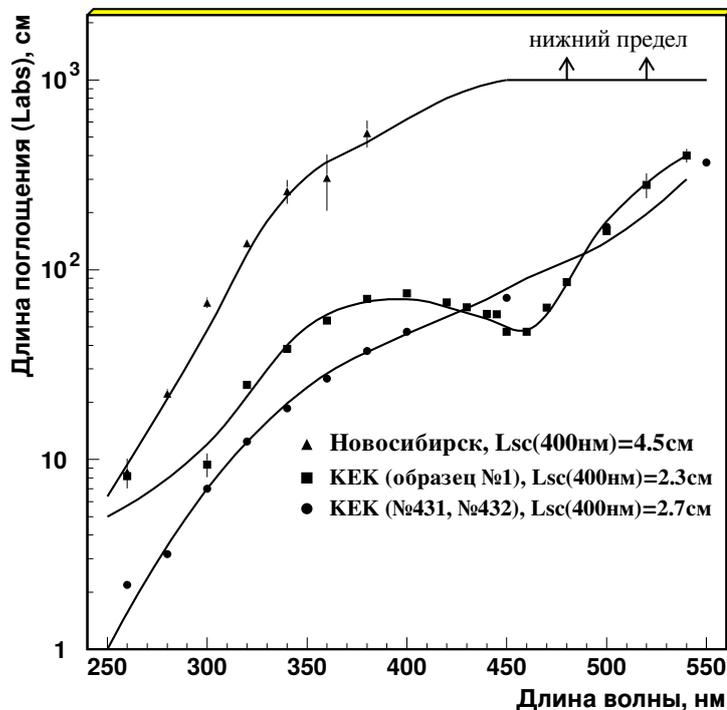


Рис. 3.9. Сравнение длины поглощения новосибирских аэрогелей и японского производства для КЕК. ( $L_{sc}(400\text{nm})$  – длина рассеяния на 400 нм)

### 3.3. Фотоумножители

#### 3.3.1. Основные технические требования к ФЭУ

К основным требованиям к фотоумножителям для построения системы Аэрогелевых Черенковских Счётчиков (АЧС) относятся:

- работоспособность в сильном магнитном поле до  $1.8 \text{ Т}$  — по изначальному проекту детектора КЕДР;
- чувствительность фотокатода в ультрафиолетовом диапазоне длин волн  $300 \div 400 \text{ нм}$  (для варианта прямого светосбора), или в максимуме пика переизлучения шифтера:  $420 \text{ нм}$  для «синего», или  $500 \text{ нм}$  для «зелёного» переизлучателя;
- минимальный коэффициент усиления  $10^4$  — для обеспечения возможности оцифровки импульса тока на аноде на доступной электронике;
- «шумовая» загрузка на уровне менее  $100 \text{ кГц}$ . Бóльшая загрузка будет приводить к заметному повышению вероятности ложных срабатываний и допороговой эффективности счётчиков;

#### 3.3.2. Сеточные ФЭУ фирмы HAMAMATSU

В первоначальном проекте было заложено использование сеточных ФЭУ фирмы Хамаматсу (HAMAMATSU). Главная особенность диодной системы — сеточная структура диодов и их близкое расположение к друг другу. Электрон, вылетевший из фотокатода, попадает на сетку, выбивая вторичные электроны, которые через ячейки сетки проходят к последующим диодам, давая умножение первоначального сигнала. Проведенное предварительное исследование в начале 90-х годов [6] показало, что такие ФЭУ отвечают всем требованиям, но весьма дорогостоящие. В связи с этим было принято решение искать более экономичные варианты построения системы АЧС.

В результате плодотворного сотрудничества с лабораториями, занимающимися в Новосибирске приборами «ночного видения», появились специализированные ФЭУ на основе микроканальных пластин (МКП) [50, 51, 52, 53, 54], которые и были использованы для построения системы АЧС детекторов КЕДР и СНД (см разделы 1.5 и 1.6). Сравнение внешних размеров ФЭУ приведено на рис. 3.10.

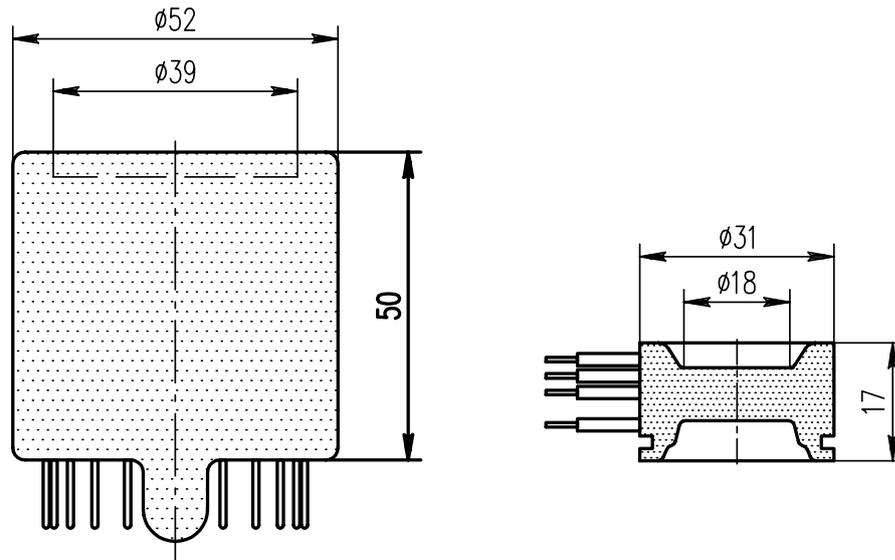


Рис. 3.10. Сравнение внешних размеров ФЭУ Hamamatsu R6150 (слева) и ФЭУ с МКП производства АОТ «Катод» (справа)

### 3.3.3. ФЭУ на основе микроканальных пластин

#### 3.3.3.1. Основные характеристики и принцип работы

Схема данного ФЭУ показана на рис. 3.11. Микроканальная пластина находится на расстоянии  $0.2 \div 0.7$  мм от фотокатода. Она представляет собой трубочки, плотно прижатые друг к другу (каналы) с внутренним диаметром  $6 \div 8$  мкм, собранные в виде естественной гексагональной структуры. Имеется некоторый угол между осью трубочек и осью всего ФЭУ, необходимый для того, чтобы избежать прямого пролёта фотоэлектронов через трубочку. Вылетевший из фотокатода фотоэлектрон под действием электрического поля от приложенного напряжения между фотокатодом и МКП разгоняется и попада-

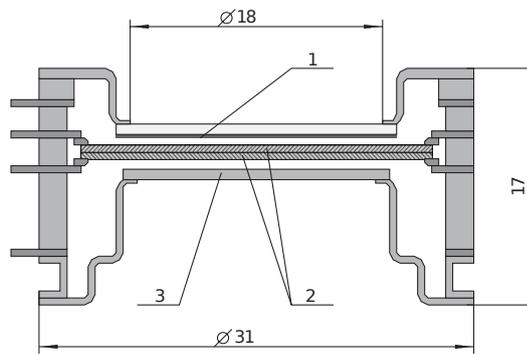


Рис. 3.11. Схема ФЭУ с МКП производства АОТ «Катод» г. Новосибирск. 1 – фотокатод с диаметром окна 18 мм, 2 – два слоя микроканальных пластин, 3 – анод.

ет в один из каналов на внутреннюю стенку трубочки, где вызывает образование вторичных электронов, которые, в свою очередь разгоняются в поле и вызывают дальнейшее развитие лавины. Таким образом, на выходе из канала образуется надёжно регистрируемый сигнал, а коэффициент усиления достигает  $10^6$  при использовании двух микроканальных пластин.

### 3.3.3.2. Коэффициент усиления в магнитном поле

Коэффициент усиления в магнитном поле параллельном оси ФЭУ падает в 3÷5 раз (см. рис. 3.12). При этом имеется сильная зависимость от угла поворота ФЭУ и ориентации каналов относительно направления поля (см. рис. 3.13).

### 3.3.3.3. Коэффициент сбора фотоэлектронов

Ввиду того, что попадание фотоэлектрона на торцевую поверхность трубочки приводит к его поглощению без образование вторичных электронов, имеется некоторая потеря сигнала характеризуемая коэффициентом сбора фотоэлектронов. Обнаружено сильное влияние на коэффициент сбора фотоэлектронов наличия в стандартной конструкции ФЭУ защитной плёнки (см. рис. 3.14). Для детекторов КЕДР и СНД были произведены специальные ФЭУ без плёнки. Дальнейшие исследования показали, что для увеличения времени жизни

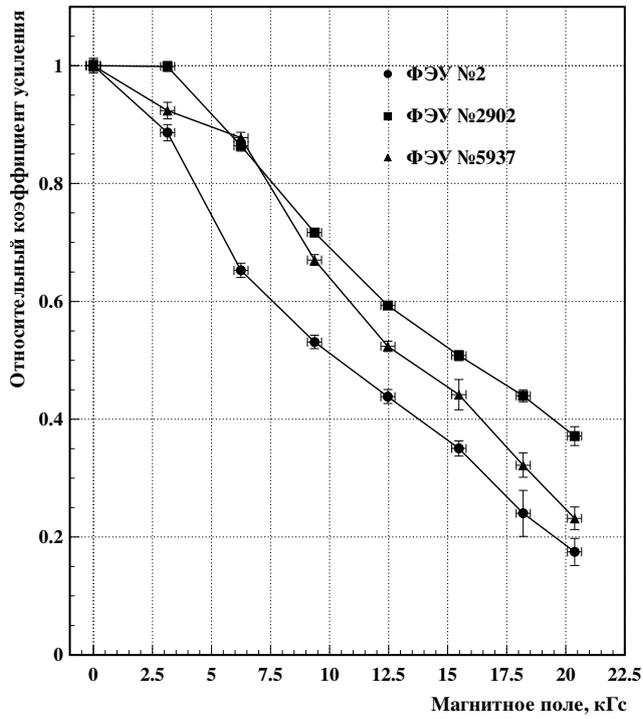


Рис. 3.12. Относительное изменение коэффициента усиления в магнитном поле для нескольких образцов ФЭУ с МКП.

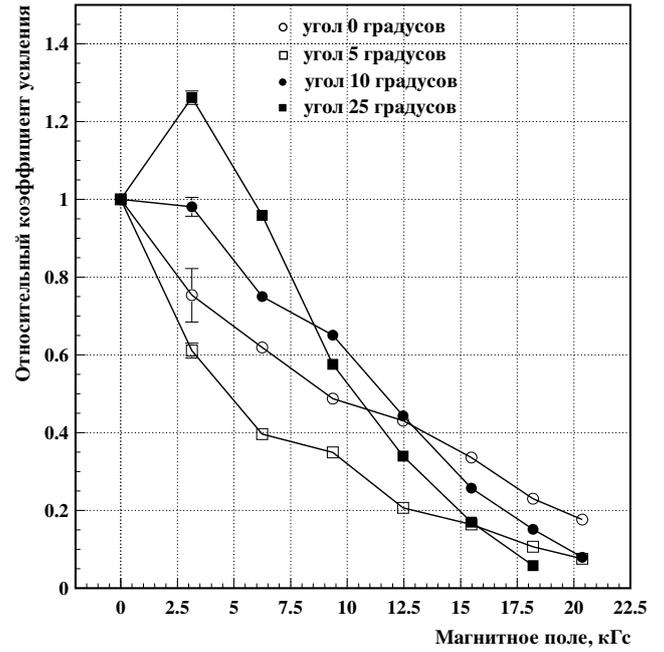


Рис. 3.13. Относительное изменение коэффициента усиления в магнитном поле для разных углов наклона оси ФЭУ к направлению поля: 0, 5, 10 и 25 градусов.

ФЭУ можно устанавливать не по две, а по три МКП, что было использовано в детекторе КЕДР [52].

Дополнительно к описанным исследованиям был измерен абсолютный коэффициент сбора фотоэлектронов. В среднем по 60-ти ФЭУ он составил 58%, при минимуме – 44%, и максимуме – 72% [50, 54]. Подробное описание процедуры измерения приведено в работе [54].

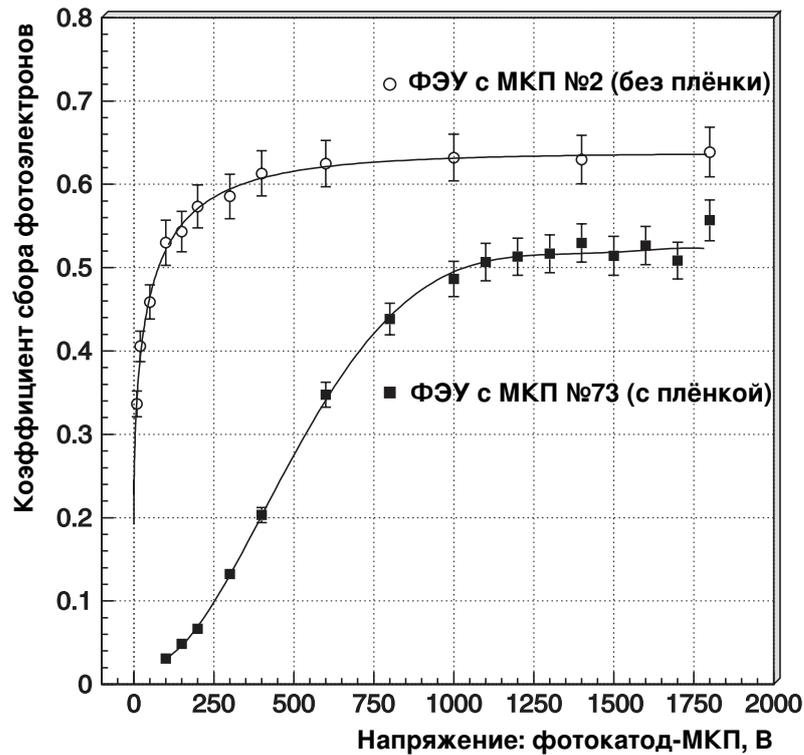


Рис. 3.14. Коэффициент сбора фотоэлектронов в зависимости от напряжения: фотокатод-МКП.

### 3.4. Переизлучатели света

НИИ Полимеров имени В.А. Каргина (г. Дзержинск) совместно с Институтом ядерной физики СО РАН имени Г.И. Будкера в 90-х годах разработал переизлучатели света на основе широко известного органического стекла «плексиглас» (полиметилметакрилат) с добавлением сместителей спектра. Сместитель спектра представляет собой вещество, в котором поглощенный свет переизлучается благодаря эффекту флуоресценции [43]. Ввиду наличия эффектов безызлучательной релаксации энергия переизлучённого фотона всегда меньше, а длина волны всегда больше, чем у поглощённого фотона. Будем далее называть переизлучателями (или шифтерами) готовые изделия из органических стёкол с добавкой того или иного сместителя спектра.

Будем называть вероятностью поглощения вероятность события, при котором поглощение фотона сопровождается излучением фотона с другой длиной волны. Вероятность поглощения зависит от длины волны падающего света. Было проверено, что базовое вещество — полиметилметакрилат в виде готово-

го световода является прозрачным для всех рассматриваемых длин волн: как поглощаемых, так и переизлучаемых сместителем спектра. Форма поперечного сечения шифтера, как и у световодов, может быть только двух вариантов: круглая или прямоугольная, что определяется полным внутренним отражением. Прямоугольная форма более оптимально подходит для задачи сбора света из аэрогеля и доведения его до фотоумножителя, ввиду меньшего числа отражений от поверхности. Кроме того, шифтеры прямоугольной формы более технологичны с точки зрения производства.

### 3.4.1. Основные характеристики переизлучателей

Основными характеристиками шифтеров в применении к аэрогелевым черенковским счётчикам являются:

- вероятность поглощения как функция длины волны,
- спектр излучения как функция длины волны,
- длина ослабления переизлученного света.

Хотя длина ослабления в зависимости от длины волны света является определяющей величиной, с практической точки зрения удобно использовать величину вероятности попадающему на шифтер фотону привезти к появлению фотона на его торце в непосредственной близости от фотоприёмника (см. рис. 3.15). Для краткости будем называть эту величину *вероятность фотон в фотон*. Для моделирования удобно использовать *вероятность фотон в фотоэлектрон*, дополнительно учитывающее квантовую эффективность ФЭУ. Обе эти вероятности являются функциями расстояния от точки падения до фотоприёмника вдоль шифтера. Далее везде предполагается наличие оптического контакта между торцом шифтера и фотокатодом ФЭУ.

Поскольку спектр излучённого света слабо зависит от длины волны поглощённых фотонов достаточно измерить зависимость вероятности фотон в

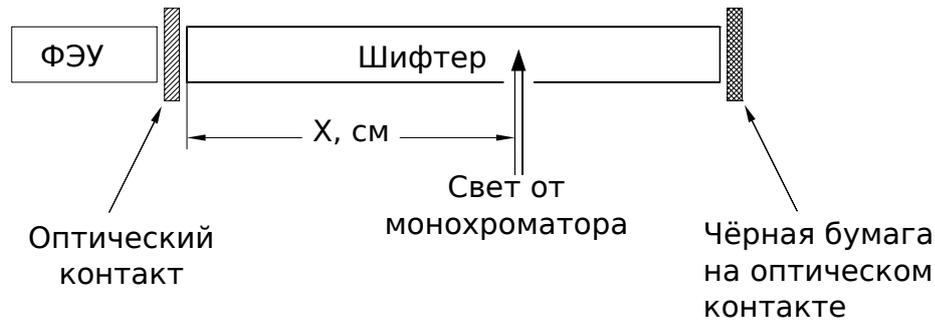


Рис. 3.15. Схема измерения вероятности фотон в фотон/фотоэлектрон у шифтера.

фотоэлектрон от расстояния на одной длине волны. Также нет существенной зависимости от точки падения на шифтер по всему периметру в данном поперечном сечении. Это позволяет ввести понятие *кривой ослабления* для данного шифтера (см. рис. 3.16). Видно, что чем ближе к фотоприёмнику, тем быстрее растёт вероятность фотон в фотоэлектрон. Это объясняется тем, что на малых расстояниях ещё есть свет, который идёт под углами близкими к предельному и испытывает относительно большое число отражений от поверхности шифтера, а на больших расстояниях — от него уже остаётся малая доля, ввиду потери на дефектах поверхности шифтера.

Поскольку дефекты поверхности шифтера сложно заложить в моделирование для Монте-Карло моделирования счётчиков АШИФ использовалась измеренная кривая ослабления  $A(x)$  и вероятность фотон в фотоэлектрон измеренного для данного шифтера  $P_{\gamma \rightarrow pe}(\lambda, x_m)$ , измеренная в некоторой точке  $x_m$ , так что итоговая вероятность для попавшего в шифтер фотона выглядит так:

$$P_{\gamma \rightarrow pe}(\lambda, x) = \frac{A(x)}{A(x_m)} \cdot P_{\gamma \rightarrow pe}(\lambda, x_m) \quad (3.5)$$

Вероятность фотон в фотон  $P_{\gamma \rightarrow \gamma}(\lambda)$  требуемую для сравнения разных шифтеров можно определить по формуле 3.6:

$$P_{\gamma \rightarrow \gamma}(\lambda) = \frac{P_{\gamma \rightarrow pe}(\lambda)}{QE(\lambda_{em})}, \quad (3.6)$$

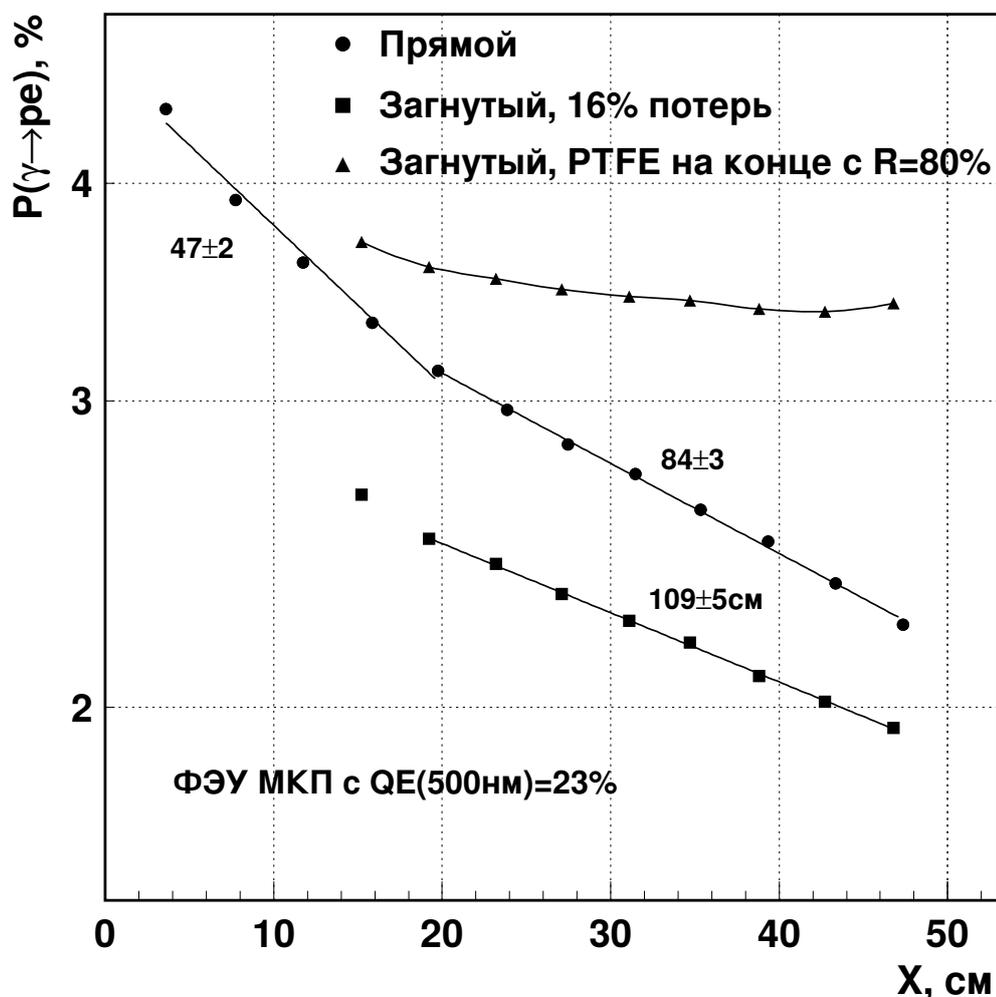


Рис. 3.16. Вероятность фотон в фотоэлектрон для разных стадий приготовления шифтера с сечением  $3 \times 17$  мм в зависимости от расстояния ( $X$ ) по длине шифтера от точки попадания до фотокатода. Варианты: Прямой, загнутый (16% потерь), загнутый с отражателем из тефлона РТФЕ на конце. Эффективный коэффициент отражения  $R=80\%$ . Квантовая эффективность ( $QE$ ) ФЭУ с МКП на 500 нм – 23%.

где  $\lambda_{em}$  — длина волны в максимуме спектра излучения. Формула предполагает узость спектра излучения по сравнению с областью чувствительности ФЭУ.

Сравнение показывает, в частности, что на длину ослабления влияет концентрация сместителя спектра в шифтере. Слишком большая концентрация приводит к уменьшению длины ослабления, а недостаточная ведёт к тому, что падающий на шифтер свет с заметной вероятностью проходит его насквозь без переизлучения.

### 3.4.2. Сравнение переизлучателей на основе РОРОР и ВВQ

Первый вариант системы АШИФ был разработан на основе «синего» сместителя спектра РОРОР, спектр излучения которого хорошо подходит для бищелочного фотокатода, где максимум излучения близок к максимуму квантовой эффективности. Более оптимальный вариант «синего» шифтера был получен с шифтером КН-18. Когда стало понятно, что фотоприёмником будет ФЭУ с МКП с мультищелочным фотокатодом, у которого более широкая и длинноволновая кривая квантовая эффективность, сделан переход на более длинноволновый «зелёный» сместитель спектра ВВQ, важным свойством которого было то, что он поглощал свет в более широком диапазоне длин волн (см. рис. 3.17, рис. 3.18), расширяя область захвата черенковского света.

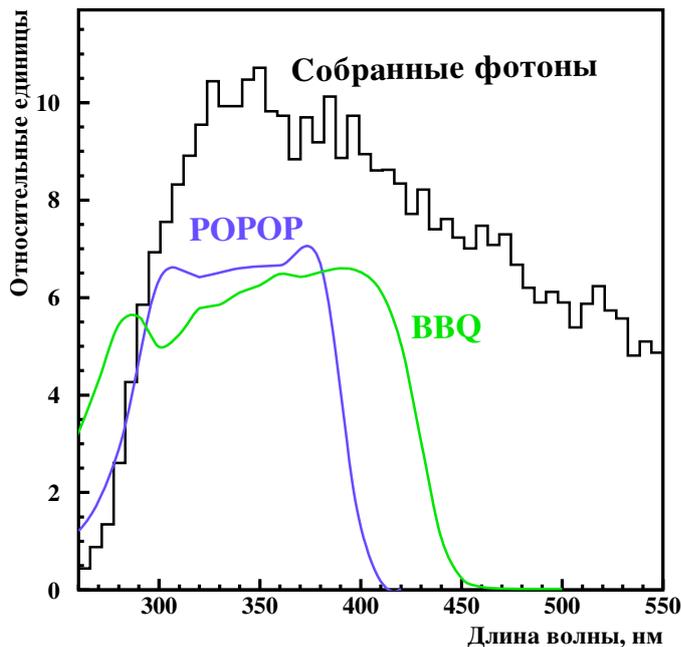


Рис. 3.17. Вероятности фотон в фотон для шифтеров на основе РОРОР и ВВQ, спектр фотонов, собранных на шифтер, полученный из Монте-Карло моделирования черенковского счётчика.

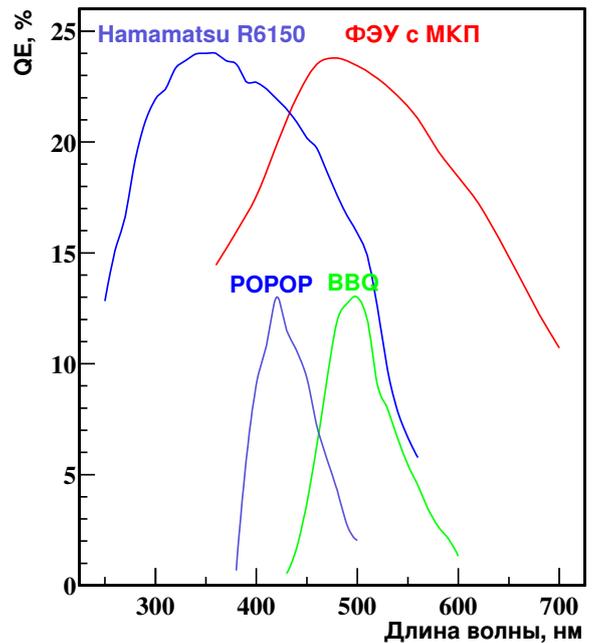


Рис. 3.18. Спектры переизлучённого света для РОРОР и ВВQ (в относительных единицах). Квантовые эффективности (QE) бищелочного фотокатода ФЭУ Hamamatsu R6150 и мультищелочного фотокатода ФЭУ с МКП.

### 3.5. Отражатели на стенках счётчиков

#### 3.5.1. Коэффициент отражения и выбор отражателя

Для порогового черенковского счётчика критически важно, чтобы при диффузном сборе света как можно меньше терялось черенковского света на разного рода поглотителях. Поглощение в аэрогеле обсуждалось ранее, а теперь следует обсудить поглощение на стенках. Цель — достичь высокого коэффициента отражения  $R$ , который тем больше, чем меньше коэффициент поглощения  $W$ :

$$R = 1 - W. \quad (3.7)$$

Несмотря на то, что черенковское излучение изначально имеет чёткое направление использование зеркала для сбора света в аэрогелевых счётчиках не является перспективным. Основная часть черенковского света лежит в коротковолновой части спектра, для которой имеет место сильное рэлеевское рассеяние в аэрогеле, поэтому в каждую точку зеркала будет попадать свет под самыми разными углами, сводя на нет усилия по его фокусировке. С использованием программы моделирования LSE было показано, что зеркало не даёт преимуществ в разумно подбираемых конструкциях счётчиков. А с учётом того, что реальные зеркала имеют коэффициент отражения меньше, чем у диффузных отражателей, было принято решение рассматривать далее только диффузные варианты.

К хорошо известным диффузным отражателям относятся, например, сульфат бария, оксид магния, оксид цинка и др. Основной их недостаток при использовании в системе идентификации частиц в детекторе — малая радиационная длина, из-за наличия элемента с большим атомным номером, что повышает вероятность конверсии фотона перед калориметром. Возможное решение этой проблемы в использовании отражателей из органических полимерных материалов на основе фторопластов. Достаточно неплохим вариантом является

использование пористого тефлона (PTFE), который производится компанией Tetratex в виде плёнки толщиной 250 мкм.

Метод измерения коэффициента поглощения на стенках  $w_{abs} = W$  рассматривалось в разделе 3.2 про измерение длины поглощения в аэрогеле. Ниже на рисунках показано сравнение коэффициентов поглощения для отражающих покрытий на основе PTFE (см. рис. 3.19, рис. 3.20), краски Kodak на основе сульфата бария (см. рис. 3.21) и бумаги Millipore (см. рис. 3.22).

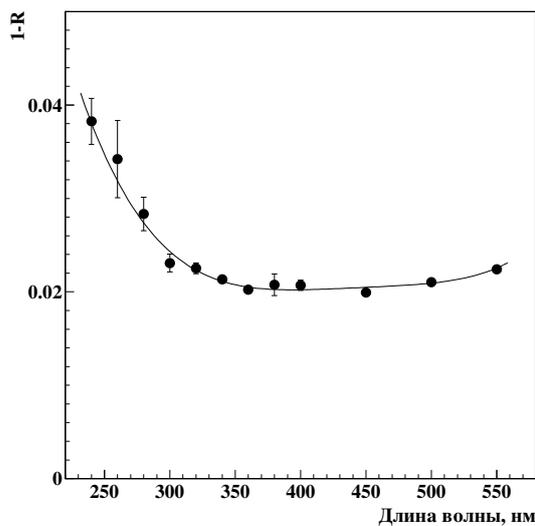


Рис. 3.19. Коэффициент поглощения для плёнки из тефлона PTFE

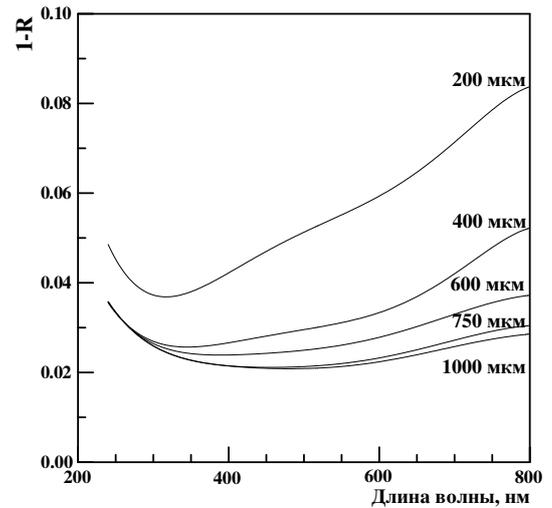


Рис. 3.20. Коэффициент поглощения для разной толщины покрытия тефлона PTFE

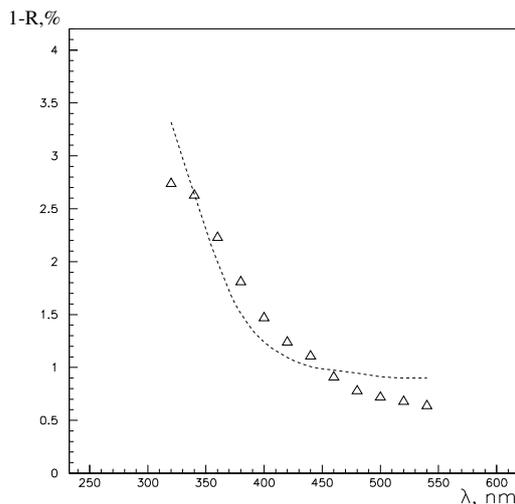


Рис. 3.21. Коэффициент поглощения для краски Kodak. Линия – данные Kodak, точки – измерения.  $\lambda$  – длина волны.

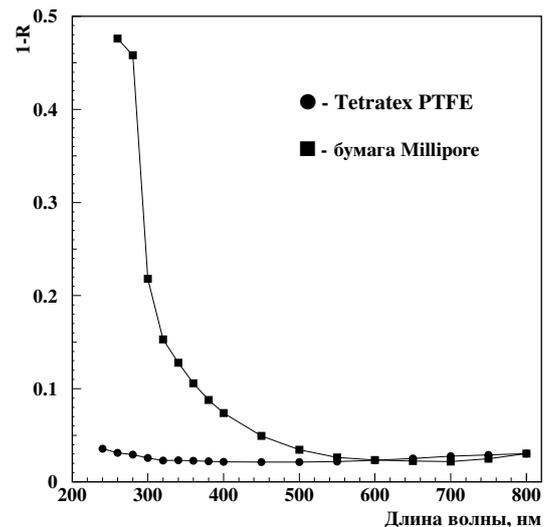


Рис. 3.22. Сравнение коэффициента поглощения для тефлона PTFE и бумаги Millipore

## Глава 4

# Проект аэрогелевых счётчиков для детектора BaBar

Детектор BaBar [26] (см. рис. 4.1) был спроектирован в середине 90-х годов и запущен в работу в 99-м году в Стенфордском центре линейных ускорителей (SLAC) в Калифорнии, США. Несколько групп из Италии, Франции и из ИЯФ активно участвовали в разработке различных вариантов системы идентификации для BaBar. Требования к системе идентификации в детекторе BaBar выдвигались довольно жёсткие — как по количеству вещества, так и по доступному месту в детекторе, при необходимости разделения  $\pi$ - и  $K$ -мезонов до импульса 4 ГэВ/с.

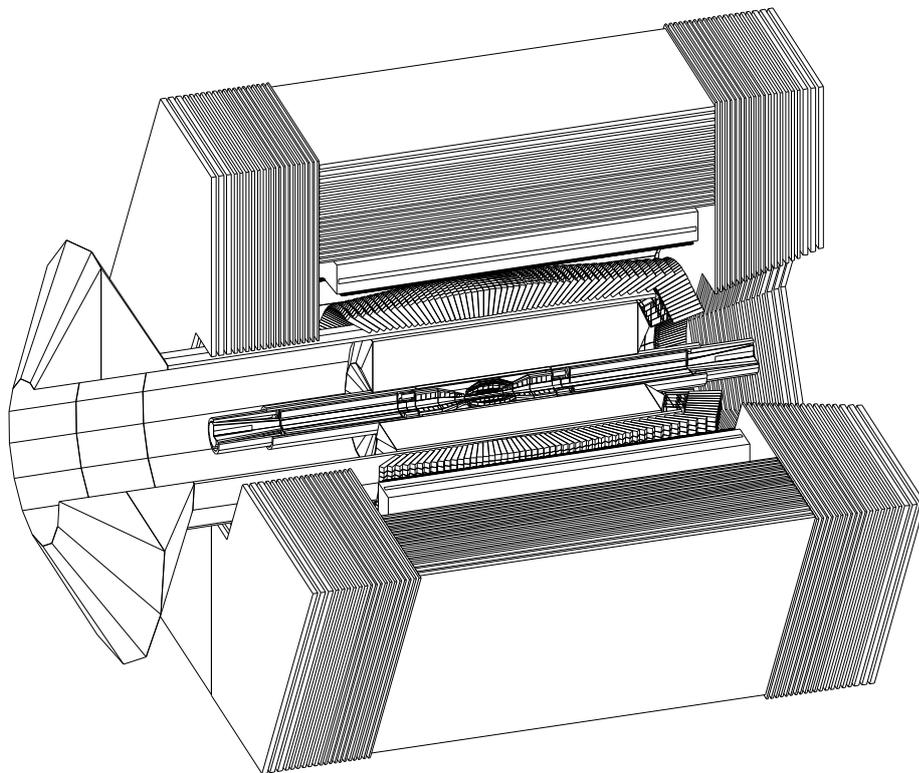


Рис. 4.1. Схема детектора BaBar.

#### 4.1. Четырехслойный вариант

Группой ИЯФ с участием соискателя была предложена и доведена до прототипа четырехслойная система аэрогелевых счётчиков для торцевой (forward) части детектора [27]. Счётчики с показателями преломления 1.008 и 1.05 чередуются друг с другом попарно так, чтобы перекрыть телесный угол, занимаемый фотоумножителями в одном слое, аэрогелем — в другом слое (см. главу 1 рис. 1.5). В счётчике с  $n=1.05$  было по два фотоумножителя и толщина аэрогеля составляла 20 мм (см. главу 1 рис. 1.6), а в счётчике с  $n=1.008$  было три фотоумножителя и толщина аэрогеля составляла 70 мм (см. рис. 4.2). Всего на систему предполагалось иметь 112 счётчиков и 280 ФЭУ. В окончательный вариант детектора ВаВаг данная система не вошла, так как телесный угол был сильно уменьшен из-за необходимости размещения фокусирующих линз коллайдера ближе к месту встречи, чем планировалось изначально.

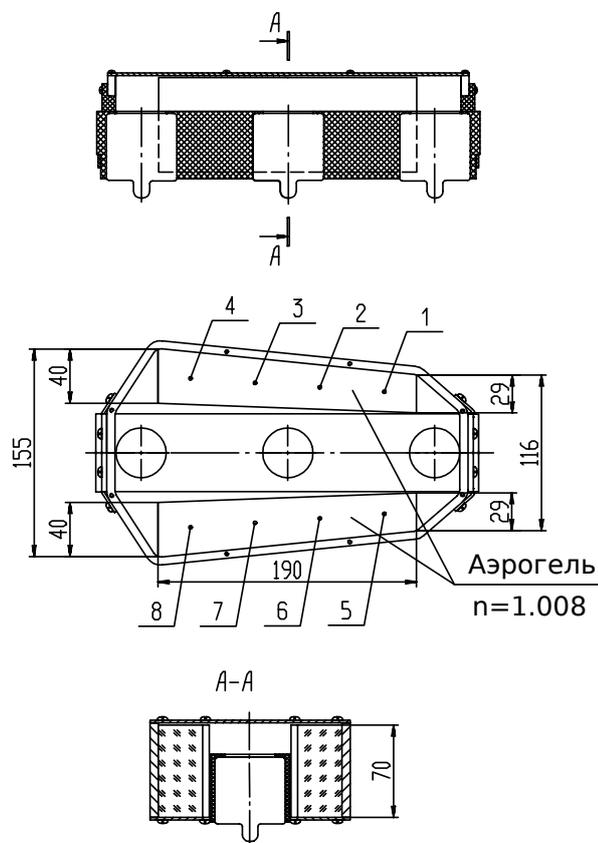


Рис. 4.2. Прототип счётчика для детектора ВаВаг с показателем преломления 1.008.

## 4.2. Проверка на выведенном пучке в ЦЕРНе

Прототипы счётчиков были изготовлены в ИЯФ СО РАН и привезены в ЦЕРН. Аэрогель был произведён в Институте Катализа СО РАН, а измерен и обработан в ИЯФе. Окончательная сборка счётчиков проводилась нами уже в ЦЕРНе. На пучке мы сотрудничали с коллегами из Италии и Франции, которые привезли свои прототипы и использовали тот же самый выведенный пучок, так что для всех счётчиков был единый триггер. Было показано, что можно получить около 10 фотоэлектронов от заряженной релятивистской частицы и достичь уровня разделения  $\pi$ - и  $K$ -мезонов около  $3.5\sigma$ . Моделирование на LSE подтвердило полученные результаты (см. главу 1 рис. 1.7). Это было первое сравнение эксперимента с моделированием на LSE [37], показавшее успешность используемого подхода.

## Глава 5

## Детектор КЕДР

Детектор КЕДР [55, 56] (см. рис. 5.1, 5.2) был разработан и построен в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН для проведения экспериментов на коллайдере ВЭПП-4М со встречными электрон-позитронными пучками в области энергий  $2 \div 11$  ГэВ в системе центра масс.

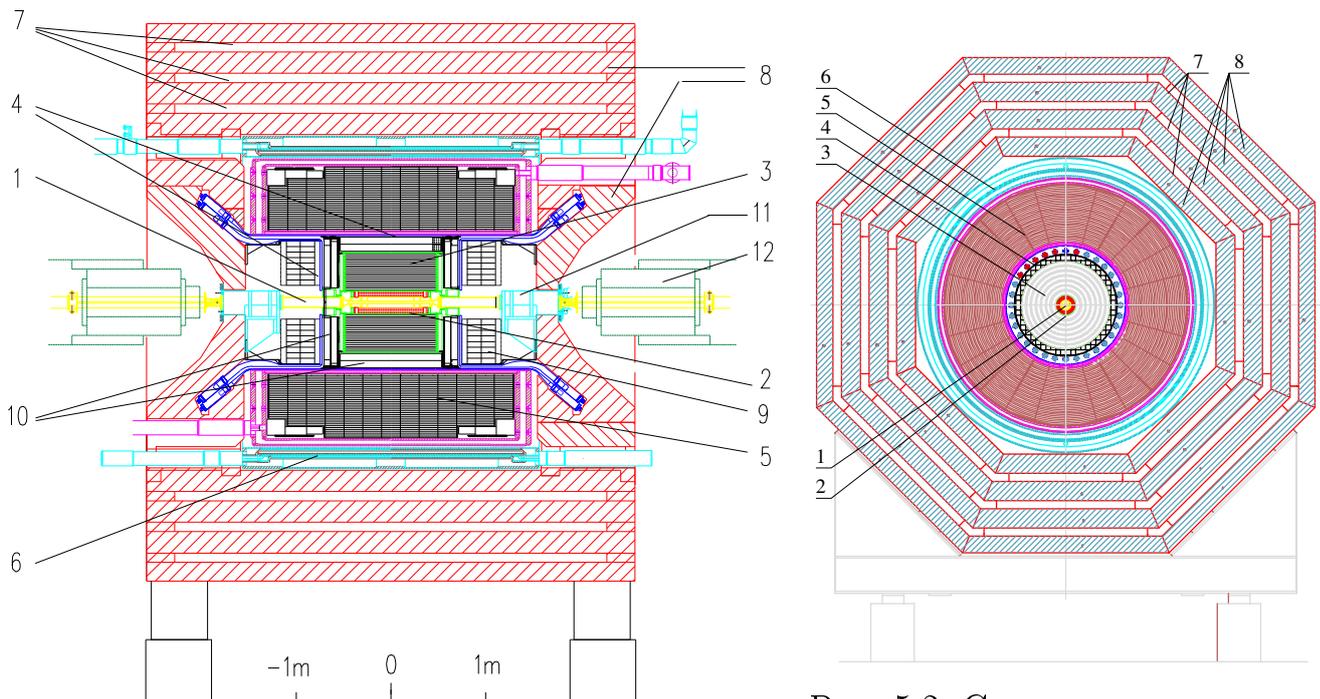


Рис. 5.1. Схема детектора КЕДР (продольный разрез).

Обозначения: 1 – вакуумная камера, 2 – вершинный детектор, 3 – дрейфовая камера, 4 – время-пролётная система, 5 – цилиндрический LKr калориметр, 6 – обмотка магнита, 7 – мюонная система, 8 – ярмо магнита, 9 – торцевой CsI калориметр, 10 – аэрогелевые черенковские счётчики, 11 – компенсирующий соленоид, 12 – элементы магнитной системы коллайдера ВЭПП-4М.

Рис. 5.2. Схема детектора КЕДР (поперечный разрез).

Детектор КЕДР состоит из следующих систем:

- *Вершинный детектор* – дрейфовые трубки с газовой смесью: аргон и 30% углекислый газ и анодной проволочкой (20 мкм). Пространственное разрешение составляет 170 мкм при суммарной толщине вещества около 0.2% от  $X_0$ .

- *Дрейфовая камера* наполнена чистым диметиловым эфиром, имеет 7 слоёв (3 стерео и 4 аксиальных), ячейка содержит 6 чувствительных проводочек, итого 42 измерения для частицы из места встречи. Импульсное разрешение при рабочем поле 0.6 Т составляет около 3.6% на 1 ГэВ/с. Пространственное разрешение в аксиальном слое 115 мкм, а в стерео – 220 мкм.
- *Аэрогелевые пороговые черенковские счётчики* покрывают 95% от 4π. Система состоит из 160 счётчиков, расположенных в два слоя, и заполненных аэрогелем с показателем преломления 1.05, что позволяет разделять π- и К-мезоны в диапазоне импульсов 600÷1500 МэВ/с [6, 7, 8, 9, 10].
- *Время-пролётные сцинтилляционные счётчики* состоят из пластин сцинтиллятора Bicron-408, соединенных с ФЭУ через световод. Всего имеется 96 счётчиков. Для баррельных счётчиков разрешение по времени пролёта составляет 360 пс, а для торцевых – 300 пс, что позволяет разделять π- и К-мезоны до 600 МэВ/с.
- *Торцевой калориметр на основе кристаллов CsI* размером 60×60×150 мм, склеенных попарно. Они просматриваются двумя вакуумными фототриодами. Полное число кристаллов – 1232. Радиационная толщина – 16.2  $X_0$ . Энергетическое разрешение – 3.5% на 150 МэВ.
- *Баррельный калориметр на основе жидкого криптона* представляет собой набор ионизационных камер, разделённых электродами из стеклотекстолита (G10) на расстоянии 19.5 мм. По радиусу имеется 3 слоя ячеек, соединённых по радиусу («башни»), а внутри первого слоя имеются 4 плоскости полосок для измерения координаты z и угла φ. Всего в калориметре – 35 слоёв электродов. Радиационная толщина – 14.8  $X_0$ . Полученное разрешение по энергии – 3.0% на 1.8 ГэВ, для массы π<sup>0</sup>-мезона – 8 МэВ. Пространственное разрешение – около 1 мм [4].

- *Мюонная система* состоит из стримерных трубок диаметром 40 мм. Она заполнена смесью аргон, углекислый газ, н-пентан. Трубки собраны в блоки и расположены внутри ярма магнита детектора. Всего имеется 3 слоя трубок. Пространственное разрешение вдоль трубок – около 4 см.
- *Сверхпроводящая магнитная система* состоит из основного соленоида с 568 витками сверхпроводящего кабеля, уложенными в гелиевый сосуд из нержавеющей стали с вакуумной теплоизоляцией. Она обеспечивает рабочее магнитное поле 0.6 Т. Компенсирующие соленоиды расположены в центрах полюсов ярма детектора и служат для зануления интеграла магнитного поля вдоль траектории пучков.
- *Система регистрации рассеянных электронов* состоит из двух наборов по четыре блока, расположенных по обе стороны от места встречи (см. рис. 5.3). Каждый блок представляет собой годоскоп из дрейфовых трубок длиной 200 мм и шириной 90 и 180 мм. Разрешение по координате трека – 0.4 мм, а по углу – около 3 мрад [5]. Кроме того, используется система на основе многокаскадных газовых электронных умножителей (ГЭУ), где разрешение в плоскости орбиты составляет 73 мкм, а по вертикали – 220 мкм. Это позволяет достичь точности измерения энергии рассеянных электронов с точностью  $0.2 \div 0.6\%$  от энергии пучка.

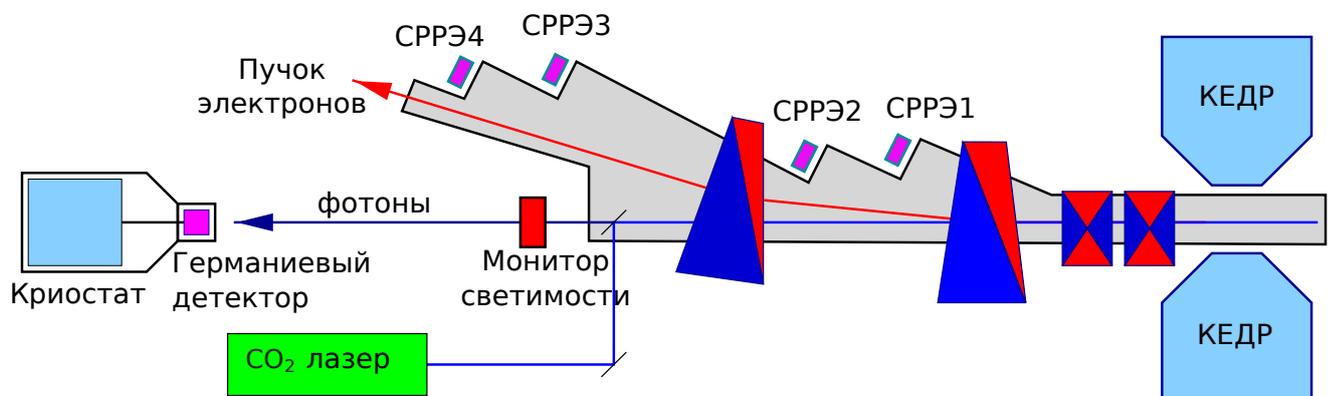


Рис. 5.3. Система регистрации рассеянных электронов (СРРЭ, 4 модуля) с электронной стороны и схема измерения энергии по методу обратного комптоновского рассеяния (ОКР).

- Система оперативного измерения светимости по процессу однократного тормозного излучения состоит из двух электромагнитных калориметров, находящихся на оси пучков на расстоянии 18 м от места встречи (см. рис. 5.3). Полученная точность измерения светимости – около 3%.
- Триггер детектора имеет трёхуровневую схему: первичный (ПТ) и вторичный (ВТ) – аппаратные, а третичный – программный. Время решения ПТ – 450 нс, а ВТ – 18 мкс. При средней загрузке фоновых событий 50 кГц частота срабатываний ПТ составляет 3.5 кГц, а ВТ – 50 Гц, при этом просчёты ВТ равны 6.3%, а итоговый КПД – 91.5%.
- Система сбора данных основана на разработанном в ИЯФ СО РАН стандарте электроники КЛЮКВА. Число каналов детектора без ГЭУ – около 15 тысяч, система ГЭУ содержит 5120 аналоговых каналов. Размер события – 2÷4 килобайт. Синхронизация, управление и передача данных из крейтов КЛЮКВА осуществляется через модули в стандарте КАМАК, крейты которых подключены к нескольким компьютерам под управлением ОС GNU/Linux. Основные программы управления сбором данных и медленный контроль работают под VAX/VMS. Характерная скорость записи событий – 50÷100 Гц.

## Глава 6

# Система счётчиков АШИФ для детектора КЕДР

### 6.1. Основные требования к системе

Основными требованиями, предъявляемыми к системе счётчиков АШИФ в детекторе КЕДР, являются:

- работа в магнитном поле до 1.8 Т,
- высокая эффективность срабатывания системы,
- идентификация: разделение  $\pi/K$  на уровне  $3\sigma$  в диапазоне импульсов, обеспечивающем перекрытие с другими подсистемами детектора КЕДР,
- долговременная стабильность на уровне 5-10 лет,
- «мёртвое» вещество перед калориметром не более  $20\div 25\%$  от  $X_0$ ,
- хорошая геометрическая эффективность — обеспечивать по возможности полное покрытие телесного угла детектора,
- сегментация по телесному углу должна обеспечивать хорошее разделение до 8 заряженных частиц в событии на  $\Upsilon$ -мезоне,
- время реакции и срабатывания системы должно укладываться во время, отведённое на детекторе вторичным триггером ( $< 10$  мкс),
- вклад собственного шума системы не должен добавлять более  $1\div 2\%$  к допороговой эффективности.

## 6.2. Проект системы

### 6.2.1. Выбор показателя преломления аэрогеля

Для общедетекторной системы идентификации важно, чтобы не оставалось неприкрытых областей по спектру импульсов частиц. Например, если время-пролётная система позволяет идентифицировать  $\pi$ -мезон при импульсах менее 600 МэВ/с, то это определяет выбор показателя преломления черенковского радиатора аэрогеля так, чтобы заряженный  $\pi$ -мезон при этом импульсе давал достаточное количество черенковского света для надёжной регистрации. Исходя из этого, был выбран показатель преломления аэрогеля  $n = 1.05$ .

### 6.2.2. Выбор переизлучателя

Основным критерием при выборе переизлучателя было согласование спектра переизлучённого света со спектральной чувствительностью фотоприёмника. Для случая бищелочного фотокатода, чувствительного в основном в «синей» и ультрафиолетовой области, был выбран «синий» переизлучатель на основе РОРОР (см. главу 3.4), поскольку в этом случае спектральная чувствительность фотокатода в зависимости от длины волны спадает гораздо быстрее, чем растёт интегральный спектр собранных фотонов (см. главу 3.4 рис. 3.17, рис. 3.18). При переходе на фотоприёмники на основе МКП с мультищелочным фотокатодом, спектральная чувствительность которого тянется до «зелёной» области, был выбран переизлучатель ВВQ с захватом уже большего диапазона длин волн, таким образом, расширился спектр собранных черенковских фотонов.

Другим критичным параметром световода с переизлучателем является длина ослабления света. Для случая более тонкого световода требования на параллельность граней и точность шлифовки возрастают. Поскольку изначально для «синего» варианта предполагалось использовать ФЭУ Hamamatsu с диаметром 52 мм, то естественный выбор толщины световода — 5 мм (см. рис. 6.1

слева). В окончательном варианте «зелёного» переизлучателя для использова-

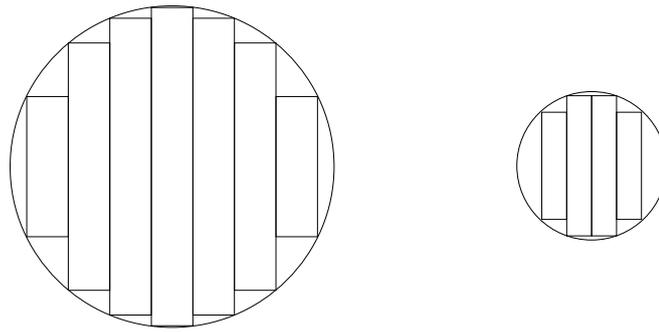


Рис. 6.1. Расположения шифтеров на фотокатоде. Слева – 5 мм шифтеры на диаметре 39 мм, справа – 3 мм на диаметре 18 мм.

ния с ФЭУ МКП с диаметром фотокатода 18 мм был осуществлён переход на 3 мм световод, при этом была достигнута приемлемая длина ослабления (см. главу 3.4 рис. 3.16).

### 6.2.3. Выбор размеров счётчиков

Размеры счётчиков, с одной стороны, определяются максимальным расстоянием между шифтерами, допустимым по коэффициенту светосбора, который определяется в основном прозрачностью аэрогеля. С другой стороны, эти размеры определялись возможностью размещения световодов, сведённых на площадь фотокатода. На рис. 6.1 справа показана окончательная схема размещения. Видно, что переход на 3 мм даёт заметный выигрыш в эффективности использования площади фотокатода, позволяя уменьшить число фотоприёмников на единичный телесный угол системы. Кроме того, световод толщиной 3 мм позволяет делать меньшие радиусы изгиба при сведении на фотоприёмник, что улучшает геометрическую эффективность системы.

Использование переизлучателей предоставило дополнительную свободу при проектировании системы счётчиков. Благодаря высокому коэффициенту сбора света на шифтеры, по сравнению с прямым светосбором на фотокатод ФЭУ, можно делать плоские и тонкие счётчики. Наличие шифтеров приводит к дополнительному пассивному веществу в системе идентификации. Этот

недостаток можно преодолеть, сделав систему в виде двух слоёв счётчиков так, чтобы при прохождении частицы в одном слое не через аэрогель (световод, фотоприёмник, электроника или стык двух соседних счётчиков), во втором слое на треке этой частицы находился бы точно аэрогель. Что и было сделано. Кроме того, учитывался радиус поворота в магнитном поле, так что даже частица с минимальным импульсом (600 МэВ/с) проходит только через аэрогель без касания пассивных элементов хотя бы в одном из слоёв счётчиков. Такая «герметичность» важна в условиях, когда нужно обеспечить высокую эффективность к  $\pi$ -мезонам, поскольку их количество в несколько раз превышает количество К-мезонов. При этом в значительном числе случаев частица проходит только через аэрогель в обоих слоях, что существенно улучшает идентификацию.

#### **6.2.4. Прототип счётчика на основе «синего» переизлучателя**

Система счётчиков АШИФ на основе «синего» переизлучателя КН-18 и ФЭУ Hamamatsu R6150 была полностью разработана (см. рис. 6.2–6.5). В 1995-м году прототип счётчика был испытан на выведенном пучке  $\pi$ -мезонов с энергией 5 ГэВ в ЦЕРНе [57]. Прототип представлял собой одну четверть реального баррельного счётчика (см. рис. 6.4) с реальными расположением и изгибами световодов. Поскольку глубина распространения света в аэрогеле ограничена небольшой областью около трека частицы, то такой «частичный» прототип представлялся адекватным для проверки принципа метода АШИФ. Доступное на момент эксперимента количество аэрогеля не позволяло заполнить весь объём прототипа, но это можно было легко учесть при моделировании на LSE. На рис. 6.6 показаны три положения прохождения пучка через прототип. В точках 1 и 3 была установлена сборка аэрогеля с размерами  $5 \times 5 \times 6$  см для того, чтобы проверить адекватность описания длины ослабления в шифтере. А в точке 2 было измерено количество света без аэрогеля, которое даёт сам отражатель. Полученные результаты измерений в числе фотоэлектронов хорошо согласуются с данными моделирования. Сравнение приведено в таблице 6.1.

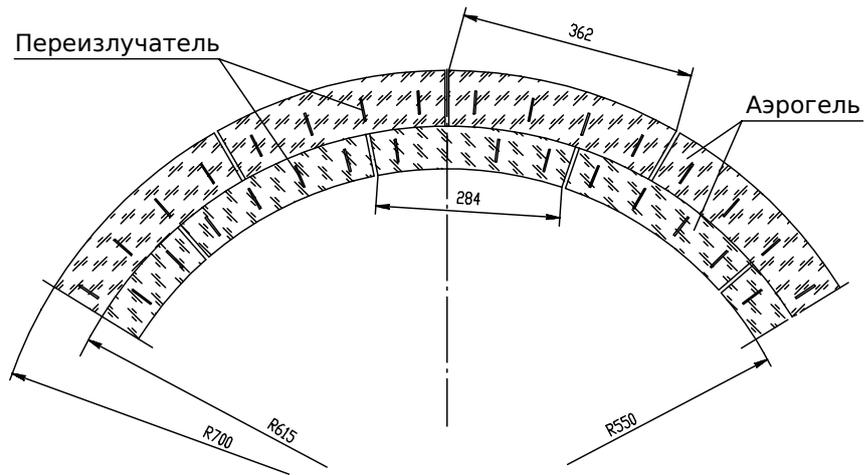


Рис. 6.2. Принцип расположения счётчиков в 2-х слойной системе АШИФ.

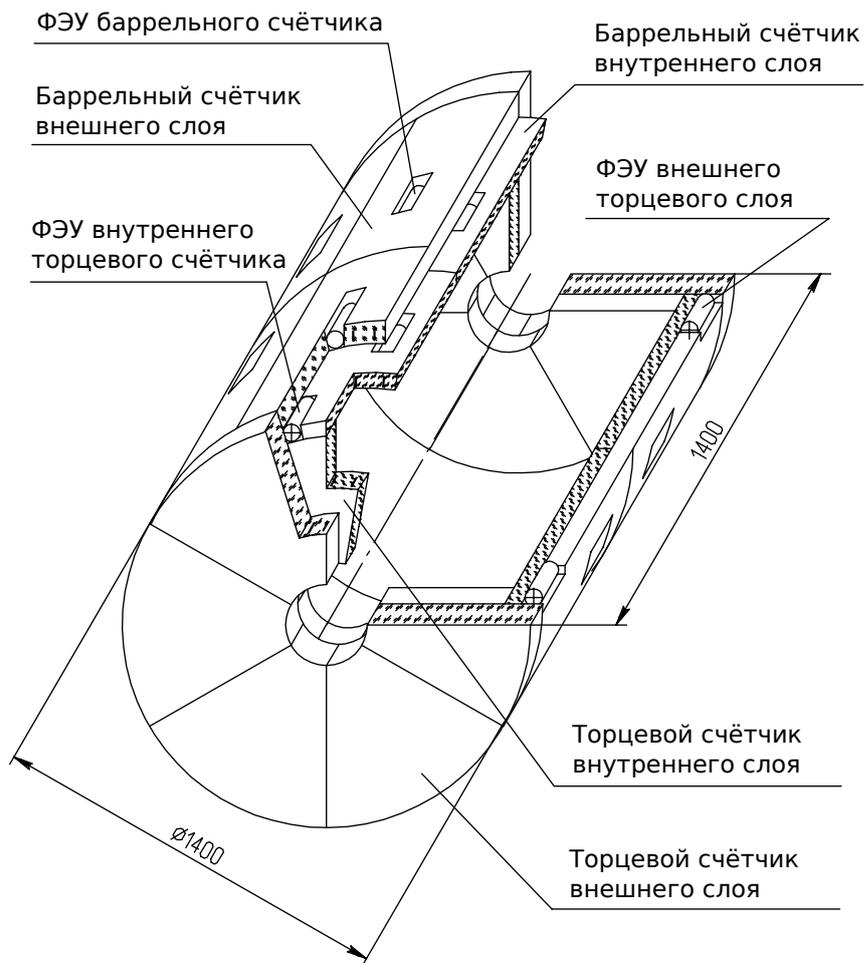


Рис. 6.3. Схема системы счётчиков АШИФ на основе «синего» переизлучателя КН-18 и ФЭУ Hamamatsu R6150.



### 6.2.5. Основные параметры системы

После проведения моделирования нескольких вариантов системы методом Монте-Карло, используя программу LCE [58, 59], выбор был остановлен на следующих параметрах (см. рисунки в разделе 1.5 главы 1):

- число счётчиков по углу  $\phi$  — 20 в каждом из двух слоёв,
- для данного угла  $\phi$  — по одному счётчику в каждом торце и по два в баррели для каждого слоя,
- толщина аэрогеля — 7 см в каждом слое,
- размеры баррельного (короткого):  $218 \times 600(480) \times 74$  мм (см. рис. 1.10),
- размеры торцевого (узкая сторона):  $214(51) \times 518 \times 74$  мм (см. рис. 1.9),
- полное число счётчиков в обоих слоях — 160,
- количество вещества 24% от  $X_0$  (по 12% в каждом слое),
- полный телесный угол системы — 95% от  $4\pi$  (см. рис. 1.8),

Метод АШИФ позволил на порядок уменьшить суммарную площадь фотокатодов по сравнению с вариантом системы счётчиков с прямым светосбором.

Используемая электроника на системе АШИФ в детекторе КЕДР позволяет измерять положение «пика» импульса с точностью около 20-30 нс. Устанавливая допустимый интервал по времени в 100 нс при шумовой нагрузке от ФЭУ — 100 кГц, получаем вероятность случайного срабатывания — 1%.

## 6.3. Сравнение эксперимента на космических частицах с моделированием счётчика методом Монте-Карло

С помощью прототипа торцевого счётчика было проведено измерение световых выходов от космических мюонов в числе фотоэлектронов [28]. Измерение выполнено на установке «телескоп» (см. рис. 6.7), где можно отбирать космические мюоны с заданным импульсом. Область прохождения космических частиц

показана рис. 6.8. Полученный световыход составил  $7.8 \pm 0.2$  фотоэлектрона. Для этой же области было проделано Монте-Карло моделирование по программе LCE с учётом всех известных параметров для данного счётчика. В результате моделирования получено  $8.2 \pm 0.8$  (ошибка систематическая) фотоэлектрона, что показывает хорошее согласие с экспериментом.

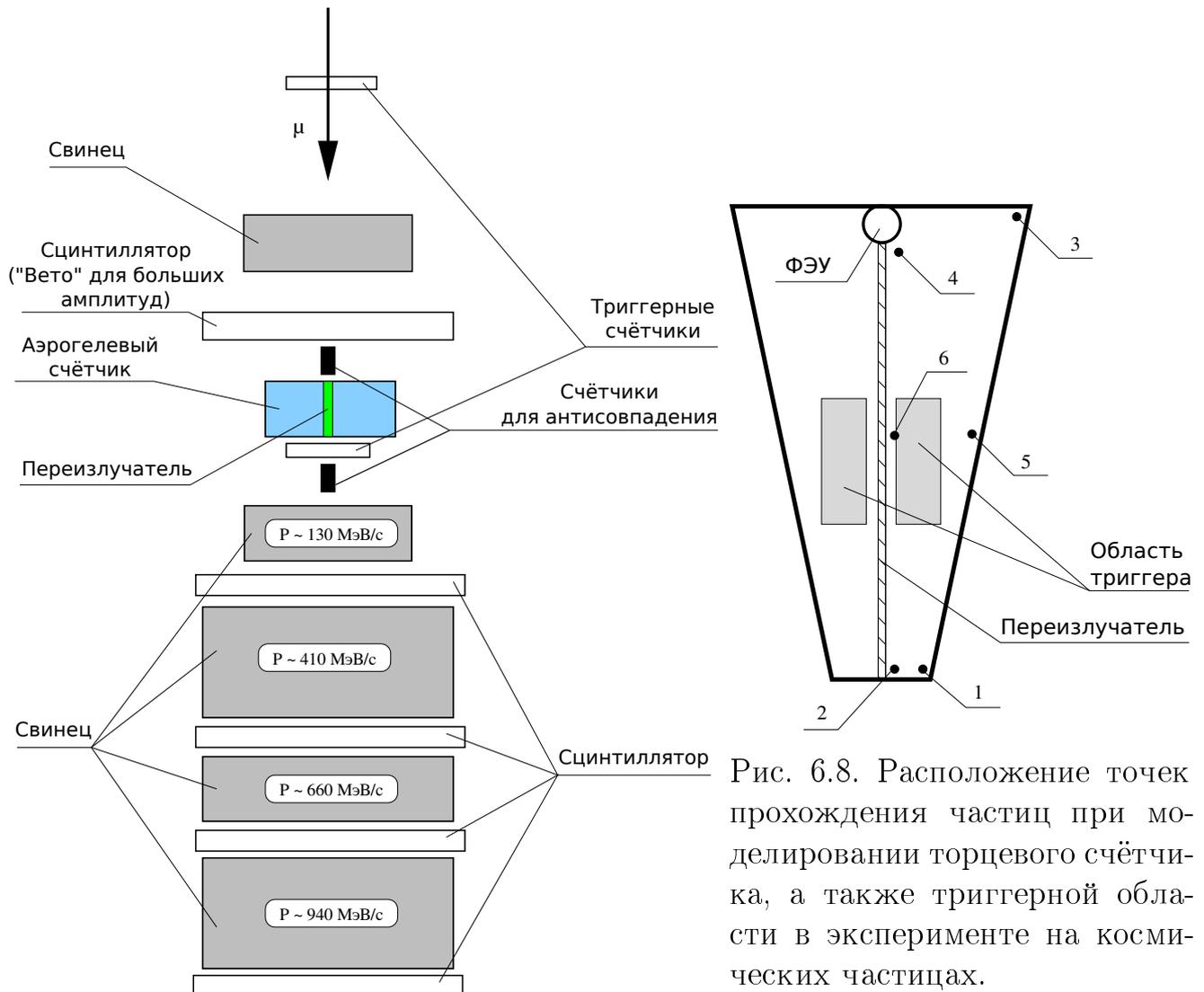


Рис. 6.8. Расположение точек прохождения частиц при моделировании торцевого счётчика, а также триггерной области в эксперименте на космических частицах.

Рис. 6.7. Схема установки «телескоп». Для исключения пролетающих через область шифтера мюонов используется пара счётчиков, включенных на антисовпадение относительно триггерных.

## 6.4. Проверка счётчиков на пучке в Дубне, $\pi/K$ разделение

В 2000-м году 4 торцевых счётчика были протестированы на выведенном пучке из протонного синхротрона ОИЯИ с энергией 10 ГэВ в г. Дубна [7] (см. рис. 6.9). Для проверки  $\pi/K$  разделения использовался пучок  $\pi$ -мезонов с им-

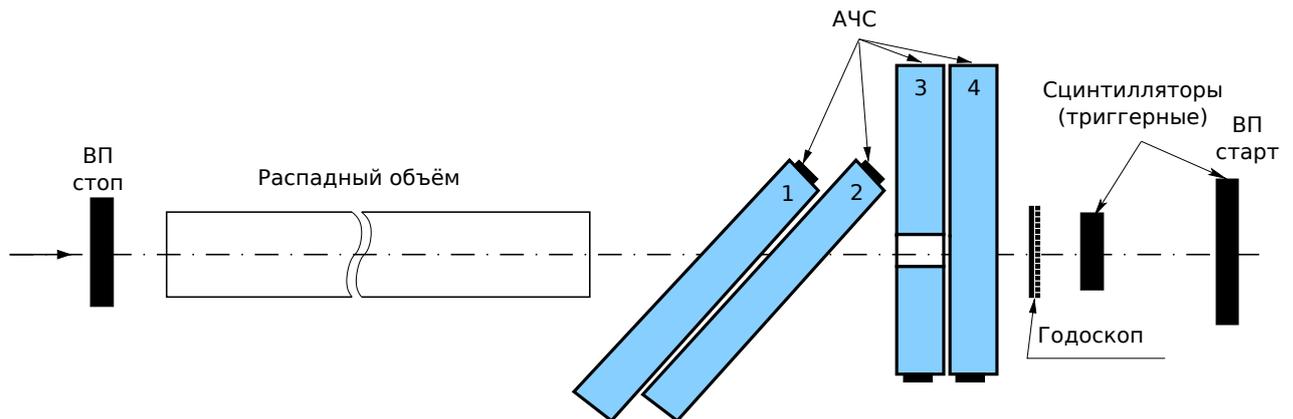


Рис. 6.9. Схема расстановки счётчиков на эксперименте в Дубне. Обозначения: ВП – время-пролётный счётчик, АЧС – аэрогелевый черенковский счётчик. Счётчики 1 и 3 были заполнены блоками аэрогеля, а 2 и 4 – аэрогелевой крошкой. Для измерения количества света только из отражателя на стенках – тефлона РТФЕ – в счётчике 3 были вынуты блоки аэрогеля на треке частицы.

пульсом 1.2 ГэВ/с, а взамен К-мезонов с тем же импульсом использовались протоны с той же скоростью. Полученный световыход от релятивистской частицы составил 10.6 фотоэлектронов для счётчиков из блоков аэрогеля, и 7.0 фотоэлектронов для заполненных аэрогелевой крошкой (размером  $5 \div 20$  мм). Полученные результаты хорошо согласуются с Монте-Карло моделированием по программе LCE (см. таблицу 6.2). Полученные вероятности ложной идентификации позволяют разделять  $\pi$ - и К-мезоны с импульсом 1.2 ГэВ/с на уровне  $4.5\sigma$  при 90% эффективности регистрации К-мезонов для счётчиков из блоков аэрогеля, и на уровне  $3.9\sigma$  при заполнении счётчиков аэрогелевой крошкой [8] (см. рис. 6.10, рис. 6.11). Способ оценки разделения в числе стандартных отклонений  $\sigma$  для случая негауссовых распределений поясняется в разделе 6.5.

Таблица 6.2. Сравнение результатов эксперимента в Дубне и Монте-Карло моделирования счётчика для триггерных областей, показанных на рис. 6.9. Представлено число фотоэлектронов для счётчика, заполненного блоками аэрогеля SAN-97. Угол соответствует углу влёта частицы из места встречи в счётчик, если бы он стоял в детекторе КЕДР.

Угол	Эксперимент, $N_{pe}$	Монте-Карло, $N_{pe}$	разница, %
19°	$8.45 \pm 0.07 \pm 0.31$	$8.27 \pm 0.04$	$2 \pm 3$
30°	$8.63 \pm 0.06 \pm 0.30$	$8.29 \pm 0.07$	$3 \pm 3$
	$7.63 \pm 0.05 \pm 0.27$	$7.55 \pm 0.11$	$1 \pm 3$
40°	$9.70 \pm 0.07 \pm 0.34$	$9.07 \pm 0.11$	$6 \pm 3$
	$7.99 \pm 0.06 \pm 0.28$	$7.94 \pm 0.17$	$0 \pm 4$
	$7.73 \pm 0.05 \pm 0.27$	$7.24 \pm 0.25$	$6 \pm 4$
45°	$7.42 \pm 0.09 \pm 0.31$	$7.8 \pm 1.0$	$-5 \pm 14$
	$7.33 \pm 0.05 \pm 0.31$	$7.1 \pm 0.6$	$3 \pm 9$
	$7.10 \pm 0.05 \pm 0.30$	$6.6 \pm 0.6$	$7 \pm 9$

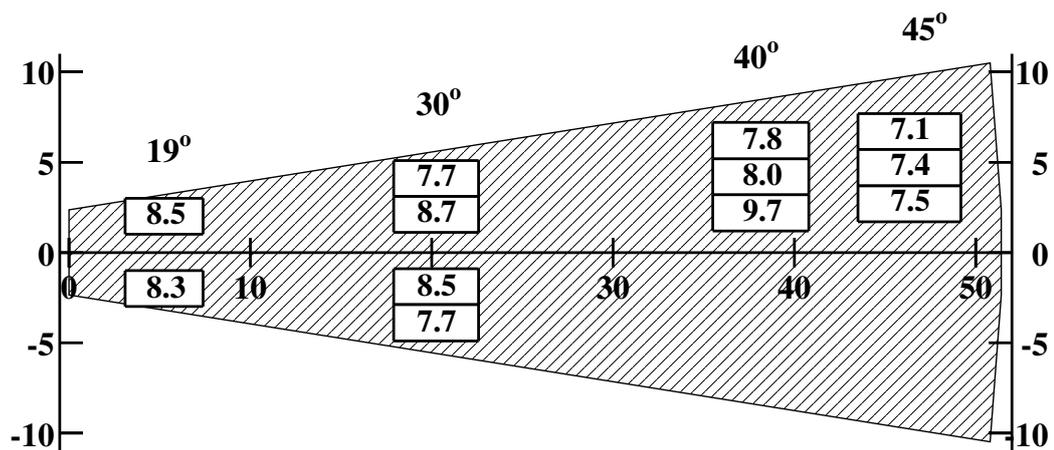


Рис. 6.10. Расположение триггерных областей при измерении неоднородности световых выходов в числе фотоэлектронов для счётчика, заполненного блоками аэрогеля (см. таблицу 6.2). Угол соответствует углу влёта частицы в счётчик из места встречи, если бы он стоял в детекторе КЕДР.

Ввиду большей неоднородности светосбора в счётчиках и меньшей предсказуемости поведения со временем, от заполнения счётчиков крошкой было принято отказаться и строить систему АЧС, заполняя её блоками аэрогеля.

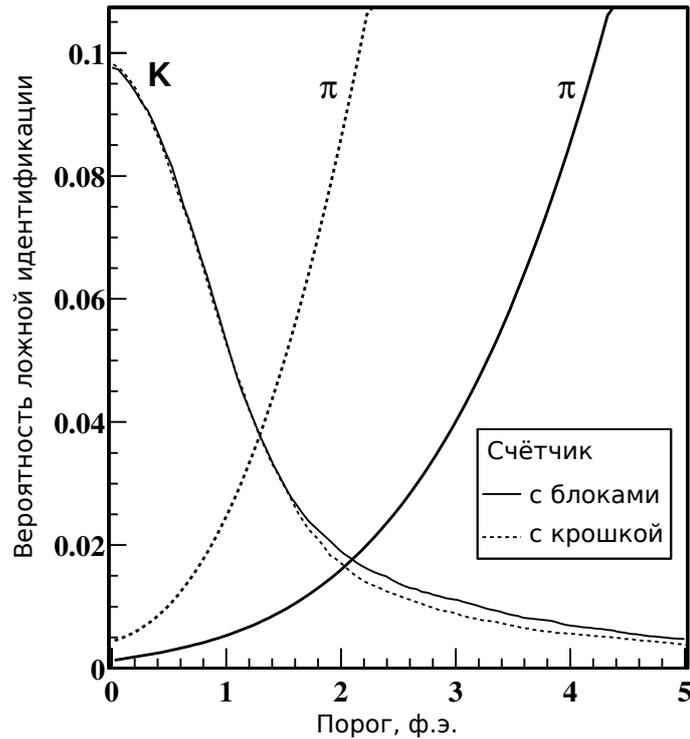


Рис. 6.11. Вероятность ложной идентификации в зависимости от заданного порога в числе фотоэлектронов: ниже порога – K-мезон, выше порога –  $\pi$ -мезон. Импульсы  $\pi$ - и K-мезонов – 1.2 ГэВ/с. Показано два случая для заполнения счётчика: с блоками аэрогеля и с аэрогелевой крошкой.

## 6.5. Проверка качества идентификации

В 2013 году установлена полная система из двух слоёв в сборе: 160 счётчиков, всего 1000 литров аэрогеля. Измерено качество идентификации для  $\pi$ - и K-мезонов в диапазоне импульсов от 940 до 1430 МэВ/с, используя космические мюоны [9, 10]. По аналогии с экспериментом в Дубне в качестве  $\pi$ - и K-мезонов использовались мюоны с той же скоростью. Поскольку каждая частица пересекает два слоя системы, то можно рассматривать следующие комбинации для определения эффективности идентификации:

- «И» – одновременное срабатывание в обоих слоях,
- «Или» – срабатывание хотя бы в одном слое,

– «Сумма» – срабатывание считается исходя из суммарной амплитуды по обоим слоям.

Ниже приведены вероятности ложной идентификации для всех трёх случаев: «И» (см. рис. 6.12), «Или» (см. рис. 6.13) и «Сумма» (см. рис. 6.14).

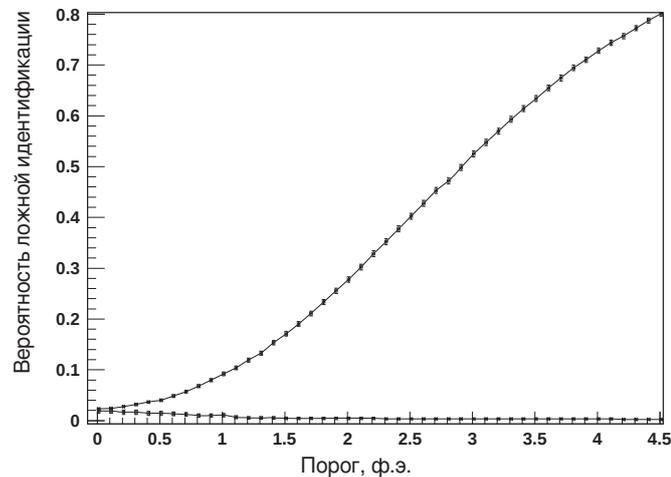


Рис. 6.12. Вероятность ложной идентификации для случая «И» в зависимости от заданного порога в числе фотоэлектронов: ниже порога – К-мезон, выше порога –  $\pi$ -мезон. Импульсы  $\pi$ - и К-мезонов лежат в области 940÷1430 МэВ/с.

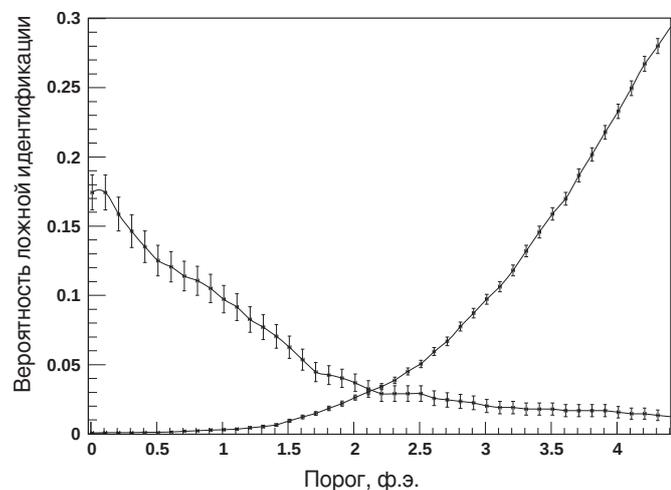


Рис. 6.13. Вероятность ложной идентификации для случая «Или» в зависимости от заданного порога в числе фотоэлектронов: ниже порога – К-мезон, выше порога –  $\pi$ -мезон. Импульсы  $\pi$ - и К-мезонов лежат в области 940÷1430 МэВ/с.

Зависимость от импульса для эффективности регистрации К-мезонов и вероятности ложной идентификации для  $\pi$ -мезонов приведена на рис. 6.15.

Сравнение с системами идентификации других детекторов: система идентификации Belle [25], также построенная на основе аэрогеля, время-пролётная

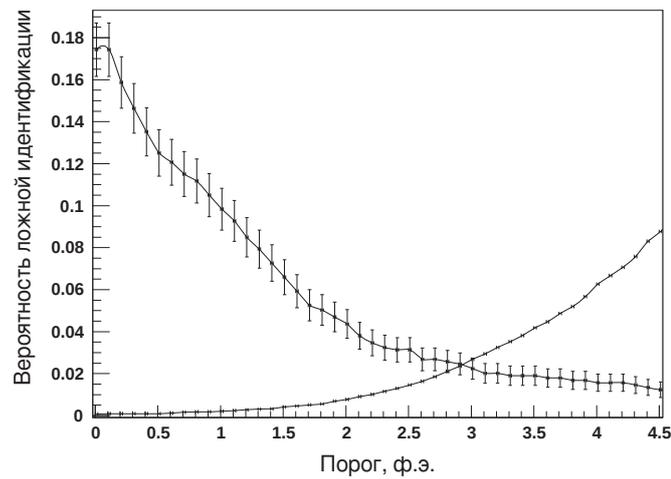


Рис. 6.14. Вероятность ложной идентификации для случая «Сумма» в зависимости от заданного порога в числе фотоэлектронов: ниже порога – К-мезон, выше порога –  $\pi$ -мезон. Импульсы  $\pi$ - и К-мезонов лежат в области  $940 \div 1430$  МэВ/с.

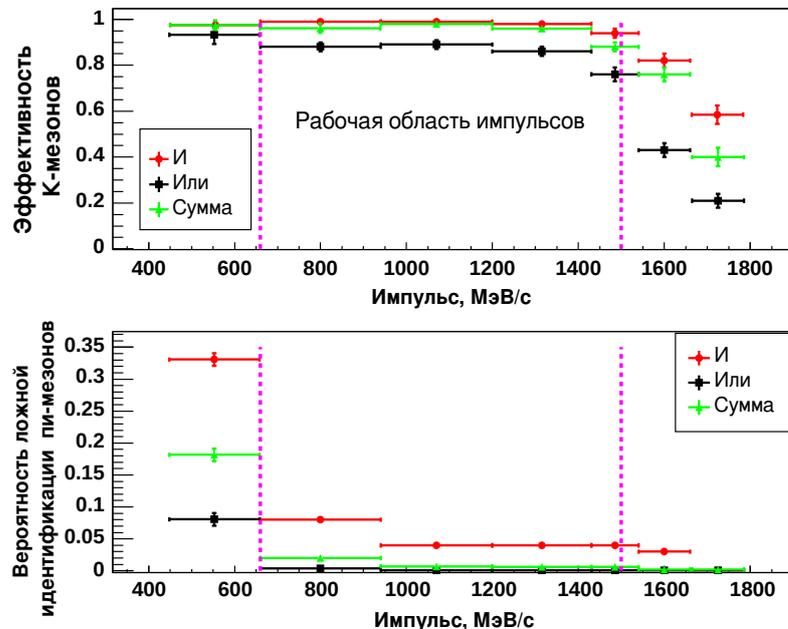


Рис. 6.15. Зависимость от импульса для эффективности регистрации К-мезонов и вероятности ложной идентификации для  $\pi$ -мезонов: показаны три случая использования обоих слоёв системы: для случаев «И» и «Или» был выбран порог в 0.5 фотоэлектрона, а для случая «Сумма» – 2.0 фотоэлектрона. Вертикальные пунктирные линии соответствуют порогам черенковского излучения в аэрогеле для  $\pi$ - и К-мезонов.

система детектора BES-III [60], который работает в данное время и в той же области энергии, что и детектор КЕДР, и система DIRC [61] детектора BaBar [26], которая до сих пор считается лучшей по идентификации приведено в табли-

це 6.3. Данные детектора ВаBar иллюстрируются рис. 6.16. Аналогичная иллюстрация для детектора Belle представлена в разделе 1.3 на рис. 1.4.

Таблица 6.3. Сравнение степени разделения (PID) систем идентификации детекторов Belle, BES-III и КЕДР в двух точках по импульсу: 0.9 и 1.2 ГэВ/с.

Система идентификации	Импульс, ГэВ/с					
	0.9			1.2		
	$\varepsilon_K, \%$	$1 - \varepsilon_\pi, \%$	PID, $\sigma$	$\varepsilon_K, \%$	$1 - \varepsilon_\pi, \%$	PID, $\sigma$
BES-III ToF	97	10	3.2	90	16	2.3
Belle ACC	$92 \pm 2$	$7 \pm 1.5$	$2.9 \pm 0.1$	$86 \pm 2$	$7 \pm 1.5$	$2.6 \pm 0.1$
VaBar DIRC <sup>a</sup>	98.5	0.4	4.8	99.2	1.3	4.6
КЕДР АЧС «И» <sup>b</sup>	$99 \pm 1$	$5.2 \pm 0.4$	$4.0 \pm 0.2$	$98.5 \pm 1$	$2.5 \pm 0.3$	$4.1 \pm 0.2$
КЕДР АЧС «Или» <sup>b</sup>	$91 \pm 2$	$0.5 \pm 0.1$	$3.9 \pm 0.1$	$89.5 \pm 2$	$0.09 \pm 0.07$	$4.4 \pm 0.2$
КЕДР АЧС «Сумма» <sup>b</sup>	$96 \pm 2$	$2.1 \pm 0.3$	$3.8 \pm 0.2$	$96.5 \pm 1$	$0.6 \pm 0.1$	$4.3 \pm 0.1$

<sup>a</sup> Данные полученные интерполяцией приведенных на рисунке ниже для ВаBar.

<sup>b</sup> Данные из диссертации А. Ю. Барнякова [62]

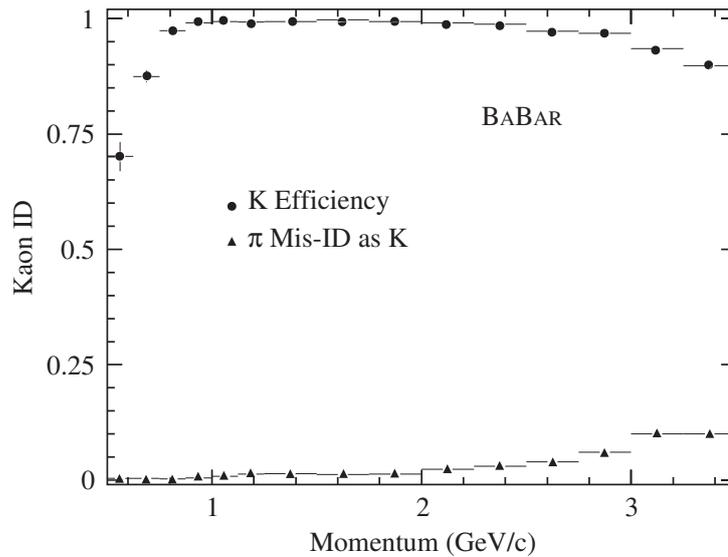


Рис. 6.16. Эффективность идентификации К-мезонов и вероятность ложной идентификации π-мезонов в зависимости от импульса для DIRC детектора ВаBar. Используются данные  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ . (Оригинальная версия рисунка из [61]).

Обозначения: Momentum (GeV/c) – импульс (ГэВ/с), Kaon ID – эффективность идентификации К-мезонов, ● К Efficiency – эффективность К-мезонов, ▲ π Mis-ID as K – вероятность ложной идентификации π-мезонов как К-мезонов.

Видно, что при импульсе 1.2 ГэВ/с уровень разделения составляет  $4\sigma$ , что выше уровня разделения на время-пролётной системе детектора BES-III,

на аэрогелевой системе детектора Belle и сравнимо с системой DIRC детектора BaBar.

Степень разделения в числе сигм определяется следующим образом. Если имеется измеряемая величина, которая позволяет разделять два типа частиц, и если функции распределения вероятностей для каждого — гауссовы, то можно измерить расстояние между «пиками» этих распределений в числе сигм. Для более общего случая негауссовых распределений можно использовать вероятность ложной идентификации при заданном значении порога разделения  $x_{sep}$  (см. рис. 6.17).

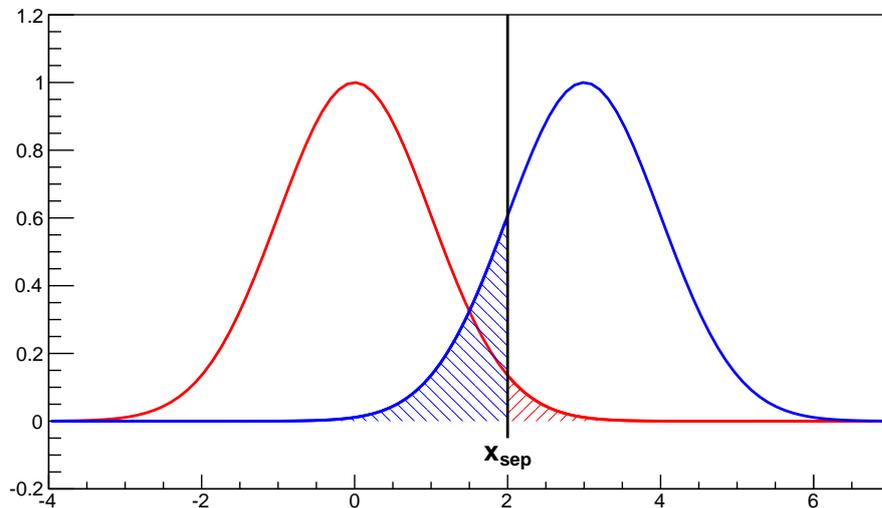


Рис. 6.17. Пример идеальных функций распределения для двух рассматриваемых типов частиц, которые требуется разделить по выбранному значению  $x_{sep}$ . Площадь отмеченная штриховкой, соответствует вероятности ложной идентификации для каждого типа частиц.

По данной вероятности ложной идентификации можно определить расстояние в числе сигм от  $x_{sep}$  до «пика» распределения для каждой частицы. Результирующим разделением в числе сигм будет сумма этих расстояний по обеим частицам. Для вычисления используется функция, обратная интегралу от функции Гаусса: GAUSIN (G105) [63] из CERNLIB [42] или из Root [64] — ROOT::Math::gaussian\_quantile ( double z, double sigma ) [65], где параметр sigma=1.0.

## 6.6. Статус системы

В 2013-м году установлена полная система из двух слоёв: 160 счётчиков, 1000 литров аэрогеля. Измерено качество идентификации для  $\pi$ - и  $K$ -мезонов с импульсом 1.2 ГэВ/с, используя космические мюоны. Для случая идентификации по одному слою степень разделение составляет  $3.3 \div 3.9\sigma$ , а для по двум слоям счётчиков –  $3.7 \div 4.3\sigma$  [9, 10]. К середине 2017-го года с системой счётчиков АШИФ набрано  $2 \text{ пб}^{-1}$  на энергии в области  $J/\psi$ -мезона, и  $4 \text{ пб}^{-1}$  в области  $\psi(3770)$ .

## Глава 7

## Система счётчиков АШИФ для детектора СНД

Детектор СНД, работающий на коллайдере ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН, представляет в своей основе сферический трёхслойный калориметр на основе  $\text{NaI}(\text{Tl})$  (см. рис. 7.1). Внутренней диаметр сферы составляет около 35 см, где наряду с дрейфовой камерой размещается система аэрогелевых черенковских счётчиков, покрывающая около 60% от телесного угла из места встречи [31] (см. главу 1 рис. 1.11). Проектирование данной системы было произведено с учётом опыта разработки счётчиков АШИФ для детектора КЕДР. В частности, был использован тот же переизлучатель (шифтер), ФЭУ с МКП и внутреннее светоотражающее покрытие – тефлон РТФЕ.

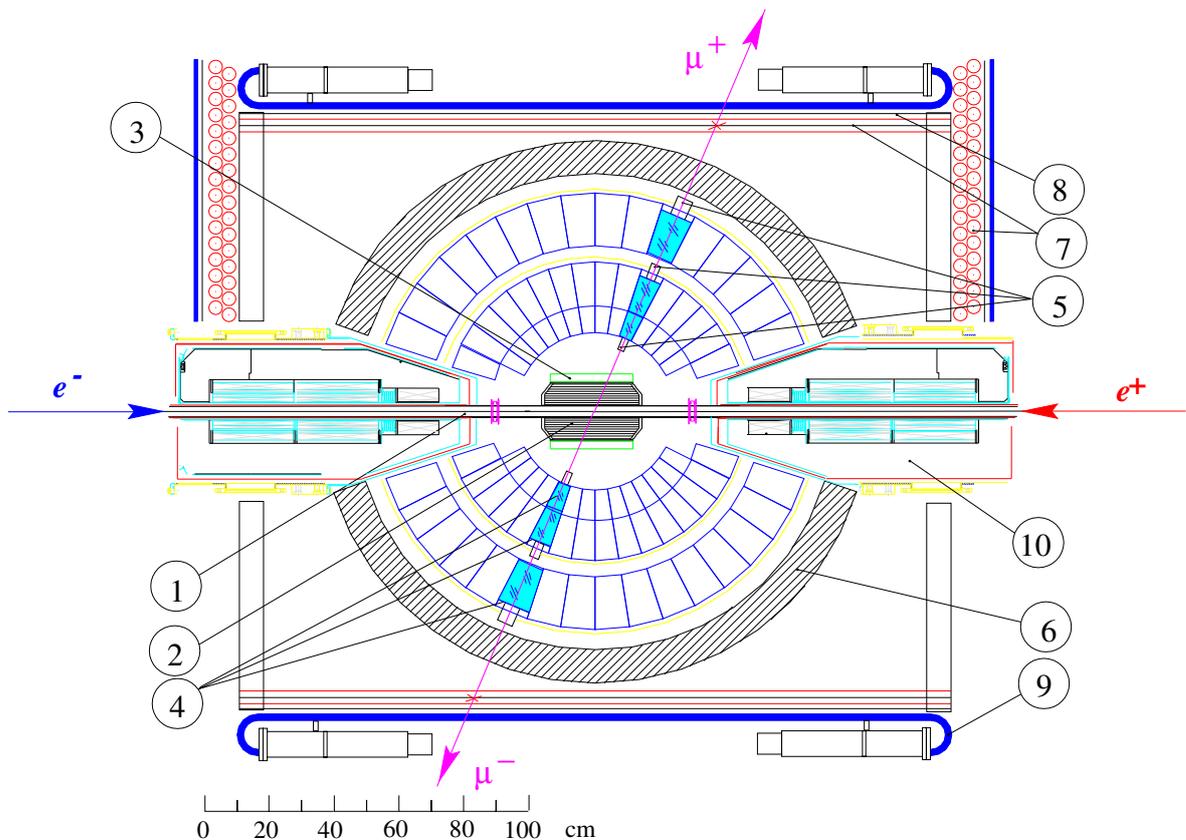


Рис. 7.1. Схема детектора СНД. 1 – Вакуумная камера, 2 – дрейфовая камера, 3 – система АШИФ, 4 – кристаллы  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , 5 – фототриоды, 6 – поглотитель из железа, 7 – мюонные трубки, 8 – железная пластина, 9 – мюонные счётчики, 10 – магниты коллайдера.

## 7.1. Размеры счётчиков и показатель преломления

Система счётчиков АШИФ представляет собой цилиндр с внутренним радиусом 106 мм, разделённый на 9 счётчиков (см. рис. 7.2). Толщина каждого счётчика равна 31 мм, а длина – 226 мм (см. главу 1 рис. 1.12). Одна полоска шифтера толщиной 3 мм проходит через весь счётчик и присоединяется к ФЭУ с МКП. Столь тонкая система идентификации (35 мм) стала возможной только благодаря использованию метода АШИФ. Шифтер помещён не в середине счётчика, а со смещением, и число счётчиков выбрано нечётным, чтобы исключить одновременное попадание двухчастичного коллинеарного трека в шифтер и/или в зазор между счётчиками с обеих сторон системы. Показатель преломления аэрогеля выбран – 1.13, для разделения  $\pi$ - и  $K$ -мезонов в диапазоне импульсов 350÷900 МэВ/с. Второй комплект системы счётчиков сделан с показателем преломления 1.05 для разделения  $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$  до импульсов  $\sim 450$  МэВ/с.

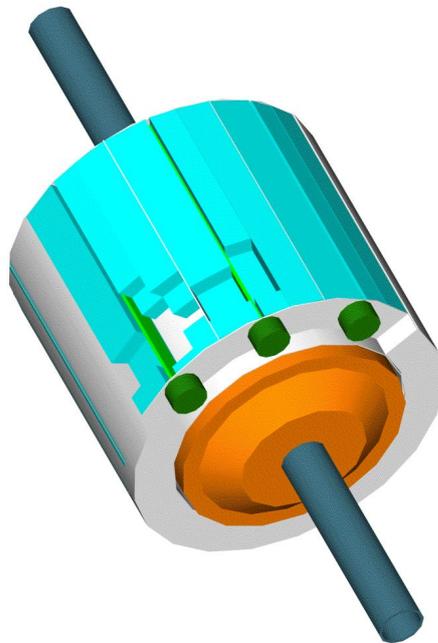


Рис. 7.2. Схема системы АШИФ детектора СНД. На ближайшем торце системы показаны ФЭУ с МКП, с присоединёнными шифтерами. Показана схема заполнения счётчиков блоками аэрогеля.

## 7.2. Результаты Монте-Карло моделирования

Экспериментальное измерение числа фотоэлектронов от космических частиц показало хорошее согласие с Монте-Карло моделированием на LSE. В обоих случаях получено число фотоэлектронов в аэрогеле с  $n=1.13$  от космических мюонов с импульсом более 1 ГэВ/с около 10 [29, 30].

## 7.3. Статус системы

Система счётчиков АШИФ работает в составе детектора СНД с 2009-го года. Экспериментально достигнуто разделение  $\pi$ - и  $K$ -мезонов на уровне  $3\sigma$ , а также коэффициент подавления  $e/K$  до 4400 при эффективности регистрации события  $K^+K^-$  на уровне 80% [66] для аэрогеля с  $n=1.13$ . Для аэрогеля с  $n=1.05$  коэффициент подавления  $e/\mu$  достигает 500 при эффективности регистрации события  $e^+e^-$  95.5% [67]. В 2015–2016 годах были получены результаты обработки эксперимента с использованием данной системы [32, 33]. В частности, с её помощью удалось провести прецизионное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в области энергии от 1050 до 2000 МэВ [34].

## Заключение

### Основные научные результаты работы, выносимые на защиту:

1. Впервые разработана универсальная программа моделирования светосбора методом Монте-Карло в сложных оптических системах с учётом переизлучения фотонов, названная LSE.

Она использовалась для расчёта основных параметров счётчиков АШИФ, предложенных в Институте ядерной физики в 1992 году.

2. Разработан оригинальный метод измерения длины поглощения света в аэрогеле с использованием программы LSE.

Применение этого метода позволило освоить технологию производства аэрогеля с большой длиной поглощения, определяющей коэффициент светосбора в счётчиках с диффузным сбором света.

В настоящее время оптические параметры аэрогеля, производимого в Новосибирске, являются одними из лучших в мире. Он используется в детекторах СНД на ВЭПП-2000, КЕДР на ВЭПП-4М и AMS-02 на Международной космической станции.

3. Оптимизирована конструкция счётчиков АШИФ для детектора КЕДР на основе переизлучателя ВВQ и ФЭУ с микроканальными пластинами и мультищелочным фотокатодом.

Система состоит из 160 счётчиков, расположенных в два слоя, и содержит 1000 литров аэрогеля. Метод АШИФ позволил на порядок уменьшить суммарную площадь фотокатодов по сравнению с вариантом системы счётчиков с прямым светосбором.

В 2000 году проведено испытание торцевого счётчика на выведенном пучке в Дубне. Измеренное число фотоэлектронов согласуется с расчётным значением.

Разделение  $\pi$ - и  $K$ -мезонов при импульсе 1.2 ГэВ/с составляет  $4.5\sigma$ .

4. С 2013 года система счётчиков АШИФ работает в составе детектора КЕДР. Впервые определено качество идентификации двухслойной системы АШИФ.

С помощью космических мюонов найдена степень разделения  $\pi$ - и  $K$ -мезонов. При импульсе 1.2 ГэВ/с уровень разделения составляет  $4\sigma$ , что выше уровня разделения на время-пролётной системе детектора BES-III, на аэрогелевой системе детектора Belle и сравнимо с системой DIRC детектора BaBar.

5. С помощью программы LSE произведён расчёт светосбора счётчиков АШИФ для детектора СНД. На основании расчёта была оптимизирована конструкция системы счётчиков. В результате удалось создать счётчики с рекордно малой толщиной, необходимой для установки в детекторе. Система счётчиков АШИФ используется в экспериментах с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000 с 2009 года. В частности, с её помощью удалось провести прецизионное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  в области энергии от 1050 до 2000 МэВ.

В заключении хочу сердечно поблагодарить моего научного руководителя А. П. Онучина за многолетнюю поддержку и неиссякаемый энтузиазм. Особую признательность хочется выразить А. Г. Шамову, благодаря ему появилась адекватная программа моделирования; моим коллегам, участвовавшим в работах по созданию системы аэрогелевых счётчиков: Е. А. Кравченко, С. А. Кононову, В. С. Бобровникову, А. Ю. Барнякову, М. Ю. Барнякову и В. В. Гулевичу, а так же А. Ф. Данилюку за совместные работы по производству аэрогеля.

Отдельно хочу поблагодарить А. И. Воробьёва, К. Г. Черепанова и С. Ф. Ганжура за развитие методики аэрогелевых черенковских счётчиков в Институте.

Хочется выразить благодарность за работы по конструированию, производству прототипов, измерительных стендов и самих счётчиков: В. И. Микеро-

ву, Г. Д. Минакову, В. А. Родякину, А. С. Старостину, Г. А. Савинову, А. П. Харченкову, А. В. Таркову, М. В. Шмакову.

Я признателен всему коллективу КЕДРа и лаборатории 3-2 за поддержку при проведении экспериментов, особенно хочу выделить: К. Ю. Тодышева, А. М. Сухарева, Д. А. Максимова, А. Н. Грехова, О. Л. Резанову, И. В. Овтина.

Выражаю благодарность руководству в лице В. Е. Блинова и Ю. А. Тихонова за постоянный интерес и поддержку.

Также хочу поблагодарить В. И. Тельнова, В. А. Таюрского и М. Н. Ачарова за интерес, поддержку и полезные замечания.

И в завершении хочу выразить благодарность моей жене Анне за понимание, поддержку и терпение.

## Список литературы

1. Absolute calibration of particle energy at VEPP-4M / V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov, S. E. Karnaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2002. — Vol. A494. — P. 81 – 85.
2. Fast and precise beam energy monitor based on the Compton backscattering at the VEPP-4M collider / N. Yu. Muchnoi, S. A. Nikitin, V. N. Zhilich et al. // Conf. Proc. — 2006. — Vol. C060626. — P. 1181 – 1183.
3. Beam energy calibration in experiment on precise tau lepton mass measurement at VEPP-4M with KEDR detector / A. Bogomyagkov, V. E. Blinov, S. Karnaev et al. // Conf. Proc. — 2006. — Vol. C060626. — P. 625 – 627.
4. High-accuracy measurement of photon position in a liquid krypton calorimeter / V.M. Aulchenko, G.Ya. Kezerashvili, S.G. Klimenko et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1998. — Vol. 419, no. 23. — P. 602 – 608. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900298008754>.
5. Aulchenko, V. M. Detector KEDR tagging system for two photon physics / V. M. Aulchenko et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1996. — Vol. A379. — P. 360 – 362.
6. The Aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and phototubes / A. Onuchin, A. Shamov, Yu. Skovpen et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1992. — Vol. A315. — P. 517 – 520.
7. Test of aerogel counters for the KEDR detector / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2002. — Vol. A478, no. 1–2. — P. 353 – 356.
8. ASHIPH counters for the KEDR detector / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2002. — Vol. A494, no. 1–3. — P. 424 – 429.
9. Operation and performance of the ASHIPH counters at the KEDR detector / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. —

2016. — Vol. A824. — P. 79 – 82.
10. Aerogel Cherenkov Counters of the KEDR Detector / Ivan Ovtin, ..., A. R. Buzykaev, et al. // CERN Proceedings. — 2017. — Vol. 1, no. 0. — P. 187. — URL: <https://e-publishing.cern.ch/index.php/CP/article/view/349>.
  11. New precision measurement of the  $J/\psi$  and  $\psi$ -prime meson masses / V. M. Aulchenko, ..., A.R. Buzykaev et al. // Phys. Lett. — 2003. — Vol. B573. — P. 63–79.
  12. Final analysis of KEDR data on  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  masses / V. V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Phys. Lett. — 2015. — Vol. B749. — P. 50 – 56.
  13. Measurement of the tau lepton mass at the KEDR detector / V. V. Anashin, ..., A. R. Buzykaev et al. // JETP Lett. — 2007. — Vol. 85. — P. 347–352.
  14. Tau mass measurement at KEDR / A.G. Shamov, ..., A.R. Buzykaev et al. // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. — 2009. — Vol. 189. — P. 21 – 23. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563209001960>.
  15. Measurement of  $D^0$  and  $D^+$  meson masses with the KEDR detector / V.V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Physics Letters B. — 2010. — Vol. 686, no. 23. — P. 84 – 90. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269310002339>.
  16. Measurement of  $\psi(3770)$  parameters / V.V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Physics Letters B. — 2012. — Vol. 711, no. 34. — P. 292 – 300. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312004224>.
  17. Measurement of  $\Gamma_{ee} \times B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$  and  $\Gamma_{ee} \times B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$  / V.V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Physics Letters B. — 2010. — Vol. 685, no. 23. — P. 134 – 140. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269310001280>.

18. Measurement of main parameters of the  $\psi(2S)$  resonance / V. V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Phys. Lett. — 2012. — Vol. B711. — P. 280–291.
19. Study of  $\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$  Decay with KEDR Detector / V. M. Aulchenko, ..., A.R. Buzykaev et al. // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. — 2014. — Vol. 35. — P. 1460462.
20. Measurement of  $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$  decay rate and  $\eta_c$  parameters at KEDR / V. V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Phys. Lett. — 2014. — Vol. B738. — P. 391–396.
21. Measurement of  $R$  at KEDR / V.V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Nuclear and Particle Physics Proceedings. — 2015. — Vol. 260. — P. 85 – 86. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405601415000760>.
22. Measurement of  $R_{uds}$  and  $R$  between 3.12 and 3.72 GeV at the KEDR detector / V.V. Anashin, ..., A.R. Buzykaev et al. // Physics Letters B. — 2016. — Vol. 753. — P. 533 – 541. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269315010072>.
23. The TASSO gas and aerogel Cherenkov counters / H. Burkhardt, P. Koehler, R. Riethmuller et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1981. — Vol. 184, no. 2-3. — P. 319 – 331.
24. Development of aerogel Cherenkov counters for KEDR detector / A. I. Vorobiov, A. P. Onuchin, A. G. Shamov et al. // World Scientific. — 1990. — P. 208 – 213. — Proceedings of the 5th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk.
25. Abashian, A. The Belle detector / A. Abashian et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2002. — Vol. A479. — P. 117 – 232.
26. BaBar Collaboration. The BaBar detector / BaBar Collaboration // Nucl. Instr. and Meth. — 2002. — Vol. A479. — P. 1 – 116.
27. Four-layer aerogel Cherenkov counter / K. Arisaka, ..., A. R. Buzykaev et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. — 1998. — Vol. 225. — P. 375 – 380.

28. Aerogel Cherenkov counters for the KEDR detector / M. Yu. Barnyakov, V. S. Bobrovnikov, A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2000. — Vol. A453. — P. 326 – 330.
29. Aerogel Cherenkov Counter for the SND Detector / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Proceedings of the International Symposium On Detector Development For Particle, Astroparticle And Synchrotron Radiation Experiments (SNIC 2006). — Vol. C0604032. — 2006. — P. 0192.
30. High density aerogel for ASHIPH SND — test results / A.Yu. Barnyakov, ..., A.R. Buzykaev et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 598, no. 1. — P. 163 – 165. — Instrumentation for Colliding Beam Physics Proceedings of the 10th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900208012163>.
31. Development of threshold aerogel Cherenkov counters ASHIPH for the SND detector / K. I. Beloborodov, M. Y. Barnykov, A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2002. — Vol. 494, no. 1 - 3. — P. 487 – 490. — URL: <http://cds.cern.ch/record/773163>.
32. Hadronic cross sections measurement with the SND detector at VEPP-2000  $e^+e^-$  collider / M. N. Achasov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Physica Scripta. — 2015. — Vol. 2015, no. T166. — P. 014018. — URL: <http://stacks.iop.org/1402-4896/2015/i=T166/a=014018>.
33. Druzhinin, V. P. Measurement of hadron cross sections with the SND detector / V. P. Druzhinin, ..., The SND Collaboration // MESON 2016 14th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction. — Vol. 130, 05004. — 2016. — URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201613005004>.
34. Achasov, M. N. Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \mathbf{K}^+\mathbf{K}^-$  cross section in the energy range  $\sqrt{s} = 1.05 - 2.0$  GeV / M. N. Achasov et al. // Phys. Rev. — 2016. —

- Vol. D94, no. 11. — P. 112006.
35. Ландау, Л. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. — Наука, 1982. — URL: <https://books.google.ru/books?id=T90YnwEACAAJ>.
  36. Сапожников, Р. Теоретическая фотометрия / Р.А. Сапожников. — Энергия, 1977.
  37. Shamov, A. LCE, Light collection efficiency simulation tool / A.G. Shamov, A.R. Buzykaev // Proceedings, 9th International Conference on Computing in High-Energy Physics (CHEP 1997). — Berlin, 1997. — April. — URL: <http://www.ifh.de/CHEP97/paper/212.ps>.
  38. Shamov, A. OPAL, an open physical analysis language / A.G. Shamov // Proceedings, 9th International Conference on Computing in High-Energy Physics (CHEP 1997). — Berlin, 1997. — April. — URL: <http://www.ifh.de/CHEP97/paper/210.ps>.
  39. GEANT: Detector Description and Simulation Tool; Oct 1994 / Renè Brun, F Bruyant, Federico Carminati et al. CERN Program Library. — Geneva: CERN, 1993. — Long Writeup W5013. URL: <https://cds.cern.ch/record/1082634>.
  40. Джелли, Д. Черенковское излучение и его применение. / Дж. Джелли. — М.: Иностранная литература, 1960.
  41. Random Number Generator. — 1980. — URL: <http://cds.cern.ch/record/2050886>. CERN Program Library Short Writeups.
  42. CERN Program Library. — 2014. — URL: <http://cern.ch/cernlib> (online; accessed: 08.06.2017).
  43. Wikipedia. Флуоресценция. — 2016. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Флуоресценция> (дата обращения: 08.06.2017).
  44. Aerogels with high optical parameters for Cherenkov counters / A. Buzykaev, A. Danilyuk, S. Ganzhur et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1996. — Vol. 379,

- no. 3. — P. 465 – 467. — Proceedings of the Sixth International Conference on Instrumentation for Experiments at  $e^+e^-$  Colliders. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900296005712>.
45. Measurement of optical parameters of aerogel / A. R. Buzykaev, S. F. Ganzhur, E. A. Kravchenko et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1999. — Vol. A433. — P. 396–400.
46. Recent results on aerogel development for use in Cherenkov counters / A. F. Danilyuk, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2002. — Vol. A494. — P. 491–494.
47. Kistler, S. S. Coherent Expanded Aerogels and Jellies. / S. S. Kistler // Nature. — 1931. — May. — Vol. 127. — P. 741.
48. Демидович, Б. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. — М.: Наука, 1966.
49. Adachi, I. Study of a threshold Cherenkov counter based on silica aerogels with low refractive indices / I. Adachi et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1995. — Vol. A355. — P. 390–398.
50. R&D of microchannel plate phototubes / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2006. — Vol. A567, no. 1. — P. 17 – 20.
51. Investigation and development of microchannel plate phototubes / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2007. — Vol. A572, no. 1. — P. 404 – 407.
52. Photomultiplier tubes with three MCPs / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2009. — Vol. A598, no. 1. — P. 160 – 162.
53. Barnyakov, M. Yu.. Photocathode aging in MCP PMT / M. Yu. Barnyakov, A. V. Mironov // Journal of Instrumentation. — 2011. — Vol. 6. — P. C12026.
54. Measurement of the photoelectron collection efficiency in MCP PMT / A.Yu. Barnyakov, M.Yu. Barnyakov, D.A. Cygankov et al. // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12, no. 03. — P. P03027. — URL: <http://>

- [stacks.iop.org/1748-0221/12/i=03/a=P03027](http://stacks.iop.org/1748-0221/12/i=03/a=P03027).
55. Детектор КЕДР / В.В. Анашин, ..., А.Р. Бузыкаев et al. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2013. — Vol. 44. — P. 1263 – 1348. — URL: [http://www1.jinr.ru/Репан/2013-v44/v-44-4/02\\_an.pdf](http://www1.jinr.ru/Репан/2013-v44/v-44-4/02_an.pdf).
  56. The KEDR detector / V. V. Anashin, ..., A. R. Buzykaev et al. // Phys. Part. Nucl. — 2013. — Vol. 44. — P. 657–702.
  57. Project of aerogel Cherenkov counters for KEDR / A. Buzykaev, C. Cherepanov, A. Danilyuk et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 1996. — Vol. A379, no. 3. — P. 453 – 456.
  58. Aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and microchannel plate phototubes / A. R. Buzykaev, A. F. Danilyuk, S. F. Ganzhur et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. — 1998. — Vol. 225. — P. 381 – 384.
  59. The status of the KEDR ASHIPH system / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2004. — Vol. A518, no. 1 - 2. — P. 597 – 601.
  60. Ablikim, M. Design and construction of the BESIII detector / M. Ablikim et al. // Nucl. Instr. and Meth. — 2010. — Vol. A614. — P. 345–399.
  61. Schwiening, J. Performance of the BABAR-DIRC / J. Schwiening, for the BABAR-DIRC Collaboration // Nucl. Instr. and Meth. — 2005. — Vol. A553. — P. 317–322.
  62. Барняков, А. Ю. Измерение основных параметров системы черенковских счетчиков АШИФ детектора КЕДР: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Ин-т ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. — Новосибирск, 2015. — 107 с.
  63. G105: Inverse of Normal Frequency Function. — 1988. — URL: [http://baikalweb.jinr.ru/doc/cern\\_doc/asdoc/psdir/shortwrups.dir/g105.ps.gz](http://baikalweb.jinr.ru/doc/cern_doc/asdoc/psdir/shortwrups.dir/g105.ps.gz). CERN Program Library Short Writeups.
  64. ROOT a Data analysis Framework. — 2017. — URL: <http://root.cern.ch/>.

65. ROOT: Quantile Functions. — 2017. — URL: [https://root.cern/doc/master/group\\_\\_QuantFunc.html](https://root.cern/doc/master/group__QuantFunc.html).
66. Particle identification system based on dense aerogel for SND detector at VEPP-2000 collider / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Journal of Instrumentation. — 2014. — Vol. 9, no. 09. — P. C09023. — URL: <http://stacks.iop.org/1748-0221/9/i=09/a=C09023>.
67. Testing aerogel Cherenkov counters with  $n = 1.05$  using electrons and muons / A. Yu. Barnyakov, ..., A. R. Buzykaev et al. // Instrum. Exp. Tech. — 2015. — Vol. 58. — P. 30–35. — [Prib. Tekh. Eksp.2015,no.1,37(2015)].