

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Никулин Максим Александрович

Проект системы идентификации каонов
в детекторе КМД-2М

Квалификационная работа
на соискание степени бакалавра

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., снс

Федотович Геннадий Васильевич

Новосибирск

2001

Содержание

1	Введение	4
2	Обзор методов идентификации частиц	6
2.1	Сцинтилляционные времяпролетные счетчики	6
2.2	Пороговые черенковские счетчики	7
2.3	Другие виды черенковских счетчиков	8
2.4	Фотоприемники	9
3	Реакции рождения π и K-мезонов на ВЭПП-2000	11
4	Возможности КМД-2М по идентификации частиц	13
5	Общие замечания о конструкции системы идентификации	14
6	Методика моделирования	16
6.1	Программа LCE	16
6.2	Среда обработки данных ROOT	17
7	Времяпролетный счетчик	18
7.1	Конструкция	19
7.2	Оценки разрешения и предполагаемые характеристики	19
8	Система аэрогелевых черенковских счетчиков	20
8.1	Конструкция детектора	20
8.2	Моделирование и учет характеристик веществ	22
8.3	Результаты моделирования	24
9	Детектор временной зависимости	28
9.1	Конструкция детектора	28
9.2	Моделирование	28
9.3	Результаты моделирования	29
10	Сравнение детекторов и выводы	34
11	Заключение	35
A	Эффект Вавилова-Черенкова	39
B	Характеристики аэрогеля	40
C	Характеристики ВВQ	41

D Коэффициент отражения тефлона	42
E Показатель преломления кварца	43
F ФЭУ с МКП	44

1 Введение

В настоящее время в Институте ядерной физики ведутся работы по созданию ускорителя ВЭПП–2000, который сменит коллайдер ВЭПП–2М. В новой установке максимальная энергия в системе центра масс составит 2 ГэВ, и это позволит провести многие новые эксперименты. В частности, точное определение сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны даст возможность уточнить теоретическое предсказание аномального магнитного момента мюона. В Брукхейвенской национальной лаборатории в настоящее время проводится эксперимент по измерению этой величины, и сравнение полученных значений позволит проверить справедливость стандартной модели. Будут проводиться и другие исследования, такие как изучение векторных резонансов, редких мод их распада, а также поиск экзотических бескварковых состояний — глоболов.

Увеличение энергии пучков делает необходимым усовершенствование детекторов. Так в КМД-2 подвергнутся модернизации практически все системы: увеличится количество кристаллов в калориметре на основе CsI, изменится конструкция дрейфовой камеры, появится жидкоксеноновый калориметр. Этот проект получил название КМД–2М, а подробное его описание дано в препринте [1].

Практически любая установка в физике высоких энергий включает в себя систему идентификации, которая позволяет определять тип рождающихся частиц. Сложность такой системы зависит от диапазона энергий, в котором работает ускоритель, но, как правило, она использует данные с нескольких систем детектора. В КМД–2М для идентификации частиц служит дрейфовая камера, но ее возможностей недостаточно для надежного разделения π и K -мезонов с большими импульсами. Так, при анализе многочастичных событий будет возникать неопределенность, какие частицы образовались. Если в конечном состоянии будут одновременно π и K -мезоны, то невозможно будет достоверно установить соответствие между треками в дрейфовой камере и родившимися адронами. Это приведет к появлению комбинаторного фона, наличие которого будет снижать точность измерения сечений изучаемых процессов. Чтобы добиться однозначного определения типа рождающихся частиц, в проект детектора КМД–2М включена система идентификации, главная задача которой — разделение заряженных π и K -мезонов.

Далее в работе дан краткий обзор методов идентификации частиц, описаны некоторые существующие детекторы, затем приводятся примеры реакций, в которых в конечном состоянии присутствуют одновременно π и K -мезоны. Далее ставятся требования к системе идентификации и описываются методы, которые использовались при моделировании. Продолжает изложение рассмотрение тех

типов детекторов, которые могут быть применены в КМД–2М. Это сцинтилляционный времяпролетный счетчик, система аэрогелевых черенковских счетчиков и детектор временной зависимости (Cherenkov correlated timing) [2]. В приложениях приведены свойства материалов, которые учитывались при моделировании, и перечислены основные свойства черенковского излучения.

2 Обзор методов идентификации частиц

Для определения типа заряженных частиц в физике высоких энергий используются различные методики: измерение ионизационных потерь частицы, времени пролета определенного расстояния, а также такие эффекты как переходное излучение и излучение Вавилова-Черенкова. Системы идентификации, построенные на этих принципах, описаны в книгах К. Группена [3] и К. Клайнкнехта [4], там же проводится сравнительный анализ этих систем.

Определение ионизационных потерь требует большого количества измерений вдоль трека частицы, и в КМД-2М для этого служит дрейфовая камера. Детекторы переходного излучения применяются только в области сверхвысоких энергий и далее не рассматриваются.

2.1 Сцинтилляционные времяпролетные счетчики

Прецизионное измерение времени пролета определенного расстояния дает возможность по скорости и импульсу, измеренному в дрейфовой камере, определить массу частицы. Различные методы измерения времени пролета описываются в статье [5].

В последнее время ведутся активные исследования счетчиков на основе RPC (камер с параллельными пластинами) — газовых детекторов, работающих в лавинном режиме. К сожалению, их временное разрешение составляет 0,2–0,3 нс, что позволяет применять их только в пробегных системах. Другая разновидность газовых детекторов — счетчики Пестова. В них может быть достигнуто временное разрешение лучше 0,05 нс, но они работают при высоком давлении, что приводит к достаточно большому количеству пассивного вещества в системе и, тем самым, ухудшает энергетическое разрешение калориметра.

Для измерения времени пролета часто применяются счетчики на основе органических сцинтилляторов. Их можно найти не только в ускорительных экспериментах, но и в детекторах космических лучей.

На установке по изучению космических лучей BESS установлены времяпролетные счетчики, на которых достигнута точность измерения времени 0,05 нс [6]. В ней использовались пластины сцинтиллятора Bicron BC-404 (фронт 0,7 нс, время высвечивания — 1,8 нс) длиной 950 мм и толщиной 20 мм. Свет собирается с помощью световодов на сеточные фотоумножители с фотокатодом, имеющим диаметр 52 мм, которые работают в магнитном поле 1 Тл.

Временного разрешения 0,1 нс добились в детекторе Belle [7, 8]. Система измерения времени пролета в нем состоит из 128 счетчиков, изготовленных из сцинтиллятора Bicron BC-408 толщиной 40 мм и длиной 2250 мм. В связи с тем, что система работает в магнитном поле напряженностью 1,5 Тл, в ней использу-

ются 24-диодные сеточные фотоумножители с диаметром фотокатода 39 мм.

2.2 Пороговые черенковские счетчики

Еще один распространенный тип систем идентификации — это черенковские счетчики. Различают пороговые счетчики, которые срабатывают только от более легких частиц, и дифференциальные, использующие разницу угла излучения черенковского света.

В пороговых счетчиках не требуется определение направлений, в которых излучаются фотоны, поэтому они имеют более простую конструкцию. При импульсах в несколько сот мегаэлектрон-вольт аэрогель (синтезируемый при высоких температурах пористый кварц) — это практически единственный материал, который подходит для пороговых счетчиков. Аэрогель имеет малую длину рассеяния света, что создает трудности при попытке получить высокий коэффициент светосбора на фотоприемник, несмотря на это, он получил широкое распространение.

В упоминавшейся выше установке BESS, система идентификации включает и аэрогелевый черенковский счетчик [9]. Он представляет собой контейнер размером $1032 \times 1022 \times 200$ мм³, стенки которого покрыты изнутри отражающим материалом. Аэрогель с показателем преломления 1,03 заполняет только часть короба по толщине (80 мм). Свет собирается на 48 сеточных фотоумножителей расположенных на двух сторонах контейнера.

Более тысячи пороговых счетчиков включает в себя система идентификации детектора Belle [10, 7, 8]. Чтобы обеспечить высокий коэффициент светосбора, каждый блок аэрогеля размерами около $100 \times 100 \times 100$ мм³ просматривается одним или двумя фотоумножителями. Следствием этого является высокая стоимость детектора. Кроме того, такая система не может быть применена там, где требуется компактная конструкция.

Свободные от вышеперечисленных недостатков счетчики были разработаны для детектора КЕДР. Методика, обеспечивающая компактность конструкции и не требующая огромного количества фотоумножителей, описана в работах [11, 12, 13]. Высокий коэффициент светосбора достигается тем, что черенковские фотоны в таком счетчике собираются не на фотокатод ФЭУ, а на сместитель спектра (шифтер), где фотоны поглощаются и переизлучаются, но уже с большей длиной волны. Часть из них попадает в условия полного внутреннего отражения и достигает фотоумножителя. Каждый счетчик помещается в контейнер, стенки которого покрыты хорошо отражающим свет материалом (тефлоном). Благодаря применению переизлучателя, количество фотоприемников можно значительно уменьшить. Дополнительный выигрыш дает согла-

сование спектра излучения шифтера и зависимости квантовой эффективности фотокатода от длины волны. Этот метод получил название АШИФ — аэрогель, шифтер, фотоумножитель. В детекторе КЕДР использовались аэрогель с показателем преломления 1,03, синтезированный в Институте катализа СО РАН и ФЭУ с микроканальными пластинами, которые могут работать в магнитном поле. Среди переизлучателей был выбран ВВQ, так как его эмиссионный спектр имеет максимум при длине волны 500 нм.

Программа модернизации детектора СНД включает создание системы аэрогелевых черенковских счетчиков [14], изготовленных по методу АШИФ. Она будет состоять из 9 блоков, имеющих форму секторов полого цилиндра. Размеры радиатора, изготовленного из аэрогеля с показателем преломления $n = 1,13$, будут следующие: внутренний радиус счетчика — 105 мм, толщина — 28, а длина — 248. Малые геометрические размеры каждого счетчика позволяют надеяться, что сигнал от минимально ионизирующей частицы составит около 10 фотоэлектронов.

2.3 Другие виды черенковских счетчиков

Чтобы измерять черенковский угол для частиц, вылетающих с разными направлениями, в детекторе ВаgВаg используется метод DIRC [15]. За дрейфовой камерой располагаются кварцевые пластины, которые одновременно играют роли и радиатора, и световода. Попавшие в условия полного внутреннего отражения фотоны достигают объема, находящегося за пределами других систем детектора, где расположены фотоумножители. По координатам сработавших фотодетекторов определяется радиус черенковского кольца, а затем и скорость частицы.

Детекторы DIRC сложны и громоздки, поэтому было предложено несколько методик, не обладающих этими недостатками. Они не требуют сложной системы фотоумножителей, но регистрируют время прихода фотонов с высокой точностью.

Для детектора Belle был разработан счетчик TOP (time-of-propagation), в котором используются позиционно чувствительные фотоумножители. Описание этого детектора можно найти в статьях [16, 17]. Он тоже состоит из кварцевых пластин, расположенных вдоль образующих цилиндра, но имеет более простую систему для определения черенковского угла. На конце пластины расположена фокусирующая система, собирающая свет на позиционно чувствительные многоанодные фотоумножители. Эта конструкция позволяет определить проекцию направления фотона на касательную к цилиндру плоскость и время регистрации фотона. На основе этих измерений вычисляется скорость частицы и

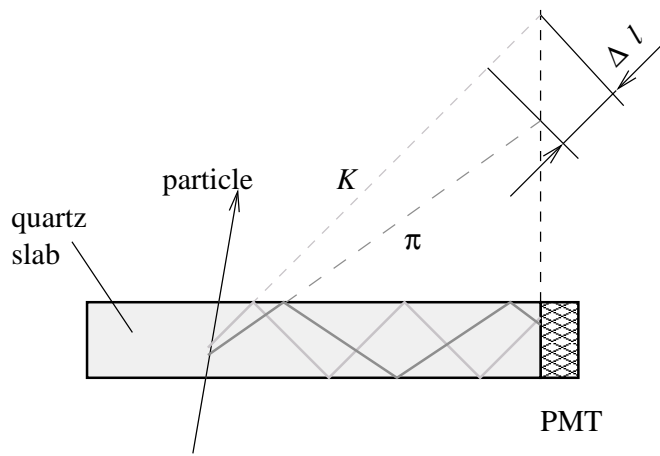


Рис. 1. Принцип работы детектора временной зависимости

ее масса. Такой детектор компактнее DIRC, но, тем не менее, для размещения фокусирующей системы требуется место.

Еще более простой выглядит конструкция детектора временной зависимости [2] — в нем измеряется только время регистрации фотонов. Принцип его работы поясняется на рис. 1. Частица пересекает кварцевую пластину, излучая черенковские фотоны. С помощью дрейфовой камеры определяется импульс частицы, место, где она прошла, и угол, под которым она пересекла пластину. Черенковский угол зависит от скорости частицы, а угол между осью пластины и направлением фотона связан с временем, за которое фотон достигнет фотомножителя. Воспользовавшись этим, можно вычислить скорость частицы, а добавив информацию об импульсе, и ее массу.

Результаты испытаний такого счетчика на пучке π -мезонов с импульсом 1,5 ГэВ/с представлены в работе [18]. При измерениях использовалась пластина толщиной 20 мм. Минимальное число фотоэлектронов в событии было около 60 (эквивалентное число фотоэлектронов, которое частица испускает с 1 см составило 136). При тестировании на пучке точность определения черенковского угла составила 15 мрад.

2.4 Фотоприемники

Далеко не все типы фотоприемников могут работать в сильных магнитных полях. У традиционных фотомножителей под действием магнитного поля значительно снижается коэффициент усиления, поэтому во многих детекторах используют сеточные ФЭУ с увеличенным количеством динодов [6, 7, 10, 8]. ФЭУ с микроканальными пластинами обладают не очень хорошей температурной стабильностью, но при этом они также могут работать в сильном магнитном поле,

поэтому они используются в детекторе КЕДР [13, 11]. В статье [12] приводятся некоторые характеристики таких фотоумножителей, в частности, представлены результаты исследования влияния магнитного поля на коэффициент усиления.

Большинство полупроводниковых фотодетекторов не обладает достаточным для регистрации одиночных фотонов коэффициентом усиления. В Объединенном институте ядерных исследований в Дубне для черенковских счетчиков разрабатываются лавинные фотодиоды, чувствительные в ультрафиолетовой части спектра [19]. Они обладают квантовой эффективностью около 60%, ограничивает их применение только высокий уровень шума при комнатной температуре.

3 Реакции рождения π и K -мезонов на ВЭПП-2000

Как уже упоминалось, при электрон-позитронной аннигиляции в многоадронные состояния могут возникнуть проблемы с идентификацией частиц, которые проявятся в невозможности определить тип родившихся частиц и установить соответствие между типом мезона и треком в дрейфовой камере. Это связано с тем, что конечные частицы имеют импульсные распределения, которые в значительной мере перекрываются между собой. Если импульсы адронов достаточно большие, то измерение ионизационных потерь в дрейфовой камере не позволит определить тип родившихся частиц. Ниже, в качестве примера, приведены некоторые реакции, в которых возможна неоднозначная идентификация π и K -мезонов. Они были выбраны на основе данных PDG [20].

Рассмотрим процессы, у которых в конечном состоянии имеется 3 частицы. Векторный мезон $\varphi(1680)$ с наибольшей вероятностью распадается в канале

$$\varphi(1680) \rightarrow K\bar{K}^* + \text{к.с.}$$

и далее

$$K^{*\pm} \rightarrow K^\pm\pi^0.$$

В итоге в конечном состоянии присутствуют две заряженных частицы и одна нейтральная:

$$e^+e^- \rightarrow \varphi(1680) \rightarrow K^+K^-\pi^0. \quad (1)$$

Один из родившихся каонов монохроматичный, его импульс равен 460 МэВ/с, а другой может иметь импульс до 622 МэВ/с, то есть в некоторых случаях дрейфовая камера не сможет идентифицировать обе заряженных частицы, а значит этот процесс неотличим от

$$\omega(1650) \rightarrow \rho^+\pi^- \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^-,$$

в котором импульсы будут следующими: у π^- — 637 МэВ/с, а у оставшихся пионов от -47 до 784 МэВ/с, то есть измерение ионизационных потерь также не позволит определить тип образовавшихся частиц. Дополнительный фон при исследовании реакции (1) будет давать нерезонансный процесс

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0.$$

Среди реакций с 4 частицами в конечном состоянии можно отметить следующие группы:

$$\begin{aligned} e^+e^- &\rightarrow \varphi(1680) \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^- \rightarrow \pi^+ \pi^- K^+ \pi^-, \\ &\rightarrow \rho(1700) \rightarrow \rho^0 \pi^+ \pi^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-, \\ &\rightarrow \omega(1700) \rightarrow \omega \pi^+ \pi^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-, \end{aligned}$$

или с участием нейтральных частиц:

$$\begin{aligned} e^+e^- &\rightarrow \varphi(1680) \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^- \rightarrow \pi^0 \pi^0 K^+ \pi^-, \\ &\rightarrow \rho(1700) \rightarrow \rho^+ \pi^- \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^- \pi^0, \\ &\rightarrow \omega(1700) \rightarrow \omega \pi^+ \pi^- \rightarrow \pi^0 \gamma \pi^+ \pi^-. \end{aligned}$$

Таким образом, из анализа трехчастичных состояний видно, что система идентификации должна надежно разделять π и K -мезоны при импульсах примерно до 650 МэВ/с.

4 Возможности КМД–2М по идентификации частиц

Из всех систем детектора только дрейфовая камера способна в некоторых пределах разделять заряженные π и K -мезоны. Мюоны можно будет выделять с помощью пробежной системы, поскольку другие частицы вообще не будут ее достигать. Сцинтилляционные калориметры использовать для идентификации не удастся. Измерение энергетических потерь жидкоксеноновым калориметром частично облегчит разделение частиц, также некоторую информацию, вероятно, можно извлечь из формы ядерных ливней. К сожалению, возможности калориметра по идентификации пионов и каонов изучены еще очень слабо.

В проект дрейфовой камеры заложено, что по измерению dE/dx можно будет разделять частицы вплоть до импульсов 450 МэВ/с. Процессы, в которых рождается только пара пионов или каонов, различаются импульсом конечных частиц. Запланированное импульсное разрешение дрейфовой камеры позволит идентифицировать π и K -мезоны в таких событиях, но, в том случае, если магнитное поле в детекторе будет меньше проектного, или хуже окажется координатное разрешение дрейфовой камеры, система идентификации частиц должна будет обеспечивать определение типа частиц и в коллинеарных событиях.

Необходимо, чтобы область импульсов, в которой должна работать система идентификации, частично перекрывалась с диапазоном, где разделение частиц обеспечивает дрейфовая камера, и охватывала импульсы адронов во всех многочастичных реакциях, где могут рождаться каоны, то есть соответствовала интервалу от 400 до 650 МэВ/с.

5 Общие замечания

о конструкции системы идентификации

Существует несколько внешних факторов, которые должны быть учтены при разработке проекта системы идентификации. Поскольку она появится в детекторе не сразу, а должна сменить Z-камеру после калибровки жидкоксеронового калориметра, размеры системы идентификации жестко ограничены. Она должна иметь форму цилиндра длиной не более 900 мм, радиус которого примерно равен 300 мм, а ее толщина не может превышать 25 мм (рис. 2).

Система будет расположена внутри сверхпроводящего соленоида, поэтому должна работать в магнитном поле 1,5 Тл. Это не оставляет возможности выбора фотодетектора, так как существует всего один вариант — ФЭУ с МКП. Сеточные фотоумножители не удастся применить из-за их высокой стоимости. В настоящее время в АООТ «Катод» изготавливаются ФЭУ с мультищелочным фотокатодом диаметром 18 мм, максимальная квантовая эффективность которых равна 25 %. Параметры любой из описанных ниже систем можно существенно улучшить, если применить фотоумножители с полупроводниковыми фотокатодами из AsGa, которые находятся в стадии разработки. У них диаметр чувствительной области фотокатода будет равен 25 мм, а квантовая эффективность — 45 %.

Также следует обратить внимание на применяемые материалы, чтобы добиться минимального количества вещества в конструкции. Это позволит сократить вероятность начала развития электромагнитного ливня, и, таким образом, в минимальной степени ухудшит энергетическое разрешение калориметров.

Система идентификации также должна быть включена в первичный триггер, чтобы заменить функции Z-камеры. Для этого в случае черенковских счетчиков возможно добавление сцинтилляционных пластин толщиной порядка 5 мм. В дальнейшем система сцинтилляционных счетчиков не рассматривается, по-

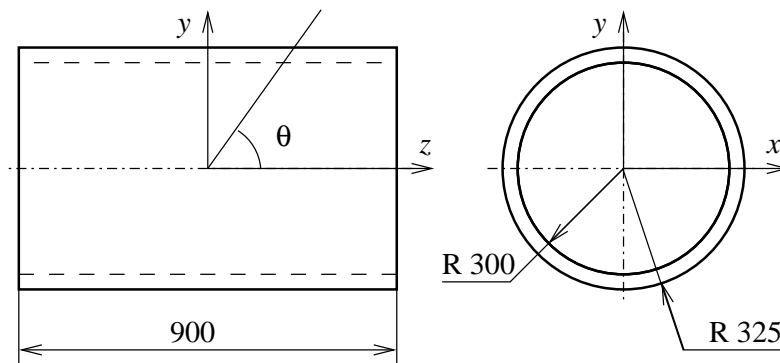


Рис. 2. Размеры системы идентификации

сколько каких-либо специальных требований к ней нет.

Для описания детектора удобно ввести систему координат, начало которой совпадает с центром цилиндра, а ось z направлена вдоль оси пучков (рис. 2). Азимутальный угол θ отсчитывается от этой оси. В дальнейшем эти обозначения будут неоднократно встречаться.

6 Методика моделирования

Большая часть работы по моделированию черенковских счетчиков была проделана с помощью программы LCE (Light Collection Efficiency), разработанной в ИЯФ А. Г. Шамовым и А. Р. Бузыкаевым. Ее возможности перечислены в [21]. Полученные с помощью программы LCE гистограммы затем обрабатывались в среде ROOT [22], предоставляющей мощные средства обработки и визуализации.

При моделировании также применялся язык C++, на нем были написаны дополнительные модули для ROOT и отдельные программы, использующие библиотеки этой среды. Сочетание компилятора C++ (egcs [23]), интерпретатора и библиотек ROOT позволяет максимально использовать возможности этой среды.

6.1 Программа LCE

Программа LCE [21, 24] успешно применяется при моделировании черенковских счетчиков детектора КЕДР, поэтому было решено ее использовать и при разработке системы идентификации для КМД–2М. Ниже описываются некоторые этапы работы с программой.

Геометрия детектора и свойства материалов описываются на специализированной версии языка OPAL (Open Physical Analysis Language), также разработанного в ИЯФ.

Для того чтобы задать размеры и форму частей детектора, необходимо с помощью поверхностей второго порядка указать границы блоков. Явно описывая «окна» в стенках блоков, можно дать возможность фотонам переходить из одного блока в другой. Операции поворота, отражения в плоскости и копирования заметно упрощают описание конструкции детектора.

Оптические свойства материала блока и его покрытия задаются с помощью констант, функций и сплайнов, построенных на основе табличных данных. Покрытие характеризуется законом отражения, коэффициентом поглощения и наличием оптического контакта с блоком. Для каждой части детектора можно задать такие оптические характеристики как показатель преломления, длина поглощения, а также длина рассеяния света.

Наряду со стандартными процедурами, например, отражением света по закону Френеля, можно воспользоваться данными, полученными из эксперимента или взятыми из таблиц. Такой подход позволяет сделать реалистичным описание детектора.

Регистрация фотона может происходить на какой-либо из стенок или в веществе детектора, для этого надо задать соответствующую процедуру при описа-

нии блока или его границы. Чувствительным элементом не обязательно должен быть фотоумножитель, с помощью специальной функции можно учесть свойства, например, комбинации фотоприемника и сместителя спектра. Так может быть сокращено время, которое требуется для моделирования.

Для того чтобы начать моделирование, необходимо также указать размеры и координаты области, из которой будут излучаться фотоны. Направление черенковского фотона определяется автоматически по скорости частицы и ее направлению, но, в то же время, чтобы получить корректное распределение фотонов по длинам волн, необходимо добавлять отдельную функцию. К сожалению, невозможно задать произвольно направленный трек частицы, так как источник частиц задается в виде параллелепипеда, стороны которого направлены вдоль осей координат.

Интересующие параметры детектора могут быть получены из гистограмм, для них должны быть заданы этап моделирования фотона (начало или окончание), на котором производится заполнение гистограммы, и условие (регистрация или поглощение). По результатам моделирования всех фотонов собирается статистика, в которую входит коэффициент светосбора, число поглощенных фотонов и некоторые другие величины.

Моделирование детекторов проводилось при различных значениях параметров, которые определяли либо конструкцию детектора, например, количество секторов в системе аэрогелевых счетчиков, либо характеристики частиц (импульс, направление вылета). Для каждого набора параметров записывались гистограммы. Такие величины, как коэффициент светосбора, сохранялись в текстовом файле, из которого с помощью утилиты `awk` создавались итоговые таблицы.

6.2 Среда обработки данных ROOT

В среде ROOT окончательно обрабатывались гистограммы, полученные с помощью LSE. Она служила для вспомогательных, но, тем не менее, важных задач. Представление гистограмм в виде объектов облегчает определение различных характеристик распределений.

С помощью ROOT также были построены все графики, приведенные в этой работе.

7 Времяпролетный счетчик

Применение времяпролетного счетчика в детекторе КМД-2М связано с некоторыми трудностями. Разделение частиц осложняется малым расстоянием до места встречи. Решающим фактором в этих условиях является получение предельного временного разрешения, что непосредственно следует из следующих расчетов.

В магнитном поле частицы движутся по спирали, ее радиус $R_{\text{Л}}$ определяется магнитным полем B

$$R_{\text{Л}} = \frac{p \sin \theta}{3B},$$

где B выражено в тесла, p в мегаэлектрон-вольтах, а $R_{\text{Л}}$ — в сантиметрах. Если $r_{\text{д}}$ — радиус детектора, то частица пролетит до него расстояние

$$l = \sqrt{r_{\text{д}}^2 \operatorname{ctg}^2 \theta + \left(2R_{\text{Л}} \arcsin \frac{r_{\text{д}}}{2R_{\text{Л}}}\right)^2}.$$

В свою очередь, для времени пролета t выражение имеет вид:

$$t = \frac{l}{\beta c}.$$

Для счетчика радиусом 30 см время пролета для π и K -мезонов различается очень слабо, что видно из рис 3. Максимально возможному импульсу пионов соответствует разница в 0,15 нс, следовательно, чтобы получить разделение частиц на уровне трех стандартных отклонений, необходимо добиться временного разрешения 0,05 нс, а такие характеристики времяпролетных счетчиков в настоящее время являются уникальными.

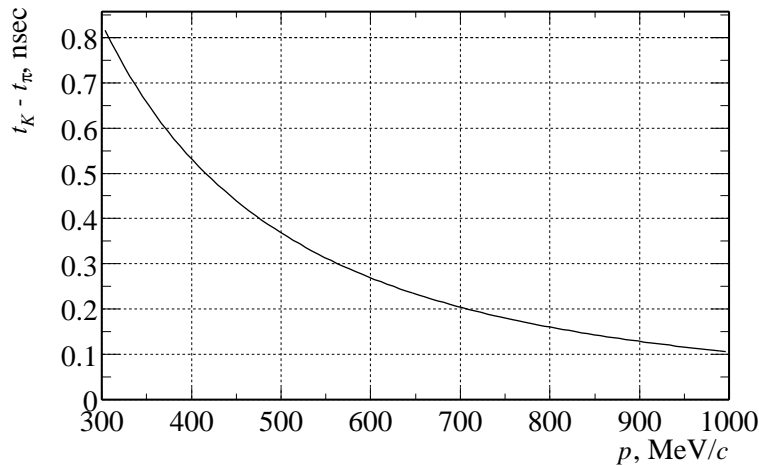


Рис. 3. Зависимость разницы времени пролета π и K -мезонов в зависимости от импульса

7.1 Конструкция

Размеры системы не допускают применения какого-либо оригинального варианта конструкции, поэтому она стандартна для детекторов на встречных пучках. Далее рассматривается проект, в котором система состоит из 32 пластин органического сцинтиллятора размером $800 \times 58 \times 20$ мм³, расположенных вдоль образующих цилиндра.

Количество вещества в таком счетчике соответствует примерно 4,8 % радиационной длины, а его стоимость определяется, главным образом, ценой 64 фотоумножителей.

7.2 Оценки разрешения и предполагаемые характеристики

Минимально ионизирующая частица, проходя сквозь пластину вдоль нормали, будет терять энергию около 4 МэВ. Для органических сцинтилляторов типичный световыход составляет 10 фотонов/кэВ, то есть от частицы излучится 40000 фотонов. Найдем, какому числу фотоэлектронов это будет соответствовать. 25 % фотонов попадут в условия полного внутреннего отражения. Далее необходимо учесть ослабление света при распространении, соответствующий коэффициент равен $e^{-0,5/2} = 0,78$. Площадь фотокатода ФЭУ с МКП меньше поперечного сечения пластины сцинтиллятора, а значит это приведет к дополнительным потерям света. Отношение площадей равно $\pi \cdot 18,5^2 / (4 \cdot 20 \cdot 60) = 0,22$. Применением световодов специально подобранной формы можно добиться увеличения светосбора в 1,5 раза, но в соединениях сцинтиллятор — световод и световод — ФЭУ будет теряться еще по 10 % света в каждом. Также необходимо учесть, что квантовая эффективность фотокатода примерно равна 0,2. Подведем итог, можно сказать, что сигнал на одном фотоумножителе будет соответствовать 420 фотоэлектронам. Принимая во внимание, что время высвечивания сцинтиллятора чуть меньше $\tau = 3$ нс, а также то, что измерение ведется двумя фотоумножителями, получим $\sigma_t = \tau / \sqrt{N_{\text{ФЭ}}} = 0,1$ нс, чего явно недостаточно для идентификации при больших импульсах.

Если применить ФЭУ с полупроводниковым фотокатодом большой площади, то за счет увеличения светосбора и большей квантовой эффективности можно улучшить временное разрешение в два раза. При максимальных импульсах это будет соответствовать разнице времени пролета 3σ .

В дальнейшем предполагается провести моделирование времяпролетного счетчика с целью выяснения возможности разделения частиц в одной из рассмотренных реакций.

8 Система аэрогелевых черенковских счетчиков

8.1 Конструкция детектора

Верхний предел импульсов каонов, которые будут рождаться на ВЭПП–2000, равен 870 МэВ/с. Исходя из этого, можно сказать, что у материала радиатора показатель преломления должен быть равен 1,15, но подобрать вещество с таким n затруднительно. У жидкого азота $n = 1,22$, что соответствует пороговому импульсу каонов 710 МэВ/с. Это несколько ниже максимально возможного импульса частиц при энергии пучка 1 ГэВ, но достаточно близко к нему, и позволяет идентифицировать адроны в реакциях множественного рождения частиц. Ограничивает применение азота достаточно большой уровень сцинтилляций, кроме того, для него неизвестна длина ослабления света. Исходя из этого было решено отказаться от моделирования счетчика на основе жидкого азота.

Распространенным материалом для пороговых счетчиков является аэрогель, но синтезировать удастся вещество с показателем преломления не более 1,05. Однако, под воздействием высокой температуры его плотность можно увеличивать, что позволяет добиться $n = 1,13$. Этот «плотный» аэрогель уже хорошо подходит для создания счетчика. На рис. 4 приведено относительное количество черенковских фотонов, по сравнению с максимальным (при $\beta = 1$) для π и K -мезонов в аэрогеле и жидком азоте. Количество фотонов, испускаемое пионом в аэрогеле ($n = 1,13$) с 1 см трека, представлено на рис. 5. При уменьшении импульса пионов с 850 МэВ/с до 400 МэВ/с количество черенковских фотонов

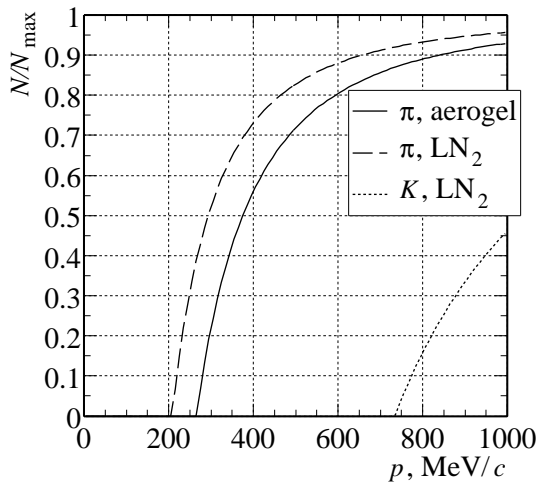


Рис. 4. Относительное количество черенковских фотонов в зависимости от импульса частицы

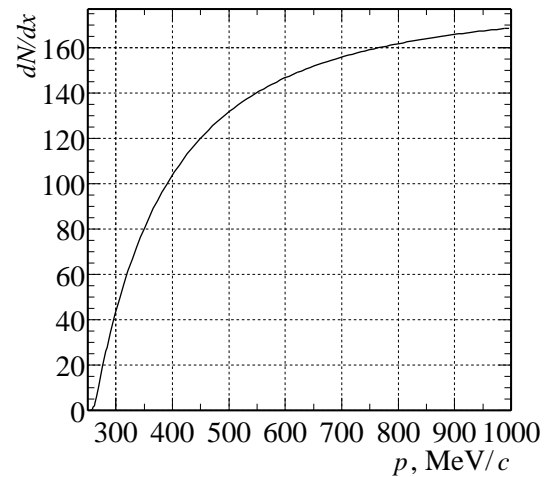


Рис. 5. Число фотонов, излучаемых пионами в аэрогеле с 1 см в диапазоне длин волн 250–450 нм

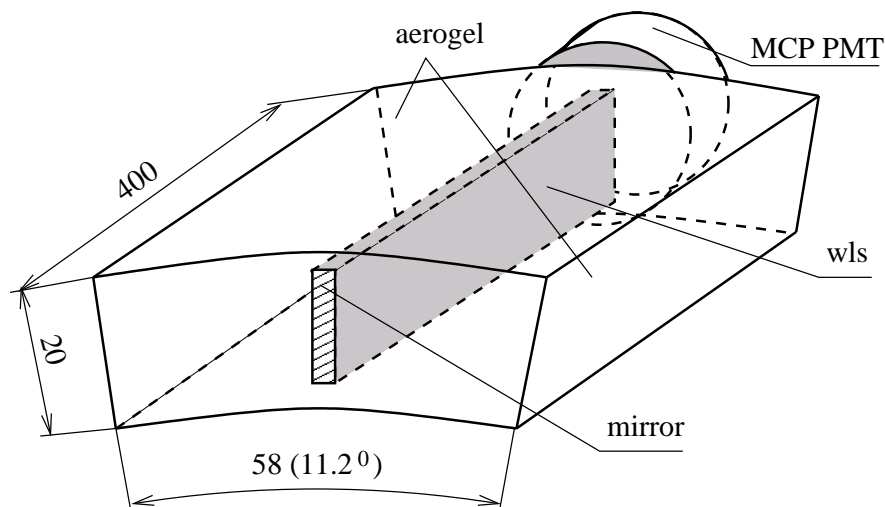


Рис. 6. Сектор аэрогелевого счетчика

сократится на 40 %, следовательно их еще можно будет отделять от каонов, а значит не будет промежутка между областями надежной идентификации порогового счетчика и дрейфовой камеры.

Размеры системы идентификации позволяют для пороговых счетчиков применять только метод АШИФ, описанный на стр. 8. Предлагаемая система счетчиков должна состоять из 64 секторов. Отведенное для нее место делится на 32 части по углу φ и на 2 части по длине. Деление по z связано с тем, что изготовить пластины переизлучателя длиной около метра затруднительно, выгоднее сделать их вдвое короче, но с зеркалом на одном конце. Увеличение гранулярности делением детектора в r - φ плоскости повышает коэффициент светосбора, но сопровождается уменьшением эффективности идентификации, поскольку частицы, пересекающие переизлучатель, дают вспышку сцинтилляционного света, что делает невозможным определение их типа. Оптимальное число секторов было определено при моделировании. Предлагаемая конструкция счетчика представлена на рис. 6. На нем не показан тефлон — хорошо отражающий свет материал, которым будет обернут каждый счетчик.

КМД-2М — это магнитный детектор, и треки заряженных частиц в нем будут изгибаться. Вследствие этого, при увеличении ширины пластин переизлучателя возрастает вероятность попадания частицы в шифтер, и уменьшается эффективность идентификации. Таким образом, необходимо найти компромисс между увеличением светосбора и уменьшением неэффективности.

Оценка количества вещества в системе идентификации, выраженного в единицах радиационной длины, приведена в таблице 1, а в таблице 2 дана ее примерная стоимость.

8.2 Моделирование и учет характеристик веществ

При моделировании аэрогеля необходимо учесть зависимость от длины волны показателя преломления, длины рассеяния и длины поглощения света в веществе (см. приложение В). Данные о показателе преломления и длине рассеяния еще не опубликованы, и были предоставлены Е. А. Кравченко и А. Р. Бузыкаевым.

Показатель преломления аэрогеля n_A известен только при одной длине волны λ_0 , но химические составы у кварца и аэрогеля совпадают. Для кварца зависимость показателя преломления $n_K(\lambda)$ от длины волны можно найти в справочнике [25] (см. также приложение Е). Предполагая, что показатель преломления аэрогеля отличается от $n_K(\lambda)$ постоянным множителем, можно получить

$$n_A(\lambda) = n_K(\lambda) \frac{n_A(\lambda_0)}{n_K(\lambda_0)}. \quad (2)$$

Важным процессом в аэрогеле является рассеяние света, характеризуется оно длиной рассеяния, которая растет пропорционально четвертой степени длины волны, поэтому для моделирования достаточно одного значения длины рассеяния при некоторой длине волны.

К сожалению, длина поглощения света в «плотном» аэрогеле еще не измерена, поэтому применялся следующий способ ее оценки. В работах [11] и [12]

Таблица 1. Количество материала в системе идентификации на основе аэрогелевых счетчиков

Материал	X_0 , см	толщина, см	% X_0
Аэрогель	44,0	$2,0 \times 0,94 = 1,88$	4,3
Тефлон	15,8	$0,08 + 2,0 \times 0,013 = 0,11$	0,9
СТЭФ	19,4	0,20	1,0
Переизлучатель	34,4	$2,0 \times 0,049 = 0,10$	0,3
Сумма			6,5

Таблица 2. Стоимость системы идентификации на основе аэрогелевых счетчиков

Материал	Цена, \$	Количество	Стоимость, \$
Аэрогель	160 л^{-1}	36 л	5 800
ФЭУ с МКП	300 шт^{-1}	64 шт	19 200
Тефлон, ВВQ, электроника			3 000
Итого			28 000

приведены соответствующие графики для аэрогеля с показателем преломления $n = 1,05$. Считая, что длина поглощения убывает обратно пропорционально величине $n - 1$, можно определить зависимость для «плотного» аэрогеля. Реально длина поглощения может оказаться несколько больше, чем данная оценка, вследствие того, что при спекании может сократиться количество примесей.

Тефлон препятствует выходу фотонов за пределы счетчика, и при моделировании следует учесть, какая часть света поглощается при отражении. Зависимость этой величины от длины волны (приложение D) была взята из работы [13].

Для описания свойств переизлучателя удобно ввести вероятность конверсии фотона в фотоэлектрон (приложение C), так как эта величина может быть измерена экспериментально. В случае длинной пластины появляется зависимость от расстояния до фотоумножителя, которая приведена в статье [11]. Дополнительно необходимо учесть зависимость вероятности переизлучения от длины волны падающего фотона. Эти данные были предоставлены А. Р. Бузыкаевым, опубликованы они в работе [12]. На торце пластины переизлучателя, противоположной фотоумножителю, должно быть отражающее покрытие. Наилучший материал для него — тефлон, но в этом случае зависимость между вероятностью конверсии и координатой падающего фотона сложная, и требуется ее измерение при нужной длине пластины, поэтому моделирование проводилось в предположении, что отражение зеркальное с фиксированным коэффициентом отражения, равным 0,9.

Упомянутые выше свойства веществ были включены в описание детектора, который состоял из двух блоков: аэрогелевого радиатора и пластины переизлучателя. Для блока аэрогеля кроме его собственных оптических свойств задавалась «обертка» из тефлона, то есть покрытие без оптического контакта. Свет, который попадал в переизлучатель, считался зарегистрированным, но далеко не все фотоны приводят к появлению фотоэлектрона. Чтобы это учесть у фотона с учетом свойств переизлучателя устанавливался соответствующий статистический вес, определяющийся длиной волны фотона и расстоянием до фотоприемника.

Чтобы определить возможность использования системы аэрогелевых счетчиков, необходимо знать минимальное количество фотоэлектронов от одной частицы. Кроме того, знание максимального и среднего количества фотоэлектронов тоже представляет интерес. Исходя из этого проводилось моделирование как для фотонов, которые излучались по всему сечению детектора, так и для точечных источников черенковского света, расположение которых показано на рис. 7. Отдельно выделялась зависимость от расстояния до фотоумножителя, то есть от продольной координаты z .

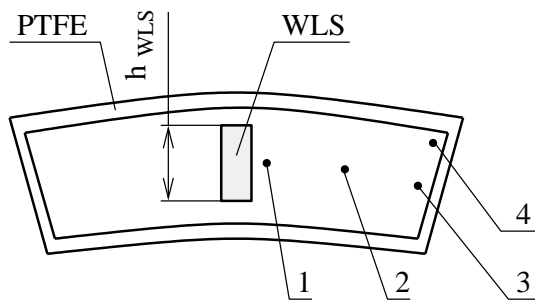


Рис. 7. Нумерация точек, для которых проводилось моделирование

И последнее замечание, моделирование проводилось для пионов с импульсом 850 МэВ/с. Это практически максимальный импульс, достижимый на ВЭПП-2000 при энергии пучков 1000 МэВ. Количество фотонов при другом импульсе может быть легко найдено из соотношения (А.2). Наглядно эта зависимость представлена на рис. 4 и 5. В счетчике подобной конструкции, из-за очень сильного рассеяния, коэффициент светосбора крайне слабо зависит от черенковского угла, поэтому результатов, полученных при одном значении импульса, вполне достаточно.

Несмотря на жесткие рамки требований, в конструкции все же существует несколько параметров, которые можно варьировать. Прежде всего, необходимо определить оптимальное количество секторов. Как уже упоминалось, уменьшение размера блока приводит к повышению светосбора, но вместе с тем растет и вероятность того, что частица пересечет переизлучатель, дав в нем вспышку сцинтилляционного света. Также необходимо подобрать толщину тефлона, которым обернуты счетчики. Если взять тонкий слой, то зазоры между секторами будут маленькими, однако уменьшится коэффициент отражения. Оптимальные значения этих параметров должны стать результатом моделирования. Кроме того, необходимо определить, на сколько можно уменьшить ширину переизлучателя, чтобы не снизить эффективность счетчика.

8.3 Результаты моделирования

После исследований различных вариантов конструкции детектора, конфигурация с 32 φ -секторами и тефлоном толщиной 400 мкм была признана оптимальной. При моделировании было выяснено, что минимальное количество фотоэлектронов, которое следует ожидать, примерно равно 5. Это соответствует точке 4 при $\theta = 90^\circ$. Ниже приведены данные, показывающие как меняется количество фотоэлектронов при варьировании различных параметров.

В таблице 3 представлена зависимость числа фотоэлектронов от количества секторов. Данные приводятся для самого неблагоприятного случая, и, как

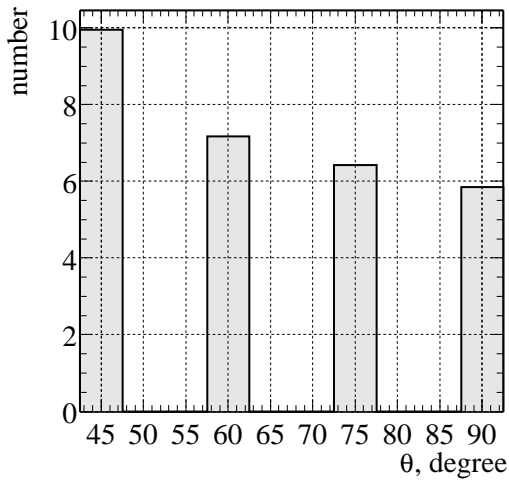


Рис. 8. Среднее количество фотоэлектронов от пиона при различных углах θ

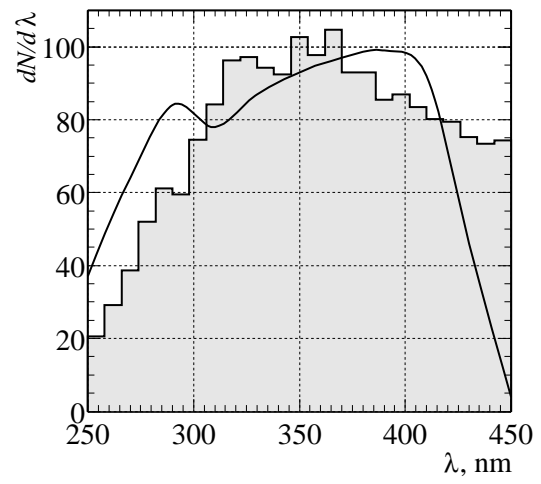


Рис. 9. Спектр собранных на переизлучатель фотонов и вероятность переизлучения VVQ (гладкая кривая)

видно из рис. 8, при приближении трека частицы к фотоумножителю наблюдается заметный рост количества фотоэлектронов. При изменении угла θ от 90° до 45° длина трека частицы внутри радиатора увеличивается в $\sqrt{2}$ раз, что соответствовало бы амплитуде сигнала 8,2 фотоэлектрона. Наблюдается 10 фотоэлектронов, а значит уменьшение поглощения света в переизлучателе при сокращении расстояния до фотоприемника также дает некоторый вклад. Возвращаясь к таблице 3, необходимо отметить, что уменьшение количества счетчиков в системе заметно сокращает число фотоэлектронов в амплитуде сигнала, а увеличение приводит к росту вероятности попадания частицы в шифтер и повышению стоимости системы идентификации.

При изменении толщины тефлона в пределах 400–750 мкм коэффициент све-

Таблица 3. Зависимость количества фотоэлектронов от конфигурации счетчика. Моделирование проводилось для точки 4 при $\theta = 90^\circ$, толщина тефлона — 400 мкм и высота шифтера — 10 мм, толщина аэрогеля — 20 мм. $n_{\text{сек}}$ — количество секторов; LCE — коэффициент светосбора на переизлучатель; N_A — число фотонов, поглощенных в аэрогеле и N_C — на стенках; $N_{\text{ФЭ}}$ — количество фотоэлектронов. В таблице приведена статистическая погрешность моделирования

$n_{\text{сек}}$	LCE, %	N_A/N_C	$N_{\text{ФЭ}}$
16	23.4 ± 0.2	2.2	2.73 ± 0.03
24	33.7 ± 0.3	2.4	4.00 ± 0.04
32	40.6 ± 0.3	2.5	4.79 ± 0.04

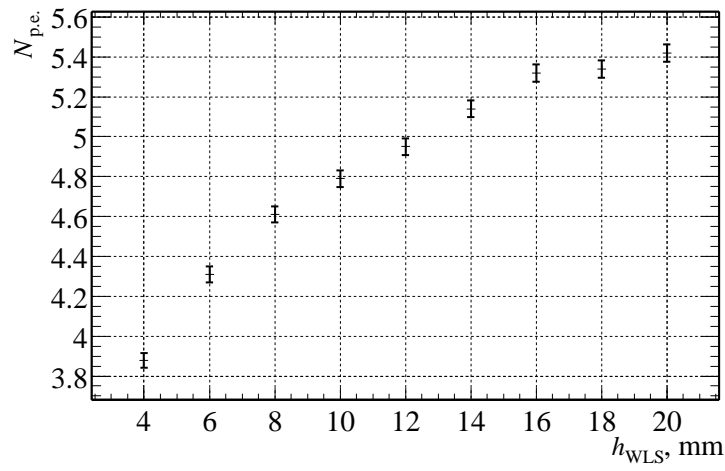


Рис. 10. Зависимость числа фотоэлектронов от ширины переизлучателя

тосбора меняется на 3%, поэтому не имеет смысла ее увеличивать.

Таблица 4 подтверждает, что доминирует поглощение света в аэрогеле. Данные, которые в ней приводятся, были получены для случая $\theta = 75^\circ$ при следующей конфигурации детектора: 32 сектора, толщина аэрогеля — 20 мм, ширина переизлучателя — 10 мм и толщина тefлона — 400 мкм. Из нее также видно, что средний по счетчику коэффициент светосбора слабо отличается от минимального. Из рис. 9 видно, насколько хорошо спектр фотонов (гистограмма), попадающих на шифтер согласуется со спектральной зависимостью вероятности переизлучения для ВВQ. Зависимости построены в относительных единицах. Можно заметить, что существенную роль играет поглощение фотонов в аэрогеле при малой длине волны.

В таблице 5 показано, какой выигрыш в эффективности идентификации можно получить, уменьшив ширину переизлучателя h_{WLS} . Видно, что, взяв шифтер шириной 12 мм вместо 20, можно добиться сокращения вероятности попадания частицы в переизлучатель менее чем на 4%. Связь между числом

Таблица 4. Коэффициент светосбора из различных точек радиатора

Точка	LCE, %	N_A/N_C	$N_{ФЭ}$
1	67.3 ± 0.3	4.1	8.04 ± 0.05
2	48.4 ± 0.3	4.3	6.01 ± 0.05
3	43.0 ± 0.3	3.6	5.34 ± 0.04
4	42.7 ± 0.3	3.2	5.33 ± 0.04
среднее	51.7 ± 0.3	3.9	6.33 ± 0.05

фотоэлектронов и шириной пластины переизлучателя приведена на рис. 10. График строился для следующих параметров: толщина тефлона — 400 мкм, количество секторов — 32, $\theta = 90^\circ$, фотоны излучаются в точке 4. Уменьшение ширины переизлучателя до 12 мм приведет к потере 1 фотона в амплитуде сигнала, но, в принципе, возможна.

К дополнительному уменьшению сигнала примерно на 10 % может привести увеличение количества отражений от граней, а следовательно и вероятности рассеяния на дефектах поверхности, при изменении ширины пластины переизлучателя с 20 мм до 12 мм.

В результате моделирования показана принципиальная возможность создания системы пороговых счетчиков на основе «плотного» аэрогеля. Несмотря на это, до принятия окончательного решения необходимо изготовить прототип, поскольку существует несколько неучтенных при моделировании эффектов. Прежде всего, необходима оценка количества света, который будет излучаться от каонов. Это могут быть сцинтилляции в аэрогеле, черенковский свет из тефлона. Кроме того, пока еще не оценен вклад, который будут давать дельта-электроны. Не учтено и ослабление света в переизлучателе, которое может быть вызвано случайным появлением оптического контакта между аэрогелем и сместителем спектра.

Успешная работа систем черенковских счетчиков в других детекторах позволяет надеяться, что допороговая эффективность рассмотренной системы не превысит 10 %.

Таблица 5. Вероятность попадания частицы в переизлучатель

p , МэВ/с	θ , °	Вероятность, %	
		$h_{\text{WLS}} = 20$ мм	$h_{\text{WLS}} = 12$ мм
400	45	13,4	10,0
400	90	10,9	8,6
850	45	8,9	7,4
850	90	7,8	6,7

9 Детектор временной зависимости

9.1 Конструкция детектора

Детектор временной зависимости (см. стр. 9) предлагается изготовить в виде наклонно расположенных пластин из плавленного кварца (рис. 11), которые образуют цилиндр. В работах [2, 18] описывается детектор с прямо расположенными пластинами, но, как будет показано ниже, конструкция с наклонными пластинами имеет ряд преимуществ. Всего в детектор входят 256 пластин размером $800 \times 10 \times 5 \text{ мм}^3$, которые делятся на группы по 8 штук, и свет с каждой группы собирается на отдельный фотоумножитель с помощью световодов. Таким образом, на каждом из торцов будет расположено по 32 ФЭУ с МКП (их общее число равно 64).

Вещество в детекторе такой конструкции соответствует примерно 5,7% радиационной длины.

9.2 Моделирование

При описании счетчика в моделировании учитывались зависимость от длины волны показателя преломления плавленного кварца [25] и квантовой эффективности фотоумножителя [12]. Графики зависимости этих величин от длины волны приведены также в приложениях E и F.

Потери света в кварце учесть сложнее, потому что свет теряется, главным образом, при отражении от граней [18]. Заранее определить, какое будет качество обработки поверхностей, практически невозможно. На потери света также влияет его поглощение в кварце, но оно, как правило, измеряется на тонких образцах, это позволяет получить зависимость от длины волны, но не длину затухания в той области, где кварц прозрачен. В работе [18] приводятся данные для двух образцов, изготовленных разными фирмами, и эффективная длина поглощения (с учетом рассеяния на гранях) различается у них практически на порядок (13,6 и 1,8 м). По этим причинам потери света в кварце не учитывались.

Моделирование проводилось для двух разных геометрий детектора (с наклонными и прямо расположенными пластинами) с помощью программы LSE [24,



Рис. 11. Детектор временной зависимости с наклонно и прямо расположенными пластинами

21]. При этом варьировались следующие параметры: угол вылета частиц и их импульс. В результате были получены различные гистограммы, большинство из которых служило для контроля правильности описания. Наиболее важными были двумерные распределения зарегистрированных фотонов: импульс частицы — время регистрации фотона при различных углах θ отдельно для π и K -мезонов.

Гистограммы затем обрабатывались в среде ROOT [22], где и было получено, как зависят от импульса частиц количество фотоэлектронов и разница времени сигналов от π и K -мезонов.

9.3 Результаты моделирования

При моделировании исследовались следующие вопросы: есть ли преимущества у конструкции с наклонно расположенными пластинами, на сколько различаются по времени сигналы от π и K -мезонов, и каким будет количество фотоэлектронов.

Чтобы оценить, сигнал какой амплитуды можно ожидать, необходимо определить, какому количеству фотоэлектронов соответствует число излучаемых фотонов. Численно проинтегрировав по длине волны произведение спектра черенковских фотонов (A.1) и квантовой эффективности ФЭУ с МКП, получим 74 фотоэлектрона с 1 см радиатора при $\beta = 1$, следовательно сигнал с фотоумножителей необходимо будет усиливать. В работе [18] говорится, что при тестировании счетчика было получено 136 фотоэлектронов с одного сантиметра. Объяснить разницу можно тем, что у ФЭУ с МКП максимум квантовой эффективности приходится на большую длину волны. Связано это с тем, что применявшиеся при испытаниях на пучке фотоумножители Hamamatsu H2431 имеют окно из силиката бора, прозрачное для ультрафиолетовых лучей.

Моделирование детекторов с прямо и наклонно расположенными кварцевыми пластинами показало, что положение максимума зависимости количества зарегистрированных фотоэлектронов от времени не изменяется. Если пластины расположены прямо, то суммарное число фотоэлектронов больше, но, вместе с тем, увеличивается длительность сигнала. Это видно из рис. 12, где представлено распределение фотоэлектронов по времени в сигнале от пиона с импульсом 600 МэВ/с, пролетевшем под углом $\theta = 75^\circ$ для прямо и наклонно расположенных пластин. Сравнивая эти распределения, можно сделать вывод, что в конструкции с наклонно расположенными пластинами в условия полного внутреннего отражения дополнительно захватываются фотоны, для которых больше угол между направлением распространения и осью z . Это подтверждает рис. 13, где приводится полученное при тех же условиях распределение проек-

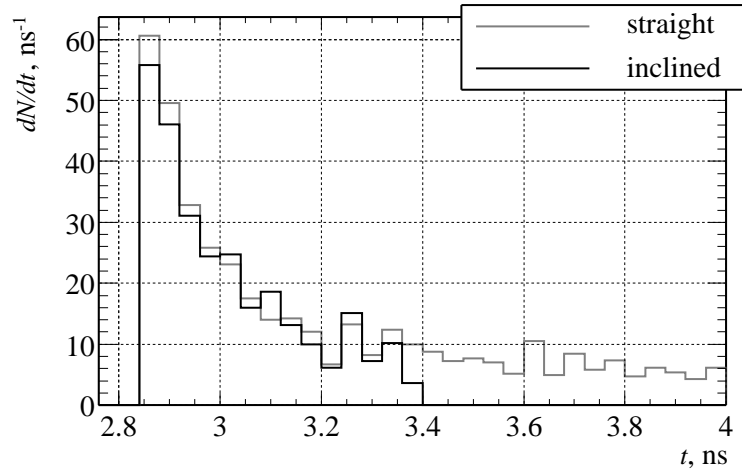


Рис. 12. Распределение зарегистрированных фотонов по времени

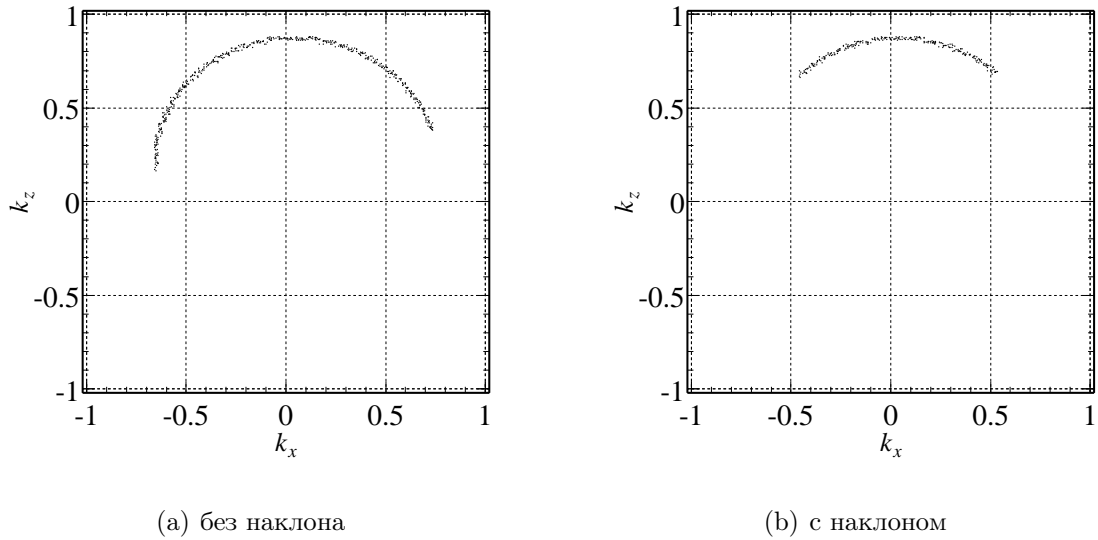
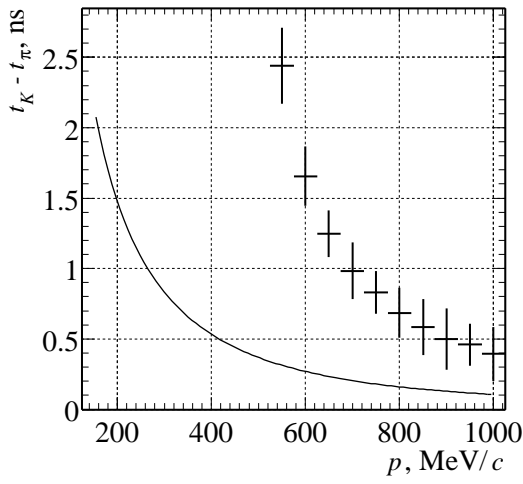
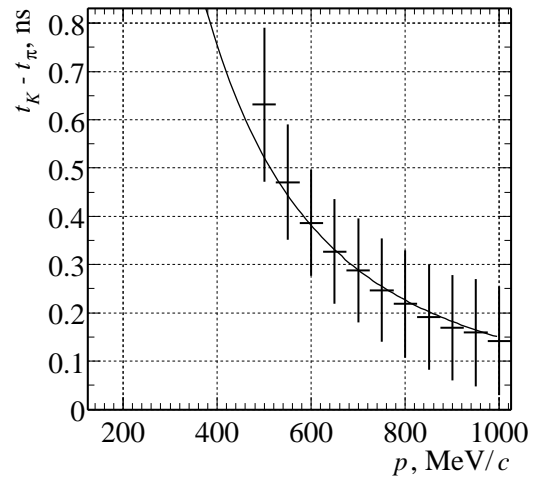


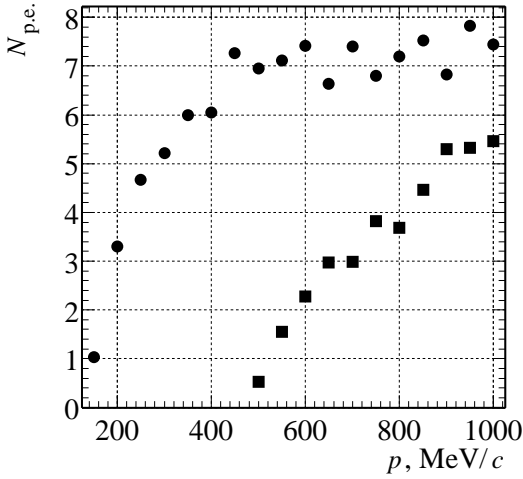
Рис. 13. Распределение проекций волнового вектора зарегистрированных фотонов для различного положения пластин



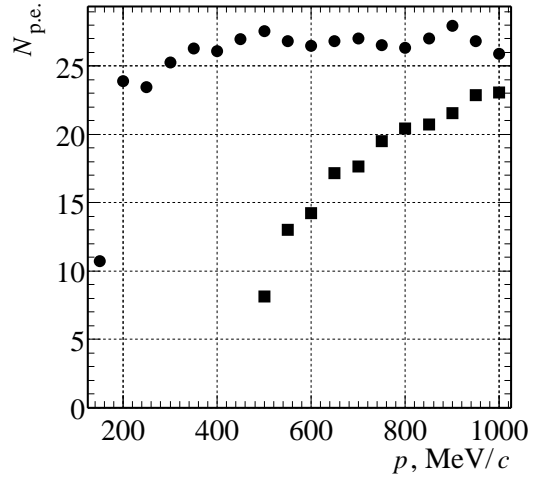
(a) Δt при $\theta = 90^\circ$



(c) Δt при $\theta = 45^\circ$



(b) Число фотоэлектронов, $\theta = 90^\circ$



(d) Число фотоэлектронов, $\theta = 45^\circ$

Рис. 14. Разница времени сигналов Δt от π и K -мезонов, линия — разница времени пролета, и количество фотоэлектронов в импульсе (● — пионы, ■ — каоны).

ций k_x и k_z единичного вектора, направленного вдоль направления распространения фотона. Из этого можно заключить, что располагать пластины следует под наклоном, чтобы сделать сигнал более коротким. Можно также заметить, что при такой конструкции детектора, в нем не будет промежутков между пластинами, через которые могли бы пролетать частицы, не давая сигнала. Свет от каонов также будет регистрироваться фотоприемником, независимо от угла θ , потому что фотоны, направление которых лежит в (r, z) -плоскости всегда будут попадать в условия полного внутреннего отражения.

На сколько различается время регистрации фотонов от π и K -мезонов видно из рис. 14. При угле $\theta = 90^\circ$ (рис. 14(a)) оно существенно больше разницы времени пролета, хотя при $\theta = 45^\circ$ (рис. 14(c)) эти времена становятся практи-

чески одинаковыми. Связано это с тем, что при наклонной траектории частицы практически все регистрируемые фотоны излучаются вдоль оси z , и разница времени распространения света внутри пластины очень мала. Приведенные на графиках погрешности оценивались следующим образом: для распределения фотонов от π и K -мезонов по времени (рис. 12) вычислялись стандартные отклонения которые, затем квадратично складывались, чтобы получить итоговую погрешность. Для точного определения разрешения системы необходимо учесть функцию отклика усилителя, который будет подключен к фотоприемнику, но эта часть работы еще не сделана.

Количество фотоэлектронов от одной частицы в одном фотоприемнике приведено на рис. 14(b) и 14(d). Они подтверждают необходимость использования усилителей, это усложняет конструкцию, так как требуются очень быстрые приборы. При импульсах от 200 МэВ/с до 500 МэВ/с детектор будет работать как пороговый черенковский счетчик, поэтому для идентификации частиц достаточно информации о наличии сигнала. При импульсе мезонов до 650 МэВ/с сигналы от π и K -мезонов различаются по времени более чем на 0,3 нс, что позволяет надеяться на возможность создания подходящей электроники. При углах вылета частиц близких к 90° фотоны будут регистрироваться фотоприемниками, находящимися с двух сторон пластины, поэтому, например, для $\theta = 90^\circ$ суммарный сигнал будет примерно равен 14 фотоэлектронам.

Детектор временной зависимости имеет целый ряд преимуществ перед времяпролетным счетчиком:

- короткое время испускания фотонов, так как нет характерного для сцинтиллятора времени высвечивания,
- меньший разброс времени регистрации фотонов, поскольку нет фотонов, распространяющихся под большим углом к оси пластины,
- разница времени пролета π и K -мезонов усиливается отличием во времени распространения фотонов внутри пластины.

Однако несмотря на эти достоинства, из-за малого числа фотоэлектронов использовать такой счетчик затруднительно. Можно сказать, что возможность реализации проекта детектора временной зависимости тесно связана с возможностью изготовить быстрый усилитель. Количество фотоэлектронов возрастет, если увеличить толщину кварцевых пластин, но это будет сопровождаться ухудшением энергетического разрешения калориметра, так как перед ним станет больше пассивного вещества.

Как уже отмечалось, каоны с импульсом до 500 МэВ/с не будут регистрироваться, следовательно необходима дополнительная система, которая будет включена в триггер, например, система сцинтилляционных счетчиков.

Таким образом, при наличии усилителя, позволяющего измерять время с точностью лучше 0,1 нс, проект детектора временной зависимости может быть реализован.

10 Сравнение детекторов и выводы

Анализ рассмотренных типов детекторов показал, что идеального во всех отношениях варианта системы идентификации нет, любой детектор будет работать на пределе своих возможностей. Наименее привлекательным выглядит проект детектора временной зависимости, так как требует прецизионного измерения времени сигналов малой амплитуды. Окончательный выбор между времяпролетным и пороговым черенковским счетчиком может быть сделан только после начала работы ВЭПП-2000.

В том случае, если точность измерения потерь энергии в дрейфовой камере окажется ниже проектной, то обойтись без системы идентификации будет невозможно. Тогда предпочтение должно быть отдано времяпролетному счетчику или детектору временной зависимости.

Также возможно, что предельное магнитное поле будет ниже 1,5 Тл, тогда хуже станет импульсное разрешение детектора, и идентификация частиц в области высоких энергий будет невозможной. Наиболее естественное решение проблемы в этой ситуации — аэрогелевый счетчик.

В пользу времяпролетного счетчика можно выдвинуть следующие аргументы. В реакциях множественного рождения у частиц будут преобладать более низкие энергии, а при малых импульсах он обладает достаточным разрешением. Кроме того, такой счетчик полностью заменяет Z-камеру в первичном триггере.

Главный недостаток аэрогелевого счетчика — мертвая зона, в которой невозможно разделение частиц, превышает 10% площади. Кроме того, он не может быть включен в триггер, а значит должен быть дополнен какой-либо другой системой, например, сцинтилляционными счетчиками.

11 Заключение

В работе было рассмотрено 3 типа системы идентификации, которые могут быть применены в детекторе КМД-2М:

- времяпролетный счетчик,
- пороговый черенковский счетчик на основе аэрогеля,
- детектор временной зависимости.

В результате моделирования выяснено, что ни одна из вышеперечисленных систем явным преимуществом не обладает. Все типы детекторов работоспособны, но их характеристики должны быть предельными.

Для окончательного решения, какая система лучше всего подходит для КМД-2М требуется изготовление и тестирование макетов.

На данном этапе можно сказать, что времяпролетный или пороговый черенковский счетчик смогут обеспечить идентификацию каонов в области энергий ВЭПП-2000.

Благодарности

Прежде всего хочется выразить признательность научному руководителю Г. В. Федотовичу за внимательное и терпеливое отношение к работе. Его вопросы и советы помогали находить и устранять в ней пробелы, направляли дальнейшие исследования.

Моделирование аэрогелевых счетчиков было бы невозможным без Е. А. Кравченко, который обратил внимание, какие эффекты необходимо учесть и какие проблемы стоят при их изготовлении. А. Г. Шамов с готовностью отвечал на многочисленные вопросы о программе LCE, что позволило быстрее научиться с ней работать.

Неоценимую помощь оказало обсуждение отдельных вопросов с Б. И. Хазиным, А. П. Онучиным, Б. А. Шварцом, А. Р. Бузыкаевым и С. А. Кононовым.

Список литературы

- [1] *Аульченко В. М. и др.* Проект детектора КМД-2М. — (Препринт/ ИЯФ им. Г. И. Будкера). Готовится к публикации.
- [2] *Honscheid K., Selen M., Sivertz M.* Particle identification via Cerenkov correlated timing // Nucl. Instrum. Meth. — 1994. — V. A343. — P. 306-310.
- [3] *Группен К.* Детекторы элементарных частиц: Справочное издание / Пер. с англ. — Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999.
- [4] *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990.
- [5] *Klempt W.* Review of particle identification by time of flight techniques // Nucl. Instrum. Meth. — 1999. — V. A433. — P. 542-553.
- [6] *Shikaze Y. et al.* Large-area scintillator hodoscope with 50-ps timing resolution onboard BESS // Nucl. Instrum. Meth. — 2000. — V. A455. — P. 596-606. — ArXiv: hep-ex/0002047.
- [7] *Satpathy Asish* Particle identification with BELLE // ArXiv: hep-ex/9903045. — 1999.
- [8] Belle collaboration. The Belle Detector / Abashian A. et al. — http://beauty.bk.tsukuba.ac.jp/belle/nim/Belle_Detector_kek.ps.gz
- [9] *Asaoka Y. et al.* Development of a large-area aerogel Cerenkov counter on board BESS // Nucl. Instrum. Meth. — 1998. — V. A416. — P. 236-242. — ArXiv: hep-ex/9805001.
- [10] *Iijima T. et al.* Aerogel Cherenkov counter for the BELLE detector // Nucl. Instrum. Meth. — 2000. — V. A453. — P. 321-325.
- [11] *Barnyakov M. Yu. et al.* Aerogel Cherenkov counters for the KEDR detector // Nucl. Instrum. Meth. — 2000. — V. A453. — P. 326-330.
- [12] *Barnykov M. Yu. et al.* Development of aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and phototubes // Nucl. Instrum. Meth. — 1998. — V. A419. — P. 584-589.
- [13] *Кравченко Е. А.* Разработка аэрогелевых черенковских счетчиков для e^-e^+ -коллайдеров: Дисс... канд. физ.-мат. наук 01.04.16, Новосибирск, 2000.

- [14] *Абрамов Г. Н. и др.* Проект модернизации детектора СНД для экспериментов на ВЭПП-2000. — Новосибирск, 2001. — (Препринт/ ИЯФ им. Г. И. Будкера; ИЯФ 2001-29).
- [15] *Adam I. et al.* Status of the DIRC detector at BaBar: Early operational experience // Nucl. Instrum. Meth. — 2000. — V. A453. — P. 301-307.
- [16] *Akatsu M. et al.* Time-of-propagation Cherenkov counter for particle identification // Nucl. Instrum. Meth. — 2000. — V. A440. — P. 124-135. — ArXiv: physics/9904009.
- [17] *Ohshima Takayoshi* Test result of time-of-propagation Cherenkov counter // Nucl. Instrum. Meth. — 2000. — V. A453. — P. 331-335. — ArXiv: hep-ex/0001057.
- [18] *Kichimi K. et al.* The Cerenkov correlated timing detector: Beam test results from quartz and acrylic bars // Nucl. Instrum. Meth. — 1996. — V. A371. — P. 91-95. — ArXiv: hep-ex/9508007.
- [19] *Bacchetta N. et al.* MRS detectors with high gain for registration of weak visible and UV light fluxes // Nucl. Instrum. Meth. — 1997. — V. A387. — P. 225-230.
- [20] Particle Data Group. Review of particle physics // Eur. Phys. J. — 2000. — V. C15
- [21] *Shamov A., Buzykaev A. R.* LCE, light collection efficiency simulation tool // <http://www.ifh.de/CHEP97/paper/212.ps>
- [22] An Object-Oriented Data Analysis Framework / Brun R., Rademakers F. — <http://root.cern.ch/>
- [23] gcc(1). GNU project C and C++ Compiler (egcs-1.1.2) // Manual pages.
- [24] *Шамов А. Г., Бузыкаев А. Р.* Программа LCE для моделирования процесса светосбора методом Монте-Карло.
- [25] Таблицы физических величин: Справочник / Под. ред. Кикоина И. К. — М.: Атомиздат, 1976.
- [26] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. — Т. 8. Электродинамика сплошных сред. — 3-е изд. испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992.

Приложение А Эффект Вавилова-Черенкова

Черенковский свет излучается частицей, которая движется быстрее скорости света в среде. Это явление было обнаружено С. И. Вавиловым и П. А. Черенковым, а его теоретическое обоснование дали И. Е. Тамм, а также И. М. Франк. Популярное объяснение этого эффекта можно найти в книге К. Групена [3], а строгое в курсе Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [26].

Условие появления излучения записывается в виде

$$\beta > \frac{1}{n},$$

где n — показатель преломления вещества. Если у двух частиц одинаковые импульсы, но разные массы, то скорости у них тоже разные. Используя это, можно подобрать показатель преломления вещества таким образом, что при пролете через радиатор (слой этого вещества) свет будет излучаться только более легкой частицей. Основанные на этом явлении пороговые счетчики получили широкое распространение.

Свет излучается под фиксированным углом α к направлению полета частицы, то есть вдоль образующих конуса, угол которого находится из

$$\cos \alpha = \frac{1}{\beta n}.$$

Другая важная характеристика черенковского излучения — число фотонов, испущенных с единицы длины трека частицы, проходящей сквозь радиатор. С учетом спектральной зависимости излучения оно записывается в виде

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right). \quad (\text{A.1})$$

Здесь α — постоянная тонкой структуры, а z — заряд частицы. Существенно, что количество фотонов обратно пропорционально квадрату длины волны. Это вынуждает использовать материалы, прозрачные в ультрафиолетовой области спектра, и фотоумножители со специальными окнами.

Удобно ввести пороговый импульс

$$p_{\text{п}} = \frac{mc}{\sqrt{n^2 - 1}},$$

тогда число фотонов будет описываться зависимостью

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} \sim 1 - \frac{p_{\text{п}}^2}{p^2}. \quad (\text{A.2})$$

Приложение В Характеристики аэрогеля

Следующие характеристики «плотного» аэрогеля предоставлены Е. А. Кравченко и А. Р. Бузыкаевым:

- показатель преломления при длине волны 400 нм — 1,13,
- длина рассеяния при $\lambda = 400$ нм — 1,85 см.

Пороговый импульс пионов в аэрогеле — 265 МэВ/с, каонов — 938 МэВ/с.

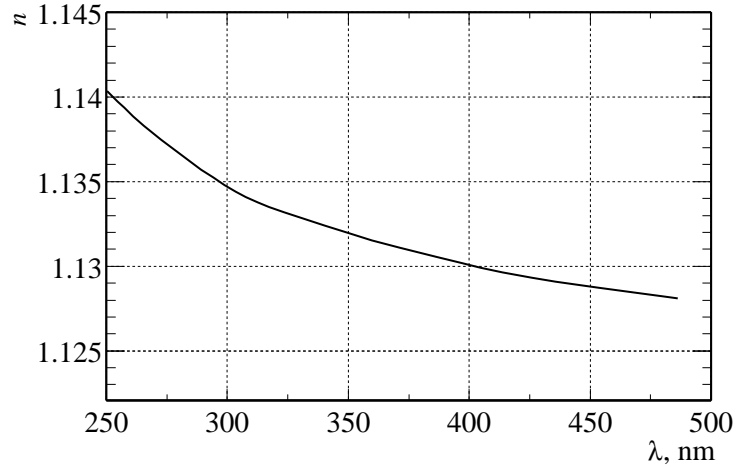


Рис. 15. Показатель преломления аэрогеля. Зависимость от длины волны определена из соотношения (2) на основе [25], стр. 636, таблица 31.6

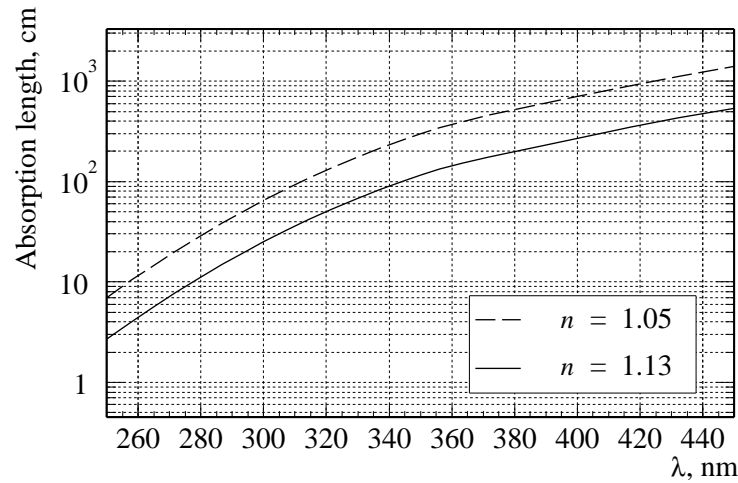


Рис. 16. Длина поглощения света в аэрогеле в зависимости от длины волны. Данные для $n = 1,05$ приведены в [13, 12, 11]. Определение длины поглощения для $n = 1,13$ описано на стр. 23

Приложение С Характеристики сместителя спектра ВВQ

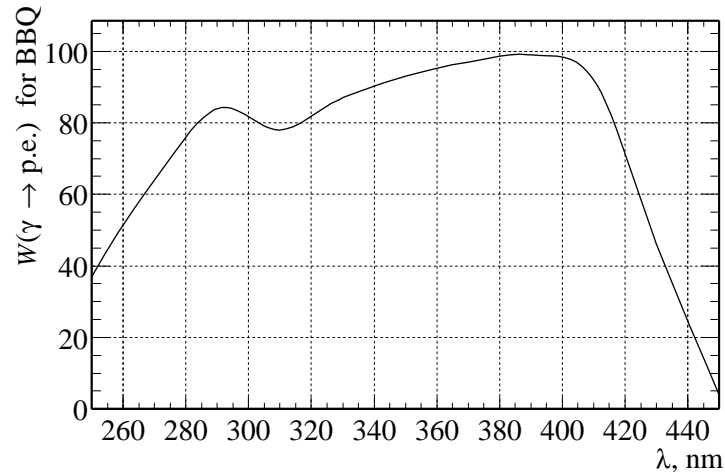


Рис. 17. Спектральная зависимость вероятности поглотить фотон с последующим излучением [12, 13].

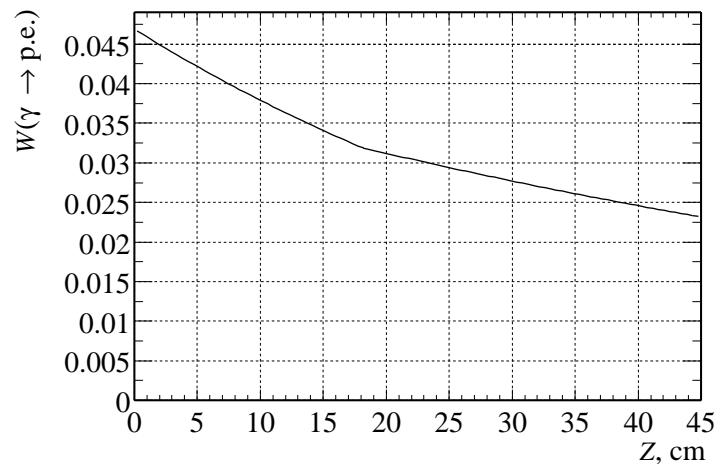


Рис. 18. Вероятность конверсии фотона в фотоэлектрон в зависимости от расстояния до фотоумножителя [11] для ВВQ и ФЭУ с МКП. На дальнем конце пластины закреплен поглощающий свет материал

Приложение D Коэффициент отражения тефлона

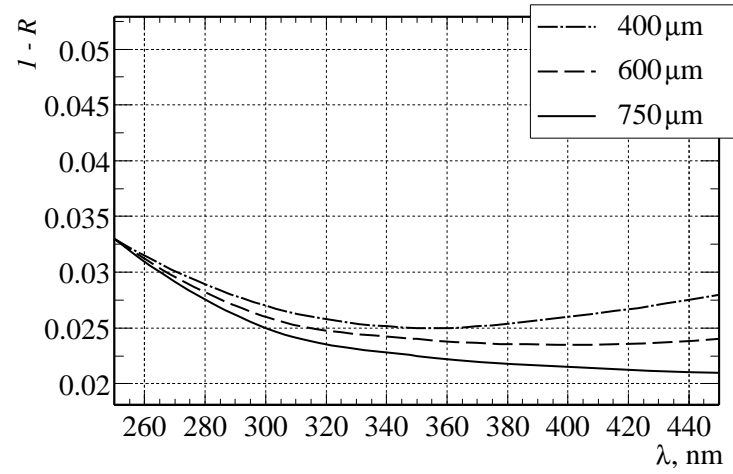


Рис. 19. Зависимость величины $1 - R$, где R — коэффициент отражения, от длины волны при различной толщине тефлона [13]

Приложение Е Показатель преломления кварца

Пороговый импульс пионов в кварце — 130 МэВ/ c , каонов — 458 МэВ/ c .

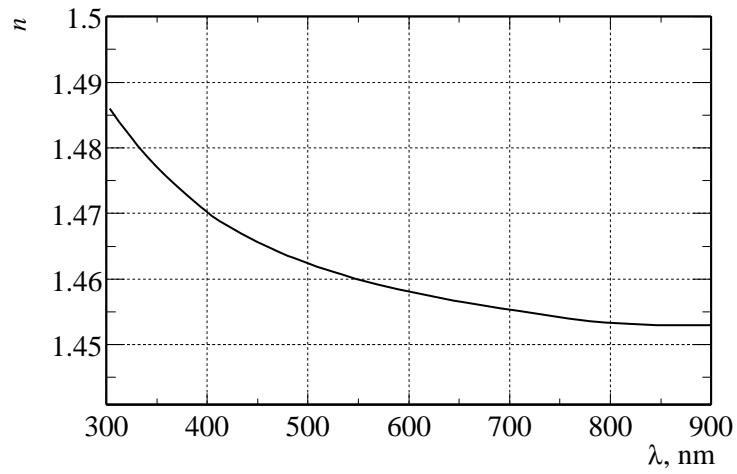


Рис. 20. Показатель преломления плавленого кварца [25], стр. 636, таблица 31.6

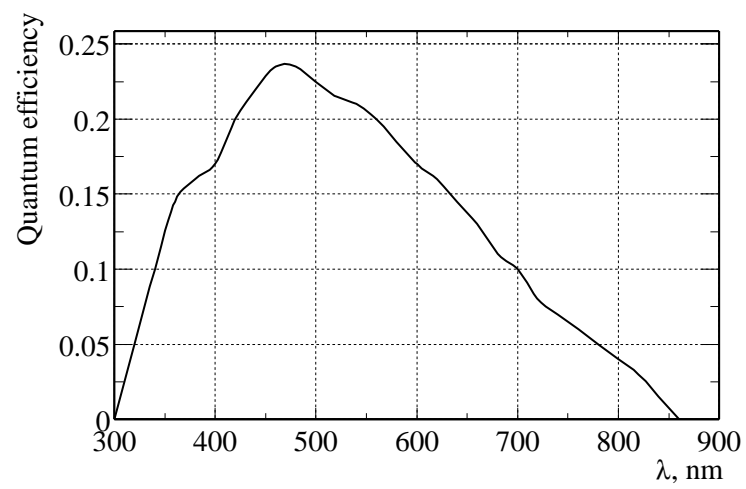


Рис. 21. Квантовая эффективность ФЭУ с МКП [12]