

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Б.П. КОНСТАНТИНОВА**

На правах рукописи

Гаврилов Геннадий Евгеньевич

УДК 539.126, 539.188

**Разработка и создание координатного торцевого детектора для
эксперимента L3**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

**Гатчина
2002**

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук А.Г. Крившич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Л.В. Краснов,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник В.В. Гребенщиков.

Ведущая организация: Объединённый институт ядерных исследований.

Защита состоится " _____ " _____ 2002 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д-002.115.01 в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН по адресу:

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

И.А. Митропольский

1. Общая характеристика работы

Работа посвящена разработке и созданию в ПИЯФ РАН¹ торцевого координатного детектора на основе модулей дрейфовых камер для эксперимента L3² на ускорителе LEP³ в CERN⁴ (Швейцария).

Основная цель работы

Целью выполненной работы явилось создание на основе модулей дрейфовых камер торцевого координатного детектора FTC (Forward Tracking Chambers) для эксперимента L3 (CERN, Швейцария).

Детектор FTC, собранный в виде двух пар дисков, был установлен по обе стороны от точки e^+e^- -взаимодействия экспериментальной установки L3 в зазорах между торцевыми частями центрального детектора и электромагнитного калориметра.

Возможность калибровки детектора FTC в его рабочем диапазоне углов ограничивалась недостаточно высоким координатным разрешением соседних детекторов. Поэтому для обеспечения надёжной калибровки особое внимание было обращено на создание одинаковых условий дрейфа электронов во всех регистрирующих ячейках модулей FTC. Этому условию была полностью подчинена оптимизация всех параметров конструкции детектора, основанная на обеспечении линейной зависимости координаты трека частицы от времени дрейфа электронов к сигнальной проволочке.

Решение задач оптимизации конструкции и обеспечение требуемых в L3 характеристик осложнялось тем, что пространство, отведённое для размещения детектора, составляло всего 72 мм по оси пучка. Из-за ограниченности пространства для формирования однородного электрического поля внутри рабочего объёма модуля потребовалось одновременно минимизировать его краевые неоднородности у боковых стенок и искажающее влияние внешних электродов.

К основным задачам работы также необходимо отнести обеспечение высокой надёжности и устойчивости детектора FTC по отношению к процессам старения.

Актуальность темы

Дрейфовые камеры (ДК) являются одним из основных трековых приборов в современной физике высоких энергий. В ближайшем будущем, несмотря на появление нового поколения полупроводниковых

¹ Петербургский Институт Ядерной Физики Российской Академии Наук

² S.C.C. Ting, Intern. School of Subnucl. Phys., Erice, Italy, p. 275-334, 1985.

³ Large Electron Positron facility.

⁴ European Organization for Nuclear Research, Geneva.

и газовых микростриповых детекторов. ДК будут продолжать играть ключевую роль в современных экспериментальных установках на ускорителях со встречными пучками (LHC⁵, LEP, HERA⁶, TESLA⁷). Дело в том, что в области высоких энергий взаимодействия частиц характеризуются конечными состояниями, в которых преобладают коллимированные струи с высокой множественностью. Это обуславливает ряд требований, предъявляемых к трековому детектору.

Во-первых, при высоких энергиях частицы мало отклоняются в ограниченном объёме магнитного поля экспериментальной установки. Поэтому для точного определения импульса регистрируемых частиц и знака заряда необходимо на большой базе обеспечить многократное измерение координат вдоль трека частицы с достаточно высокой точностью. Причём, учитывая высокую светимость современных коллайдеров ($10^{31}=10^{34}$ см⁻¹ с⁻¹), регистрация частиц должна осуществляться в условиях высокой загрузки (в том числе и фоновой), что налагает жёсткие требования на временное разрешение детектора.

Во-вторых, образование и последующий распад нестабильных частиц (например, τ -лептонов, c - и b -мезонов) приводит к появлению вторичных вершин, для реконструкции которых необходимо высокое двухчастичное и пространственное разрешение детектора в широком диапазоне углов вылета продуктов распада.

В-третьих, для работы детектора в экспериментальной физической установке в течение нескольких лет без доступа персонала требуются высокая надёжность и радиационная стойкость прибора в условиях длительного и интенсивного облучения.

Дрейфовые камеры, отличающиеся высоким пространственным разрешением, относительно небольшим количеством каналов электроники и сравнительно несложной конструкцией, позволяют эффективно решать перечисленные выше проблемы.

Рассмотренные в диссертации вопросы оптимизации конструкции в соответствии с требуемыми рабочими характеристиками и внешними условиями, являются общими для большинства типов ДК.

Научная новизна работы

- Разработан и создан торцевой координатный детектор FTC для экспериментальной установки L3, с помощью которой на ускорителе LEP в CERN изучались уникальные физические процессы с участием электронов, фотонов, мюонов и адронов, рождающихся в e^+e^-

⁵ Large Hadron Collider.

⁶ Hadron Electron Research Accelerator

⁷ Tera Electron Volt Energy Superconducting Linear Accelerator.

столкновениях при энергиях до $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. Детектор участвовал в наборе статистики и использовался в анализе данных.

- Впервые разработан и применён алгоритм оптимизации всех рабочих параметров детектора, основанный на соблюдении линейности зависимости координаты трека частицы от времени дрейфа электронов (Y-T). Это условие позволило одновременно обеспечить необходимую однородность и стабильность электрического поля; одинаковость коэффициентов газового усиления на анодных проволочках и температуры газовой смеси; необходимую механическую точность изготовления модуля. В итоге, одинаковые условия дрейфа электронов были созданы во всех дрейфовых ячейках модулей, что значительно упростило процедуру калибровки детектора. Максимальная погрешность в определении координаты трека частицы, вызванная нелинейностью зависимости Y-T, составила 70 мкм.

- Разработан и реализован в конструкции детектора новый метод формирования однородного электрического поля с помощью полеобразующих элементов. Результирующая неоднородность электрического поля в дрейфовом промежутке модуля FTC составила $|\Delta E/E| \leq 0,5\%$, что обеспечило постоянство дрейфовой скорости электронов на уровне $|\Delta v_{др}/v_{др}| < 0,08\%$.

- Впервые при использовании низкорезистивной анодной проволочки (100 Ω /метр) реализовано одновременное измерение координат трека частицы по времени дрейфа электронов и методом деления заряда (ДЗ). При этом пространственное разрешение измерения координаты методом деления заряда составило $\sigma_{ДЗ}/\lambda \approx 1\%$, где λ - длина проволочки, что для данного метода близко к предельному значению.

- Работая на газовой смеси 62%Ar + 38%C₂H₆, детектор FTC за 10 лет в составе установки L3 набрал суммарную дозу 0,2 Кл/см без ухудшения рабочих характеристик из-за процессов старения и находится в рабочем состоянии.

Научная и практическая ценность работы

В работе представлен выбор и реализация конструкции детектора FTC. При этом можно сформулировать общий подход к созданию координатных детекторов для физического эксперимента, когда:

- физические задачи эксперимента определяют рабочие характеристики детектора, которые могут быть реализованы в виде различных конструктивных решений;
- окончательный вариант конструкции выбирается исходя из условий работы детектора (ограниченное пространство, соседство мощных источников электромагнитных полей и т. д.);

• экспериментальная и расчетная оптимизация всех параметров конструкции детектора проводится для достижения требуемых рабочих характеристик в условиях внешних ограничений.

Создание детектора FTC наглядно иллюстрирует практическую реализацию данного подхода.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на международной конференции: "Международное совещание по пропорциональным и дрейфовым камерам", Дубна, 1988, и на семинарах ПИЯФ РАН.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов. В начале диссертации сформулирована цель работы. Диссертация включает в себя 2 таблицы, 68 рисунков и список литературы. Общий объем диссертации 123 страницы.

2. Краткое содержание диссертации

Цель работы содержит формулировку основной цели работы и проблем, возникших при её реализации.

Введение включает в себя краткое описание содержания всех глав представленной работы.

Первая глава работы посвящена общему описанию экспериментальной установки и задач эксперимента L3. Представлено описание каждого из основных детекторов в установке L3, включая торцевой координатный детектор FTC [1]. Установка L3 предназначена для проверки предсказаний и параметров Стандартной Модели. Все детекторы установки находятся внутри магнита (диаметром ≈ 11 м и длиной 12 м), создающего магнитное поле 0,5 Тл. Начиная от точки взаимодействия e^+e^- -пучков, в L3 находятся: центральный вершинный детектор на основе дрейфовой камеры "растянутого времени" – ТЕС⁸, электромагнитный калориметр BGO⁹, состоящий из кристаллов ортогерманата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, урановый адронный калориметр и мюонный спектрометр, состоящий из набора дрейфовых камер.

Торцевому координатному детектору FTC было отведено место (72 мм по оси пучка Z) в зазоре между ТЕС и калориметром BGO.

⁸ Time Expansion Chamber.

⁹ Bismuth Germanium Oxid.

Детектор предназначался для регистрации и измерения треков частиц, входящих в торцевую часть калориметра BGO в диапазонах полярных углов $14^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$ и $145^\circ \leq \theta \leq 166^\circ$, не перекрываемых детектором ТЕС. Необходимость точного определения координат и направления частиц обуславливалась многократным кулоновским рассеянием частиц в алюминиевом фланце ТЕС. Для выполнения этой задачи FTC должен был обеспечивать:

- пространственное и угловое разрешение координат и направлений треков частиц $\sigma \leq 150$ мкм и 10 мрад, соответственно;
- одновременную регистрацию треков 5÷7 частиц;
- надёжную работу в течение не менее 2÷3 лет без ремонта;
- достаточно низкое тепловыделение электроники в зазоре (≤ 50 Вт).

Вторая глава посвящена выбору и последующему анализу конструкции детектора FTC. Выбор конструкции детектора жёстко обуславливался условиями его размещения в установке L3. Во-первых, ограниченность пространства для установки преусилителей, прокладки кабелей и газового питания обусловила необходимость минимизации числа каналов электроники. Во-вторых, замкнутость и ограниченность пространства в зазоре ТЕС-BGO исключили возможность применения системы охлаждения, что лимитировало тепловыделение электроники. Предполагая для разрабатываемой регистрирующей электроники потребление мощности 0,1 Вт на один канал, допустимое число каналов электроники в каждом зазоре не должно было превышать 500. В-третьих, конструкция детектора должна была обеспечить высокую надёжность и радиационную стойкость в течение нескольких лет работы без доступа персонала.

С целью выбора конструкции FTC был проведён сравнительный анализ многопроволочной пропорциональной камеры (МПК) с цифровым съёмом информации, МПК с наклонной регистрирующей плоскостью, МПК с катодным считыванием информации и дрейфовой камеры (ДК). Показано, что МПК могут обеспечить необходимое пространственное и угловое разрешение, но не удовлетворяют требованиям по числу каналов электроники, по величине тепловыделения и по надёжности [2].

В отличие от МПК, дрейфовые камеры оптимально соответствуют назначению FTC и условиям его размещения в установке L3. Основу конструкции FTC составляют модули дрейфовых камер [3]. Схема сечения отдельного модуля приведена на Рис. 1. В FTC координаты положения трека частицы измеряются в двух взаимно ортогональных слоях-дисках, собранных из модулей. Модуль FTC (см. Рис. 1) состоит из

анодной плоскости, включающей в себя четыре сигнальных¹⁰ (SW) и пять полеформирующих (FW) проволочек¹¹, сверху и снизу от плоскости располагаются два дрейфовых промежутка по 22 мм, ограниченные катодами из фольгированного стеклопластика и стенками с полосковыми полеформирующими электродами – стрипами. В каждом модуле измеряются четыре координаты трека по времени дрейфа электронов и дополнительно, методом деления заряда, измеряется координата вдоль одной из проволочек SW.

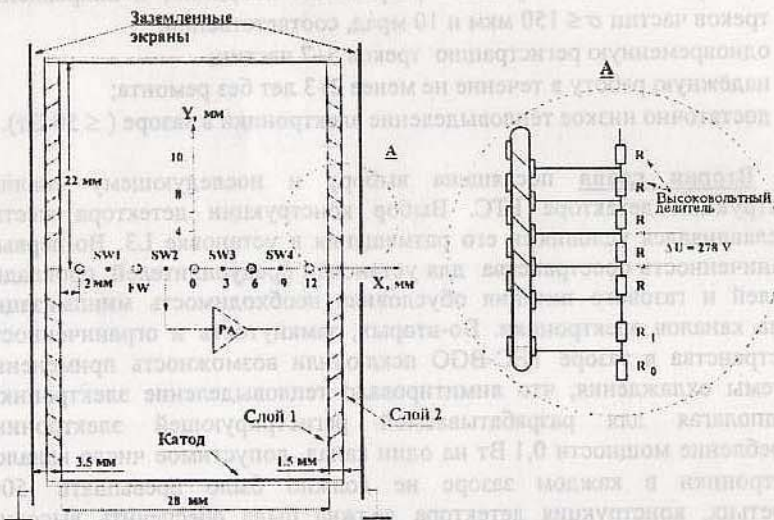


Рис. 1. Поперечное сечение модуля FTC и схема высоковольтного делителя (А), установленного на модуле. Показаны: катод, полеформирующие (FW) и сигнальные анодные проволочки (SW). Полосковые электроды – стрипы (Слой 1 и Слой 2) задают спадающее электрическое поле в рабочем объёме детектора и обеспечивают его защиту от влияния соседних заземлённых экранов.

Для создания одинаковых условий дрейфа электронов в дрейфовых ячейках (зоны регистрации проволочек SW) модуля нужно обеспечить однородное электрическое поле в дрейфовом промежутке, одинаковые коэффициенты газового усиления (КГУ), стабильную температуру рабочего газа и минимизировать механические погрешности. Критерием решения этой задачи было соблюдение линейности координатно-временной зависимости. Предполагалось, что погрешность в

определении координаты трека частицы из-за нелинейности зависимости Y-T не должна превышать $|\Delta x| \leq 70$ мкм.

В геометрии модуля FTC (Рис. 1) линейность зависимости Y-T обеспечивается постоянством скорости дрейфа электронов, зависящей от напряжённости электрического поля E , как $v_{др} = \mu \cdot E$, где μ – подвижность электронов в газе. Аргон-этановая газовая смесь 62%Ar + 38%С₂H₆ была выбрана в качестве рабочей для FTC и, чтобы оценить допустимый в ней уровень неоднородности электрического поля, с помощью программы MAGBOLTZ¹² была рассчитана зависимость скорости дрейфа электронов от напряжённости поля при различной температуре. Анализ зависимости $v_{др}(E)$ показал, что погрешность измерения координаты, вызванная нелинейностью Y-T, ниже указанной выше величины 70 мкм, если неоднородность электрического поля $|\Delta E/E| \leq 2\%$.

Ожидаемое пространственное разрешение (σ_x) детектора FTC оценивалось по совокупности вкладов следующих факторов:

$$\sigma_x^2 = \sigma_s^2 + \sigma_D^2 + \sigma_A^2,$$

где σ_s – вклад от пространственного разброса первичных кластеров ионизации; σ_D – вклад от диффузии электронного облака; σ_A – аппаратная погрешность.

Поскольку распределение расстояний между кластерами первичной ионизации подчиняется распределению Пуассона, стандартное отклонение распределения расстояний от ближайшего электрона трека до проволочки даётся формулой¹³

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{5}{16}} \cdot \frac{1}{N_c^2 x}, \quad (x \gg 1/N_c), \quad (1)$$

где x – расстояние от сигнальной проволочки до трека; $N_c = 29 \text{ см}^{-1}$ – число кластеров первичной ионизации в аргоне. Величина σ_s для $x \geq 3$ мм пренебрежимо мала по сравнению с другими вкладами ($\sigma_s \approx 10$ мкм).

Если электроны трека дрейфуют на расстояние $x \geq 1$ см, то наибольший вклад в пространственное разрешение ДК вносит продольная диффузия электронного облака ($\sigma_L = 220$ мкм на 1 см дрейфа в рабочей газовой смеси)¹⁴. Максимальный вклад диффузии в дрейфовом промежутке FTC ($y_{\max} = 22$ мм) при срабатывании электроники от $n \approx 10$ первых электронов составляет:

¹² S.F. Biagi, MAGBOLTZ, Version 2.2, University Liverpool.

¹³ J.A Jaroc, "Drift and proportional tracking chambers", SLAC-Pub-2647, 1980.

¹⁴ A. Peisert, F. Sauli, "Drift and Diffusion of Electrons in Gases: a compilation" CERN Yellow preprint 84-08, 1984.

¹⁰ Золочёная вольфрамовая проволочка диаметром 25 микрон.

¹¹ Проволочка из бериллиевой бронзы диаметром 150 микрон.

$$\sigma_D = \sigma_L \sqrt{\frac{y_{\max}}{n}} \approx 110 \text{ мкм.} \quad (2)$$

Аппаратурное разрешение $\sigma_A = \sqrt{\sigma_{\text{мех}}^2 + \sigma_{\text{эл}}^2}$ определяется

качеством регистрирующей электроники ($\sigma_{\text{эл}}$) и механической точностью изготовления детектора ($\sigma_{\text{мех}}$). Вклад в пространственное разрешение ДК, связанный с качеством электроники, обусловлен в основном погрешностью измерения времени прихода электронов на сигнальную проволочку: $\sigma_{\text{эл}} = \sigma_t \times v_{\text{др}}$, где σ_t – временное разрешение электроники. На стадии разработки детектора и регистрирующей электроники величина $\sigma_{\text{эл}}$ была оценена по данным работ^{15,16} и не превышала $\sigma_{\text{эл}} \leq 40 \div 50$ мкм. Вклад механических погрешностей изготовления детектора в погрешность измеряемой координаты $\sigma_{\text{мех}}$ изначально оценивался (и не превысил при производстве) $\sigma_{\text{мех}} \approx 35$ мкм.

Суммарный вклад всех вышеперечисленных факторов в ожидаемую погрешность определения координаты трека частицы составил $\sigma_{\Sigma} \approx 120$ мкм, что соответствовало требованиям L3.

С целью решения проблем многотрековых событий и право-левой неоднозначности в модуле FTC дополнительно определялась координата трека вдоль проволочки SW методом деления заряда, что давало предсказание координаты для точного её измерения модулями соседнего диска.

Влияние магнитного поля установки L3 ($B = 0,5$ Т) на FTC легко учитывалось благодаря поперечному расположению проволочек SW по отношению к вектору \mathbf{B} . В результате, снос дрейфующих электронов под воздействием силы Лоренца, $\mathbf{F}_L = e \cdot [v_{\text{др}} \times \mathbf{B}]$, происходил вдоль проволочек. Влияние магнитного поля при вычислении координаты трека частицы сводилось к уменьшению в $\cos\psi$ раз скорости дрейфа электронов: $v_{\text{др}}^B = v_{\text{др}} \cdot \cos\psi = 49,8$ мкм/нс, где $\psi = 12^\circ$ – угол между направлением дрейфа электрона и вектором поля \mathbf{E} в условиях FTC.

Третья глава посвящена описанию устройства детектора FTC и его систем обеспечения: регистрирующей электроники, высоковольтного питания, газового снабжения. Подробное описание FTC даётся в работах [3], [4]. На Рис. 2 показано размещение детектора в зазоре между

тепловыми экранами калориметра BGO и фланцем ТЕС в экспериментальной установке L3.

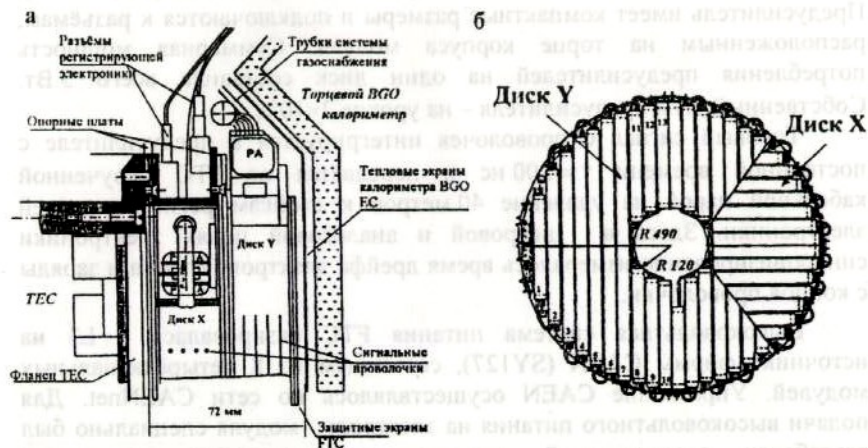


Рис. 2. а) Схема компоновки модулей FTC в зазоре между фланцем ТЕС и тепловыми экранами BGO; б) Размещение модулей FTC в дисках Y и X. Оба диска размещаются над трубой пучкового тракта ускорителя LEP.

Из Рис. 2а видно, что малое число каналов электроники позволило в зазоре шириной 72 мм разместить предусилители, кабели электроники и высоковольтного питания, трубки системы газоснабжения. Для защиты от наводок со стороны электроники и высоковольтного питания ТЕС и BGO диски FTC закрыты заземлёнными экранами из фольгированного стеклопластика G10. Каждый блок FTC включает в себя два диска (Диск Y и Диск X на Рис. 2б), собранных из модулей ДК. Диски диаметром 1 м развёрнуты относительно друг друга на 90° , что обеспечивает одновременное измерение X и Y координат трека частицы с обеих сторон от точки e^+e^- -взаимодействия. Общее число модулей в диске равно 26.

Сигналы в модуле FTC регистрируются с обоих концов проволочек SW. Это позволяет измерять одновременно координаты трека по времени дрейфа электронов и методом деления заряда. Сигнальные анодные проволочки SW из золочёного вольфрама с сопротивлением $R_{\text{пр}} = 100 \text{ }\Omega/\text{м}$ используются для обоих способов измерения координат, что, практически, сняло проблему старения для детектора, так как проволочки из высокорезистивных ($R_{\text{пр}} \geq 2500 \text{ }\Omega/\text{м}$) сплавов Ni, Cr, Al, используемые обычно для метода ДЗ, не устойчивы по отношению к

¹⁵ G. Schultz, J. Gresser, Nucl. Instrum. and Methods **151**, p. 413-431, 1978.

¹⁶ S. Bobkov et al., Nucl. Instrum. and Methods **226**, p. 376-382, 1984.

процессам старения¹⁷. Для регистрации сигналов с проволочек был разработан малощумящий четырёхканальный зарядочувствительный предусилитель с малым входным сопротивлением – 15 Ω (РА, Рис. 2). Предусилитель имеет компактные размеры и подключаются к разъёмам, расположенным на торце корпуса модуля. Суммарная мощность потребления предусилителей на один диск составила всего 5 Вт. Собственный шум предусилителя – на уровне $2 \times 10^{-3} \text{ e}^-$.

Токовый сигнал с проволочек интегрируется в предусилителе с постоянной времени $\tau = 200 \text{ нс}$ и передаётся от FTC скрученной кабельной парой на удаление 40 метров к стойкам регистрирующей электроники. Здесь в цифровой и аналоговой цепях электроники синхронизированно измерялось время дрейфа электронов трека и заряды с концов проволочки.

Высоковольтная система питания FTC базировалась в L3 на источнике фирмы CAEN (SY127), состоящем из 8 четырёхканальных модулей. Управление CAEN осуществлялось по сети CAENnet. Для подачи высоковольтного питания на электроды модуля специально был разработан прецизионный высоковольтный делитель на основе технологии высокорезистивных толстых плёнок, обеспечившей высокую температурную стабильность (не хуже, чем 5×10^{-4}) и точность значений резисторов на уровне 1×10^{-3} . Размеры делителя $20 \times 30 \times 0,5 \text{ мм}^3$ были заданы исходя из необходимости его размещения на модуле FTC.

Газовое питание детектора FTC было подключено в систему газового снабжения мюонных камер L3, что значительно уменьшило экономические затраты и позволило использовать имеющиеся уже оборудование и средства контроля. Скорость открытого продува газовой смеси $62\% \text{ Ar} + 38\% \text{ C}_2\text{H}_6$ составила 5 объёмов детектора в час или 240 л/ч.

Проблема тепловыделения FTC специально исследовалась ввиду плохих условий конвекции в зазоре и невозможности использовать систему охлаждения. Для уменьшения температурного градиента тепловыделяющие элементы вдоль края диска FTC были перераспределены так, чтобы высоковольтные делители чередовались с предусилителями. Газовый продув модулей на диске был организован последовательно с чередованием направления. Это привело к встречному движению и теплообмену газовых потоков в смежных модулях. В итоге, в реальных условиях было получено почти однородное распределение

температуры $\Delta t \leq 2^\circ \text{C}$, что соответствовало изменению скорости дрейфа электронов всего на уровне $|\Delta v_{др}/v_{др}| \leq 0,1\%$ [4].

В Таблице 1 приведены рабочие параметры конструкции FTC.

Таблица 1. Основные характеристики детектора FTC

N	Геометрические параметры			
	1	Радиус диска: минимальный максимальный	120 мм 490 мм	
2	Длина дрейфового промежутка модуля	2×22 мм		
3	Размеры дрейфовой ячейки	6 мм		
Количественные характеристики				
	в модуле	в диске	на одной стороне	с двух сторон
Число модулей FTC	—	26	52	102
Потребляемая мощность (Вт), в том числе в/в делителем и предусилителем (ПУ)	0,7	20	40	80
	0,57	15	30	60
	0,125	5	10	20
Число сигнальных проволочек SW	4	104	208	416
Число каналов регистрирующей электроники	2×4	160	320	640
	В модулях 1+3 и 11+13 каналы объединены			
Число каналов высоковольтного питания, из них для проволочек FW и катодов	2	52	104	208
	1	26	52	104
	1	26	52	104
Количество предусилителей	2	40	80	160
Количество тестовых генераторов	—	2	4	8
Число тестовых каналов	1	26	52	104

Четвертая глава содержит описание формирования электрического поля в модулях детектора FTC. Расчётным путём и экспериментально были выполнены:

¹⁷ M. Atac, "Wire chamber aging and wire material", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-34, p. 476-499, 1987.

- выбор оптимальной геометрии полеформирующих стрипов и их потенциалов, при которых неоднородность электрического поля в зоне дрейфа не превышает $|\Delta E/E| \leq 2\%$;
- расчёт структуры полеформирующих стрипов, обеспечивающей электростатическую защиту электрического поля в модуле от возмущающего воздействия внешних заземлённых экранов;
- испытание методики защиты электрического поля в модулях FTC;
- минимизация всех токов утечки в модуле на уровне $I_{\text{утечки}} \leq 50 \text{ нА}$.

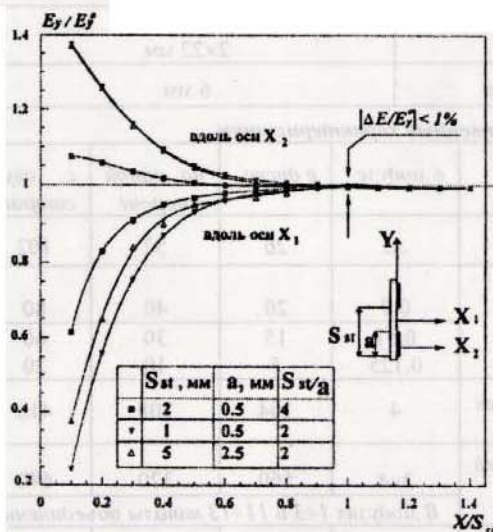


Рис. 3. Зависимость отношения продольных компонент напряжённости электрического поля E_y/E_y^0 для трёх вариантов геометрии стрипов, где E_y - "реальный" случай при наличии боковой стенки модуля и E_y^0 - "идеальный" случай бесконечно протяжённых электродов.

Для расчёта электрического поля использовался аналитический метод решения интегральных уравнений Пуассона, где учитывались размеры полеформирующих электродов (стрипов и проволочек), а также наличие диэлектрических стенок [5]. Результаты расчётов трёх вариантов геометрии стрипов представлены на Рис. 3. По оси ординат отложено отношение продольных компонент поля E_y/E_y^0 , где E_y - это "реальная" компонента напряжённости электрического поля в присутствии диэлектрической стенки с полеформирующими стрипами, а E_y^0 - "идеальная" компонента при бесконечных катодных и анодной плоскостях. По оси абсцисс отложено отношение координаты X (см. Рис. 2) к величине шага между стрипами S_{st} .

Наиболее оптимальной оказалась геометрия с шириной стрипа $a = 0,5$ мм и шагом $S_{st} = 2$ мм, которая обеспечивает в 2 мм от боковой стенки ($X/S_{st} = 1$) однородное электрическое поле ($|\Delta E_y/E_y^0| \leq 1\%$) при наименьшем градиенте и абсолютной величине напряжённости поля в

центре стрипа и посередине между стрипами. Это, практически, исключает микропробои между стрипами и возникновение самоподдерживающихся разрядов на их краях.

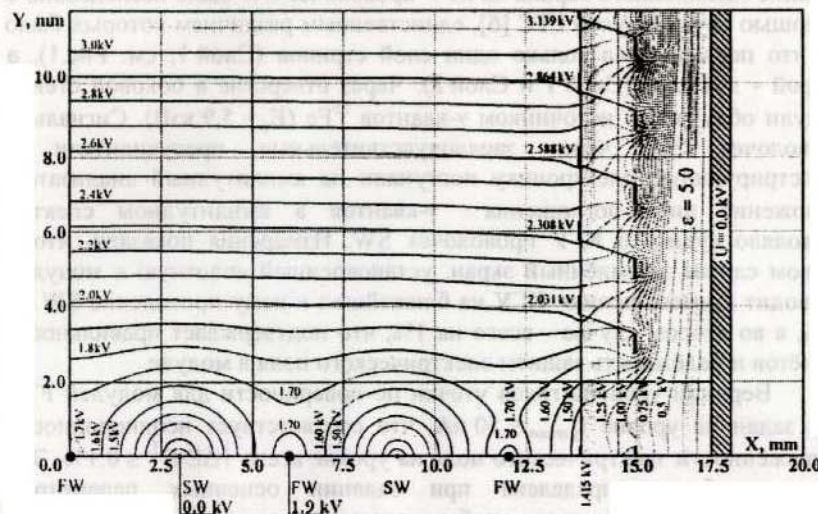


Рис. 4. Компьютерная симуляция структуры электрического поля в модуле FTC при наличии двух слоёв полеформирующих стрипов и заземлённого защитного экрана, установленного в 3,5 мм от границы внутреннего объёма. Внешний слой стрипов смещён на 1 мм вниз относительно внутреннего.

Расчёт структуры электрического поля в модуле с одним слоем полеформирующих стрипов (Слой 1, Рис. 1) показал, что при размещении снаружи заземлённого экрана однородное поле заметно искажается. Даже посередине модуля ($X = 0$, Рис. 1) продольная компонента поля E_y меняется на 15%. А на краях стрипов напряжённость электрического поля вырастает в 5 раз, достигая величины $E_y = 1,5$ кВ/мм, что крайне нежелательно из-за опасности возникновения микропробоев.

Для подавления негативного воздействия экрана на внешней стороне стенок с полеформирующими электродами был помещён второй слой стрипов (Слой 2, Рис. 1), соединённый с внутренним слоем и смещённый вниз на $S_{st}/2 = 1$ мм. Результирующая компьютерная симуляция электрического поля представлена на Рис. 4. Видно, что зазор между двумя слоями стрипов играет роль буфера между сильно неоднородным полем в зазоре "Слой 2 - экран" и однородным полем в модуле. Согласно данным расчёта, в зоне дрейфа электронов с координатами $|X| \leq 12$ мм

$5 \leq Y \leq 22$ мм поле практически однородно $|\Delta E/E| \leq 0,5\%$, что обеспечивает постоянство скорости дрейфа на уровне $|\Delta v_{др}/v_{др}| < 0,08\%$.

С целью экспериментальной проверки правильности расчётов влияние заземлённого экрана на КГУ проволочек SW было исследовано с помощью двух модулей FTC [6], единственным различием которых было то, что первый имел только один слой стрипов (Слой 1, см. Рис.1), а второй - два слоя (Слой 1 и Слой 2). Через отверстие в боковой стенке модули облучались источником γ -квантов ^{55}Fe ($E_\gamma = 5,9$ кэВ). Сигналы с проволочек SW через зарядочувствительные предусилители и регистрирующую электронику поступали на амплитудный анализатор. Положение пика поглощения γ -квантов в амплитудном спектре позволяло судить о КГУ проволочек SW. Измерения показали, что в первом случае заземлённый экран, установленный вплотную к модулю, приводит к уменьшению КГУ на ближайшей к нему проволочке SW на 30%, а во втором случае - всего на 1%, что подтверждает правильность расчётов и надёжность защиты электрического поля в модуле.

Верхний уровень токов утечки по поверхности для модулей FTC был задан на уровне $I_{утечки} \leq 50$ нА, что соответствует неоднородности напряжённости электрического поля на уровне всего $|\Delta E/E| \leq 0,1\%$. Эта величина была определена при задании основных параметров высоковольтного делителя, чтобы исключить влияние погрешностей этого делителя и технологии изготовления модулей на структуру электрического поля. При создании детектора все "уязвимые" с этой точки зрения узлы конструкции контролировались путём подачи на них высокого напряжения и последующего измерения токов утечки.

Самым эффективным способом удаления всех видов загрязнений оказалась ультразвуковая очистка, которая позволила обеспечить заданный уровень токов утечки $I_{утечки} \leq 50$ нА. В результате, точность потенциалов на стрипах $|\Delta U/U| \leq 0,1\%$ определялась прецизионностью изготовления резисторов высоковольтного делителя [7].

Пятая глава содержит описание методики выбора рабочего напряжения, обеспечивающего одновременное измерение координат трека по величине времени дрейфа и методом деления заряда. Приведены результаты изучения рабочих характеристик детектора на протонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ.

В рабочей точке по напряжению коэффициент газового усиления на проволочках SW должен быть достаточным для двух методов измерения координаты трека частицы. Точное определение координаты трека

частицы по времени дрейфа электронов обеспечивается КГУ на уровне¹⁸ $M \leq 4 \times 10^4$. В свою очередь, метод ДЗ требует большего газового усиления, поскольку он основывается на измерении зарядов (Q_A и Q_B) с обоих концов (А, В) проволочки, когда исходный заряд $Q_\Sigma = Q_A + Q_B$ делится обратно пропорционально отношению омических сопротивлений между точкой развития электронной лавины и землёй на концах проволочки, длиной λ , не завися от её суммарного сопротивления $R_{пр}$. Исходя из требования к FTC об одновременной регистрации треков нескольких частиц в условиях высокой шумовой загрузки и учитывая, что длина проволочек SW имеет разброс $\lambda = 30 \div 90$ см, пространственное разрешение метода ДЗ было определено равным $\sigma_{ДЗ}/\lambda \approx 1\%$. Для оценки необходимой при этом величины КГУ использовалась формула¹⁹:

$$\frac{\sigma_{ДЗ}}{\lambda} \approx k \frac{2 \cdot \rho_\Sigma}{Q_\Sigma}, \quad (1)$$

где $\rho_\Sigma \approx 2 \times 10^4$ - величина шума в единицах заряда с низкоомной проволочки и двух подсоединённых к ней предусилителей, сопротивлением $R_{ПГУ}$; $Q_\Sigma = N \times M$ - суммарный заряд, вычисленный как произведение газового усиления M на число электронов трека в дрейфовой ячейке от минимально ионизирующей частицы $N \approx 60 e^-$; $k = (R_{пр} + 2R_{ПГУ})/2R_{пр}$ - коэффициент. Из формулы (1) следует, что пространственное разрешение на уровне $\sigma_{ДЗ}/\lambda \approx 1\%$, достигается при величине КГУ более $M \geq 8 \times 10^4$.

Для достижения в модуле необходимого газового усиления исследовались разные варианты шага проволочек (s_{SW}) и возможные составы газовой смеси. Были изготовлены два прототипа модулей с $s_{SW} = 4$ мм и 6 мм, а в качестве рабочей газовой смеси рассматривались: 60%Ag + 40%CH₄, 70%Ag + 30%CH₄ и 62%Ag + 38%C₂H₆. Величина КГУ задавалась напряжением на полеформирующих проволочках U_{FW} . Результаты проведённых измерений показали, что при шаге $s_{SW} = 4$ мм требуемая величина КГУ не обеспечивается. Величина $M \geq 8 \times 10^4$ достигается только в двух газовых смесях: 70%Ag + 30%CH₄ и 62%Ag + 38%C₂H₆ при $s_{SW} = 6$ мм. От первой из них пришлось отказаться из-за её легковоспламеняемости. Рабочая точка во второй смеси, когда газовое усиление достигает значения $M = 8 \times 10^4$, соответствует

¹⁸ W. Blum, L. Rolandy, "Particle detection with drift chambers", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993.

¹⁹ V. Radeka, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS- 25, №1, p. 46-52, (1978).

напряжениям $U_{FW} = -1,8$ кВ и $U_C = -4,1$ кВ на проволочке FW и на катоде, соответственно.

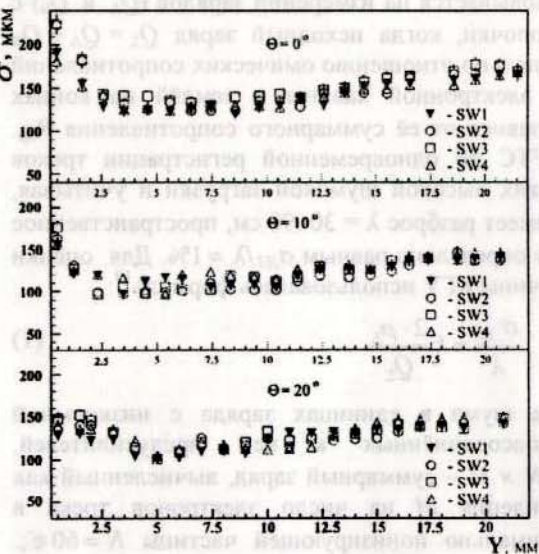


Рис. 5. Зависимости пространственного разрешения проволочек SW (дрейфовых ячейек) от длины дрейфа электронов (X) для различных углов наклона θ : 0° , 10° , 20° треков протонов с энергией $E_p = 1$ ГэВ к сигнальной плоскости.

Измерения рабочих характеристик FTC проводились на протонном пучке с энергией $E_p = 1$ ГэВ синхроциклотрона ПИЯФ [4, 8]. Для выделения трека протона использовались три пропорциональные камеры с катодным считыванием информации, каждая из которых имела две плоскости для измерения координат вдоль осей X и Y. Пространственное разрешение каждой МПК составляло $\sigma_{MPC}(x,y) \leq 100$ мкм, что обеспечило проведение трека протона в чувствительном объёме FTC с точностью $\sigma(x,y) \leq 90$ мкм. В результате, пространственное разрешение каждой дрейфовой ячейки определялось, как разница между измеренной координатой и положением трека, реконструированного по МПК и остальным трём ячейкам модуля.

Зависимости пространственного разрешения дрейфовых ячейек модуля FTC от длины дрейфа электронов для различных углов наклона трека θ приведены на Рис. 5. Видно, что пространственное разрешение в рабочей точке по напряжению не хуже $\sigma < 150$ мкм во всём дрейфовом промежутке и соответствует требованиям к детектору FTC. Ухудшение разрешения треков частиц вблизи проволочки SW вызвано изменениями времён дрейфа электронов из-за пространственного разброса кластеров первичной ионизации (см. формулу (1)). Ухудшение разрешения при

большом пути дрейфа электронов $X \geq 1$ см вызвано ростом влияния диффузии (см. формулу (2)).

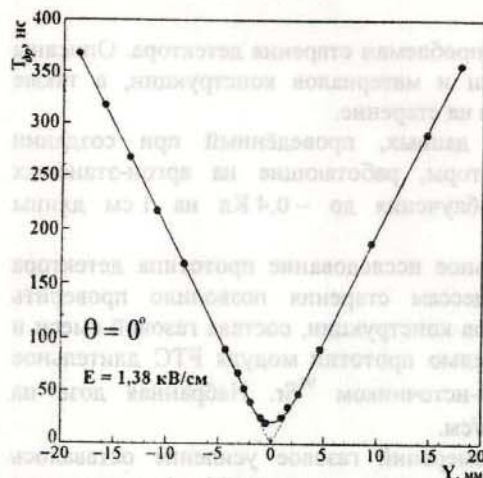


Рис. 6. Зависимость “координата трека – время дрейфа” (Y-T), измеренная в модуле FTC на протонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ с энергией 1 ГэВ.

Зависимость Y-T для угла наклона трека $\theta = 0^\circ$, полученная путём последовательного сканирования протонным пучком обоих дрейфовых промежутков модуля, представлена на Рис. 6. Видно, что зависимость линейна почти во всём дрейфовом промежутке, кроме участка $|Y| = 1$ мм вблизи проволочек. Нелинейность в диапазоне $|Y| = 2 \div 22$ мм составила менее 70 мкм.

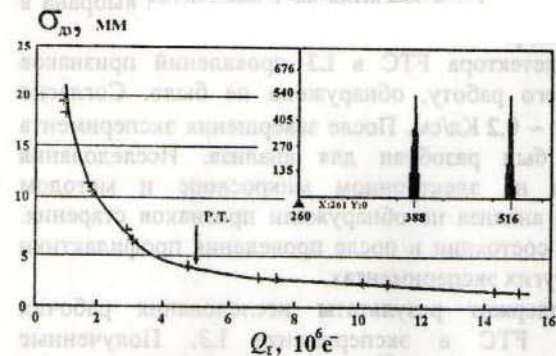


Рис. 7. Пространственное разрешение σ_{DZ} метода ДЗ от величины суммарного собираемого заряда на проволочке Q_T . В окне показаны спектры сигналов, набранных при двух фиксированных положениях γ -источника ^{55}Fe .

Пространственное разрешение измерения координаты трека методом ДЗ изучалось на стенде при помощи модуля FTC с длиной проволочки SW, равной $\lambda = 40$ см. Показано, что требуемое разрешение метода $\sigma_{DZ}/\lambda \approx 1\%$ достигается в рабочей точке, которая

соответствует заряду $Q_s = 5 \times 10^6 e^-$, образованному в дрейфовой ячейке треком минимально ионизирующей частицы, при газовом усилении $M = 8 \times 10^4$ [8].

Шестая глава посвящена проблемам старения детектора. Описаны критерии выбора газовой смеси и материалов конструкции, а также результаты испытаний детектора на старение.

Анализ опубликованных данных, проведённый при создании детектора, показал, что детекторы, работающие на аргон-этановых смесях, устойчивы к дозам облучения до $\sim 0,4$ Кл на 1 см длины проволоочки.

Но только экспериментальное исследование прототипа детектора FTC на устойчивость к процессам старения позволило проверить правильность выбора материалов конструкции, состава газовой смеси и скорости её продува. С этой целью прототип модуля FTC длительное время облучался на стенде β -источником ^{90}Sr . Набранная доза на проволоочках составила $\sim 0,45$ Кл/см.

С начала и до конца измерений газовое усиление оставалось стабильным, а темновой ток не превышал величины 10 нА в диапазоне напряжений $U_{FW} = 1,6 \pm 2,1$ кВ. Единственным признаком начала старения оказался сдвиг начала микропробоев в модуле по напряжению вниз на ~ 100 В с $U_{FW} = 2,1$ кВ, что сравнительно далеко от рабочей точки. Поэтому полученные результаты были признаны удовлетворительными с точки зрения возможности использования детектора FTC. Скорость продува газовой смеси на стенде – 5 объёмов за 1 час – была выбрана в качестве рабочей величины расхода газа.

За 10 лет работы детектора FTC в L3 проявлений признаков старения, влияющих на его работу, обнаружено не было. Согласно оценкам, FTC набрал дозу $\sim 0,2$ Кл/см. После завершения эксперимента один из модулей FTC был разобран для анализа. Исследования поверхностей проволоочек на электронном микроскопе и методом рентгенофлюоресцентного анализа не обнаружили признаков старения. FTC находится в рабочем состоянии и после проведения профилактики может использоваться в других экспериментах.

Седьмая глава содержит результаты исследования рабочих характеристик детектора FTC в эксперименте L3. Полученные результаты были представлены в работе ²⁰. На Рис. 8 приведена типичная зависимость координатного разрешения отдельной проволоочки SW от времени дрейфа электронов, измеренная в эксперименте. В данном

случае отбирались треки частиц, вылетевшие из точки взаимодействия e^+e^- в диапазоне углов захвата FTC.

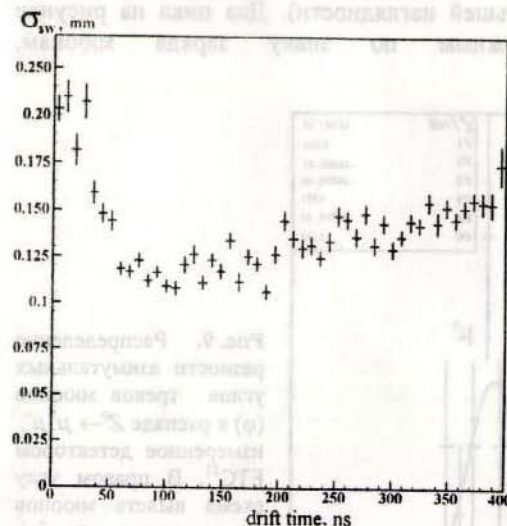


Рис. 8. Пространственное разрешение (σ_{SW}) отдельной проволоочки в зависимости от времени дрейфа электронов трека (drift time) в модуле FTC ²⁰.

Видно, что величина пространственного разрешения не хуже $\sigma_{SW} \leq 175$ мкм во всём дрейфовом промежутке и, практически, совпадает с результатами, полученными на синхроциклотроне ПИЯФ.

Пространственное разрешение измерения координаты трека методом деления заряда оценивалось по распределению величины разницы между координатами, измеренными ТЕС и методом ДЗ. Среднеквадратичное отклонение распределения для большинства модулей составило ≈ 22 мкм.

Детектор FTC, как один из компонентов установки L3, постоянно участвовал в наборе данных. Использование детектора FTC при определении знака заряда частиц ²¹ иллюстрируется на примере распада $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Мюоны, образовавшиеся в распаде, вылетают в противоположные стороны и имеют равные по величине импульсы – $P_\mu \approx 45$ ГэВ/с. Знак заряда мюонов определялся по их отклонению в магнитном поле установки L3 ($B = 0,5$ Тл). На Рис. 9 приведено измеренное с помощью FTC распределение разности азимутальных углов пары мюонов, образовавшихся в распаде $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Разность азимутальных углов $\phi = \phi_\mu^+ - \phi_\mu^- - \pi$ определена следующим образом: от

²¹ А.А. Воробьёв, А.Г. Крившич, В.А. Щегельский, Сборник ПИЯФ "ХХV Основные направления научной деятельности ОФВЭ", стр. 67-68, 1996.

²⁰ D. Prokofiev, V. Schegelsky et. al., PNPI preprint EP-23-1996, 2116.

азимутального угла изгиба трека φ_{μ^+} , измеренного в FTC для μ^+ -мезона, вычитается угол φ_{μ^-} , измеренный во второй половине FTC для μ^- -мезона, а также величина π (для большей наглядности). Два пика на рисунке соответствуют противоположным по знаку заряда мюонам, зарегистрированным в FTC.

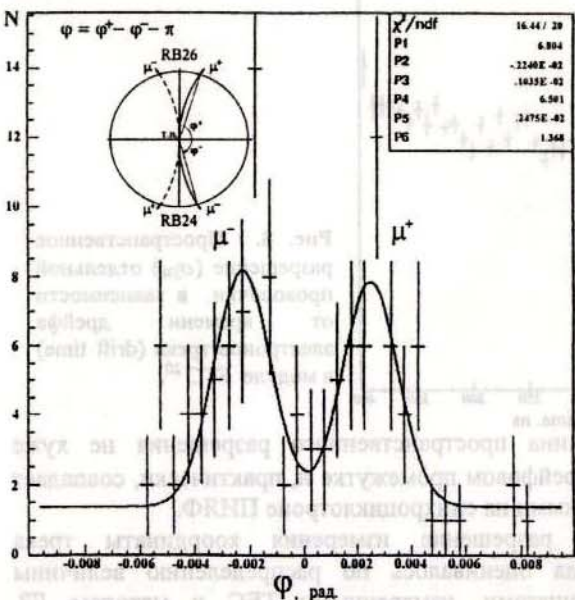


Рис. 9. Распределение разности азимутальных углов треков мюонов (φ) в распаде $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, измеренное детектором FTC²¹. В правом углу схема вылета мюонов из точки e^+e^- взаимодействия L3. На схеме показаны азимутальные углы изгиба треков φ_{μ^+} и φ_{μ^-} .

Измеренный детектором изгиб траектории мюона оценивается сагитой S , которая вычисляется как $S = \langle R \rangle \cdot \varphi_{\mu}^2 / 8 \approx 75$ мкм, где $\langle R \rangle = 124$ м – средний радиус кривизны траекторий мюонов в пределах углового захвата FTC (см. стр. 7), $\varphi_{\mu} = 2.2$ мрад, определен по положению пиков μ^+ и μ^- (см. P2, P5 на Рис. 9). Полученный результат говорит о хорошем пространственном разрешении, точности выстройки детектора и об отсутствии систематических ошибок.

Другой пример использования FTC приводится в работе²² по исследованию предсказаний квантовой электродинамики для реакции $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$. Отбор событий этой реакции осуществлялся с помощью детекторов ТЕС и FTC, перекрывавших интервалы косинусов углов вылета частиц $|\cos(\theta)| < 0,883$ и $0,833 < |\cos(\theta)| < 0,97$, соответственно. Причём три точки значений сечения реакции в области малых углов были

получены исключительно с помощью FTC. Информация о треках заряженных частиц в ТЕС и FTC использовалась для идентификации γ -квантов в качестве “вето”. Полученная эффективность “вето” составила $99,98\% \pm 0,02\%$.

Выводы содержат основные результаты проделанной работы:

1. Разработан и построен для эксперимента L3 торцевой координатный детектор на основе модулей дрейфовых камер FTC, позволяющий регистрировать треки заряженных частиц в диапазонах полярных углов $14^0 \leq \theta \leq 35^0$ и $145^0 \leq \theta \leq 166^0$ и азимутальных углов $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.
2. Разработан и применён алгоритм оптимизации всех рабочих параметров детектора в условиях ограниченного пространства для его размещения. В результате получены одинаковые условия дрейфа электронов во всех дрейфовых ячейках модулей, что упростило процедуру калибровки детектора.
3. Разработан и реализован в конструкции модулей FTC метод одновременного формирования однородного электрического поля и его электростатической защиты от искажающего воздействия внешних электродов.
4. Впервые на низкорезистивной анодной проволочке (100 Ω /метр) реализовано одновременное измерение координат трека частицы по времени дрейфа электронов и методом деления заряда. При этом пространственное разрешение метода деления заряда (ДЗ) составило $\sigma_{DZ}/\lambda \approx 1\%$, где λ – длина проволочки, что близко к лучшим результатам при измерениях на высокорезистивной проволочке.
5. Пространственное разрешение дрейфовой ячейки FTC при регистрации трека частицы составило $\sigma_x \leq 150$ мкм. Угловое разрешение детектора $\sigma_{\theta} \leq 10$ мрад. Обе величины были измерены на синхротроне ПИЯФ и на коллайдере LEP в CERN, результаты совпадают друг с другом и удовлетворяют требованиям эксперимента L3.
6. После 10 лет работы в составе установки L3 детектор FTC набрал суммарную дозу 0,2 Кл/см без ухудшения рабочих характеристик в результате процессов старения и находится в рабочем состоянии.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. B. Adeva, M. Aguilar-Benitez, H. Akbari, J. Alcaraz, A. Aloisio, J. Alvarez-Taviel, ... G. Gavrilo et al., “The construction of the L3 experiment”, Nucl. Instrum. and Methods **A289** (1990), p. 35-102.
2. В.А. Андреев, Г.Е. Гаврилов, А.Г. Крившич, С.К. Патричев и др., “Пропорциональные камеры с высокой однородностью коэффициента газового усиления для детектора переходного излучения”, Материалы

²² O. Adriani, M. Aguilar-Benitez, et al., Phys. Lett. **B 288**, p. 404-411, 1992.

- Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам, Дубна, 1988, стр. 189–193.
3. G. Alkhazov, V. Andreev, A. Atamanchuk, G. Gavrilo, V. Ivochkin, A. Krivshich et. al., "Forward tracking chamber (FTC) in L3 detector. Part I. General description", PNPI preprint EP-23-1996, **2115**.
 4. V. Andreev, G. Gavrilo, A. Krivshich, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, S. Volkov, "Design principles of the end cap drift chambers in the L3 experiment", Nucl. Instrum. and Methods **A430** (1999), p. 245-259.
 5. G. Gavrilo, A. Krivshych and M. Jarmarkin, "Influence of external grounded screens on electric field structure in a drift chamber", Nucl. Instrum. and Methods **A356**(1995), p. 189-195.
 6. А.В. Андреев, Г.Е. Гаврилов, А.Г. Крившич, В.П. Малеев, Л.А.Щипунов, "Воздействие внешних экранов на коэффициенты газового усиления в дрейфовых камерах детектора FTC", Препринт ПИЯФ N1797, май 1992 г.
 7. А.В. Андреев, Г.Е. Гаврилов, А.Г. Крившич, В.М. Кузьмин, Т.В. Николаева, "Минимизация тока утечки в дрейфовых камерах", Препринт ПИЯФ N1842, декабрь 1992 г.
 8. В.А. Андреев, А.Г. Атаманчук, Н.Ф. Бондарь, А.Л. Воинов, А.А. Воробьёв, С.В. Волков, Г.Е. Гаврилов и др., "FTC - детектор в установке L3 (ЦЕРН)", сборник работ ПИЯФ "Основные результаты исследований 1990-1991 гг. (оперативные результаты)", Гатчина, 1992, стр. 190-192.