



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФЭ 96-14
ОЭИ УНК

Е.В.Власов¹, Ю.М.Гуз^{1;11}, С.П.Гуменюк^{1;8}, А.М.Зайцев¹,
Ю.М.Иванюшенков¹, А.Н.Карюхин¹, В.Ф.Образцов¹,
Л.А.Петровых^{1;8}, А.Б.Фенюк¹, S.J.Alvsvaag², M.Bari¹², G.Barreira⁶,
A.C.Benvenuti³, M.Bigi¹¹, M.Bonesini⁸, M.Bozzo⁵, T.Camporesi⁴,
V.Cassio¹¹, L.Castelliani¹⁰, R.Cerreceto⁵, F.Chignoli⁸, G.Della Rica¹²,
D.R.Dharmasiri⁹, M.C.Espirito Santo⁶, E.Falk⁷, P.Ferrari⁸, D.Gamba¹¹,
H.Garling⁷, V.Giordano³, M.Guerzoni³, V.Hedberg⁷, G.Jarlskog⁷,
A.Klovning², I.Kronkvist⁷, L.Lanceri¹², R.Leoni⁸, O.A.Maeland²,
A.Maio⁶, R.Mazza⁸, E.Migliore¹¹, F.L.Navarria³, P.Negri⁸, B.Nossum⁹,
A.Onofre⁶, M.Paganoni⁸, M.Pegoraro¹⁰, L.Peralta⁶, L.Petrovykh⁸,
M.Pimenta⁶, P.Poporat¹², M.Prest¹², A.L.Read⁹, A.Romero¹¹,
L.Simonetti¹¹, B.Skaali⁹, B.Tome⁶, E.Torassa¹¹, P.P.Trapani¹¹,
E.Valazza⁴, M.G.Verardi³

STIC — НОВЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР В ОБЛАСТИ МАЛЫХ УГЛОВ УСТАНОВКИ DELPHI

¹ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

² Отделение физики университета г. Бергена, Норвегия

³ Отделение физики университета г. Болоньи, Италия

⁴ CERN, Европейский центр ядерных исследований, Женева, Швейцария

⁵ Отделение физики университета г. Генуи и INFN, Италия

⁶ LIP и IST-FCUL Коимбра и Лиссабон, Португалия

⁷ Отделение физики университета г. Лунда, Швеция

⁸ Отделение физики университета г. Милана, Италия

⁹ Отделение физики университета г. Осло, Норвегия

¹⁰ Отделение физики университета г. Падуи и INFN, Италия

¹¹ Отделение физики университета г. Турина и INFN, Италия

¹² Отделение физики университета г. Триеста и INFN, Италия

Аннотация

Власов Е.В. и др. STIC — новый электромагнитный калориметр в области малых углов установки DELPHI: Препринт ИФВЭ 96–14. – Протвино, 1996. – 21 с., 22 рис., библиогр.: 24.

Описан калориметр STIC (Small angle Tile Calorimeter), служащий монитором светимости и электромагнитным калориметром в области малых углов установки DELPHI (CERN). Представлены как характеристики, полученные на тестовых пучках, так и данные с e^+e^- -коллайдера LEP. Энергетическое разрешение детектора составляет $13.5\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$, точность в определении радиального положения ливня для 45 ГэВ электронов не хуже 250 мкм на границе между двумя башнями при систематической ошибке не более 50 мкм. Калориметр оборудован кремниевыми детекторами максимума ливня, позволяющими измерять направление развивающейся ливень частицы с угловым разрешением ~ 13 мрад при энергии частицы 45 ГэВ. Система вето калориметра, состоящая из двух сцинтилляционных плоскостей, обеспечивает $e - \gamma$ разделение и позволяет вырабатывать триггер на события с одиночным γ -квантом.

Abstract

Vlasov E.V. et al. STIC, the New DELPHI Very Forward Electromagnetic Calorimeter: IHEP Preprint 96–14. – Protvino, 1996. – p. 21, figs. 22, refs.: 24.

The new DELPHI (CERN, LEP collider) very forward electromagnetic calorimeter STIC (Small angle Tile Calorimeter) serving as a luminosity monitor is described. The results from extensive test beam measurements as well as performance during 1994 LEP run are presented. The energy resolution of $13.5\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$ and resolution of 250 μm in radial shower position measurements at the edge between two towers for 45 GeV electrons are achieved. The calorimeter is equipped with: a) silicon shower maximum detectors to improve the accuracy in the determination of the showering particle direction; b) veto system composed of two scintillator layers to provide $e - \gamma$ separation and to trigger the single photon events.

Введение

На установке DELPHI [1] до недавнего времени для измерения светимости и в качестве электромагнитного калориметра в области малых углов служил SAT (Small Angle Tagger). В процессе его эксплуатации и по мере постоянного усовершенствования установки DELPHI выявился ряд недостатков (открытый промежуток между 8 и 11°, наличие мёртвых зон в вертикальной плоскости, большой внутренний радиус ~ 10 см начала активной области калориметра при радиальных размерах современной пучковой камеры ~ 5 см), которые существенно ограничивали потенциал DELPHI, приводя, в частности, к систематической ошибке в определении светимости $\sim 0.5\%$, в то время как постоянный прогресс в теоретических вычислениях и Монте-Карло моделировании процесса Баба (процесс упругого рассеяния электрон-позитронных пар на малые углы, используемый на e^+e^- -коллайдере LEP для определения светимости) позволил к настоящему времени достичь точности $\sim 0.2\%$.

Поэтому для улучшения характеристик установки DELPHI при эксплуатации LEP в режиме повышенной светимости, а также при повышенной энергии LEP (LEP200), коллаборацией DELPHI было решено [2] заменить SAT калориметром STIC (Small angle **T**He **C**alorimeter), к которому были предъявлены требования по измерению светимости с систематической точностью порядка 0.1% и полной герметичности калориметра в области углов 3-11°.

Калориметр с указанными параметрами был создан и установлен внутри установки DELPHI в перерыве между сеансами 1993 и 1994 гг. [3,4,5,6,7].

Перед калориметром установлен сцинтилляционный годоскоп, который позволяет вырабатывать триггер на одиночный γ -квант в области углов 3-11°. Это существенно для регистрации на LEP200 процессов “радиационного возврата” $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$. Для улучшения отделения этого процесса от фона, вызванного электронами, образованными при взаимодействии электрон-позитронного пучка с остаточным газом пучковой камеры, детектор может измерять направление ливня с точностью ~ 13 мрад при помощи двух плоскостей кремниевых детекторов (смон-

тированных внутри калориметра), служащих в качестве детекторов максимума ливня. В статье представлены наиболее важные особенности конструкции калориметра STIC и его составляющих частей. Приведены результаты испытаний детектора на тестовых пучках и данные о его функционировании на LEP.

DELPHI

Внутренняя часть

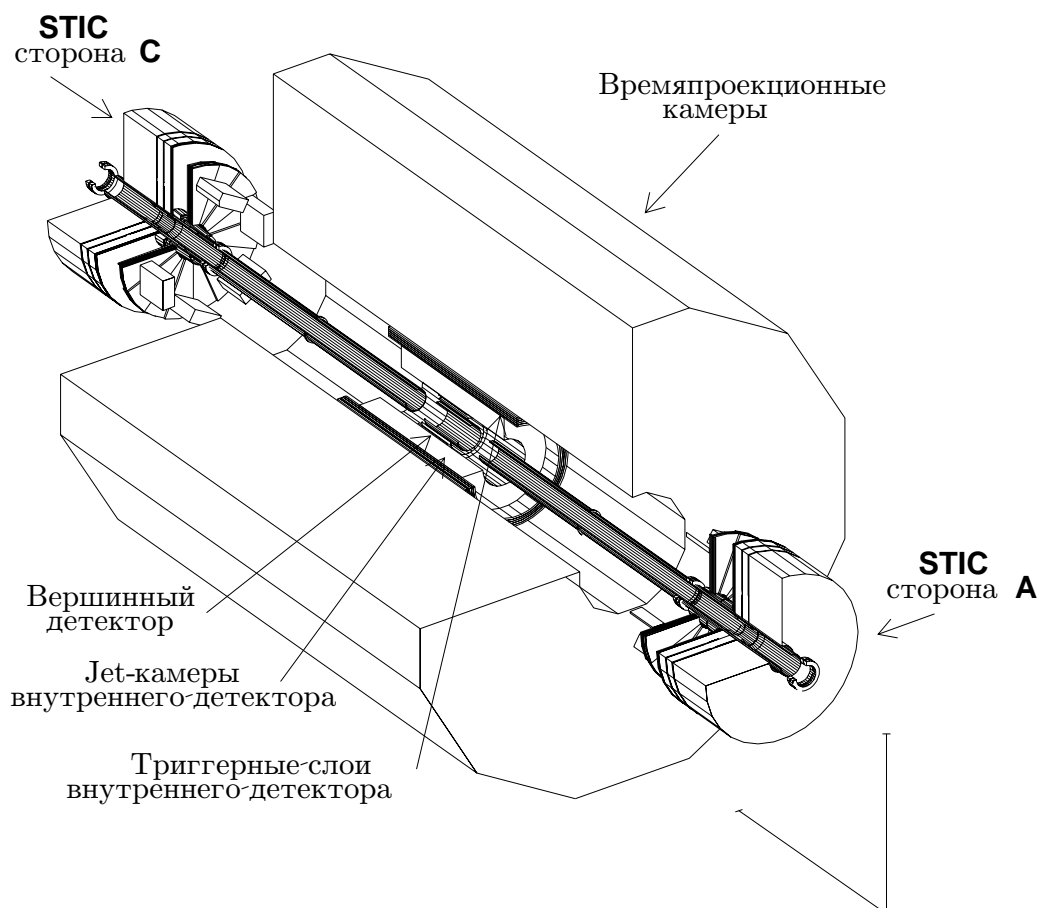


Рис. 1. Общий вид внутренней части установки DELPHI и расположение в ней калориметра STIC.

1. Элементы конструкции

1.1. Калориметр

STIC представляет из себя слоистый (свинец – сцинтиллятор) калориметр, в котором свет от электромагнитного ливня в сцинтилляторе передаётся на фо-

топриёмники, расположенные в задней части калориметра, посредством спектросмещающих пластмассовых волокон, идущих перпендикулярно сквозь отверстия в плоскостях поглотителя и сцинтиллятора и служащих световодами. Такая техника съёма сигнала была впервые предложена в работе [9] и развита в дальнейшем в работах [10,11]. Спектросмещающие волокна распределены однородно по поперечному сечению калориметра и осуществляют светосбор по всей его глубине. Применение большой плотности волокон [12,13] позволило значительно уменьшить неоднородности в светосборе, характерные для спектросмещающей техники считывания сигнала [10,11].

1.1.1. Структура калориметра

STIC состоит из двух независимых цилиндрических детекторов, симметрично размещённых по обе стороны от области взаимодействия на расстоянии ± 2200 мм. Схематическое изображение внутренней части установки DELPHI и калориметра STIC в ней представлено на рис. 1. Каждое плечо образовано из двух полуцилиндров, смонтированных вокруг пучковой камеры и поддерживаемых при помощи квадруполей LEP. Апертура калориметра составляет от 29 до 185 мрад по углу θ (что соответствует изменению радиуса от 65 до 420 мм при $z=2200$ мм) и 2π по азимутальному углу. Представление о конструкции калориметра можно получить из рис. 2 (общий вид) и рис. 3 (самплинг-структура), где изображена малая часть калориметра в разрезе. Габаритные размеры детектора составляют: диаметр 86 см, длина 89.5 см, масса каждого полуцилиндра около 750 кг.

Полуцилиндры являются независимыми модулями и объединяют по 47 слоёв свинцовых пластин и сцинтилляционных сегментов и по две плоскости кремниевых полосковых детекторов. Общая толщина калориметра STIC, равная 367.5 мм, соответствует $\sim 27X_0$.

Основной сборочной единицей калориметра является 3-мм свинцовая плоскость в виде полудиска, на которой прецизионно (с точностью ~ 50 мкм) с помощью штифтов ($\varnothing(1\pm 0.003)$ мм) закреплены 80 сцинтилляционных сегментов толщиной 3 мм, разделённых радиально на 10 колец, а по азимутальному углу — на 8 одинаковых (22.5°) секторов. Ширина колец для первого (ближайшего к области взаимодействия) слоя составляет 30 мм, за исключением внутреннего (35 мм) и наружного (77.5 мм) слоев. С увеличением номера слоя все кольца (кроме наружного, ограниченного сверху габаритами детектора) проективно расширяются. Для оптической изоляции сцинтилляционных сегментов и увеличения светосбора, между сегментами (и вокруг них) проложены полоски (листы) белого пластика Tyvek¹ толщиной 120 мкм. Для наглядности первая, средняя и последняя сцинтилляционные плоскости изображены на рис. 4.

Впервые для электромагнитного калориметра была реализована проективная башенная структура с непрерывными плоскостями абсорбера, что позволило обес-

¹Tivek, Du Pont.

STIC

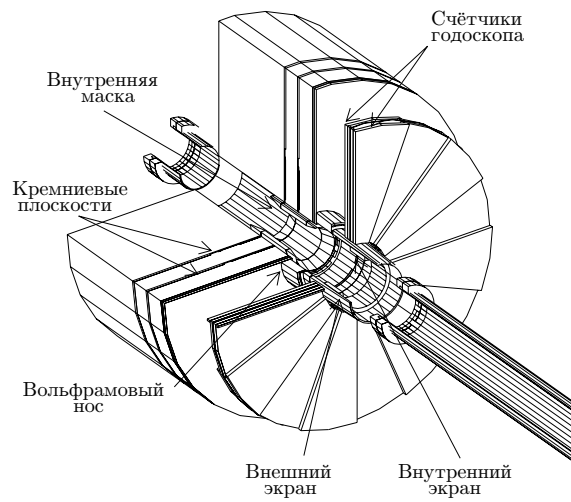


Рис. 2. Общий вид калориметра STIC. Внутренний и наружный экраны предназначены для защиты от синхротронного излучения LEP.

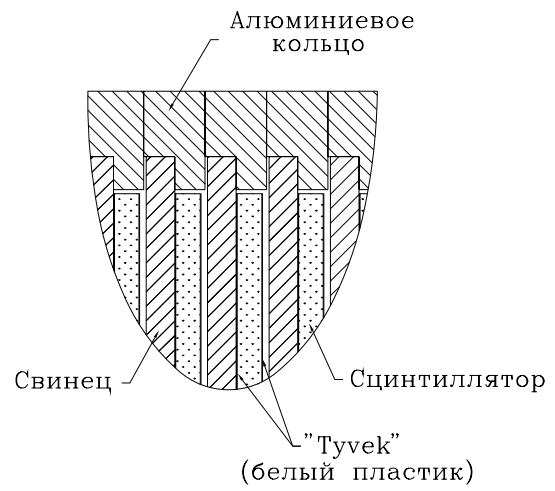


Рис. 3. Сэмплинговая структура калориметра STIC.

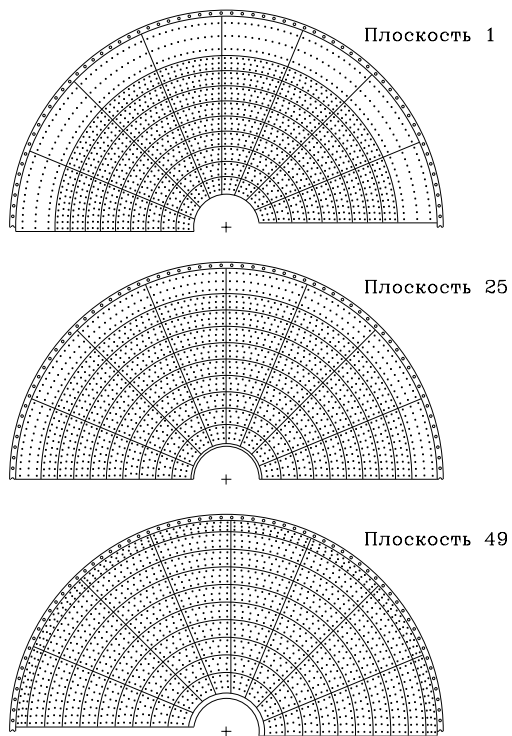


Рис. 4. Сцинтилляционные плоскости калориметра.

печить полную герметичность и устранить неоднородности в энергетическом отклике, характерные для калориметров, собранных из отдельных модулей.

Светосбор осуществляется при помощи спектросмещающих волокон² диаметром 1 мм, идущих перпендикулярно плоскостям калориметра. Алюминизированные с одного конца для увеличения светосбора и объединённые для каждой башни в пучки волокна просматриваются через 5-мм воздушный промежуток фототетрадами³. Положение фототетродов было оптимизировано по отношению к рассеянному магнитному полю установки DELPHI в месте расположения калориметра.

Помимо проективного расширения сцинтилляционных сегментов в конструкции калориметра предусмотрен азимутальный поворот $\sim 3^\circ$ всех плоскостей относительно начального положения, что позволяет полностью ликвидировать мёртвую зону в месте соединения двух половинок калориметра. Кроме того, неизбежно возникающее при этом небольшое отклонение положения волокон от прямых линий, проходящих через область взаимодействия, исключает прямое прохождение частиц сквозь них. Данный азимутальный поворот реализуется в калориметре посредством небольшого (375 мкм) пошагового сдвига боковых границ соседних плоскостей друг относительно друга, что можно видеть на рис. 4.

Фронтальная плоскость калориметра (так называемая нулевая), идентичная первой, но изготовленная из алюминия и несущая на себе плексигласовые сегменты, служит для мониторинга калориметра при помощи светодиодов, вмонтированных внутри сегментов [8].

Вся калориметрическая часть детектора, а также плоскости для крепления кремниевых детекторов и системы светодиодного мониторинга были изготовлены в опытном производстве ИФВЭ. Здесь также были осуществлены сборка всех свинцово-сцинтилляционных плоскостей и предварительная проверочная сборка модулей.

1.1.2. Поглотитель

Исходным материалом для изготовления плоскостей поглотителя служили свинцовые пластины с габаритами $0.5 \times 1.0 \text{ м}^2$, раскатанные до толщины $(2.95 \pm 0.05) \text{ мм}$. После тщательной очистки на боковые поверхности наклеивались листы из нержавеющей стали толщиной 100 мкм. В качестве клея применялась предварительно пропитанная стеклоткань⁴, широко используемая при изготовлении многослойных печатных плат. Этот способ склейки использовался ранее при изготовлении калориметров типа “аккордеон” [14]. Основное преимущество плёночного клея перед другими — гарантированное обеспечение нанесения клеевого слоя одинаковой толщины по всей поверхности пластины. Полимеризация клея происходила в течение 4 часов при температуре около 100°C под давлением 4-5 кг/см². Использование плавающей верхней плиты и системы ограничивающих вставок при прессовании позволило изготовить плоскости поглотителя равной толщины.

²Kuraray Y7.

³Hamamatsu 1" R2149.

⁴Vicotex 176, BROCHIER SA.

Каждая плоскость имеет в себе 1656 отверстий диаметром 1.9-2.1 мм (в зависимости от угла наклона волокна к оси пучка) для прохождения спектросмещающих волокон и 160 глухих отверстий диаметром 1 мм для фиксации сцинтилляционных сегментов. Сверление слоёных материалов с сильно отличающимися физическими свойствами (свинец и нержавеющая сталь) представляет собой чрезвычайно трудоёмкую и деликатную задачу. Поэтому поле отверстий для оптических волокон было изготовлено методом штампования на станке с числовым программным управлением.⁵ Время изготовления одной пластины составило 45 минут, что в 30 раз меньше времени, какое занял бы процесс сверления такого же количества отверстий. Несмотря на то, что точность в выполнении отверстий составляла лишь 0.1 мм, она не имела особого значения, так как диаметр отверстий был выбран чуть большим, чем необходимо для прохождения волокна, а все прецизионные позиционирующие отверстия были выполнены на другом оборудовании. Всего в калориметре было проделано около 650 тысяч отверстий для волокон и 15 тысяч — для крепления сегментов.

Одним из этапов в производстве плоскостей поглотителя являлось изготовление дюралюминиевых колец. Кольца служат несущей частью для поглотителя и определяют геометрию калориметра (рис. 4). Поэтому на толщину колец налагались очень жёсткие требования. На рис. 5 представлено распределение отклонения толщины колец от номинала, из которого видно, что статистическая точность в изготовлении колец составила 6 мкм. Кольца при изготовлении маркировались в соответствии с номерами слоёв, и каждая половинка кольца использовалась таким образом, чтобы при объединении двух полуцилиндров пары с одинаковыми номерами образовывали как бы прежние неразрезанные кольца. По завершении обработки контура плоскость поглотителя с готовым полем отверстий для спектросмещающих волокон клеивалась⁶ с помощью специальной оснастки в соответствующее ей полукольцо (см. выше). После этого на высокоточном (~ 2 мкм) оборудовании с числовым программным управлением⁷ за одну установку изготавливались все ответственные позиции — сверлились посадочные отверстия для сцинтиллятора, растачивались посадочные полуотверстия для колец и отверстия для стягивающих шпилек. При изготовлении поддерживалась постоянная температура $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

В результате предпринятых мер была достигнута высокая точность при производстве плоскостей поглотителя. Например, отклонение положения центров полуотверстий от номинального значения на базе около 800 мм было не более 20 мкм. В процессе изготовления проводились многочисленные проверки качества работы. На рис. 6 представлены данные по взвешиванию пластин поглотителя. Точность взвешивания составляла 20 г. Изменение веса на 100 г соответствует изменению толщины пластины на 30 мкм. Видно, что разброс пластин по толщине составил около 100 мкм.

⁵Trumatic 180LW, TRUMPF Maschinenfabrik.

⁶Araldit AW106, Harter HV 953U.

⁷МАНО 2000, МАНО.

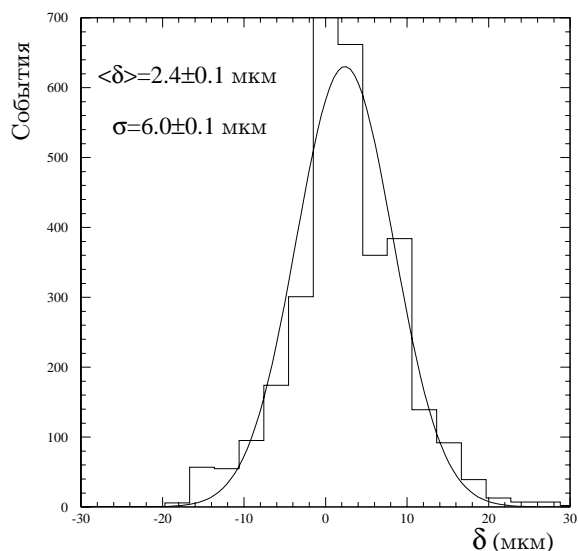


Рис. 5. Контроль за изменением толщины колец.

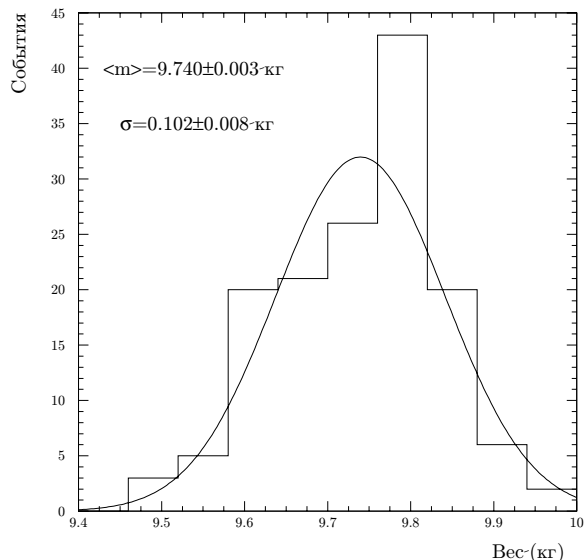


Рис. 6. Измерение веса пластин поглотителя.

1.1.3. Сцинтиллятор

Сцинтилляционные сегменты изготавливались механическим образом из стандартных пластин размером $150 \times 150 \times 3 \text{ мм}^3$, полученных разработанным в ИФВЭ методом литья полистирола под давлением [15] с добавками 1.5% РТР и 0.05% РОРОР. Общее на весь детектор количество изготовленных сегментов составило 15680 штук. При этом вследствие проективности калориметра число различных типов сегментов достигло 490.

Обработка сегментов проводилась в воде при комнатной температуре на фрезерных многофункциональных станках с числовым программным управлением.⁸ Фрезерование и сверление сцинтиллятора в воде позволили решить проблему разогревания материала, характерную при работе с полистиролом, и тем самым значительно ускорить процедуру обработки. Так, для изготовления одного сегмента требовалось от 5 (для первого кольца) до 15 (для последнего) минут, а изготовление всей партии заняло около 5 месяцев (на трёх станках в две смены).

Изготовление сегментов осуществлялось в специальных приспособлениях, позволяющих держать сцинтилляционный сегмент неподвижным относительно нулевой точки станка в течение его обработки различными инструментами. Точность станка составляла 10 мкм. При обработке сегментов предусматривался зазор $\sim 120 \text{ мкм}$ для просовывания отражающей плёнки Tyvek.

⁸ГФ2171, ЗФС, Горький.

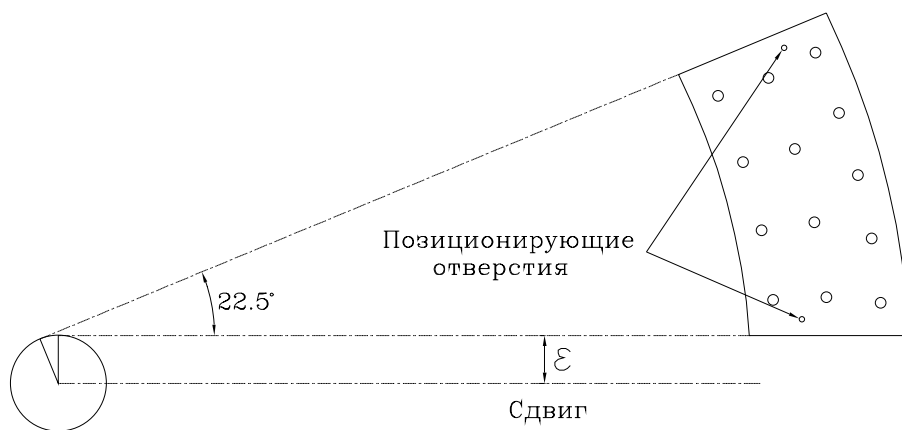


Рис. 7. Изображение сцинтиляционного сегмента из 1-го слоя и 3-го кольца крупным планом.

На рис. 7 крупным планом изображены сегмент из третьего кольца первой плоскости и способ задавания его геометрии. Сегмент асимметричен. Степень асимметрии определяется упомянутой выше величиной сдвига ε . Сдвиг зависит от номера слоя и меняет свой знак во второй (считая от области взаимодействия) половине калориметра. Соответственно для среднего 25-го слоя величина сдвига нулевая, и все сегменты этого слоя симметричны относительно биссектрисы. Данный сдвиг более отчётливо виден на рис. 8, где представлены сегменты 1-, 5- и 10-го колец для 1- и 49-го слоёв, наложенных друг на друга. Из рисунка также видно проективное расширение сегментов с увеличением номера слоя (т.е. с удалением от области взаимодействия) кроме сегментов последнего 10-го кольца, ограниченных сверху габаритами детектора.

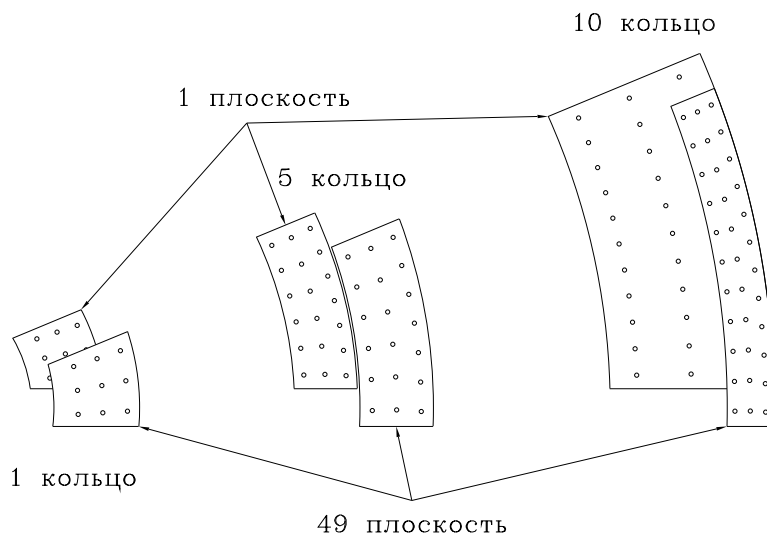


Рис. 8. Сцинтиляционные сегменты первого и последнего слоёв, спроецированные на одну плоскость. Позиционирующие отверстия не показаны.

Количество спектросмещающих волокон на единицу площади сегмента зависит от положения сегмента в калориметре. Для колец с 1-го по 9-е плотность расположения волокон уменьшается от 0.8 в начале калориметра до 0.6 1/см² в конце. Для 10-го кольца плотность, наоборот, увеличивается с 0.3 в начале до 1.0 1/см² в конце.

Как и в случае с плоскостями поглотителя, сцинтилляционные сегменты в процессе изготовления проходили тщательный контроль. Ширина каждого сегмента сразу по изготовлению была измерена цифровым штангенциркулем с точностью не хуже 30 мкм. Около 10% сегментов были полностью обмеряны на просмотровых столах⁹ (используемых при исследовании снимков с пузырьковых камер) с точностью порядка 2 мкм. Процедура обмера заключалась в нахождении координат центров всех отверстий, а также прямых и дуг, задающих контур сегмента. При последующей математической обработке осуществлялась привязка измеренных координат позиционирующих отверстий к их теоретическим значениям и проводилась оценка отклонения измеренных данных от заданных. Результаты обработки показали, что величина наибольшего отклонения как размеров сцинтилляционных сегментов, так и положений центров отверстий от заданных параметров составила ~ 30 мкм.

Кроме контроля отдельных деталей было проведено тщательное измерение положения сцинтилляционных сегментов на свинцовой плоскости относительно базовых полуотверстий, определяющих положение плоскости относительно оси пучка. Измерения были выполнены в CERN на оборудовании, аналогичном просмотровым столам в ИФВЭ. Измерялась степень отклонения границ между первым и вторым и между вторым и третьим кольцами сегментов от окружностей заданного радиуса. Результаты измерений границы между 1- и 2-м кольцами, изображённые на рис. 9, показали отклонение не больше 25 мкм.

1.1.4. Сборка калориметра

Каждое плечо калориметра, как было упомянуто выше (см. рис 2), состоит из двух полуцилиндров, замкнутых вместе вокруг пучковой трубы. Эти полуцилиндры при стыковке опираются полуотверстиями на цилиндрические направляющие и фиксируются винтами при помощи Г-образных профилей, закреплённых по краям алюминиевых полуколец.

⁹ПУОС-4, ЛОМО, Ленинград.

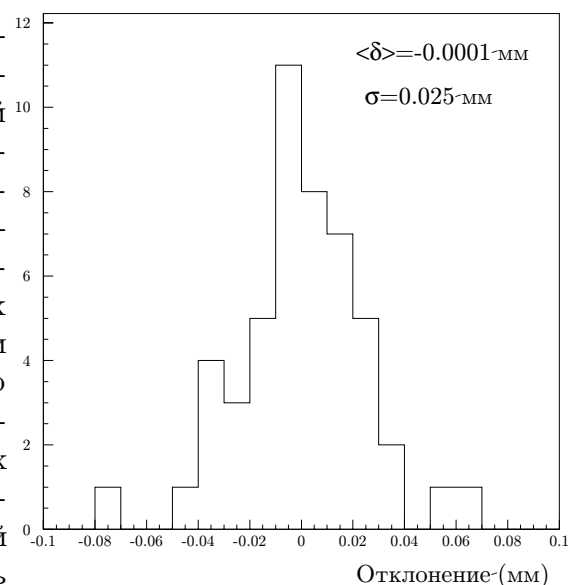


Рис. 9. Отклонение радиуса границы между первым и вторым кольцами от номинального значения.

Полуцилиндры по отдельности деформируются под собственным весом кроме того случая, когда плоскости располагаются вертикально, опираясь полуотверстиями на горизонтально расположенные цилиндрические направляющие. В таких условиях и была организована сборка. Каждая плоскость, скользя по направляющим, расположенным на мраморном столе, по очереди подтягивалась сквозь отверстия в несущем полукольце (\varnothing 5.04 мм) при помощи специального приспособления через 62 прецизионно выполненные шпильки (\varnothing 5 мм) к массивной коробке для фототетродов, служащей также поддерживающей структурой для всего калориметра. Для уменьшения воздействия трения на поверхность полуотверстий во время сборки, давление плоскостей на направляющие было ослаблено пружиной, временно монтируемой наверху движущейся плоскости. По окончании установки плоскостей все шпильки были затянуты динамометрическим ключом для обеспечения равномерности приложенного усилия, а также во избежание перетяжки.

1.2. Кремниевый детектор максимума ливня

На LEP200 для подавления фона от гало пучка и правильной идентификации событий с одним γ -квантом в конечном состоянии требуется угловая точность ~ 10 мрад в измерении направления оси ливня. В калориметре STIC угол ливня измеряется с помощью кремниевых детекторов максимума ливня.

Кремниевые стриповые детекторы расположены внутри калориметра на глубине 4 и 7.4 радиационных длин. Радиально перекрываемая область составляет 71.5-174.2 мм для первой плоскости и 73.0-178.3 мм для второй. Каждая плоскость состоит из алюминиевой поддерживающей пластины толщиной 3.5 мм, на которой прецизионно (с точностью, аналогичной достигнутой при размещении сцинтилляционных сегментов на пластинах поглотителя) располагаются керамические сегменты толщиной 1 мм. Кремниевые пластинки приклеены проводящим клеем к металлизированной поверхности керамики для обеспечения приложения напряжения смещения.

Кремниевый детектор изготовлен из высокоомного кремния p-типа толщиной 300 мкм с имплантированными стрипами p-типа, с одной стороны, и p⁺-слоем, с другой. Азимутально каждая кремниевая плоскость покрывает 22.5°. Шаг стрипов составляет 1.712 мм для первой и 1.754 мм (вследствие проективности) для второй плоскости. При этом на сегментах первой плоскости нанесено по 24 стрипа и на сегментах второй — по 36 стрипов.

Особенностью конструкции детекторов является наличие в кремнии отверстий диаметром 1.4 мм для прохождения спектросмещающих волокон. Отверстия изготовлены с помощью лазера. Полученная точность в диаметре прорезанных отверстий лучше 10 мкм. Во избежание разрыва стрипов отверстия находятся между ними. Каждое отверстие окружено пассивированной областью диаметром ~ 3 мм.

Более подробную информацию о конструкции кремниевых детекторов максимума ливня, данные о технике съёма сигнала и системе сбора данных можно найти в работах [7,18,19,20,21].

1.3. Сцинтилляционный годоскоп

Годоскоп, предназначенный для выделения заряженных треков, состоит из 64 трапецидальных счётчиков, собранных в две плоскости по каждую сторону установки DELPHI и расположенных на расстоянии 2010 и 2050 мм от точки взаимодействия (см. рис. 2). Перекрываемый радиальный диапазон составляет от 86 до 379 мм.

Счётчики изготовлены из сцинтиллятора¹⁰ толщиной 10 мм. Свет собирается с помощью 8 спектросмещающих волокон, вклеенных в канавки шириной 8.35 мм и глубиной 1.2 мм, вырезанные с боковых сторон счётчиков. Верхний и нижний края счётчиков покрыты белой отражающей краской на основе диоксида титана. Счётчики обернуты белым пластиком Тувек для улучшения светосбора и чёрным пластиком — для светоизоляции.

Для светосбора используются такие же спектросмещающие волокна, как и в калориметре STIC. Свет собирается на фотоэлектронные умножители¹¹ вынесенные за пределы магнитного поля DELPHI. Связь с ФЭУ осуществляется посредством прозрачных оптических волокон длиной 10 м и диаметром 1 мм, склеенных со спектросмещающими волокнами. Пучки волокон от каждого счётчика светоизолированы.

Более подробную информацию о годоскопе можно найти в работах [5,6,7].

2. Характеристики детектора

Концепция калориметра STIC проверялась в 1992 г. в CERN на маленьком (4×3 сегмента) прототипе (также изготовленном в ИФВЭ) для выяснения энергетического разрешения, однородности отклика, точности координатных измерений [16]. Кроме того, на нём была отработана технология изготовления сцинтилляционных сегментов. Общий вид прототипа изображён на рис. 10.

В течение 1993 г. измерения были повторены для двух различных полномасштабных модулей калориметра STIC на тестовых пучках X3, X5 и X7 в западной пучковой зоне CERN, а с начала 1994 г. детектор в полном объёме установлен внутри установки DELPHI.

¹⁰Bicron BC-408.

¹¹Hamamatsu H3165.

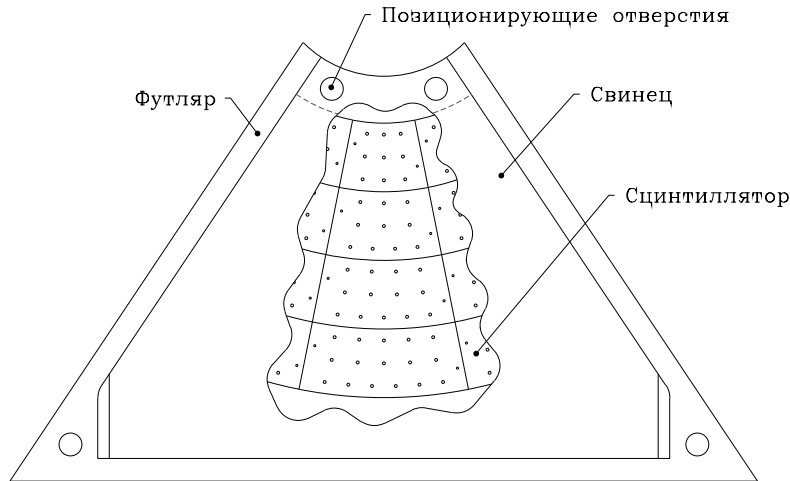


Рис. 10. Общий вид прототипа калориметра STIC. 12 ячеек скомпонованы по 4 ячейки в радиальном и по 3 в азимутальном направлениях.

2.1. Калориметр STIC

2.1.1. Координатные измерения

При определении светимости наиболее важной задачей для калориметра является точное измерение точки попадания электрона в области малых углов. В установке DELPHI это было реализовано при помощи прецизионно обработанной вольфрамовой маски, переводящей обрезание по выделенной в калориметре энергии в точное радиальное обрезание [22]. В калориметре STIC благодаря высокой механической точности при изготовлении возможно непосредственное измерение радиуса точки попадания.

На рис. 11 приведены результаты высокостатистического радиального сканирования колец 1 и 2 пучком электронов с энергией 45 ГэВ, где отношение энергий, измеренных в двух кольцах, даётся как функция от точки попадания. Параметризация данной кривой может быть использована для определения радиального положения ливня. На рис. 12 изображено разрешение, достигаемое в измерении радиального положения ливня в области вокруг границы между 1- и 2-м кольцами. Непосредственно на границе разрешение составляет ~ 250 мкм, ухудшаясь до 1.2 мм в центре башни. При помощи калориметра возможно также измерение азимутального угла. Однако вследствие того, что угловая сегментация секторов значительно шире радиальной и из-за азимутального сдвига границ секторов, разрешение значительно хуже. В частности, для 2-го кольца разрешение на границе секторов достигает ~ 1 мм, а в центре башни ~ 4 мм.

Данные, полученные в экспозициях на тестовых пучках, были в дальнейшем использованы для реконструкции радиуса рассеянных e^+e^- -пар на LEP. На рис. 13 показано такое радиальное распределение в сравнении с данными, полученными из Монте-Карло моделирования [23,24]. Резкий край в районе 97 мм обусловлен вольфрамовой маской, определяющей аксептанс в области малых углов.

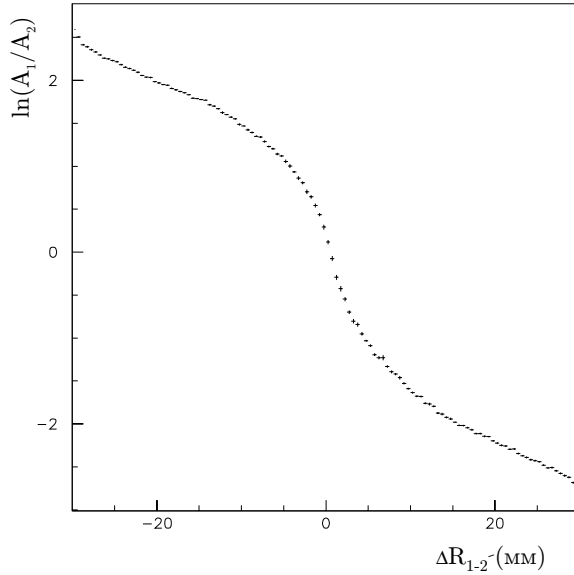


Рис. 11. Зависимость отношения энергий, измеренных в кольцах 1 и 2 от точки попадания электрона в калориметр, определённой с помощью микрострипового телескопа.

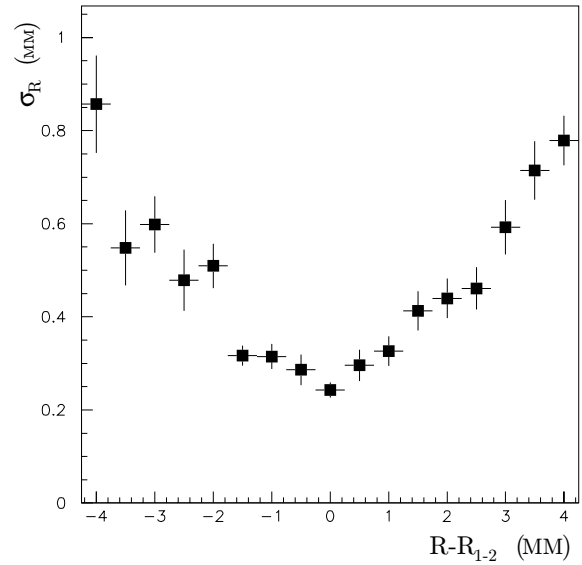
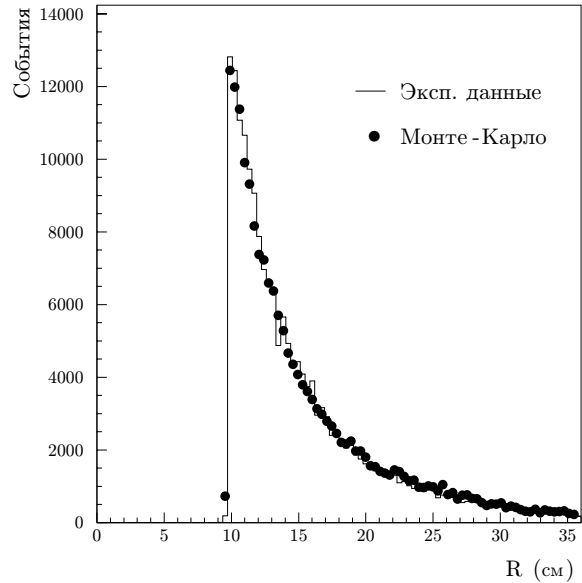


Рис. 12. Разрешение в измерениях радиального положения ливня в области границы между башнями 1- и 2-го колец.

Рис. 13. Радиальное распределение рассеянных электронов Баба, измеренное калориметром, в сравнении с данными из Монте-Карло моделирования.



2.1.2. Энергетическое разрешение

Измерения энергетического отклика были выполнены на пучке электронов с энергией 10; 20; 45; 60; 70 и 100 ГэВ. Пучок, имевший размеры (rms) 3.5 мм по вертикали и 6.0 мм по горизонтали, был направлен в центр башни 6-го кольца. Результаты этих измерений представлены на рис. 14.

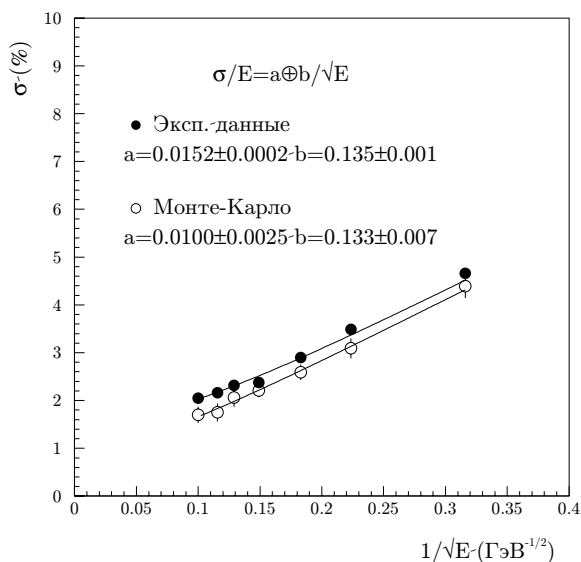


Рис. 14. Энергетическое разрешение калориметра для пучка электронов, направленного в центр одной из башен 6-го кольца. Здесь же показаны данные из Монте-Карло моделирования.

Разрешение описывается формулой

$$\sigma_E/E = 13.5\%/\sqrt{E} \oplus 1.52\%$$

с пренебрежимо малым шумовым членом в 90 МэВ. В частности, для энергии 45 ГэВ разрешение составляет 2.5%. Здесь же приведены результаты моделирования по программе GEANT. Разница в постоянном члене, возможно, объясняется тем, что при моделировании не были учтены такие эффекты, как разброс по толщинам пластин поглотителя и т.п. Нелинейность энергетического отклика менее $\pm 1\%$. Энергия, потерянная минимально ионизирующей частицей в калориметре, превышает пьедестал на величину $\sim 4\sigma$.

Пространственная однородность отклика детектора была определена при радиальном сканировании калориметра тестовым электронным пучком. Для определения точки попадания частиц пучка в калориметр использовался кремниевый микрополосковый телескоп, обеспечивший точность измерения координаты ~ 40 мкм.

На рис. 15 представлена зависимость энергии, собранной каждой башней по отдельности и калориметром в целом, от радиальной точки попадания. За пределами кольца 1 (где энергетические измерения искажены утечками ливней) модуляция сигнала лежит в пределах $\pm 2\%$, достигая локальных максимумов в местах попадания частиц вблизи волокна. Очевидна важность непрерывности пластин поглотителя для однородности отклика в местах пересечения пучком границ башен. Пространственная однородность также исследовалась и на данных с LEP.

Рис. 16 (верхняя кривая) иллюстрирует зависимость энергии рассеянных электронов Баба при фиксированном радиусе как функцию азимутального угла. При этом и радиус и угол были измерены калориметром. Пространственного разрешения калориметра достаточно для наблюдения модуляций энергетического отклика вследствие волоконной структуры съема сигнала. Наблюдаемые неоднородности имеют величину порядка $\pm 3\%$.

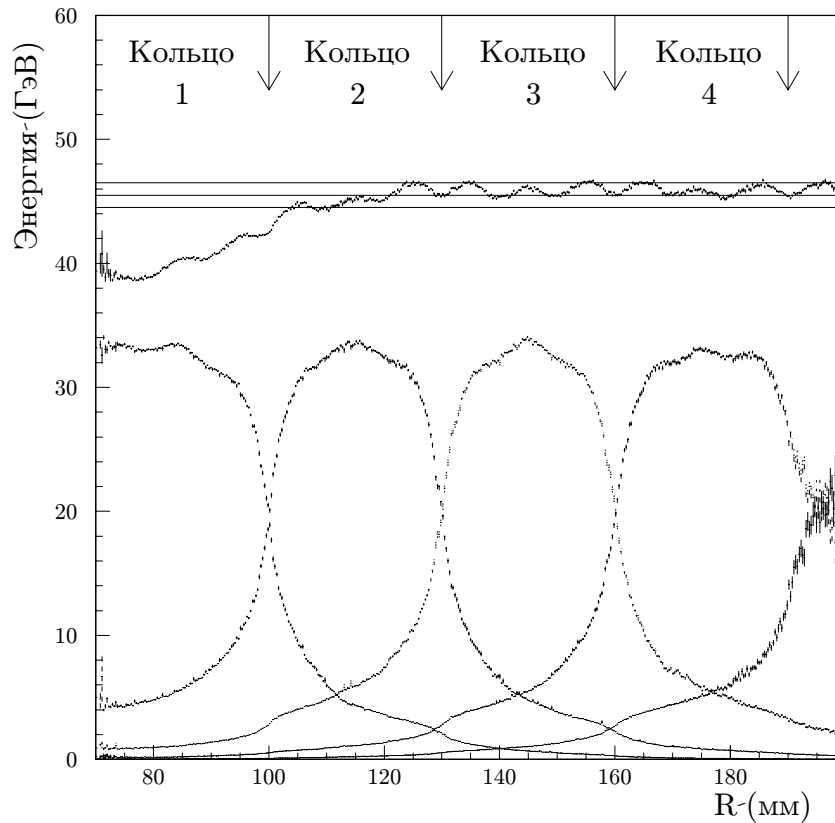


Рис. 15. Пространственная однородность в отклике калориметра. Нижние кривые соответствуют энергии, потерянной в каждом кольце по отдельности, верхняя кривая соответствует суммарной оставленной в калориметре энергии. Прямые линии выделяют интервал $\pm 2\%$ вокруг энергии пучка.

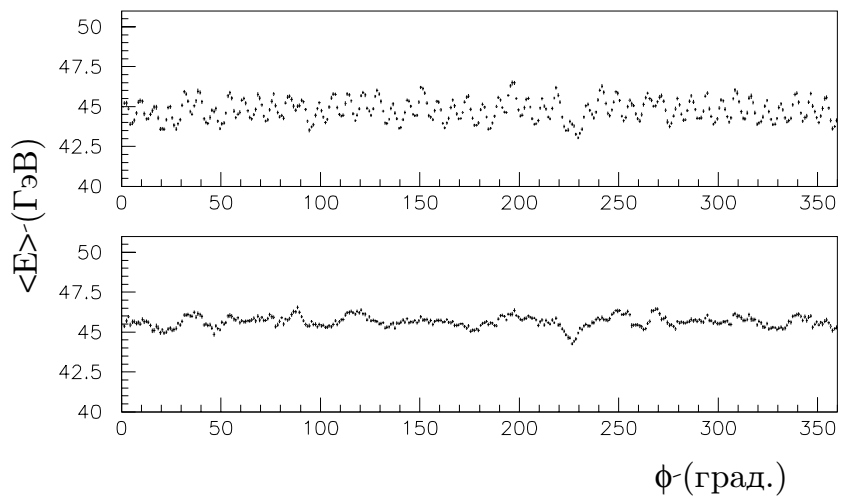


Рис. 16. Зависимость измеренной при радиусе 10.5 см (2-е кольцо) энергии от азимутального угла для 45 ГэВ электронов LEP. И радиус и угол измерены самим калориметром. Верхняя картинка до и нижняя после коррекции по энергетической карте (см. следующий рисунок).

По данным LEP была построена карта отклика калориметра в зависимости от измеренного калориметром положения ливня. Рис. 17 представляет такую карту для башни из 2-го кольца. Карта использовалась для корректировки измеренной калориметром энергии после уточнения положения ливня. Из рис. 16 (нижняя кривая) видно, что после корректировки большинство модуляций в отклике, вызванных волокнами, исчезли. В результате введённой поправки энергетическое разрешение улучшилось с 3.2 до 2.7% (измерено для 45 ГэВ электронов LEP). Полученная величина очень близка к разрешению в 2.5%, полученному в идеальных условиях узкого тестового пучка, направленного в центр башни.

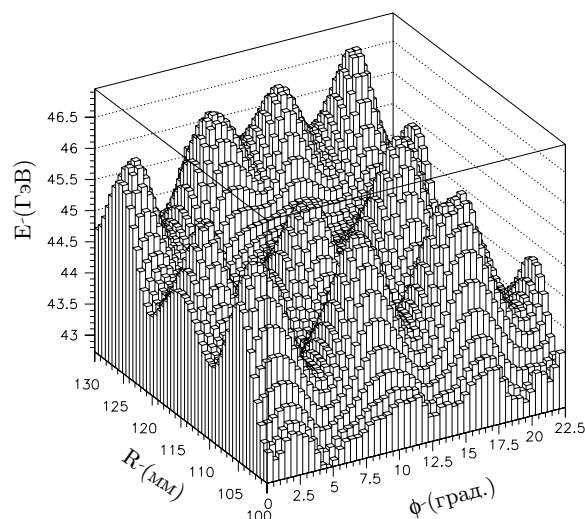


Рис. 17. Зависимость измеренной энергии от радиуса и азимутального угла, также измеренных калориметром (для башен из 2-го кольца).

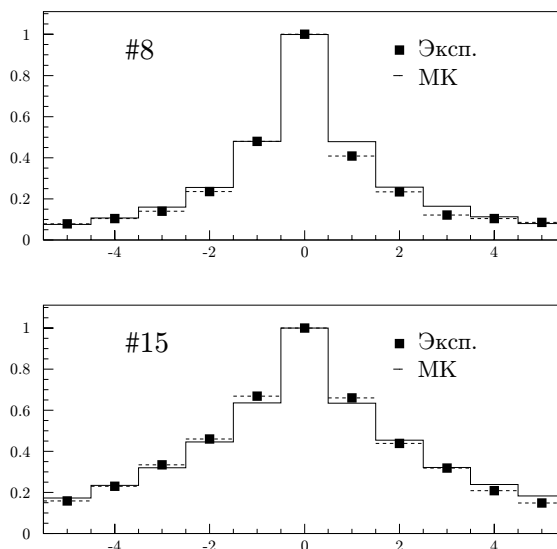


Рис. 18. Поперечные профили ливней для 45 ГэВ электронов, измеренные 1- ($4X_0$) и 2-й ($7.4X_0$) кремниевыми плоскостями в сравнении с данными из Монте-Карло моделирования.

2.2. Кремниевый детектор максимума ливня

Подробная информация о характеристиках кремниевого детектора максимума ливня дана в работах [7,18,19,20,21]. Здесь представлены только данные, необходимые для оценки прибора как части калориметра STIC.

Измеренное отношение сигнал/шум для электронов с энергией 45 ГэВ составило ~ 40 (для стрипа, в котором произошло наибольшее энерговыделение).

На рис. 18 представлены поперечные профили ливней, измеренные обеими кремниевыми плоскостями, а также данные Монте-Карло моделирования. Радиальное положение входящих в калориметр частиц оценивалось путём определения центра тяжести от сигналов 5 стрипов вокруг максимума ливня (без поправок на возможные вариации усиления для соседних стрипов).

Угловое разрешение при реконструкции направления образующей ливень частицы можно оценить по распределению разницы между радиальными положениями событий, измеренных обеими кремниевыми плоскостями. Учитывая, что расстояние между плоскостями равно 51.7 мм, ширина по основанию 630 мкм вышеупомянутого распределения, изображённого на рис. 19, соответствует угловому разрешению 13 мрад.

Рис. 20 (где изображены радиальные профили ливня одного и того же события Баба на LEP, измеренные непосредственно калориметром и двумя кремниевыми плоскостями) даёт наглядное представление об улучшении пространственного разрешения при регистрации частиц благодаря применению кремниевых детекторов максимума ливня.

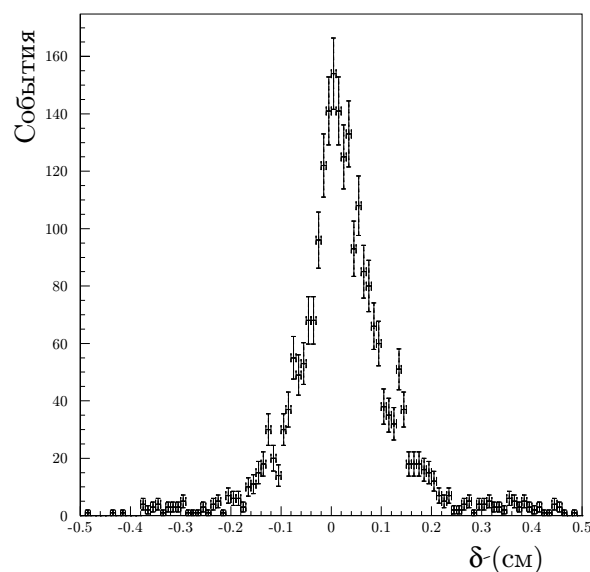


Рис. 19. Разница между радиальными положениями ливней, реконструируемыми в обеих кремниевых плоскостях.

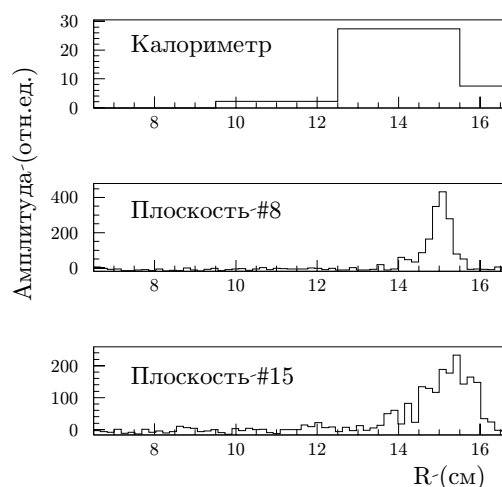


Рис. 20. Поперечные профили ливня, измеренные независимо калориметром и кремниевыми плоскостями для типичного события Баба на LEP.

2.3. Сцинтилляционный годоскоп

На тестовом пучке был исследован отклик счётчиков годоскопа на минимально ионизирующую частицу (MIP). Отклик счётчиков, измеренный на 45 ГэВ электронах, не зависит от точки попадания и составляет ~ 20 фотоэлектронов на MIP. Распределения по импульсам для пионов и электронов (рис. 21) слегка отличаются друг от друга — распределение для электронов имеет хвост из-за эффекта альбеда. При разнесении счётчиков годоскопа и калориметра на расстояние около 2 м (в реальных условиях годоскоп находится на расстоянии 10 см от фронта калориметра), спектры становятся идентичными.

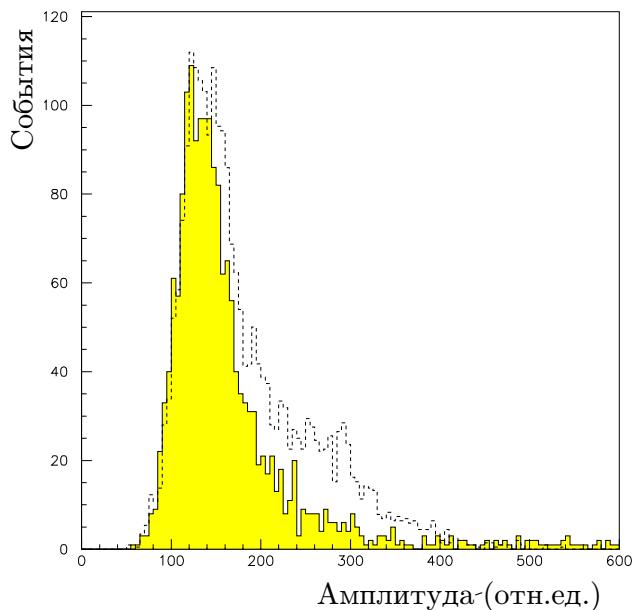


Рис. 21. Амплитудные распределения сигнала со счётчика годоскопа для электронов (заштриховано) и пионов.

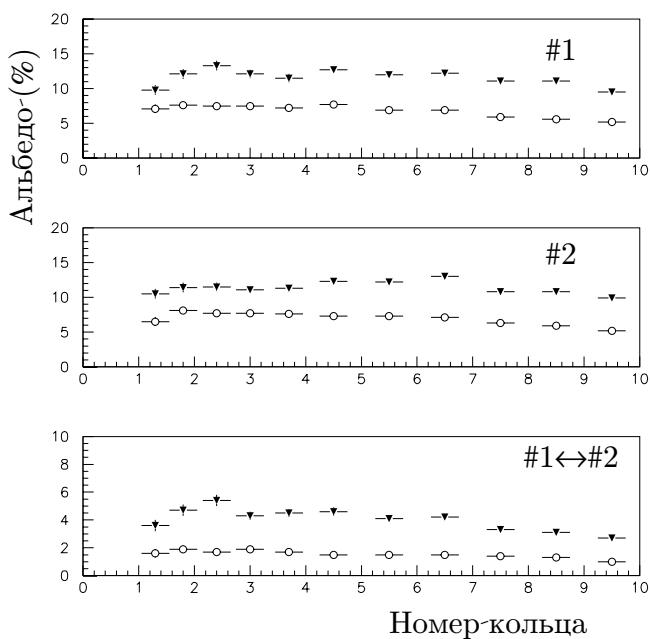


Рис. 22. Часть событий с амплитудой, соответствующей прохождению МПР через счётчик в случае попадания пучка в сектор калориметра, соседний с исследуемым счётчиком (треугольники) и через сектор от исследуемого счётчика (кружки). Верхний и средний рисунки представляют альбедо для каждого счётчика по отдельности, нижний – для их совпадения.

Из-за отсутствия возможности изучения альbedo на пучке фотонов, этот эффект был исследован на электронном пучке, направленном в центр калориметрического сектора, соседнего с исследуемым счётчиком годоскопа. После обрезания амплитуды 3σ над пьедесталом для выделения сигнала, величина альbedo определялась как часть событий, идентифицированная как MIP. На рис. 22 представлены результаты радиального сканирования двух секторов калориметра STIC, при котором в соседних счётчиках годоскопа наблюдаются события с амплитудой, соответствующей прохождению через них MIP. Из рисунка видно, что альbedo не зависит от радиального положения точки попадания электрона в калориметр. При этом для одиночного счётчика величина альbedo составляет $\sim 12\%$, когда пучок направлен в соседний со счётчиком сектор, и $\sim 7\%$ — при попадании через сектор от счётчика. В случае, когда оба счётчика (годоскоп, см. выше, состоит из двух близко расположенных плоскостей) удовлетворяют обрезанию на MIP, величина альbedo уменьшается до ~ 5 и 2% соответственно. Соблюдение требования на MIP в обоих счётчиках (при прохождении пучка через счётчики) даёт 99.7%-ую эффективность идентификации заряженных частиц.

Энергетическая зависимость эффекта альbedo исследовалась при попадании пучка в центр сегмента из 5-го кольца на соседнем с сектором счётчике в диапазоне энергий от 5 до 100 ГэВ. Влияние альbedo увеличивалось с энергией и для случая совпадения двух счётчиков менялось от ~ 2 до 6% .

Заключение

Калориметр STIC, установленный в DELPHI в начале 1994 г., достиг своих проектных характеристик.

Детектор расширил калориметрический аксептанс установки DELPHI как в сторону пучковой камеры, повышая статистическую точность в измерениях светимости в 2,3 раза, так и наружу, полностью закрывая щель, существовавшую между старым калориметром и передним электромагнитным калориметром.

Калориметр может измерять в индивидуальном событии радиус точки попадания на границе между 1- и 2-м кольцами с точностью ~ 250 мкм при систематической ошибке ≤ 50 мкм, что достаточно для определения светимости на уровне 0.1%.

Система вето позволяет осуществить триггер на одиночные γ -кванты, а также осуществить e - γ -разделение.

Авторы выражают большую благодарность коллективу опытного производства, сотрудникам конструкторского и технологического отделов ИФВЭ за проведение в сжатые сроки громадной работы, без которой было бы невозможно создание калориметра STIC.

Список литературы

- [1] Aarnio P. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 1991. V. A303. P. 233.
- [2] The DELPHI Collaboration. // In: *Proposal for the Replacement of the Small Angle Calorimeter of DELPHI*, CERN LEPC/92-6.
- [3] Benvenuti A.C. et al. *STIC, The New DELPHI Luminosity Monitor*. Contribution to the International Conference on Calorimetry, La Biodola, Italy, 1993, DELPHI 94-31 CAL 112.
- [4] Alvsvaag S.J. et al. *The New Small Angle Calorimeter in DELPHI*. Contribution to the International Conference on Calorimetry, Brookhaven, USA, 1994, DELPHI 94-148 CAL 118.
- [5] Benvenuti A.C. et al. *The DELPHI Small Angle Tile Calorimeter*. Contribution to the IEEE Nuclear Science Symposium, Norfolk, USA, 1994, DELPHI 94-157 CAL 120.
- [6] Bonesini M. et al. *The Small Angle Tile Calorimeter Project in DELPHI*. Contribution to the 4-th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, 3-7 Oct 1994, Como, Italy, DELPHI 95-12 CAL 119.
- [7] Camporesi T. et al. *The DELPHI Small Angle Tile Calorimeter*. Contribution to the 1994 Beijing Calorimetry Symposium, 14-18 Oct 1994, Beijing, P.R. China, DELPHI 95-14 CAL 123.
- [8] Gouz Yu. et al. *LED monitoring system for the STIC calorimeter*: Preprint IHEP 95-108. Protvino, 1995.
- [9] Fessler H. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 1985. 228. P. 303.
- [10] Fessler H. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 1985. A 240. P. 284.
- [11] Loher B. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 1987. A 254. P. 26.
- [12] Atoyán G.S. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 1992. A 320. P. 144.
- [13] Badier J. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 1994. A 348. P. 74.
- [14] Aubert B. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 1991. A 309. P. 438;
Aubert B. et al. (RD3 Collaboration), CERN/DRDC 90-31 (1990).
- [15] Семёнов В.К. // В сб.: Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции *Состояние и перспективы разработки и применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в XII пятилетке*. Харьков, АН УССР, с.86;
Кадыков М.Г. и др. Препринт ОИЯИ, 13-90-16, Дубна 1990.

- [16] Benvenuti A.C. et al. *Prototype Design, Construction and Test of a Pb/ Scintillator Sampling Calorimeter with Wavelength Shifter Fiber Optic Readout*, CERN/PPE 92-212, IEEE Trans.// Nucl.Sci. 1993. 40. P.537-545.
- [17] Benvenuti A.C. et al. *Status of the DELPHI Small Angle Tile Calorimeter Project*. Contribution to the Europhysics 93 Conference, Marseille, France, 1993, DELPHI 94-32 CAL 113.
- [18] Alvsvaag S.J. et al. *The Silicon Shower Maximum Detector for the STIC.*, Contribution to 6 Pisa Meeting on Advanced Detectors, La Biodola, Isola d'Elba, Italy, 1994, DELPHI 94-126 CAL 117.
- [19] Paganoni M. et al. *A silicon pad shower maximum detector for a "Shashlik" calorimeter*, Contribution to the IEEE Nuclear Science Symposium, Norfolk, USA, 1994, DELPHI 94-158 CAL 121.
- [20] Cassio V. et al. *A silicon pad shower maximum detector for a "Shashlik" calorimeter*. Contribution to the 4th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, 3-7 Oct 1994, Como, Italy, DELPHI 95-13 CAL 122.
- [21] Della Ricca G., Prest M. et al. *New technology for shower maximum silicon detectors for shashlik calorimeters*. Contribution to the European Symposium on Semiconductor Detectors, New Dewelopments in Radiation Detectors, 7-10 May 1995, Schloss Elmau, Germany.
- [22] Abreu P. et al. // *Nucl. Phys.* 1991. B367. P.511.
- [23] Bonesini M. et al. DELPHI 93-118 CAL 108.
- [24] Jadach S. et al. // *Comp. Phys. Comm.* 1992. 70. P. 305.

Рукопись поступила 22 февраля 1996 г.

Е.В.Власов и др.

STIC — новый электромагнитный калориметр в области малых углов
установки DELPHI.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L^AT_EX.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 23.02.96. Формат 60 × 84/8.

Офсетная печать. Печ.л. 3,12. Уч.-изд.л. 2,4. Тираж 240. Заказ 580.

Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

