



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

2000–51  
На правах рукописи

**Карюхин Андрей Николаевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ  
НА УСКОРИТЕЛЯХ И КОЛЛАЙДЕРАХ**

**01.04.23 – физика высоких энергий**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 2000

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино)

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор А.М. Зайцев (ИФВЭ, г. Протвино).

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук А.А. Деревщиков (ИФВЭ, г. Протвино), кандидат физико-математических наук Ю.В. Катинов (ИТЭФ, г. Москва).

Ведущая организация – Лаборатория ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2000 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142280, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю.Г. Рябов

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность проблемы**

В настоящее время в составе больших экспериментальных установок на современных ускорителях значительную долю составляют различные сцинтилляционные детекторы. Их применение позволяет решать широкий спектр разноплановых физических задач. В диссертации сделан упор на использование изготовленных в ИФВЭ пластмассовых сцинтилляторов в экспериментах на фиксированной мишени, встречных электрон-позитронных и протон-протонных пучках.

### **Цель диссертационной работы:**

1. Разработка и создание системы сцинтилляционных детекторов установки ВЕС.
2. Разработка и создание прототипа электромагнитного калориметра в области малых углов установки DELPHI. Изготовление полномасштабного детектора.
3. Разработка технологии изготовления сцинтиллятора для пластинчатого адронного калориметра установки ATLAS. Исследование характеристик.

### **Автор защищает:**

- Результаты исследования характеристик сцинтилляционных детекторов установки ВЕС.
- Результаты исследования характеристик прототипа электромагнитного калориметра в области малых углов установки DELPHI.
- Результаты исследования свойств сцинтиллятора для пластинчатого адронного калориметра установки ATLAS; результаты исследования характеристик прототипов калориметра.

**Научная новизна и практическая ценность.** Создан электромагнитный калориметр нового типа. Измерены его характеристики. Разработана технология изготовления высококачественных сцинтилляционных пластин большой площади методом литья под давлением. Измерены характеристики полученного сцинтиллятора. Подготовлен участок для массового производства дешевого сцинтиллятора.

**Апробация работы и публикации.** Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в работах [1-5] и докладывались на семинарах ИФВЭ, ЦЕРН, международных конференциях.

**Структура диссертации.** Работа изложена на 65 страницах; состоит из введения, трех глав и заключения; содержит 73 рисунка, пять таблиц и список цитируемой литературы, включающий 53 наименования.

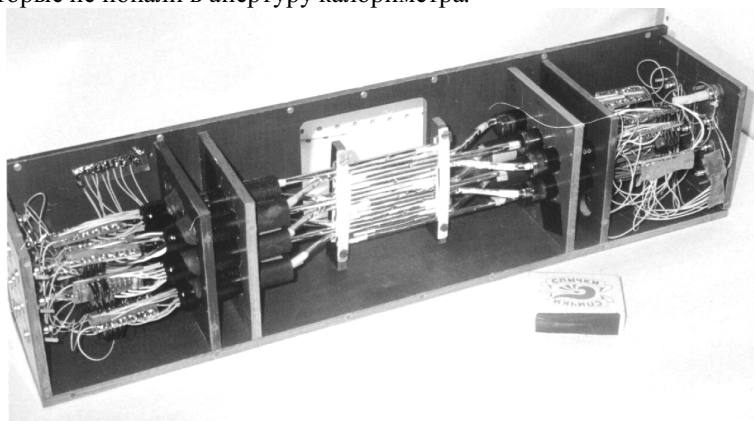
## Содержание работы

Во **Введении** дано краткое описание сцинтилляционного метода детектирования ионизирующих излучений, являющегося в течение последних десятилетий одним из основных способов регистрации и спектрометрии. Основное внимание уделено применению пластмассовых сцинтилляторов в различных областях физики высоких энергий: в эксперименте на фиксированной мишени (BEC), в эксперименте на встречных электрон-позитронных пучках (DELPHI), в планируемом эксперименте на протон-протонном пучке (ATLAS). Описана структура диссертации.

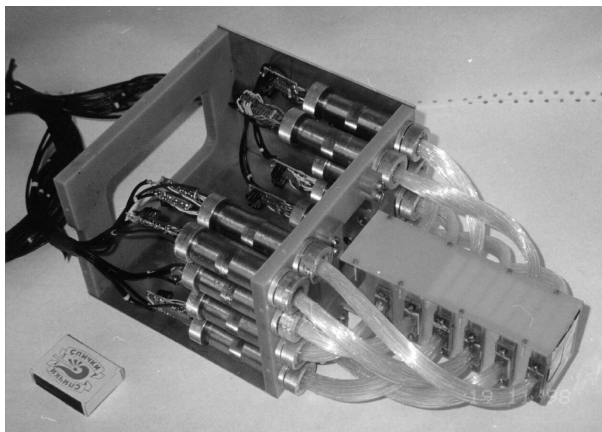
**Первая глава** посвящена сцинтилляционным детекторам установки Вершинный Спектрометр (BEC), размещенной на канале 4Д протонного синхротрона У-70. В состав сцинтилляционных детекторов (кроме пучковых счетчиков) входили или входят по настоящее время следующие приборы:

- Пучковый годоскоп на 16 каналов с активной областью  $48 \times 60 \text{ мм}^2$  (внешний вид показан на рис. 1). Располагался в голове канала и служил для уточнения импульса налетающей на мишень пучковой частицы.
- Активная мишень на 12 каналов (внешний вид показан на рис. 2). Использовалась для уточнения продольной координаты точки взаимодействия.
- Двухслойная охранная система на 14 каналов вокруг мишени. Внутренний слой состоит из сцинтилляционных счетчиков и запрещает регистрацию события. Наружный слой, образованный из слоистых (свинец-сцинтиллятор) счетчиков, служит для регистрации  $\gamma$ -квантов низкой энергии, вылетающих из области мишени.
- Счетчик на выделение взаимодействий в мишени. Расположен в пределах охранной системы и используется в выработке триггера нулевого уровня (наличие одной частицы в первичном пучке и ее выбывание из него после мишени).
- Широкоапертурный сцинтилляционный годоскоп на 200 каналов. Состоит из двух плоскостей (размер каждой  $2.6 \times 2.17 \text{ м}^2$ ) с горизонтально и вертикально расположенными счетчиками и является основным триггерным прибором для выделения многочастичных событий в конечном состоянии.

- Охранная система на 12 каналов вокруг ячеистого электромагнитного калориметра из свинцового стекла. Предназначена для регистрации  $\gamma$ -квантов, которые не попали в апертуру калориметра.



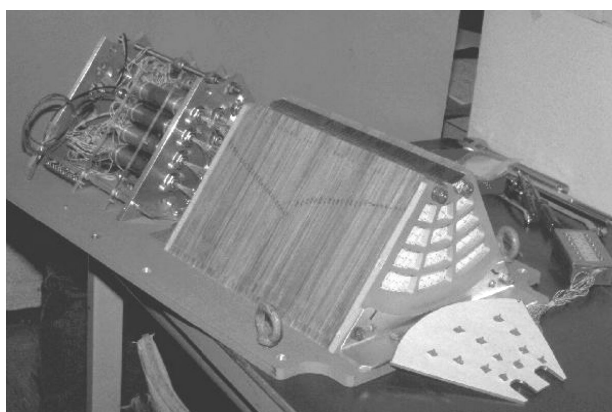
**Рис. 1.** Пучковый сцинтилляционный детектор.



**Рис. 2.** Активная мишень.

Сцинтилляционные детекторы эксплуатировались в составе установки ВЕС на протяжении 10 лет и показали за это время удовлетворительную работу. Общее число каналов на установке составляет  $\sim 250$ . Сцинтилляционные детекторы участвуют в выработке триггера нулевого и первого уровней, используются в последующей off-line обработке записанных событий.

Во **второй главе** описаны разработка и изготовление электромагнитного калориметра STIC (Small angle Tile Calorimeter) в области малых углов установки DELPHI. Основной задачей калориметра является определение светимости с точностью  $\sim 0.1\%$  путем подсчета упруго рассеянных электрон-позитронных пар в прецизионно заданный аксептанс. Указанная точность накладывает требование на знание геометрии калориметра на уровне  $\sim 50$  мкм, высокие энергетическое разрешение и пространственную однородность.



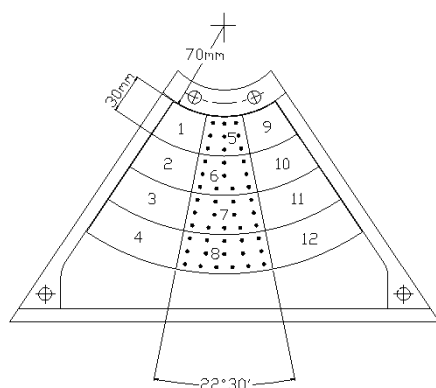
**Рис. 3.** Внешний вид прототипа электромагнитного калориметра STIC.

Для проверки возможности создания полномасштабного калориметра в ИФВЭ был изготовлен небольшой прототип. Его внешний вид представлен на рис. 3. Это слоистый (свинец-сцинтиллятор) калориметр, в котором свет, полученный от электромагнитного ливня в сцинтилляторе, передается на фотоприемники, расположенные в задней части калориметра, посредством спектросмещающих пластмассовых волокон, идущих перпендикулярно сквозь отверстия в плоскостях поглотителя и сцинтиллятора и служащих световодами. Спектросмещающие волокна распределены однородно по поперечному сечению калориметра и осуществляют светосбор по всей его глубине. Применение большой плотности волокон позволило значительно уменьшить неоднородности в светосборе. Впервые для электромагнитного калориметра была реализована проективная башенная структура с непрерывными плоскостями абсорбера, что обеспечило полную герметичность и устранило неоднородности в энергетическом отклике, характерные для калориметров, собранных из отдельных модулей.

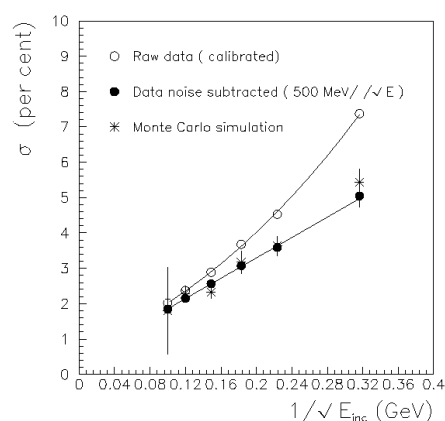
Основной сборочной единицей прототипа являлась стеклотекстолитовая рама с тонкой стенкой посередине. С одной стороны рамы крепились свинцовая

пластина конвертора толщиной 3 мм, а с другой – 2.5-мм пластинки сцинтиллятора.

Прототип содержал 50 сэндвичей, что соответствует в сумме 27 радиационным длинам, и делился на три сектора по азимутальному углу и на четыре – в радиальном направлении. Внутренний радиус калориметра составил 70 мм, радиальная ширина каждой башни для первой плоскости – 30 мм. Фронтальный вид прототипа представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Фронтальный вид прототипа. Точки показывают расположение волокон для данного азимутального сектора.



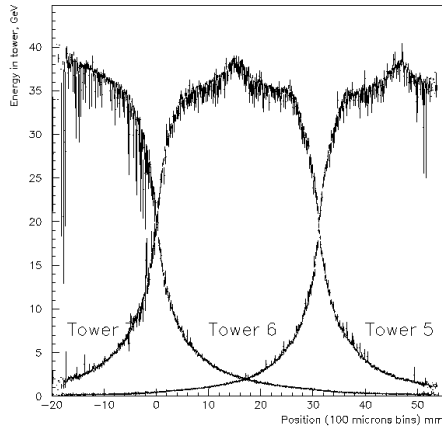
**Рис. 5.** Энергетическое разрешение калориметра.

Сцинтилляционные сегменты изготавливались из пластин сцинтиллятора большего размера на станках с числовым программным управлением. Каждый сцинтилляционный сегмент прецизионно крепился с помощью двух позиционирующих штифтов к пластине конвертора. Все элементы образованного таким образом сэндвича имели сквозные отверстия для спектросмещающих волокон.

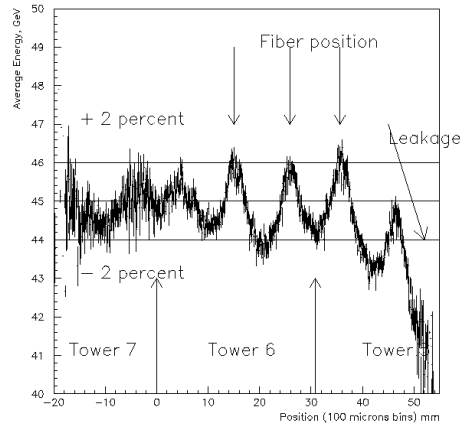
Прототип был испытан на электронном пучке в диапазоне энергий 10–100 ГэВ. Макет калориметра размещался на подвижном столе, перемещение которого обеспечивалось шаговыми электродвигателями с точностью установки 0.6 мкм в вертикальном и 10 мкм в горизонтальном направлениях. Расположенный впереди калориметра телескоп из четырех кремниевых микростриповых детекторов позволял восстанавливать трек с точностью 40 мкм.

Энергетическое разрешение прототипа калориметра измерялось при попадании пучка в центральную башню. Результаты показаны на рис. 5. Набор данных аппроксимировался зависимостью

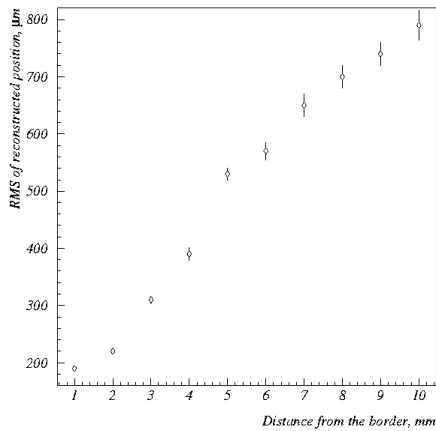
$$\sigma / E = (0.098 \pm 0.003) \oplus (0.158 \pm 0.001) / \sqrt{E} .$$



**Рис. 6.** Средняя энергия на башню при сканировании вдоль вертикальной средней линии.



**Рис. 7.** Полная энергия как функция вертикального положения пучка. Стрелки вверх показывают геометрическое положение волокон, внизу – положение границ.



**Рис. 8.** Зависимость определенного калориметром разрешения от расстояния от границы между кольцами для 45 ГэВ электронов.

Отклонение от линейности не превышает 0.5 %. Высокая точность в определении треков позволила осуществить детальное сканирование поверхности детектора. Пучком были засвечены не только границы между несколькими башнями, но и места расположения многих смещающих волокон. На рис. 6 приведена зависимость средней энергии на башню от вертикального положения пучка. Здесь можно видеть специфическую картину, полученную в результате разделения энергии между соседними башнями вблизи их границ. На рис. 7 показано то же самое, но для средней суммарной энергии. Видно, что общая пространственная неоднородность, измеренная в геометрически наиболее сложных местах, не превышает  $\pm 2\%$ .



Ключевым моментом при определении светимости является точность, с которой калориметр может реконструировать точку попадания налетающего электрона. Наилучшее разрешение достигается на границе между кольцами (~200 мкм для 45-ГэВ электронов) и быстро ухудшается при движении в сторону от границы, оставаясь чуть лучше 1 мм, как показано на рис. 8.

На основании опыта, приобретенного как при производстве прототипа, так и при измерении его характеристик на электронном пучке, был изготовлен калориметр STIC и установлен внутри установки DELPHI. STIC состоит из двух независимых цилиндрических детекторов, симметрично размещенных по обе стороны от области взаимодействия на расстоянии  $\pm 2200$  мм. Каждое плечо образовано из двух полуцилиндров, замыкающихся вокруг пучковой камеры. Апертура калориметра составляет от 29 до 185 мрад по полярному углу  $\theta$  (что соответствует изменению радиуса от 65 до 420 мм при  $z = 2200$  мм) и  $2\pi$  по азимутальному углу.

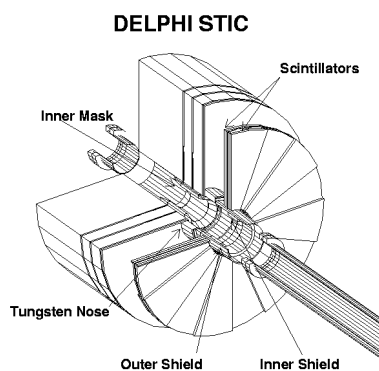


Рис. 9. Общий вид калориметра STIC.

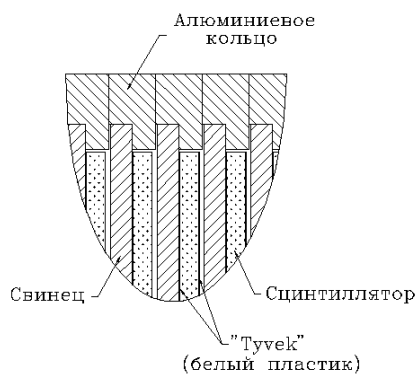
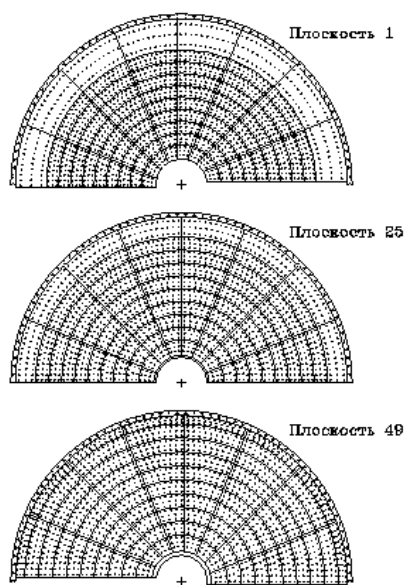


Рис. 10. Иллюстрация структуры калориметра STIC.

Представление о конструкции калориметра можно получить из рис. 9 (общий вид) и рис. 10 (сэмплинг-структура, где изображена маленькая 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 в себе по 47 слоев свинцовых пластин и сцинтилляционных сегментов и по две плоскости кремниевых полосковых детекторов. Общая толщина калориметра STIC, равная 367.5 мм, соответствует 27 радиационным длинам.



**Рис. 11.** Сцинтилляционные плоскости калориметра.

сти первая, средняя и последняя сцинтилляционные плоскости изображены на рис. 11.

Помимо проективного расширения сцинтилляционных сегментов в конструкции калориметра предусмотрен азимутальный поворот на  $\sim 3^\circ$  всех плоскостей относительно начального положения, что позволяет полностью ликвидировать мертвую 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 ( $375 \text{ мкм}$ ) пошагового сдвига боковых границ соседних плоскостей друг относительно друга, как это можно наблюдать на рис. 11.

Детектор расширил калориметрический аксептанс установки DELPHI, повышая статистическую точность в измерениях светимости в  $\sim 2.3$  раза. Калориметр может измерять в индивидуальном событии радиус точки попадания на границе между 1- и 2-м кольцами с точностью  $\sim 250 \text{ мкм}$  при систематической ошибке  $\sim 50 \text{ мкм}$ , что достаточно для определения светимости на уровне  $0.1\%$ . Основные параметры калориметра STIC (технические данные и физические характеристики) приведены ниже в сводной табл. 1.

Основной сборочной единицей калориметра является  $3 \text{ мм}$  свинцовая плоскость в виде полудиска, на которой прецизионно (с точностью  $\sim 50 \text{ мкм}$ ) с помощью штифтов закреплены 80 сцинтилляционных сегментов толщиной  $3 \text{ мм}$ , разделенных радиально на 10 колец, а по азимутальному углу – на 8 одинаковых ( $22.5^\circ$ ) секторов. Ширина колец для первого (ближайшего к области взаимодействия) слоя составляет  $30 \text{ мм}$ , за исключением внутреннего ( $35 \text{ мм}$ ) и наружного ( $77.5 \text{ мм}$ ). С увеличением номера слоя все кольца (кроме наружного, ограниченного сверху габаритами детектора) проективно расширяются.

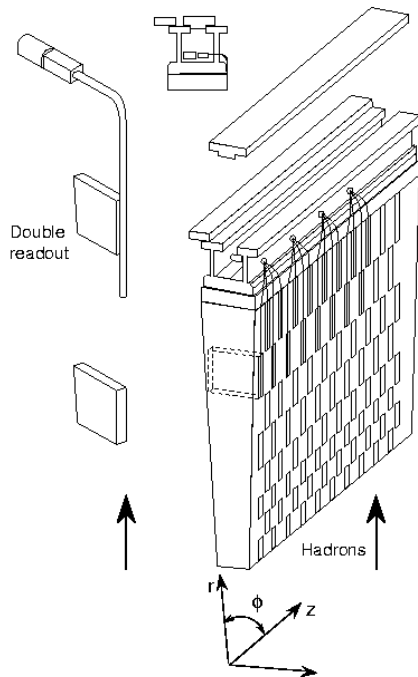
Для оптической изоляции сцинтилляционных сегментов и увеличения светосбора между сегментами (и вокруг них) проложены полоски (листы) диффузного светотражательного материала Tyvek толщиной  $120 \text{ мкм}$ . Для наглядно-

Таблица 1.

Вид геометрии калориметра	Цилиндрический детектор с проективной геометрией
Полярное угловое покрытие сцинтилляционными плоскостями	$29.5 \text{ мрад} \leq \theta \leq 188\text{-}161 \text{ мрад}$
Радиальное покрытие сцинтилляционными плоскостями	$65\text{-}76 \text{ мм} \leq R \leq 417.5 \text{ мм}$
Радиальное покрытие плоскостями конвертора	$65 \text{ мм} \leq R \leq 417.5 \text{ мм}$
Поперечный размер башни (радиус / азимутальный угол)	$30\text{-}35 \text{ мм} / 22.5^\circ$
Число сцинтилляционных плоскостей	47
Число сцинтилляционных сегментов	7520
Полное число спектросмещающих волокон	3312
Плотность спектросмещающих волокон	$0.79 \text{ см}^2$
Толщина сцинтиллятора / свинца (мм)	3.0 / 3.0
Мольеровский радиус	2.3 см
Энергетическое разрешение на тестовом пучке	$\sigma / E = 13.5\% / \sqrt{E} \oplus 1.52\%$
Энергетическое разрешение на LEP	$\sigma/E=2.7\%$ при $E=45 \text{ ГэВ}$
Отклонение энергетического отклика от линейности	$\leq \pm 1\%$
Радиальное разрешение для 45-ГэВ электронов в калориметре	250-1200 мкм
Пространственная неоднородность	$\leq \pm 3\%$

**В третьей главе** описывается пластинчатый адронный калориметр, являющийся одной из подсистем установки ATLAS – универсального детектора, предназначенного для исследования протон-протонных взаимодействий на строящемся в CERNе большом адронном коллайдере LHC (Large Hadron Collider). Адронный калориметр имеет слоистую структуру в виде стальных листов в качестве абсорбера и сцинтилляционных пластин в качестве активной среды, считываемых посредством спектросмещающих волокон. Новой чертой конструкции калориметра является ориентация сцинтилляционных пластин, размещенных перпендикулярно направлению соударяющихся пучков и собранных по глубине в шахматном порядке. Калориметр представляет собой цилиндр с внутренним радиусом 2280 мм и наружным – 4320 мм. Цилиндр делится на центральную часть длиной 5640 мм и две боковые (так называемые расширенные) длиной 2910 мм каждая. Все части в азимутальном направлении состоят из 64 независимых клинообразных модулей.

Более детально концептуальные особенности конструкции калориметра показаны на рис. 12. Шахматная структура конвертора крепится к массивной ферме. Высокая степень периодичности позволит осуществлять сборку модулей детектора из частей меньшего размера.



**Рис. 12.** Концептуальные особенности конструкции пластинчатого адронного калориметра.

Механическая сборка калориметра полностью независима от оснащения его оптической частью. Пластинчатая структура позволит сильно упростить систему светосбора. В такой геометрии спектросмещающие волокна прикладываются к открытым торцам сцинтилляционных сегментов и далее тянутся в радиальном направлении к ферме. На входе в ферму волокна группируются в пучки. Внутри фермы отведено специальное место для расположения фотоприемников и компактной считывающей электроники. Использование волоконной системы съема сигнала позволит образовать трехмерную считываемую ячейку. Таким образом, обеспечивается проективная геометрия, необходимая при выработке триггера и реконструкции энергетического отклика. Считывание каждого сцинтилляционного сегмента с двух сторон отдельно двумя фотоэлектронными умножителями обеспечивает дублирование (возможно, необходимое в течение длительной эксплуатации установки ATLAS) и служит

для разнообразных приложений (проверка контакта сцинтилляционной пластины с волокном, подсчет поля фотоэлектронов и т.п.).

Основными задачами адронного калориметра являются вклад в реконструкцию энергии струй, образованных в результате  $pp$ -взаимодействий, и обеспечение хорошего измерения  $p_T^{\text{miss}}$  (с помощью переднего и торцевого калориметров). Главным ориентиром при построении калориметра, вытекающим из постановки общих физических задач, является внутреннее разрешение струй в центральной части на уровне

$$\Delta E / E = 50\% / \sqrt{E} \oplus 3\%.$$

В адронный калориметр входят 11 различных типоразмеров сцинтилляционных пластин трапецевидной формы. Габариты находятся в пределах от 200 до 400 мм по длине (в азимутальном направлении) и от 97 до 187 мм по высоте (в радиальном направлении). Общий вид сцинтилляционной пластины изображен на рис. 13. Спектросмещающие волокна располагаются на боковых сторонах трапеции. Все пластины имеют толщину 3 мм. Все типоразмеры пластин и веса приведены ниже в табл. 2. Каждая пластина содержит два 9-мм отверстия для прохождения трубок гидравлической мониторирующей системы и стяжных шпилек. Общий допуск на все размеры составляет  $\pm 0.10$  мм. Для оснащения адронного калориметра требуется изготовить около 460000 сцинтилляционных пластин, что составляет ~60 т.

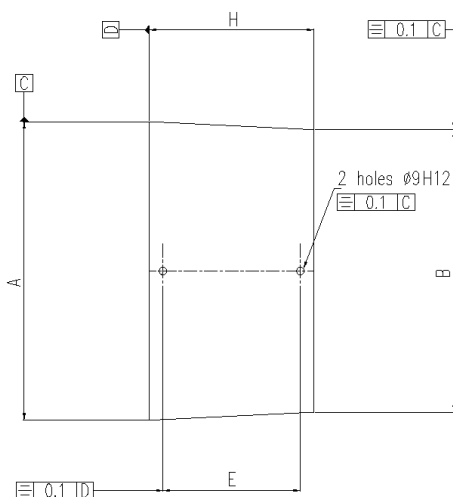


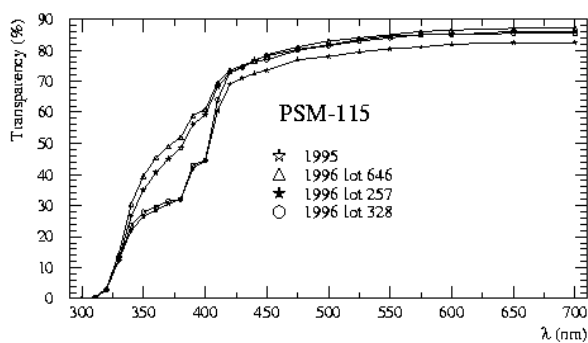
Рис. 13. Общий вид сцинтилляционной пластины.

Таблица 2.

№	A (мм)	B (мм)	H (мм)	E (мм)	Вес (г)
1	228.7	219.1	97	70	69
2	238.5	229.0	97	70	72
3	248.3	238.8	97	70	75
4	261.1	248.6	127	100	102
5	273.9	261.4	127	100	107
6	286.7	274.2	127	100	112
7	301.4	286.9	147	120	136
8	316.1	301.7	147	120	143
9	330.9	316.4	147	120	150
10	349.5	331.2	187	160	200
11	368.2	349.8	187	160	212

Стандартной технологией при изготовлении пластмассовых сцинтилляторов является полимеризация стирола между высококачественными стеклянными плоскостями. Тщательная подготовка стеклянных поверхностей и длительное время полимеризации определяют высокую стоимость и низкую производительность данного способа производства. Получающиеся при этом пластины обладают очень хорошими оптическими свойствами, но подверженность их старению, высокая стоимость сцинтиллятора неприемлемы для больших экспериментов. Кроме того, в случае адронного калориметра необходима последующая механическая обработка для придания пластинам трапециевидной формы. Разработанная в ИФВЭ технология литья под давлением хорошо подходит для массового производства сцинтилляционных пластин всех размеров и форм, необходимых для адронного калориметра. Литье под давлением характеризуется высокой скоростью производства и низкой ценой по сравнению со стоимостью коммерчески доступного сцинтиллятора. Для окончательного продукта не требуется дополнительная механическая обработка.

В качестве сцинтилляционной матрицы используется промышленный оптически прозрачный гранулированный полистирол (размер гранул порядка 3 мм). Полистирол высушивается при температуре  $\sim 70^\circ\text{C}$  и затем тщательно смешивается с первичными и вторичными спектросмещающими добавками. В качестве наиболее часто используемых добавок применяются РТР и РОРОР, но их выбор и концентрация определяются спецификой назначения сцинтиллятора (прямая или спектросмещающая регистрация света, наилучшее перекрытие спектров излучения и поглощения, спектральная чувствительность используемого фотодетектора и т.д.).



**Рис. 14.** Прозрачности некоторых 20%-ых весовых растворов разных партий полистирола ПСМ-115 в толуоле.

Для литья используются стандартные промышленные термопластавтоматы. Приготовленная смесь загружается в бункер литьевой машины и поступает в нагреваемый цилиндр, на выходе из которого температура достигает порядка  $200^\circ\text{C}$ . Расплавившийся полистирол впрыскивается в литьевую форму под давлением около 600 атм. Процесс впрыска длится около 2 с, по его окончании прессформа охлаждает

ется до 50°C, размыкается, и извлекается готовая сцинтилляционная пластина. Полный цикл занимает менее 2 мин.

Полистирол является основой многих видов сцинтилляторов. Этот материал очень широко используется в промышленности и производится многими предприятиями. Для опытов было отобрано несколько наиболее перспективных сортов от почти десятка разных производителей. Отбор проводился посредством измерения прозрачности образцов на спектрофотометре. Прозрачность исходного материала оказывает непосредственное влияние на качество производимого сцинтиллятора. На рис. 14 показаны результаты одного из таких измерений, выполненных на растворах различных партий полистирола марки ПСМ-115. Отчетливо виден провал в области 330-400 нм (максимум испускания РТР) для некоторых образцов.

Другим способом проверки качества полистирола является непосредственное изготовление сцинтилляционных пластин со стандартным набором добавок. Наилучшие характеристики из всех исследуемых образцов показал полистирол марки ПСМ-115, который и был выбран в качестве матрицы для сцинтиллятора адронного калориметра.

На базе ПСМ-115 были проведены систематические исследования разнообразных спектросмещающих добавок. Основные результаты представлены на рис. 15. Так, например, использование РРО как первичной добавки по сравнению с РТР позволило увеличить световыход на 10%. Для определения дальнейшей его пригодности необходимо провести испытания по радиационной стойкости и стабильности.

Большую роль играют концентрации применяемых первичных и вторичных добавок. На рис. 16 показано влияние концентраций РТР и РОРОР на световыход сцинтиллятора. Практически нет зависимости световыхода от концентрации РОРОР в пределах 0.02-0.1%. Увеличение концентрации РТР с 1.5 до 2.5% приводит к соответствующему увеличению световыхода на ~6%. Сдерживающими факторами являются цена добавки, становящаяся существенной долей от стоимости сцинтиллятора, а также ухудшение прозрачности образцов.

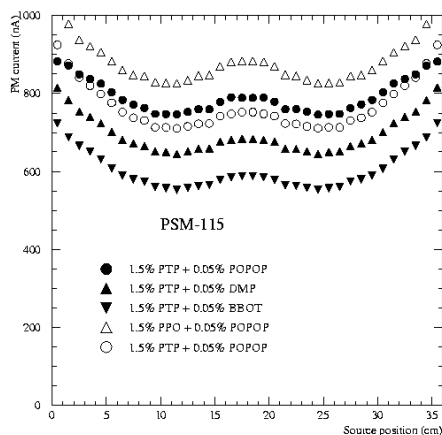
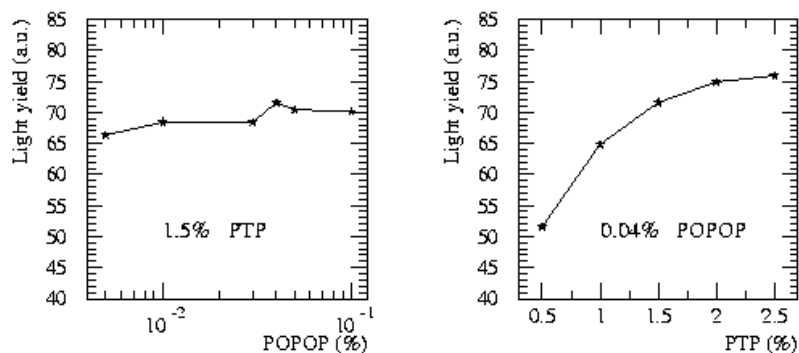
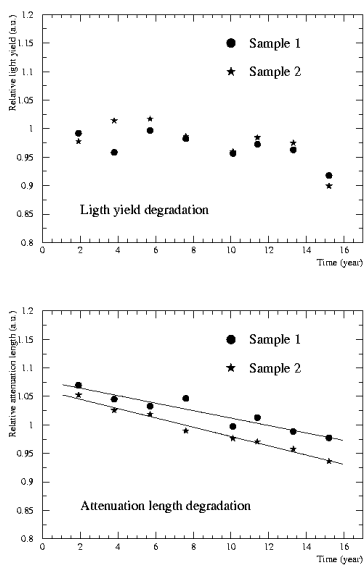


Рис. 15. Характеристики сцинтилляторов на основе ПСМ-115 с различными спектросмещающими добавками.



**Рис. 16.** Зависимость световыхода от концентраций первичной РТР и вторичной РОРОП добавок для сцинтилляционных пластин, изготовленных на основе полистирола ПСМ-115.



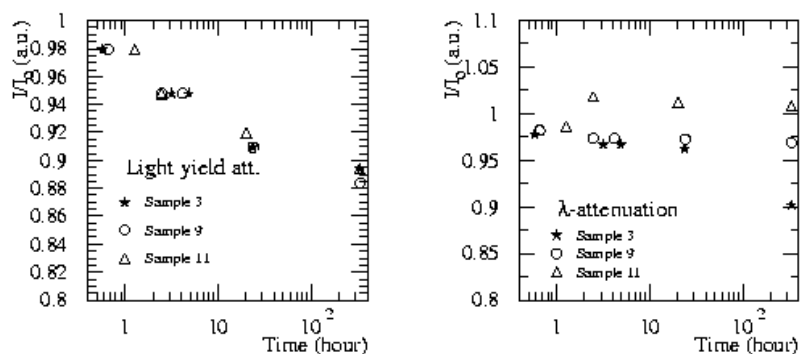
**Рис. 17.** Ожидаемое ухудшение свойств сцинтиллятора как функция времени (измерения проводились при повышенной температуре).

Предполагается, что работа в эксперименте ATLAS будет продолжаться не менее десяти лет. Поэтому естественным требованием к любому компоненту установки является прогнозирование его поведения в течение этого времени. Для оценки степени ухудшения свойств сцинтиллятора во времени была использована методика искусственного старения. Ее суть заключается в резком возрастании скорости протекания химических реакций с увеличением температуры. Рассмотрим естественное старение сцинтиллятора как простейшую химическую реакцию вида  $A \rightarrow X$ , дающую в результате деградацию главных характеристик сцинтиллятора – световыхода и прозрачности. Скорость химической реакции определяется формулой  $dA/dt = k(T) \cdot A$ , где  $A$  есть концентрация реагента;  $k(T) = k_0 \cdot \exp(E/RT)$  – постоянная скорости химической реакции;  $E$ ,  $R$  и  $T$  – энергия активации, универсальная газовая постоянная и температура соответственно. На основании вышеприведенных формул легко подсчитать, что отношение скоростей реакций, например при температурах  $20^\circ$  (рабочая температура



установки ATLAS) и 70°C (искусственное старение) и энергии активации для полистирола 91.19 кДж/моль, составляет 235. Это соответствует ~ 16 годам естественного старения.

В процессе опыта две сцинтилляционные пластины содержались около месяца при температуре 70°C с небольшими перерывами для проведения промежуточных измерений. Данные по деградации световыхода и длины затухания представлены на рис. 17, где отложены отношения после/до нагревания. Ступенчатый рост прозрачности сразу после начала нагревания может быть связан с процессами отпуска в сцинтилляционных пластинах при повышенной температуре. Приняв первую точку графика за исходную, 5%-ое ухудшение длины затухания наблюдается в точке, соответствующей 10 годам срока эксплуатации. Деградация световыхода не превышает 10%.

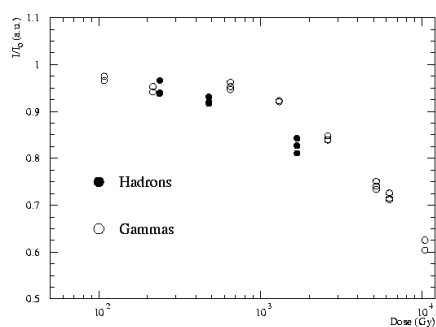
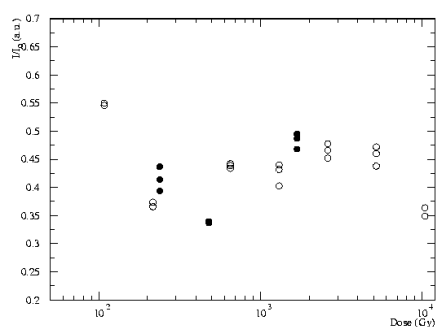


**Рис. 18.** Изменение свойств литьевого сцинтиллятора в течение ближайших суток после изготовления.

При работе с литевым сцинтиллятором наблюдался интересный эффект ухудшения сигнала со сцинтилляционной пластины при повторных измерениях через некоторое время после ее изготовления. Обобщенные данные собраны на рис. 18. Оказалось, что 10–15%-ой деградации подвержен только световыход сцинтилляционных пластин, в то время как длина затухания остается неизменной. При этом резкое ухудшение характеристик происходит лишь в первые сутки после изготовления пластины. Далее процесс замедляется и становится сравнимым с ошибками измерения. Данную особенность необходимо учитывать при мониторинге во время массового производства сцинтилляционных пластин для адронного калориметра.

Радиационная обстановка в эксперименте ATLAS в основном будет определяться числом протон-протонных взаимодействий. Для большей части объема сцинтилляционного калориметра годовая доза не превысит 20 Гр. Максимальное

значение годовой дозы составит 40 Гр, что за 10 лет времени эксплуатации установки выльется в 400 Гр (40 крад). Радиационная стойкость пластинчатого адронного калориметра определяется его наиболее чувствительными элементами – сцинтиллятором и спектросмещающими волокнами. Деградация их свойств в процессе радиационного облучения приводит к ухудшению разрешения калориметра.



**Рис. 19.** Относительный отклик при различных типах облучения как функция полученной дозы сразу (вверху) и через месяц после экспозиции.

Были проведены исследования радиационной стойкости стандартного литьевого сцинтиллятора (1.5 % РТР и 0.04 % РОРОР на базе ПСМ-115) при облучении его  $\gamma$ -квантами и адронами. Результаты сравнительного исследования влияния адронного и  $\gamma$ -облучения суммированы на рис. 19. Адронное облучение вызывает более серьезные повреждения. Кроме того, радиационные повреждения от адронов быстрее возрастают с увеличением поглощенной дозы по сравнению с повреждениями, вызванными  $\gamma$ -квантами. В целом, анализ данных демонстрирует незначительный эффект от воздействия радиационных полей в течение предполагаемого срока эксплуатации установки ATLAS (400 Гр) на характеристики литьевого сцинтиллятора.

Для исследования свойств калориметра было изготовлено несколько прототипов, три из которых представляли собой полномасштабные модули (один центральный и два боковых). Прототипы были всесторонне исследованы на мюонных, пионных и электронных пучках в диапазоне энергий 10–400 ГэВ.

Энергетическое разрешение для пионов исследовалось в диапазоне от 20 до 300 ГэВ при углах падения  $\theta$  от 0 до 30°. Зависимость  $\sigma/E$  аппроксимировалась стандартным выражением  $\sigma/E = a/\sqrt{E} \oplus b$ . Результаты для параметров  $a$  и  $b$  сведены в табл. 3.

Таблица 3.

$\theta$	$b$ (%)	$b$ (%)
10°	46.9±1.2	1.78±0.12
20°	45.2±1.1	1.29±0.11
30°	46.2±1.4	2.13±0.14

Однородность отклика к пионам в сборке из нескольких модулей находится в пределах 1–2%. Исследования отклика калориметра на мюонный сигнал проводились в диапазоне энергий 10–300 ГэВ под полярным углом от 0 до 40°. При перпендикулярном падении осуществлялись калибровка, измерение световых выходов и спектра энергетических потерь мюона. Световых выходов для 150 ГэВ мюонов составил 64 ф.э./ГэВ. Этого достаточно для надежного отделения отклика мюона от шума. Однородность отклика к мюонам была хуже, чем к пионам, – и составила 2–3%.

Экстенсивная программа по исследованию прототипов на тестовых пучках продемонстрировала их хорошие возможности, которые в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявленным к адронной калориметрии эксперимента ATLAS.

**В Заключение** кратко сформулированы основные результаты работы.

### Список литературы

1. A.C.Benvenuti, V.Giordano, M.Guerzoni, F.L.Navarria, T.Camporesi, P.Vaz, S.J.Alvsvaag, O.A.Maeland, A.Klovning, R.Rongved, A.L.Read, J.Bjarne, V.Hedberg, G.Jarlskog, I.Kronkvist, V.Cassio, D.Gamba, E.Torassa, E.Vallazza, L.Zanini, L.Lanceri, G.Della Ricca, P.Poropat, M.Bonesini, P.Negri, M.Paganoni, A.Gomez, A.Maio, L.Peralta, M.Pimenta, B.TomE, S.Bityukov, S.Gumenyuk, **A.Karioukhine**, V.Lapin, V.Obraztsov, A.Ostankov, L.Petrovykh, I.Protopopov, V.Semenov, A.Zaitsev, D.Colledani, W.Dulinski, R.Turchetta. Prototype design, construction and test of a Pb/scintillator sampling calorimeter with wavelength shifter fiber optic readout. In: Proc. of "The 1992 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference – NSS-MIC", Orlando, USA, 1992, Ed. by F. Kirsten. IEEE Trans. Nucl. Sci., 40, (1993), 537-545.
2. Е.В.Власов, А.М.Зайцев, Ю.М.Иванющенко, **А.Н.Карюхин**, В.Ф.Образцов, А.Б.Фенюк, S.J.Alvsvaag, M.Bari, G.Barreira, A.C.Benvenuti, M.Bigi, M.Bonesini, M.Bozzo, T.Camporesi, V.Cassio, L.Castelliani, R.Cerecto, F.Chignoli, G.Della Rica, D.R.Dharmasiri, M.C.Espirito Santo, E.Falk, P.Ferrari, D.Gamba, H.Garling, V.Giordano,

- Yu.Gouz, M.Guerzoni, S.Gumenyuk, V.Hedberg, G.Jarlskog, A.Klovning, I.Kronkvist, L.Lanceri, R.Leoni, O.A.Maeland, A.Maio, R.Mazza, E.Migliore, F.L.Navarria, P.Negri, B.Nossum, A.Onofre, M.Paganoni, M.Pegoraro, L.Peralta, M.Pimenta, P.Poporat, M.Prest, A.L.Read, A.Romero, L.Simonetti, B.Skaali, B.Tome, E.Torassa, P.P.Trapani, E.Valazza, M.G.Verardi. STIC – новый электромагнитный калориметр в области малых углов установки DELPHI. Препринт ИФВЭ 96-14. Протвино, 1996.
3. S.J.Alvsvaag, M.Bari, G.Barreira, A.C.Benvenuti, M.Bigi, M.Bonesini, M.Bozzo, T.Camporesi, H.Carling, V.Cassio, L.Castelliani, R.Cerecto, F.Chignoli, G.Della Rica, D.R.Dharmasiri, M.C.Espirito Santo, E.Falk, A.Fenyuk, P.Ferrari, D.Gamba, V.Giordano, Yu.Gouz, M.Guerzoni, S.Gumenyuk, V.Hedberg, G.Jarlskog, **A.Karyukhin**, A.Klovning, A.Konoplyannikov, I.Kronkvist, L.Lanceri, R.Leoni, O.A.Maeland, A.Maio, R.Mazza, E.Migliore, F.L.Navarria, P.Negri, B.Nossum, V.Obraztsov, A.Onofre, M.Paganoni, M.Pegoraro, L.Peralta, L.Petrovykh, M.Pimenta, P.Poporat, M.Prest, A.L.Read, A.Romero, N.Shalanda, L.Simonetti, B.Skaali, B.Stugu, B.Tome, E.Terranova, B.Tome, E.Torassa, P.P.Trapani, E.Valazza, M.G.Verardi, E.Vlasov, A.Zaitsev. The small angle tile calorimeter in the DELPHI experiment. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A425, (1999), 106-139.
  4. ATLAS/Tile Calorimeter Collaboration. S.Akhmadaliev, F.Albiol, P.Amaral, G.Ambrosini, A.Amorim, K.Anderson, M.L.Andrieux, B.Aubert, E.Auge, F.Badaud, L.Baisin, F.Barreiro, G.Battistoni, A.Bazan, K.Bazizi, C.Bee, J.Belorgey, A.Belymam, D.Benckekroun, S.Berglund, J.C.Berset, G.Blanchot, A.Bogush, C.Bohm, V.Boldea, W.Bonivento, P.Borgeaud, O.Borisov, M.Bosman, N.Bouhemaïd, D.Breton, P.Brette, C.Bromberg, J.Budagov, S.Burdin, L.Caloba, F.Camarena, D.V.Camin, B.Canton, M.Caprini, J.Carvalho, P.Casado, R.Cases, M.V.Castillo, D.Cavalli, M.Cavalli-Sforza, V.Cavasinni, R.Chadelas, M.Chalifour, L.Chekhtman, J.L.Chevalley, I.Chirikov-Zorin, G.Chlachidze, J.C.Chollet, M.Citterio, W.E.Cleland, C.Clement, M.Cobal, F.Cogswell, J.Colas, J.Collot, S.Cologna, S.Constantinescu, G.Costa, D.Costanzo, J-P.Coulon, M.Crouau, P.Dargent, F.Daudon, M.David, T.Davidek, J.Dawson, K.De, E.Delagnes, C.de la Taille, J.Del Peso, T.Del Prete, P.de Saintignon, B.DiGirolamo, B.Dinkespiller, S.Dita, F.Djama, J.Dodd, J.Dolejsi, Z.Dolezal, R.Downing, J.-J.Dugne, P.-Y.Duval, D.Dzahini, I.Efthymiopoulos, D.Errede, S.Errede, F.Etienne, H.Evans, G.Eynard, F.Farida, P.Fassnacht, N.Fedyakin, J.Fernandez De Troconiz, A.Ferrari, A.Ferrari, A.Ferrer, V.Flaminio, D.Fournier, G.Fumagalli, E.Gallas, G.Garcia, M.Gaspar, F.Gianotti, O.Gildemeister, V.Glagolev, V.Glebov, A.Gomes, V.Gonzalez, S.Gonzalez De La Hoz A.Gordeev, H.A.Gordon, V.Grabsky, E.Grauges, Ph.Grenier, H.Hakopian, M.Haney, C.Hebrard, A.Henriques, F.Henry-Couannier, L.Hervas, E.Higon,

- S.Holmgren, J.Y.Hostachy, A.Hoummada, M.Huet, J.Huston, D.Imbault, Yu.Ivanyushenkov, Y.Jacquier, S.Jezequel, E.Johansson, K.Jon-And, R.Jones, A.Juste, S.Kakurin, P.Karst, **A.Karyukhin**, Yu.Khokhlov, J.Khubua, V.Klyukhin, G.Kolachev, V.Kolomoets, S.Kopikov, M.Kostrikov, V.Kovtun, V.Kozlov, P.Krivkova, V.Kukhtin, M.Kulagin, Y.Kulchitsky, M.Kuzmin, L.Labarga, G.Laborie, D.Lacour, S.Lami, V.Lapin, O.Le Dortz, M. Lefebvre T.Leflour, R.Leitner, M.Leltchouk, A.Le Van Suu, J.Li, C.Liapis, O.Linossier, D.Lissauer, F.Lobkowicz, M.Lokajicek, Yu.Lomakin, O.Lomakina, J.M.Lopez Amengual, J-P.Lottin, B.Lund-Jensen, J.Lundquist, A.Maio, D.Makowiecki, S.Malyukov, L.Mandelli, B.Mansoulie, L.Mapelli, C.P.Marin, P.Marrocchesi, F.Marroquin, L.Martin, O.Martin, Ph.Martin, A.Maslennikov, N.Massol, M.Mazzanti, E.Mazzoni, F.Merritt, B.Michel, R.Miller, I.Minashvili, L.Miralles, A.Mirea, E.Mnatsakanian, E.Monnier, G.Montarou, G.Mornacchi, M.Mosidze, M.Moynot, G.S.Muanza, E.Nagy, P.Nayman, S.Nemecek, M.Nessi, D.Nicod, S.Nicoleau, M.Niculescu, J.M.Noppe, A.Onofre, D.Pallin, D.Pantea, R.Paoletti, I.C.Park, G.Parrou, J.Parsons, J.Pascual, A.Pereira, L.Perini, J.A.Perlas, P.Perrodo, P.Petroff, J.Pilcher, J.Pinhao, H.Plochow-Besch, L.Poggioli, S.Poirot, L.Price, Y.Protopopov, J.Proudfoot, O.Pukhov, P.Puzo, V.Radeka, D.Rahm, G.Reinmuth, J.F.Renardy, G.Renzoni, S.Rescia, S.Resconi, R.Richards, J-P.Richer, I.Riu, C.Roda, J.Roldan, J.Romance, V.Romanov, P.Romero, N.Russakovich, P.Sala, E.Sanchis, H.Sanders, C.Santoni, J.Santos, D.Sauvage, G.Sauvage, A.Savoy-Navarro, L.Sawyer, L.-P.Says, A.Schaffer, P.Schwemling, J.Schwindling, N.Seguin-Moreau, W.Seidl, J.M.Seixas, B.Sellden, M.Seman, A.Semenov, V.Senchishin, L.Serin, E.Shaldaev, A.Shchelchkov, M.Shochet, V.Sidorov, J.Silva, V.Simaitis, S.Simion, A.Sissakian, I.Soloviev, R.Snopkov, J.Soderqvist, A.Solodkov, P.Sonderegger, K.Soustruznik, F.Spano, R.Spiwoks, R.Stanek, E.Starchenko, P.Stavina, R.Stephens, S.Studenov, M.Suk, A.Surkov, I.Sykora, J.P.Taguet, H.Takai, F.Tang, S.Tardell, P.Tas, J.Teiger, F.Teubert, J.Thaler, J.Thion, Y.Tikhonov, V.Tisserand, S.Tisserant, S.Tokar, N.Topilin, Z.Trka, M.Turcotte, S.Valkar, M.J.Varanda, A.Vartapetian, F.Vazeille, I.Vichou, P.Vincent, V.Vinogradov, S.Vorozhtsov, V.Vuillemin, C.Walter, A.White, M.Wielers, I.Wingerter-Seez, H.Wolters, N.Yamdagni, G.Yarygin, C.Yosef, A.Zaitsev, R.Zitoun, Y.P.Zolnierowski. Tile Calorimeter Technical Design Report. CERN/LHCC 96-42, 1996.
5. **A.N.Karyukhin**, V.V.Lapin, Yu.M.Protopopov, V.G.Vasil'chenko. Radiation hardness study on molded scintillation tiles and wavelength shifting fibers. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B117. (1996). 415-420.

*Рукопись поступила 16 ноября 2000 г.*

А.Н. Карюхин.

Разработка и исследование сцинтилляционных детекторов в экспериментах на ускорителях и коллайдерах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 20.11.2000. Формат 60x84/16. Офсетная печать.

Печ.л. 1,17. Уч.-изд.л. 1. Тираж 100. Заказ 236. Индекс 3649.

ЛР №020498 06.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142280, Протвино Московской обл.

**Индекс 3649**

---

**АВТОРЕФЕРАТ, 2000 –51, ИФВЭ, 2000**

---