

На правах рукописи

Шманин Евгений Владимирович

**РАЗРАБОТКА РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО
МОДУЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
КАЛОРИМЕТРА СПЕКТРОМЕТРА LHCb**

Специальность 01.04.01 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им.П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва

Научный руководитель: **Полухина Наталья Геннадьевна** д.ф.-м.н., проф., высококвалифицированный главный научный сотрудник лаборатории элементарных частиц Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), г. Москва

Официальные оппоненты: **Роганова Татьяна Михайловна**, доктор физико-математических наук, профессор, НИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Заведующий лабораторией теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия и переноса излучений в различных средах.

Лубсандоржиев Баярто Константинович, доктор физико-математических наук, ИЯИ РАН г. Москва, Ведущий научный сотрудник отдела экспериментальной физики

Ведущая организация: Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна

Защита состоится 26 Сентября 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 по защите докторских и кандидатских диссертаций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53., ФИАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и на сайте института: www.lebedev.ru, с авторефератом – на сайте ФИАН www.lebedev.ru..

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.04, д.ф.-м.н

Баранов Сергей Павлович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Приборы для измерения энергии частиц — калориметры впервые разработаны в середине XX века и основаны на методе полной остановки, то есть поглощении частицы в объеме детектора [1; 2]. Большинство современных экспериментов ядерной физики и физики высоких энергий содержат в своей конструкции калориметрические системы, в том числе и детекторы Большого Адронного Коллайдера (БАК) в Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН).

Экспериментальное подтверждение существования Бозона Хиггса экспериментами ATLAS и CMS на LHC [3; 4] дополнило стандартную модель (СМ), однако на данный момент модель не является «теорией всего» и актуальным направлением современной физики являются исследования по поиску так называемой Новой физики, выходящей за рамки СМ. Физическая программа эксперимента LHCb в ЦЕРН посвящена изучению физики частиц, содержащих s - и b - кварки, поскольку в их распадах ожидается наличие эффектов, не описанных Стандартной Моделью, что может повлечь за собой отклонения от СМ в описании CP-симметрии, что подтверждает актуальность эксперимента. Калориметрическая система является важнейшей частью детектора LHCb и отвечает за триггер нулевого уровня электронными и фотонными кандидатами с высоким поперечным импульсом [5], измерение энергии частиц и их положения, а также позволяет проводить идентификацию электронов, фотонов и адронов [6].

В рамках модернизации БАК и реализации программы увеличения светимости [7; 8], произойдет увеличение радиационного воздействия, оказываемого на подсистемы детектора LHCb. Таким образом, актуальность темы определяется необходимостью модернизации электромагнитного калориметра (ECAL) на предмет повышенного быстродействия и радиационной стойкости внутренней и центральной частей прибора.

Целью работы является разработка модуля калориметра гетерогенной структуры, состоящего из плотного абсорбера и сцинтилляционных волокон, расположенных параллельно направлению развития ливня (SPACAL-технология). Основной задачей являлось создание прибора, соответствующего требованиям эксперимента LHCb после фазы модернизации 2, по временному разрешению (десятки пс), энергетическому разрешению ($\sim 10\%/\sqrt{E}$) и

радиационной стойкости (способность работы при интегральной светимости $300 fb^{-1}$).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Поиск и исследование радиационно-стойких материалов, потенциально применимых в электромагнитной калориметрии.
2. Оптимизация конструкции модуля с целью оптимального применения новых материалов.
3. Моделирование работы прототипа при регистрации релятивистских электронов и фотонов.
4. Создание и сборка тестового прототипа калориметра.
5. Тестирование прототипа на пучке релятивистских электронов. Анализ результатов измерений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Конструкция электромагнитного калориметра типа Спагетти в качестве детектора, работающего в условиях высокой радиационной нагрузки при поглощенной дозе порядка 100 МРад.
2. Результат исследования оптической прозрачности сцинтилляционных кристаллов под воздействием радиационных нагрузок, приближенных к условиям работы детектора ЛНСб в условиях повышенной светимости БАК.
3. Оптимизация геометрии прототипа калориметра по результатам Монте-Карло моделирования его работы при регистрации релятивистских электронов и фотонов.
4. Результаты экспериментального тестирования прототипа электромагнитного калориметра эксперимента ЛНСб на пучке релятивистских электронов.

Научная новизна:

1. Измерена радиационная стойкость сцинтилляционных кристаллов гадолиний-алюминиевого галлиевого граната, допированного церием (GAGG:Ce) при поглощенной дозе порядка 100 МРад;
2. Впервые собран и протестирован спагетти-калориметр на основе кристаллических сцинтилляционных волокон;

3. Исследованы энергетические и временные характеристики прототипов спагетти-калориметров.

Практическая значимость. Предложенный метод построения калориметрической системы регистрации электромагнитных ливней позволяет проводить исследования в условиях повышенных радиационных нагрузок (~ 100 МРад в центральной части калориметра) и обладает требуемыми значениями временного и энергетического разрешения, при этом пространственное разрешение прибора определяется размером ячейки и может варьироваться в зависимости от задач.

Достоверность полученных в работе результатов определяется стабильностью функционирования всех подсистем экспериментальной установки в период набора данных, а также сравнением результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: VIII Международной школе-конференции "Современные проблемы физики и технологий Москва (15 — 20 апреля 2019); The SENSE Detector School, Мюнхен (19 — 22 июня 2019); LHCb simulation and reconstruction Meeting, Женева (Октябрь 2018), Регулярных совещаниях исследовательской группы SPACAL R&D/LHCb ECAL Upgrade 2, Женева (2017 — 2022). Также результаты работы неоднократно докладывались на коллаборационных совещаниях LHCb week в CERN (2017 — 2022).

Личный вклад. Автор принимал активное участие в реализации проекта на всех стадиях, а именно: проведении радиационных испытаний образцов сцинтилляционных кристаллов, разработке и сборке тестовых прототипов, моделировании прототипов в инструментарии GEANT4, подготовке экспериментальной установки, проведении экспериментальных исследований, а также при решении сопутствующих основной цели задач.

Публикации. Общий список публикаций автора включает 162 статей. При этом основные результаты по теме диссертации изложены в 4 неколлаборационных работах [9–12] 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [9–11]:

1. V. Alenkov, E. Shmnain [и др.] «Irradiation studies of a multi-doped $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ scintillator» Nuclear Instruments and Methods

- in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — т. 916. — с. 226—22;
2. E. Shmanin «GEANT4 simulation of energy resolution of the SPACAL electromagnetic calorimeter» Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — янв. — т. 1439. — с. 012007;
 3. G. Dodovitskiy, E. Shmanin [и др.] «Time and energy resolution with SPACAL type modules made of high-light-yield Ce-doped inorganic scintillation materials: Spillover and background noise effects» Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2021. - т. 999. - с. 165169;
 4. I. Guz, E. Shmanin [и др.] «A simulation study of the time measurement accuracy for the SPACAL type ECAL Module for LHCb Upgrade phase 2» CERN. — Geneva, 05.2020. — URL: <http://cds.cern.ch/record/2718983>;

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена эксперименту LHCb на Большом Адронном Коллайдере (LHC), описанию LHC, спектрометра LHCb, основных достижений эксперимента и мотивации модернизации прибора.

Эксперимент Large Hadron Collider beauty (LHCb) является одним из четырех экспериментов на LHC, наряду с CMS, ATLAS и ALICE. Главной задачей данного эксперимента является поиск Новой физики за пределами Стандартной Модели, а также изучение процессов, влияние которых повлекло за собой возникновение одного из самых впечатляющих явлений во Вселенной — преобладания количества материи над антиматерией, что предоставило возможность возникновению мира в таком виде, в каком он существует сейчас. Предполагается, что данное нарушение произошло в первые моменты возникновения Вселенной и доля преимущества вещества над антивеществом составила порядка 10^{-9} .

Детекторный комплекс LHCb предназначен для изучения нарушения CP-симметрии, а также редких распадов адронов, содержащих b или c кварки. Основной особенностью данного детектора является его несимметричное строение (в отличие от CMS и ATLAS, окружающих место столкновения встречных пучков протонов), он имеет форму в виде конуса в вершине которого и происходит взаимодействие встречных пучков протонов (рисунок 1). Образовавшиеся в результате столкновения частицы, попадают в первую часть детектора LHCb — вершинный трековый детектор (VELO), который предназначен для измерения трековых координат, используемых при реконструкции первичных и вторичных вершин (рождения и распада) b - и c - адронов. Во время измерений VELO находится на расстоянии 5 мм от оси пучка, по причине того, что «прелестные» и «очарованные» частицы имеют пробеги порядка 1 мм. За вершинным детектором установлены черенковские детекторы RICH 1 и RICH 2, служащие для идентификации заряженных частиц в диапазоне импульсов от 1 ГэВ/с до 150 ГэВ/с [13].

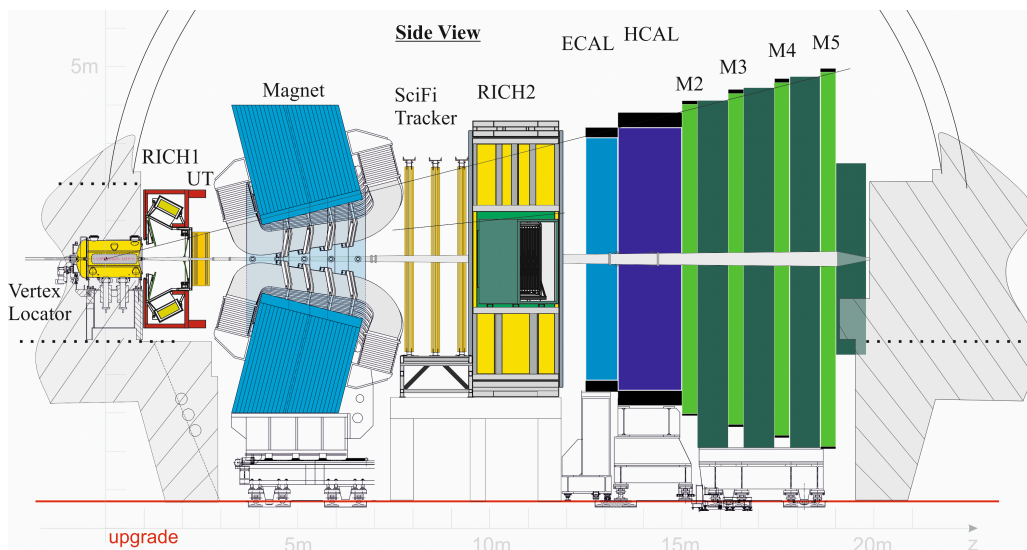


Рис. 1 — Детекторный комплекс LHCb.

Между черенковскими детекторами расположена трековая система, состоящая из секции триггерного трекера, и трех секций T1-T3, расположенных между магнитом и черенковским детектором RICH-2. В ближней к пучку области секций T1-T3 внутреннем трекере и в триггерном трекере ТТ используются микроstriповые сенсоры. Во внешней области секций T1-T3 внутреннем трекере используются дрейфовые трубки, по причине меньшей плотности частиц. Трекинг система предназначена для реконструкции

треков заряженных частиц и черенковских колец RICH-детекторов, а также определения импульсов частиц.

Следующей частью детектора LHCb является калориметрическая система, необходимая для измерения энергии частиц. Основными модулями системы являются сцинтилляционно – падовый детектор (SPD) и предливневый детектор (PS), с установленной свинцовой пластиной между ними, а также электромагнитный калориметр (ECAL) и адронный калориметр (HCAL). Система SPD/PS позволяет режектировать фон от π^0 -мезонов и определить заряженная или нейтральная частица проходит калориметр (SPD). Также система позволяет произвести режекцию фона от заряженных пионов и определить тип пролетающей частицы – электрон, если заряженная, или фотон, если нейтральная (PS). Наличие подобной системы перед ECAL необходимо по причине того, что вышеупомянутые частицы дают в калориметре одинаковые электромагнитные ливни и необходимо идентифицировать их до входа в калориметр. На рисунке 2 представлены сигналы, возникающие от частиц в различных частях калориметрической системы [6; 14; 15].

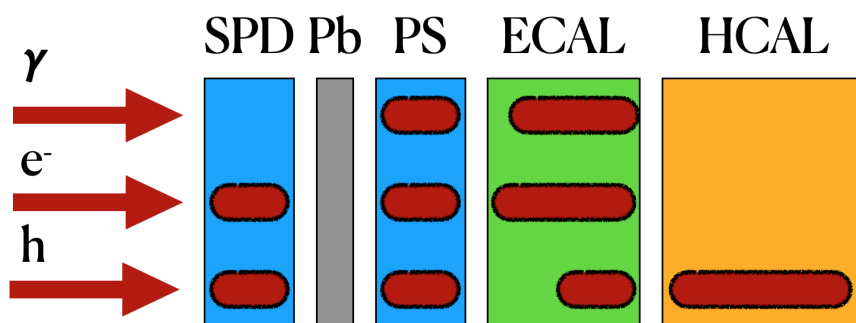


Рис. 2 — Сигналы, возникающие от частиц (электрон, адрон и гамма-квант), в различных частях калориметра.

Электромагнитный калориметр является гетерогенным и выполнен по технологии «шашлык». Основная идея данной структуры заключается в чередовании пластинок сцинтиллятор (4 мм) – свинец (2 мм). В одном модуле содержится стопка из 66 свинцовых и 67 сцинтилляционных пластин. В стопках имеются отверстия для спектросмещающих волокон, через которые свет передается на ФЭУ (Hamamatsu R7899-20). Длина модуля 42 см \sim 25 радиационных длин, радиус Мольера \sim 36 мм. ECAL разбит на 3 зоны – внутренняя, средняя и внешняя. Модули внутренней секции содержат 9 ячеек в каждом,

средней – 4, внешней – 1 ячейку в модуле (рисунок 3). Всего в калориметре 3312 модулей и 6016 ячеек.



Рис. 3 — Модули электромагнитного калориметра ЛНСб.

Адронный калориметр также является гетерогенным. Ключевая особенность данного калориметра – ориентация пластин сцинтиллятора, направленных параллельно оси пучка. В боковом направлении пластины сцинтиллятора перемежаются железными пластинами толщиной 1 см, в то время как в продольном направлении длины пластин сцинтиллятора и железа соответствуют длине адронного взаимодействия в стали. Свет собирается спектро-смещающими волокнами, расположенными вдоль детектора по направлению к задней стороне, где находятся ФЭУ. Завершающим модулем детекторного комплекса является мюонная система. Регистрация мюонов является важной составляющей эксперимента, поскольку они рождаются во многих модах распада b – мезонов, чувствительных к CP-нарушению. В мюонной системе используются многопроволочные пропорциональные камеры, а также трехкаскадные газовые электронные умножители (GEM) – во внутренней секции, где плотность потока частиц максимальна [16; 17].

Вторая глава посвящена выбору материала для радиационно-стойкого модуля электромагнитного калориметра. Приводятся результаты исследования радиационной стойкости сцинтилляционных кристаллов, а также оценки наведенной радиоактивности при работе в реальных условиях. Также приводятся результаты моделирования энергетического разрешения спагетти-калориметра при различных значениях сэмплинг отношения.

Наиболее перспективной заменой пластиковым сцинтилляторам являются кристаллы гадолиний-алюминиевого галлиевого граната, легированного

цием (GAGG:Ce) [18–20]. Данный сцинтиллятор имеет монокристаллическую структуру желтого цвета, негигроскопичен, обладает высоким световым выходом $\sim 50\,000$ фотонов/МэВ. Основные характеристики кристалла представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные характеристики сцинтиллятора GAGG: Ce.

	GAGG:Ce	YAG:Ce
Плотность	6,63 г/см ³	4,56 г/см ³
Z_{eff}	54	37
Энергетическое разрешение на энергии 662 КэВ	6%	14,9%
Время высвечивания	62 нс	76 нс
Пик эмиссии	530 нм	530 нм
Показатель преломления (для 550 нм)	1,9	1,82

Основной задачей радиационных испытаний кристаллов являлось определение влияния радиационного воздействия на спектр пропускания кристаллов путем последовательного измерения трансмиссионных спектров до и после облучения с последующим сравнением этих результатов. Исследовались несколько образцов, в том числе сцинтилляционное волокно на основе кристалла GAGG:Ce.

Результаты испытаний, представленные на рисунке 4(а), демонстрируют высокую радиационную устойчивость кристаллов - при поглощенной дозе ≈ 91 МРад ухудшение спектров пропускания кристалла составило не более 4%.

Облучение сцинтилляционного волокна длиной 10 см проводилось на протонном пучке ускорителя PS с плотностью пучка $3,5 \times 10^{15}$ протонов/см², энергия протонов – 24 ГэВ. Общая доза, поглощенная исследуемым образцом составила приблизительно 1,03 МГр (103 Мрад). Результаты экспериментального исследования длины затухания представлены на рисунке 4(б).

Результаты исследования демонстрируют уменьшение длины затухания под воздействием радиационных нагрузок дозой в 103 МРад прибли-

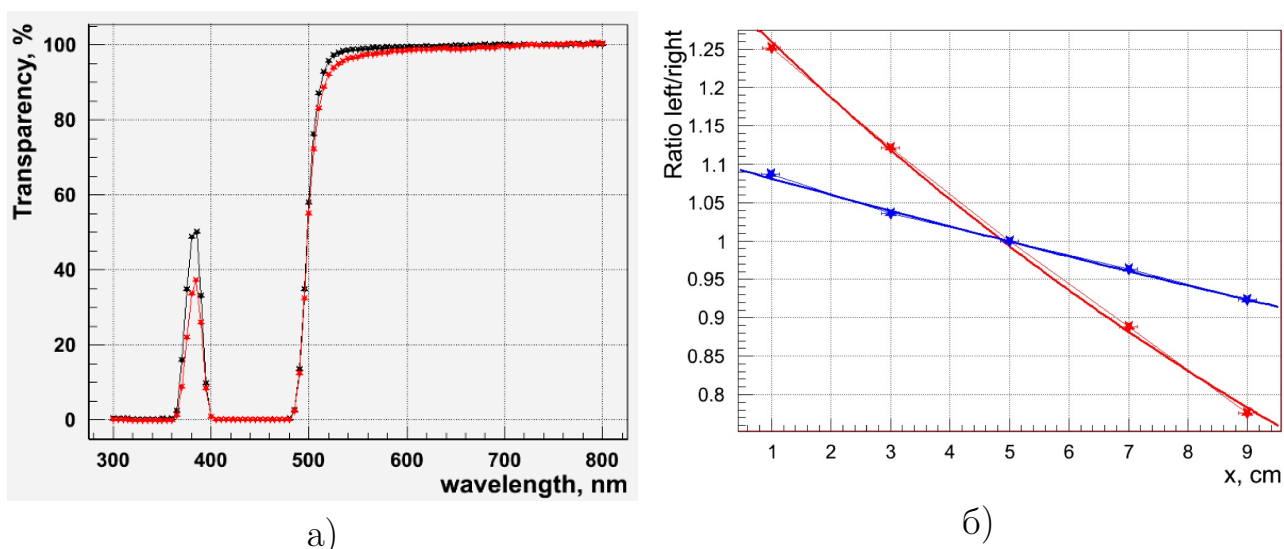


Рис. 4 — Спектр пропускания кристалла GAGG:Ce толщиной 1 см до (черный) и после (красный) облучения, поглощенная доза составила 91 Мрад. (а) и длины затухания сцинтилляционного волокна до (синий) и после (красный) облучения (103 Мрад)(б).

зительно в три раза. Однако, несмотря на это, полученное значение более чем достаточно для использования сцинтилляционных волокон кристалла GAGG:Ce в прототипе радиационно-стойкого модуля электромагнитного калориметра [9].

Оценка наведенной радиоактивности проводилась посредством специализированной программы ActiWiz на базе инструментария FLUKA [21]. В ходе моделирования были заданы условия аналогичные ожидаемым радиационным нагрузкам в области ЕСАL после старта программы повышенной светимости LHC. Опираясь на результаты симуляции определено энерговыделение в секунду E_{second} , и энерговыделение на кубический сантиметр кристалла в секунду E_{totSec} тридцати наиболее активных изотопов в составе облученного GAGG:Ce, составляющее, вносящих максимальный вклад в общее энерговыделение в кристалле. $E_{second} = 2,526 \text{ ГэВ/с}$, $E_{totSec} = 16,746 \text{ ГэВ} \times \text{см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

SPACAL (Spaghetti Calorimeter) – технология построения калориметра, при которой конструкция прибора представляет собой цельный блок поглотителя, пронизанный сцинтилляционными волокнами вдоль направления развития ливня. Данная конструкция позволяет получить относительно компактный электромагнитный ливень за счет увеличения объема поглотителя в приборе. Расстояние между волокнами, а также их размер могут варьиро-

ваться, что в свою очередь будет отражаться на энергетическом разрешении прибора, радиусе Мольера и радиационной длине конструкции в целом [22].

Немаловажным аспектом в подготовке прототипа является определение зависимости энергетического разрешения от основных параметров конфигурации, таких как размер сцинтилляционного волокна и расстояние между волокнами. Для решения этой задачи проведено моделирование работы модуля на пучке электронов с энергией 1 ГэВ. Размеры исследуемого модуля $210 \times 180 \times 400$ мм³, материал поглотителя — вольфрам-медный сплав с массовой долей (75:25%). Исследуемый модуль облучался пучком электронов отклоненных на 3° относительно осей OY и OZ . Смоделированы размеры квадратных сцинтилляционных волокон со сторонами 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6 и 2 мм, с расстоянием между центрами волокон варьирующемся от 1 до 2,8 мм. Энергетическое разрешение определялось посредством использования распределения энергии выделенной в сцинтилляторе, т.е. без учета возможных световых потерь. Результаты исследования для сцинтилляторов GAGG:Ce и YAG:Ce представлены на рисунке 5 (а и б) соответственно [10].

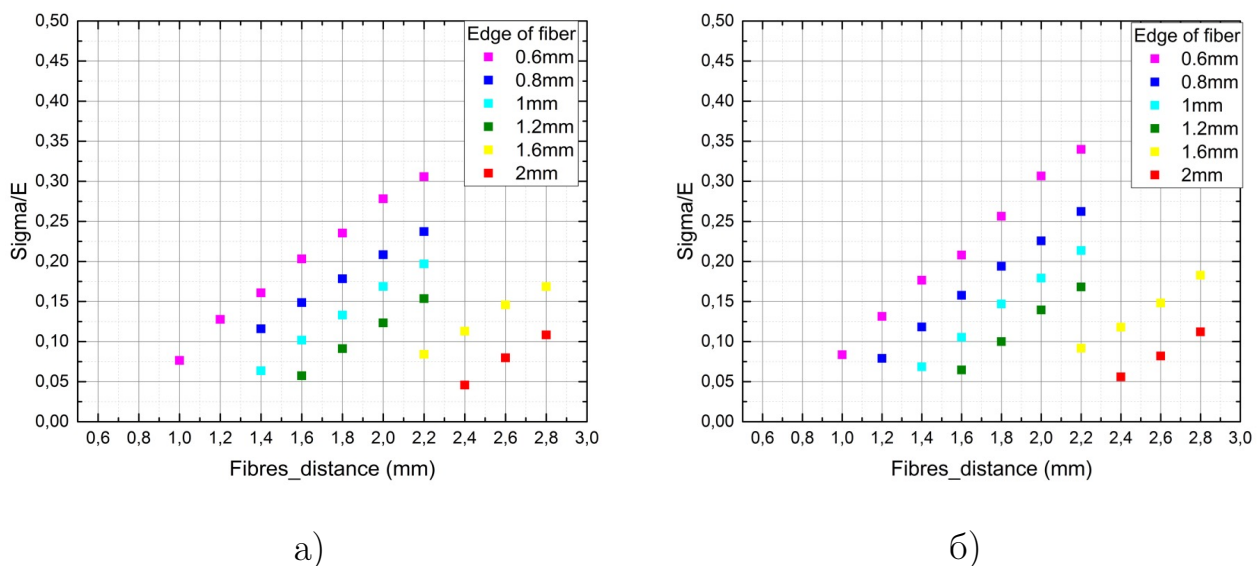


Рис. 5 — Зависимость стохастического члена энергетического разрешения от размера сцинтиллятора и расстояния между центрами волокон. GAGG:Ce (а) YAG:Ce (б).

Исходя из данного исследования была выбрана конфигурация первого прототипа спагетти-модуля с размером волокон 1×1 мм² и расстоянием между центрами 1.6 мм.

Третья глава посвящена разработке первого прототипа спагетти-калориметра, моделированию энергетического разрешения прибора и экспериментальным исследованиям прототипа на пучке релятивистских частиц.

В основу прототипа заложена схема расположения волокон следующего типа — девять ячеек, центральная заполнена сцинтиллятором GAGG:Ce, угловые ячейки — сцинтиллятором на основе полистерена, а оставшиеся, кристаллами YAG:Ce, образующими крест вокруг центральной ячейки (рисунок 6). Прототип разделен на две секции по 10 см длиной (общая длина модуля — 20 см), система считывания расположена с двух сторон (double read-out) и основана на светособирающих конусах с размером выходного окна совпадающего с входным окном фотоприёмника. В качестве материала поглотителя использовался вольфрам-медный сплав с массовым отношением 75:25.

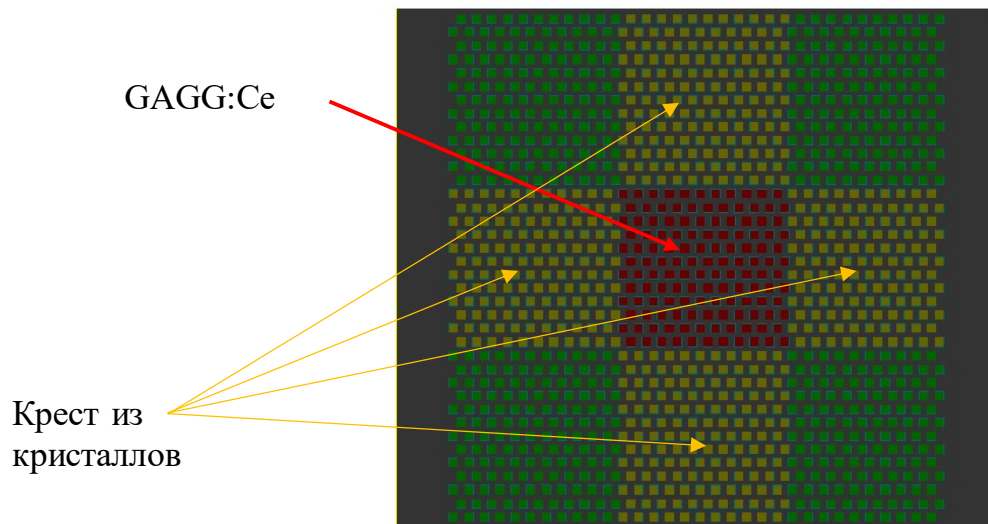


Рис. 6 — Схема расположения сцинтилляционных волокон.

Система двойного считывания в данном случае использовалась с целью уменьшения световых потерь на стыках кристаллических волокон, что позволяет улучшить как энергетические, так и временные характеристики прибора, с этой же целью торцы кристаллов были покрыты светоотражающим материалом.

С целью экспериментального исследования характеристик прототипа проведены серии измерений модуля на пучке электронов от протонного суперсинхротрона (SPS) в CERN, являющегося предшественником Большого Адронного Коллайдера (LHC). В планы измерений входило исследование энергетического разрешения прибора для различных углов и энергий первичных

частиц, измерение отклика прибора на мюоны, а также проведение временных измерений прототипа. В состав экспериментальной установки входили 3 сцинтилляционных счетчика, выступающие в качестве триггерной системы для пучка, 3 проволочные дрейфовые камеры, для измерения треков и 2 черенковских счетчика на основе плекса, считываемые при помощи микроканальных пластин (МСП), выполняющие роль временного референса. Схема установки представлена на рисунке 7.

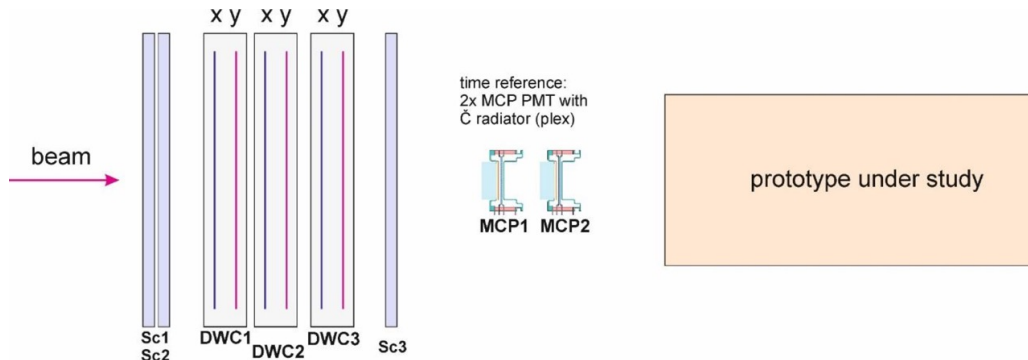


Рис. 7 — Схема экспериментальной установки.

В качестве электронной системы считывания использовались временно-цифровой преобразователь CAEN TDC V1290N для считывания МСП, амплитудно-цифровой преобразователь LeCroy ADC 1182 для амплитудных измерений и оцифровщик сигналов CAEN DT5742 digitizer для записи формы сигналов.

Энергетическое разрешение для электронов энергией 20 ГэВ составило 4,4%, результаты моделирования подобного эксперимента в инструментарии GEANT4 демонстрировали ожидаемое разрешение 3,8%. Таким образом, реальные результаты согласуются с результатами моделирования (Рисунок 8).

Результаты временного разрешения модуля SPACAL калориметра для центральной секции (кристаллы GAGG:Ce) представлены в таблице 2 [23].

Таблица 2 — Результаты временных измерений SPACAL модуля.

Энергия частиц, ГэВ	Напряжение на ФЭУ, В	$\langle t \rangle$, нс	$\sigma(t)$, пс
20	630	27,5	85 ± 3
20	730	26,1	78 ± 2

Временное разрешение SPACAL модуля составило ≈ 80 пс, однако представляется возможным улучшение этой характеристики до 40 – 50 пс,

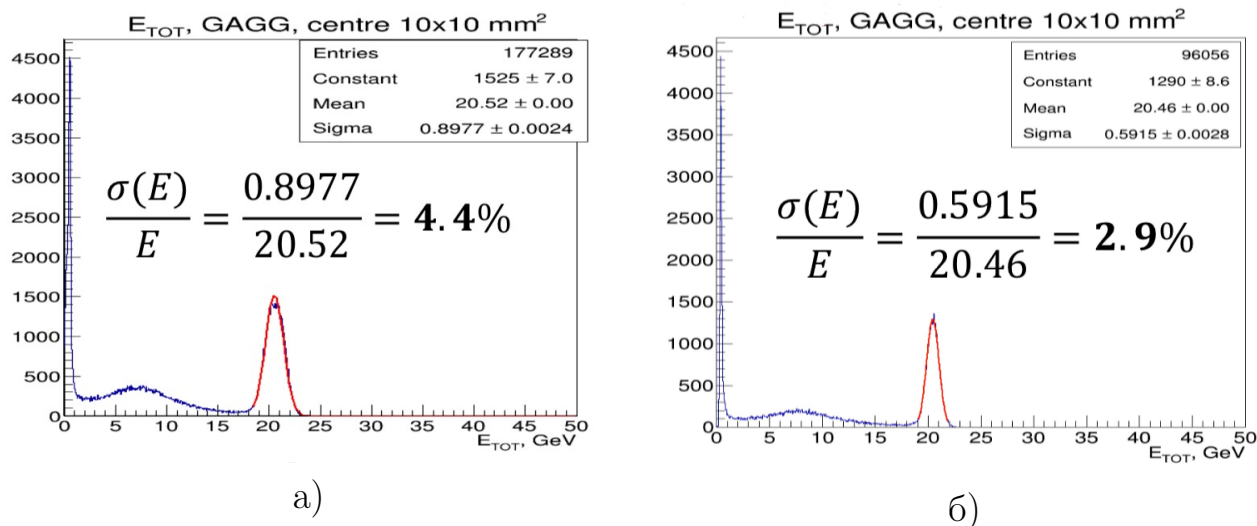


Рис. 8 — Амплитудное распределение центральной ячейки прототипа от пучка электронов с энергией 20 ГэВ. $\alpha_X = 3^\circ$, $\alpha_Y = 0^\circ$ (а) $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_Y = 3^\circ$ (б).

за счет внесения изменений в конструкцию модуля. В частности, укорочение фронтальной секции может служить фактором улучшения временного разрешения. Исследованию временного разрешения шаплык-модуля с системой двойного считывания описанное в пункте 3.3.3 послужило мотивацией создания модернизированного прототипа с асимметричным разделением на продольные секции.

В четвертой главе приведено описание разработки и сборки модернизированного модуля спагетти-калориметра с асимметричным разделением на продольные секции. В главе приводится описание процесса сборки модуля, моделирования энергетического разрешения в инструментарии GEANT4 и результаты экспериментальных исследований прототипа, а также изменение конструкции светосбора после первых неудачных экспериментальных исследований и повторное измерение временного разрешения.

В основу прототипа заложена схема расположения сцинтилляционных волокон, разделенная на девять ячеек: три ячейки заполнены сцинтиллятором GAGG:Ce, и шесть ячеек — кристаллами YAG:Ce (рисунок 9).

В продольном направлении прототип разделен на две секции по 4 и 10 см длиной, что эквивалентно 7 и 18 радиационным длинам соответственно. В проведенном исследовании [11] выполнено моделирование, демонстрирующее преимущество использования укороченной фронтальной секции при проведении измерений временного разрешения. Исследование проводилось посред-

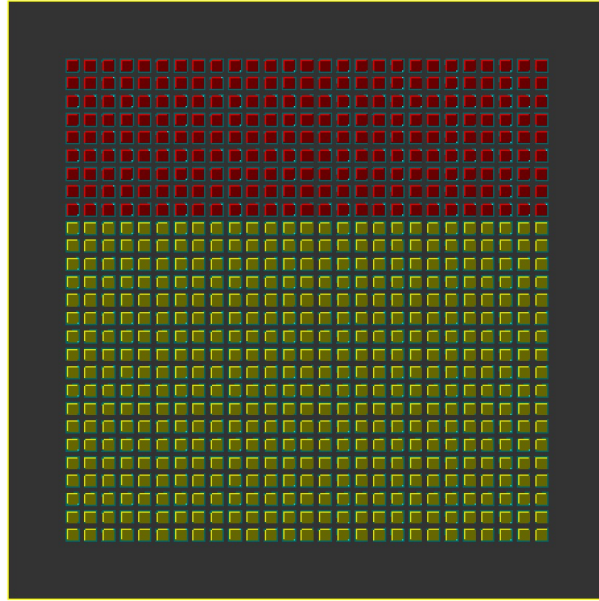


Рис. 9 — Схема расположения сцинтилляционных волокон в прототипе.

Красный — GAGG:Ce, Желтый — YAG:Ce.

ством моделирования временного разрешения в инструментарии GEANT4 и демонстрирует, что точность постановки временных меток при считывании ФЭУ обеих секций модуля зависит от типа сцинтилляционного материала: предпочтительнее сочетание более короткой кинетики сцинтилляций с более высоким световыходом. В то же время, преимущества короткой фронтальной части становятся наиболее заметными при увеличении энергии регистрируемых частиц, поскольку позволяет уменьшить влияние медленных компонентов спада сцинтилляционных вспышек, приводящих к наложению сигналов. Система считывания расположена обоим торцам модуля и основана на системе светопроводящих волокон, стыкующихся со сцинтиллятором таким образом, что каждому кристаллу соответствует свой световод. Свет от каждой из ячеек транспортируется на фотоприемник (Hamamatsu R-7899-20). Подобная система позволяет транспортировать свет на фотоприемник, размеры входного окна которого значительно превышают поперечные размеры ячеек (рисунок 10).

В тестируемом прототипе использовались световоды на основе пластика, длина световодов ~ 15 см, общая длина прототипа, включая системы светосбора ~ 700 см.

Светосбор с ячеек модуля осуществляется посредством светособирающих волокон на основе полистерена. Свет от каждой сцинтилляционного

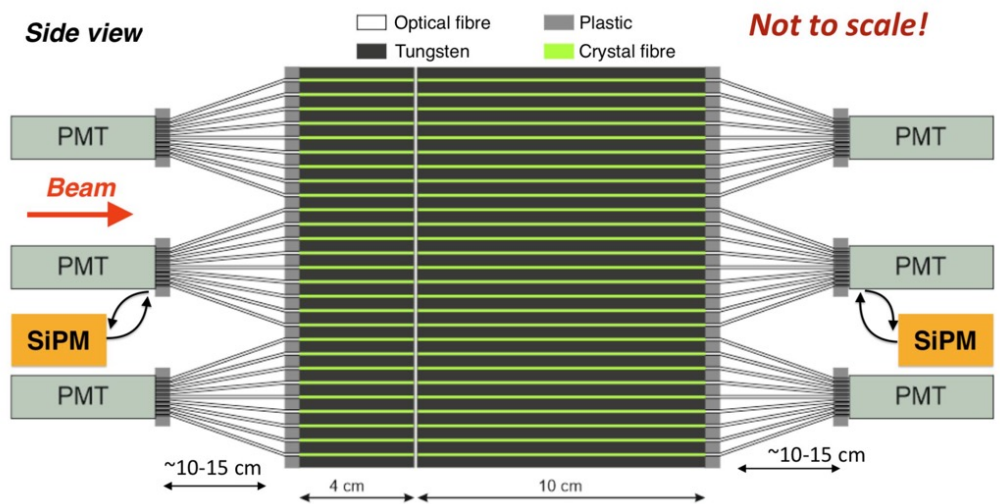


Рис. 10 — Схема построения системы считывания прототипа.

волокна всех 9 ячеек, размером $15 \times 15 \text{ мм}^2$ собирается светопроводящим волокном и направляется на во входное окна фотоэлектронного умножителя (22 мм). Крепление волокон обеспечивается напечатанной на 3-D принтере маской из пластика посредством винтового соединения (рисунок 11).

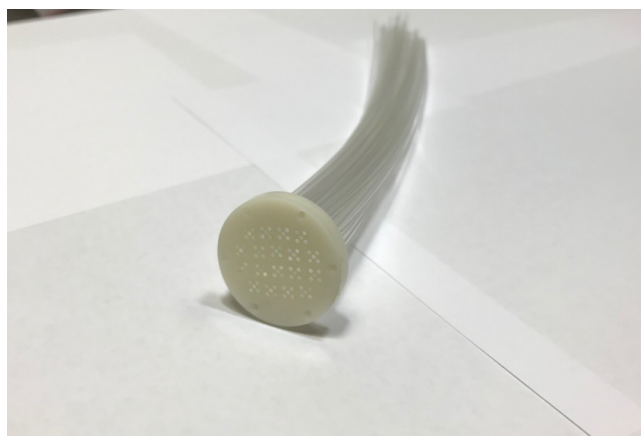
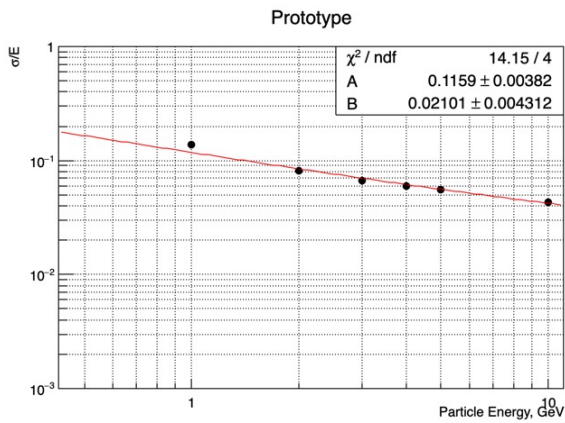


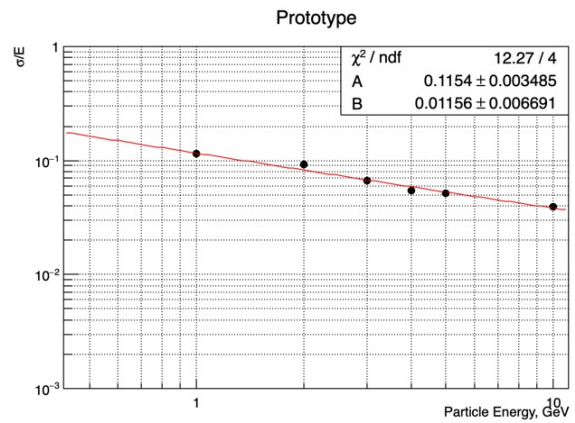
Рис. 11 — Пучок светособирающих волокон.

Результаты моделирования модернизированного прототипа демонстрируют незначительное улучшение энергетического разрешения в сравнении с предыдущим прототипом (рисунок 12). Данный факт объясняется увеличением воздушного пространства между сцинтилляционным волокном и стенкой поглотителя, что приводит к расширению электромагнитного ливня и, соответственно, улучшению энергетического разрешения.

В измерениях на электронном пучке основными задачами являлись измерение энергетического разрешения, а также исследование временных характеристик прототипов. Максимальная энергия электронного пучка на уско-



а)



б)

Рис. 12 — Результаты моделирования энергетического разрешения модернизированного прототипа SPACAL калориметра, угол первичной частицы $3^\circ \times 3^\circ$ (а) и $4^\circ \times 4^\circ$ (б).

рителе DESY II составляет 5 ГэВ. Схема экспериментальной установки была идентичной схеме проведения экспериментальных исследований первого прототипа (рисунок 7).

Результаты энергетических измерений для углов вхождения частиц 0° и 0° представлены на рисунке 13. На данном рисунке представляется возможным наблюдать два визуально разделяемых пика в энергетическом распределении. Происхождение данных событий объясняется углом вхождения частицы в модуль калориметра: в первом случае частица входит в сцинтилляционное волокно или воздушный зазор под нулевым углом и инициирует электромагнитный ливень после прохождения большей части длины модуля. Таким образом электромагнитный ливень собирается не полностью, и его значительная часть выходит за пределы прибора. Второй случай соответствует попаданию частицы в более плотное вещество — поглотитель, в таком случае ливень инициируется в первых сантиметрах модуля, однако ядро ливня направлено в параллельном направлении с плоскостью листа поглотителя, что приводит к уменьшению энергии в сцинтилляционном волокне, в сравнении с случаем наклоненного пучка.

Зависимость энергетического разрешения от энергии для разных углов падения первичных частиц представлена на рисунке 14

Измерения световыхода сцинтилляционных волокон базировались на использовании системы светодиодов. Результаты измерений представлены в таблице 3.

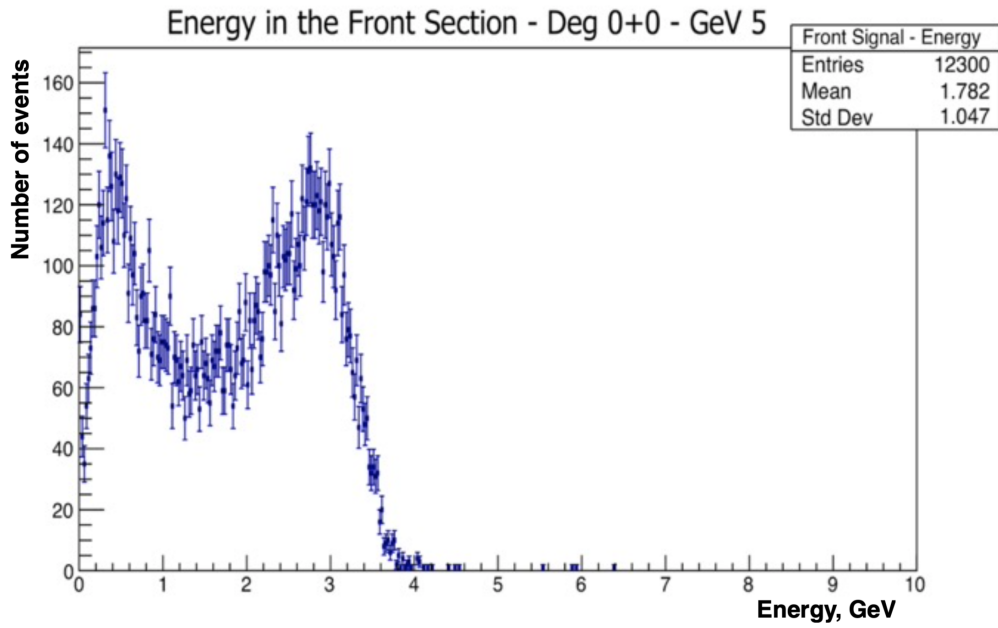


Рис. 13 — Откалиброванное амплитудное распределение энергии в первой секции прототипа от пучка электронов с энергией 4 ГэВ, $\alpha_X = 0^\circ$, $\alpha_Y = 0^\circ$.

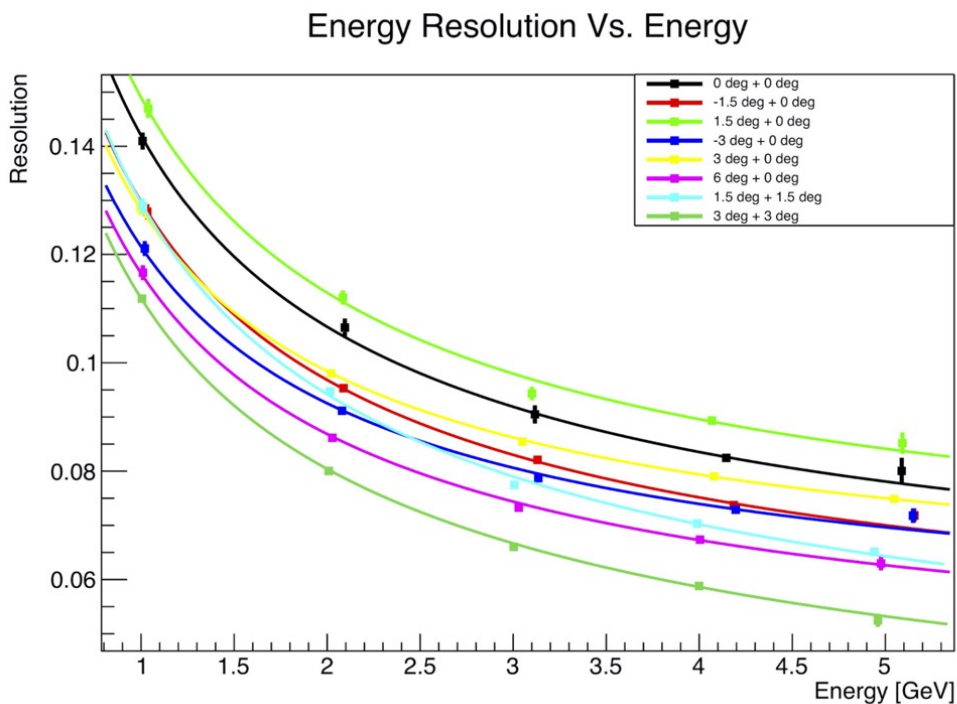


Рис. 14 — Зависимость энергетического разрешения от энергии для различных углов падения первичных частиц.

Энергия пучка электронов составляла 1-5 ГэВ. Дополнительно к вышеуказанным измерениям были набраны данные от аналогичного пучка частиц, но входящего в модуль в реверсном направлении, то есть со стороны фотоэлектронных умножителей рисунок 16.

Таблица 3 — Результаты исследования световыхода сцинтилляторов.

Сцинтиллятор	Световыход, фотоэл./МэВ.
GAGG:Ce (Front)	19.7 ± 0.5
YAG:Ce (Front)	14.2 ± 0.4
GAGG:Ce (Back)	11.7 ± 0.5
YAG:Ce (Back)	9 ± 1

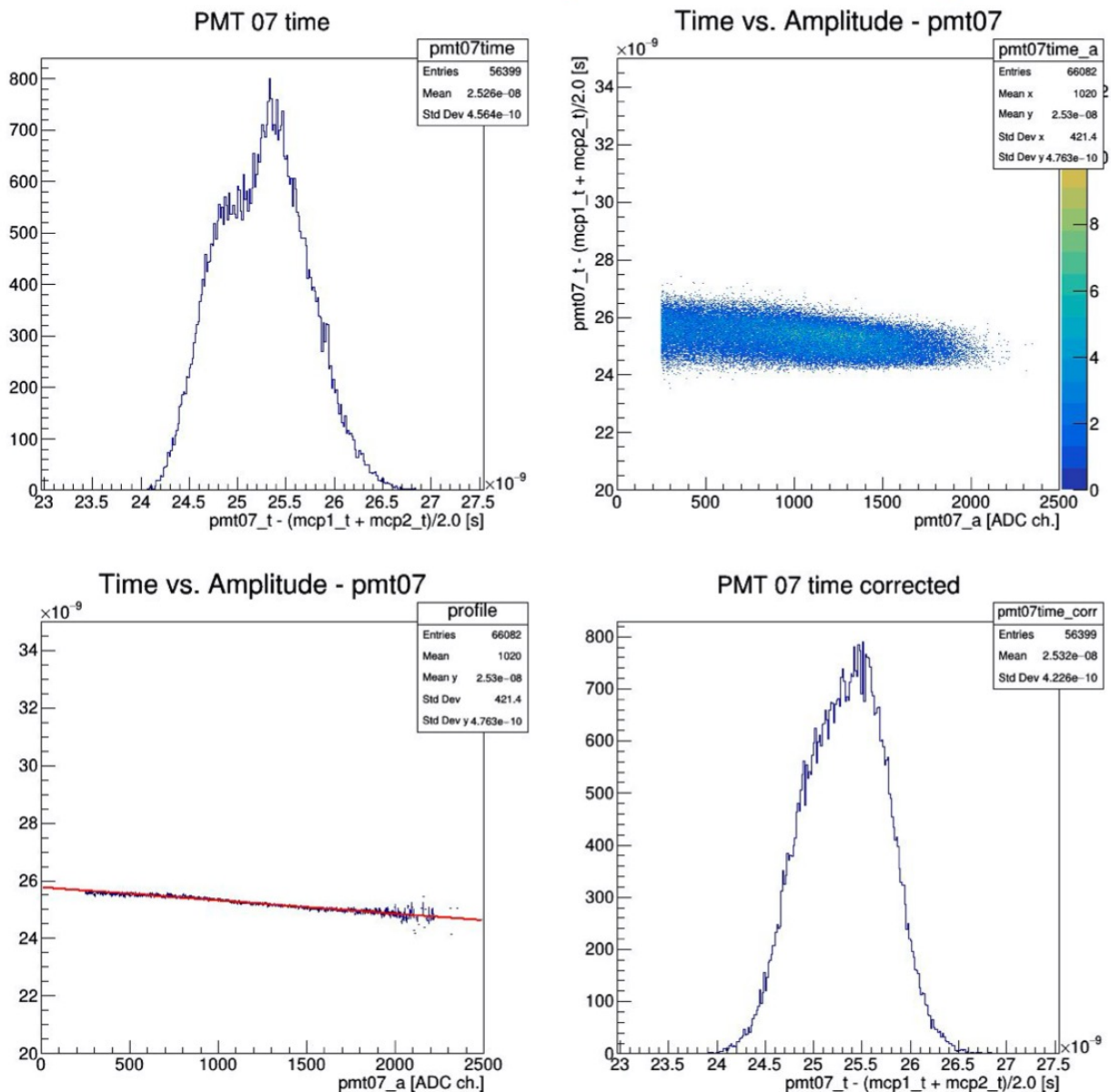


Рис. 15 — Временные измерения модернизированного SPACAL модуля (ячейка GAGG:Ce, передняя секция).

Временное разрешение модернизированного SPACAL модуля для ячейки с сцинтиллятором GAGG:Ce составило 422 пс для передней секции и 352 пс для тыльной секции (рисунок 16)

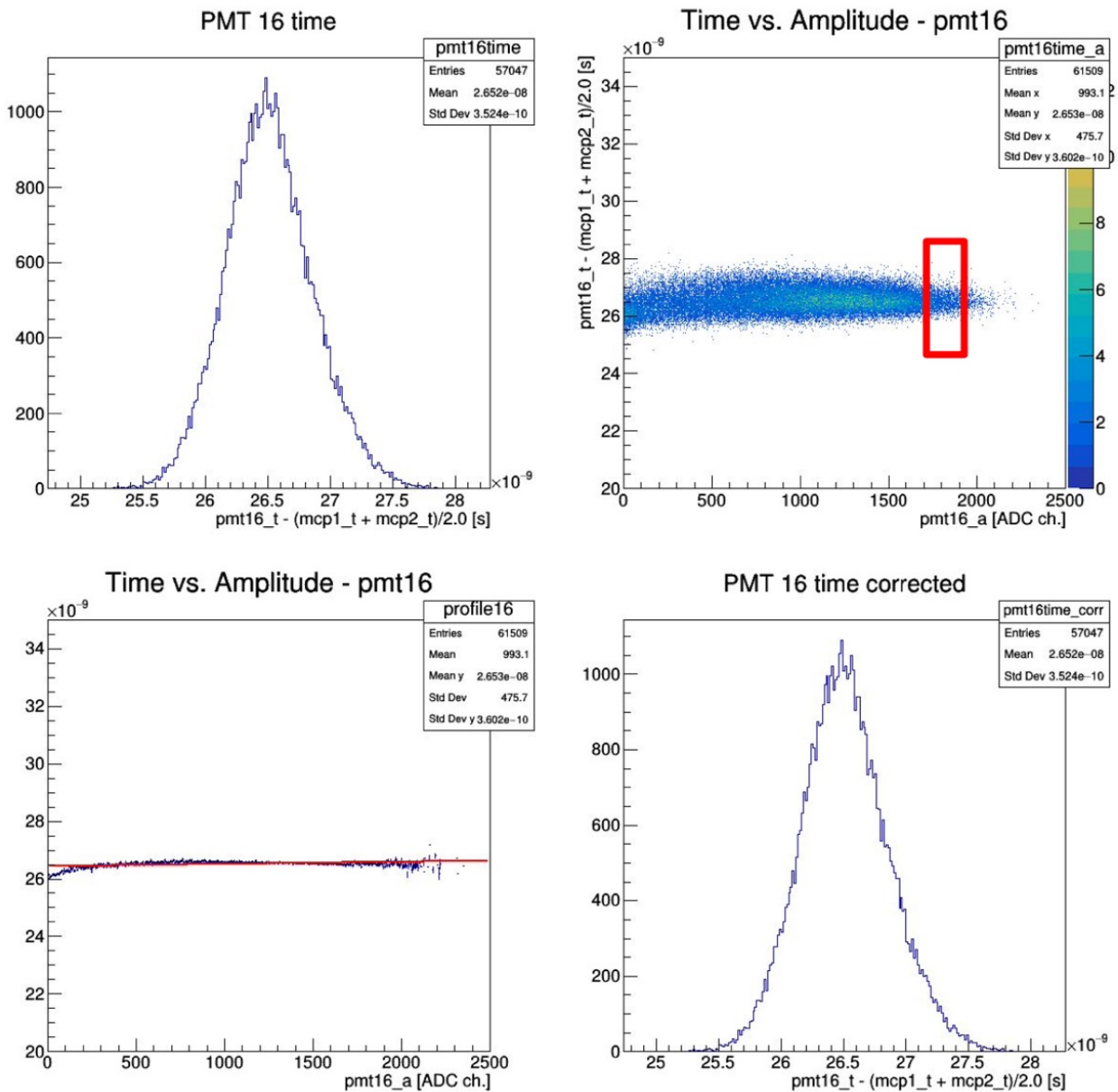


Рис. 16 — Временные измерения модернизированного SPACAL модуля (ячейка GAGG:Ce, тыльная секция).

Первичный анализ экспериментальных данных демонстрирует временное разрешение заметно хуже ожидаемого. Полученные результаты подтолкнули к дополнительному исследованию, детально описанному в работе [12], в ходе которого было установлено, что причина получения неудовлетворительных результатов заключается в несовершенстве конструкции светосбора, а именно использование индивидуального световодного волокна на каждый

сцинтилляционный кристалл, что приводит к ухудшению временного разрешения в случае неравномерности отклика фотоумножителя в зависимости от области фотокатода, на которую падает свет. Исследование заключалось в моделировании временного разрешения прототипа в инструментарии GEANT4, результаты моделирования демонстрируют возможность достижения временного разрешения порядка 20-30 пс на энергиях от 1 до 5 ГэВ. В то же время продемонстрировано значительное ухудшение временного разрешения при искусственном уменьшении световыхода кристалла.

Исходя из неудовлетворительных результатов временного разрешения, возникла необходимость дополнительного исследования прототипа с измененной системой считывания сцинтилляционного света. Обновленная система считывания была представлена в двух опциях, а именно, ФЭУ Hamamatsu R12421, использованные в первом SPACAL прототипе и мультианодные ФЭУ Hamamatsu R7600-20, обладающие лучшими временными характеристиками в сравнении со стандартными ФЭУ.

Светосбор с ячеек модуля осуществлялся посредством светособирающих конусов на основе плексигласа. Свет от каждой сцинтилляционной волокна всех 9 ячеек, размером 15x15 мм собирается конусом и направляется во входное окно фотоэлектронного умножителя (13 мм – R12421). В случае ФЭУ R7600U-20 использовался прямой оптический контакт без использования оптической смазки.

Условия экспериментальных исследований остались неизменными, исследования проводились в DESY, с использованием абсолютно идентичной экспериментальной установки и системы сбора данных.

Результаты измерения временного разрешения прототипов с двумя видами фотоприемников представлены на рисунке 17.

В результате проведенного исследования временного разрешения с измененной системой светосбора было получено временное разрешение для модернизированного модуля SPACAL калориметра 54 пс с фотоприемником Hamamatsu R12421 и 32 пс с ФЭУ Hamamatsu R7600U-20, что удовлетворяет требованиям предъявляемым к электромагнитному калориметру спектрометра ЛНСб.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

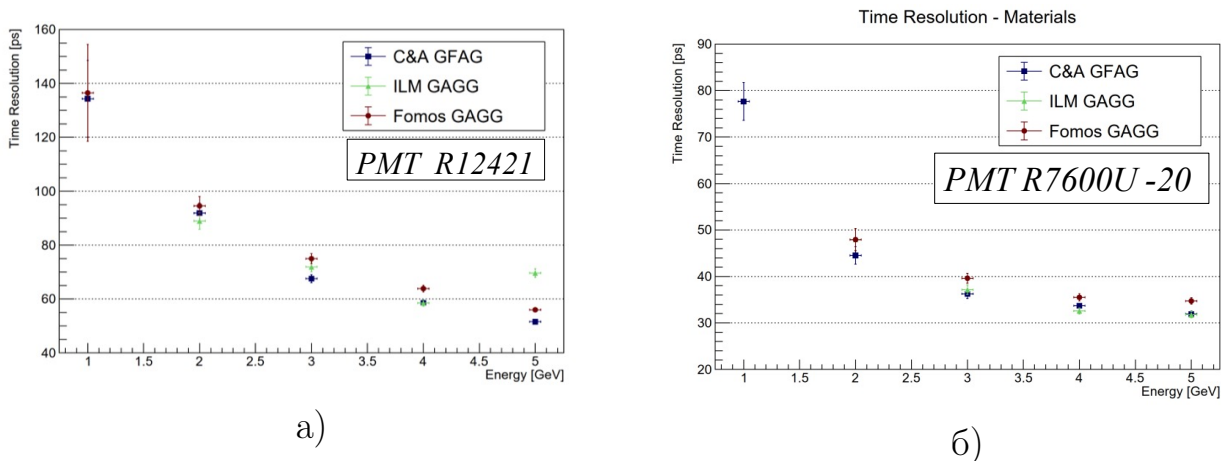


Рис. 17 — Зависимость временного разрешения от энергии для различных сцинтилляционных материалов ФЭУ с R1242(a) и R7600U-20 (б).

1. Проведены испытания радиационной стойкости сцинтилляционных кристаллов потенциально применимых в модернизации электромагнитного калориметра и выдерживающих радиационную нагрузку порядка 100 МРад.
2. Предложена обновленная конструкция электромагнитного калориметра спектрометра ЛНСб, заключающаяся в использовании сцинтилляционных волокон и плотного абсорбера.
3. Математическое моделирование в инструментари GEANT4 показало достижимость требуемых значений энергетического разрешения прибора при использовании обновленной конфигурации.
4. Собраны и протестированы прототипы радиационно-стойких модулей электромагнитного калориметра. Результаты тестовых испытаний демонстрируют соответствие характеристик прототипов электромагнитного калориметра на основе спагетти-технологии требованиям по энергетическому и временному разрешению предъявляемым к электромагнитному калориметру спектрометра ЛНСб.

Список литературы

1. Grigorov N. L., Nurzin V. S., Rapoport I. D. Method of Measuring Particle Energies above 10^{11} Ev // J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) — 1958. — т. 34. — с. 506—507.

2. *Anderson R. L., Richter B.* Calorimeter for absolute photon and electron beam energy determination // SLAC-TN-66-021. — 1966. — апр.
3. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC / G. Aad [и др.] // Physics Letters B. — 2012. — сент. — т. 716, № 1. — с. 1–29. — DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.020](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020).
4. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC / S. Chatrchyan [и др.] // Physics Letters B. — 2012. — сент. — т. 716, № 1. — с. 30–61. — DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021).
5. *Lefevre R., LHCb Collaboration the.* Triggering with the LHCb calorimeters // Journal of Physics: Conference Series. — 2009. — апр. — т. 160. — с. 012063. — DOI: [10.1088/1742-6596/160/1/012063](https://doi.org/10.1088/1742-6596/160/1/012063).
6. *Dzhelyadin R.* The LHCb calorimeter detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — т. 581, № 1. — с. 384–388. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.010>. — VCI 2007.
7. *Schmidt B.* The High-Luminosity upgrade of the LHC: Physics and Technology Challenges for the Accelerator and the Experiments // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 706, no. 7. — P. 42. — DOI: [10.1088/1742-6596/706/2/022002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/706/2/022002).
8. *Brüning O., Rossi L.* The High-Luminosity Large Hadron Collider // Nature Reviews Physics. — 2019. — т. 1, № 4. — с. 241–243. — DOI: [10.1038/s42254-019-0050-6](https://doi.org/10.1038/s42254-019-0050-6).
9. Irradiation studies of a multi-doped Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ scintillator / V. Alenkov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — т. 916. — с. 226–229. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.101>.
10. *Shmanin E.* GEANT4 simulation of energy resolution of the SPACAL electromagnetic calorimeter // Journal of Physics: Conference Series. —

2020. — янв. — т. 1439. — с. 012007. — DOI: [10.1088/1742-6596/1439/1/012007](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1439/1/012007).
11. Time and energy resolution with SPACAL type modules made of high-light-yield Ce-doped inorganic scintillation materials: Spillover and background noise effects / G. Dosovitskiy [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2021. — т. 999. — с. 165169. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165169>.
 12. A simulation study of the time measurement accuracy for the SPACAL type ECAL Module for LHCb Upgrade phase 2 : тех. отч. / I. Guz [и др.] ; CERN. — Geneva, 05.2020. — URL: <http://cds.cern.ch/record/2718983>.
 13. The LHCb Detector at the LHC / T. L. Collaboration [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2008. — авг. — т. 3, № 08. — S08005—S08005. — DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08005).
 14. *Olloqui E. P., LHCb Collaboration the.* LHCb Preshower(PS) and Scintillating Pad Detector (SPD): Commissioning, calibration, and monitoring // Journal of Physics: Conference Series. — 2009. — апр. — т. 160. — с. 012046. — DOI: [10.1088/1742-6596/160/1/012046](https://doi.org/10.1088/1742-6596/160/1/012046).
 15. Beam Test Results of the LHCb Electromagnetic Calorimeter.тех. отч. / A. Arefev [и др.] ; CERN. — Geneva, 05.2008. — revised version submitted on 2008-05-15 09:09:53.
 16. *Machikhiliyan I.* The LHCb electromagnetic calorimeter // Journal of Physics: Conference Series. — 2009. — апр. — т. 160. — с. 012047. — DOI: [10.1088/1742-6596/160/1/012047](https://doi.org/10.1088/1742-6596/160/1/012047).
 17. *Guz Y., collaboration L.* The LHCb Hadron Calorimeter // Journal of Physics: Conference Series. — 2009. — апр. — т. 160. — с. 012054. — DOI: [10.1088/1742-6596/160/1/012054](https://doi.org/10.1088/1742-6596/160/1/012054).
 18. Light Emission Efficiency of Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:Ce (GAGG:Ce) Single Crystal Under X-ray Radiographic Conditions / I. E. Seferis [и др.] // XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and

- Computing 2013 / под ред. L. M. Roa Romero. — Cham : Springer International Publishing, 2014. — с. 455—458. — ISBN 978-3-319-00846-2.
19. Scintillation properties of Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:Ce (GAGG:Ce): a comparison between monocrystalline and nanoceramic samples / W. Drozdowski [и др.] // Optical Materials. — 2018. — т. 79. — с. 227—231. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.03.042>.
 20. Evaluation of GAGG:Ce scintillators for future space applications / M. Yoneyama [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2018. — февр. — т. 13, № 02. — P02023—P02023. — DOI: [10.1088/1748-0221/13/02/p02023](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/02/p02023).
 21. *Vincke H., Theis C.* ActiWiz 3 – an overview of the latest developments and their application // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — т. 1046. — 012007. 10 p. — DOI: [10.1088/1742-6596/1046/1/012007](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1046/1/012007).
 22. *Weber M.* The new H1 spaghetti calorimeter. — 1995. — апр. — URL: <https://cds.cern.ch/record/282030>.
 23. *Pizzichemi M.* The Phase II upgrade of the LHCb calorimeter system // Journal of Instrumentation. — 2020. — май. — т. 15, № 05. — с. C05062—C05062. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/05/c05062](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/c05062).