

На правах рукописи

МЕЛИКЯН
Юрий Александрович

Разработка детектирующей системы
триггерного комплекса **FIT**
обновлённого эксперимента **ALICE**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель

Каплин Владимир Александрович, кандидат физико-математических наук, НИЯУ МИФИ, кафедра №11 «Экспериментальные методы ядерной физики», доцент.

Официальные оппоненты

Топчиев Николай Петрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Отделение ядерной физики и астрофизики, Лаборатория гамма-астрономии, ведущий научный сотрудник;

Юревич Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна), Лаборатория физики высоких энергий, начальник сектора.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ).

Защита состоится 16 мая 2019 года в 13.30 часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН, а также на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01,
д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

Троицкий С.В.

Общая характеристика работы

Актуальность исследования

Эксперимент ALICE Большого адронного коллайдера в ЦЕРН посвящён изучению свойств кварк-глюонной материи в условиях экстремально высокой температуры и плотности энергии столкновений ионов свинца. ALICE успешно участвует в наборе данных в течение первого и второго сеансов работы LHC (2009–2012 и 2015–2018, соответственно). К началу третьего сеанса в 2021 году планируется проведение крупной модернизации эксперимента. Её целью, помимо обновления устаревших и выработавших свой ресурс компонентов, является адаптация основных детекторных систем к повышению средней частоты столкновений вплоть до 50 кГц при столкновениях ионов свинца и 0,2–1,0 МГц в протон-протонных и протон-свинцовых столкновениях. В ходе модернизации, несколько детекторных систем эксперимента будут внедрены «с нуля», включая новый триггерный детектор FIT (Fast Interaction Trigger)¹.

Актуальность данной работы обоснована тем, что детектор FIT будет являться основным триггерным детектором эксперимента ALICE после его модернизации в течение 2019–2020 годов, без которого невозможен корректный набор данных всего эксперимента. FIT также будет использоваться для определения точного момента времени, множественности, центральности и плоскости реакции свинец-свинцовых столкновений в широком диапазоне псевдобыстрот. Кроме того, FIT будет являться одним из немногих инструментов Большого адронного коллайдера для надёжного измерения светимости в режиме он-лайн в ходе третьего и четвёртого сеансов работы в 2021–2029 годах.

¹ALICE collaboration, Upgrade of the readout and Trigger system Technical Design Report, CERN-LHCC-2013-019.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является подготовка рабочего проекта детектирующей системы триггерного комплекса FIT обновлённого эксперимента ALICE, включая выбор и детальное исследование физических характеристик нового фотодетектора, определение конфигурации рабочего вещества и оптической связи между ними. Такая система должна обеспечить предельно высокое временное разрешение в условиях жёстких радиационных, электромагнитных и геометрических ограничений.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- Выбор и обоснование конфигурации триггерного комплекса FIT и конструкции его подсистем;
- Выбор, модернизация и детальная характеристика фотоумножителей для использования в детекторе FIT;
- Экспериментальное исследование физических характеристик прототипов черенковской и сцинтилляционной подсистем детектора FIT и макета его регистрирующей системы на пучке ускорителя;
- Экспериментальное обоснование спецификации на параметры фотоумножителей, производимых серийно для применения в детекторе FIT и разработка методики их входного тестирования и характеристики.

Научная новизна результатов исследования

- Разработана регистрирующая система уникального триггерного детектора FIT. Его черенковская подсистема T0+ отличается рекордно высоким временным разрешением среди всех прочих стартовых детекторов крупных ускорительных экспериментов: собственное временное разрешение модулей при регистрации одиночных заряженных частиц составляет 13 пс (сигма), при использовании штатной электроники — 33 пс;

- Совместно с производителем (Photonis USA Pennsylvania Inc.), разработана новая версия четырёхканального фотоумножителя на микроканальных пластинах (МКП-ФЭУ) Planacon XR85002/FIT-Q, оптимизированная для прецизионных временных измерений (с точностью лучше $\sigma = 13$ пс) в условиях высоких загрузок (вплоть до $10\,000$ ф.э./см²);
- Впервые получен широкий спектр физических характеристик фотоумножителей семейства Planacon (XR85012/A1-Q, XR85002/FIT-Q), включая прецизионные временные параметры, время жизни, закономерности образования электрических и оптических наводок и поведение в условиях сильного магнитного поля при низких напряжениях питания;
- Впервые продемонстрировано радикальное влияние ALD-покрытия стенок микроканалов в МКП-ФЭУ семейства Planacon (в частности, XR85112/A1-Q-ALD) на уровень их токового насыщения и время восстановления;
- Впервые продемонстрирована возможность создания черенковского детектора с твердотельным радиатором, герметично покрывающим просматриваемую область при сохранении высокого временного (лучше 50 пс) и амплитудного разрешения путём расположения детектора «спиной» к точке вылета регистрируемых частиц;
- Впервые измерены временные и амплитудные характеристики сцинтилляционного детектора со светосбором с помощью матрицы SiPM, распределённой в объёме рабочего вещества.

Практическая значимость работы

Практическая ценность работы состоит в создании рабочего проекта детектирующей системы триггерного комплекса FIT, который будет использоваться в составе модернизированного эксперимента ALICE по изучению свойств кварк-глюонной материи в течение третьего и четвёртого сеансов работы Большого адрон-

ного коллайдера. Кроме того, были разработаны и реализованы в прототипах детектора FIT нетипичные методики прямого светособирания для черенковских и сцинтилляционных детекторов, позволяющие обеспечить высокое временное и амплитудное разрешение при существенном превышении площади просматриваемой поверхности рабочего вещества над чувствительной площадью фотоприёмников. Разработанные методики могут быть применены в схожих детекторных системах других ускорительных экспериментов с менее жёсткими радиационными, либо геометрическими ограничениями.

Кроме того, предложенная методика модернизации МКП-ФЭУ позволяет адаптировать семейство фотоумножителей Planason к прецизионным временным измерениям в условиях больших загрузок.

Личный вклад соискателя

Основные результаты работы получены либо лично автором, либо при его определяющем и непосредственном участии, включая:

- все измеренные характеристики фотоэлектронных умножителей семейства Planason и определение необходимости их модификации до версии XP85002/FIT-Q;
- разработку методики и экспериментальную демонстрацию возможности создания черенковского детектора с твердотельным радиатором, герметично покрывающим просматриваемую область при сохранении высокого временного и амплитудного разрешения;
- измеренные на пучке ускорителя параметры макета черенковской подсистемы детектора FIT и создание ряда вспомогательных детекторов для проведения данных измерений;
- создание некоторых прототипов сцинтилляционных детекторов с нетипичной методикой светособирания и измерение их временных и амплитудных характеристик;

- разработку спецификации параметров МКП-ФЭУ, производимых серийно для непосредственного использования в детекторе FIT, а также разработку методики входного тестирования и характеристики данных МКП-ФЭУ и создание специализированного экспериментального стенда.

Полученные экспериментальные результаты систематизированы и опубликованы в десяти печатных трудах, основной и определяющий вклад в непосредственную подготовку которых внёс соискатель.

Основные положения, выносимые на защиту

- Методика модернизации МКП-ФЭУ семейства Planacon до версии XR85002/FIT-Q и результаты исследования специфических характеристик данных фотоумножителей, включая временное и амплитудное разрешение, закономерности формирования наведённых оптических и электрических сигналов, пределы амплитудной и токовой линейности, а также результаты тестирования МКП-ФЭУ в условиях сильного магнитного поля (до 0,5 Тл).
- Измеренные характеристики макета регистрирующей системы детектора FIT на пучке ускорителя, включая обоснование выбора конфигурации модуля FIT T0+, типа фотоумножителя, оптической смазки, количества и размера черенковских радиаторов.
- Разработанная методика серийной характеристики и тестирования фотоумножителей на микроканальных пластинах для их непосредственного использования в детекторе FIT.
- Методика регистрации частиц с предельно высокой геометрической эффективностью с помощью черенковского детектора обратной конфигурации при сохранении высокого амплитудного и временного разрешения.
- Измеренные временные и амплитудные характеристики сцинтилляционных детекторов с нетипичной методикой светособирания, включая использование распределённой матрицы SiPM,

инкорпорированных в тело сцинтиллятора, а также методику регистрации сцинтилляций в детекторах большой площади с помощью воздушного световода.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается долговременным и успешным функционированием прототипа детектора FIT в составе эксперимента ALICE, а также использованием для измерений современной высокоточной электроники и программного обеспечения, апробацией результатов на научных конференциях и семинарах, публикацией их в печати и сравнением с опубликованными результатами для систем сопоставимого функционального назначения и области применения. Помимо этого, разработанный проект регистрирующей системы детектора FIT одобрен технической комиссией коллаборации ALICE.

Апробация и реализация результатов исследования

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, были представлены соискателем и обсуждались на следующих международных конференциях:

- 10th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (Москва, 29 июля – 4 августа 2018),
- 133rd LHCC meeting (Женева, 28 февраля 2018),
- International Conference on Particle Physics and Astrophysics (Москва, 10-14 октября 2016),
- Fundamental Research and Particle Physics (Москва, 18-20 февраля 2015),

а также в рамках следующих научных мероприятий:

- Научный семинар Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ (Москва, 16 января 2019);
- ALICE FIT Production Readiness Review (Женева, 18 июля 2018),
- Научный семинар Лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ (Москва, 28 ноября 2016),
- Научная сессия НИЯУ МИФИ (Москва, 22-26 декабря 2015).

Основные экспериментальные результаты данного исследования были учтены при подготовке спецификации на оптовую поставку фотосенсоров, при составлении компьютерной модели отклика детектора FTT и при разработке механической конструкции детектора, а также легли в основу рабочего проекта детектора FTT, утверждённого коллаборацией ALICE.

Публикации

По материалам, представленным в диссертации, опубликованы 10 работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 201 страницу печатного текста, включая 137 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 160 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** даётся определение основных понятий квантовой хромодинамики, таких, как конфайнмент — явление удержания кварков в составе адронов, и кварк-глюонная плазма (КГП), как единственная форма материи, отличающаяся асимптотической свободой кварков и глюонов. Представлен краткий исторический обзор обнаружения признаков образования КГП в столкновениях релятивистских тяжёлых ионов на ускорителях SPS, RHIC и LHC. Основным экспериментом LHC, посвящённым исследованию свойств КГП в условиях экстремально высоких температуры и плотности энергии, является эксперимент ALICE, имеющий в своём составе 18 различных детекторных систем для измерения множественности, траектории и идентификации частиц.

Крупная модернизация эксперимента ALICE, запланированная на 2019–2020 гг., предполагает адаптацию большинства детекторных систем эксперимента к регистрации столкновений ионов свинца при энергии $\sqrt{S_{NN}}=5,5$ ТэВ с частотой 50 кГц, а также полную замену нескольких ключевых детекторов. Одной из наиболее важных систем, внедряемых «с нуля», является единый триггерный детектор FIT (Fast Interaction Trigger), к которому предъявляются строгие требования по временному разрешению, эффективности регистрации частиц и диапазону линейной работы в условиях жёстких радиационных, электромагнитных и геометрических ограничений:

- определение времени столкновения в режиме он-лайн с точностью не хуже $\sigma=50$ пс при допустимой задержке формирования триггера не более 225 нс;
- эффективность регистрации заряженных частиц, близкая к 100% в диапазоне псевдобыстрот, сопоставимым с покрытием прежнего вершинного детектора (~ 3 единицы псевдобыстроты) при временном разрешении не хуже $\sigma=250$ пс;
- индукция магнитного поля вплоть до $B=0,5$ Т;
- поглощённая доза ионизирующего излучения вплоть до ~ 46 крад;
- флюенс адронов вплоть до $\sim 1,3 \cdot 10^{12}$ 1-МэВ- $n_{\text{экв}}/\text{см}^2$;
- частота столкновений вплоть до 40 МГц;
- общая толщина детектора в северном плече эксперимента («С») — не более 92 мм.

Глава 1 посвящена эксперименту ALICE: в ней рассмотрены некоторые из основных научных результатов работы эксперимента, полученные в период с 2010 по 2018 гг., а именно измерение множественности столкновений ионов свинца при энергиях $\sqrt{S_{NN}}=2,76$ и $\sqrt{S_{NN}}=5,02$ ТэВ; измерение вязкости и температуры КГП; измерение степени подавления выхода кваркония, вызванного рекомбинацией s - и \bar{s} -кварков при деконфайнменте; а также

неожиданное наблюдение признаков образования КГП в малых системах².

Мотивация к модернизации эксперимента ALICE в 2019-2020 гг. представлена в п.1.2. Глобальной её целью является уточнение механизма партон-адронного перехода и прояснение природы конфайнмента и ядерной материи при высоких значениях температуры и плотности энергии. Достижение данной цели требует решения ряда научных задач, осуществимого при увеличении регистрируемой статистики столкновений релятивистских ионов свинца в ALICE на порядок за счёт увеличения частоты регистрируемых столкновений до 50 кГц. План технической реализации этого проекта включает, среди прочего, создание единого триггерного детектора FIT, вместо прежних детекторов T0, V0 и FMD.

В завершении главы 1 представлен обзор детекторов аналогичного функционального назначения, используемых или планируемых к использованию в экспериментах на ускорителях LHC, RHIC и NICA. Все рассмотренные детекторы (детекторы T0 и V0 прежнего эксперимента ALICE, VPD и EPD детекторы эксперимента STAR, детекторы BBC и RXNP эксперимента PHENIX, детектор FFD эксперимента MPD, и пр.) основаны на черенковской или сцинтилляционной методике регистрации частиц, и лучшие из них характеризуются временным разрешением 44–52 пс/канал при регистрации одиночных заряженных частиц^{3,4,5}.

Глава 2 посвящена выбору методики регистрации частиц детектором FIT. На основании вышеприведённого обзора схожих детекторных систем, а также требований к детектору FIT, сцин-

² ALICE collaboration, Long-range angular correlations on the near and away side in p-Pb collisions at 5.02 TeV // Phys. Lett. B – 2013, 719, 29-41.

³ V.I. Yurevich et al., Fast Forward Detector Technical Design Report, LHEP / JINR, 2017.

⁴ M. Allen et al., PHENIX inner detectors // NIM A – 2003 V.499, 549–559.

⁵ ALICE collaboration, Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC // 2017 — Eur. Phys. J. Plus 132: 99.

тилляционная и черенковская методики регистрации частиц были определены как наиболее подходящие. Ввиду того, что параметры обеих методик во многом зависят от типа используемых фотоумножителей, в п.2.1 представлена история развития фотоумножителей и перечислены основные их типы, подходящие для применения в детекторе FIT с точки зрения временных параметров и стойкости к магнитному полю.

Применение кремниевых фотоумножителей в детекторе FIT в качестве основного фотоприёмника осложнено их ограниченной радиационной стойкостью: несмотря на сохранение работоспособности, временное разрешение таких приборов может ухудшиться на несколько порядков при их облучении флюенсом адронов $\sim 10^{13}$ 1-МэВ- $n_{\text{экв}}/\text{см}^2$.

В связи с этим, была рассмотрена возможность использования МКП-ФЭУ в качестве основного фотосенсора для детектора FIT, в частности, коммерчески доступной модели Planacon XP85012/A1-Q (см. рис.1), превосходящей основных своих конкурентов по геометрическому фактору чувствительной поверхности и по стоимости, приведённой на 1 см^2 фотокатода. МКП-ФЭУ оснащён индивидуальным выходом с каждого из 64-х анодов и общим выходом положительной полярности.

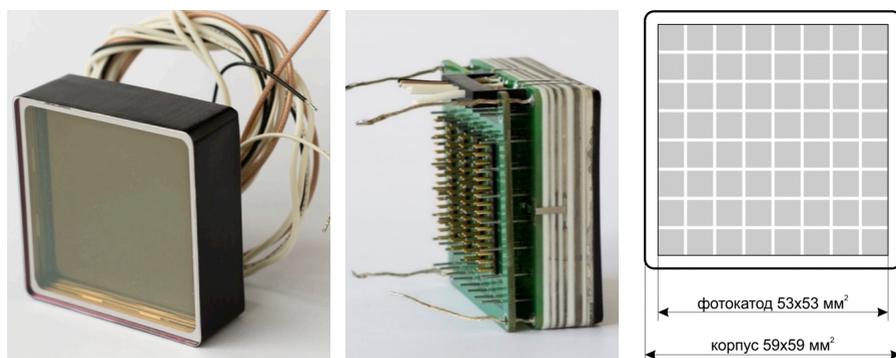


Рис. 1. МКП-ФЭУ Planacon XP85012/A1-Q: а) вид спереди; б) вид сзади; в) схема с указанием размеров и анодной сегментации

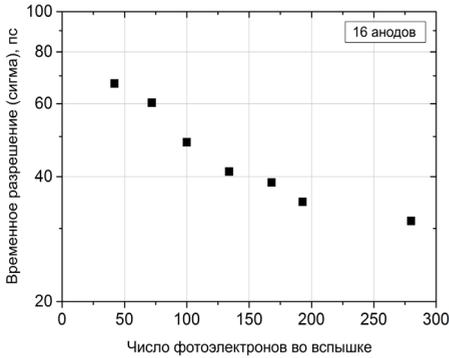


Рис. 2. Зависимость временного разрешения МКП-ФЭУ от интенсивности вспышки, регистрируемой 16-ю объединёнными анодами. Измерено с помощью аналогового ФСП и ВАП

Длительность фронта сигналов с такого ФЭУ составляет $\sim 1,2$ нс, временное разрешение при регистрации однофотонных сигналов — 50 пс, 79 пс и 91 пс (сигма) при съёме сигналов с одного, четырёх и 16-ти анодов соответственно. При этом, временное разрешение при регистрации более интенсивных сигналов группой из 16-ти анодов может достигать ~ 30 пс — см. рис. 2.

Имея достаточно большой диаметр микроканалов — 25 мкм, данные МКП-ФЭУ характеризуются наименьшей стоимостью (~ 300 USD/см²) и умеренной стойкостью к влиянию магнитного поля на коэффициент умножения. В ходе специальных тестов наблюдалось сокращение коэффициента умножения не более, чем в 10 раз при их использовании

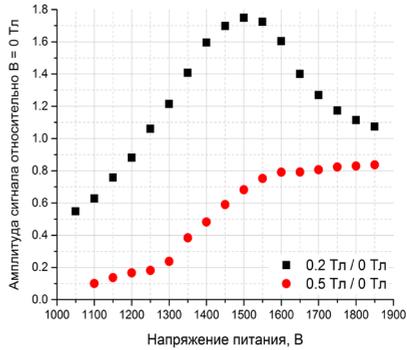


Рис. 3. Зависимость изменения амплитуды сигнала от напряжения питания в условиях магнитного поля индукцией 0,2 Тл и 0,5 Тл

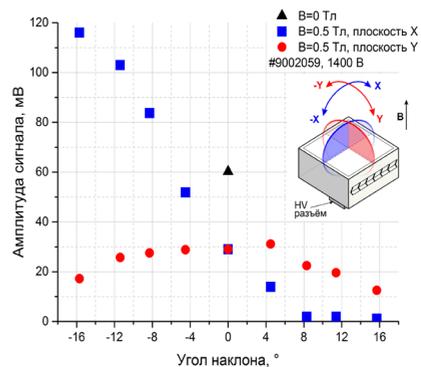


Рисунок 4. Зависимость изменения амплитуды сигнала от угла наклона МКП-ФЭУ при индукции магнитного поля 0 Тл и 0,5 Тл

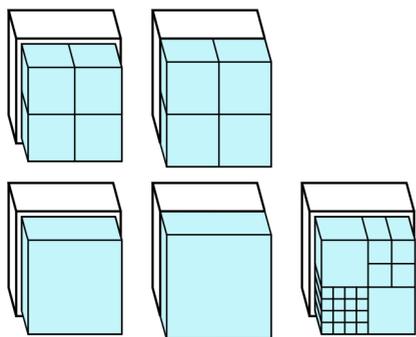


Рис. 5. Конфигурации радиаторов для прототипа черенковских модулей FIT: стандартные (по размеру фотокатода $53 \times 53 \text{ мм}^2$) и увеличенные (по размеру входного окна $59 \times 59 \text{ мм}^2$) радиаторы, а также наборные радиаторы (из расчёта 2×2 , 4×4 , 8×8 радиаторов на окно МКП-ФЭУ)

в магнитном поле до 0,5 Тл при напряжениях $\geq 1100 \text{ В}$ (как правило, соответствует усилению $\sim 10^3$) — см. рис.3. В данных тестах также была выявлена существенная и асимметричная угловая зависимость усиления МКП-ФЭУ для плоскости, совпадающей с плоскостью шевронного угла поворота микроканалов (плоскость X на рисунке 4). Эти недостатки, однако, не являются препятствием для применения данного типа МКП-ФЭУ в детекторе FIT.

Для измерения достижимого временного разрешения черенковских модулей, основанных на кварцевых радиаторах в прямом оптическом контакте с МКП-ФЭУ Planacon XR85012/A1-Q, была проведена серия специальных измерений на пучке релятивистских π^- -мезонов ускорителя PS. В ходе измерений были исследованы различные конфигурации радиаторов (см. рис.5), типы покрытий их поверхности и варианты оптических смазок. Для измерения пространственных распределений временных и амплитудных параметров использовался координатно-чувствительный детектор, разработанный и созданный в НИЯУ МИФИ специально для данной задачи.

Амплитудные спектры и временное разрешение исследуемого модуля с четырьмя стандартными радиаторами (по размеру фотокатода) относительно системы стартовых детекторов представлены на рис.6. Временное разрешение составило $\sim 31 \text{ пс}$ — при этом, дальнейшая сегментация радиаторов не продемонстрировала существенной выгоды ни с точки зрения временного, ни с точки зре-

ния амплитудного разрешения. Однако, использование радиаторов по размеру фотокатода ограничивает геометрическую эффективность детектора на уровне 81% — в связи с этим, представляют интерес параметры детектора при использовании увеличенных радиаторов по размеру входного окна. Результаты таких измерений представлены на рис. 7 при прямом облучении черенковского модуля, на рис.8 — при обратном облучении (задом наперёд).

Как можно видеть из рисунка 7, использование увеличенных радиаторов радикально ухудшает амплитудное разрешение, прив-

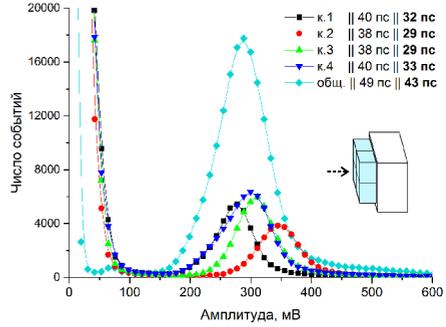


Рис. 6. Амплитудные спектры с каждого канала черенковского модуля (4 квадранта + общий выход) при использовании четырёх стандартных радиаторов, с указанием временного разрешения до и после вычитания вклада стартовых детекторов

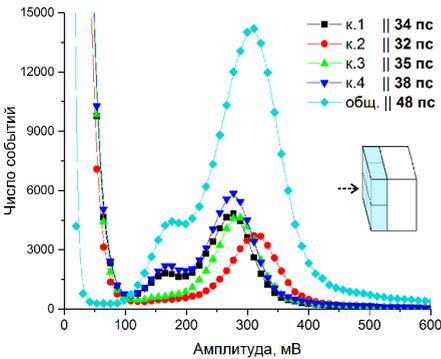


Рис. 7. Амплитудные спектры с каждого канала черенковского модуля при использовании четырёх увеличенных радиаторов, с указанием временного разрешения после вычитания вклада стартовых детекторов

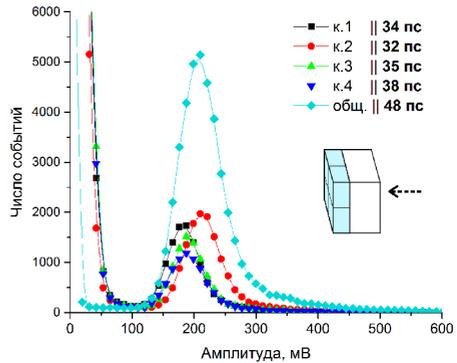


Рис. 8. Амплитудные спектры с каналов черенковского модуля при использовании четырёх увеличенных радиаторов при обратном облучении модуля, с указанием временного разрешения после вычитания вклада стартовых детекторов

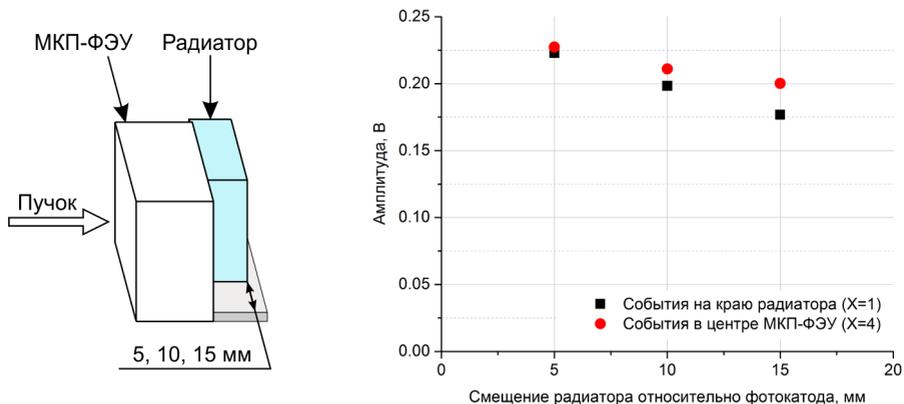


Рисунок 9. Слева — схема облучаемого модуля, справа — амплитуда сигналов для центральных и краевых событий в зависимости от величины смещения края радиатора относительно края фотокатода

нося второй пик с меньшим средним значением. Как показано в п.2.2, данный эффект связан с попаданием части черенковских фотонов (~20%) на нечувствительную к свету кромку МКП-ФЭУ шириной 3 мм.

Во избежание такой проблемы, было предложено располагать модули с увеличенными радиаторами «спиной» к направлению частиц — таким образом, за счёт большего пути черенковского света достигается равномерная засветка всей поверхности квадранта вне зависимости от области прохода частицы. Как можно видеть из рис.8, средняя амплитуда сигналов в такой конфигурации сокращается на ~30%, но существенного ухудшения амплитудного разрешения не происходит. Кроме того, сохраняется достаточно высокое временное разрешение (~35 пс) при съёме сигналов с индивидуальных выходов.

Интересно, что рассмотренная методика разворота черенковских модулей позволяет даже выносить радиаторы за габариты ФЭУ (в пределах ~1 см) без существенного ухудшения базовых параметров черенковского модуля (см. рис.9), что демонстрирует возможность создания черенковского детектора, вплотную

прилегающего к ионопроводу круглого сечения.

К сожалению, рассмотренная «обратная» конфигурация черенковских модулей не может быть применена в FIT из-за большого вклада фоновых частиц обратного направления в загрузку фотоприёмников (сопоставим с вкладом полезных сигналов⁶). В прямой же конфигурации модулей, чернение задних торцов радиаторов позволит ликвидировать вклад фоновых частиц обратного направления.

Таким образом, была определена конфигурация детектора FIT, включающая комбинацию небольших массивов черенковских счётчиков с обеих сторон от точки взаимодействия (для определения точного времени столкновения) и дублирующую детекторную плоскость из недорогого пластмассового сцинтиллятора для большего акцептанса и герметичного покрытия.

Характеристики различных прототипов сцинтилляционной подсистемы детектора рассмотрены в п. 2.3. Прототип детектора со светосбором с помощью спектросмещающих волокон продемонстрировал наилучшее временное разрешение $\sigma = 0,5$ нс. Предложенная нестандартная конструкция детектора на основе модульной плоскости из независимых брусков пластмассового сцинтиллятора, просматриваемых единым фотоумножителем посредством воздушного световода, продемонстрировала умеренно высокое временное разрешение 250-300 пс в зависимости от области пролёта частиц. При этом, соотношение просматриваемой площади сцинтиллятора и чувствительной площади фотоприёмника составило 36:1. Временная однородность регистрации сигнала по площади сцинтиллятора ($3,2 \text{ дм}^2$) составила ~ 150 пс и ~ 400 пс при расстоянии между сцинтиллятором и окном ФЭУ 15 см и 8,5 см, соответственно.

Наиболее удачной является предложенная коллегами из коллаборации FIT конфигурация сцинтилляционной подсистемы, ис-

⁶ ALICE collaboration, Radiation Dose and Fluence in ALICE after LS2 // ALICE-PUBLIC-2017, 30.11.2017.

пользующая пластмассовый сцинтиллятор толщиной 4 см с внедрёнными в него с шагом 5 мм торцами оптических волокон диаметром 1 мм. Пучки таких волокон передают фотоны сцинтилляций на вход ФЭУ с сетчатыми динодами Hamamatsu R5924-70. Такая методика, при относительно компактных габаритах, позволяет регистрировать сигналы со сцинтилляторов большой площади (несколько дм²) с временным разрешением ~250 пс при сохранении высокой временной однородности.

Такая конфигурация сцинтилляционного детектора была принята коллаборацией FIT в качестве основной, совместно с использованием черенковских модулей с кварцевыми радиаторами и МКП-ФЭУ семейства Planacon. Другие предложенные и протестированные конфигурации детекторов, тем не менее, являются перспективными технологиями для применения в других ускорительных экспериментах (например, на выведенных пучках), требующих высокого временного разрешения и однородности светособирания в условиях сильных магнитных полей.

Глава 3 посвящена методике и результатам адаптации МКП-ФЭУ семейства Planacon для использования в черенковской подсистеме детектора FIT. Необходимость такой адаптации вызвана, главным образом, наличием ёмкостной связи между анодной плоскостью и МКП, с выхода которой формируется положительный общий сигнал, что приводит к возникновению биполярной наводки между каналами съёма сигналов. При одновременной регистрации потока частиц несколькими каналами одного МКП-ФЭУ, наложение биполярной наводки на сигнал отрицательной полярности искажает фронт полезного сигнала, что делает невозможным формирование точной временной отметки.

Ликвидация данной наводки потребовала модернизации плат съёма сигналов (см. рис.10). Стандартные МКП-ФЭУ Planacon имеют резисторы (R5-R11), создающие колебательный контур в цепи питания и съёма общего сигнала. В предлагаемой схе-

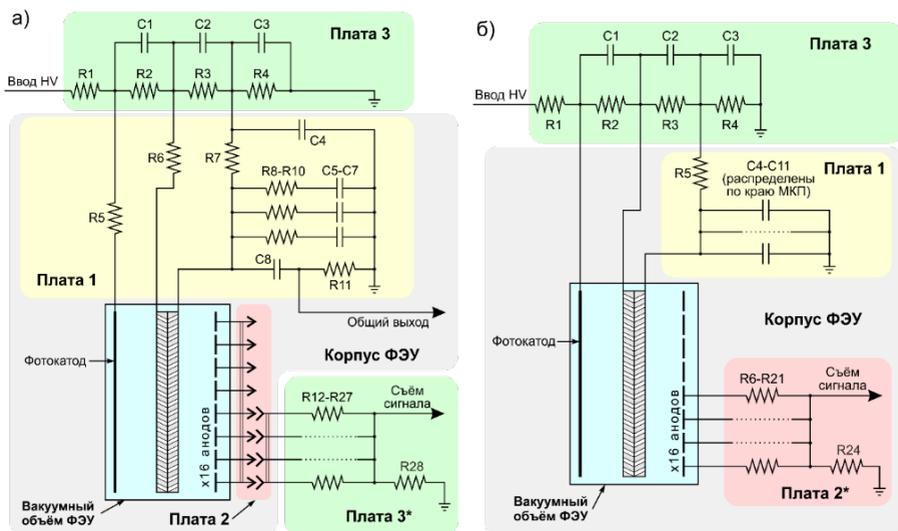


Рисунок 10. а) Схема подключений стандартной модификации МКП-ФЭУ Planasop XR85012/A1-Q; б) Предложенная схема модификации МКП-ФЭУ. *Представлена схема подключения только для одного квадранта — канала считывания с 16-ти анодов

ме (рис.10, б), общий выход ликвидируется за ненадобностью, и все компоненты Платы 1 заменяются на восемь конденсаторов (C4-C11), равномерно распределённых по краю микроканальной пластины для уменьшения индуктивности её подключения. Резистор R5 используется для уменьшения добротности контура из конденсаторов и подводящего провода — такая схема предотвращает возникновение колебаний после прохождения коротких токовых импульсов.

Кроме того, в предложенной схеме, для улучшения временных параметров МКП-ФЭУ при равномерной засветке и для уменьшения его габаритов, сигналы с 16-ти анодов МКП-ФЭУ коммутируются дорожками равной длины непосредственно на выводной ММСХ-разъём.

Для реализации предложенной схемы, были изготовлены и переданы производителю модифицированные платы съёма сигнала



Рисунок 11. Фотография МКП-ФЭУ семейства Planacon, оптимизированного для использования в детекторе FIT.

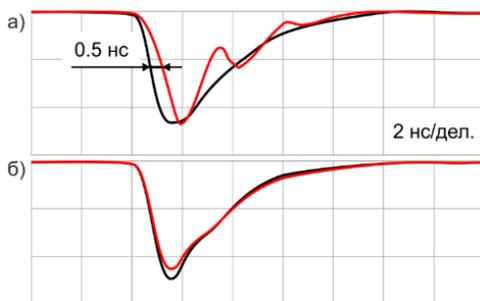


Рисунок 12. Сигналы, полученные при засветке квадранта МКП-ФЭУ короткими вспышками в отсутствие засветки на других квадрантах (чёрные кривые) и при равномерной засветке всех квадрантов (красные кривые) до и после модификации плат съёма сигналов – рисунки (а) и (б), соответственно

ла для их установки в корпус МКП-ФЭУ. Фотографии МКП-ФЭУ до модификации представлены выше, на рис.1, после модификации — на рис.11. Демонстрация основного результата модификации прибора — ликвидации биполярной наводки — представлена на рис. 12.

Для модифицированной версии МКП-ФЭУ были измерены пределы по амплитудной и токовой линейности (4000 МПР/квадрант и 4 мкА/квадрант соответственно), которые оказались существенно выше требований детектора FIT (260 МПР/квадрант и 1,7 мкА/квадрант соответственно). Однако, такие параметры могут быть достигнуты лишь для пластин с пониженным сопротивлением (~15 МОм вместо ~50 МОм). Это является одной из основных причин разработки подробной спецификации параметров для серийного производства МКП-ФЭУ для использования в детекторе FIT.

Разработанная спецификация вводит требования на сопротивление микроканальных пластин при заданном напряжении (12–22 МОм при 1400 В), предел насыщения по среднему анодному току, минимальное напряжения для заданного коэффициента ум-

ножения (не менее 1250 В для 10^5), длительность фронта импульса (не более 1,2 нс), квантовую эффективность ($>18\%$ для синего света) и направление шевронного угла наклона микроканалов относительно корпуса прибора. Оптимизация указанных параметров МКП-ФЭУ, совместно с использованием модифицированных плат съёма сигнала, привели к фактической разработке новой версии фотоумножителя семейства Planacon, получившей заводскую модификацию XR85002/FIT-Q. Для контроля указанных параметров, был создан экспериментальный стенд и разработана методика тестирования и характеристики МКП-ФЭУ, описанная в п.3.3.

Несмотря на достаточно высокие требования детектора FIT к величине интегрального анодного заряда МКП-ФЭУ (Integrated Anode Charge, IAC), при котором не должно наблюдаться ухудшение основных параметров детектора ($0,58 \text{ Кл/см}^2$), идея использования ALD-покрытия стенок микроканалов МКП-ФЭУ была отвергнута. Это связано с продемонстрированной в п.3.4 нестабильной характеристикой работы МКП-ФЭУ с ALD-покрытием в условиях повышенного анодного тока (время восстановления микроканалов — более часа) и низким уровнем токового насыщения (несколько десятков нА/см^2 даже при сопротивлении пластины $\sim 8 \text{ МОм}$).

Время жизни МКП-ФЭУ семейства Planacon без ALD-покрытия составляло не более $0,1 \text{ Кл/см}^2$ по состоянию на 2011 год⁷. Однако, по заявлениям производителя, ряд новых производственных методик позволил увеличить этот параметр до 2 Кл/см^2 . Для экспериментального измерения данной величины, была создана специальная установка для накопления интегрального анодного заряда одной половиной МКП-ФЭУ и мониторинга эффектов старения. Накопление $\text{IAC} = 0,5 \text{ Кл/см}^2$ в ненасыщенном режиме потребовало непрерывной работы установки в течение полугода (определяется уровнем токового насыщения МКП, которое, для

⁷ A. Britting et al., Lifetime-issues of MCP-PMTs // JINST – 2011, 6 C10001

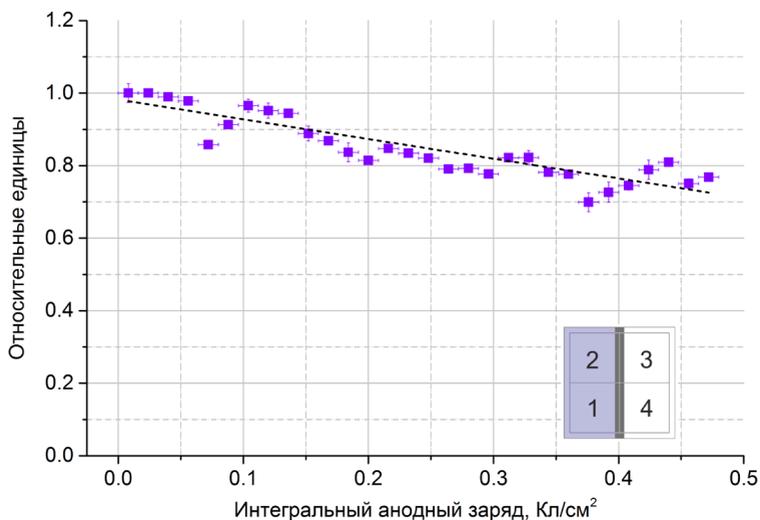


Рисунок 13. Относительное изменение средней амплитуды сигналов с облучённого (к.1) и не облучённого (к.4) квадрантов по мере накопления анодного заряда на первом квадранте

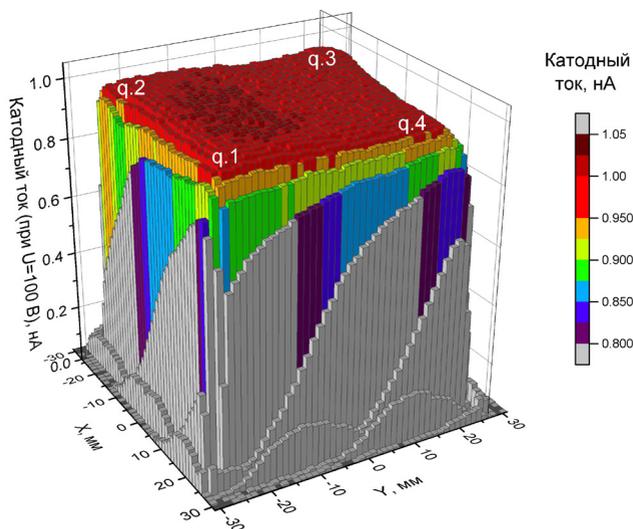


Рисунок 14. Распределение квантовой эффективности фотокатода МКП-ФЭУ для $\lambda=405$ нм после накопления $0,47$ Кл/см² и $0,35$ Кл/см² интегрального анодного заряда на квадрантах 1 и 2 соответственно. Источник данных: Jeff DeFazio (Photonis USA Pennsylvania Inc.), визуализировано и адаптировано автором

данного экземпляра с сопротивлением пластины 35 МОм, составляло 30 нА/см²).

Для определения величины изменения функции отклика облучаемых квадрантов МКП-ФЭУ, амплитуда сигналов на их выходе нормировалась на амплитуду сигналов с квадрантов, не облучаемых в режиме накопления ИАС (рис. 13). Полученные результаты нашли своё подтверждение в проверочных измерениях координатной зависимости амплитуды сигналов черенковских вспышек, возникающих непосредственно в кварцевом входном окне МКП-ФЭУ при облучении прибора потоком π -мезонов ускорителя PS. Для определения причины падения средней амплитуды сигнала с облучённых квадрантов, исследованный МКП-ФЭУ был передан производителю для измерения его квантовой эффективности в различных областях. Как можно видеть из рис. 14, снижения квантовой эффективности в облучённой области фотокатода относительно не облучённой не наблюдается.

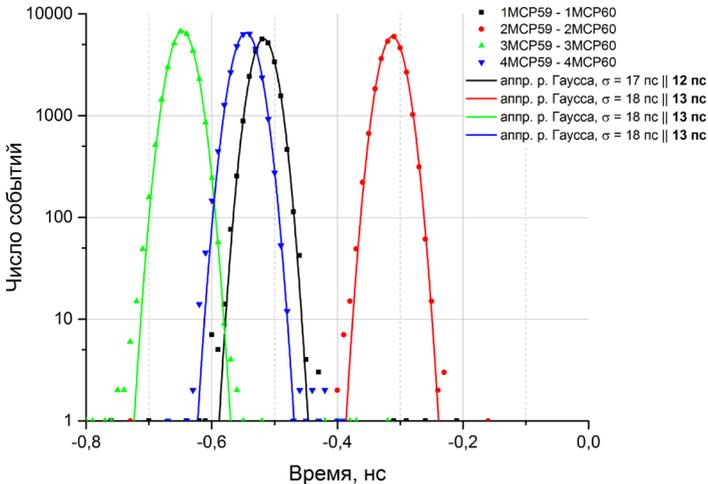


Рисунок 15. Распределение интервалов времени между моментом регистрации частиц двумя идентичными черенковскими модулями (MCP59 и MCP60) с модернизированными МКП-ФЭУ

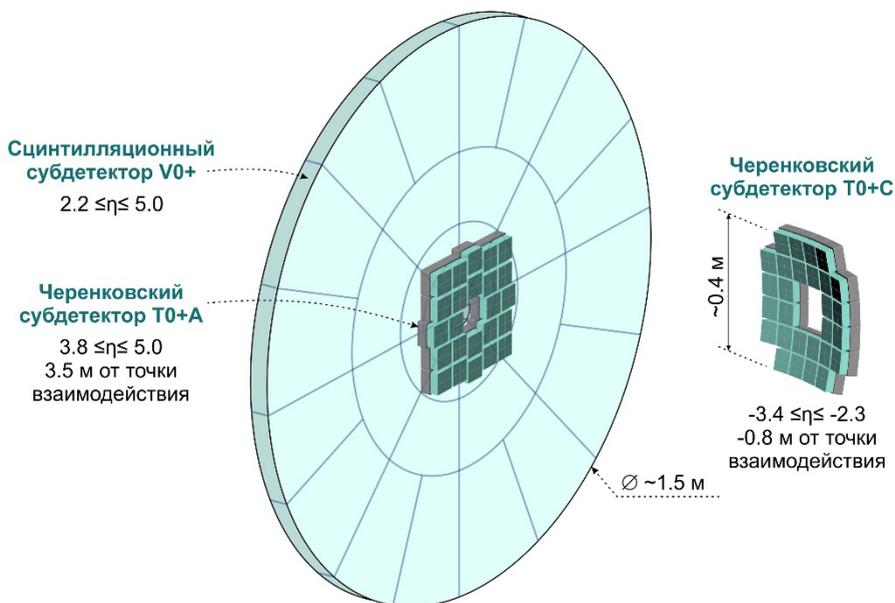


Рисунок 16. Схематичное изображение структуры детектора FIT



Рисунок 17. Фотографии базовых элементов макета детектора FIT: черенковский модуль T0+ и сектор сцинтилляционного детектора V0+

Полученная величина падения коэффициента усиления МКП-ФЭУ после накопления $\sim 0,5$ Кл/см² ИАС не является критичной для применения данных ФЭУ в детекторе FIT, ввиду 50-кратного запаса по коэффициенту умножения данных приборов (штатное для FIT усиление $\sim 1,4 \cdot 10^4$ против максимального усиления

$\sim 2 \cdot 10^6$, с учётом ~ 3 -кратной корректировки коэффициента усиления в условиях магнитного поля 0,5 Тл).

В **Главе 4** даётся описание окончательного проекта детектора FIT и его подсистем, основанное на успешном тестировании макета детектора FIT на ускорителе PS в ЦЕРН. Поскольку в новых измерениях использовалось два одинаковых модуля, их временное разрешение определялось друг относительно друга. Собственное временное разрешение индивидуальных каналов модулей составило ~ 13 пс (см. рис.15), временное разрешение системы черенковский модуль – штатный кабель длиной 40 м — штатная входная электроника (усилитель + ФСП) ~ 33 пс/канал.

В окончательном варианте детектора, 52 таких черенковских модуля будут составлять две матрицы его черенковской подсистемы с обеих сторон от точки взаимодействия пучков (T0+A и T0+C на рис.16). Базовым элементом сцинтилляционной подсистемы V0+ будет являться сектор пластмассового сцинтиллятора с оригинальным волоконным светосбором на ФЭУ с сетчатыми диодами. Фотографии базовых элементов макета детектора FIT представлены на рис.17.

В главе 4 также рассмотрены основные принципы и методики обработки сигналов в детекторе, который будет выдавать триггерные сигналы трёх типов:

- OR — в случае возникновения хотя бы одного сигнала с одной из сторон (T0+A или T0+C) в корректное время;
- TVX — при регистрации хотя бы одного события на обеих сторонах T0+ в заданный интервал для столкновения;
- Триггеры по множественности событий с регулируемым порогом, свидетельствующие о регистрации детектором сигналов определённого суммарного заряда.

Эффективность формирования триггеров OR и TVX ожидается выше 95% при возникновении более 70-ти и более 200 первичных частиц-продуктов столкновения, соответственно.

Первичная обработка сигналов будет осуществляться специально разработанными модулями обработки сигнала, включающими формирователь со следящим порогом, время-цифровой преобразователь и ПЛИС для быстрого анализа данных и подготовки к передаче в модуль интерфейса триггера для условного формирования триггерных сигналов.

Состоятельность рабочего проекта детектора FIT подтверждается успешным функционированием прототипа черенковского модуля в составе эксперимента ALICE с 2016 года. Параметры работы прототипа соответствуют закономерностям, определённым в специальных измерениях. Временное разрешение прототипа черенковского модуля в условиях реального эксперимента при регистрации одиночных заряженных частиц составило менее 40 пс.

В **Заключении** представлены основные результаты проведённой работы, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Создан рабочий проект детектирующей системы триггерного комплекса FIT и подтверждено соответствие физических характеристик его макета требованиям обновлённого эксперимента ALICE;
2. Разработана модернизированная версия многоканального фотомножителя Planacon XP85002/FIT-Q, адаптированная для прецизионных временных измерений в условиях больших световых нагрузок. С её помощью было достигнуто временное разрешение черенковских модулей детектора FIT $\sigma=13$ пс — рекордно высокое для детекторов подобного типа;
3. Создан экспериментальный стенд и разработана и отлажена методика серийной характеристики и входного контроля параметров фотомножителей на микроканальных пластинах для их непосредственного использования в детекторе FIT;
4. Разработаны методики создания черенковского детектора с твердотельным радиатором, герметично покрывающим просматриваемую область без существенного ухудшения амплитуд-

ного или временного разрешения путём разворота фотосенсора «спиной» к направлению движения частиц;

5. Измерены специфические характеристики сцинтилляционных детекторов с нетипичными методиками светособирания, включая сцинтилляционный детектор с матрицей SiPM, распределённой в объёме рабочего вещества, и экономичный сцинтилляционный детектор со светосбором с помощью воздушного световода. Продемонстрированные высокие временные и амплитудные параметры прототипов подобных приборов делают возможным их применение в условиях с менее жёсткими геометрическими и радиационными ограничениями, нежели в эксперименте ALICE.

Публикации автора по теме диссертационного исследования

1. Kaplin V.A., Makliaev E.F., **Melikyan Yu.A.**, Naumov P.P., Naumov P.Yu., Runtso M.F. Time and amplitude characteristics of large scintillation detectors with SiPM // Physics Procedia. 2015. V.74. P. 232–237.
2. Акимов Д.Ю., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Каплин В.А., Коваленко А.Г., **Меликян Ю.А.**, Сосновцев Ю.А., Шакиров Ю.А., Хромов А.В. Шумовые характеристики низкофоновых фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R11410-20 // Приборы и техника эксперимента. 2015, №3. С.97–101.
3. Grigoryev V.A., Kaplin V.A., Karavicheva T.L., Kurepin A.B., Maklyaev E.F., **Melikyan Yu.A.**, Serebryakov D.V., Trzaska W.H., Tykmanov E.M. Study of the Planacon XP85012 photomultiplier characteristics for its use in a Cherenkov detector // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V.675 042016.
4. Grigoryev V.A., Kaplin V.A., Karavicheva T.L., Konevskikh A.S., Kurepin A.B., Loginov V.A., **Melikyan Yu.A.**, Morozov I.V., Reshetin A.I., Serebryakov D.V., Shabanov A.I., Slupecki M.,

- Trzaska W.H., Tykmanov E.M. Fast timing and trigger Cherenkov detector for collider experiments // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V.675 042015.
5. Akimov D.Yu., Belov V.A., Bolozdynya A.I., Kaplin V.A., Khromov A.V., Kozlova E.S., Maklyaev E.F., **Melikyan Yu.A.**, Shakirov A.V. and Sosnovtsev V.V. Performance of Hamamatsu R11410-20 PMTs under intense illumination in a two-phase cryogenic emission detector // *JINST.* 2016 V.11 P12005
 6. Finogeev D.A., Grigoriev V.A., Kaplin V.A., Karavichev O.V., Karavicheva T.L., Konevskikh A.S., Kurepin A.B., Kurepin A.N., Loginov V.A., Mayevskaya A.I., **Melikyan Yu.A.**, Morozov I.V., Serebryakov D.V., Shabanov A.I., Slupecki M., Tikhonov A.A., Trzaska W.H. Performance study of the fast timing Cherenkov detector based on a microchannel plate PMT // *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. V.798 012168.
 7. Antamanova E.V., Buzhan P.Zh., Kaplin V.A., Maklyaev E.F., **Melikyan Yu.A.**, Pleshko A.D., Popova E.V., Stifutkin A.A., Voznyuk N.O. Timing scintillation detector with SiPM incorporated throughout a scintillator's body // *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. V.798 012219.
 8. ALICE collaboration, Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC // 2017 — *Eur. Phys. J. Plus* 132: 99.
 9. Antamanova E.V., Bearden I.G., Garcia-Solis E.J., Harton A.V., Kaplin V.A., Karavicheva T.L., Klay J.L., **Melikyan Yu.A.**, Serebryakov D.V., Slupecki M., Trzaska W.H. Anode current saturation of ALD-coated Planacon® MCP-PMTs // *JINST* – 2018. V.13 T09001.
 10. **Melikyan Yu.A.**, от имени коллаборации ALICE, Performance of Planacon MCP-PMT photosensors under extreme working conditions // *NIM A* – 2019, 61689; DOI: 10.1016/j.nima.2018.12.004.

Научное издание

МЕЛИКЯН

Юрий Александрович

Разработка детектирующей системы
триггерного комплекса **FIT**
обновлённого эксперимента **ALICE**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60х84/16 Уч.-изд.л. 0,95 Зак. № 22438 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а