

На правах рукописи

Полещук
Роман Владимирович

Разработка фотонных методов
для экспериментального комплекса
Центра подземной физики CUFP

01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
ИЯИ РАН

Лубсандоржиев Баярто Константинович.

Официальные оппоненты:

Кузьмичев Леонид Александрович,
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, заведующий лабораторией наземной гамма-астрономии;

Останков Александр Павлович,
кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение “Государственный научный центр Российской Федерации — Институт физики высоких энергий” (ИФВЭ), НИЦ “Курчатовский институт”, ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (НИЯУ МИФИ)”.

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 002.119.01
доктор физико-математических наук

С.В. Троицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Фотонные методы — одни из самых распространенных методов в экспериментах в физике нейтрино и астрофизике частиц. Рождение и последующая регистрация фотонов является основным детектирующим принципом для подавляющего большинства современных экспериментов в этих областях физики. Вообще говоря, если приглядеться пристально в современные эксперименты, то можно в них найти практически все элементы фотоники — бурно развивающейся области науки XXI века. Источники фотонов — сцинтилляторы и радиаторы черенковского и переходного излучений, калибровочные источники света (лазеры, лазерные диоды, светодиоды, газоразрядные источники). Среды, в которых распространяются фотоны (“фотонные” среды), — световоды, радиаторы излучений, оптоволоконные кабели. В черенковских и флуоресцентных детекторах космических лучей высоких и ультравысоких энергий атмосфера Земли используется как гигантский калориметр. В черенковских детекторах природных потоков нейтрино, нейтринных телескопах, рабочей средой служат гигантские естественные объемы морской воды (нейтринный телескоп ANTARES в Средиземном море) или антарктического льда (нейтринный телескоп ICECUBE на Южном Полюсе).

Количество детекторов фотонов в экспериментах исчисляется многими тысячами. В подземном черенковском детекторе Super-KAMIOKANDE, в котором были открыты осцилляции нейтрино, 11300 крупногабаритных фотоумножителей регистрируют фотоны черенковского излучения, рождающиеся от продуктов взаимодействия нейтрино в 50 килотоннах ультрачистой воды. В эксперименте Pierre Auger Observatory, зарегистрировавшем обрезание Зацепина-Кузьмина-Грейзена в энергетическом спектре космических лучей ультравысоких энергий, более 10 тысяч фотоумножителей регистрируют черенковский свет от заряженных частиц широких атмосферных ливней в водных баках и флуоресцентный

свет, порождаемый ливнями в атмосфере Земли. В проектирующихся экспериментах следующего поколения, например, NUR-КAMIKANDE, планируется применять уже ~100 тысяч фотоумножителей большой чувствительной площади.

Во всех экспериментах с применением фотодетекторов и фотонных сред возникает необходимость тщательного исследования и контроля не только параметров фотодетекторов, но и свойств среды. В силу этого в экспериментах создаются калибровочные системы с различного рода источниками фотонов, калиброванных реперных фотодетекторов, оптоволоконных систем и т.д.

В последнее время стало весьма популярным использовать в экспериментах пластиковые сцинтилляторы, в которых сигнал считывается с помощью спектросмещающих оптоволоконных кабелей, сочлененных с кремниевыми фотоумножителями. Это связано с компактностью получающихся детекторов, относительно небольшими значениями рабочих напряжений в несколько десятков вольт, а также достаточно высокой надежностью.

Развитие экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета-распада ядер и частиц темной материи привели к появлению новых неорганических сцинтилляционных кристаллов со специфическими сцинтилляционными параметрами, для исследования которых необходимы новые методы и средства.

Цель работы и методы исследований

Целью данной диссертационной работы была разработка фотонных методов для экспериментального комплекса Центра подземной физики CUUP в Финляндии, работы по созданию которого активно ведутся в настоящее время. Необходимо было разработать методы и средства для исследования параметров кремниевых фотоумножителей для сцинтилляционных детекторов подземного эксперимента по исследованию мюонов космических лучей ЕММА, разработать также методы исследования параметров сцинтилляционных кристаллов для экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета-распада ядер и частиц темной материи. Задача исследования кинетики свечения таких сцинтилляционных кристаллов методом счета коррелированных во времени фотонов привела к разработке и созданию широкодиапазонного времяцифро-

вого преобразователя. Исследование коррелированных во времени событий с большими временами задержек в фотодетекторах для проекта эксперимента LENA, который планировалось разместить в экспериментальном комплексе Центра CUPP, привели к наблюдению нового класса послеимпульсов в классических вакуумных фотоумножителях.

Научная новизна и практическая ценность работы

Разработанные фотонные методы предназначены для использования в экспериментальном комплексе Центра подземной физики CUPP в шахте Пихасалми в Финляндии. Эти методы обеспечивают успешное осуществление эксперимента по исследованию мюонов космических лучей EMMA, входящего в комплекс, и открывают новые возможности для низкофоновой лаборатории комплекса. Работы по созданию этой лаборатории активно ведутся в настоящее время. Впервые обнаружен новый класс послеимпульсов в классических вакуумных фотоэлектронных умножителях с аномально большими временами задержки, которые не могут быть объяснены существующими моделями образования послеимпульсов. Разработаны оригинальные методы измерения основных сцинтилляционных параметров кристаллов с большими временами высвечивания ($\sim 10-20$ мкс) и малым световыходом ($\sim 2000-3000$ фотонов/МэВ), активно разрабатываемых в настоящее время для экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета распада ядер и темной материи.

Разработанные соискателем фотонные методы активно используются в Центре подземной физики CUPP, как в действующем эксперименте по исследованию мюонов космических лучей EMMA, так и в проектах низкофоновых исследований и экспериментов следующего поколения в астрофизике частиц. Эти методы также могут быть использованы при проектировании и создании сцинтилляционных и черенковских детекторов для экспериментов не только в астрофизике частиц, но и в ускорительной физике. Полученные результаты могут быть использованы, например, в эксперименте по гамма-астрономии высоких энергий TAIGA в Тункинской долине, Россия, в эксперименте с реакторными антинейтрино JUNO в Китае и т.д.

Материал, представленный в диссертации, несомненно, будет представлять интерес для широкого круга физиков-экспериментаторов, работающих в отечественных (ФИАН, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ИФВЭ и др.) и зарубежных физических институтах.

Личный вклад автора

Приведенные результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Автором лично разработаны и созданы измерительные стенды для отбора, тестирования и изучения параметров твердотельных кремниевых фотоумножителей международного подземного эксперимента по изучению мюонов космических лучей ЕММА в Центре подземной физики SUPP в Пихасалми, Финляндия. Стенды успешно эксплуатируются на протяжении ряда лет в ИЯИ РАН и в экспериментальном комплексе SUPP, как в лаборатории на поверхности, так и в подземной лаборатории. Автором разработаны методы отбора и классификации фотодетекторов подземного эксперимента по изучению мюонов космических лучей ЕММА. Вклад автора был определяющим при проведении отбора, тестирования и исследования параметров кремниевых фотоумножителей сцинтилляционных детекторов эксперимента ЕММА. Автором исследованы параметры более 2000 кремниевых фотоумножителей сцинтилляционных детекторов эксперимента ЕММА. Автором лично разработан времяцифровой преобразователь БПВ-15, с помощью которого автором был обнаружен и исследован новый класс послепимпульсов с временами задержки ~ 120 мкс, а также модуль счета фотонов МСИ-1280. Автором предложены и разработаны методы исследований основных сцинтилляционных параметров неорганических кристаллов с медленной кинетикой свечения и малым световыходом.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработка и создание измерительных стендов для отбора, тестирования и изучения параметров твердотельных кремниевых фотоумножителей международного подземного эксперимента по изучению мюонов космических лучей ЕММА в Центре подземной физики SUPP в Пихасалми, Финляндия.

2. Разработка методов отбора и классификации фотодетекторов подземного эксперимента по изучению мюонов космических лучей ЕММА в Центре подземной физики CUPP. Результаты исследований параметров более 2000 кремниевых фотоумножителей сцинтилляционных детекторов эксперимента ЕММА.

3. Разработка времяцифрового преобразователя БПВ-15 с максимальным диапазоном измеряемых интервалов времени 276 мкс с шагом 67 нс для исследования послеимпульсов в фотодетекторах и кинетики сцинтилляционного свечения некоторых неорганических кристаллов.

4. Обнаружение нового класса послеимпульсов в классических вакуумных фотоэлектронных умножителях с временами задержки от основного сигнала ~ 120 мкс.

5. Разработка методов измерения основных сцинтилляционных параметров кристаллов с временами высвечивания 10-20 мкс и световыходом на уровне 2000-3000 фотонов/МэВ, разрабатываемых для экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета распада ядер и темной материи. Разработка электронного модуля счета коррелированных во времени фотонов МСИ-1280 для исследования световыходов сцинтилляционных кристаллов с медленной кинетикой свечения и малым световыходом.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертации были представлены в виде докладов на:

- Международной конференции “New developments in Photon Detection” 2008 (France, Aix-les-Bains, 2008)
- Международной конференции “New developments in Photon Detection” 2011 (France, Lyon, 2011)
- 52-й Научной конференции МФТИ. Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Москва, МФТИ, 2009.
- Рабочих совещаниях коллаборации ЕММА (2008–2015 гг.)

Публикации

Основные положения диссертации опубликованы в 14 работах, в том числе в 10 статьях в реферируемых журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованной литературы. Общее количество страниц составляет 127, рисунков — 72 и таблиц — 1. Список литературы включает 109 наименований.

Содержание работы

Во введении обсуждается актуальность темы исследований, цели, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы. Описаны основные положения, выносимые на защиту, где и как результаты работы были апробированы.

В первой главе описывается экспериментальный комплекс Центра подземной физики CUPP и задачи, стоящие перед входящими в этот комплекс подземным экспериментом по исследованию мюонов космических лучей ЕММА и низкофоновой подземной лабораторией.

Центр подземной физики CUPP (Centre of Underground Physics in Ruhäsalmi) располагается в шахте Пихасалми на берегу озера Пихаярви в центральной части Финляндии. На рис. 1а показано географическое расположение Центра. Шахта Пихасалми была создана для добычи медно-цинкового концентрата и является одной из самых глубоких шахт в Европе. Фотография инфраструктуры шахты на поверхности представлена на рис. 1б. Разработка шахты ведется с начала 1960-х годов и ее закрытие произойдет в 2018 году. Расположение шахты, развитая инфраструктура в самой шахте и ее ближайшей окрестности делают это место весьма привлекательным местом для подземных экспериментов в нейтринной физике и астрофизике частиц. Экспериментальный комплекс Центра состоит из двух лабораторий – умеренного (200 м.в.э.) и глубокого (~4300 м.в.э.) заложений.

Самая глубокая часть шахты (глубина ~4300 м.в.э.) рассматривалась для размещения комплексных экспериментов в нейтринной физике и астрофизике частиц – LAGUNA, LAGUNA-LBNO, LENA. Одной из целей эксперимента LAGUNA-LBNO является регистрация событий от пучка нейтрино от ускорителя в Европейском центре ядерной физики (CERN) в Женеве (Швейцария) или/и от ускорителя Института физики высоких энергий (ИФВЭ) в Протвино

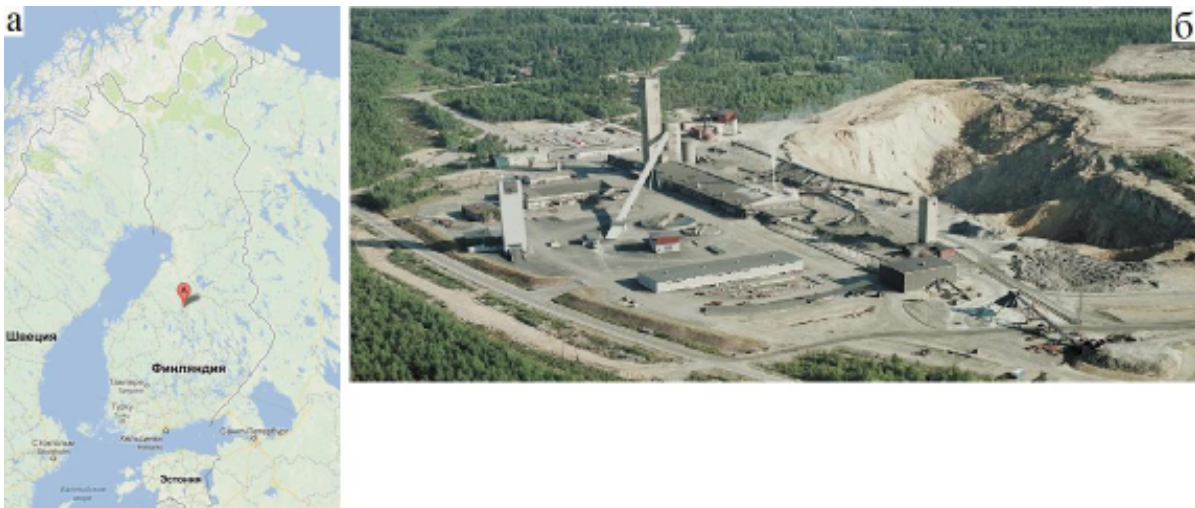


Рис. 1. а) Географическое расположение Центра подземной физики CUPP;
 б) Фотография наземной инфраструктуры шахты Пихасалми

(Россия), направленного в шахту Пихасалми. Уникальное расположение Центра CUPP относительно обоих ускорителей, ~ 2300 км от CERN и ~ 1100 км от ИФВЭ, открывают прекрасную возможность для измерения иерархии масс нейтрино и CP-нарушающей фазы δ_{CP} . В проекте эксперимента LAGUNA-LBNO предусматривается создание в шахте огромного 100 килотонного жидкоаргонового детектора GLACIER. В этой же шахте планировалось разместить 50 килотонный жидкостинцилляционный детектор LENA для проведения исследований в широчайшем диапазоне, включающем в себя распад протона, геонейтрино, нейтрино от взрывов сверхновых звезд и т.д.

Полости шахты, расположенные на относительно небольших “умеренных” глубинах (~ 200 м.в.э.), представляют хорошую возможность для проведения исследований мюонов космических лучей. На этой глубине электрон-фотонная и ядерно-активная компоненты космических лучей полностью подавлены, остается только мюонная компонента, при этом, поток мюонов остается еще достаточно высоким. Существующая инфраструктура позволяет выводить данные по кабельным сетям, включающим в себя и оптоволоконные кабели, на поверхность, где в одном из зданий управления шахты оборудована наземная лаборатория Центра общей площадью ~ 200 м².

Космические лучи были открыты в 1912 году австрийским физиком Виктором Гессом в ходе серии его знаменитых полетов на воз-

душном шаре. Космические лучи покрывают гигантский диапазон по энергиям. Несмотря на более чем столетнюю историю, до сих пор до конца неизвестно происхождение космических лучей — где они рождаются, и какие механизмы позволяют им ускориться до таких гигантских энергий. При энергии 3×10^{15} эВ наблюдается ставший теперь классическим излом или “колени” в энергетическом спектре космических лучей, который был открыт в конце 50-х годов группой советских физиков из НИИЯФ МГУ, под руководством Г.Б. Христиансена. До сегодняшнего дня неизвестна природа излома — как причина возникновения излома, так и какие изменения происходят, если они вообще происходят, с массовым составом первичного космического излучения в области излома. Тщательное изучение энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в области излома их спектра представляет большую важность для решения проблемы происхождения космических лучей.

В силу круто падающего степенного характера спектра исследовать космические лучи с энергиями выше 10^{15} эВ прямыми методами на спутниках или баллонах практически невозможно в силу малости потока (~ 1 частицы/ $\text{м}^2 \times \text{год}$ при энергии 3×10^{15} эВ), поэтому приходится регистрировать вторичные частицы, образующиеся в результате взаимодействия первичных космических лучей с ядрами воздуха, так называемые, широкие атмосферные ливни (ШАЛ), наземными экспериментами. При этом, в этих экспериментах регистрируется заряженная компонента ШАЛ (электроны/позитроны, мюоны и адроны), а также индуцированные заряженной компонентой черенковское и ионизационное (флуоресцентное) излучения.

В подземных детекторах регистрируется мюонная компонента ливней. Изучение множественности мюонов в ливнях и их пространственного распределения наряду с определением направления прихода мюонов представляет особый интерес, поскольку эти параметры чувствительны к химическому составу первичного космического излучения. Существуют возможности разделения ливней от протонов и ядер железа. Хотя, следует отметить, что существуют значительные сложности при интерпретации экспериментальных результатов при регистрации только одной компоненты широких атмосферных ливней.

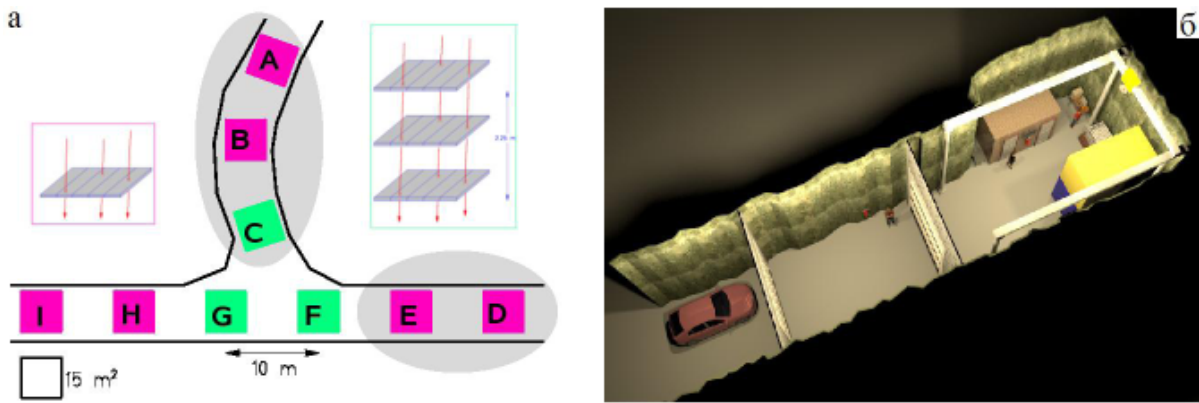


Рис. 2. а) Общая схема расположения эксперимента ЕММА; б) Эскиз-схема низко-фоновой лаборатории Центра СУРР

Подземный эксперимент по изучению мюонов космических лучей ЕММА (Experiment with Multi-Muon Array) проводится в экспериментальном комплексе СУРР в шахте Пихасалми на глубине 85 м, что соответствует ~ 240 м.в.э. Поток мюонов ослабляется по сравнению с поверхностью в ~ 100 раз на глубине расположения эксперимента ЕММА и составляет $I_m \sim 1 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Полная площадь детекторов в эксперименте равна $\sim 150 \text{ м}^2$. Пороговая энергия для мюона на этой глубине составляет ~ 50 ГэВ. Общая схема расположения установки показана на рис. 2а. Установка состоит из 9 детекторов-домиков площадью $\sim 15 \text{ м}^2$ каждый. Каждый детектор состоит из дрейфовых камер, использовавшихся в эксперименте LEP-DELPHI в Европейском центре ядерных исследований (CERN), и пластиковых сцинтилляционных счетчиков, разработанных в ИЯИ РАН специально для эксперимента ЕММА.

Одиночный сцинтилляционный счетчик обозначается, как SC1. Счетчики SC1 объединяются в сцинтилляционный детектор по 16 счетчиков в каждом детекторе. Такой детектор получил название SC16. Сцинтилляционный счетчик SC1 представляет собой пластиковый сцинтиллятор, сигналы которого считываются с помощью спектросмещающего оптического волокна и кремниевого фотумножителя (микروпиксельного лавинного фотодиода, работающего в режиме ограниченного гейгеровского разряда). Сцинтилляционные счетчики SC1 были разработаны и производились в ИЯИ РАН. В работе используются кремниевые фотумножители производства Центра Перспективных Технологий и Аппаратуры (ЦПТА г.Мо-

сква), о свойствах этих фотоумножителей будет описано подробнее в следующей главе.

В самой глубокой части выработки шахты, в непосредственной близости от места, где планируется размещение крупномасштабных экспериментов следующего поколения, для экспериментального комплекса SURP создается низкофоновая лаборатория глубокого заложения. Глубина лаборатории составляет ~ 4300 м.в.э. (~ 1430 м). На рис. 26 схематично показана сама низкофоновая лаборатория. Полная площадь полости составляет ~ 250 м², из них лаборатория занимает более 100 м², при этом, площадь чистой комнаты будет превышать 60 м². Вся необходимая инфраструктура лаборатории уже создана: вентиляция (500 м³/час), электричество (650 кВт), вода, связь с наземной лабораторией (1GBLan) и т.д. Физический же пуск лаборатории планируется в первой половине 2016 года. Планируется начать использование этой лаборатории пуском небольшого эксперимента по измерению концентрации радиоактивного изотопа углерода ¹⁴C в жидких сцинтилляторах на основе растворителей, произведенных как из нефти, так и из каменного угля. Также проектируется в настоящее время проведение эксперимента по измерению двойного бета-распада ядер с использованием жидкосцинтилляционного детектора. Поток мюонов на глубине низкофоновой лаборатории ослаблен почти в миллион раз по сравнению с потоком на поверхности и составляет $I_{\mu} \sim 1 \times 10^{-4}$ м⁻²с⁻¹.

Во второй главе описывается подземный эксперимент по исследованию мюонов космических лучей ЕММА. Даются описания измерительных стендов для проведения отбора, тестирования и исследования параметров кремниевых фотоумножителей для сцинтилляционных счетчиков эксперимента ЕММА. Представлены методы отбора, результаты измерения свойств кремниевых фотоумножителей и способы установления рабочих параметров в установке. Описаны также сам сцинтилляционный счетчик и результаты измерений со счетчиком в лаборатории на поверхности и в подземной лаборатории.

Кремниевые фотоумножители, изобретенные в Советском Союзе в конце 80-х годов XX века, в настоящее время находят широкое применение в разных областях экспериментальной физики. Особый интерес они представляют для регистрации сигналов с пла-

стикových сцинтилляторов с помощью спектросмещающих оптоволоконных кабелей. В таких приложениях получают компактные надежные сцинтилляционные детекторы. Для использования в сцинтилляционных счетчиках подземного эксперимента по исследованию мюонов космических лучей ЕММА выбраны кремниевые фотоумножители или микропиксельные лавинные фотодиоды со структурой металл-резистор-полупроводник, работающие в режиме ограниченного гейгеровского разряда производства Центра Перспективных Технологий и Аппаратуры (ЦПТА, Москва). Фотоумножитель состоит из 556 пикселей, каждый пиксель размером — 45×45 мкм². Индивидуальный пиксель представляет собой отдельный лавинный кремниевый фотодиод, изготовленный на подложке из кремния *p*-типа. Рабочая площадь фотоумножителя составляет 1,1 мм². Пиксели отделены друг от друга металлизированными узкими канавками для эффективного подавления оптической и электрической связи между пикселями. Каждый пиксель соединен с общим металлическим электродом при помощи отдельного высокоомного сопротивления, гасящего резистора, из поликристаллического кремния. Также имеется общий электрический контакт для всех пикселей. К фотоумножителю прикладывается обратное напряжение смещения. Если это напряжение начинает превышать напряжение пробоя *p-n* перехода, то свободные носители, электроны и дырки, образовавшиеся в области пространственного заряда пикселя, порождают электронно-дырочную лавину — гейгеровский разряд в пикселе, развитие которого при достижении больших токов прекращается из-за падения напряжения на гасящем резисторе. Выходной сигнал фотоумножителя формируется при прохождении тока, обусловленного лавиной, через нагрузочное сопротивление.

Как электроны, так и дырки могут инициировать возникновение лавины в пикселе. Эти носители могут образовываться в результате либо фотоэффекта в области пространственного заряда, либо в результате термоэмиссии носителей в этой области. Электрический ток, протекающий через высокоомное сопротивление, вызывает падение напряжения смещения на пикселе, в котором протекает лавина, что вызывает эффективное “гашение” гейгеровского разряда. Время восстановления напряжения смещения на пикселе

характеризуется $\tau \sim R_q \times C_p$, где R_q и C_p — гасящее сопротивление и паразитная емкость пикселя соответственно. При таком подходе каждый пиксель фотоумножителя является независимым микро-фотоумножителем. Одновременное срабатывание нескольких пикселей приводит к суммированию сигналов на выходных электродах фотоумножителя.

Для исследования параметров, тестирования и отбора кремниевых фотоумножителей для сцинтилляционных счетчиков подземного эксперимента ЕММА разработаны и созданы специализированные измерительные стенды. Эти стенды также использовались и для тестирования самих сцинтилляционных счетчиков эксперимента, использующих такие фотоумножители и спектросмещающие оптоволоконные кабели. Разработанные стенды выполняют следующие основные задачи:

1. измерение напряжения лавинного пробоя фотоумножителей;
2. определение рабочего напряжения питания фотоумножителей;
3. измерение скорости счета импульсов темнового тока фотоумножителей;
4. оптимизация уровней дискриминации сигналов фотоумножителей и сцинтилляционного счетчика;
5. измерение эффективности регистрации фотонов кремниевыми фотоумножителями.

Вольт-амперные характеристики показывают наглядно работу кремниевых фотоумножителей. Из них легко определить напряжение пробоя, оценить коэффициент усиления и уровень шумов. На рис. 3а показаны типовые вольт-амперные характеристики кремниевых фотоумножителей отобранных для использования в сцинтилляционных счетчиках эксперимента ЕММА [1,11]. Из вида вольт-амперной характеристики кремниевых фотоумножителей довольно ясно выделяются три области, как показано на рис. 3б. Левая часть вольт-амперной кривой (область 1), почти горизонтальная в логарифмической кривой, соответствуют пропорциональному режиму кремниевых фотоумножителей, когда прибор работает как линейный лавинный фотодиод. Резкий рост тока в области напряжений 28-30 В (область 2) соответствует режиму гейгеровского разряда. Точка перегиба соответствует напряжению лавинного пробоя

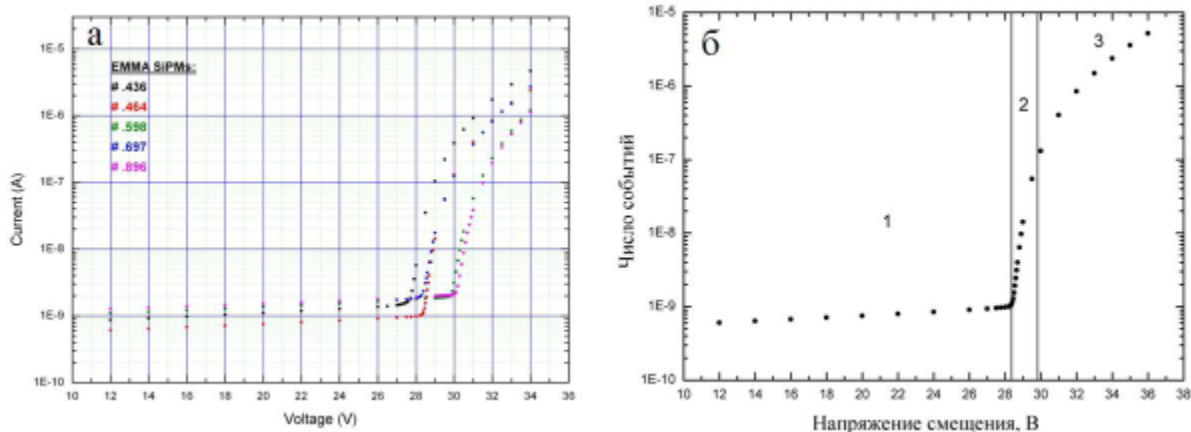


Рис. 3. а) Вольтамперные характеристики кремниевых фотоумножителей отобранных для использования в сцинтилляционных счетчиках эксперимента ЕММА; б) Типовая вольт-амперная характеристика кремниевого фотоумножителя эксперимента ЕММА. 1 — область линейного или пропорционального лавинного фотодиода; 2 — область гейгеровского разряда; 3 — область гейгеровского разряда, где уже сказывается влияние гасящего резистора в пикселях кремниевого фотоумножителя. Точка резкого перегиба между областями 1 и 2 определяет напряжение лавинного пробоя кремниевого фотоумножителя

V_{bd} . Дальнейшее уположение кривых в области 3 демонстрируют влияние гасящих резисторов в пикселях кремниевого фотоумножителя. Величина перенапряжения $\Delta V = V_{op} - V_{bd}$, равная 4 В, соответствующая усилению $G \sim 10^6$, лежит именно уже в области 3. Здесь V_{op} — рабочее напряжение, а V_{bd} — напряжение пробоя.

К сожалению, наблюдается большой разброс в напряжениях пробоя, а, следовательно, в значениях и рабочих напряжений, рис.2а. Из этого следует необходимость группировки фотоумножителей по рабочим напряжениям для облегчения дальнейшей настройки электронных систем эксперимента. Хорошая повторяемость формы вольт-амперных кривых, т.е. их практически одинаковая крутизна, кремниевых фотоумножителей эксперимента ЕММА существенно упрощает процедуру выбора рабочего напряжения фотоумножителей, соответствующего усилению $G \sim 10^6$ — нужно просто к величине напряжения лавинного пробоя прибавить 4 В. Этот факт также значительно облегчает работы по определению рабочего напряжения кремниевых фотоумножителей эксперимента ЕММА.

Измерения зарядовых спектров одно- и многофотоэлектронных импульсов позволяют исследовать большинство параметров кремниевых фотоумножителей. На рис. 4а и 4б представлены типичные

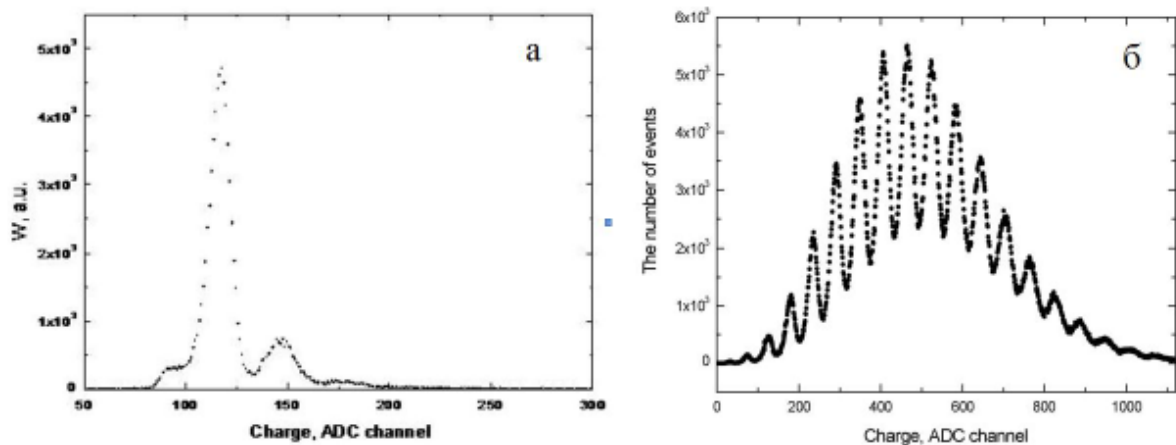


Рис. 4. а) Зарядовое распределение однофотоэлектронных импульсов фотоумножителя; б) Зарядовое распределение многофотоэлектронных импульсов кремниевого фотоумножителя

зарядовые спектры одно- и многофотоэлектронных импульсов исследуемых кремниевых фотоумножителей соответственно. Следует иметь в виду вклад существующих кросс-токов между пикселями фотоумножителей.

Кросс-токи образуются в результате рождения световых фотонов в ходе развития гейгеровского разряда в пикселе. Эти фотоны излучаются изотропно и могут проникать в соседние пиксели фотодиода, вызывая их срабатывание. Данный параметр необходим для корректного измерения эффективности регистрации фотонов кремниевого фотоумножителя. Уровень кросс-токов определяется с учетом того, что статистика числа фотоэлектронов подчиняется закону Пуассона. При анализе зарядовых распределений, показанных на рис. 4а и б, вероятность кросс-токов составляет $\sim 8\%$ при усилении $G = 10^6$. Эта величина кросс-токов является типичной для такого значения усиления данных кремниевых фотоумножителей. Такие же значения кросс-токов получаются и при анализе скорости счета импульсов темнового тока при различных величинах уровня дискриминации сигналов.

Эффективность регистрации фотонов кремниевого фотоумножителя принято обозначать PDE (photon detection efficiency). Величина PDE данных кремниевых фотоумножителей измерялась относительно PDE хорошо прокалиброванного фотоэлектронного умножителя с помощью спектрофотометра или набора интерференционных фильтров. Величина PDE для кремниевых фотоум-

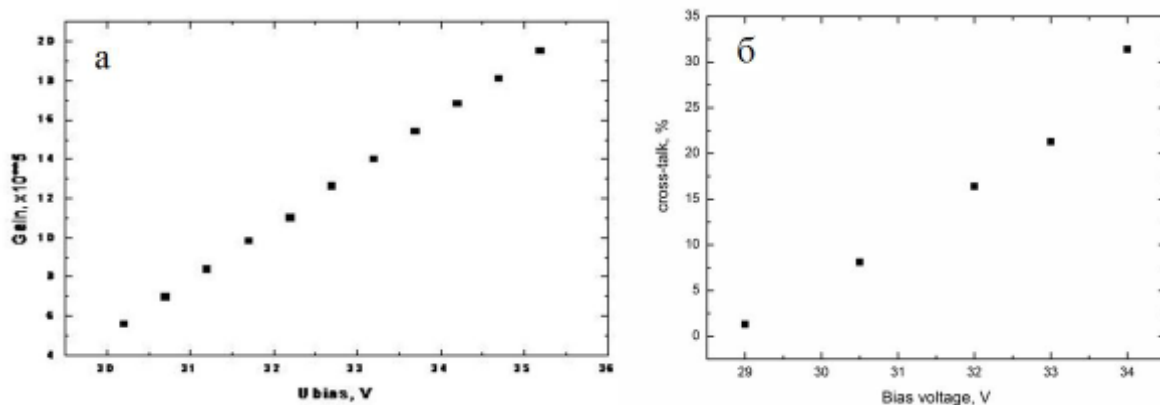


Рис. 5. а) Типовая зависимость усиления кремниевых фотоумножителей от напряжения питания; б) Типовая зависимость уровня кросс-токов кремниевых фотоумножителей от напряжения питания

ножителей эксперимента ЕММА превышает 20% на длине волны 515 нм при усилении $\sim 10^6$ и температуре 22°C. Отметим, что при определении PDE делалась поправка на значения кросс-токов для каждого напряжения питания. На рис. 5а и б показаны зависимости усиления и кросс-токов от напряжения питания соответственно.

В силу конечного числа пикселей (556 пикселей в используемых здесь кремниевых фотоумножителях) такие фотоумножители характеризуются ограниченной линейностью отклика. На рис. 6а показана кривая линейности исследуемых кремниевых фотоумножителей. Измеренная зависимость хорошо согласуется с расчетами, сделанными в предположении, что количество сработавших пикселей подчиняется закону Пуассона.

Во временном отклике кремниевых фотоумножителей данного типа есть одна особенность — это некоторая инерционность отклика на повторные импульсы, связанная с наличием гасящего сопротивления. Время восстановления определяется как время, за которое амплитуда второго импульса, следующего за основным, восстанавливается до 90% своего истинного значения. При этом амплитуда основного импульса должна соответствовать полному насыщению кремниевого фотоумножителя, т.е. необходимо срабатывание всех пикселей фотоумножителя. На рис. 6б показана зависимость отношения амплитуды второго сигнала A1 к амплитуде этого же сигнала A2 при отсутствии первого сигнала от времени задержки второго импульса от первого импульса. Это типичная картинка времени

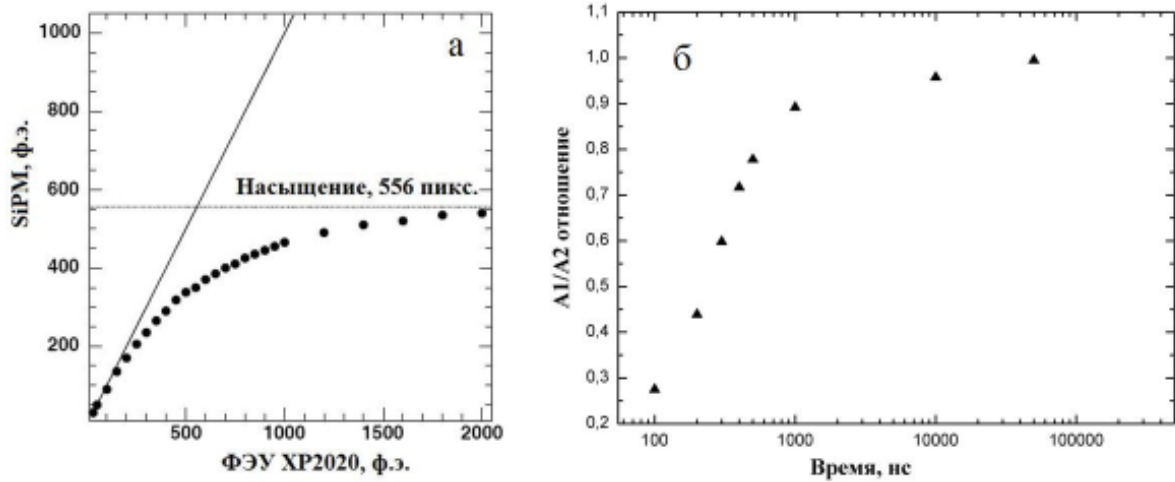


Рис. 6. а) Кривая линейности исследуемых кремниевых фотоумножителей; б) Зависимость отношения амплитуды второго импульса к амплитуде первого импульса ($A1/A2$) от времени задержки между импульсами

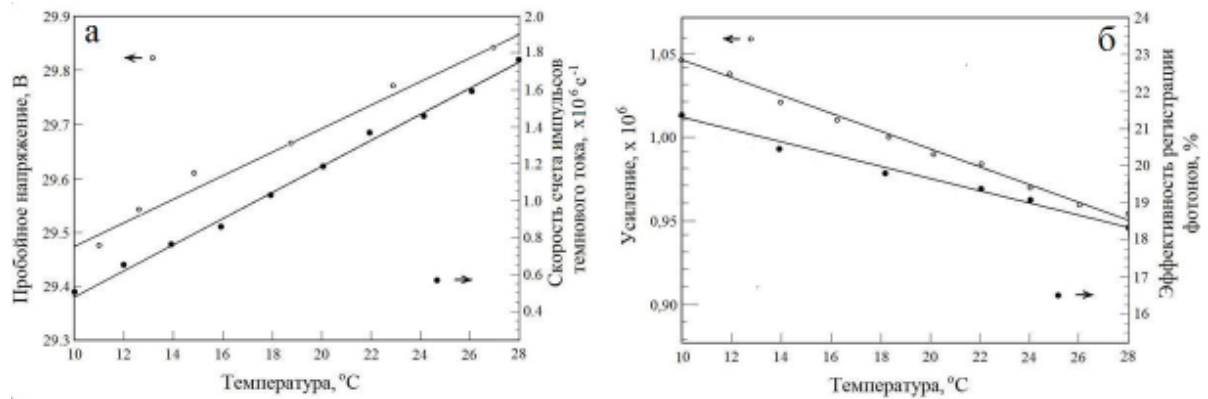


Рис. 7. Температурные зависимости а) пробойного напряжения (o) и скорости счета импульсов темнового тока (•); б) усиления (o) и вероятности детектирования фотонов PDE (•) кремниевых фотоумножителей эксперимента ЕММА

восстановления для кремниевых фотоумножителей эксперимента ЕММА. Как видно из рисунка величина времени восстановления не превышает 1 мкс. Это вполне удовлетворяет требованиям эксперимента ЕММА, поскольку, как указывалось выше, общая нагрузка индивидуального сцинтилляционного счетчика составляет приблизительно $\sim 5 \text{ с}^{-1}$.

Скорость счета импульсов темнового тока кремниевого фотоумножителя измеряется при различных уровнях дискриминации сигнала и напряжения питания при заданной температуре. Эта величина составляет $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$ при уровне дискриминации сигналов $\sim 0,5Q_{1\text{фэ}}$, где $Q_{1\text{фэ}}$ — средний заряд однофотоэлектронных импульсов фотоумножителя.

Рабочее напряжение кремниевого фотоумножителя может быть определено также из измерений зарядового распределения однофотонных импульсов (усиления фотоумножителя), скорости счета импульсов темнового тока, уровня кросс-токов и эффективности регистрации фотонов. Все эти параметры зависят от напряжения питания. Значение рабочего напряжения выбирается из условия обеспечения достаточно высокого усиления ($>3 \times 10^5$), приемлемого уровня скорости счета импульсов темнового тока ($\leq 10^6 \text{ с}^{-1}$), значений кросс-токов ($\leq 10\%$) и высокой величины эффективности регистрации фотонов ($>15\%$).

Измерения температурной зависимости параметров кремневых фотоумножителей показывают, что усиление и PDE фотоумножителей увеличиваются, а скорость счета импульсов темнового тока уменьшается с уменьшением температуры [11]. Измерения проводились в температурном диапазоне $+10$ — $+28$ °С. Температурный коэффициент PDE для исследуемых кремневых фотоумножителей составляют $\sim -0,8\%/^{\circ}\text{C}$, а их усиление меняется с температурой с коэффициентом $\sim -0,5\%/^{\circ}\text{C}$. Температурный коэффициент для скорости счета импульсов темнового тока кремневых фотоумножителей равен $\sim 60 \text{ кГц}/^{\circ}\text{C}$. Пробойное напряжение изменяется при изменении температуры с коэффициентом $\sim 17 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$. На рис. 7а и б представлены типичные температурные зависимости пробойного напряжения и скорости счета темнового тока (а), величины вероятности детектирования фотонов и усиления (б) кремневых фотоумножителей эксперимента ЕММА. Величины же кросс-токов и времени восстановления исследуемых кремневых фотоумножителей практически не зависят от температуры.

Тестирование и отбор кремневых фотоумножителей для сцинтилляционных детекторов эксперимента ЕММА проводились на измерительном стенде, описанном выше в этой главе. Была изучена партия из ~ 2000 кремневых фотоумножителей, полученная из ЦПТА. Тестирование кремневых фотоумножителей велось с учетом следующих требований к фотодиодам для сцинтилляционного счетчика эксперимента ЕММА:

1. Эффективность детектирования фотонов с длиной волны 515 нм — $\geq 15\%$;

2. Скорость счета импульсов темнового тока при комнатной температуре (20°C) – 2,5 МГц;
3. Уровень кросс-токов при рабочем напряжении - $\leq 12\%$
4. Усиление — $\geq 3 \times 10^5$;
5. Время восстановления — ≤ 10 мкс.

Результаты тестирования показывают, что все просмотренные кремниевые фотоумножители можно подразделить на 5 групп. Разделение осуществляется, в основном, по форме импульса кремниевых фотоумножителей. Возможность такого разбиения на группы существенно облегчает работы, как по проектированию самого эксперимента, так и работы по монтажу и отладке установки. Сцинтилляционные детекторы SC16 по 16 сцинтилляционных счетчиков SC1 каждый комплектовались кремниевыми фотоумножителями из одной группы с близкими значениями рабочего напряжения, усиления и со схожими формами выходных импульсов.

Сцинтилляционный счетчик SC1 [1] состоит из пластикового сцинтиллятора, спектросмещающего оптоволоконного кабеля и кремниевого фотоумножителя. Как уже упоминалось, этот сцинтилляционный счетчик был разработан и производился в ИЯИ РАН на основе полистирольного сцинтиллятора, полученного литьевым способом, с размерами $12.5 \times 12.5 \times 3$ см³. В счетчиках используется метод собирания сцинтилляционного света при помощи вклеенного в материал сцинтиллятора спектросмещающего оптического волокна, которое захватывает и поглощает фотоны сцинтилляционного света, а затем происходит переизлучение этих фотонов, но уже в зеленую область спектра. Переизлученные таким образом фотоны распространяются по оптическому волокну и транспортируются к регистрирующим фотоприемникам с повышенной чувствительностью в этой области спектра. Спектральная чувствительность используемого кремниевого фотоумножителя довольно хорошо согласуется со спектром излучения спектросмещающих оптоволоконных кабелей, который находится в основном в зеленой области длин волн 510-520 нм. Как уже отмечалось выше, размер чувствительной области кремниевого фотоумножителя, равный $1,1$ мм², также хорошо подходит для оптоволоконных кабелей с диаметром сердцевины 1 мм. Фотографии сцинтилляционного счетчика SC1 и сцинтилляционного детектора SC16 показаны на рис. 8а и б соответственно.

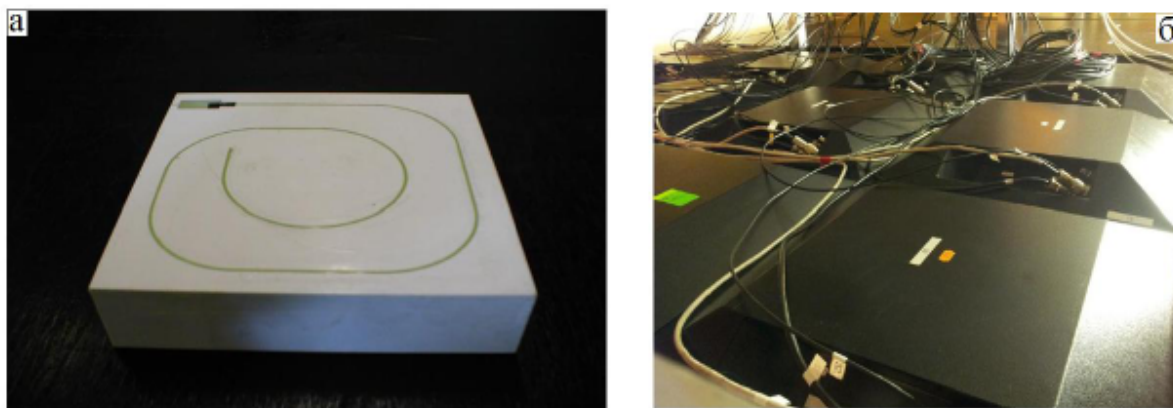


Рис. 8. Фотографии сцинтилляционного счетчика SC1 (а) и сцинтилляционного детектора SC16 (б)

Отклик сцинтилляционного счетчика на мюоны космических лучей был изучен в лаборатории на поверхности и в подземной лаборатории на одной и той же глубине 85 м (200 м.в.э.) в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО ИЯИ РАН) и в Центре подземной физики CUUP в шахте Пихасалми. Исследования в шахте Пихасалми проводились на установке, созданной нами в ИЯИ РАН на базе измерительного стенда, описанного выше в данной главе. Эта установка была поставлена в Финляндию и в настоящее время успешно используется для тестирования всех элементов сцинтилляционной части эксперимента ЕММА. Температура в наземной и подземной лабораториях поддерживалась на уровне $+18^{\circ}\text{C}$ в течение всего времени измерений. Рабочее напряжение кремниевого фотоумножителя составляло 27,3 В, что обеспечивало эффективность регистрации фотонов $\sim 20\%$ на длине волны 51-520 нм. Измерения в БНО ИЯИ РАН и в Центре подземной физики CUUP показали весьма схожие результаты [1, 4].

Зарядовые распределения событий, измеренные на поверхности и под землей в Центре подземной физики CUUP в шахте Пихасалми представлены на рис. 9а и б соответственно. В этих измерениях регистрировались заряды всех событий, превышающих установленный порог дискриминатора, т.е. система работала в режиме “self-triggered mode”. Уровень дискриминации сигналов соответствовал ~ 15 фотоэлектронам. Пик, обусловленный мюонами космических лучей, достаточно четко виден в обоих спектрах, измеренных на поверхности, и соответствует ~ 70 фотоэлектронам. Как

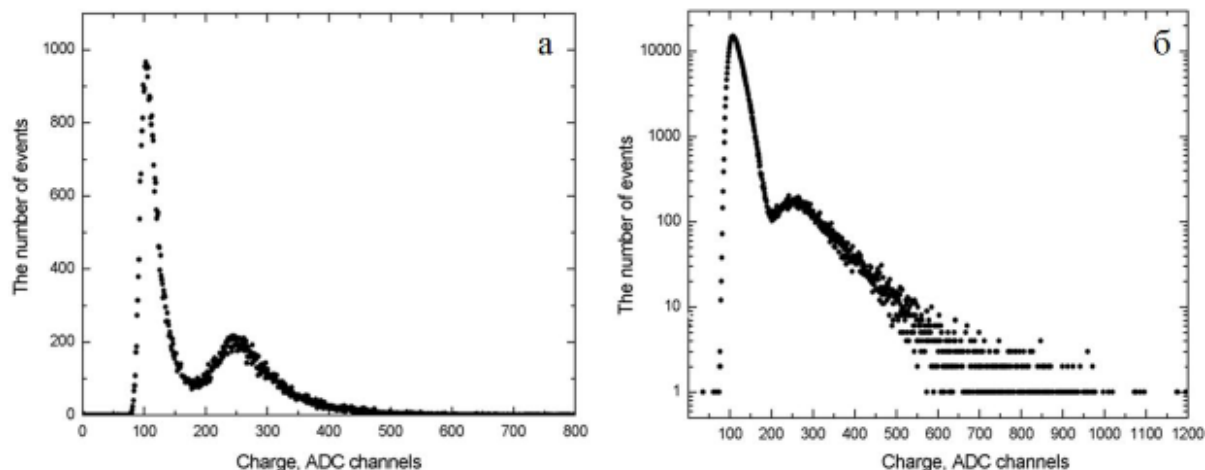


Рис. 9. Зарядовые распределения событий, измеренные на поверхности (а) и на глубине 200 м.в.э. (б) в Центре подземной физики CUPP университета г. Оулу в шахте Пихасалми

видно из приведенных рисунков, эффективность регистрации мюонов данным сцинтилляционным счетчиком близка к 100%. Полная скорость счета импульсов сцинтилляционного счетчика выше данного порога составляет ~ 7 Гц [1, 4]. Отметим, что уровень дискриминации сигналов (~ 15 фотоэлектронов) соответствует $\sim 0,21$ МПР, где МПР – средняя величина сигнала, обусловленного прохождением релятивистского мюона.

Большая часть событий в спектрах, измеренных в подземных лабораториях в БНО и в шахте Пихасалми, обусловлена радиоактивным фоном от окружающей породы. Однако мюонные пики также отчетливо видны и остаются в тех же каналах, что и в спектрах, измеренных в лабораториях на поверхности в БНО и Пихасалми. Как видно из рис. 9б, вклад мюонов в полный спектр событий на глубине 85 м мал. Полная скорость счета импульсов сцинтилляционного счетчика на этой глубине в шахте Пихасалми составляет ~ 5 Гц [4], что говорит о довольно высоком уровне радиоактивного фона в месте эксперимента. Этот уровень остается постоянным во времени, что позволило создать автоматическую систему подстройки усиления кремниевых фотоумножителей в сцинтилляционных счетчиках эксперимента ЕММА [7]. Принцип работы этой системы, разработанной В.И. Волченко и Г.В. Волченко, основан на отслеживании скорости счета сцинтилляционного счетчика выше установленного порога. То есть, репером этой системы является

скорость счета сцинтилляционного счетчика N_r . При отклонении скорости счета от N_r автоматически изменяется напряжение питания кремниевого фотоумножителя сцинтилляционного счетчика – увеличивается при уменьшении скорости счета и уменьшается при увеличении скорости счета.

В целом, как видно из представленных спектров, мюонный пик хорошо выделяется над экспоненциальным хвостом спектра, обусловленном радиоактивным фоном среды, окружающей сцинтилляционные счетчики.

Результаты измерений эффективности регистрации мюонов космических лучей сцинтилляционным счетчиком SC1 показывают, что эта эффективность очень высока и близка к 100%.

В третьей главе представлены результаты разработок фотонных методов для низкофоновой лаборатории Центр подземной физики SUPP. Описаны методы исследования сцинтилляционных кристаллов с медленной кинетикой свечения и относительно малым световыходом, разрабатываемых для экспериментов по поиску двойного бета-распада ядер и частиц темной материи. Описан разработанный для этих целей широкодиапазонный времяцифровой преобразователь.

В последнее время для такого класса экспериментов разрабатываются относительно тяжелые неорганические сцинтилляционные кристаллы, такие, как CaWO_4 , CaMoO_4 , ZrMoO_4 и т.д. Эти кристаллы наряду с характеристиками привлекательными для таких экспериментов, обладают и некоторыми недостатками, ставящими определенные экспериментальные сложности для измерения их параметров. А именно, такие сцинтилляторы характеризуются медленной кинетикой сцинтилляционного свечения и относительно малым световыходом.

При измерении световыходов сцинтилляторов с характерными временами высвечивания в десятки микросекунд появляется сложность для проведения измерений классическим способом – интегрированием сигналов детектора с последующим амплитудным анализом, так как доступные стандартные спектрометрические усилители имеют наибольшие времена интегрирования в 10–12 мкс. Возможно, конечно, измерить световыход таких сцинтилляторов оцифровкой формы каждого сцинтилляционного им-

пульса с последующим интегрированием всех импульсов, составляющих сцинтилляционный импульс, off-line. Но такой подход довольно дорогостоящий и достаточно сложен для внедрения его, например, на заводе-изготовителе кристаллов для быстрой и оперативной оценки параметров кристаллов.

Нами предложен довольно простой выход из этой ситуации применением сдвоенных измерений – сначала тщательное исследование кинетики свечения сцинтилляционных кристаллов методом счета коррелированных во времени фотонов с применением классических широкодиапазонных времяцифровых преобразователей, выявление различных компонент с разными временами высвечивания и определение вклада каждой компоненты в полный световыход. Затем измеряется зарядовое распределение сцинтилляционных импульсов при облучении стандартными радиоактивными источниками с интегрированием сигнала в стандартных коммерчески доступных спектрометрических усилителях с постоянной интегрирования в 10-12 мкс. Затем, зная вклад компонент с разными временами высвечивания, восстанавливается полный световыход кристалла. Другой метод, также довольно простой, заключается в прямом счете фотонов или, говоря точнее, фотоэлектронов. Дело в том, что сцинтилляционный импульс медленных сцинтилляторов с малым световыходом представляет собой набор однофотоэлектронных импульсов фотоумножителя, регистрирующего импульсы сцинтиллятора.

Во многих физических экспериментах возникает необходимость измерения интервалов времени длительностью до сотен микросекунд и более. В качестве примера можно привести эксперименты, где планируется использовать уже упоминавшиеся, так называемые, “медленные” сцинтилляционные кристаллы, времена высвечивания которых составляют десятки или даже сотни микросекунд. Кроме того, отдельный интерес представляют явления, имеющие место в самих детекторах. Например, послеимпульсы в классических вакуумных фотоэлектронных умножителях. Для изучения кинетики свечения “медленных” сцинтилляционных кристаллов и временных распределений послеимпульсов в вакуумных фотоумножителях нами был разработан и создан 12-ти разрядный времяцифровой преобразователь БПВ-15 [6, 13]. Одними из требований к времяцифровым преобразователям были простота использова-

ния, изготовления и доступность элементной базы.

Времяцифровой преобразователь БПВ-15 предназначен для измерения интервалов времени длительностью до 276 мкс с шириной канала преобразования 67 нс. По методу измерения временного интервала БПВ-15 является преобразователем прямого счета, т.е. в преобразователе сначала формируется интервал времени, длительность которого напрямую равна времени между передними фронтами измеряемых импульсов. Этот интервал времени затем оцифровывается с помощью генератора импульсов тактовой частоты. Функциональная схема времяцифрового преобразователя БПВ-15 приведена на рис. 10. Преобразователь состоит из следующих блоков: двух преобразователей уровней (NIM-ТТЛ), формирователя импульса (ФИ), тактового генератора (ГЕН), блоков управления, счетчиков и регистров. После преобразования уровней от NIM в ТТЛ сигналы “Старт” и “Стоп” поступают в формирователь импульса ФИ. Длительность выходного импульса формирователя ФИ пропорциональна измеряемому интервалу времени. Максимальная длительность измеряемого интервала времени ограничена до значения 276 мкс. По заднему фронту измеряемого импульса формируется сигнал “Готовность” в блок управления для выработки ЛАМ-запроса, выставления его на магистраль КАМАК и записи накопленных данных счетчиков в выходные регистры. С помощью

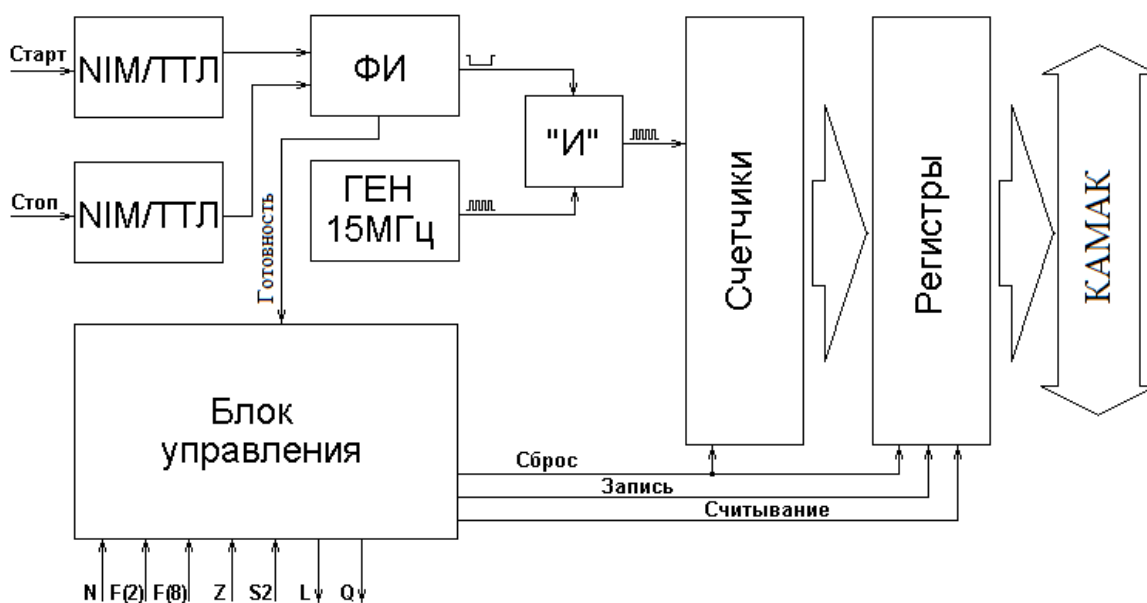


Рис. 10. Функциональная схема времяцифрового преобразователя БПВ-15

логического элемента “И” измеряемый интервал времени заполняется импульсами тактового генератора. Выходные сигналы элемента “И” считываются счетчиками и через регистры поступают на шину КАМАК. Максимальный диапазон измеряемых интервалов времени БПВ-15 составляет 276 мкс, а ширина канала преобразователя — 67 нс. Интегральная и дифференциальная нелинейности не превышают 1% и 4% соответственно. Времяцифровой преобразователь БПВ-15 выполнен в механическом стандарте КАМАК и занимает одну станцию крейта. Преобразователи БПВ-15 активно используются в настоящее время в лабораторных исследованиях как послеимпульсов ФЭУ, так и кинетики сцинтилляционного свечения ряда кристаллов. Успешная эксплуатация на протяжении ряда лет времяцифрового преобразователя БПВ-15 показывает его высокую надежность, простоту и удобство использования.

Послеимпульсы в ФЭУ – это импульсы, строго коррелированные с основным импульсом и отстающие от него на время от десятков наносекунд до десятков микросекунд. Это явление было открыто в 40-х годах XX века Г.А. Мортонем с сотрудниками. На сегодняшний день общепринято, что основным источником послеимпульсов является как ионизация атомов остаточного газа в вакуумном объеме фотодетекторов, так и поверхностная ионизация атомов и молекул, адсорбированных на поверхностях эмиттеров фотодетекторов. В основном, послеимпульсы распределены во временном интервале от ~100 нс до ~15-20 мкс после основного импульса. На рис. 11а показано типичное распределение времен задержки послеимпульсов для крупногабаритного фотоумножителя с полусферическим фотокатодом диаметром 20 см, ЕМІ9350КВ. Наблюдаемые пики в распределении обусловлены группами ионов различных масс. При временах задержки более 15-20 мкс распределение выходит на подложку случайных срабатываний от импульсов темнового тока фотоумножителя.

При исследовании послеимпульсов в вакуумных ФЭУ различного типа для использования в эксперименте LENA (здесь следует напомнить, что этот эксперимент планировалось разместить именно в экспериментальном комплексе СУРР в шахте Пихасалми) с помощью преобразователя БПВ-15 нами был обнаружен новый класс послеимпульсов с временами задержки от основного импуль-

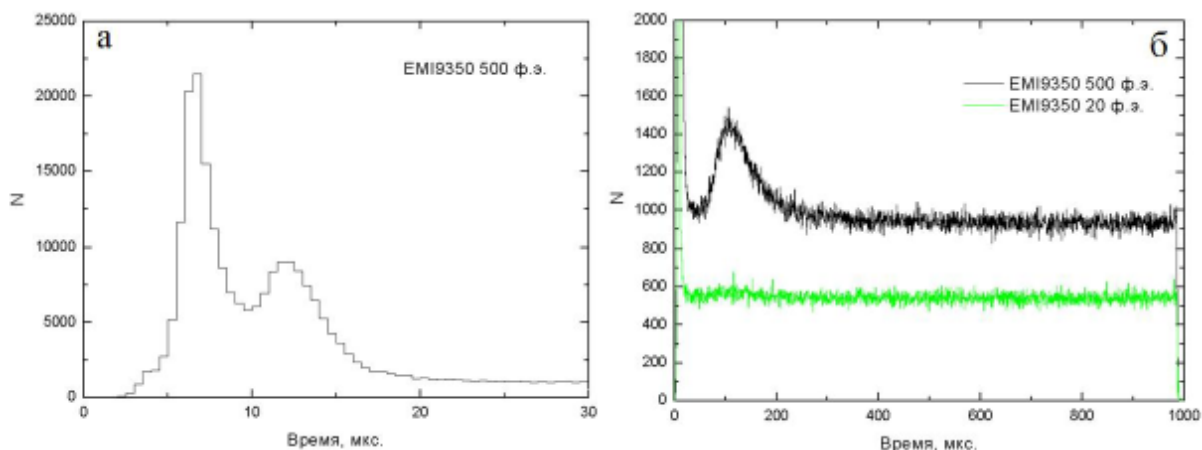


Рис. 11. Распределение времен задержек типичных послеимпульсов (а) и послеимпульсов с аномально большими временами задержки (б) для фотоумножителя ЕМІ9350КВ с фотокатодом размером 20 см в диаметре

са в диапазоне ~ 70 -200 мкс [8, 12]. На рис. 11б показано распределение времен задержек таких послеимпульсов, зарегистрированных в ФЭУ ЕМІ9350. Зарядовое распределение этих послеимпульсов носит сугубо однофотоэлектронный характер и их вероятность образования не превышает 0,1% на фотоэлектрон.

Следует отметить, что в настоящее время такие послеимпульсы обнаружены нами только в двух типах крупногабаритных ФЭУ (ЕМІ9350 и ХР1806) из большого числа исследованных ФЭУ различного типа. Существование такого класса послеимпульсов не объясняется общепринятыми на сегодняшний день моделями образования послеимпульсов в вакуумных ФЭУ. Поэтому необходимо дальнейшее тщательное изучение этого явления, поскольку, несмотря на малую вероятность образования, такие послеимпульсы могут накладывать ограничения на эксперименты по поиску редких событий, использующих временную информацию.

Световой выход и кинетика свечения сцинтилляционных кристаллов являются очень важными параметрами. Они играют практически определяющую роль, наряду с радиационной чистотой, при проектировании, создании и проведении экспериментов по поиску редких событий. Сцинтилляционный кристалл CaMoO_4 вызывает большой интерес со стороны физиков-экспериментаторов на протяжении ряда последних лет. Следует отметить, что кинетика сцинтилляционного свечения кристалла CaMoO_4 , имеет сложный многоэкспоненциальный характер с несколькими постоянными времени

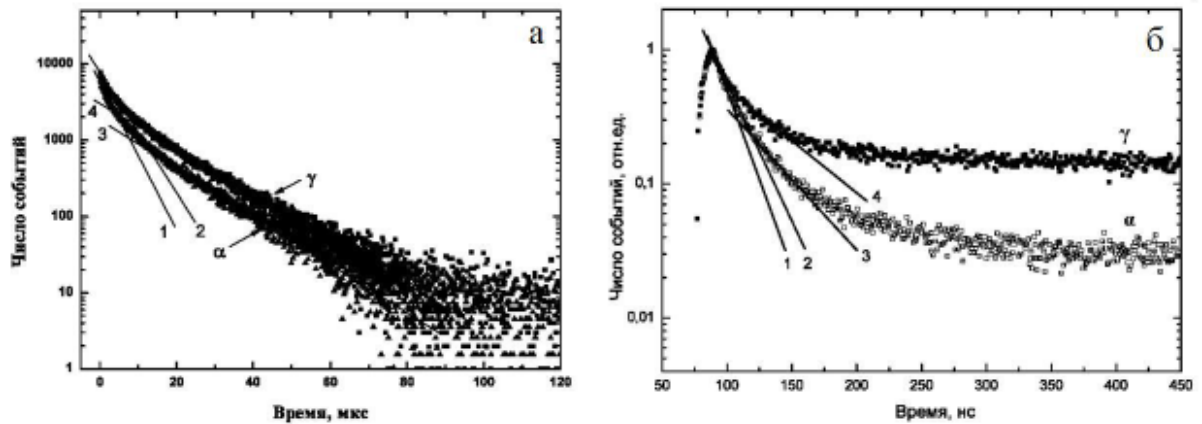


Рис. 12. а) Кинетика сцинтилляционного свечения кристалла CaMoO_4 при облучении α -частицами и γ -квантами в диапазоне $0 \div 120$ мкс. Фитирующие кривые 1 и 3 соответствуют медленным компонентам с $\tau_4 = 4,6$ мкс и $\tau_5 = 15,2$ мкс соответственно при облучении кристалла α -частицами с энергией $\sim 5,5$ МэВ от источника ^{238}Pu , а кривые 2 и 4 соответствуют медленным компонентам с $\tau_4 = 5,0$ мкс и $\tau_5 = 15,8$ мкс соответственно при облучении кристалла γ -частицами с энергией ~ 662 кэВ от источника ^{137}Cs ; б) Кинетика сцинтилляционного свечения кристалла CaMoO_4 при облучении α -частицами и γ -квантами в диапазоне $0 \div 450$ нс. Фитирующие кривые 1 и 3 соответствуют быстрым компонентам с $\tau_1 = 12$ нс и $\tau_2 = 36$ нс соответственно при облучении кристалла α -частицами с энергией $\sim 5,5$ МэВ от источника ^{238}Pu , а кривые 2 и 4 соответствуют быстрым компонентам с $\tau_4 = 15$ нс и $\tau_5 = 46$ нс соответственно при облучении кристалла γ -частицами с энергией ~ 662 кэВ от источника ^{137}Cs

высвечивания. Основные компоненты характеризуются постоянными времени высвечивания, лежащими в пределах $\sim 4\text{--}17$ мкс [2, 3].

Кинетика свечения кристаллов CaMoO_4 исследовалась с помощью измерительного стенда, который был специально разработан нами для этих целей. В этом стенде используется метод счета коррелированных во времени фотонов. На рис. 12а показана кинетика сцинтилляционного свечения кристалла CaMoO_4 при комнатной температуре при облучении α -частицами и γ -квантами в диапазоне $0 \div 120$ мкс. Как видно из этого рисунка, в световыход кристалла основной вклад вносят компоненты с $\tau \sim 1,4$ мкс ($A = 5,5\%$), $\sim 5,0$ мкс (29%) и $\sim 15,8$ мкс (65%) для γ -квантов и $\sim 1,0$ мкс (6%), 4,6 мкс (35%) и 15,2 мкс (58%) для α -частиц. В скобках приведены вклады соответствующих компонент в полный световыход кристалла. Вклад от фоновых событий, обусловленный темновым током фотоумножителя, в данных измерениях мал и не превышает 1-2%, однако, корректировка вклада фоновых событий все равно производилась. Кинетика высвечивания быстрых компонент сцинтилляций пред-

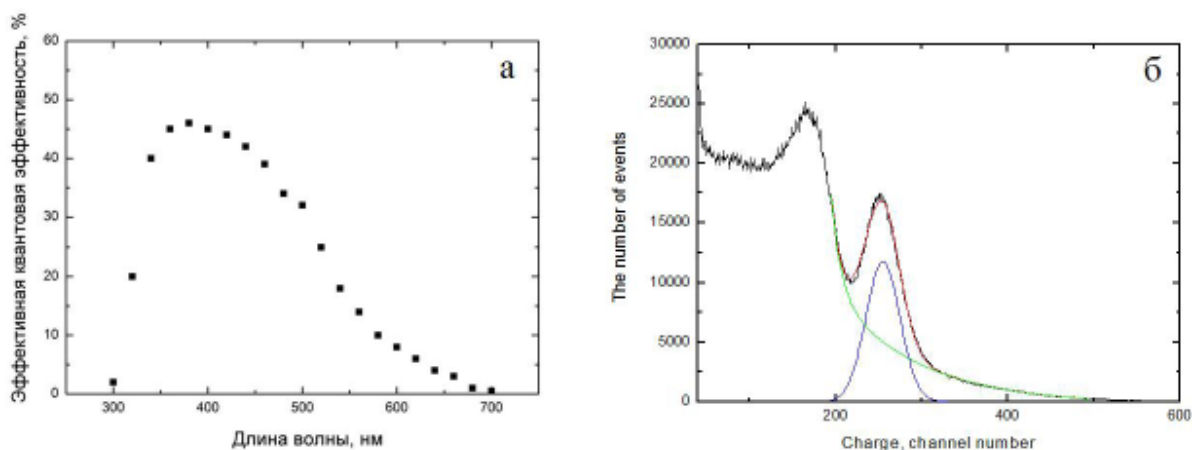


Рис. 13. а) Спектральная зависимость квантовой эффективности ФЭУ XP5302B; б) зарядовый спектр импульсов при облучении сцинтиллятора CaMoO_4 γ -квантами с энергиями 662 кэВ (Cs^{137})

ставлена на рис. 12б. Выделяются две компоненты с $\tau \sim 15$ нс и $\tau \sim 46$ нс для γ -квантов и $\tau \sim 12$ нс и $\tau \sim 36$ нс для α -частиц. По световыходу вклад этих компонент несущественен и не превышает $\sim 1\%$ от полного световыхода кристалла [3].

Измерение световыхода таких медленных кристаллов с малым световыходом сопряжено с некоторыми экспериментальными сложностями, так как постоянная времени высвечивания превышает ~ 10 мкс. Во-первых, сцинтилляционный импульс таких кристаллов представляет собой набор распределенных по сложному многоэкспоненциальному закону преимущественно однофотонных импульсов фотоумножителя, использующегося для регистрации сцинтилляционного импульса кристалла. Во-вторых, при работе с кристаллом CaMoO_4 является то, что спектр излучения этого кристалла имеет максимум при $\lambda_{\text{max}} = 540\text{-}560$ нм [5], причем значительная часть излучения кристалла лежит в оранжево-красной области спектра. Поэтому корректное измерение абсолютного световыхода кристалла CaMoO_4 представляет весьма непростую задачу. Особенно, если принять во внимание медленную кинетику сцинтилляционного свечения и небольшое значение световыхода.

Таким образом, важной задачей является выбор фотодетектора для проведения измерения световыхода данного кристалла. Для этой цели хорошо бы подходил фотоумножитель с мультищелочным фотокатодом, поскольку такие фотокатоды характеризуются широкими спектральными характеристиками, покрывающими большую

часть спектра излучения данного кристалла. Однако, нами был выбран фотоумножитель с высокой квантовой эффективностью (HQE PMT), так как чувствительность таких фотоумножителей в максимуме излучения кристаллов CaMoO_4 значительно превышает чувствительности фотоумножителей с мультищелочным фотокатодом. Конечно, хорошую чувствительность в нужной области спектра имеют кремниевые фотоумножители и pin-фотодиоды. К сожалению, в первом случае высокий уровень темнового тока ограничивает их применение, а во втором случае отсутствие внутреннего усиления становится препятствием для использования в измерениях с такими кристаллами.

В измерениях нами использовался фотоумножитель с фотокатодом с высоким квантовым выходом XP5301B или XP5302B производства фирмы Photonis SAS. Максимальная квантовая эффективность этих фотоумножителей достигается на длинах волн $\sim 360\text{-}380$ нм и превышает 40% [5], рис. 13а. Оценка световыхода данного кристалла в единицах фотон/МэВ производилась из анализа пика полного поглощения при облучении кристалла гамма-квантами с энергией 662 кэВ от радиоактивного источника ^{137}Cs . На рис. 13б представлен зарядовый спектр импульсов при облучении γ -квантами с энергиями 662 кэВ (^{137}Cs). Оценка величины световыхода кристалла CaMoO_4 составляет ~ 3000 фотонов/МэВ для γ -квантов при температуре $\sim 22^\circ\text{C}$.

Измерения отклика кристалла на γ -кванты и α -частицы позволяют определить параметр “ α/β -отношение”. Этот параметр равен $\alpha/\beta \sim 0,25$ (это значение получено с учетом различий в кинетике сцинтилляционного свечения для γ -квантов и α -частиц). Таким образом, световыход кристалла CaMoO_4 при комнатной температуре ($+22^\circ\text{C}$) в диапазоне длин волн 400-700 нм, составляет ~ 3000 фотонов/МэВ, а α/β -отношении равно $\sim 0,25$ [5]. Предложенные методы позволяют быстро и оперативно измерять основные параметры кристаллов (световыход и время высвечивания) даже в заводских условиях.

Модуль счета коррелированных во времени фотонов МСИ-1280 был разработан именно для измерения световыхода неорганических сцинтилляторов, подобных CaMoO_4 , т.е. кристаллов с медленной кинетикой свечения и малым световыходом. Учитывая характер сцинтилляционного импульса таких сцинтилляторов, когда

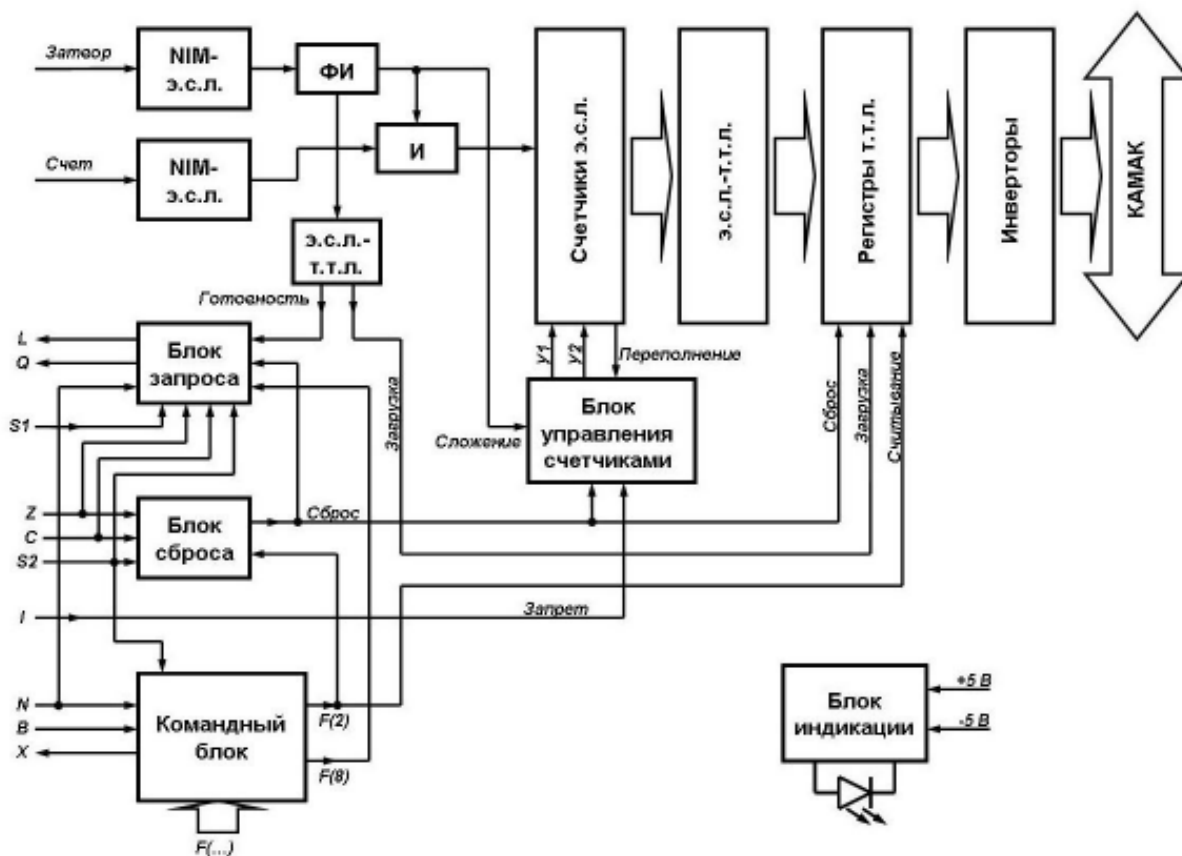


Рис. 14. Функциональная схема модуля счета коррелированных во времени фотонов МСИ-1280

сцинтилляционный импульс представляет последовательность преимущественно однофотоэлектронных импульсов в ФЭУ, регистрирующего сцинтилляционный импульс, вместо интегрирования сцинтилляционного импульса можно просто подсчитать количество зарегистрированных однофотоэлектронных импульсов ФЭУ. Такой подход существенно облегчит измерения световых выходов такого рода сцинтилляционных кристаллов.

Модуль обладает большим быстродействием и предназначен для счета импульсов в течение промежутка времени до 80 мкс. МСИ-1280 имеет 12 разрядов. МСИ-1280 выполнен в стандарте КАМАК и имеет два входа *Затвор* и *Счет*, а также светодиодный индикатор работы. Функциональная схема блока счета коррелированных во времени фотонов МСИ-1280 приведена на рис. 14. МСИ-1280 состоит из следующих блоков: двух преобразователей NIM-ЭСЛ, формирователя импульса *ФИ*, преобразователей ЭСЛ-ТТЛ и ТТЛ-ЭСЛ, блока запроса, блока сброса, командного блока, блока управления счетчиками, счетчиков, регистров, инверторов и бло-

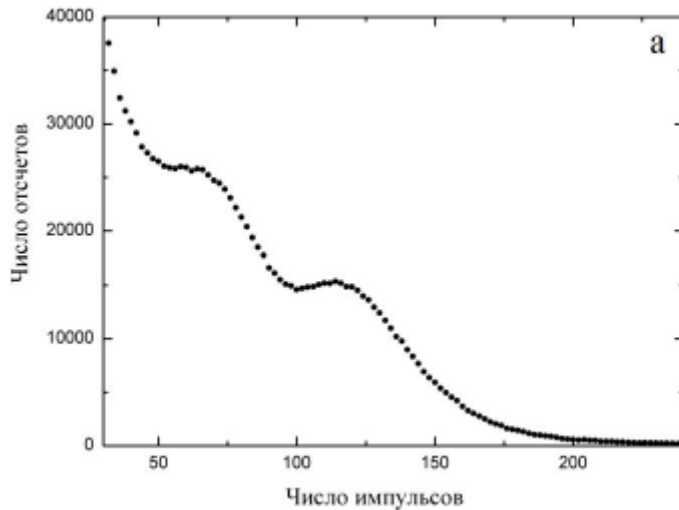


Рис. 15. а) Спектр отсчетов блока МСИ-120, полученный при облучении кристалла CaMoO_4 , измеренный при облучении кристалла γ -квантами с энергиями 662 кэВ от радиоактивного источника ^{137}Cs ; б) фотография времяцифрового преобразователя БПВ-15 (слева) и модуля счета коррелированных во времени фотонов МСИ-1280 (справа)

ка индикации. Модуль МСИ-1280 выполнен в стандарте КАМАК в блоке одиночной ширины.

На рис. 15а представлен спектр сцинтилляционных импульсов кристалла CaMoO_4 , измеренный при комнатной температуре с помощью модуля МСИ-1280, при облучении кристалла γ -квантами с энергиями 662 кэВ от радиоактивного источника ^{137}Cs . Сцинтилляционный свет регистрировался с помощью фотоумножителя с высокой квантовой эффективностью ХР5302В. Наблюдается пик полного поглощения с максимумом при ~ 118 импульсов. К сожалению, разрешение пика несколько хуже, чем при использовании традиционного метода измерений с помощью зарядочувствительных усилителей и амплитудно-цифровых преобразователей, см. рис. 13б. Это может объясняться просчетами системы, например, импульс с амплитудой, соответствующей нескольким фотоэлектронам, регистрируются данной системой как одиночный импульс. Просчеты можно было бы эффективно подавить добавлением в блок еще нескольких дискриминаторов для регистрации 2-х, 3-х и т.д. фотоэлектронных событий со своими счетчиками импульсов. При окончательном анализе данные со всех счетчиков будут соответствующим образом суммироваться. В последующих модификациях модуля счета импульсов следует добавить систему выделения

коррелированной последовательности (пачек) импульсов, т.е. автономной системы, регистрирующей сцинтилляционные импульсы кристаллов, подобных по своим параметрам кристаллу CaMoO_4 .

Разработанный модуль МСИ-1280 позволяет существенно облегчить и ускорить исследования параметров, отбор и тестирование сцинтилляционных кристаллов с относительно малыми световыходами и большими временами высвечивания, что весьма важно при разработке и создании детекторов для низкофоновых экспериментов, использующих такие сцинтилляторы. Следует отметить, что дальнейшие разработки модификаций данного модуля позволят значительно улучшить разрешение при гамма-спектрометрических измерениях с медленными сцинтилляторами с малым световыходом. На рис. 15б показаны времяцифровой преобразователь БПВ-15 (на фотографии слева) и модуль счета коррелированных во времени фотонов МСИ-1280 (на фотографии справа).

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Разработаны и созданы измерительные стенды для отбора, тестирования и изучения параметров твердотельных кремниевых фотоумножителей международного подземного эксперимента по изучению мюонов космических лучей ЕММА в Центре подземной физики Сурр в Пихасалми, Финляндия. Стенды успешно эксплуатируются на протяжении ряда лет в ИЯИ РАН и в экспериментальном комплексе Сурр, как в лаборатории на поверхности, так и в подземной лаборатории.

2. Разработаны методы отбора и классификации фотодетекторов подземного эксперимента по изучению мюонов космических лучей ЕММА в Центре подземной физики Сурр. Исследованы более 2000 кремниевых фотоумножителей сцинтилляционных детекторов эксперимента ЕММА.

3. Разработан времяцифровой преобразователь БПВ-15 с максимальным диапазоном измеряемых интервалов времени 276 мкс с шагом 67 нс для исследования послеимпульсов в фотодетекторах и кинетики сцинтилляционного свечения некоторых неорганических кристаллов.

4. Обнаружен новый класс послеимпульсов в классических вакуумных фотоэлектронных умножителях с временами задержки от основного сигнала ~ 120 мкс.

5. Разработаны методы измерения основных сцинтилляционных параметров кристаллов с временами высвечивания 10-20 мкс и световыходом на уровне 2000-3000 фотонов на МэВ, разрабатываемых для экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета распада ядер и темной материи. Разработан электронный модуль счета коррелированных во времени фотонов МСИ-1280 для исследования световыходов сцинтилляционных кристаллов с медленной кинетикой свечения и малым световыходом.

Список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации:

1. E.V. Akhrameev, L.B. Bezrukov, I.M. Dzaparova, I.Sh. Davitashvili, T. Enqvist, H. Fynbo, Zh.Sh. Guliev, L.V. Inzhechik, A.O. Izmaylov, J. Joutsenvaara, M.M. Khabibullin, A.N. Khotjantsev, Yu.G. Kudenko, P. Kuusiniemi, B.K. Lubsandorzhev, O.V. Mineev, L. Olanterä, V.B. Petkov, R.V. Poleshuk, T. Räihä, B.A.M. Shaibonov, J. Sarkamo, A.T. Shaykhiev, W. Trzaska, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, A.F. Yanin, N.V. Yershov. Multi-pixel Geiger-mode avalanche photodiode and wavelength-shifting fibre-optics readout of plastic scintillator counters for the EMMA underground experiment // Nuclear Instruments and Methods A. 2009. V.610. P.419.
2. А.В. Вересникова, И.Р. Барабанов, Б.К. Лубсандоржиев, Р.В. Полещук, Б.А.М. Шайбонов, Е.Э. Вятчин, В.Н. Корноухов. Исследование кинетики сцинтилляционного свечения кристалла CaMoO_4 // Приборы и техника эксперимента. 2009. N.1. С.41-45.
3. A.V. Veresnikova, B.K. Lubsandorzhev, I.R. Barabanov, P. Grabmayr, D. Greiner, J. Jochum, M. Knapp, C. Osswald, R.V. Poleshuk, F. Ritter, B.A.M. Shaibonov, Y.E. Vyatchin, G. Meierhofer. Fast Scintillation Light from CaMoO_4 crystals // Nuclear Instruments and Methods A. 2009. Vol.603. P.529-531.
4. V.I. Volchenko, E.V. Akhrameev, L.B. Bezrukov, I.M. Dzaparova, I.Sh. Davitashvili, T. Enqvist, H. Fynbo, Z.Sh. Guliev, L.V. Inzhechik, A.O. Izmaylov, J. Joutsenvaara, M.M. Khabibullin, A.N. Khotjantsev, Y.G. Kudenko, P. Kuusiniemi, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, O.V. Mineev, L. Olanterä, V.B. Petkov, R.V. Poleshuk, T. Räihä, B.A.M. Shaibonov, J. Sarkamo, A.T. Shaykhiev, W. Trzaska, G.V. Volchenko, A.F. Yanin, N.V. Yershov. Background and muon counting rates in underground muon measurements with a plastic scintillator counter based on a wavelength shifting fibre and a multi-pixel avalanche photodiode readout // Central European Journal of Physics. 8(3). 2010. P.425.

5. Васильев Р.В., Лубсандоржиев С.Б., Лубсандоржиев Б.К., Р.В.Полещук, Б.А.М.Шайбонов, P.Grabmayr, J.Jochum, Ch.Sailer, И.П.Барабанов, А.В.Вересникова. Измерение светового выхода сцинтилляционного кристалла CaMoO_4 // Приборы и техника эксперимента. 2010. N.6. С.24.
6. Р.В. Полещук, Б.К. Лубсандоржиев. Широкодиапазонный времяцифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. 2011. №4. С.53.
7. V.Volchenko, G.Volchenko, E.Akhrameev, L.Bezrukov, I.Dzaparova, T.Enqvist, L.Inzhechik, A.Izmaylov, J.Joutsenvaara, M.Khabibullin, A.Khotjantsev, Yu.Kudenko, P.Kuusiniemi, B.Lubsandorzhev, O.Mineev, V.Petkov, R.Poleshuk, B.Shaibonov, J.Sarkamo, A.Shaykhiev, W.Trzaska, A.Yanin, N.Yershov. The features of electronics structure of the multichannel scintillation module for the EMMA experiment // Astrophysics Space Science Transactions. 2011. V.7. P.171.
8. R.V.Poleshchuk, B.K.Lubsandorzhev, R.V.Vasiliev. An observation of a new class of afterpulses with delay time in the range of 70-200 μs in classical vacuum photomultipliers // Nuclear Instruments and Methods A. 2012. V.695. P.362-364.
9. B.K.Lubsandorzhev, R.V.Poleshuk, B.A.M.Shaibonov, Ye.E.Vyatchin. LED based powerful nanosecond light sources for calibration systems of deep underwater neutrino telescopes // Nuclear Instruments and Methods A. 2009. V. 602. P.220-223.
10. Р.В.Васильев, Е.Э.Вятчин, Б.К.Лубсандоржиев, Р.В.Полещук, Б.А.М.Шайбонов. Светодиодная калибровочная система Байкальского нейтринного телескопа НТ-200+ // Приборы и техника эксперимента. 2011. N.4. С.11-19.
11. L.B. Bezrukov, R. Falkenstein, V.M. Golovin, J. Jochum, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, R.V. Poleshuk, F. Ritter, Ch. Sailer, B.A. Shaibonov (Jr), K. von Sturm. Studies of Geiger-mode MRS APDs for muon veto scintillator detectors of cryogenic experiments // Proceedings of the 32nd ICRC. Beijing China. August 11-19, 2011. V.4. P.42. (ID-1054).
12. Б.К.Лубсандоржиев, Р.В.Полещук. Послеимпульсы в фотоэлектронных умножителях с временами задержки от основного импульса 100-120 мкс // Труды 52-й Научной конференции МФТИ. Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Часть VIII. Проблемы современной физики. – М.: МФТИ, 2009. С.125.
13. Р.В.Полещук, Б.К.Лубсандоржиев. Время-цифровой преобразователь БПВ-15 // Препринт ИЯИ РАН 2011. 17с.
14. Полещук Р.В., Лубсандоржиев Б.К., Лубсандоржиев С.Б. Электронный модуль счета коррелированных во времени фотонов // Препринт ИЯИ РАН 1390/2014. Сентябрь 2014. 11с.

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,7 Зак. № 22379 Тираж 100 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований

Российской академии наук

Издательский отдел

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