

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора ФТИ
им. А.Ф. Иоффе



_____ П.Н. Брунков
« 24 » декабре 2019 г.

М.П.

Отзыв

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук на работу Трофимова Юрия Алексеевича «Спектрометр научной аппаратуры ГРИС по исследованию с борта РС МКС рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

В диссертационной работе рассмотрены вопросы создания солнечного спектрометра ГРИС по измерению жесткого рентгеновского и гамма-излучения а так же высокоэнергичных нейтронов от солнечных вспышек.

Актуальность.

Солнечные вспышки являются наиболее яркими проявлениями солнечной активности. Их изучение важно для понимания фундаментальных процессов в магнитоактивной плазме – накопления энергии, ее взрывного перехода в энергию заряженных частиц, нагрева и макроскопических движений. Практическая ценность исследований связана с влиянием солнечной активности на космическую «погоду» в межпланетном пространстве, в том числе и в окрестностях Земли. Мощные солнечные вспышки могут приводить к магнитосферным бурям, оказывающим существенное негативное влияние на процессы в околоземном пространстве, в том числе на работу технических средств.

Рентгеновское и гамма- излучение непосредственно связано с процессом первичного энерговыделения во вспышке и ускорением заряженных частиц. Измерения в этом диапазоне проводятся со второй половины прошлого века. Несмотря на существенное продвижение как в наблюдениях, так и в теории проблема солнечных вспышек не решена и их изучение в настоящее время не менее актуально, чем и ранее.

Научная новизна

Проведенные экспериментальные исследования показали, что основной причиной нелинейности энергетической шкалы при регистрации квантов высоких энергий сцинтилляционными детекторами, использующими ФЭУ и кристаллы на основе $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (до энергий 12 МэВ) и на основе $\text{CsI}(\text{Tl})$ (до энергий 200 МэВ) является эффект объемного заряда на последних диодах, а не насыщение тока фотокатода.

При выборе типа детектора СКН применен комплексный подход, включающий в себя данные экспериментальных исследований, численного моделирования функционирования прибора на орбите и нацеленный на наиболее полную реализацию научных задач эксперимента ГРИС.

Достоверность результатов

Корректность методики проведения экспериментальных исследований и надежность полученных результатов подтверждается данными аналогичных исследований и характеристиками, приведенными в сопроводительной документации на сцинтилляционные кристаллы.

Достоверность модели фона в орбитальных условиях работы прибора ГРИС подтверждается тем, что, во-первых, модель фона была создана на основе разнообразных экспериментальных данных, в том числе полученных в подобных орбитальных условиях и, во-вторых, совпадением результатов моделирования фоновых спектров прибора Наталия-2М с полученными этим прибором на борту АУОС «КОРОНАС-ФОТОН» экспериментальными результатами.

Кроме того, результаты работы апробированы на различных конференциях и семинарах и прошли рецензирование при публикации в научных журналах.

Практическая ценность

На основе спутниковых экспериментальных данных создана модель фона в рентгеновском и гамма диапазонах на низких околоземных высотах. Исследованы причины нелинейности энергетических шкал сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{CsI}(\text{Tl})$ в области высоких энергий и подобраны схемы делителей напряжения ФЭУ, обеспечивающих минимальную нелинейность шкалы.

Произведен подбор оптимальных, в смысле энергетического разрешения, типов фотокатодов ФЭУ для кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, CeBr_3 и $\text{CsI}(\text{Tl})$.

Результаты работы используются в НИЯУ МИФИ для создания солнечного рентгеновского и гамма спектрометра ГРИС, а также могут быть использованы в

организациях, разрабатывающих аппаратуру для исследования рентгеновского и гамма излучения космического происхождения, и в организациях, использующих сцинтилляционные методы регистрации излучений, таких как ИКИ, ФТИ, ПИЯФ, Радиевый институт, ЦНИИ РТК и другие.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Содержит 160 страниц текста, 68 рисунков и 20 таблиц. Список цитируемой литературы включает 109 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность и цели исследования, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Также аргументируется достоверность результатов и приводится список статей по теме диссертации, опубликованных в реферируемых журналах и список докладов, представленных на научных конференциях.

В первой главе дан краткий обзор физических процессов, протекающих во время солнечных вспышек, приведен характерный спектр рентгеновского и гамма излучения вспышки с указанием процессов, ответственных за его формирование. При этом обращено особое внимание на параметры, которые могут быть определены из наблюдений с помощью спектрометра ГРИС (анизотропия нетепловых электронов, вид спектра ускоренных ионов, отношение ускоренных альфа частиц и протонов и т.д.). Приведен также обзор экспериментов, проводившихся ранее, проводимых в настоящий момент и планируемых в будущем в этой области спектра электромагнитного излучения.

Во второй главе диссертант подчеркивает научные цели эксперимента: исследование физических механизмов ускорения электронов и ионов на различных фазах солнечных вспышек, элементного состава, физических характеристик солнечной плазмы в области генерации рентгеновского и гамма- излучения. Особенностью эксперимента ГРИС являются одновременные измерения в широком диапазоне энергий 0.02 – 200 МэВ.

Исходя из научных задач, диссертант формулирует требования к аппаратуре, описывает метод построения спектрометра ГРИС и описывает метод выбора типа детектора для спектрометрического канала низких энергий (СКН), предлагая 3 критерия. Для этого канала предлагается использовать детектор на основе неорганических сцинтилляторов нового поколения $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ или CeBr_3 с высоким энергетическим разрешением (3-4%) и малым временем высвечивания (20нс). Для спектрометрического канала высоких энергий (СКВ) оптимальным решением является использование сцинтиллятора $\text{CsI}(\text{Tl})$.

В третьей главе описана методика проведения экспериментов, приводятся полученные результаты и проведен их анализ. Исследования проводились с целью улучшения энергетического разрешения и уменьшения нелинейности энергетической шкалы детекторов. Проведены исследования работы кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, CeBr_3 и $\text{CsI}(\text{Tl})$ в сочетании с тремя ФЭУ, имеющими различный тип фотокатода. Показано, что во всем диапазоне детекторов энергетическое разрешение описывается с помощью двух компонент: статистического и константного членов. Последний особенно существенен для высокоэнергичной области. Экспериментально исследована и интерпретирована зависимость этих компонент от параметров кристаллов и ФЭУ. Для прототипа детектора СКВ также подобрано оптимальное светоотражающее покрытие и показано отсутствие существенного ухудшения энергетического разрешения при установке между кристаллом и ФЭУ дополнительного полистирольного сцинтиллятора (который запланирован в конструкции аппаратуры при реализации защиты от фона с помощью АСЗ).

Дан обзор причин возникновения нелинейности энергетической шкалы сцинтилляционных детекторов при регистрации квантов высокой энергии и методов борьбы с этим явлением. Проведенные автором исследования показали, что основной причиной нелинейности для прототипов детекторов ГРИС является эффект объемного заряда между диодами. Для уменьшения нелинейности энергетической шкалы было предложено и исследовано применение клиновидных схем делителей ФЭУ. По результатам проведенных экспериментальных исследований были выработаны рекомендации по выбору типов ФЭУ и их делителей для детекторов СКН и СКВ прибора ГРИС, оптимальных в смысле энергетического разрешения и нелинейности энергетической шкалы.

В четвертой главе приведены результаты расчетных оценок ожидаемого фона в детекторах прибора ГРИС при его работе на орбите, отклика прибора на излучение вспышек и его чувствительности к гамма-линиям. Корректная оценка фона является необходимой задачей при разработке и планировании космического эксперимента, так как дает возможность правильно оценить реальные возможности аппаратуры при проведении эксперимента и при необходимости принять меры для достижения требуемых параметров. Оценка фона производилась диссертантом путем моделирования с использованием программного пакета Geant4. При создании модели фонового космического излучения были учтены все основные источники фона в тех орбитальных условиях, в которых предполагается работа прибора. Для определения конкретных параметров отдельных источников фона были привлечены результаты многочисленных космических экспериментов, в том числе проведенных в схожих орбитальных условиях.

Проверка предложенного метода расчета фона проводилась на основе данных прибора Наталья-2М, работавшего на КА «КОРОНАС-ФОТОН», при этом было получено согласие расчетных и экспериментальных данных. В результате была получена оценка фона в детекторах прибора ГРИС в экваториальной зоне и его широтный ход. Также приводятся результаты расчета отклика детекторов прибора ГРИС на излучение солнечных вспышек различной мощности и оценки чувствительности детекторов к непрерывному излучению, гамма линиям и пионной компоненте при проведении измерений в реальных условиях.

Результаты моделирования показали низкую эффективность защиты от фона с помощью системы антисовпадений (АСЗ) для энергий ниже 10-15 МэВ, в то время как для более высоких энергий ее эффективность высока. Это позволило упростить конструкцию и отказаться от АСЗ для СКН.

В пятой главе приводятся основные результаты, полученные при экспериментальных исследованиях прототипов детекторов прибора ГРИС и численного моделирования работы прибора на орбите, даны конкретные рекомендации необходимые для разработки аппаратуры, в частности делается выбор в пользу кристалла CeBr_3 в качестве детектора СКН. Результаты численного моделирования позволили определить оптимальные значения энергетических порогов спектрометра ГРИС: для СКН – 20кэВ, для СКВ -100 кэВ.

Замечания.

1. Учитывая высокие требования, предъявляемые разработчиками к достоверности энергетической шкалы прибора (например, для определения красных смещений гамма линий), представляет интерес зависимость параметров прибора (нелинейность энергетической шкалы, энергетическое разрешение) от общей загрузки детекторов. Экспериментальные данные отражающие эти зависимости вероятно можно извлечь из проведенных экспериментов, но они не отражены в диссертационной работе.

2. Исследования нелинейности энергетической шкалы прототипа детектора СКН проводились только на кристалле $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Интересно было бы проверить основные результаты и на прототипе, использующем CeBr_3 .

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В целом диссертационная работа представляет законченный научный труд и полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (ред. от 01.10.2018), а ее автор Трофимов Юрий Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составил:

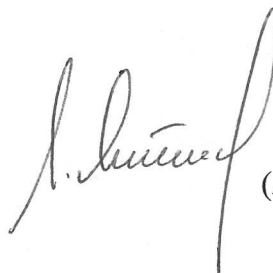
старший научный сотрудник
лаборатории Космических лучей
кандидат физико-математических наук
т. (812) 2927904
e-mail: Mikhail.Savchenko@mail.ioffe.ru



(М.И. Савченко)

Отзыв утвержден на семинаре лаборатории Космических лучей « 17» «декабря» 2019 года, протокол № 4.

Зав. лаб. Космических лучей,
доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН



(А.В. Степанов)

Список основных публикаций сотрудников ФТИ им. А.Ф. Иоффе в
рецензируемых научных журналах по теме диссертации:

1. Р.Л. Аптекарь, А.М. Быков, С.В. Голенецкий, Д.Д. Фредерикс, Д.С. Свинкин, М.В. Уланов, А.Е. Цветкова, А.В. Козлова, А.Л. Лысенко Космические гамма-всплески и мягкие гамма-репитеры — наблюдения и моделирование экстремальных астрофизических процессов (К 100-летию Физико-технического института им.А.Ф.Иоффе РАН), 2019, УФН, т.189, 8 страницы: 785-802
2. A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii, A. Lysenko, P. Oleynik, V Pal'shin, D Svinkin, M Ulanov, T. Cline, K. Hurley, R. Aptekar, The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode, 2017, *Astrophys. J.*, v.850, 2, p. 161
3. D.S. Svinkin, D.D. Frederiks, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, V.D. Pal'shin, P.P. Oleynik, A.E. Tsvetkova, M.V. Ulanov, T.L. Cline, K. Hurley The Second Konus-Wind Catalog of Short Gamma-Ray Bursts, 2016, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, v.224, 1, p.10
4. Г.Г. Моторина, И.В. Кудрявцев, В.П. Лазутков, М.И. Савченко, ДВ Скородумов, Ю.Е. Чариков, Реконструкция энергетического спектра электронов, ускоренных во время солнечной вспышки 15 апреля 2002 г., на основе измерений рентгеновским спектрометром ИРИС, 2016, *ЖТФ*, т.86, 4 страницы: 47-52
5. А.М. Быков, Ф.А. Агаронян, А.М. Красильщиков, Е.Е. Холупенко, Н.Н. Аруев, Д.А. Байко, А.А. Богданов, Г.И. Васильев, В.В. Забродский, С.В. Троицкий, Ю.В. Тубольцев, А.А. Кожберов, К.П. Левенфиш, Ю.В. Чичагов Черенковские гамма-телескопы: прошлое, настоящее, будущее. Проект ALEGRO, 2017, *ЖТФ*, т.87, 6 страницы: 803-821
6. Y.E. Charikov, A.N. Shabalin Hard X-ray generation in the turbulent plasma of solar flares, 2016, *Geomagn. Aeron.*, v.56, 8 страницы: 1068-1074