

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИНАСАН

Член-корреспондент РАН

Дмитрий Валерьевич Бисикало



2017 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации

Федерального государственного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) на диссертацию «Разработка новых методов и создание научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах», представленную Топчиевым Николаем Петровичем на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы.

Диссертация Топчиева Николая Петровича посвящена исследованию и разработкам новых методов создания научной аппаратуры, позволяющей проводить измерения первичного гамма-излучения с высокими угловым и энергетическим разрешениями при астрофизических исследованиях дискретных источников, диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от солнечных вспышек, гамма-излучения при аннигиляции или распаде частиц «темной материи» в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий на космических аппаратах. Актуальность работы обусловлена необходимостью проведения активных наблюдений во всех диапазонах электромагнитного спектра – от низкочастотного радиоизлучения до гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий. Многие из указанных диапазонов успешно осваиваются с помощью внеатмосферных средств: высотных аэростатов, спутников, космических станций, обсерваторий и т.п. Лишь наблюдения во всех диапазонах длин волн позволяют реализовать комплексный подход в исследованиях астрофизических объектов, например, исследования нашей Галактики, Крабовидной туманности, Солнца и многих других объектов, проведенные с помощью радиоастрономического,

оптического, инфракрасного, рентгеновского и гамма-астрономического методов наблюдения.

Поэтому тема диссертационной работы Топчиева Н.П. представляется актуальной и важной.

Научная новизна.

Предложенные в диссертации методы создания научной аппаратуры – гамма-телескопа нового поколения с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований на космических аппаратах гамма-излучения от дискретных источников, диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от солнечных вспышек, гамма-излучения при аннигиляции или распаде частиц «темной материи» в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий обладают несомненной новизной. Особо выделяется, что при регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ будет достигнуто угловое и энергетическое разрешения гамма-телескопа ($\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$, соответственно), существенно превышающие характеристики зарубежных космических и наземных гамма-телескопов.

Практическая значимость.

Практическая значимость заключается в разработке и реализации новых методов создания научной аппаратуры для проведения на космических аппаратах астрофизических исследований высокоэнергичного гамма-излучения. В гамма-телескопе ГАММА-400, который предназначен для исследования космического гамма-излучения в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий на высокоапогейной орбите, позволяющей проводить длительные (до 100 суток) непрерывные наблюдения, получены уникальные характеристики (угловое и энергетическое разрешения составляют $\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$ при регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ). Полученные характеристики превышают характеристики зарубежных космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз.

Результаты наблюдений гамма-телескопа ГАММА-400 будут востребованы при идентификации многих дискретных гамма-источников, анализе физических условий в этих объектах, изучении свойств межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), исследованиях физических

процессах, происходящих на Солнце во время вспышек, а также для определения природы «темной материи» во Вселенной, развития теории происхождения и ускорения космических лучей, физики элементарных частиц

Достоверность.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается результатами многочисленными расчетами и экспериментами, в том числе при разработке и во время эксперимента ГАММА-1.

Структура и результаты работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем работы - 243 страницы, включая 98 рисунков, 17 таблиц. Список литературы состоит из 174 наименований.

Во Введении раскрывается актуальность проблемы, цель работы, научная новизна, научная и практическая значимость, полученных результатов, достоверность полученных результатов, апробация работы, публикации и личный вклад автора.

В Главе 1 проводится анализ актуальных научных задач, решаемых методами гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий по исследованию гамма-излучения от дискретных источников в космических и наземных экспериментах, исследованию диффузного гамма-излучения в космических и наземных экспериментах, исследованию высокоэнергичного гамма - излучения от Солнца, исследованию природы «темной материи», которые позволят получить уникальную информацию: о физических условиях в дискретных астрофизических объектах: активных звездах, остатках сверхновых (пульсарах), двойных звездах, черных дырах, микрокварах, галактиках с активными ядрами, в которых происходит генерация и ускорение частиц (электронов, позитронов, протонов, ядер); о свойствах межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), в котором происходит распространение и взаимодействие высокоэнергичных космических заряженных частиц, в результате которого появляется высокоэнергичное диффузное гамма-излучение; о физических процессах, происходящих на Солнце во время вспышек; о природе «темной материи», распределении плотности «темной материи» в Галактике и

Вселенной, аннигиляции и распаде гипотетических частиц, составляющих «темную материю».

Проведенные и проводимые в настоящее время исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических ($E_\gamma = \sim 100 \text{ МэВ} - \gtrsim 300 \text{ ГэВ}$), так в наземных ($E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ГэВ}$) экспериментах выявили, что как в космических, так и в наземных наблюдениях требуются дополнительные измерения с улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

Несмотря на многочисленные исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических, так и в наземных экспериментах, необходимы новые экспериментальные данные, которые должны быть получены с использованием гамма-телескопов, установленных на космических аппаратах и обладающих значительно лучшими угловым и энергетическим разрешениями, способными проводить длительные непрерывные наблюдения, в связи с тем, что многие источники гамма-излучения являются переменными. Особенно важным является исследование гамма-излучения на космическом аппарате одним гамма-телескопом в диапазоне энергий от $\sim \text{ГэВ}$ до $\sim \text{ТэВ}$.

Поставлена задача необходимости разработки новой космической научной аппаратуры, которая должна обеспечить регистрацию одним гамма-телескопом высокоэнергичного гамма-излучения в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ и будет иметь значительно лучшие характеристики: угловое разрешение $< 0,05^\circ$ при $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$ и энергетическое разрешение $< 2\%$ при $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$.

В Главе 2 проводится анализ существующих методов регистрации гамма-излучения в космических экспериментах: OSO-3, Космос-208, АННА-3, OGO-5, SAS-2, COS-B, ГАММА-1, COMPTEL, EGRET, AGILE, Fermi-LAT, CALET, DAMPE.

Будущие космические гамма-телескопы для решения актуальных астрофизических задач должны проводить непрерывные, длительные измерения для получения хорошей статистики и для измерения вариаций светимости одновременно во всем диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ, иметь большую чувствительную площадь ($0,5\text{-}1 \text{ м}^2$), высокое угловое ($< 0,05^\circ$ при $E_\gamma = 100$

ГэВ) и энергетическое ($< 2\%$ при $E_\gamma = 100$ ГэВ) разрешения, определен состав такого гамма-телескопа.

В Главе 3 рассматриваются новые методы регистрации гамма-квантов и создание научной аппаратуры в эксперименте ГАММА-1 и проводится анализ полученных результатов. Основным методом регистрации гамма-квантов в эксперименте ГАММА-1 с гамма-телескопом нового типа было использование комбинации детекторов.

Применение широкозачереночных камер в ГАММА-1 позволило улучшить угловое разрешение почти в 2 раза по сравнению с телескопами SAS-2 и COS-B, в которых использовались узкозачереночные камеры, и достичь 2 град. при энергии фотонов 100 МэВ и 1,2 град. при энергии 300 МэВ. Применение ионизационного калориметра площадью 60×60 см² толщиной 7,4 р.е.д. позволило получить энергетическое разрешение 55% при энергии 100 МэВ и 34% при энергии 550 МэВ.

Было уделено существенное внимание методам выделения гамма-квантов на значительном фоне заряженных частиц путем использования комбинации высокоэффективной антисовпадательной системы, времяпролетной системы и газового черенковского счетчика.

Представлено сравнение характеристик SAS-2, COS-B и ГАММА-1. Приведены научные результаты эксперимента ГАММА-1. Наблюдалось гамма-излучение от источников: пульсара PSR 0833-45 (Vela), пульсара Geminga, двойной системы Cyg X-3, двойной системы Hercules X-1. В 1991г. в период максимума солнечной активности ГАММА-1 впервые зарегистрировал высокоэнергичное (до нескольких ГэВ) гамма-излучения от Солнца во время мощных вспышек 26 марта (класс 3В/X4,7) и 15 июня (класс 3В/X12+) 1991 г.

В Главе 4 рассматриваются разработка новых методов и создание научной аппаратуры с уникальными характеристиками для астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах. На основе анализа актуальных астрофизических задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и анализа существующих методов регистрации гамма-излучения в космических экспериментах, в том числе эксперимента ГАММА-1, были разработаны и реализованы методы создания гамма-телескопа ГАММА-400 с уникальными

характеристиками для проведения астрофизических исследований космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий.

В результате разработан гамма-телескоп нового поколения ГАММА-400, способный проводить длительные непрерывные наблюдения гамма-источников на высокоэллиптической орбите космической обсерватории с начальными параметрами: апогей 300 000 км, апогей 500 км, наклонение $51,4^\circ$, при которой поле зрения гамма-телескопа не затеняется Землей и космический аппарат находится, в основном, вне радиационных поясов Земли.

Определен состав гамма-телескоп ГАММА-400.

Уникальные характеристики ГАММА-400 (при $E_\gamma = 100$ ГэВ угловое и энергетическое разрешения $\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$, соответственно) в 5-10 раз превосходят характеристики космического гамма-телескопа Fermi-LAT и существующих наземных гамма-телескопов H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, HAWC, а также проектируемого СТА. При непрерывном длительном (до 100 суток) наблюдении областей небесной сферы, например, центра Галактики, пузырей Ферми и др., позволят гамма-телескопу ГАММА-400, имеющему поле зрения $\pm 45^\circ$, значительно продвинуться в проведении прецизионного исследования дискретных источников гамма-излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного гамма-излучения, выделения потоков гамма-излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи. На космической обсерватории наряду с гамма-телескопом устанавливается рентгеновский телескоп. Одновременные наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах центра Галактики, пузырей Ферми и т.п. значительно улучшат наше понимание процессов, происходящих в астрофизических объектах.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В целом, диссертация Топчиева Н.П. представляет завершённое научное исследование в актуальной области астрономии. Достоверность результатов не вызывает сомнений, поскольку правильность выбранных подходов подтверждается тем, что полученные теоретические и численные результаты согласуются с результатами проведённых экспериментов, в том числе эксперимента ГАММА-1.

Несомненно, что в диссертации получены новые научные результаты, основные из которых состоят в следующем:

1. Проведенный анализ современного состояния исследования дискретных источников, диффузного излучения и природы темной материи методами высокоэнергичной гамма-астрономии как в космических ($E_\gamma = \sim 100 \text{ МэВ} - \gtrsim 300 \text{ ТэВ}$), так и в наземных ($E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ТэВ}$) экспериментах показал необходимость:

- непрерывных длительных измерений для получения хорошей статистики и изучения переменности астрофизических объектов;

- повторных измерений в связи с переменностью многих астрофизических объектов;

- расширения энергетического диапазона в сторону больших энергий (до нескольких ТэВ) для исследования пограничного диапазона энергий между космическими и наземными гамма-телескопами (в районе 100 ТэВ);

- улучшения энергетического разрешения научной аппаратуры для повышения точности измерений и разрешения гамма-линий при аннигиляции или распаде частиц «темной материи»;

- улучшения углового разрешения научной аппаратуры для идентификации астрофизических объектов и изучения структуры протяженных источников;

- создания гамма-телескопа нового поколения с большой площадью и улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

2. Проведенный анализ существующих методов регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах и требований к научной аппаратуре показал, что для решения актуальных астрофизических задач методами высокоэнергичной гамма-астрономии необходима научная аппаратура нового поколения, которая должна иметь:

- большую чувствительную площадь $\sim 1 \text{ м}^2$;

- широкий энергетический диапазон от $\sim 100 \text{ МэВ}$ и до нескольких ТэВ;

- высокое энергетическое разрешение $< 2\%$ при энергии гамма-квантов 100 ТэВ;

- высокое угловое разрешение $< 0,05$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- эффективную систему выделения гамма-квантов на фоне заряженных частиц;
- эффективную систему исключения из регистрации частиц «обратного тока»;
- возможность одновременно с наблюдением гамма-излучения регистрировать электроны и позитроны космического излучения.

3. По результатам разработки новых методов, создания и проведения наблюдений на гамма-телескопе ГАММА-1, разработан гамма-телескоп ГАММА-400, в котором реализованы новые методы создания научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий с уникальными характеристиками, превышающими характеристики космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз, и определен его состав.

Замечания и недостатки работы.

Наряду с вышеперечисленными несомненными достоинствами на наш взгляд рецензируемая работа имеет следующие недостатки:

Раздел 4.6 «Расчеты физических характеристик гамма-телескопа ГАММА-400» принадлежит к числу наиболее актуальных разделов диссертации. Указано, что модельные расчеты физических характеристик гамма-телескопа ГАММА-400 были проведены с использованием пакета программ «GEANT4». К сожалению, ни описания программы, ни необходимых ссылок текст диссертации не содержит.

Отметим также, что раздел 4.6 «Расчеты физических характеристик гамма-телескопа ГАММА-400», посвященный основным результатам, полученным в диссертации по расчетам светосилы, эффективной площади, величины минимального потока гамма-квантов и наиболее важных оценок энергетического и углового разрешения, не содержит ни одной ссылки на литературный источник. Отсутствуют указания, где и как верифицировались предложенные численные методы.

Имеется умеренное число опечаток и неточностей, неудачных формулировок, так например, стр. 54 и стр. 69 (и аналогично стр. 17 автореферата «...была зарегистрировано гамма-телескопом..»

Стр. 32 «... другая первая в мире...»

Стр. 42 «... так и для понимания межзвездной среды...»

Однако, указанные недостатки работы не снижают ценности полученных результатов.

Заключение.

Диссертация Н.П. Топчиева посвящена актуальным проблемам исследования и разработки новых методов создания научной аппаратуры, позволяющих проводить измерения гамма-излучения с высокими угловым и энергетическим разрешениями. Основные результаты, выносимые на защиту, являются важными и новыми.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в ИКИ РАН, ИПМ РАН, ГАИШ МГУ, СПбГУ и других организациях, занимающихся гамма-астрономией и космическими исследованиями. Результаты в достаточной мере опубликованы в ведущих российских и зарубежных астрономических журналах (в том числе из списка ВАК) и представлены на российских и международных конференциях.

Диссертация Н.П. Топчиева представляет собой полное и законченное исследование с важными и востребованными результатами. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации, научные результаты диссертации опубликованы в статьях автора в рецензируемых научных изданиях. Следует заключить, что диссертация «Разработка новых методов и создание научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к докторским диссертациям), а ее автор Николай Петрович Топчиев заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Доклад Н.П. Топчиева заслушан и обсужден на заседании семинара ИНАСАН 07 сентября 2017 года. Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником ИНАСАН доктором физико-математических наук Савановым И.С.

Составитель отзыва

ведущий научный сотрудник ИНАСАН

доктор физико-математических наук

Игорь Спартакович Саванов

Адрес: 119017, Москва, ул. Пятницкая, 48

Тел. (495) 951-12-79

Е-mail: isavanov@inasan.ru



И.С. Саванов

Заместитель директора ИНАСАН

доктор физико-математических наук

Михаил Евгеньевич Сачков

Тел. (495) 951-12-79

Е-mail: msachkov@inasan.ru



М.Е. Сачков

Список основных работ ИНАСАН по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)

1. Dmitrienko, E.S. Savanov, I.S., Spots and the activity of M dwarfs from observations with the Kepler Space Telescope. ASTRONOMY REPORTS, 2017, Том: 61, Выпуск: 2, Стр.: 122-129
2. Zasov, A.V., Saburova, A.S., Khoperskov, A.V., Khoperskov, S.A., Dark matter in galaxies. PHYSICS-USPEKHI, 2017, Том: 60 Выпуск: 1 Стр.: 3-44
3. Kilpio, E.Yu., Mironov, A.V., Malkov, O.Yu. ON THE ASTRON UV SPACE MISSION DATA. BALTIC ASTRONOMY, 2016, Том: 25, Выпуск: 1, Стр.: 23-30
4. Boyarchuk, A.A., Shustov, B.M., Savanov, I.S., Sachkov, M.E., Bisikalo, D.V. et al., Scientific problems addressed by the Spektr-UV space project (world space Observatory-Ultraviolet). ASTRONOMY REPORTS, 2016, Том: 60, Выпуск: 1, Стр.: 1-42
5. Podgorny, I.M., Podgorny, A.I. Acceleration and propagation of solar cosmic rays, GEOMAGNETISM AND AERONOMY, 2015, Том: 55, Выпуск: 8, Стр.: 1159-1164
6. Churazov, E., Sunyaev, R., Isern, J., Bikmaev, I., Bravo, E., Chugai, N., Grebenev, S. et al. GAMMA RAYS FROM TYPE Ia SUPERNOVA SN 2014J, ASTROPHYSICAL JOURNAL, 2015, Том: 812, Выпуск: 1, Номер статьи: 62
7. Podgorny, A.I., Podgorny, I.M. Acceleration of solar cosmic rays in a flare current sheet and their propagation in interplanetary space, ASTRONOMY REPORTS, 2015, Том: 59, Выпуск: 9, Стр.: 888-897
8. Shustov, B.M., Sachkov, M.E. Science issues of the "Spektr-UF" project, SOLAR SYSTEM RESEARCH, 2014, Том: 48, Выпуск: 7, Стр.: 467-474
9. Shustov, Boris, de Castro, Ana I. Gomez, Sachkov, Mikhail, et al. WSO-UV progress and expectations, ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE, 2014, Том: 354, Выпуск: 1, Стр.: 155-161
10. Boyarchuk, Alexander, Savanov, Igor, Kanev, Evgeny, Shustov, Boris, Sachkov, Mikhail. The Soviet ASTRON mission: legacy, ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE, 2014, Том: 354, Выпуск: 1, Стр.: 247-250