

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Топчиева Николая Петровича

«Разработка новых методов и создание научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

В диссертационной работе Н.П. Топчиева представлены результаты по разработке новых методов и созданию научной аппаратуры – гамма-телескопа нового поколения с отменными характеристиками для проведения различных астрофизических исследований с гамма-излучением. Так как гамма-излучение почти полностью поглощается в верхних слоях атмосферы Земли, то прямые наблюдения гамма-излучения осуществляются за пределами атмосферы на орбитальных станциях или космических аппаратах. Это исследования дискретных источников, диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от солнечных вспышек, гамма-излучения при аннигиляции или распаде частиц «темной материи». Диапазон энергий составляет: высоких - $E_\gamma \geq 100$ МэВ и сверхвысоких - $E_\gamma \geq 100$ ГэВ. Научная проблематика диссертационной работы Н.П. Топчиева является, несомненно, **актуальной и важной**.

Необходимо отметить, что при регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ достигнуто угловое и энергетическое разрешения гамма-телескопа ($\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$, соответственно), существенно превышающие характеристики зарубежных космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз. В этом **научная новизна** диссертации.

Результаты диссертационной работы изложены на 243 страницах. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы из 174 наименований. Работа включает 98 рисунков и 17 таблиц.

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.

Делается вывод, что, 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.

В **Главе 2** проводится анализ существующих методов регистрации гамма-излучения в различных космических экспериментах. Делается вывод, что для решения актуальных астрофизических задач должны проводиться непрерывные, длительные измерения для получения хорошей статистики и для измерения вариаций светимости одновременно во всем диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ.

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: широкозасорной искровой камеры, сцинтилляционной времяпролетной системы с большой пролетной базой, газового черенковского счетчика большой площади, сцинтилляционной системы для анти-совпадений. Использование этих систем позволило существенно улучшить характеристики гамма-телескопа ГАММА-1 по сравнению с предыдущими экспериментами на спутниках, особенно угловое разрешение почти в два раза. Стоит отметить, что детекторы при решающем участии диссертанта были изготовлены в 80-х годах прошлого века, а полет телескопа ГАММА-1 состоялся в 1990-1992 годах.

Приведены научные результаты эксперимента ГАММА-1. Наблюдалось гамма-излучение от различных источников: двух пульсаров и др. В 1991 г. в период максимума солнечной активности эксперимент ГАММА-1 впервые зарегистрировал высокоэнергичное (до нескольких ТэВ) гамма-излучение от Солнца во время мощных вспышек.

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.

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. Гамма-телескоп ГАММА-400 готовится к полёту в космос (ориентировочно в 2025 году).

Уникальные характеристики телескопа ГАММА-400 в ограниченном пространстве внутри спутника (при $E_\gamma = 100$ ТэВ угловое и энергетическое разрешения $\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$, соответственно) в 5-10 раз превосходят характеристики лучших зарубежных космических

телескопов и существующих наземных гамма-телескопов. 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.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В целом, диссертационная работа 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 проведенных экспериментов, в том числе эксперимента ГАММА-1.

В диссертационной работе Топчиева Н.П. получены новые научные результаты, основные из которых:

1. 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 нескольких десятков МэВ и до нескольких ТэВ;
- высокое энергетическое разрешение $< 2\%$ при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- 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.

2. По результатам разработки новых методов, создания и проведения наблюдений на гамма-телескопе ГАММА-1 разработан гамма-телескоп ГАММА-400. В нём реализованы новые методы создания научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований в диапазоне высоких и сверхвысоких энергий с уникальными характеристиками, превышающими характеристики космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз и который обладает:

- высокочувствительной координатной системой, позволяющей регистрировать гамма-кванты с высокой точностью и получать угловое разрешение $\sim 0,01$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- высокоэффективным координатно-чувствительным калориметром, позволяющим регистрировать гамма-кванты в диапазоне от ~ 100 МэВ до ~ 1000 ГэВ с энергетическим разрешением $\sim 1\%$ при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокоэффективными системами анти-совпадений и времени пролёта, способными выделять гамма-кванты на фоне заряженных частиц;
- высокоэффективной системой для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающих при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ;
- высокоэффективной системой отсортровки протонов при одновременной регистрации с гамма-квантами электронов + позитронов.

Помимо несомненных достоинств диссертационная работа содержит ряд стилистических неточностей. Так:

- стр.7, 4-я строка снизу: «применялась переориентации» следует заменить на «применялась переориентация»;
- стр.9, 3-я строка снизу: «в мировой практики» следует заменить на «в мировой практике»;
- стр.21: «осуществлена переориентации» следует заменить на «осуществлена переориентация».

В тексте диссертации (стр.71) и в заключении указан предполагаемый динамический диапазон регистрируемых в установке ГАММА-400 гамма-квантов, а именно – «диапазон энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ». Для регистрации гамма-квантов в таком широком диапазоне энергий нужен амплитудный анализ, если использовать один блок АЦП, то на ~20 бит (с учетом шума электроники). Фотодетектор с таким широким динамическим диапазоном также, мягко говоря, найти не просто. В диссертации я не нашел ничего про электронику для электромагнитного калориметра ГАММА-400, также как и экспериментальное доказательство возможности предполагаемым фотодетектором (или несколькими фотодетекторами на одном кристалле калориметра) с соответствующей электроникой перекрыть такой широкий динамический диапазон. Разумным выглядело бы использование, как минимум, двух фотодетекторов с разными коэффициентами преобразования и двух АЦП на один канал электромагнитного калориметра для перекрытия указанного широкого диапазона.

Приведенные выше замечания ни в коем случае не снижают общей высокой оценки работы. В целом, диссертация оставляет впечатление законченного научного исследования, выполненного на высоком профессиональном уровне. Актуальность избранной диссертантом темы и новизна полученных автором результатов не вызывает сомнений. Автором проделана большая и продуктивная работа по анализу данных и разработке и изготовлению новых детекторов, как в 80-х годах прошлого века для телескопа Гамма-1, так и в этом веке для телескопа будущего - Гамма-400.

Результаты работы своевременно опубликованы в реферируемом журнале и представляют интерес для текущих и планируемых экспериментов в космосе. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН, НИЯУ МИФИ 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.

**Список основных работ оппонента
в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет (не более 15)
по теме защищаемой диссертации:**

1. Поиск новых форм материи при взаимодействии антивещества с веществом в эксперимента ПАНДА – **Атомная Энергия** 112 (2012), 108-116
2. Исследование радиационной стойкости кристаллов вольфрамата свинца при их долговременном гамма-облучении – **ПТЭ** 3 (2013), 27-31
3. Dielectron mass spectra from Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV – **Physical Review Letters** 113 (2014), 142301
4. Анализирующая способность в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации поляризованной мишени при энергии 50 ГэВ – **Ядерная Физика** 77 (2014), 629-636
5. Neutral pion cross section and spin asymmetries at intermediate pseudorapidity in polarized proton collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV – **Physical Review D** 89 (2014), 12001
6. J/ψ polarization in $p + p$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV in STAR – **Physics Letters B** 739 (2014), 180
7. Measurements of interaction between antiprotons – **Nature** 527 (2015), 345-348
8. Observation of charge asymmetry dependence of pion elliptic flow and the possible chiral magnetic wave in heavy-ion collisions - **Physical Review Letters** 114 (2015), 252302
9. Precision measurement of the longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet production in polarized proton collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV – **Physical Review Letters** 115 (2015), 92002
10. Feasibility studies of time-like proton electromagnetic form factors at PANDA at FAIR – **European Physical Journal A** 52 (2016), 325
11. Study of doubly strange systems using stored antiprotons – **Nuclear Physics A** 954 (2016), 323-340
12. J/ψ production at low transverse momentum in $p + p$ and $d + Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV – **Physical Review C** 93 (2016), 64904
13. Direct virtual photon production in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV – **Physics Letters B** 770 (2017), 451
14. Charge-dependent directed flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV – **Physical Review Letters** 118 (2017), 12301
15. Measurement of D_0 azimuthal anisotropy at mid-rapidity in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV – **Physical Review Letters** 118(2017),212301