

ОТЗЫВ

официального оппонента Быкова Андрея Михайловича, доктора физико-математических наук, профессора, руководителя Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» на диссертацию

Москаленко Игоря Владимировича

«Галактические космические лучи и диффузное излучение»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Наблюдательные исследования галактических источников жесткого рентгеновского и гамма-излучения, активно развивающиеся в последние десятилетия, дают уникальную информацию о неравновесных процессах выделения и трансформации огромной энергии в космических объектах, проливающую свет на эволюцию звезд и звездных систем и позволяющую изучать фундаментальные свойства вещества и излучения, находящегося в экстремальных условиях, недостижимых в земных лабораториях. Недавно выполнены уникальные наблюдения с высокой статистикой особенностей спектров позитронов и антипротонов на космических аппаратах PAMELA, Fermi, AMS-02 и получены уточненные данные о спектрах космических лучей в экспериментах ATIC и CREAM. Анализ результатов наблюдений требует как моделирования потенциальных источников позитронов, так и детальных моделей распространения космических лучей в галактических магнитных полях с регулярной и случайной компонентами. Адекватная интерпретация наблюдений точечных и протяженных гамма-источников, статистические исследования различных галактических популяций требуют количественной информации о пространственном распределении и спектре диффузного галактического фона. Поэтому представленные в диссертации И.В.Москаленко модели и результаты анализа наблюдений галактических космических лучей и космических гамма-источников являются несомненно **актуальными**.

В представленной диссертации выполнены важные оригинальные исследования, посвященные моделированию распространения космических лучей в Галактике и генерации диффузного галактического фона в рентгеновском, гамма- и радиодиапазоне. Значительный интерес научного сообщества к этим исследованиям подтверждает, что диссертация посвящена разработке **фундаментальной и актуальной проблемы современной астрофизики**.

Предложенные автором методы исследования диффузного излучения в Галактике успешно применяются на практике для обнаружения слабых и протяженных источников нетеплового излучения, обладающих низкой поверхностной яркостью.

Автором получен ряд **новых** результатов. К таким результатам, в частности, можно отнести получение аналитических выражений для обратного комптоновского рассеяния в анизотропном поле излучения, а также детальный анализ наблюдаемой структуры гамма-излучения так называемых «Пузырей Ферми» (Fermi Bubbles) – протяженных высокоширотных излучающих структур, природа которых до сих пор не выяснена и является предметом широкой дискуссии.

Разработанный автором диссертации в соавторстве с доктором Э. Стронгом **оригинальный** программный код, позволяющий моделировать процессы распространения космических лучей и генерации диффузного излучения в Галактике,

доступен для использования широким научным сообществом как непосредственно, так и через интерфейс *WebRun*. Результаты, полученные на его основе, активно используются в научной литературе. Эти результаты, безусловно, вносят существенный вклад в понимание механизмов распространения космических лучей и генерации диффузного излучения в Галактике и определяют **большую практическую значимость** работы.

Диссертация объемом 446 страниц, включая введение, пять глав основного текста, 172 рисунка, 35 таблиц и список литературы (649 наименований), представляет собой законченное оригинальное научное исследование, посвященное изучению механизмов распространения космических лучей в Галактике и их связи с наблюдаемой крупномасштабной структурой диффузного гамма-излучения.

Во Введении (*Глава 1*) обоснована актуальность темы исследований, дан краткий обзор современных экспериментальных данных о спектре и составе галактических космических лучей, а также о диффузном гамма-излучении в Галактике.

В *Главе 2* дано общее описание процессов генерации и распространения космических лучей в межзвездной среде, указаны основные физические процессы, определяющие эволюцию состава и спектра космических лучей по мере их распространения. Обосновано использование диффузионного приближения в задаче о распространении космических лучей. В этой же главе рассмотрены процессы генерации диффузного высокоэнергичного нетеплового излучения в Галактике и приведена краткая история развития методов и инструментов внеатмосферной гамма-астрономии.

В *Главе 3* дано описание модели GALPROP: указаны основные источники использованных в этой модели ядерно-физических, астрофизических и астрономических данных, перечислены учтенные в модели элементарные процессы, приводящие к эволюции состава и спектра космических лучей в Галактике, в том числе, основные механизмы потерь энергии. Рассмотрены вопросы о пространственном распределении основных компонент межзвездного газа в Галактике и о спектре межзвездного поля оптического и ИК-излучения в диапазоне от 0,1 до 10(3) мкм. В этой же главе приведены численные схемы, использованные для количественного моделирования.

В *Главе 4* с помощью модели GALPROP рассчитаны распределения и спектры космических лучей в Галактике для различных наборов модельных параметров. Результаты расчетов сопоставлены с данными измерений спектров космических лучей в локальной межзвездной среде и в Солнечной системе, полученных в экспериментах Voyager, AMS-02, PAMELA, CREAM, ACE и др. Это позволило автору оценить такие модельные параметры, как размер гало Галактики, нормировочный коэффициент диффузии и индекс коэффициента диффузии космических лучей, а также параметры спектра космических лучей, инжектируемых в процесс ускорения.

В *Главе 5* приведено описание конструкции, принципов работы и программы наблюдений орбитального гамма-телескопа им. Ферми. Проанализированы результаты наблюдений диффузного гамма-излучения в Галактике, выполненных с помощью этого телескопа. Выполнено моделирование морфологии и спектров галактических источников диффузного гамма-излучения с помощью модели GALPROP с параметрами, согласующимися с наблюдательными данными о составе и спектрах галактических космических лучей, рассмотренными в Главе 4. Особое внимание уделено моделированию гамма-излучения в окрестности центра Галактики и излучения так

называемых «Пузырей Ферми» – протяженных высокоширотных излучающих структур, природа которых до сих пор не ясна и является предметом активных дискуссий в научном сообществе. Результаты моделирования сопоставлены с данными, полученными в обзорах гамма-телескопа им. Ферми, а также с данными черенковских гамма-телескопов H.E.S.S., MAGIC и VERITAS.

В *Главе 6* исследовано взаимодействие галактических космических лучей с объектами Солнечной системы, в частности, рассеяние Солнечных фотонов на энергичных электронах галактических космических лучей, приводящее к генерации гамма-излучения, регистрируемого телескопом им. Ферми. Результаты моделирования спектра этого излучения, выполненного автором, согласуются с наблюдательными данными.

К основным **новым** результатам, полученным автором, по мнению оппонента, следует отнести:

- (i) построение последовательной модели формирования спектров гамма-излучения при обратном Комптоновском рассеянии анизотропного поля фотонов релятивистскими электронами и позитронами.
- (ii) Создание многофункциональной интерактивной компьютерной модели распространения и взаимодействий галактических космических лучей, для интерпретации данных экспериментов.
- (iii) Детальное исследование и анализ морфологии и спектральных свойств диффузного галактического гамма-излучения на основе современных данных, полученных на космическом телескопе Fermi.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных математических методов, тщательным анализом сечений основных процессов взаимодействия космических лучей, а также согласованностью полученных данных с результатами других научных групп. Численный код GALPROP для моделирования распространения космических лучей и генерации диффузного излучения в Галактике, разработанный автором в соавторстве с доктором Э. Стронгом (A.W.Strong), доступен в сети Интернет и активно используется научным сообществом. Результаты диссертации прошли проверку на многочисленных международных и всероссийских конференциях и были опубликованы в 65 статьях в изданиях, входящих в Перечень ВАК ведущих рецензируемых журналов и изданий.

Диссертация **не лишена отдельных недостатков**. По тексту диссертации можно высказать следующие замечания и пожелания.

1. В тексте диссертации детально обсуждаются сечения ядерных реакций и процессов излучения, но недостаточно подробно обсуждается влияние точности входных параметров модели GALPROP, в том числе спектра и конфигурации магнитного поля, спектра поля излучения в различных областях Галактики, пространственного распределения и состава межзвездного газа и пыли на устойчивость результатов расчетов. Модель включает очень много параметров, автор модели тщательно обсуждает их выбор, но исследование устойчивости результатов численного расчета многопараметрической модели важно проиллюстрировать на тестовых моделях.

2. По мнению оппонента, нуждается в детальном обсуждении учет влияния временной эволюции спектров космических лучей, покидающих ускоритель, в модели GALPROP. Спектр космических лучей, уходящих из источника ускорения, согласно современным моделям, существенно отличается от спектра частиц в источнике. Плазменные неустойчивости, возникающие в окрестности источников за счет сильной анизотропии уходящих космических лучей, существенно модифицируют спектр релятивистских частиц для молодых остатков сверхновых. Космические лучи умеренно релятивистских и субрелятивистских энергий испытывают адиабатическое охлаждение. Было бы целесообразно обсудить влияние процессов в источниках на результаты моделирования GALPROP.

3. Текст диссертации и автореферата не свободен от некоторого числа синтаксических и стилистических ошибок. Термин «гамма-излучение» в тексте диссертации представлен в нескольких вариантах (с дефисом, без дефиса, с греческой буквой и без нее). Вместо термина «металличность» в тексте диссертации используется записанное кириллицей английское слово («металлисити»).

Вышеперечисленные **недостатки не носят принципиального характера и не снижают высокой общей оценки** результатов, полученных автором диссертации. Диссертация представляет собой законченное оригинальное научное исследование, вносящее существенный вклад в решение фундаментальной физической проблемы распространения космических лучей в Галактике и их связи с наблюдаемой крупномасштабной структурой диффузного рентгеновского и гамма-излучения. Результаты, полученные в диссертационной работе И.В. Москаленко, могут быть использованы и используются в научных учреждениях, в которых ведутся работы по астрофизике высоких энергий и физике космических лучей: ИКИ РАН, ИЯИ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ФИАН им П.Н. Лебедева, ИЗМИРАН, ИТЭФ, МГУ им. М.В. Ломоносова и др. Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих научных изданиях и широко цитируется. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Игорь Владимирович Москаленко, безусловно **заслуживает** присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики
и астрофизики ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Быков А.М.

25.02.2017

Подпись Быкова А.М. заверяю,
ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе
доктор физ.-мат. наук, профессор



Шергин А.П.

Почтовый адрес оппонента: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
Телефон: 7 (812) 292-7160
Электронная почта: byk@astro.ioffe.ru