

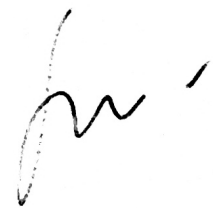
На правах рукописи

Москаленко Игорь Владимирович

## Галактические космические лучи и диффузное излучение

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



Стэнфорд, 2016

Работа выполнена в Стэнфордском Университете (Калифорния, США)

Официальные оппоненты:

Зелёный Л. М. – доктор физ.-мат. наук, академик РАН, директор Института Космических Исследований РАН, вице-президент РАН

Ткачёв И. И. – доктор физ.-мат. наук, академик РАН, заведующий Отделом Экспериментальной Физики Института Ядерных Исследований РАН

Быков А. М. – доктор физ.-мат. наук, руководитель Отделения Физики Плазмы, Атомной Физики и Астрофизики Физико-Технического Института им. А. Ф. Иоффе РАН

Ведущая организация:

Научно-Исследовательский Институт Ядерной Физики им. Д. В. Скобельцына, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова

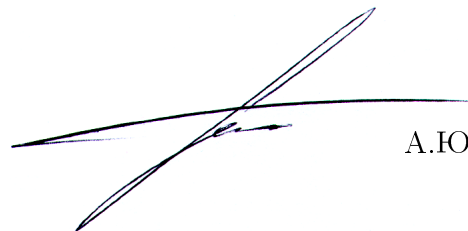
Защита диссертации состоится 24 марта 2017 г. в 17:30.

на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте Космических Исследований РАН по адресу: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2017/moskalenko.htm>

Автореферат разослан 7 февраля 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.113.02  
кандидат физико-математических наук



А.Ю.Ткаченко

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Большое количество нерешенных проблем в физике и астрофизике связаны с изучением космических лучей (КЛ) и диффузных излучений (радио, рентгеновское, гамма-излучение) генерируемых во взаимодействиях ускоренных частиц вблизи источников, а также по мере распространения КЛ в межзвездной среде. Среди таких проблем можно назвать механизмы ускорения частиц в ударных волнах, происхождение спектра и состава КЛ, процессы в межзвездной среде, влияние КЛ на скорость звездообразования и эволюцию галактик, нуклеосинтез, распространение КЛ в гелиосфере, а также происхождение внегалактического диффузного излучения, поиски следов темной материи, и многие другие.

В настоящее время, по прошествии ста лет с момента открытия КЛ, астрофизика КЛ и астрономические исследования диффузных излучений переживают период бурного развития. Новые технологии, используемые при измерениях КЛ и электромагнитных излучений, позволили значительно улучшить энергетическое и угловое разрешение используемых детекторов, а значительные размеры экспериментальных установок – увеличить количество детектируемых событий на порядки. Многие открытия были бы невозможны без использования космических аппаратов.

Перечислим только некоторые открытия, сделанные за последнее десятилетие. Одним из первых стало открытие аппаратом PAMELA возрастания позитронной фракции в КЛ с энергией подтвержденное в экспериментах Ферми и AMS-02, в то время как стандартные расчеты рождения позитронов в межзвездной среде предсказывают её убывание. В настоящее время имеются измерения позитронной фракции до энергии  $\sim 500$  ГэВ (AMS-02), где она по-видимому выходит на насыщение. В то же время, согласно измерениям аппаратов PAMELA и AMS-02 отсутствует похожее возрастание в отношениях других компонент КЛ, таких как антипротоны к протонам, бор к углероду и др. Согласно измерениям электронного спектра выполненным в экспериментах Ферми, PAMELA, AMS-02 он оказывается существенно более пологим, чем ожидалось, особенно при высоких энергиях, где потери энергии вследствие Комптоновского рассеяния и синхротронного излучения являются очень быстрыми. С другой стороны, наблюдается неожиданно резкое обрезание спектра электронов при энергии  $\sim 1$  ТэВ, обнаруженное в экспериментах HESS и VERITAS.

Согласно измерениям, выполненным при помощи инструментов ATIC, CREAM, PAMELA, AMS-02, спектр гелия в КЛ оказался более пологим, чем спектр протонов. Имевшиеся данные возможно указывали на это и ранее, но большие статистические погрешности не позволяли сделать такое заключение, к тому же до сих пор неясен механизм предпочтительного ускорения гелия. Интересно, что измерения более тяжелых ядер в экспериментах ATIC и CREAM также указывают на более пологие спектры по сравнению с протонами. Обнаружение изломов в спектрах протонов и гелия в районе магнитной жесткости 300 ГВ в эксперименте PAMELA стало полной неожиданностью, но было подтверждено в экспериментах Ферми и AMS-02. При

этом изломы в спектрах протонов и гелия наблюдаются при одинаковой жёсткости, что, по-видимому, не случайно и указывает на единую природу их происхождения. Более того, показатели спектров протонов и гелия отличаются примерно на одну и ту же величину ниже и выше излома (AMS-02). Имеются указания на то, что и более тяжёлые ядра имеют излом на той же самой жёсткости (CREAM).

Новые измерения отношений  $\bar{p}/p$ ,  $p/e^+$ , и  $e^+/\bar{p}$  в эксперименте AMS-02 показывают, что эти отношения практически не изменяются в широком диапазоне энергий 30–500 ГэВ, что, по-видимому, является сильным аргументом в пользу того, что спектры всех этих частиц имеют одинаковое происхождение. Таким образом, гипотезы о происхождении избытка позитронов вследствие вклада пульсаров или аннигиляции частиц тёмной материи сталкиваются с серьёзными проблемами. На передний план выходят гипотезы ускорения в ударных волнах, т.е. там, где ускоряется основная часть КЛ.

Давно ожидаемым и всё же неожиданным прорывом стал выход аппарата Voyager 1 за пределы гелиосферы в конце августа 2012 г. Хотя в настоящее время Voyager 1 находится в т.н. гелиопаузе, а это ещё не в полном смысле слова межзвездное пространство, с точки зрения астрофизики КЛ аппарат Voyager 1 измеряет спектры частиц в локальной межзвездной среде. Таким образом, впервые стало возможным измерение спектра частиц низких энергий, которые не модифицированы гелиосферой. Это очень серьёзное достижение, которое позволит правильно учитывать эффект солнечной модуляции в экспериментах в глубине гелиосферы и сделать предсказания моделей распространения КЛ значительно более точными.

Новые сюрпризы обнаруживаются и в изотопном составе КЛ при низких энергиях. Недавнее обнаружение радиоактивного изотопа  $^{60}\text{Fe}$  в эксперименте ACE/CRIS свидетельствует о взрыве сверхновой в непосредственной близости от Солнечной системы несколько миллионов лет назад. В обработке находятся данные эксперимента Super Trans-Iron Galactic Element Recorder (Super-TIGER), специализированного детектора тяжёлых ядер.

Большие ожидания связаны с экспериментом Alpha Magnetic Spectrometer – 02 (AMS-02), находящимся на Международной Космической Станции (МКС) с 2011 г. Первые опубликованные результаты по измерениям позитронной фракции, спектрам протонов, гелия, антипротонов, электронов и позитронов, а также отношений  $\bar{p}/p$ ,  $p/e^+$  и  $B/C$  показывают большие возможности инструмента. На исследования тонкой структуры в спектрах отдельных компонент КЛ нацелены такие эксперименты как CALorimetric Electron Telescope (CALET), пристыкованный к МКС в конце 2015 г., и готовый к запуску на МКС Cosmic Ray Energetics And Mass (ISS-CREAM) спектрометр.

Галактические и экстрагалактические источники и диффузное излучение в широком диапазоне энергий наблюдаются целым созвездием космических и наземных телескопов, таких как Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), Planck, International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL), Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT, Ферми), High Energy Stereoscopic System (HESS), Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System (VERITAS), Major Atmospheric

Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescopes (MAGIC), High-Altitude Water Cherenkov Observatory (HAWC). Будущие проекты, например Гамма-400 и Cherenkov Telescope Array (CTA), находятся в стадии изучения и проектирования.

Одним из наиболее впечатляющих результатов наблюдений обсерватории Ферми является открытие так называемых Пузырей Ферми, Fermi Bubbles, гигантских (приблизительно 10 кпк в поперечнике) структур, находящихся по обе стороны от Галактического центра. Другим недавним открытием является обнаруженный избыток диффузного гамма-излучения неизвестного происхождения в направлении Галактического центра. Важнейшим этапом является анализ диффузного Галактического гамма-излучения с использованием данных телескопа Ферми, обнаружение диффузного гамма-излучения других нормальных галактик телескопом Ферми и атмосферными черенковскими телескопами HESS, VERITAS, MAGIC, и определение спектра экстрагалактического диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий до  $\sim 1$  ТэВ по наблюдениям Ферми. Давно ожидаемым является свидетельство ускорения протонов в оболочках сверхновых обнаруженное телескопом Ферми. Ценнейшая информация о распределении синхротронного излучения в Галактике получена инструментами WMAP и Planck.

Огромный интерес к изучению КЛ подтверждается наличием широкого набора инструментов нового поколения, предназначенных как для прямого исследования спектров и состава частиц КЛ, так и непрямого, через наблюдение различных видов излучения, генерируемого ускоренными частицами, и способными давать необходимую информацию о потоках КЛ в каждой точке Галактики и даже в других галактиках. При этом перекрывается весь диапазон энергий частиц от тепловых до  $> 10^{15}$  эВ, т.е. до энергий, близких к максимально возможным в Галактических источниках. (В данной работе обсуждаются только Галактические КЛ.)

Сложный характер современных научных исследований, таких как обнаружение следов новых явлений на фоне интенсивного диффузного излучения, интерпретация тонких деталей в спектрах частиц или детальные теоретические расчеты изотопного состава КЛ, требуют надежных и детальных вычислений. Это возможно сделать только с использованием реалистичных компьютерных моделей. Однако, до 1996 г. не существовало готовой самосогласованной модели распространения Галактических КЛ. Каждая экспериментальная группа фактически была вынуждена разрабатывать свою собственную модель для интерпретации полученных данных. Точно также поступали и теоретики, которые использовали эти данные. Очень часто такие модели были слишком простыми (например, однородная или Leaky-Box модель), или неполными, эмпирическими, или использовались недокументированные и/или необоснованные приближения, что приводило к трудностям при попытках воспроизведения полученных результаты. Результаты же были зачастую противоречивы и приспособлены для целей конкретного эксперимента или теоретической модели. Такова была ситуация в декабре 1996 г., когда мы начинали<sup>1</sup> проект GALPROP.

Модель распространения Галактических КЛ и генерации диффузного излуче-

---

<sup>1</sup>См. интервью: <http://archive.sciencewatch.com/dr/erf/2009/09octerf/09octerfStronET/>

ния, GALPROP<sup>2</sup>, разработанная автором совместно с доктором Эндрю Стронгом из Института Макса Планка для Внеземной Физики (Гархинг, Германия), стала самой детальной и наиболее реалистичной из всех имеющихся моделей. GALPROP рассчитывает распространение всех компонентов КЛ: всех стабильных и долгоживущих ядер от  $^1\text{H}$  до  $^{64}\text{Ni}$ , антипротонов, электронов и позитронов, и самосогласованно вычисляет распределение и спектр диффузного Галактического излучения в рентгеновском,  $\gamma$ - и радио-диапазонах. В настоящее время GALPROP является “стандартной моделью,” используемой многими экспериментальными группами, такими как Ферми, AMS-02, ACE, PAMELA, HAWC, Planck и тысячами других исследователей во всем мире.

Работы, описывающие модель GALPROP и выполненные с её помощью исследования являются широко востребованными, что отражается в высоких индексах цитируемости. Согласно данным Web of Science, пять ранних работ автора имеют суммарный индекс цитируемости более 2000, а количество цитирований первой работы, выполненной в 1998 г. и описывающей принцип работы GALPROP, превышает 500.

## Цель работы

Целью данной работы является разработка модели распространения КЛ в Галактике, их взаимодействий с межзвездной средой, генерации диффузных излучений, а также изучение взаимодействия Галактических КЛ с объектами Солнечной системы. Приводится описание использования модели ГАЛПРОП (GALPROP) для интерпретации различных астрофизических данных. В работе приводятся результаты как теоретических расчетов и моделирования, так и результаты наблюдений выполненные в составе коллаборации Ферми.

## Научная и практическая ценность работы

Создана уникальная реалистичная самосогласованная модель распространения КЛ в Галактике, включающая в себя все стабильные и долгоживущие изотопы от  $^1\text{H}$  до  $^{64}\text{Ni}$ , антипротоны, электроны и позитроны, позволяющая вычислять трансформацию состава КЛ в процессе распространения частиц в межзвездной среде и генерируемое ими диффузное излучение в рентгеновском,  $\gamma$ - и радио-диапазонах. Распространение КЛ рассчитывается посредством решения системы  $\sim 90$  связанных нестационарных уравнений переноса в 3-х или 4-х мерном пространстве (пространственные координаты плюс координата момента или энергии) с заданным распределением источников и краевыми условиями для частиц в КЛ. Уравнения включают в себя эффекты Галактического ветра (конвекция), распределенного ускорения в межзвездной среде (ускорение Ферми 2-го порядка), потери энергии, ядерные реакции, радиоактивный распад и рождение вторичных частиц и изотопов.

---

<sup>2</sup><http://galprop.stanford.edu>

Разработанная модель включает в себя несколько независимых пакетов программ и использует сформированные ими наборы данных, а именно: пакет для расчета ядерных реакций и рождения вторичных изотопов с учетом цепочек распада короткоживущих изотопов, 2-х и 3-х мерные модели распределения компонент газа в Галактике ( $H_2$ ,  $H\ I$ ,  $H\ II$ ), полную 3-х мерную модель фотонного поля (оптическое, инфракрасное, микроволновое излучение) и распределения регулярной и случайной компонент магнитного поля. Описанная модель также включает в себя пакет для расчета возможных сигналов от аннигиляции или распада частиц темной материи, а также интерфейс с хорошо известным пакетом для расчёта свойств суперсимметричных частиц DarkSUSY<sup>3</sup>.

Созданная модель успешно применялась и применяется в настоящее время для теоретических предсказаний и интерпретации различных типов астрофизических данных, полученных в различных экспериментах. По своей точности и предсказательным возможностям созданная модель превосходит все когда-либо существовавшие модели. Многие исследования, в том числе описываемые в данной диссертации, были бы невозможны без использования созданной автором модели.

## Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации, были представлены автором в сотне приглашенных и обзорных докладах на наиболее представительных конференциях по астрофизической тематике и коллоквиумах в ведущих научных учреждениях в различных странах: Российской Федерации, США, Австралии, Англии, Аргентине, Бразилии, Германии, Голландии, Гонконге, Дании, Индии, Италии, Китае, Польше, Португалии, Франции, Швейцарии, Швеции, Японии. Кроме того, доклады о разработке различных аспектов модели GALPROP и результатах полученных с её помощью были представлены на всех международных конференциях по космическим лучам (начиная с 25-й конференции в г. Дурбан, Южная Африка, в 1997 г.), которые являются важнейшими научными конференциями в области астрофизики КЛ.

Среди них такие конференции, как: “4-й Комптоновский симпозиум” (Вильямсбург, США, 1997 г.), “16-й Европейский симпозиум по космическим лучам” (Алкала де Хенарес, Испания, 1999 г.), “26-я Международная конференция по космическим лучам” (Салт Лейк Сити, США, 1999 г.), “27-я Международная конференция по космическим лучам” (Гамбург, Германия, 2001 г.), “34-я научная ассамблея COSPAR” (Хьюстон, США, 2002 г.), “28-я Международная конференция по космическим лучам” (Цукуба, Япония, 2003 г.), “2-й симпозиум по мультиволновой идентификации неидентифицированных источников” (Гонконг, Китай, 2004 г.), “35-я научная ассамблея COSPAR” (Париж, Франция, 2004 г.), “Ядерные данные для науки и технологии (ND2004)” (Санта Фе, США, 2004 г.), Рабочее совещание коллаборации Ферми (Менло Парк, США, 2005 г.), “Астрофизические источники частиц высоких энергий и радиации” (Торунь, Польша, 2005 г.), “Тёмная материя и новая физика” (Менло

---

<sup>3</sup><http://www.darksusy.org>

Парк, США, 2005 г.), “Распространение и происхождение космических лучей” (Рим, Италия, 2005 г.), “Источники и детектирование тёмной материи и тёмной энергии во Вселенной” (Марина дел Рей, США, 2006 г.), “Аннигиляция позитронов в Галактике” (Берн, Германия, 2007 г.), “Астрофизика высоких энергий” (Рим, Италия, 2007 г.), “Будущее гамма-астрономии высоких энергий” (Чикаго, США, 2007 г.), “Связь между физикой элементарных частиц и космологией (PPC07)” (Колледж Стейшн, США, 2007 г.), “Наука с новым поколением гамма-телескопов: астрофизика гамма-излучения и связь с другими диапазонами энергий и частицами (SciNeGHE 2007)” (Фраскати, Италия, 2007 г.), “ТЭВная астрофизика частиц (TeVPA07)” (Венеция, Италия, 2007 г.), “30-я Международная конференция по космическим лучам” (Мерида, Мексика, 2007 г.), “Рабочее совещание по космическим лучам” (Вашингтон, США, 2007 г.), “1-й GLAST симпозиум” (Стэнфорд, США, 2007 г.), “Идентификация тёмной материи” (Стокгольм, Швеция, 2008 г.), “Летний институт по космическим ускорителям в Стэнфордском Центре Линейных Ускорителей” (Менло Парк, США, 2008 г.), “Международная конференция по астрофизике высоких энергий” (Москва, 2008 г.), “Симпозиум по тёмной материи” (Женева, Швейцария, 2009 г.), “Тёмная материя” (Флоренция, Италия, 2009 г.), “Современные теории тёмной материи” (Принстон, США, 2009 г.), “Гамма-астрономия на большой высоте” (Пекин, Китай, 2009 г.), “Результаты эксперимента PAMELA” (Рим, Италия, 2009 г.), “2-я Международная Римская конференция по астрофизике частиц (RICAP’09)” (Фраскати, Италия, 2009 г.), “Ускорение частиц в астрофизической плазме” (Санта Барбара, США, 2009 г.), “Летняя школа в Стэнфордском Центре Линейных Ускорителей” (Менло Парк, США, 2009 г.), “Астрофизика высоких энергий” (Цукуба, Япония, 2009 г.), “Прямые, непрямые и коллайдерные сигналы тёмной материи” (Санта Барбара, США, 2009 г.), “Непрямые поиски тёмной материи” (Токио, Япония, 2009 г.), “Конференция дивизиона высоких энергий Американского Астрономического Общества (HEAD 2010)” (Гавайи, США, 2010 г.), “38-я научная ассамблея COSPAR” (Бремен, Германия, 2010 г.), “Всероссийская конференция по космическим лучам” (Москва, 2010 г.), “Наука с новым поколением гамма-телескопов: астрофизика гамма-излучения и связь с другими диапазонами энергий и частицами (SciNeGHE 2010)” (Триест, Италия, 2010 г.), “Теория и наблюдения экстрагалактических магнитных полей” (Париж, Франция, 2010 г.), “Международная конференция по астрофизике высоких энергий” (Москва, 2010 г.), “Космические лучи и гелиосферная плазма” (Бохум, Германия, 2011 г.), “Анизотропия космических лучей” (Медисон, США, 2011 г.), “GALPROP симпозиум” (Стэнфорд, США, 2011 г.), “32-я Международная конференция по космическим лучам” (Пекин, Китай, 2011 г.), “Международная конференция по астрофизике высоких энергий” (Москва, 2011 г.), “Столетие открытия космических лучей” (Денвер, США, 2012 г.), “39-я научная ассамблея COSPAR” (Майсор, Индия, 2012 г.), “4-я международная конференция по физике частиц и фундаментальной физике в космосе (SpacePart2012)” (Женева, Швейцария, 2012 г.), “Черенковские телескопы” (Буэнос Айрес, Аргентина, 2012 г.), “Поиск источников Галактических космических лучей” (Париж, Франция, 2012 г.), “Международная конференция по астрофизике высоких энергий” (Москва, 2012 г.), “Поиск тёмной материи: междисциплинарный под-



ход” (Санта Барбара, США, 2013 г.), “Гамма-400” (Триест, Италия, 2013 г.), “Передний край космических исследований” (Менло Парк, США, 2013 г.), “Лабораторная астрофизика” (Индианаполис, США, 2013 г.), “33-я Международная конференция по космическим лучам” (Рио де Жанейро, Бразилия, 2013 г.), “16-я Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц” (Москва, 2013 г.), “Международная конференция по астрофизике высоких энергий” (Москва, 2013 г.), “Зельдович-100” (Москва, 2014 г.), “40-я научная ассамблея COSPAR” (Москва, 2014 г.), “Всероссийская конференция по космическим лучам” (Дубна, 2014 г.), “Симпозиум AMS-02” (Женева, Швейцария, 2014 г.), “Дни AMS-02 в ЦЕРНе” (Женева, Швейцария, 2015 г.), “34-я Международная конференция по космическим лучам” (Гаага, Голландия, 2015 г.), “19-я конференция по физике частиц и космологии (COSMO-15)” (Варшава, Польша, 2015 г.), “Симпозиум по астрофизике частиц” (Пекин, Китай, 2015 г.), “Симпозиум посвященный памяти Георгия Гамова” (Вашингтон, США, 2015 г.), “Международная конференция по астрофизике высоких энергий” (Москва, 2015 г.), “227-я Конференция Американского Астрономического Общества” (Киссимми, США, 2016 г.), Рабочее совещание коллаборации AMS-02 (Женева, Швейцария, 2016 г.), “Конференция Американского Физического Общества” (Салт Лейк Сити, США, 2016 г.), “FAMELA: 10 лет на орбите” (Фраскати, Италия, 2016 г.), “Источники Галактических космических лучей” (Париж, Франция, 2016 г.).

Автором были также сделаны приглашенные доклады на астрофизических семинарах в Колумбийском Университете (Нью Йорк, США, 2002, 2014 гг.), Мэрилендском университете (Колледж Парк, США, 2003, 2004 гг.), Научном центре и университете Карлсруе (Карлсруе, Германия, 2004 г.), Лос Аламосской Национальной Лаборатории (Лос Аламос, США, 2004 г.), Национальной Ускорительной Лаборатории им. Ферми – Фермилаб (Батавия, США, 2005, 2010 гг.), Калифорнийском университете в Санта Крузе (Санта Круз, США, 2006, 2007 гг.), университете штата Огайо (Колумбус, США, 2007 г.), Стэнфордском Центре Линейных Ускорителей (Менло Парк, США, 2008 г.), Стэнфордском университете (Стэнфорд, США, 2008 г.), Калифорнийском университете в Ирвайне (Ирвайн, США, 2009 г.), Калифорнийском университете в Санта Барбаре (Санта Барбара, США, 2009 г.), университете Амстердама (Амстердам, Голландия, 2012 г.), Калифорнийском университете в Сан-Диего (Сан-Диего, США, 2012 г.), институте им. Нильса Бора (Копенгаген, Дания, 2014 г.), а также в НИИ Ядерной Физики им. Д. В. Скобельцына, Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова (Москва, 2014, 2015 г.).

В 2010 г. автор данной диссертации был избран почётным членом Американского Физического Общества<sup>4</sup> с формулировкой: “За выдающийся вклад в гамма-астрономию, за самосогласованные расчёты Галактических космических лучей и гамма-излучения, а также за то, что он сделал такие расчёты доступными астрофизикам всего мира.” (Оригинальный текст: “For his seminal contributions to gamma-ray astronomy, for making self-consistent computations of high-energy charged particle and gamma radiations from the Galaxy and for making such calculations accessible to the

<sup>4</sup>[http://www.aps.org/programs/honors/fellowships/archive-all.cfm?year=2010&unit\\_id=DAP&institution=Stanford+University](http://www.aps.org/programs/honors/fellowships/archive-all.cfm?year=2010&unit_id=DAP&institution=Stanford+University)

astrophysics community worldwide.”)

Развитие модели GALPROP финансировалось в течение 1996–1999 гг. Институтом Макса Планка для Внеземной Физики (Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Гархинг, Германия), а с 1999 г. и до конца 2020 г. финансируется из различных грантов НАСА. Автор данной диссертации является руководителем (Principal Investigator) этих грантов.

По теме диссертации опубликовано 65 работ.

## Содержание работы

Диссертация состоит из введения и пяти частей. Вторая часть состоит из 3 глав, третья часть состоит из 12 глав, четвёртая часть – из 7 глав, пятая – из 7 глав и шестая – из 2 глав. Объем диссертации – 446 страниц, в том числе 172 рисунка и 35 таблиц. Список литературы содержит 649 наименований.

**Часть первая (введение)** даёт общую характеристику работы.

**Во второй части** даётся общее представление о КЛ, диффузии, энергетических потерях и прочих процессах в межзвездной среде влияющих на распространение КЛ и генерацию диффузного излучения, даётся описание диффузионных моделей и диффузного излучения.

Глава 2.1 посвящена описанию спектра и состава КЛ, обсуждается энергетика остатков сверхновых необходимая для поддержания наблюдаемого спектра КЛ. Описывается теория переноса частиц и простейшие модели распространения КЛ в межзвездной среде. Даются представления о фрагментации ядер в КЛ и производстве вторичных частиц и изотопов, расчет которых является центральным в любой модели распространения КЛ. На основе вышеизложенного даётся представление о происхождении химического состава КЛ, спектрах первичных и вторичных ядер. Описаны способы определения параметров распространения КЛ в межзвездной среде с использованием данных о вторичных стабильных и радиоактивных изотопах. Описаны гипотезы избирательного ускорения различных компонент КЛ, распределение по потенциалам ионизации различных элементов и температурам конденсации наиболее распространённых минералов. Объясняются возможные причины отличия состава КЛ в источниках от состава Солнечной системы.

Глава 2.2 посвящена обсуждению процессов, связанных с диффузией КЛ в межзвездной среде, и транспортного уравнения. Рассматривается резонансное рассеяние КЛ в межзвездной среде и подводится база под использование диффузионного приближения. Приводится описание конвективного переноса частиц КЛ Галактическим ветром и распределённого доускорения в межзвездной среде. Подробно рассматриваются вопросы взаимодействия КЛ с межзвездной турбулентностью и модификация спектра турбулентности (затухание) под воздействием КЛ низких энергий. Описываются ранние диффузионные модели, такие как однородная модель, модель взвешенных слоёв и их модификации. Обсуждаются современные двух- и трёх-мерные полуаналитические и полностью численные модели диффузии.

Глава 2.3 посвящена краткому описанию истории гамма-астрономии и изучения диффузного излучения. Дается описание процессов, приводящих к генерации диффузного гамма-излучения. Описаны способы моделирования диффузного излучения и использование модельных карт распределения диффузного гамма-излучения для анализа точечных и протяженных источников.

**Часть третья** посвящена детальному описанию модели GALPROP, численной схеме, описанию различных физических процессов, включенных в модель, и трактовке солнечной модуляции. Дано также описание различных компонент межзвездной среды. Описан пользовательский интерфейс GALPROP WebRun.

В главе 3.1 описывается история создания модели GALPROP и дается изложение основных принципов, заложенных в её основу. Дается общее описание модели, её предназначения, и используемых данных. Описываемая модель включает в себя все стабильные и долгоживущие изотопы от  $^1\text{H}$  до  $^{64}\text{Ni}$ , электроны, позитроны, антипротоны. При этом отдельно описываются ядра КЛ с одним электроном (водородоподобные атомы) и неупруго рассеянные протоны и антипротоны. В общей сложности в модели учитывается около 90 различных компонент КЛ. В данной главе также дается подробное описание процессов фрагментации, рождения и распадов вторичных частиц и ядер, различных типов энергетических потерь, а также процессов К-захвата электронов ядрами КЛ, отрыва электронов от частично ионизованных ядер КЛ и выбивания электронов из атомов межзвездного газа. Дается представление о способах построения распределений межзвездного газа ( $\text{H}_2$ ,  $\text{H I}$ ,  $\text{H II}$ ) и радиационного и магнитного полей в Галактике. Описываются способы построения карт диффузного излучения (радио-, рентгеновского, и гамма-излучения) и выходные форматы данных.

В главе 3.2 дается детальное описание используемых нестационарных транспортных уравнений, граничных условий и способов численного решения системы из 90 уравнений в трёх- и четырехмерных случаях (пространственные компоненты плюс импульс) для описания всех компонент КЛ.

В главе 3.3 дается описание конечно-разностных численных схем решения систем нестационарных транспортных уравнений. Дается описание явной и неявной схем и метода Кранка-Николсона, используемого в GALPROP. Описывается метод переменных направлений и даются детали используемой численной схемы, такие как начальный и конечный шаги по времени, количество итераций, пространственная сетка и шаг по импульсу. Даются примеры вычисления коэффициентов разностных схем для различных членов транспортного уравнения.

В главе 3.4 описаны детали расчетов ядерных реакций, которые необходимо учитывать в любой модели распространения КЛ. Для астрофизических приложений в общей сложности необходимо уметь вычислять около 8 тысяч различных каналов фрагментации стабильных и долгоживущих ядер и производства вторичных изотопов. Однако не все они одинаково важны. Около 1000 каналов реакций имеют первостепенное значение для правильных расчетов превращений ядерной компоненты КЛ в процессе распространения в Галактике, в то время как измерения имеются только для половины из них. При этом сечения реакций необходимо знать в широ-

ком диапазоне энергий от нескольких МэВ/н до нескольких ГэВ/н. В данной главе описаны способы расчета ядерных сечений в случаях, когда имеется достаточное количество данных, в случаях, когда данных мало или они противоречивы, а также в случаях полного отсутствия данных. Для этого использовались все доступные экспериментальные данные, производилось их сравнение с предсказаниями ядерных моделей, при необходимости точность данных оценивалась по опубликованным описаниям экспериментальных установок. При недостатке или отсутствии данных строились параметризации с использованием Лос Аламосских моделей ядерных реакций LAQGSM и SEM. Цепочки распадов строились с использованием материалов, опубликованных в Nuclear Data Sheets.

В главе 3.5 описан формализм используемый для вычисления сечений отрыва и подхвата электронов. Эти процессы необходимо учитывать, т.к. некоторые изотопы распадаются по различным каналам в зависимости от наличия или отсутствия электрона на К-оболочке, при этом может значительно изменяться время жизни ядра. Некоторые изотопы являются стабильными в случае полностью оголённого ядра, но при наличии электрона быстро распадаются через К-захват. Примером такого ядра может служить изотоп  ${}^7\text{Be}$ , который распадается через К-захват на  ${}^7\text{Li}$  с периодом полураспада 0,146 года. Изучение ядер, обладающих различными свойствами в зависимости от наличия или отсутствия электрона на К-оболочке даёт возможность изучать характерные времена ускорения КЛ из межзвездной среды, а также процесс стохастического доускорения, поскольку процессы подхвата электрона из межзвездной среды или отрыва электронов сильно зависят от энергии ядер КЛ.

В главе 3.6 описано вычисление неупругих сечений  $pp$ -,  $\bar{p}p$ -,  $pA$ -, и  $\bar{p}A$ -реакций, сечений аннигиляции антипротонов, дифференциальных сечений рождения  $\bar{p}$ ,  $\bar{n}$ ,  $K^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ , и спектров вторичных  $e^\pm$  и гамма-квантов. Приводятся аналитические параметризации, основанные на подгонке к имеющимся данным, и новые расчеты, основанные на использовании новейших Монте Карло генераторов событий, таких как Pythia 6.2, QGSJET-II-04, EPOS-LHC, настроенных на соответствие широкому кругу ускорительных данных включая данные Большого Адронного Коллайдера. При этом учитывается присутствие ядер  $Z > 1$  в КЛ и в межзвездной среде.

В главе 3.7 даны формулы для энергетических потерь ядер и электронов. Приводятся выражения для потерь энергии ядер вследствие ионизации, Кулоновского рассеяния, фрагментации и радиоактивных распадов. Потери вследствие неупругого рассеяния протонов и антипротонов считаются катастрофическими и неупруго рассеянные частицы учитываются как отдельные компоненты – вторичные протоны, третичные антипротоны. Даются выражения для энергетических потерь электронов вследствие ионизации, Кулоновского рассеяния, тормозного излучения в нейтральной и ионизованной среде, Комптоновского рассеяния с использованием сечения Клейна-Нишины и синхротронного излучения.

В главе 3.8 описываются вычисления распределений компонент межзвездной среды: различных компонент газа ( $\text{H}_2$ ,  $\text{H I}$ ,  $\text{H II}$ ), радиационного и магнитного полей. Дано описание аналитических параметризаций газовых распределений, используемых для расчета фрагментации и энергетических потерь различных компонент КЛ.

Для вычисления радиационного поля в Галактике используются яркости, полученные на основе подгонки распределений различных звездных классов в Галактике к данным COBE/DIRBE и модель SKY, а также модели пыли. Вычисленный спектр и угловое распределение теплового излучения используется для расчета анизотропного обратного Комптоновского рассеяния – компоненты диффузного гамма-излучения Галактики. Дается также описание моделей регулярной и случайной компонент магнитного поля, используемого в GALPROP для вычисления синхротронного излучения и его поляризации.

В главе 3.9 описываются процессы генерации диффузного синхротронного и гамма-излучения. Приводится формализм для вычисления синхротронного излучения генерируемого электронами в случайном и упорядоченном поле. В случае упорядоченного поля возможно также вычисление карт поляризации. Приводится вывод формулы для анизотропного обратного Комптоновского рассеяния в общем случае с использованием сечения Клейна-Нишины. Дан подробный анализ важности эффекта анизотропии для генерации диффузного гамма-излучения при рассеянии фотонов оптического и инфракрасного излучения Галактического диска на электронах КЛ. Приводятся формулы для тормозного излучения электронов ( $\geq 10$  кэВ) в среде, которая включает в себя нейтральный водород, водородоподобные и гелий-подобные ионы, а также полностью ионизованную плазму.

В главе 3.10 в деталях обсуждаются проблемы связанные с определением пространственных распределений компонент межзвёздного газа ( $H_2$ ,  $H\ I$ ,  $H\ II$ ) и построение распределений используемых для расчётов диффузного излучения. Обсуждается влияние спиновой температуры на определение толщи атомарного газа вдоль луча зрения. В случае молекулярного газа  $H_2$  обсуждаются проблемы связанные с определением фактора  $X_{CO}$ , которое может меняться с расстоянием от центра Галактики. Обсуждается использование карт межзвёздного покраснения  $E(B-V)$  для нормировки полной толщи газа при построении карт диффузного гамма-излучения. Описаны способы вычисления двумерных “кольцевых” распределений с использованием обзоров излучения  $H\ I$  на длине волны 21 см и молекулы CO на длине волны 0.26 см и кривой вращения. Даны примеры кольцевых распределений газа, используемых для расчётов диффузного гамма-излучения. Описан пакет *GarDiAn* (Gamma Ray Diffuse Analysis) предназначенный для анализа излучения всего неба методом максимизации функции правдоподобия.

В главе 3.11 дано описание влияния гелиосферы на спектры Галактических КЛ при энергиях ниже 30–50 ГэВ, т.н. солнечная модуляция. Описано приближение силового поля, эффекты знака заряда (дрейф), и современный подход к описанию диффузии частиц в гелиосфере.

В главе 3.12 дано описание пользовательского интерфейса WebRun<sup>5</sup>, позволяющего пользователю производить вычисления с использованием модели GALPROP онлайн при помощи браузера. Разработка интерфейса WebRun привела к значительному техническому упрощению расчётов распространения КЛ и связанных с ними

---

<sup>5</sup>galprop.stanford.edu/webrun/

диффузных излучений и охвату широкого круга исследователей без специальных знаний в области компьютерных технологий. Описывается также специализированный компьютерный кластер *galprop* состоящий из  $\sim 500$  ядер и предназначенный для обеспечения работы сервиса WebRun.

**В четвёртой части** описаны примеры использования модели GALPROP для интерпретации данных по КЛ: вычисления спектров ядерной компоненты КЛ, интерпретация данных Voyager 1, данных по антипротонам, позитронной фракции и суммарного спектра электронов. Обсуждается энергетический бюджет Галактики, полная светимость в электромагнитном диапазоне, а также суммарная мощность излучения в различных компонентах КЛ. Делается обобщение на другие нормальные галактики. В заключении этой части описывается применение Байесовских методов и обучаемых нейронных сетей к задаче определения параметров диффузии и определению состава источников КЛ.

В главе 4.1 описываются измерения изотопного состава и спектров КЛ низких энергий. Описывается интерпретация этих данных с использованием модели GALPROP и определение параметров диффузии в Галактике, таких как коэффициент диффузии, размер гало, Альфвеновская скорость, спектр инжекции частиц. Приводится изотопный состав КЛ в источниках, полученный в самосогласованных расчётах в двух моделях распространения КЛ.

В главе 4.2 описаны результаты измерений состава и спектров КЛ низких энергий в межзвездной среде, которые были получены аппаратом Voyager 1 впервые вышедшим за пределы гелиосферы. Приводится интерпретация результатов измерений при помощи модели GALPROP, и указания на отсутствие источника КЛ низких энергий в окрестностях Солнечной системы. Дается подробное описание значения измерений выполненных аппаратом Voyager 1 для понимания процессов, влияющих на распространение КЛ в гелиосфере, а также в целом для всей астрофизики КЛ.

В главе 4.3 описаны измерения спектров протонов и гелия в КЛ и их интерпретация. В частности, обсуждается излом в спектрах обнаруженный при одинаковом значении магнитной жёсткости ( $\sim 300$  ГВ), а также различия в спектральных индексах протонов и более тяжелых ядер. Описывается измерение спектра протонов высоких энергий при помощи наблюдений спектра гамма-излучения лимба земной атмосферы телескопом Ферми. Дается интерпретация наблюдаемых изломов в спектрах протонов и гелия в рамках 5 базовых гипотез: изменения процесса диффузии в межзвездной среде, модификации спектра инжекции частиц в источниках КЛ, композитного спектра источников, и присутствия локальных источников КЛ низких или высоких энергий. Для каждой из 5 базовых гипотез делаются модельные предсказания для анизотропии КЛ и отношений вторичных ядер к первичным (В/С) и антипротонов к протонам.

В главе 4.4 описаны измерения антипротонов в КЛ и модельная интерпретация этих измерений. Обсуждаются возможные модификации моделей распространения необходимые для описания измерений спектра антипротонов. В частности, обсуждаются гипотезы присутствия локального источника первичных КЛ низких энергий в окрестностях Солнечной системы (например в Локальном Пузыре), влияние моди-

фикации спектра турбулентности (затухание) под воздействием КЛ низких энергий, а также возможные указания на пространственную неоднородность коэффициента диффузии в Галактике.

В главе 4.5 описаны измерения спектров электронов и позитронов в КЛ. Описаны модельные вычисления спектра вторичных позитронов и позитронной фракции. Показано, что предсказанное поведение позитронной фракции в предположении вторичного происхождения позитронов в процессах адронных столкновений в межзвездной среде кардинально отличается от наблюдений, что может указывать на наличие дополнительной, возможно первичной, компоненты позитронов при энергиях  $>10$  ГэВ. Дается анализ различных гипотез происхождения избытка позитронов в КЛ и обсуждаются способы их проверки.

В главе 4.6 описывается глобальная модель Галактики, приводятся результаты расчетов полной светимости в различных диапазонах длин волн, суммарная мощность источников КЛ и генерируемых вторичных компонент (антипротонов, позитронов, электронов). Обсуждается энергетический бюджет Галактики и показывается, что Галактика является хорошим лептонным калориметром. Обсуждаются наблюдения диффузного гамма-излучения от других нормальных галактик, включая галактики с активным звездообразованием, дается их сравнительный анализ и интерпретация в рамках модели распространения КЛ.

В главе 4.7 описано использование различных современных статистических методов и обучаемых нейронных сетей для анализа моделей распространения КЛ в Галактике. Впервые такие методы применены к полностью численным моделям построенным на основе GALPROP. Используемые методы позволяют детально анализировать многомерные пространства параметров, которые включают в себя параметры распространения КЛ в межзвездной среде, параметры спектров инжекции и изотопный состав КЛ в источниках. Анализируемые параметры также включают модуляционные потенциалы используемые для описания данных каждого используемого эксперимента, а также параметры “ошибок” для каждого набора данных, используемые для описания неучтенных систематических ошибок. Проведенный анализ позволяет вычислять средние значения параметров и их доверительные интервалы. Показано, что параметры диффузии, определённые независимо для двух наборов данных, лёгких изотопов ( $p, \bar{p}$ , He) и лёгких ядер (Be-Si), указывают на крупномасштабную пространственную неоднородность параметров распространения КЛ и, как следствие, на крупномасштабную пространственную неоднородность свойств межзвездной среды.

**В пятой части** дается описание телескопа Ферми и обсуждается моделирование диффузного излучения. Даются примеры применения модели GALPROP к задачам анализа излучения от центральной части Галактики, определения спектра и морфологии Пузырей Ферми, определения спектра изотропного излучения. Приводятся результаты вычисления процесса рождения пар фотонами высоких энергий на фотонах межзвездной среды (оптическое, инфракрасное и микроволновое излучения).

В главе 5.1 описываются измерения и моделирование диффузного гамма-излучения в эпоху до запуска телескопа Ферми. Дается описание самосогласованных моделей построенных на основе GALPROP. Показано, что использование таких са-

мосогласованных моделей, включающих все компоненты КЛ и процессы генерации диффузного гамма-излучения, позволяет отбирать наиболее реалистичные гипотезы, удовлетворяющие всем наблюдаемым ограничениям.

В главе 5.2 дано описание гамма-обсерватории нового поколения Ферми, одного из наиболее успешных инструментов, когда-либо запущенных НАСА. Высокая чувствительность и широчайшее поле зрения телескопа с большой площадью (LAT) в составе обсерватории Ферми в сумме дают 40-кратное преимущество по сравнению с характеристиками предыдущего гамма-телескопа EGRET на обсерватории CGRO. Кроме того, LAT имеет значительно лучшее угловое разрешение и широкий интервал энергий от 20 МэВ до более чем 300 ГэВ. Основной режим наблюдений обсерватории – это “сканирование”, которое позволяет делать обзор всего неба каждые 3 часа и даёт возможность наблюдать переменные источники в реальном времени.

В главе 5.3 описан наиболее детальный на настоящий момент анализ диффузного Галактического гамма-излучения с использованием данных Ферми полученных в течение первых 21 месяца наблюдений. Анализ выполнялся на сетке из 128 моделей, построенных на основе GALPROP. Все модели построены с использованием данных по КЛ и других данных, *не связанных* с наблюдениями в гамма-диапазоне, т.е. они являются *априорными*. Все модели являются “стандартными”, т.е. согласуются с прямыми измерениями КЛ. В исследовании рассматривались только модели со стохастическим доускорением и Колмогоровским спектром межзвёздной турбулентности хорошо зарекомендовавшие себя при интерпретации данных по КЛ и диффузному гамма-излучению. Коллекция моделей, используемых в этом анализе, построена с использованием “сетки” различных параметров. В качестве сетки используются различные распределений источников КЛ, два значения для радиуса Галактики, а также варьирующиеся размеры гало. Вдобавок к этому используются две величины спиновой температуры  $T_S$  атомарного водорода H I, и две величины обрезания по магнитуде межзвёздного покраснения  $E(B-V)$ , которое используется для коррекции полной толщи газа. В результате исследования показано, что стандартные модели в целом хорошо описывают наблюдения диффузного гамма-излучения. Это указывает на хорошее общее понимание процессов распространения КЛ в Галактике. В то же время имеются области остаточной эмиссии, указывающие на наличие источников КЛ генерирующих частицы с жёсткими спектрами. В большинстве случаев такие области совпадают с направлениями касательными к спиральным рукавам, где сосредоточено большинство источников КЛ и основная масса молекулярного газа, что указывает на необходимость перехода к трёхмерным моделям межзвёздной среды.

В главе 5.4 описывается анализ диффузного излучения от центральной области Галактики, которая является одной из наиболее ярких в гамма-диапазоне и одновременно сложнейших для анализа. В этой области происходит активное звёздообразование и присутствуют все известные и потенциальные типы источников КЛ. Сверхмассивная чёрная дыра в Галактическом центре имеет массу  $\sim 4.4 \times 10^6 M_\odot$ . Кроме того, ожидается, что регион вблизи сверхмассивной чёрной дыры имеет высокую концентрацию тёмной материи и, следовательно, потенциально может быть источником излучения, возникающего при аннигиляции слабо-взаимодействующих



массивных частиц. В данном исследовании использовались данные Ферми полученные за первые 62 месяца наблюдений. В анализе использовалось несколько моделей диффузного излучения, построенных на основе GALPROP. Данное исследование является первым самосогласованным анализом излучения внутренней Галактики. В результате анализа получены спектры отдельных компонент диффузной эмиссии и составлен каталог источников центральной области Галактики. Показано присутствие слабой компоненты излучения с распределением похожим на распределение ожидаемое от аннигиляции частиц тёмной материи и получен её спектр в различных моделях диффузного излучения.

В главе 5.5 описывается анализ морфологии и спектров так называемых Пузырей Ферми (Fermi Bubbles), гигантских приблизительно 10 кпк в поперечнике структур находящихся по обе стороны от Галактического центра, и являющихся одним из наиболее впечатляющих недавних открытий сделанных телескопом Ферми. Анализ этих протяженных структур основывается на моделях диффузной эмиссии, построенных с использованием GALPROP. В результате анализа было показано удивительное совпадение спектров обоих Пузырей, а также однородность формы спектра по Галактической широте. Однородность и жесткость этих спектров (спектральный индекс около  $-2$ ) являются труднообъяснимыми в рамках существующих представлений принимая во внимание огромные размеры Пузырей и указывают на возможное наличие в них процессов ускорения частиц.

В главе 5.6 описан анализ спектра изотропного излучения. В анализе используются модели диффузного Галактического гамма-излучения, построенные на основе GALPROP. В результате анализа получен спектр изотропного излучения в диапазоне энергий от 100 МэВ до 820 ГэВ, имеющий степенной спектр с показателем в интервале 2.26–2.34 и обрезанием в районе 206–374 ГэВ. Обсуждаются различные процессы, дающие вклад в формирование изотропного излучения.

В главе 5.7 обсуждается поглощение фотонов высоких энергий вследствие рождения  $e^+e^-$ -пар на фотонном поле Галактики, которое до недавнего времени считалось пренебрежимо малым. Наличие в тепловом излучении Галактики оптических и инфракрасных фотонов приводит к тому, что образование пар происходит уже при энергиях около 100 ГэВ, при этом поглощение медленно возрастает с энергией и достигает максимума около 100 ТэВ. Этот диапазон энергий является рабочим диапазоном для Черенковских телескопов, таких как HESS, MAGIC, VERITAS и HAWC. В данной главе приводятся формулы для расчета эффекта поглощения с учетом пространственной неоднородности и анизотропии в распределении межзвёздного радиационного поля и оценивается влияние этого поглощения на спектры источников гамма-излучения высоких энергий, расположенных в различных частях Галактики. В расчётах использовалась модель межзвёздного радиационного поля описанная в главе 3.8.

**В шестой части** приводятся результаты расчетов взаимодействия КЛ с телами Солнечной системы. Это тоже компонента диффузного излучения, т.к. находясь внутри гелиосферы мы смотрим на Вселенную сквозь излучение, генерируемое этими объектами, и считаем часть его Галактическим или изотропным внегалактическим

излучением. В частности, приводится вывод спектра гамма-излучения генерируемого в процессе обратного Комптоновского рассеяния фотонов солнечного света на электронах Галактических КЛ и результаты наблюдения этого эффекта при помощи телескопа Ферми.

В главе 6.1 описывается формализм расчёта спектра гамма-излучения генерируемого в процессе обратного Комптоновского рассеяния фотонов солнечного излучения на электронах Галактических КЛ. Вычисляется спектр и угловое распределение таких фотонов. Показано, что гамма-излучение генерируемое в процессе обратного Комптоновского рассеяния является протяженным и покрывает все небо с максимумом интенсивности приходящимся на направление на Солнце. Измерения спектра этого излучения на различных угловых расстояниях от Солнца может быть использовано для определения распределения Галактических электронов в гелиосфере, включая области в непосредственной близости от фотосферы, что невозможно сделать другими способами.

В главе 6.2 описаны результаты анализа наблюдений двух компонент гамма-излучения Солнца: “точечного” излучения от диска, возникающего в результате взаимодействий протонов КЛ с атмосферой Солнца, и протяженной компоненты, возникающей в результате обратного Комптоновского рассеяния фотонов солнечного излучения на электронах Галактических КЛ. Показано, что обе компоненты надёжно разделяются. Полученный спектр протяженной компоненты хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями, в то время как спектр дисковой компоненты существенно отличается от предсказаний. Последнее неудивительно, т.к. в значительной мере зависит от предположений о транспорте КЛ во внутренней гелиосфере, распределении и силе магнитных полей в солнечной атмосфере и развитии там каскадов КЛ.

## Основные положения, выносимые на защиту

Основными результатами диссертации являются:

1. Создание уникальной самосогласованной модели расчета распространения различных компонент Галактических КЛ, и модельные расчёты распределений диффузного Галактического синхротронного и гамма-излучений, построение глобальной модели Галактики и определение спектра экстрагалактического  $\gamma$ -излучения;
2. Крупномасштабное изучение диффузного Галактического  $\gamma$ -излучения с использованием телескопа Ферми;
3. Применение методов основанных на теореме Байеса для определения параметров распространения КЛ в Галактике;

4. Вывод формализма расчета обратного Комптоновского рассеяния в анизотропном фотонном поле и его применение для расчётов различных процессов генерации гамма-излучения;
5. Теоретическое предсказание и наблюдение эффекта обратного Комптоновского рассеяния электронов в составе Галактических КЛ на фотонах Солнца с использованием телескопа Ферми, и расчеты спектров  $\gamma$ -излучения от взаимодействия Галактических КЛ с атмосферой Земли и поверхностями Луны и малых тел, а также пылью в Солнечной системе: в Поясе Астероидов, системах Троянов на орбитах Юпитера и Нептуна, поясе Койпера и Облаке Оорта.

## Публикации по теме диссертации

- [1] Abdo, A. A., Allen, B., Aune, T., et al. 2008, A Measurement of the Spatial Distribution of Diffuse TeV Gamma-Ray Emission from the Galactic Plane with Milagro, *Astrophys. J.*, 688, 1078
- [2] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2009, Fermi Large Area Telescope Measurements of the Diffuse Gamma-Ray Emission at Intermediate Galactic Latitudes, *Phys. Rev. Lett.*, 103, 251101
- [3] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2009, Fermi large area telescope observations of the cosmic-ray induced  $\gamma$ -ray emission of the Earth's atmosphere, *Phys. Rev. D*, 80, 122004
- [4] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2009, Fermi LAT Observation of Diffuse Gamma Rays Produced Through Interactions Between Local Interstellar Matter and High-energy Cosmic Rays, *Astrophys. J.*, 703, 1249
- [5] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2010, Fermi Observations of Cassiopeia and Cepheus: Diffuse Gamma-ray Emission in the Outer Galaxy, *Astrophys. J.*, 710, 133
- [6] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2010, Spectrum of the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission Derived from First-Year Fermi Large Area Telescope Data, *Phys. Rev. Lett.*, 104, 101101
- [7] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2011, Fermi Large Area Telescope Observations of Two Gamma-Ray Emission Components from the Quiescent Sun, *Astrophys. J.*, 734, 116
- [8] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2012, Fermi Observations of  $\gamma$ -Ray Emission from the Moon, *Astrophys. J.*, 758, 140

- [9] Ackermann, M., Ajello, M., Baldini, L., et al. 2011, Constraints on the Cosmic-ray Density Gradient Beyond the Solar Circle from Fermi  $\gamma$ -ray Observations of the Third Galactic Quadrant, *Astrophys. J.*, 726, 81
- [10] Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., et al. 2012, Fermi-LAT Observations of the Diffuse  $\gamma$ -Ray Emission: Implications for Cosmic Rays and the Interstellar Medium, *Astrophys. J.*, 750, 3
- [11] Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., et al. 2012, GeV Observations of Star-forming Galaxies with the Fermi Large Area Telescope, *Astrophys. J.*, 755, 164
- [12] Ackermann, M., Ajello, M., Albert, A., et al. 2014, Inferred Cosmic-Ray Spectrum from Fermi Large Area Telescope  $\gamma$ -Ray Observations of Earth's Limb, *Phys. Rev. Lett.*, 112, 151103
- [13] Ackermann, M., Albert, A., Atwood, W. B., et al. 2014, The Spectrum and Morphology of the Fermi Bubbles, *Astrophys. J.*, 793, 64
- [14] Ackermann, M., Ajello, M., Albert, A., et al. 2015, The Spectrum of Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission between 100 MeV and 820 GeV, *Astrophys. J.*, 799, 86
- [15] Ajello, M., Albert, A., Atwood, W. B., et al. 2016, Fermi-LAT Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission toward the Galactic Center, *Astrophys. J.*, 819, 44
- [16] Barbiellini, G., Bastieri, D., Bechtol, K., et al. 2014, Fermi Large Area Telescope Observations of Blazar 3C 279 Occultations by the Sun, *Astrophys. J.*, 784, 118
- [17] Bouchet, L., Strong, A. W., Porter, T. A., et al. 2011, Diffuse Emission Measurement with the SPectrometer on INTEGRAL as an Indirect Probe of Cosmic-Ray Electrons and Positrons, *Astrophys. J.*, 739, 29
- [18] Cummings, A. C., Stone, E. C., Heikkila, B. C., et al. 2016, Galactic Cosmic Rays in the Local Interstellar Medium: Voyager 1 Observations and Model Results, *Astrophys. J.*, 831, 18
- [19] de Nolfo, G. A., Moskalenko, I. V., Binns, W. R., et al. 2006, Observations of the Li, Be, and B isotopes and constraints on cosmic-ray propagation, *Adv. Space Res.*, 38, 1558
- [20] Hayashida, M., Stawarz, L., Cheung, C. C., et al. 2013, Discovery of GeV Emission from the Circinus Galaxy with the Fermi Large Area Telescope, *Astrophys. J.*, 779, 131
- [21] Jóhannesson, G., Ruiz de Austri, R., Vincent, A. C., et al. 2016, Bayesian Analysis of Cosmic Ray Propagation: Evidence against Homogeneous Diffusion, *Astrophys. J.*, 824, 16

- [22] Kachelriess, M., Moskalenko, I. V., & Ostapchenko, S. S. 2014, Nuclear Enhancement of the Photon Yield in Cosmic Ray Interactions, *Astrophys. J.*, 789, 136
- [23] Kachelriess, M., Moskalenko, I. V., & Ostapchenko, S. S. 2015, New Calculation of Antiproton Production by Cosmic Ray Protons and Nuclei, *Astrophys. J.*, 803, 54
- [24] Mashnik, S. G., Gudima, K. K., Moskalenko, I. V., et al. 2004, CEM2K and LAQGSM codes as event generators for space-radiation-shielding and cosmic-ray-propagation applications, *Adv. Space Res.*, 34, 1288
- [25] McEnery, J. E., Moskalenko, I. V., & Ormes, J. F. 2004, GLAST: Understanding the High Energy Gamma-Ray Sky, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 304, Cosmic Gamma-Ray Sources, ed. K. S. Cheng & G. E. Romero, 361–395
- [26] Moskalenko, I. V. 2013, Cosmic Rays in the Milky Way and Beyond, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 243, 85
- [27] Moskalenko, I. V., Digel, S. W., Porter, T. A., et al. 2007, Understanding limitations in the determination of the diffuse Galactic  $\gamma$ -ray emission, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 173, 44
- [28] Moskalenko, I. V., & Jourdain, E. 1997, Positron propagation in semi-relativistic plasmas: particle spectra and the annihilation line shape., *Astron. Astrophys.*, 325, 401
- [29] Moskalenko, I. V., & Porter, T. A. 2007, The Gamma-Ray Albedo of the Moon, *Astrophys. J.*, 670, 1467
- [30] Moskalenko, I. V., & Porter, T. A. 2009, Isotropic Gamma-Ray Background: Cosmic-Ray-Induced Albedo from Debris in the Solar System?, *Astrophys. J. Lett.*, 692, L54
- [31] Moskalenko, I. V., Porter, T. A., & Digel, S. W. 2006, Inverse Compton Scattering on Solar Photons, Heliospheric Modulation, and Neutrino Astrophysics, *Astrophys. J. Lett.*, 652, L65
- [32] Moskalenko, I. V., Porter, T. A., Digel, S. W., et al. 2008, A Celestial Gamma-Ray Foreground Due to the Albedo of Small Solar System Bodies and a Remote Probe of the Interstellar Cosmic-Ray Spectrum, *Astrophys. J.*, 681, 1708
- [33] Moskalenko, I. V., Porter, T. A., & Strong, A. W. 2006, Attenuation of Very High Energy Gamma Rays by the Milky Way Interstellar Radiation Field, *Astrophys. J. Lett.*, 640, L155
- [34] Moskalenko, I. V., & Strong, A. W. 1998, Production and Propagation of Cosmic-Ray Positrons and Electrons, *Astrophys. J.*, 493, 694

- [35] Moskalenko, I. V., & Strong, A. W. 1999, Positrons from particle dark-matter annihilations in the Galactic halo: propagation Green's functions, *Phys. Rev. D*, 60, 063003
- [36] Moskalenko, I. V., & Strong, A. W. 1999, Puzzles of Galactic continuum gamma-rays, *Astrophys. Lett. Comm.*, 38, 445
- [37] Moskalenko, I. V., & Strong, A. W. 2000, Anisotropic Inverse Compton Scattering in the Galaxy, *Astrophys. J.*, 528, 357
- [38] Moskalenko, I. V., & Strong, A. W. 2000, Diffuse Galactic  $\gamma$ -rays: Constraining Cosmic-Ray Origin and Propagation, *Astrophys. Space Science*, 272, 247
- [39] Moskalenko, I. V., Strong, A. W., Mashnik, S. G., et al. 2003, Challenging Cosmic-Ray Propagation with Antiprotons: Evidence for a "Fresh" Nuclei Component?, *Astrophys. J.*, 586, 1050
- [40] Moskalenko, I. V., Strong, A. W., Ormes, J. F., et al. 2005, Propagation of secondary antiprotons and cosmic rays in the Galaxy, *Adv. Space Res.*, 35, 156
- [41] Moskalenko, I. V., Strong, A. W., Ormes, J. F., et al. 2002, Secondary Antiprotons and Propagation of Cosmic Rays in the Galaxy and Heliosphere, *Astrophys. J.*, 565, 280
- [42] Moskalenko, I. V., Strong, A. W., & Reimer, O. 1998, Diffuse galactic gamma rays, cosmic-ray nucleons and antiprotons, *Astron. Astrophys.*, 338, L75
- [43] Moskalenko, I. V., Strong, A. W., & Reimer, O. 2004, Diffuse Gamma Rays, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 304, *Cosmic Gamma-Ray Sources*, ed. K. S. Cheng & G. E. Romero, 279–310
- [44] Murphy, E. J., Porter, T. A., Moskalenko, I. V., et al. 2012, Characterizing Cosmic-Ray Propagation in Massive Star-forming Regions: The Case of 30 Doradus and the Large Magellanic Cloud, *Astrophys. J.*, 750, 126
- [45] Ogliore, R. C., Stone, E. C., Leske, R. A., et al. 2009, The Phosphorus, Sulfur, Argon, and Calcium Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Ray Source, *Astrophys. J.*, 695, 666
- [46] Porter, T. A., Moskalenko, I. V., & Strong, A. W. 2006, Inverse Compton Emission from Galactic Supernova Remnants: Effect of the Interstellar Radiation Field, *Astrophys. J. Lett.*, 648, L29
- [47] Porter, T. A., Moskalenko, I. V., Strong, A. W., et al. 2008, Inverse Compton Origin of the Hard X-Ray and Soft Gamma-Ray Emission from the Galactic Ridge, *Astrophys. J.*, 682, 400

- [48] Ptuskin, V. S., Moskalenko, I. V., Jones, F. C., et al. 2005, Propagation model for cosmic ray species in the Galaxy, *Adv. Space Res.*, 35, 162
- [49] Ptuskin, V. S., Moskalenko, I. V., Jones, F. C., et al. 2006, Dissipation of Magnetohydrodynamic Waves on Energetic Particles: Impact on Interstellar Turbulence and Cosmic-Ray Transport, *Astrophys. J.*, 642, 902
- [50] Seo, E.-S., & Moskalenko, I. V. 2014, PREFACE: Cosmic ray origins: The Viktor Hess centennial anniversary, *Adv. Space Res.*, 53, 1377
- [51] Strong, A. W., & Moskalenko, I. V. 1998, Propagation of Cosmic-Ray Nucleons in the Galaxy, *Astrophys. J.*, 509, 212
- [52] Strong, A. W., & Moskalenko, I. V. 1999, Galactic Cosmic Rays & Gamma Rays: A Synthesis, in *ASPC Series, Vol. 171, LiBeB Cosmic Rays, and Related X- and Gamma-Rays*, ed. R. Ramaty, E. Vangioni-Flam, M. Cassé, & K. Olive, 162–169
- [53] Strong, A. W., & Moskalenko, I. V. 2000, Galactic cosmic rays and gamma rays: a unified approach, in *Horizons in World Physics, Vol. 230, Topics in Cosmic Ray Astrophysics*, ed. M. A. DuVernois (New York: Nova Science Publishers), 81–103
- [54] Strong, A. W., & Moskalenko, I. V. 2001, Diffuse Galactic Continuum Gamma-Rays: A tracer of cosmic rays, in *The Universe in Gamma Rays*, ed. V. Schönfelder (Springer), 207–231
- [55] Strong, A. W., & Moskalenko, I. V. 2001, Models for galactic cosmic-ray propagation, *Adv. Space Res.*, 27, 717
- [56] Strong, A. W., Moskalenko, I. V., & Ptuskin, V. S. 2007, Cosmic-Ray Propagation and Interactions in the Galaxy, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 57, 285
- [57] Strong, A. W., Moskalenko, I. V., & Reimer, O. 2000, Diffuse Continuum Gamma Rays from the Galaxy, *Astrophys. J.*, 537, 763
- [58] Strong, A. W., Moskalenko, I. V., & Reimer, O. 2004, A New Determination of the Extragalactic Diffuse Gamma-Ray Background from EGRET Data, *Astrophys. J.*, 613, 956
- [59] Strong, A. W., Moskalenko, I. V., & Reimer, O. 2004, Diffuse Galactic Continuum Gamma Rays: A Model Compatible with EGRET Data and Cosmic-Ray Measurements, *Astrophys. J.*, 613, 962
- [60] Strong, A. W., Moskalenko, I. V., Reimer, O., et al. 2004, The distribution of cosmic-ray sources in the Galaxy,  $\gamma$ -rays and the gradient in the CO-to-H<sub>2</sub> relation, *Astron. Astrophys.*, 422, L47

- [61] Strong, A. W., Porter, T. A., Digel, S. W., et al. 2010, Global Cosmic-ray-related Luminosity and Energy Budget of the Milky Way, *Astrophys. J. Lett.*, 722, L58
- [62] Tibaldo, L., Digel, S. W., Casandjian, J. M., et al. 2015, Fermi-LAT Observations of High- and Intermediate-velocity Clouds: Tracing Cosmic Rays in the Halo of the Milky Way, *Astrophys. J.*, 807, 161
- [63] Trotta, R., Jóhannesson, G., Moskalenko, I. V., et al. 2011, Constraints on Cosmic-ray Propagation Models from A Global Bayesian Analysis, *Astrophys. J.*, 729, 106
- [64] Vladimirov, A. E., Jóhannesson, G., Moskalenko, I. V., et al. 2012, Testing the Origin of High-energy Cosmic Rays, *Astrophys. J.*, 752, 68
- [65] Vladimirov, A. E., Digel, S. W., Jóhannesson, G., et al. 2011, GALPROP WebRun: An internet-based service for calculating galactic cosmic ray propagation and associated photon emissions, *Computer Phys. Comm.*, 182, 1156