

ОТЗЫВ

официального оппонента Ткачева Игоря Ивановича о диссертационной работе Москаленко Игоря Владимировича «Галактические космические лучи и диффузное излучение», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

В представленной диссертации на защиту выносятся, теперь уже всемирно известная, модель распространения Галактических космических лучей, GALPROP, и оригинальные физические результаты, полученные соискателем и автором модели, с ее помощью. Правильный и точный расчет распространения Галактических космических лучей, и вторичного излучения возникающего в результате этих процессов, чрезвычайно важен для множества астрофизических приложений. В частности, такой расчет дает возможность корректно описать гамма-излучение Галактики и выделить внегалактический диффузный фон. Эти результаты находят, в свою очередь, множество приложений, от физики космических лучей сверхвысоких энергий, где они важны для установления ограничений на потоки и химический состав, до интерпретации результатов по не прямым астрофизическим поискам проявлений темной материи. Поэтому новизна и актуальность диссертации И.В. Москаленко не вызывают сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, содержит 172 рисунка, 35 таблиц, список литературы из 649 наименований, всего 446 страниц текста. Содержание диссертации по главам представлено следующим образом:

Во **Введении**, помимо общего обзора основных проблем, затронутых в диссертации, сформулированы актуальность темы исследования, цели и задачи диссертационной работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

Перечислены конференции и семинары, на которых докладывались результаты. Указана структура диссертации, приведено распределение материала по главам.

В Главе 2 дается общее представление о космических лучах. Описывается важная для дальнейшего теория переноса частиц и модели распространения КЛ в межзвездной среде. Обсуждаются процессы связанные с диффузией КЛ в межзвездной среде, энергетическими потерями, выводится транспортное уравнение. Описаны методы и подходы к моделированию диффузного излучения и использованию модельных карт распределения диффузного гамма-излучения для анализа точечных и протяженных источников.

В третьей главе дается общее описание модели GALPROP. Изложено предназначение и основные принципы, лежащие в ее основании. Описаны конечно-разностные численные схемы решения систем нестационарных транспортных уравнений, используемые в GALPROP. В общей сложности в модели учитывается около 90 различных компонент космических лучей. Приведены детали расчета ядерных реакций, которые необходимо учитывать. Что бы подчеркнуть масштабность модели, отмечу, что в ней учитывается около 1000 каналов только ядерных реакций, которые имеют первостепенное значение для правильных расчетов превращений ядерной компоненты космических лучей в процессе распространения в Галактике. Даются выражения для энергетических потерь электронов вследствие ионизации, Кулоновского рассеяния, тормозного излучения в нейтральной и ионизированной среде, Комптоновского рассеяния с использованием сечения Клейна-Нишины и синхротронного излучения. 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. Описываются процессы генерации диффузного синхротронного и гамма-излучения. Приводится формализм для вычисления синхротронного излучения

генерируемого электронами в случайном и упорядоченном поле. Здесь же дано описание пользовательского интерфейса WebRun5, позволяющего производить вычисления с использованием модели GALPROP онлайн, что привело к значительному техническому упрощению расчетов распространения космических лучей и связанных с ними диффузных излучений для широкого круга исследователей.

В четвертой главе приводятся конкретные результаты использования модели GALPROP для интерпретации данных полученных различными экспериментами в физике космических лучей, таких как: Voyager 1, данных по антипротонам, по позитронной фракции и по суммарному спектру электронов. Вычисляется энергетический бюджет Галактики, ее полная светимость в электромагнитном диапазоне, и излучение в различных компонентах космических лучей. В заключении этой части описывается использование различных современных статистических методов и обучаемых нейронных сетей для анализа моделей распространения космических лучей в Галактике, определения параметров диффузии и состава источников.

В пятой главе соискателем рассматривается моделирование диффузного гамма-излучения. Дается описание самосогласованных моделей построенных на основе GALPROP. В частности, приводятся результаты вычисления процесса рождения пар фотонами высоких энергий на всем энергетическом спектре фотонов межзвездной среды. Показано, что использование этих самосогласованных моделей, включающих все компоненты космических лучей и процессы генерации диффузного гамма-излучения, позволяет отбирать наиболее реалистичные гипотезы, удовлетворяющие всем наблюдаемым ограничениям. Далее приводится наиболее полный в настоящее время анализ диффузного Галактического гамма-излучения с использованием данных гамма-обсерватории нового поколения Ферми. Особый интерес вызывают исследования в разделах 5.4 – 5.6, где приводятся результаты применения модели GALPROP к задачам

анализа излучения от центральной части Галактики, определения спектра и морфологии пузырей Ферми, определения спектра изотропного излучения.

В Главе 6 приводится теоретическое предсказание эффекта обратного Комптоновского рассеяния электронов в составе Галактических космических лучей на фотонах Солнца, выводится спектр этого излучения. Далее приводятся результаты наблюдения этого эффекта телескопом Ферми. Выполнены расчеты спектров γ -излучения от взаимодействия Галактических космических лучей с атмосферой Земли, поверхностью Луны, другими телами Солнечной системы, а также с пылью в Солнечной системе. Эти результаты чрезвычайно важны, в частности, для правильного определения истинного Галактического и изотропного внегалактического излучения.

В процессе изучения текста диссертации у меня не возникло существенных замечаний по ее содержанию. Материал диссертации изложен ясно и подробно. В качестве мелких несущественных замечаний отмечу следующее. Вместо общеупотребительного термина «внегалактический» автор использует жаргонизм «экстрагалактический». Можно было бы также выразить субъективное пожелание сделать текст диссертации не таким объемным, хотя я понимаю, что с учетом масштабности излагаемых результатов, это, возможно, потребовало бы значительных дополнительных усилий от соискателя.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации были представлены автором примерно в сотне приглашенных и обзорных докладов на наиболее значимых конференциях по астрофизике, как за рубежом так и в России. По теме диссертации опубликовано 65 работ, из них 58 в высокорейтинговых реферируемых журналах, в частности, в Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. D, Astrophys. J., Astrophys. J. Lett., Adv. Space Res., и других журналах, имеется 7 статей в сборниках трудов конференций. За научные результаты, представленные в диссертации, соискатель был избран почетным членом Американского Физического Общества. Особо хочу отметить, что разработанная в

диссертации модель распространения космических лучей и генерации сопровождающего гамма-излучения, GALPROP, является в настоящее время стандартным инструментом, с которым работают тысячи исследователей во всем мире, и с помощью которого получены известные и важные результаты многих экспериментальных групп, таких как Ферми, AMS-02, ACE, PAMELA, HAWC, Planck и других.

Таким образом, диссертационная работа выполнена на очень высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Москаленко Игорь Владимирович**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02. – астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент:
доктор физ.-мат. наук
зав. отделом экспериментальной
физики ИЯИ РАН
академик РАН



Ткачев Игорь Иванович

3 марта 2017 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, вл. 27.
Тел. 8(495)851-01-90
e-mail: tkachev@inr.ru

Подпись И.И. Ткачева удостоверяю:
Ученый секретарь ИЯИ РАН к.ф.м.н.

А.Д. Селидовкин