

**Отзыв официального оппонента на диссертацию
И.В.Москаленко,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук.**

Целью диссертационной работы И.В.Москаленко являются разработка целостной модели распространения космических лучей (КЛ) в Галактике, их взаимодействий с межзвездной средой, генерации диффузных излучений, а также изучение взаимодействия Галактических КЛ с объектами Солнечной системы. В диссертации приводится описание уникальной модели ГАЛПРОП (GALPROP) и её использования для интерпретации различных астрофизических данных.

В представленной работе приводятся результаты как теоретических расчетов и моделирования, выполненные автором так и результаты наблюдений полученные коллаборацией Ферми, в составе которой он участвовал.

Созданная автором (совместно с Андрю Стронгом) модель ГАЛПРОП действительно во многих отношениях является уникальной. Фактически, она стала первой и до сих пор остается единственной полностью самосогласованной моделью распространения КЛ включающей в себя все известные частицы (электроны, позитроны, антипротоны) и все стабильные и долгоживущие изотопы от водорода до никеля (всего около 90 различных частиц). При этом учитывается генерация вторичных частиц и ядер, включая короткоживущие, полностью отслеживаются цепочки их распадов. Вычисления распространения ядер выполняются с учетом реалистической модели межзвездной среды включающей в себя различные компоненты газа (молекулярный, атомарный, ионизованный), а также радиационное (оптическое, инфракрасное, радио-) излучения и магнитные (упорядоченное и случайное) поля. В процессе распространения КЛ самосогласованно учитывается также и генерация разного рода сопутствующих процессов в межзвездной среде (синхротронного, тормозного, обратного Комптоновского рассеяния, распадов нейтральных мезонов и т.д.), создающих т.н. диффузное излучения, в радио-, рентгеновском, и гамма- диапазонах длин волн.

Автором предложен и реализован оригинальный метод решения систем нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, т.н. транспортных уравнений, позволяющий находить точные решения даже при наличии ограниченных вычислительных ресурсов персонального компьютера в разумное время от десятков минут до нескольких часов. Написан оригинальный пакет программ для вычисления эффективных сечений ядерных реакций, таких как сечения фрагментации и рождения вторичных изотопов, а также для описания цепочек их распадов до сих не имеющий аналогов в мировой практике. При этом учитывались как имеющиеся экспериментальные данные и пакеты программ, проверенные и протестированные автором, так и оригинальные вычисления и параметризации. Для этого автором выполнены детальные расчеты сечений рождения вторичных частиц (нейтральных и заряженных мезонов, антипротонов) и их распадов, построены аппроксимации для их использования в модельных вычислениях. Модель ГАЛПРОП при этом включает также и аппроксимации

полученные другими авторами. Автором построены реалистические модели компонент межзвездной среды: различных компонент газа, радиационного и магнитного полей, опирающиеся на имеющиеся астрономические измерения. Можно сказать, что эти, собранные все вместе компоненты, представляют собой не просто одну из моделей распространения КЛ, а детально проработанную уникальную модель Галактики, содержащую подробное описание всех физических процессов происходящих в межзвездной среде.

Кроме описанных явлений и реакций, в пакете учтены процессы энергетических потерь частицами КЛ (ионизационные и Кулоновские потери, тормозное излучение в нейтральном и ионизованном газе, обратное Комптоновское и синхротронное излучения), катастрофические потери в случае неупругих рассеяний, подхват, отрыв и выбивание электронов и К-захват. Вычисления вероятностей процессов с участием атомных электронов необходимы для учета изменения времён жизни водородоподобных или гелиоподобных атомов в составе КЛ распадающихся через К-захват.

Автором впервые получены формулы расчета обратного Комптоновского рассеяния для произвольных спектральных, угловых и пространственных распределений электронов и фотонов. Результаты данной работы использованы для расчета спектров и распределения гамма-излучения генерированного в процессе анизотропного обратного Комптоновского рассеяния фоновых тепловых фотонов электронами КЛ в Галактике, а также фотонов солнечного излучения электронами КЛ в гелиосфере. В обоих случаях процессы Комптоновского рассеяния играют первостепенную роль, а учет анизотропии распределений электронов и фотонов оказывает существенное влияние на результаты.

Помимо развития модели диффузного Галактического излучения автором впервые изучены особенности генерации гамма-излучения при взаимодействии Галактических КЛ с телами Солнечной системы, предсказано наличие протяженной компоненты гамма-излучения Солнца (вследствие обратного Комптоновского рассеяния электронами КЛ фотонов солнечного излучения), найдены её спектр и угловое распределение на небе. Теоретические расчеты автора нашли блестящее подтверждение в результате анализа наблюдений гамма-телескопа Ферми, также представленного в диссертации.

Разработка модели ГАЛПРОП началась примерно 20 лет назад, когда ничего подобного этой целостной модели еще просто не существовало. Широко использовались малореалистичные варианты однородной модели (Leaky-Box), где Галактика представлялась в виде «ящика с утечкой» однородно заполненного газом, источниками и частицами КЛ. Несмотря на то, что все основные идеи и формализм модели ГАЛПРОП опубликованы автором в общедоступных журналах, а сама программа свободно распространяется, до настоящего времени не существует другой модели схожего уровня.

В основу модели ГАЛПРОП были положены два основополагающих принципа, которые в наши дни кажутся естественными, но 20 лет назад требовались определенная смелость и научное предвидение, чтобы начать эту работу, успех которой вовсе не был гарантирован. Первая и основная идея заключалась в том, что все измерения КЛ и диффузного излучения относятся к одной системе – нашей Галактике и, следовательно, модель должна быть самосогласованной и описывать

все имеющиеся наблюдения. Вторая идея заключалась в стремлении разработать модель, максимально приближенную к реальности и содержащую минимум упрощающих предположений. В расчётах должна была использоваться наиболее детальная доступная информация о структуре Галактики и характеристиках различных процессов и реакций, полученная в результате астрономических, астрофизических, и физических измерений и теоретических разработок. Этот подход полностью себя оправдал – за эти годы автором и его коллегой А.Стронгом была создана уникальная целостная модель с успехом (как мы покажем ниже) применяемая для решения многих астрофизических задач и активно используемая мировым научным сообществом. Очень важно что авторы сделали свою модель общедоступной и в последних- версиях не требующей сложной инсталляции на компьютерах пользователей. Существование такой общепризнанной- можно сказать ставшей «стандартной» – модели несомненно существенно повлияло на бурное развитие физики КЛ в последнее десятилетие.

Происходит и качественный скачок в астрономии, где наблюдения теперь ведутся во всех диапазонах энергий от микроволнового радио- до ТЭВного гамма-излучения. Благодаря новым технологиям, применяемым в астрофизике, значительным размерам установок и широкому использованию космических аппаратов удалось кардинально улучшить энергетическое и угловое разрешение используемых детекторов и выйти на новый уровень точности, недоступный ещё совсем недавно. Все это привело к многочисленным открытиям, подробно обсуждаемым в диссертации, и принципиальному изменению наших представлений о процессах происходящих в Галактике. На этой стадии, когда обнаружено много новых, еще не вполне понятых в настоящее время явлений, особую значимость приобретают реалистичные целостные модели подобные ГАЛПРОП, активно используемые для анализа и интерпретации данных многочисленных новых экспериментов (Voyager 1, ACE/CRIS, PAMELA, AMS-02, PLANCK, INTEGRAL, Fermi, Milagro, HAWC и многих других).

Кроме описания самой модели ГАЛПРОП в диссертации представлены примеры ее использования для расчетов спектров различных компонент КЛ, их изотопного состава, определения параметров межзвездной среды, глобальных свойств Галактики, интерпретация имеющихся данных, а также расчеты диффузного излучения и его использования для анализа излучений из центра Галактики и протяженных источников (таких, например, как недавно открытые Пузыри Ферми).

Перейдем теперь к формальному отзыву.

Диссертационная работа имеет четкую и логичную структуру, изложена на 446 страницах и состоит из введения, пяти частей и списка использованной литературы. Список литературы включает 649 наименований, охватывает широчайший круг публикаций по затронутым в диссертации вопросам и характеризует высокий уровень компетентности диссертанта в освещаемых вопросах. По теме диссертации опубликовано 65 работ в ведущих научных журналах рекомендованных ВАК РФ, а всего автором опубликовано около 300 работ. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Часть первая (введение) даёт общую характеристику работы. Во второй части даётся общее представление о КЛ, диффузии, энергетических потерях, формировании химического состава КЛ, ядерных реакциях и реакциях рождения вторичных частиц и изотопов, а также прочих процессах в межзвездной среде влияющих на распространение КЛ и генерацию диффузного излучения, даётся описание диффузионных моделей и диффузного излучения. 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 под воздействием КЛ низких энергий.

Часть третья посвящена подробному описанию модели ГАЛПРОП, истории её создания и основных принципов, заложенных в её основу. Приводятся детали численной схемы, метода решения и различных физических процессов, включенных в модель. Описываются принципы построения распределений компонент межзвёздной среды: различных компонент газа, радиационного и магнитного полей. Дано описание процессов генерации диффузного синхротронного и гамма-излучения, способы расчета спектров и распределений этих излучений. Даётся трактовка солнечной модуляции. В последней главе описывается компьютерный кластер galprop.stanford.edu и пользовательский интерфейс WebRun, позволяющий производить вычисления с использованием модели ГАЛПРОП онлайн.

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. Описывается применение Байесовских методов и обучаемых нейронных сетей к задаче определения параметров диффузии и состава источников КЛ.

Пятая часть посвящена описанию телескопа Fermi и методам моделирования 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 шестой части приводятся результаты расчетов взаимодействия КЛ с телами Солнечной системы. Это одна из компонент диффузного излучения, т.к. находясь внутри Солнечной системы мы смотрим на нашу Галактику и всю Вселенную сквозь излучение, генерируемое этими объектами. В частности, даётся предсказание спектра гамма-излучения генерируемого в процессе обратного Комптоновского рассеяния фотонов солнечного света на электронах Галактических КЛ и результаты наблюдения этого эффекта при помощи телескопа Fermi.

К определенным недостаткам диссертации я бы отнес понятную увлеченность автора разработанной им моделью ГАЛПРОП. Хотелось бы в четвертой, пятой и шестой частях работы при интерпретации и объяснении экспериментальных данных увидеть более детальное сравнение с другими моделями- как предшествовавшими ГАЛПРОП, так и разрабатываемыми другими авторами в настоящее время.

В целом диссертация написана очень профессионально, живым языком, со множеством иллюстраций и достаточно легко читается. Количество опечаток в тексте является типичным для работ подобного уровня и вполне укладывается в статистическую норму. При небольшой доработке я бы рекомендовал издать её как учебник по современной астрофизике (надеюсь сначала на русском языке).

Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Диссертация И. В. Москаленко актуальна по тематике, содержит уникальные в научном отношении результаты и свидетельствует об очень высокой квалификации её автора. Актуальность результатов, представленных в диссертации, подтверждается и очень высокими индексами цитирования вошедших в нее работ. Сделанные выше замечания несколько не умаляют научной значимости работы.

Представленная работа – это результат двух десятилетий работы автора, которая оказала существенное влияние на развитие соответствующих областей науки. Основные результаты диссертации публиковались в ведущих международных научных журналах в течение 20 лет и докладывались практически на всех основных конференциях по тематике диссертации.

Диссертант является настоящим первопроходцем и общепризнанным ведущим экспертом в данной области. В 2010 г. он был избран почётным членом Американского Физического Общества 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."

По актуальности избранной темы, научной новизне, практической значимости, достоверности и обоснованности решений и выводов диссертация И.В.Москаленко является фундаментальным исследованием и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а её автор, Москаленко Игорь Владимирович, несомненно заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия».

Академик РАН,
д.ф.-м.н.,
директор
Института космических исследований РАН



Л.М.ЗЕЛЕНЬИ