

ОТЗЫВ научного руководителя
на диссертацию Долгих Константина Александровича
«Построение модели горячих пятен космических лучей предельно высоких
энергий с учётом межгалактических магнитных полей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
1.3.3 — теоретическая физика.

Одна из важнейших задач современной релятивистской астрофизики — определение природы и источников космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ). Такие источники должны обеспечивать производство частиц наиболее высоких энергий из доступных для наблюдений сегодня. Процессы, происходящие в таких источниках, а также при распространении космических лучей от источника к Земле обладают рекордными энергиями как в системе отсчета реликтового излучения, так и в системе центра масс, что определяет высокую значимость задачи для физики фундаментальных взаимодействий. Сегодня в Обсерватории имени Пьера Оже и в эксперименте Telescope Array накоплена беспрецедентно высокая статистика наблюдений космических лучей с энергиями выше 10 ЭэВ и получен ряд важных результатов по анизотропии направлений прихода таких частиц. В частности, в Обсерватории имени Пьера Оже обнаружена дипольная составляющая в распределении направлений прихода КЛПВЭ, в обоих экспериментах получены свидетельства существования областей с увеличенным наблюдаемым потоком космических лучей, так называемых горячих пятен. Несмотря на ожидания научного сообщества и ряд полученных результатов, проблема источников частиц таких энергий остается нерешенной. Космические лучи (КЛ), обладая электрическим зарядом, отклоняются в галактических и межгалактических магнитных полях, что не позволяет непосредственно интерпретировать направления прихода КЛ как направления на их источник. Актуальность диссертации К.А. Долгих связана с тем, что определение направления на источник требует корректного учета распространения космических лучей в галактических и

межгалактических магнитных полях. В диссертации К.А. Долгих выполнено систематическое исследование влияния турбулентного межгалактического поля на наблюдаемые изображения источников КЛ. Выбранный подход позволил К.А. Долгих обнаружить новый каустикоподобный режим диффузии, реализующийся в широком диапазоне параметров магнитных полей между предельными случаями — режимом линейного отклонения частиц и классической диффузией. Кроме того, дана интерпретация горячего пятна на карте направлений прихода КЛ в области Центавра А.

В первой главе диссертации К.А. Долгих выполнено масштабное моделирование распространения протонов ультравысоких энергий в турбулентных межгалактических магнитных полях с колмогоровским спектром с помощью современного программного пакета CRbeam. Впервые показано, что существует режим, в котором КЛ, испущенные источником, образуют на сфере каустикоподобные структуры, которые названы автором магнитными узлами, магнитными филаментами и магнитными войдами. Распределение потока КЛ на сфере существенно отличается от известных ранее приближений: линейное отклонение в магнитном поле и приближение классической диффузии.

Во второй главе диссертации исследованы изображения источников космических лучей, регистрируемые наблюдателем. Для этого К.А. Долгих разработал алгоритм прицеливания, позволяющий выделить траектории частиц, попадающие в источник, используя существенно меньшее общее число моделируемых траекторий. Показано, что изображение источника в стохастических магнитных полях качественно различается в трех различных режимах. В дополнение к известным режимам линейных отклонений на малых расстояниях и диффузии на больших расстояниях до источника, впервые построены изображения источника в режиме промежуточных расстояний. Именно этот режим наиболее интересен с точки зрения интерпретации наблюдаемой анизотропии космических лучей ультравысоких энергий в виде «горячих пятен» на карте неба. В диссертации К.А. Долгих показано, что в режиме промежуточных расстояний очень вероятно, что в заданной точке наблюдения поток от источника будет ослаблен в 10 раз и более и существует

вероятность порядка 10%, что поток будет усилен по крайней мере в два раза. Значимость результата состоит в том, что в данном режиме неверно предположение об одинаковых источниках, обычно используемое при проверке моделей популяции. Источники будут наблюдаться с усилением или ослаблением в зависимости от места их расположения в трехмерной структуре магнитного поля, что необходимо учитывать при оценке плотности источников.

В третьей главе диссертации К.А. Долгих показано, что для распространения космических лучей в турбулентных межгалактических магнитных полях неприменимо стандартное приближение диффузионной теории, состоящее в том, что распространения каждой частицы считается независимо случайным. Существенно то, что, хотя мы имеем дело со стохастическим магнитным полем, речь идет об одной его конкретной случайной реализации в некоторой ближней к наблюдателю области Вселенной. В результате, размер изображения источника получается меньше, чем размер, предсказанный в модели стандартной диффузии, а его положение смещено. В стандартном диффузионном приближении положение изображения остается несмещенным, что не соответствует результату распространения в турбулентном магнитном поле. Кроме К.А. Долгих рассмотрено горячее пятно на карте космических лучей ультравысоких энергией, находящееся вблизи радиогалактики Центавр А. Важно, что несмотря на отклонение в галактических магнитных полях КЛ, испущенных активной галактикой Центавр А, эта галактика может быть источником наблюдаемого избытка, если в результате случайности отклонения в межгалактических магнитных полях компенсируют отклонения в галактических полях. Показано, что такие конфигурации внегалактических полей существуют, но, учитывая случайность поля, вероятность этого составляет около 0.5%. В то же время, показано, что избыток в окрестности Центавра А может быть следствием отклонения частиц, испущенных галактикой со вспышкой звездообразования M83.

В приложении 1 описан разработанный К.А. Долгих программный пакет, позволяющий визуализировать результаты проведенного масштабного моделирования. Этот код помог существенно ускорить анализ и интерпретацию

результатов диссертации. В приложении 2 дан вывод выражения для среднеквадратичного угла отклонения частиц и углового размера изображения источника в рамках стандартной диффузионной теории.

Вклад К.А. Долгих во все работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим. К.А. Долгих самостоятельно выполнил масштабные симуляции с помощью пакета CRBeam, выполнил анализ изображений источников в новом режиме, получил данные о размерах и смещениях источников, дал интерпретацию горячего пятна в области Центавра А. К.А. Долгих разработал новый веб-сервер для визуализации результатов моделирования и новый модуль CRBeam, содержащий ряд функций для построения изображений источника и новый алгоритм прицеливания.

К.А. Долгих является сложившимся исследователем, имеет глубокие знания в области физики частиц, теоретической астрофизики, владеет современными вычислительными методами. Достоверность результатов, выносимых на защиту, подтверждается проведением вычислений двумя независимыми программными кодами CRBeam и CRProa. Кроме того, было показано, что, в тех случаях, когда такие сравнения возможны, промежуточные результаты диссертации согласуются с результатами других исследователей, а также с предсказаниями диффузной теории.

Диссертация «Построение модели горячих пятен космических лучей предельно высоких энергий с учётом межгалактических магнитных полей» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Долгих Константин Александрович, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

10 ноября 2025 г.

Заместитель директора по научной работе,
заведующий лабораторией обработки больших данных в физике частиц и
астрофизики ИЯИ РАН

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Г.И. Рубцов

М.П.