

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Каляшовой Марии Евгеньевны

«Скопления молодых массивных звезд как источники космических лучей и нетеплового излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия

В диссертации М.Е. Каляшовой рассматриваются компактные и разреженные скопления молодых звезд в Галактике как ускорители космических лучей высоких энергий. Несмотря на то, что исследования космических лучей (КЛ) ведутся уже многие годы, целый ряд вопросов, в первую очередь связанных с источниками высокоэнергичных КЛ, их составом, механизмами ускорения частиц, является открытыми. В частности, внутри звездных скоплений, богатых массивными звездами, выделяется огромная кинетическая энергия за счет вспышек сверхновых и звездных ветров. Эта энергия может идти на ускорение частиц, что делает звездные скопления потенциальными источниками КЛ, в том числе с энергиями выше петаэлектронвольт. Повышенные потоки гамма-излучения в направлении на скопления звезд могут указывать на непрерывную инжекцию ускоренных частиц в межзвездную среду в этих объектах. Результаты таких наблюдений могут быть использованы для проверки и ограничения круга моделей ускорения КЛ. Еще одной до сих пор нерешенной проблемой физики космических лучей является наблюданное аномальное отношение изотопов неона $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$. Изучению всех этих вопросов и посвящена представленная диссертация, что делает ее тему, безусловно, актуальной для современной астрофизики высоких энергий.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 113 страниц и включает 32 рисунка, 8 таблиц, а также список литературы из 131 наименования.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены основные результаты, выносимые на защиту, и обоснована их научная новизна и достоверность, а также указаны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

Первая глава диссертации посвящена вычислению анизотропии и потока частиц космических лучей очень высоких (более 100 ПэВ) энергий от возможных галактических источников – компактных массивных звездных скоплений. Это необходимо, чтобы оценить возможный вклад таких источников в общий поток КЛ

очень высоких энергий. В отличие от изолированных сверхновых, система сталкивающихся ударных волн сверхновых и массивных ветров в таких скоплениях может обеспечить жесткий спектр ускоренных частиц. В смоделированном турбулентном магнитном поле Галактики найдены коэффициенты диффузии частиц для энергий порядка 1-300 ПэВ, и на основе этих коэффициентов выполнено моделирование распространения КЛ в Галактике с помощью метода Монте-Карло. Вычислены анизотропия и поток КЛ от галактических компактных скоплений. Помимо турбулентного поля, исследовано также влияние регулярного магнитного поля Галактики на распространение частиц. В результате моделирования получено, что наблюдаемые значения дипольной анизотропии КЛ энергий порядка сотен ПэВ допускают то, что значительная их часть может быть ускорена в галактических компактных массивных скоплениях.

Во второй главе выполнено моделирование спектров гамма-излучения двух галактических скоплений: Cygnus Cocoon и Westerlund 2. Эти спектры выделяются тем, что имеют излом на ТэВ-ных энергиях. В качестве основы для расчетов использована теоретическая модель распространения КЛ в турбулентной среде с ударными фронтами, что и реализуется в молодом звездном скоплении с ветрами массивных звезд или сверхновыми. Согласно этой модели, на низких энергиях распространение ускоренных частиц осуществляется в основном движениями среды (турбулентная адвекция), а на высоких энергиях является диффузионным. Этим и обусловлен излом в спектре ускоренных протонов, а следовательно, и гамма-излучения – предполагается протон-протонный механизм излучения. Найдены необходимые параметры для того, чтобы удовлетворить наблюдениям: показатель степени и длина корреляции турбулентности. Будучи применимым как к ОВ-ассоциациям, так и к компактным скоплениям, выполненное моделирование позволяет объяснить интересные особенности, наблюдаемые в гамма-спектрах некоторых звездных скоплений.

В третьей главе исследуется долгоиграющая астрофизическая проблема – избыток ^{22}Ne в космических лучах с энергиями ниже ГэВ. В звездных скоплениях может происходить эффективное ускорение вещества предполагаемых источников неоновой аномалии – ветров звезд Вольфа-Райе, на стадиях, когда они выбрасывают наибольшее количество ^{22}Ne . Это становится возможным потому, что в скоплениях вещество может ускоряться в системах сталкивающихся ветров массивных звезд еще до того, когда в скоплении начнутся вспышки сверхновых. На основе известных моделей звездной эволюции рассчитано отношение $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в КЛ, ускоренных в звездных скоплениях, и показано, что эти источники могут объяснить неоновую аномалию в Галактических КЛ.

В Заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

Представленные в диссертации результаты получены на качественно высоком уровне. Проведенные расчеты и моделирования являются существенным шагом в понимании физики и источников формирования КЛ высоких энергий и особенностей их изотопного состава. Они могут служить хорошей отправной точкой для дальнейшего развития работ по этому направлению. Автором продемонстрировано хорошее владение различными методами моделирования (МГД, Монте-Карло, кинетические модели). Еще одним достоинством диссертации является хороший и понятный стиль изложения материала и минимальное количество опечаток.

Выносимые на защиту положения хорошо обоснованы, достоверны и значимы для астрофизики высоких энергий. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах и конференциях высокого уровня, опубликованы в семи статьях, из которых в трех соискатель является первым автором.

У оппонента есть несколько вопросов к диссертации.

Возможно ли, используя предложенные модели для объяснения спектров гамма-излучения звездных скоплений, смоделировать их спектры в жестком рентгеновском диапазоне? Какие можно ожидать потоки и форму спектра диффузного излучения?

Из каких предположений при моделировании спектров разреженных звездных скоплений скорость фронта и принята равной 1000 км/с, в то время как для компактных скоплений 1500 км/с?

На рис.2.7 измерение обсерватории LHAASO для Кокона Лебедя существенно отличается от других измерений и модели. Есть ли какая-то дополнительная информация о верификации этого измерения? Имеются ли подобные измерения для других скоплений и как они согласуются с другими данными?

Было бы желательно более подробно пояснить/продемонстрировать зависимость изотопного состава вещества, ускоренного в массивном звездном скоплении от скорости начального вращения. Представляется более реалистичным принимать начальные скорости не одинаковыми для всех звезд, а имеющим некое распределение. Как при этом изменятся результаты и соответствующие выводы?

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Считаю, что диссертация М. Е. Каляшовой «Скопления молодых массивных звезд как источники космических лучей и нетеплового излучения» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а М.Е. Каляшова, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
заместитель директора по научной работе,
ФГБУН Институт космических исследований РАН
Лутовинов Александр Анатольевич

Контактные данные:

тел.: +7(495)3332222, e-mail: aal@iki.rssi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32,

Тел.: +74953332588; e-mail: iki@cosmos.ru

Подпись сотрудника Института космических
исследований РАН А.А.Лутовинова удостоверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН

А.М.Садовский

04.04.2023