

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

Каляшова Мария Евгеньевна

**СКОПЛЕНИЯ МОЛОДЫХ МАССИВНЫХ ЗВЁЗД КАК ИСТОЧНИКИ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И НЕТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Отрасль науки – Физико-математические науки,  
1.3.1 «Физика космоса, астрономия»  
Направленность – 03.06.01\_01 «Астрофизика и звездная астрономия»

Академическая степень **Исследователь.Преподаватель-исследователь**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Научный руководитель:  
д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН, профессор  
Быков Андрей Михайлович

Санкт-Петербург  
2022

Научный доклад выполнен в высшей школе фундаментальных физических исследований Физико-механического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: Быков Андрей Михайлович,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН, профессор

Рецензент: Красильщиков Александр Михайлович,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## Содержание

<b>Общая характеристика работы</b>	<b>4</b>
Актуальность темы . . . . .	4
Цели и задачи работы . . . . .	6
Научная новизна . . . . .	6
Научная и практическая значимость . . . . .	6
Методология и методы исследования . . . . .	7
Основные положения, выносимые на защиту . . . . .	7
Достоверность научных результатов . . . . .	7
Апробация работы . . . . .	8
Личный вклад . . . . .	8
Объем и структура работы . . . . .	8
<b>Содержание работы</b>	<b>8</b>
<b>Список публикаций по теме научно-квалификационной работы</b>	<b>18</b>
<b>Литература</b>	<b>18</b>

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Звёздное скопление представляет собой группу звезд, имеющих общее происхождение и близкое месторасположение. Научно-квалификационная работа посвящена исследованию молодых скоплений массивных звёзд – компактных сверхскоплений и ОВ-ассоциаций – как источников космических лучей (КЛ) и нетеплового излучения. Далее под термином «звёздное скопление» будут подразумеваться именно такие объекты.

Поиск источников Галактических космических лучей (КЛ), в том числе с энергиями выше петаэлектронвольт (ПэВ) является одной из важных задач астрофизики высоких энергий, долгие годы ждущей решения [1, 2, 3]. Наиболее естественными кандидатами в ускорители КЛ, с точки зрения энергетике, являются остатки сверхновых звезд (ОСН), ударные волны которых способны эффективно ускорять частицы за счет механизма Ферми I рода [1, 4, 5]. В то же время, известно, что существенная часть сверхновых вспыхивает в результате коллапса ядер массивных звезд, а большинство массивных звезд рождаются в компактных или разреженных звёздных скоплениях, где они проводят большую часть своей жизни. Внутри звёздных скоплений, богатых массивными звездами, выделяется огромная кинетическая энергия за счет вспышек сверхновых и звёздных ветров, причем мощности этих двух источников сравнимы по величине. Было высказано предположение [6], что эта энергия может идти на ускорение частиц, в частности, за счет коллективных плазменных эффектов [7]. Ускорение КЛ в звёздных скоплениях является альтернативой стандартной парадигме ускорения КЛ ударными волнами одиночных изолированных друг от друга сверхновых.

Проверка модели ускорения КЛ в скоплениях звезд может быть сегодня выполнена средствами гамма-астрономии, которая позволяет изучать как процессы в источниках КЛ, так и взаимодействие КЛ с межзвездной средой [8]. Современные гамма-телескопы – орбитальная обсерватория им. Ферми, а также наземные телескопы High Energy Stereoscopic System, MAGIC, Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO), Tibet, Ковер 2 детектируют повышенные потоки гамма-излучения в направлении на скопления звезд (см., например, [9, 10]). Накапливающаяся статистика детектирования космических нейтрино высоких энергий гигаэлектронными детекторами обсерваторий IceCube и Байкал-GVD позволит проводить их совместный анализ с данными гамма-обсерваторий и делать заключения об источниках и механизмах излучения (см. например [11, 12]). Адекватная интерпретация этих наблюдений требует построения моделей ускорения частиц и их излучения в скоплениях звезд различных масштабов, что является одной из задач данной работы.

Мощные ветры массивных звезд и сверхновые, вспыхивающие в ОВ-ассоциации, приводят к высвобождению большого количества энергии, выметанию окружающего межзвездного газа и созданию огромной (до размеров порядка 100 пк) каверны горячего и разреженного газа, которую называют сверхпузырем или сверхкаверной (superbubble в англоязычной литературе). Энергетика межзвездного газа в галактиках обычно определяется энерговыделением сверхновых и ветров молодых массивных звезд. Оба этих источника также ответственны за химическую эволюцию галактик. Ускорение КЛ высоких энергий в сверхкавернах обсуждается как реалистичный источник КЛ ([13, 14, 15, 16]). В пользу этой гипотезы говорит, в том числе, химический

состав ГКЛ ([17]), что исследуется в данной работе на примере неоновой аномалии. Ускорение частиц ансамблем ударных волн и их переускорение в сильно турбулентной перемежаемой среде может быть более эффективным, чем ускорение Ферми на одиночной ударной волне (УВ) остатка сверхновой[18]. Также можно ожидать, что ускорение КЛ сверхновыми звездами в компактных звездных скоплениях обеспечит высокие максимальные энергии ускоренных частиц — выше «колена» в наблюдаемом спектре ускоренных частиц[19].

На протяжении двух десятков лет предпринимаются попытки моделирования механизмов ускорения КЛ в звездных скоплениях. В работе [20] рассматривалось ускорение как на ударной волне коллективного ветра массивных звёзд в компактном скоплении, так и на отдельных УВ в разреженной ассоциации, и, по оценкам авторов, максимальная энергия ускоренных частиц может быть увеличена на 1-2 порядка в таких системах по сравнению с ускорением на одиночной ударной волне. Ускорению КЛ на взаимодействующих ударных волнах — сталкивающихся ветрах или УВ остатков сверхновых — посвящен ряд работ А.М. Быкова и соавторов ([21, 19]). Они построили модель ускорения частиц на сходящихся быстрых МГД-течениях при столкновении ОСН и ветров звезд. Нелинейное моделирование распределения частиц методом Монте-Карло в упрощенной геометрии предсказывает очень жесткий спектр частиц. Попытки учесть эффекты геометрии и зависимость от времени были предприняты в работах [19, 22], где получены максимальные энергии КЛ выше ПЭВ. Когда речь идет о компактном скоплении, ускорение может происходить как в системах «ОСН-ветер» или «ветер-ветер», описанных выше, так и на УВ остановки коллективного ветра в компактном скоплении, что было рассмотрено в работах [23, 24], авторы которых пришли к выводу, что максимальные энергии ускоренных частиц в таких системах также достигают петаэлектронвольт.

Хотя гипотеза о звездных скоплениях — источниках КЛ обсуждается уже более 20 лет, в последние годы тема вызывает все больший интерес из-за того, что для ряда звездных скоплений были обнаружены ассоциированные с ними гамма-источники. К ним относятся компактные скопления Westerlund 1 и Westerlund 2, RSGC 1, NGC 3603, Кокон Лебедя, в области которого находятся несколько звездных ассоциаций, крупнейшая из которых — Cygnus OB2, сверхкаверна 30 Doradus C в Большом Магеллановом Облаке и другие источники. Это подтверждает, что звездные скопления и сверхкаверны являются важнейшими источниками КЛ.

Излучение, испущенное ускоренными частицами, предоставляет важную информацию о распределении материи и магнитных полях в звездных скоплениях. В частности, из анализа высокоэнергичного гамма-излучения компактных скоплений Westerlund 1 и 2 и ОБ-ассоциации Cygnus OB2 было найдено [25], что плотность КЛ вблизи источника убывает с расстоянием как  $1/r$ . Это может указывать на непрерывную инжекцию ускоренных частиц в межзвездную среду на временах порядка нескольких миллионов лет.

Наблюдательная поддержка исследований звездных скоплений является важной частью научных программ действующих и планируемых рентгеновских, гамма- и других обсерваторий, что подтверждает актуальность задачи. В последнее время было реализовано значительное количество наблюдений, позволяющих прямо или косвенно как проверить применимость имеющихся моделей, так и оценить ключевые параметры, которые должны иметь

скопления как предполагаемые источники космических лучей. Моделирование ускорения и распространения частиц в таких объектах вкупе с анализом доступных наблюдательных данных позволяет приблизиться к решению ряда актуальных задач. К ним относятся «неоновая проблема» - наблюдаемое аномальное отношение изотопов неона  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в КЛ, проблема происхождения КЛ выше «колена» в спектре, выявление природы нетеплового излучения звёздных скоплений. Таким образом, тема работы и поставленные в ней цели и задачи представляются актуальными.

**Цели и задачи работы.** Целью работы является построение теоретических моделей, позволяющих исследовать наблюдаемые особенности галактических космических лучей и источников гамма-излучения, которые могут быть обусловлены вкладом скоплений молодых массивных звезд в ускорение частиц.

Были поставлены следующие задачи:

1. Анализ возможности ускорения космических лучей с энергиями выше 100 ПэВ в галактических компактных скоплениях. Исследование распространения космических лучей высоких энергий, ускоренных в скоплениях звезд, в галактическом магнитном поле.
2. Моделирование спектров гамма-излучения ОВ-ассоциаций и компактных скоплений на основе модели транспорта частиц в сильно перемежаемой турбулентной среде.
3. Моделирование обогащения космических лучей  $^{22}\text{Ne}$  и исследование возможной роли галактических звездных скоплений в наблюдаемой неоновой изотопной аномалии.

**Научная новизна.** Следующие результаты, представленные в работе, получены впервые:

1. Построена модель распространения высокоэнергичных частиц, ускоренных в компактных скоплениях, с учетом специфики магнитных полей Галактики, и на ее основе найдены значения анизотропии и потоков галактических космических лучей с энергиями выше 100 ПэВ.
2. Построены спектры гамма-излучения галактических скоплений молодых звезд посредством модификации теории ускорения КЛ ансамблями ударных волн и МГД-турбулентностью.
3. Впервые построена модель обогащения космических лучей  $^{22}\text{Ne}$  в галактических звёздных скоплениях учитывающая как современные модели эволюции массивных звезд, так и процессы ускорения частиц, влияющих на химический состав КЛ.

**Научная и практическая значимость.** Космические лучи являются важнейшей компонентой глобальной экологии галактик. Они влияют на процессы звездообразования, эволюцию газа и плазмы. КЛ также существенно влияют на космическую погоду в окрестности Земли и являются фактором, определяющим возможность жизни на Земле и на планетах, и, в частности, важны для поиска зон возможных внеземных обитаемых систем. В данной работе предпринята попытка построить непротиворечивую модель рождения существенной компоненты наблюдаемых галактических космических лучей в звёздных скоплениях, собрав воедино наблюдаемые проявления процессов ускорения в этих объектах. В работе получены оценки мощности

источников и эффективности ускорения частиц; эти оценки, в свою очередь, могут быть использованы в более совершенных моделях источников космических лучей. Реализация моделирования включает в себя универсальные инструменты (код Монте-Карло для распространения частиц в магнитном поле Галактики, программа построения спектра гамма-излучения и фитирования экспериментальных данных), которые могут быть полезны для других расчетов. Наконец, в работе решены значимые задачи астрофизики космических лучей: в рамках моделирования найдено возможное объяснение избытка  $^{22}\text{Ne}$  в космических лучах и кусочной формы спектров гамма-излучения ряда звёздных скоплений.

**Методология и методы исследования.** Методология исследования заключается в том, чтобы с помощью как разработки новых моделей, так и модификации существующих объяснить наблюдения, касающиеся КЛ и гамма-излучения высоких энергий. В первой главе выполнено моделирование распространения частиц методом Монте-Карло на основе коэффициентов диффузии, найденных прямым численным решением уравнений движения в сложном Галактическом магнитном поле со стохастической компонентой. Во второй главе разрабатывается аналитическая модель переноса частиц внутри звёздного скопления, основанная на методе перенормировок кинетических коэффициентов частиц в сильно турбулентной плазме, предложенного в работах Быкова и Топтыгина. В третьей главе моделируется химический состав ускоряемого в звёздном скоплении вещества на основе существующих моделей звёздного нуклеосинтеза, для которых сделаны интерполяции на все необходимые массы звёзд.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Расчет кинетических коэффициентов и построение модели переноса в Галактике космических лучей с энергиями выше ПэВ, выполненные на основе наблюдаемых характеристик регулярной и стохастической компоненты галактического магнитного поля.
2. Результаты расчетов анизотропии и потоков космических лучей с энергиями выше ПэВ, ускоренных в молодых компактных скоплениях. Оценка доли космических лучей, которые могут рождаться в таких источниках.
3. Результаты моделирования особенностей формирования спектров гамма-излучения протяженных и компактных скоплений молодых звезд в Галактике на примере скопления в Лебедь и компактного скопления Westerlund 2.
4. Построение модели и анализ процессов формирования аномального отношения изотопов  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в космических лучах, ускоренных в галактических скоплениях молодых звезд, на основе современных моделей звездной эволюции.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность представленных в работе результатов обусловлена тем, что:

1. Все существующие модели, используемые в работе (напр. модели звёздного нуклеосинтеза *Geneva* и *Frascati*, метод перенормировок Быкова-Топтыгина), хорошо изучены, непротиворечивы, описаны в публикациях в реферируемых журналах и успешно используются для решения задач, сходных с задачами работы.

2. Все методы, используемые в работе (метод Монте-Карло, уравнения движения частиц и их численное и аналитическое решение, гидродинамическое моделирование) являются адекватными поставленным задачам.
3. Все разработанные и использованные в работе модели были протестированы на простых задачах, либо сравнивались между собой.
4. Все полученные в работе результаты находятся в удовлетворительном соответствии с наблюдательными данными. Они также не противоречат друг другу.

**Апробация работы.** Основные результаты, описанные в работе, опубликованы в 7 статьях в реферируемых журналах. Результаты работы также были представлены на всероссийских и международных конференциях: «Физика А.СПб» (Санкт-Петербург, 2019, 2021), «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2018, 2019, 2021), XXI Jubilee Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: Symposium “The Periodic Table Through Space and Time” (Санкт-Петербург, 2019), «Всероссийская конференция по космическим лучам» (Москва, 2020, 2022).

**Личный вклад.** Автору научно-квалификационной работы принадлежит определяющий вклад во все основные результаты работы. Все моделирование, присутствующее в работе, было либо разработано лично автором, либо модифицировано автором для конкретной задачи. Автором были выполнены все аналитические и численные расчеты и написаны необходимые для этого программные коды. Автор работы участвовал в постановке задач и внёс основной вклад в получение опубликованных результатов, которые выносятся на защиту и, в частности, разделов 1 и 5 обзорной публикации.

**Объём и структура работы.** Научно-квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объём работы составляет 89 страниц с 25 рисунками и 7 таблицами. Список литературы включает в себя 107 наименований.

## Содержание работы

**Первая глава** посвящена исследованию анизотропии и потоков КЛ, ускоренных в компактных звездных скоплениях. Молодые компактные звездные скопления содержат большие популяции массивных звезд и, как следствие, высокий темп вспышек сверхновых.

Остатки сверхновых являются одними из наиболее вероятных источников космических лучей с энергиями до ТэВ [26]. Однако, у всех одиночных ОСН, обнаруженных на настоящий момент, спектр гамма-излучения обрывается на энергиях менее 100 ТэВ [27]. В системе сходящихся потоков, такой как взаимодействующие УВ сверхновой и быстрый ветер ОВ-звезды, происходит более эффективное удержание частиц, чем на отдельной УВ, что модифицирует механизм Ферми и приводит к более высоким максимальным энергиям ускоренных частиц. Такие системы могут ускорять протоны до энергий порядка сотен ПэВ [19].

Космические лучи отклоняются в галактических и внегалактических магнитных полях, что усложняет выявление источников. Анизотропия прибытия КЛ может быть следствием как анизотропного распределения их источников, так и квази-прямолинейного или диффузионного распространения

частиц. Данные по амплитуде и фазе космических лучей на энергиях  $\sim$  сотен ПэВ приводит наземная черенковская обсерватория Оже (Pierre Auger Observatory) — в диапазоне энергий десятки ПэВ-десятки ЭэВ она не превышает 1%.

С целью исследовать галактические компактные скопления как источники КЛ с энергиями выше 100 ПэВ, было выполнено моделирование распространения частиц в магнитном поле Галактики от известных скоплений и расчет соответствующих анизотропии и потоков КЛ от этих источников. Моделирование включало в себя:

1. Нахождение коэффициентов диффузии в Галактике для тестовых частиц в турбулентном поле с заданным спектром
2. Моделирование распространения частиц с энергиями  $10^{17}$  эВ и  $3 \times 10^{17}$  эВ от галактических компактных скоплений методом Монте-Карло с учетом вращения частиц в регулярном поле Галактики
3. Нахождение модельных амплитуды дипольной анизотропии и потока космических лучей, ускоренных в галактических компактных скоплениях

В работе использовался двухкомпонентный спектр турбулентного магнитного поля Галактики, описанный в работах [28, 29]:

$$E_B(k) \propto \left(\frac{k}{k_0}\right)^{-0.37}, 0.5 < 1/k < 15 \text{ кпк}; \quad E_B(k) \propto \left(\frac{k}{k_0}\right)^{-5/3}, 1/k < 0.5 \text{ кпк} \quad (1)$$

Среднеквадратичное значение турбулентного магнитного поля равно  $\sim 6$  мкГс. Турбулентное магнитное поле моделировалось как сумма плоских волн со случайными направлениями, фазами и направлениями поляризации, а амплитуда каждой моды определялась энергетическим спектром. Путем прямого численного решения уравнений движения тестовых частиц, были получены оценки на значения коэффициентов диффузии в заданном поле для частиц с энергиями  $10^{17}$  эВ и  $3 \times 10^{17}$  эВ — основными энергиями, для которых выполнялось моделирование. Они равны, соответственно,  $2.2 \times 10^{30}$  см<sup>2</sup>/с и  $4.8 \times 10^{30}$  см<sup>2</sup>/с.

В сформированной турбулентности с найденным коэффициентом диффузии  $D$  методом Монте-Карло был смоделирован транспорт частиц. Исследуемые энергии частиц —  $10^{17}$  и  $3 \times 10^{17}$  эВ, модельные параметры Галактики — диаметр 30 кпк, и высота гало — 10 кпк. Предполагается, что взрыв сверхновой в каждом скоплении происходит раз в  $\sim 20000$  лет, что для 10 источников дает частоту раз в  $\sim 2000$  лет.

Также было учтено влияние крупномасштабного регулярного магнитного поля Галактики на потоки и анизотропию. В качестве модели постоянного магнитного поля использовалась 21-параметрическая модель [30]. Амплитуда постоянного галактического поля достигает значений 3 мкГс, сравниваясь по порядку величины с амплитудой турбулентного поля ( $\sim 6$  мкГс). Учет регулярного поля был выполнен следующим образом: на каждом шаге Монте-Карло моделирования частица, пролетев длину свободного пробега, делала поворот вокруг направления регулярного магнитного поля в данной точке.

Интенсивность КЛ в дипольном приближении равна:

$$I(\mu) = I_0 + I_1\mu \quad (2)$$

где  $\mu = \cos \Theta$ , где  $\Theta$  — угол между выделенным направлением, и направлением, в котором достигается максимальная интенсивность. Дипольная анизотропия,  $|A|$ , определяется как разница между максимальной и минимальной интенсивностью, т.е.,

$$|A| = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \left| \frac{I_1}{I_0} \right|. \quad (3)$$

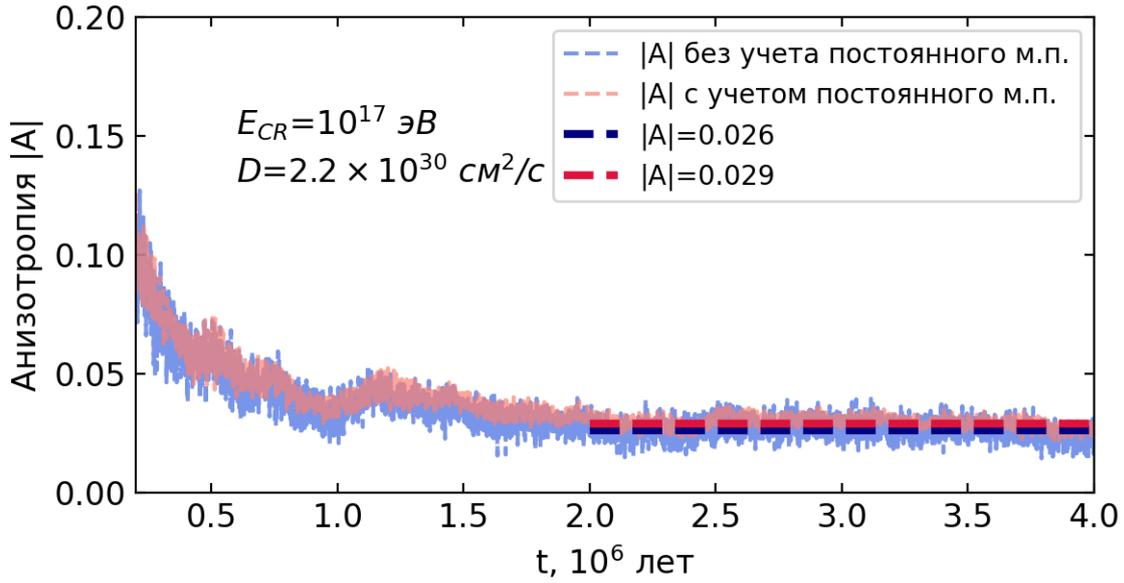


Рисунок 1: Анизотропия в зависимости от времени для протонов с энергией  $10^{17}$  эВ. Пунктиром показаны средние значения анизотропии за последние  $2 \times 10^6$  лет симуляции

На Рис. 1, 2 приведены смоделированные амплитуды анизотропии для КЛ энергий  $10^{17}$  и  $3 \times 10^{17}$  эВ с учетом и без учета вращения в постоянном магнитном поле Галактики. В моделировании получены величины  $|A| \simeq 0.03$  для  $E_{CR} = 10^{17}$  эВ и  $|A| \simeq 0.06$  для  $E_{CR} = 3 \times 10^{17}$  эВ. Уменьшить величину анизотропии может присутствие изотропной внегалактической компоненты КЛ. На основе данных об анизотропии, компактные скопления могут обеспечивать  $\sim 33\%$  потока 100-ПэВных и  $\sim 16\%$  потока 300-ПэВных космических лучей. Остальное приходится на внегалактические источники, КЛ от которых предполагаются приходящими изотропно.

На основе частоты и энергетики вспышек сверхновых в компактных скоплениях были найдены модельные потоки КЛ исследуемых энергий. Из сравнения наблюдаемого и модельного потоков КЛ можно оценить эффективность ускорения, т.е. доля общей энергии вспышек сверхновых в скоплениях, которая должна идти в ускоренные предлагаемым механизмом частицы. Она должна быть равна  $\simeq 7.5\%$  в рамках предложенной модели.

**Вторая глава** посвящена моделированию спектров  $\gamma$ -излучения ОВ-ассоциаций и компактных массивных скоплений. ОВ - ассоциации — скопления молодых звезд низкой плотности — содержат как большое количество

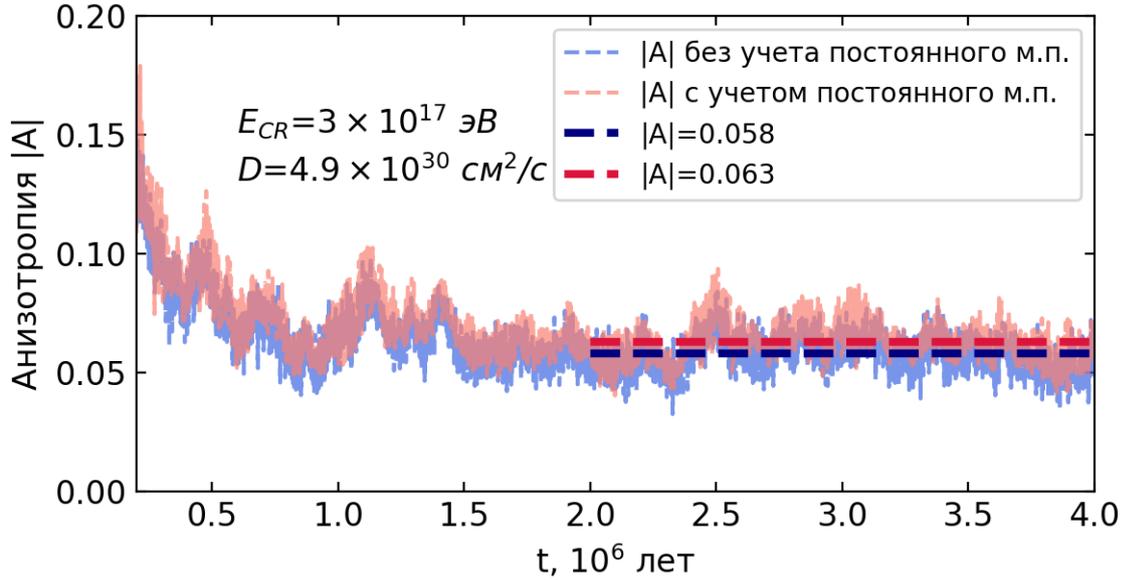


Рисунок 2: Анизотропия в зависимости от времени для протонов с энергией  $3 \times 10^{17}$  эВ. Пунктиром показаны средние значения анизотропии за последние  $2 \times 10^6$  лет симуляции.

массивных звезд O- и B- типов, так и множество маломассивных звезд, имея протяженность от десятков до сотен парсек. В работе [31] представлены наблюдения Fermi LAT в ГэВ-ном диапазоне протяженного  $\gamma$ -источника - Кокона Лебеда, связанного со сверхпузырем, окружающим регион Лебедь OB2. Как показывает анализ данных Fermi LAT, на ГэВ-ных энергиях спектральное распределение энергии  $\gamma$ -излучения Кокона подчиняется степенному закону с показателем степени (-2.1), тогда как исследования этого региона в ТэВ-ном диапазоне показали, что ТэВ-ный спектр Кокона близок к степенному с показателем степени (-2.6), т.е. значительно смягчается по сравнению с ГэВ-ным на переходной энергии порядка 1 ТэВ[32]. Подобное поведение демонстрируют и некоторые компактные скопления, например, Westerlund 2 [33] — спектр  $\gamma$ -излучения Westerlund 2 так же, как и спектр Кокона Лебеда, имеет излом на энергии  $\sim 1$  ТэВ: показатель степени меняется с  $\sim 2.0$  [34] до  $\sim 2.6$ .

В условиях магнитогидродинамической (МГД) турбулентности с сильными ударными волнами возможно ускорение частиц механизмом Ферми II рода. В разделе 2.2 описано теоретическое моделирование процессов ускорения и переноса частиц в OB-ассоциации и компактном звездном скоплении на основе метода перенормировок[35]. Рассмотрены два режима (для низкоэнергичных и высокоэнергичных частиц) транспорта КЛ в плазме с сильными ударными волнами.

В распределении частиц, ускоренных на ударном фронте, формируется неоднородность с пространственным масштабом  $l \simeq \kappa/u \simeq v\Lambda(p)/3u$ , где  $\kappa$  - локальный коэффициент диффузии,  $u$  - скорость фронта,  $v$  - скорость частицы,  $\Lambda(p)$  - длина пробега частицы. Разумно параметризовать длину свободного пробега частиц в результате рассеяния на квазирезонансных магнитных флуктуациях с масштабами, сравнимыми с гирорадиусом КЛ  $R_H(p)$  [36]:

$$\Lambda(p) \simeq l_{\text{corr}} \cdot \left[ \frac{R_H(p)}{l_{\text{corr}}} \right]^{2-\nu} \quad (4)$$

Здесь,  $\nu$  - это степенной индекс МГД турбулентности. Параметр  $l_{\text{corr}}$ , определенный таким образом, по порядку величины равен среднему расстоянию между сильными ударными волнами в системе. Если  $l \ll l_{\text{corr}}$ , распределение частиц становится сильно перемежаемым, что означает, что кинетика частиц существенно разная в областях около ударных фронтов и между ними. Если  $l \gg l_{\text{corr}}$ , то частица на длине своего пробега успевает провзаимодействовать с многими фронтами. Переходный импульс  $p_*$ , на котором происходит смена режимов транспорта частиц, таким образом, приближенно определяется выражением:  $v\Lambda(p_*) \simeq 3ul_{\text{corr}}$ . Спектр ускоренных частиц в зависимости от времени для низких энергий, когда  $p < p_*$ , был рассчитан в работе [18] и может быть приближен степенным спектром с индексом, близким к 2:  $p^2 N(p) \sim p^{-2}$  (данные Fermi воспроизводятся, если спектр низкоэнергичных протонов имеет показатель около -2.1).

Для частиц высоких энергий ( $p > p_*$ ) характерный масштаб диффузии больше, чем  $l_{\text{corr}}$ , система не является такой же сильно перемежаемой, как для низкоэнергичных КЛ. В результате решения кинетического уравнения для этого случая получена функция распределения в пространстве импульсов:

$$N(p) = A_0(p/p_*)^{-(\nu+1)/2} K_a((p/p_*)^{2-\nu} \Delta), \quad (5)$$

где  $K_a$  - функция Макдональда с показателем  $a = (\nu + 1)/|4 - 2\nu|$  (для  $\nu \neq 2$ ), а

$$\Delta = \frac{\pi}{2} \frac{c\Lambda(p_*)}{(2 - \nu)uR} \quad (6)$$

Нормировка  $A_0$  определяется исходя из мощности каждого отдельного источника.

Как было показано в [37, 38], взаимодействие сильных ударных волн остатков сверхновых с флуктуациями плотности - облаками - может привести к формированию многочисленных слабых вторичных ударных волн. Коэффициент диффузии КЛ в присутствии слабых ударных волн становится энергонезависимым [37] в достаточно широком диапазоне энергий, что соответствует  $\nu = 2$ . В таком случае спектр ускоренных частиц, и, следовательно, соответствующий спектр  $\gamma$ -излучения являются степенными.

В разделах 2.3, 2.4 работы приведена аппроксимация наблюдаемых спектров  $\gamma$ -излучения скоплений Лебедь OB2 и Westerlund 2 на основе моделей, описанных выше. Адронный механизм  $\gamma$ -излучения предполагает протон-протонные ( $p-p$ ) взаимодействия ускоренных частиц со средой, которые приводят к образованию  $\pi^0$ -мезонов и последующему излучению  $\gamma$ -квантов за счет их распада.

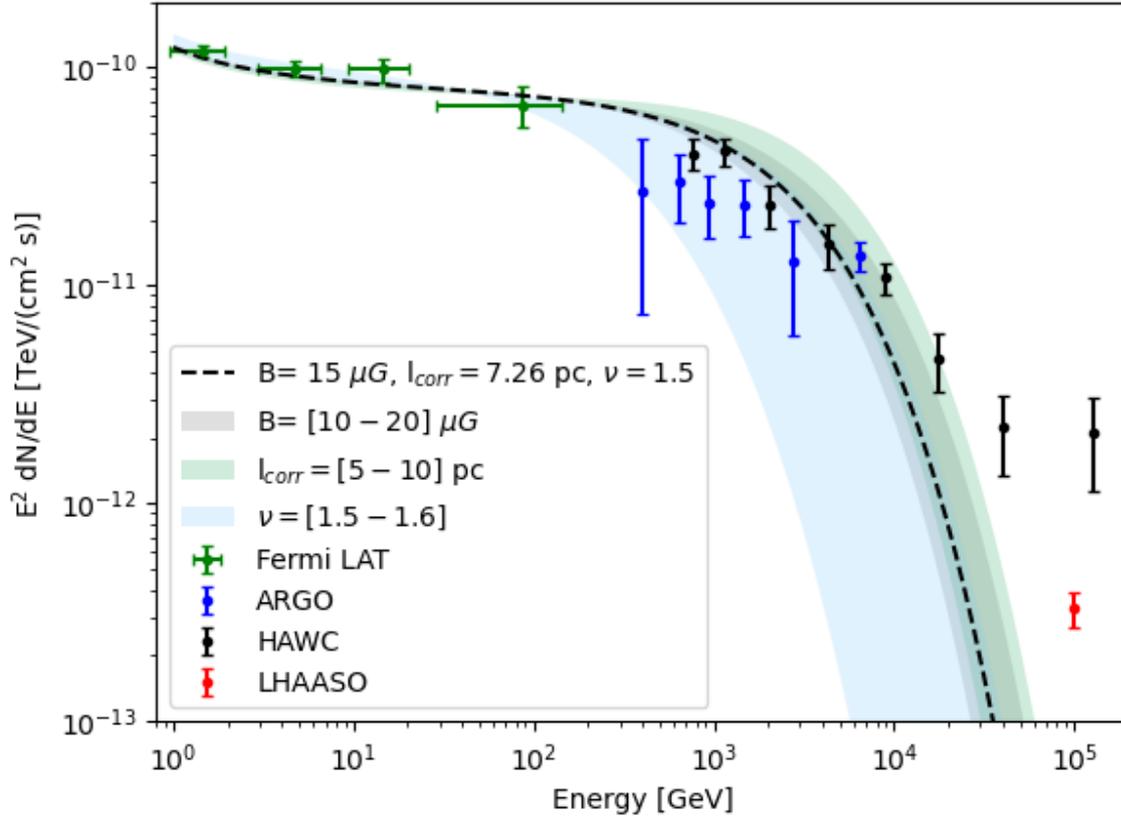


Рисунок 3: Спектральное распределение  $\gamma$ -излучения Кокона Лебеда для следующих параметров:  $\nu = 1.50$ ,  $l_{\text{corr}} = 7.26$  пк. Остальные параметры зафиксированы на величинах  $B_0 = 15$  мкГс и  $R = 15$  пк,  $u = 1000$  км с $^{-1}$ . Полупрозрачные области разных цветов соответствуют вариациям различных параметров. Дополнительная неопределенность может возникнуть из-за неопределенности переходной области между режимами.

Основными параметрами моделирования являлись корреляционная длина  $l_{\text{corr}}$  и показатель турбулентного спектра  $\nu$ . Остальные параметры были зафиксированы:  $B_0 = 15$  мкГс для Кокон Лебеда, размер скопления  $R = 15$  пк и оценочное значение средней скорости турбулентных потоков  $u = 1,000$  км с $^{-1}$  для Кокон Лебеда, и  $B_0 = 50$  мкГс,  $R = 2$  пк и  $u = 1,500$  км с $^{-1}$  для Westerlund 2.

Для того, чтобы подогнать модельные спектры под данные наблюдений  $\gamma$ -излучения и найти соответствующие параметры, в работе использовался метод Монте-Карло по схеме марковских цепей, реализованный в пакете *emcee* на Python[39]. Полученные значения параметров для Кокон Лебеда:

$$\nu \simeq 1.50, \quad l_{\text{corr}} \simeq 7.25 \text{ пк} \quad (7)$$

Тогда как для Westerlund 2:

$$\nu \simeq 1.53, \quad l_{\text{corr}} \simeq 0.51 \text{ пк} \quad (8)$$

Найденные значения параметров выглядят разумно, показатель спектра турбулентности  $\nu$  близок к показателю Крайкнана ( $3/2$ ). Более высокая

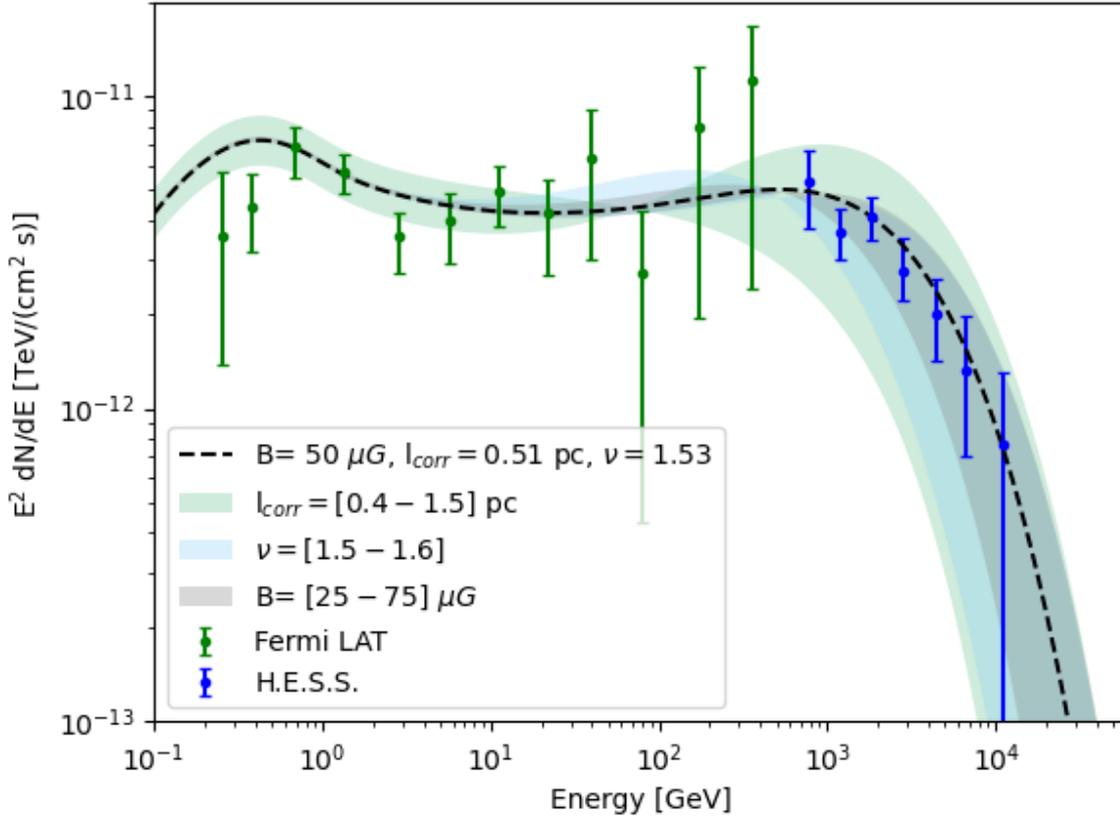


Рисунок 4: Спектральное распределение  $\gamma$ -излучения компактного скопления Westerlund 2 для следующих параметров:  $\nu = 1.53$ ,  $l_{corr} = 0.51$  пк. Остальные параметры зафиксированы на величинах  $B_0 = 50$  мкГс и  $R = 2$  пк,  $u = 1500$  км с $^{-1}$ . Полупрозрачные области разных цветов соответствуют вариациям различных параметров.

средняя скорость турбулентных потоков ( $\sim 3,000$  км с $^{-1}$ ) привела бы к более близкому к Колмогоровскому спектру турбулентности ( $\nu \sim 1.63 - 1.68$ ).

Рассмотрена энергетическая сторона задачи: с учетом известных данных о кинетической мощности скоплений Лебедь OB2 и Westerlund 2 найдены необходимые значения эффективности конвертации механической энергии в ускорение частиц в этих скоплениях. Они равны  $\sim 6\%$  для скопления в Лебеде и  $\sim 2\%$  для Westerlund 2, что не превышает используемое обычно значение  $10\%$ .

Спектры  $\gamma$ -излучения с найденными параметрами показаны на Рис. 3,4.

На Рис. 5 приводится спектр  $\gamma$ -излучения для альтернативной модели со слабыми ударными волнами в сверхпузыре Лебеда (его размер равен  $\sim 55$  пк). Наблюдаемый спектр Кокона Лебеда в области высоких энергий имеет степенной индекс  $\sim (-2.6)$ . Было найдено необходимое значение постоянного пространственного коэффициента диффузии  $\kappa$ . Для  $u = 1,500$  км/с  $\kappa \simeq 1.5 \times 10^{28}$  см $^2$ /с. Соответствующая энергия перехода между режимами должна быть 3.4 ТэВ. Как можно видеть из рис. 3, 5, вторая модель лучше подходит к наблюдаемому спектру.

Описанная в главе модель может успешно объяснить как наблюдаемое  $\gamma$ -излучение Westerlund 2, так и, с некоторыми оговорками, Кокона Лебеда. Это

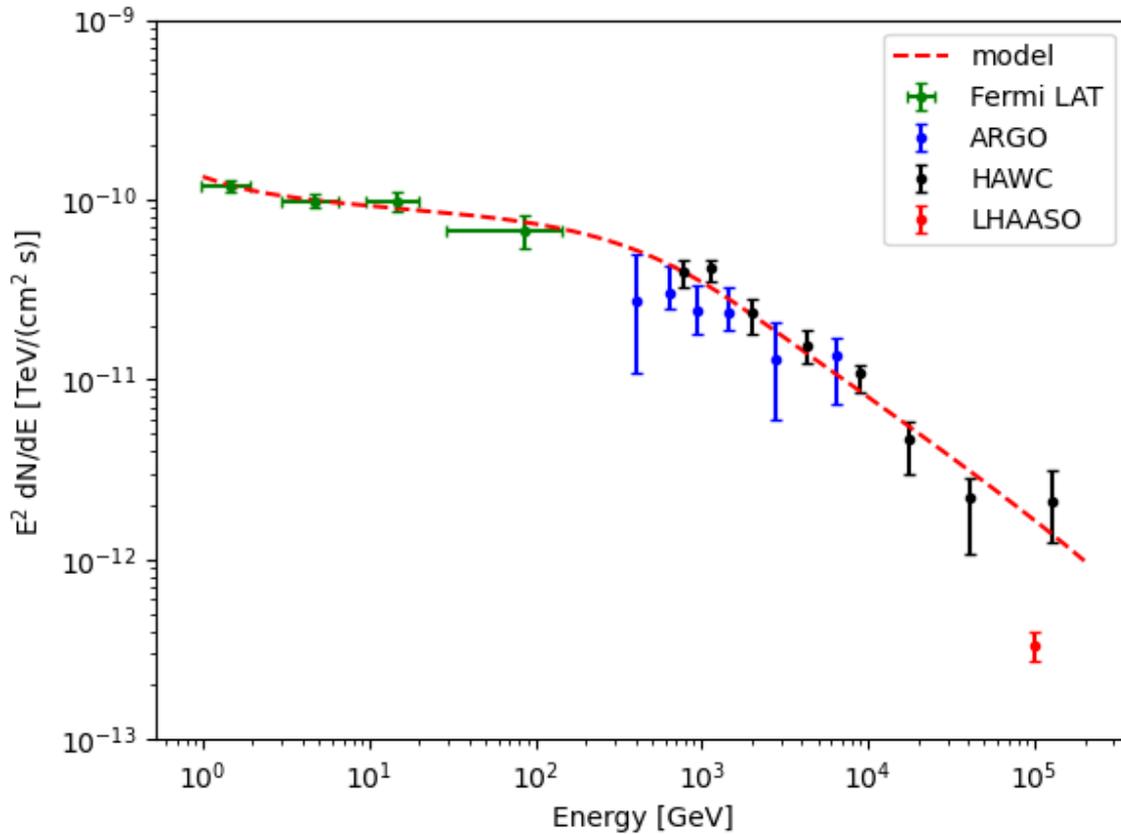


Рисунок 5: Спектральное распределение  $\gamma$ -излучения Кокона Лебедя в модели, где  $\nu = 2$  и коэффициент диффузии в сверхпузыре не зависит от энергии и равен  $\kappa \simeq 1.5 \times 10^{28} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , а энергия перехода равна  $\epsilon_* \simeq 3.4 \text{ ТэВ}$ .

свидетельствует о том, что предложенный механизм ускорения и переноса частиц может быть применим как к протяженным ОВ-ассоциациям, так и к компактным плотным скоплениям.

**Третья глава** посвящена моделированию обогащения космических лучей  $^{22}\text{Ne}$  в скоплениях молодых массивных звезд. В результате многочисленных наблюдений установлено, что распространенности изотопов большинства химических элементов в солнечном ветре и в космических лучах совпадают. Но имеются и несоответствия, наиболее значительным из которых является различие изотопного отношения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  на Солнце и в космических лучах. Общепринятым источником обогащенного  $^{22}\text{Ne}$  вещества являются ветры углеродной последовательности (WC) звезд Вольфа-Райе (WR) [40], значительная часть которых находится в скоплениях молодых массивных звезд [41, 42].

В работе выполнено моделирование ускорения обогащенных  $^{22}\text{Ne}$  КЛ в звездных скоплениях – в молодых массивных компактных скоплениях, а также в ОВ-ассоциациях. Предполагалось, что ускорение обогащенного  $^{22}\text{Ne}$  вещества происходит в системах сходящихся ударных волн от ветров массивных звезд и вспышек сверхновых. Для расчета изотопного состава ускоренных частиц были использованы две наиболее актуальные на сегодняшний день модели звездной эволюции - модель авторов [43] (*Geneva*) и модель авторов [44] (*Frascati*).

Основными параметрами моделирования являлись:

1. Скорость начального вращения звезд в скоплении – 0, 150 км/с, 300 км/с
2. Показатель степени начальной функции масс в скоплении – 1.8-2.6
3.  $M_{BHcut}$  – начальная масса звезды, выше которой не происходит вспышки сверхновой –  $25 M_{\odot}$ ,  $30 M_{\odot}$ ,  $40 M_{\odot}$ .

С помощью интерполяций моделей звездного нуклеосинтеза для всех этих параметров были получены значения средних изотопных отношений неона в КЛ, ускоренных к моменту  $t$  жизни скопления.

В разделе 3.2.3 описано сравнение моделей *Geneva* и *Frascati* для данной задачи – было найдено среднее отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в скоплении с учетом только вещества, выбрасываемого ветрами. Модели оказались в удовлетворительном соответствии.

Типичная массивная звезда теряет свою массу в основном в течение трех стадий эволюции: стадия главной последовательности, стадия красного сверхгиганта (RSG) и стадия Вольфа-Райе. Из-за различных характерных скоростей ветра на разных стадиях вещество, выбрасываемое на разных стадиях эволюции звезды, может ускоряться с разной эффективностью. Для того, чтобы оценить распределение вещества OB/WR/RSG в компактном скоплении, было использовано гидродинамическое моделирование с помощью кода PLUTO. Оно помогло понять, что в компактном скоплении чуть более эффективно удерживается вещество звёзд WR, а также, что вещество сверхгигантов, скорее всего, ускоряется уже после начала вспышек сверхновых.

На левой панели рис. 6 представлены результаты расчетов – среднее отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в веществе, ускоренном в массивном звездном скоплении в зависимости от его возраста. Учтены вспышки сверхновых в предположении, что выше  $M_{BHC}=25 M_{\odot}$  происходит прямой коллапс в черную дыру.

На правой панели рис. 6 приведены усредненные по времени удержания КЛ в Галактике изотопные отношения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в КЛ, ускоренных в галактических молодых звездных скоплениях. Для  $M_{BHcut}=25 M_{\odot}$  и даже  $30 M_{\odot}$ , при наличии вращения достигаются значения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ , значительно превышающие наблюдаемые. Наибольшее усредненное отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  достигается при  $v_{rot} = 150$  км/с,  $\gamma_{IMF} = 1.8$ ,  $M_{BHcut}=25 M_{\odot}$  и превышает наблюдаемое в КЛ более, чем в 2 раза.

В разделе 3.4 обсуждается энергетика предлагаемых источников. В работе [45] показано, что общая мощность ветров массивных звезд в Галактике составляет  $\simeq 1.1 \times 10^{41}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Исходя из [41, 42], мощность ветров массивных звезд в компактных скоплениях и OB-ассоциациях можно оценить как  $\simeq 7 \times 10^{40}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Доли механической энергии, выбрасываемой с ветрами массивных звёзд и со вспышками сверхновых в рамках одного звёздного скопления, были рассчитаны с помощью моделирования кодом Starburst99[46]. Было найдено, что они соотносятся как  $\sim 1.6 : 1$ . Тогда полная мощность ветров+сверхновых в галактических скоплениях равна  $\sim 1.75 \times 10^{41}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Принимая во внимание необходимую долю КЛ, которая должна быть ускорена в скоплениях на основе расчета  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  ( $\geq 43\%$ ), и эффективность ускорения КЛ ударными волнами ( $\sim 10\%$ ) можно получить полную мощность КЛ в рамках предложенной модели –  $\sim 4 \times 10^{40}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Из наблюдений эта величина оценивается как  $(6 - 8) \times 10^{40}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , т.е. в 1.5-2 раза

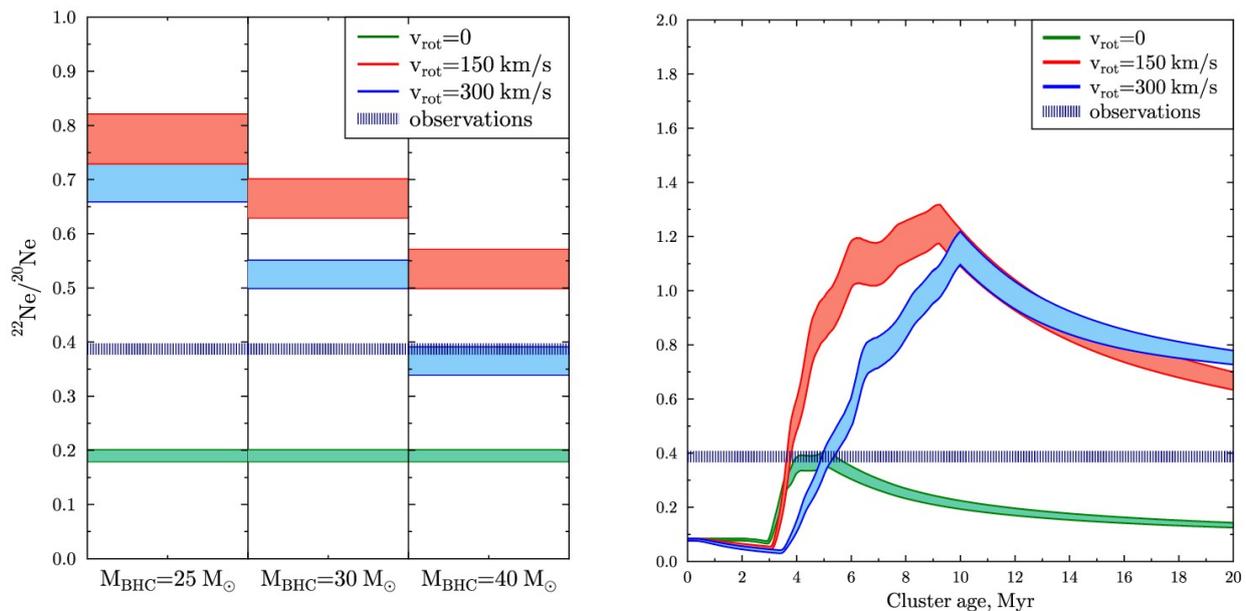


Рисунок 6: Слева: Изотопное отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в космических лучах, ускоренных в галактических молодых скоплениях, усредненное по возрастам скоплений. Справа: Отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в веществе, ускоренном в массивном звездном скоплении в зависимости от его возраста с учетом различных скоростей вращения звезд и для интервала показателей степени начальной функции масс в скоплении 1.8-2.6 (верхний предел содержания  $^{22}\text{Ne}$  соответствует более пологой начальной функции масс). Синей толстой линией показано наблюдаемое в КЛ отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}_{obs}=0.387$ . Есть учет вспышек сверхновых,  $M_{BHcut}=25 M_{\odot}$ .

больше, чем получено в модели. Этому может быть несколько объяснений: оценки мощности галактических ветров массивных звезд и содержания  $^{22}\text{Ne}$  в ветрах массивных звезд могут быть занижены, эффективность ускорения космических лучей на сталкивающихся потоках в компактных скоплениях и ОВ-ассоциациях может быть больше, чем 10%.

Также рассмотрена гипотеза, что аномалия изотопного отношения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  может быть обусловлена вкладом локальных источников – близлежащих компактных скоплений или ассоциаций. Найдены ограничения снизу на мощности таких источников. Возможным кандидатом в локальные источники является ОВ-ассоциация Скорпиона-Центавра.

В научно-квалификационной работе получен ряд результатов, подтверждающих то, что скопления молодых массивных звезд в Галактике являются важными источниками космических лучей и нетеплового излучения. Описание результатов и выводы представлены в **заключении**:

1. Выполнено моделирование анизотропии и потоков космических лучей, ускоренных в галактических молодых компактных скоплениях массивных звезд. Для этого разработана модель распространения частиц, учитывающая геометрию галактики, межзвездную магнитную турбулентность и распределение источников КЛ. Найдены доли КЛ, которые могут быть ускорены в таких источниках —  $\sim 33\%$  для 100-ПэВных и  $\sim 16\%$  для 300-ПэВных частиц.
2. Выполнено моделирование излома в некоторых наблюдаемых спектрах гамма-излучения звездных скоплений. Найдены формы спектра косми-

ческих лучей высоких энергий в звездных скоплениях в двух случаях: в случае сильных, но редких ударных фронтов, и в случае часто расположенных вторичных слабых ударных волн. На примере гамма-источников Кокон Лебеда и Westerlund 2 показана применимость модели к спектрам излучения ассоциаций звезд и найдены необходимые параметры для того, чтобы модельный расчет удовлетворял наблюдениям.

3. Построена модель обогащения  $^{22}\text{Ne}$  космических лучей, ускоренных на многочисленных ударных волнах от взаимодействующих ветров O-, B-звезд и звезд Вольфа-Райе в молодых компактных звездных скоплениях. Найдено усредненное по времени жизни ГКЛ ожидаемое изотопное отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в космических лучах от массивных скоплений и параметры, при которых достигается наибольшее содержание  $^{22}\text{Ne}$ . Рассчитан энергетический баланс для космических лучей, ускоренных в звездных скоплениях, а также рассмотрена модель локальных источников неоновой аномалии, получены оценки на необходимую механическую светимость близлежащих скоплений.

### Список публикаций по теме научно-квалификационной работы

- A1. A. M. Bykov, D. C. Ellison, M. E. Kalyashova, S. M. Osipov High-energy cosmic rays from supernovae in young clusters of massive stars // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, Volume 30, Issue Suppl 1, p.155-158;
- A2. A. M. Bykov, M. E. Kalyashova, D. C. Ellison, S. M. Osipov High-energy cosmic rays from compact galactic star clusters: Particle fluxes and anisotropy // *Advances in Space Research*, Volume 64, Issue 12, p. 2439-2444.;
- A3. A. M. Bykov, A. Marcowith, E. Amato, M. E. Kalyashova, J. M. D. Kruijssen, E. Waxman High-Energy Particles and Radiation in Star-Forming Regions // *Space Science Reviews*, Volume 216, Issue 3, article id.42.
- A4. A. M. Bykov, M. E. Kalyashova Modeling of GeV-TeV gamma-ray emission of Cygnus Cocoon // *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.029>;
- A5. M. E. Kalyashova, A. M. Bykov, S. M. Osipov, D. C. Ellison, D. V. Badmaev Wolf-Rayet stars in young massive star clusters as potential sources of Galactic cosmic rays // *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1400, Issue 2, article id. 022011 (2019);
- A6. М. Е. Каляшова, А. М. Быков, С. М. Осипов Молодые звездные скопления как источники обогащенных  $^{22}\text{Ne}$  Галактических космических лучей // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, т. 85, № 4, 482–485
- A7. M. E. Kalyashova, A. M. Bykov Modeling of cosmic ray  $^{22}\text{Ne}$ -enrichment in compact star clusters // *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 2103, Issue 1, id.012008;

### Литература

1. Березинский В. С., Буланов С. В., Догель В. А. и др. *Астрофизика Космических Лучей*, М.Наука. — 1990.

2. Axford W. I. The Origins of High-Energy Cosmic Rays // *Astrophys. J. Suppl.*. — 1994. — Vol. 90. — P. 937.
3. Blandford Roger, Simeon Paul, Yuan Yajie. Cosmic Ray Origins: An Introduction // *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*. — 2014. — Vol. 256. — P. 9–22.
4. Lagage P. O., Cesarsky C. J. The maximum energy of cosmic rays accelerated by supernova shocks // *A&A*. — 1983. — Vol. 125. — P. 249–257.
5. Hillas A. M. TOPICAL REVIEW: Can diffusive shock acceleration in supernova remnants account for high-energy galactic cosmic rays? // *Journal of Physics G Nuclear Physics*. — 2005. — Vol. 31, no. 5. — P. R95–R131.
6. Montmerle T. On gamma-ray sources, supernova remnants, OB associations, and the origin of cosmic rays. // *ApJ*. — 1979. — Vol. 231. — P. 95–110.
7. Bykov A. M., Fleishman G. D. On non-thermal particle generation in superbubbles. // *MNRAS*. — 1992. — Mar. — Vol. 255. — P. 269–275.
8. Dogiel V. A., Chernyshov D. O., Ivlev A. V. et al. Gamma-Ray Emission from Molecular Clouds Generated by Penetrating Cosmic Rays // *ApJ*. — 2018. — Vol. 868, no. 2. — P. 114.
9. Aharonian Felix, Yang Ruizhi, de Oña Wilhelmi Emma. Massive stars as major factories of Galactic cosmic rays // *Nature Astronomy*. — 2019. — Vol. 3. — P. 561–567.
10. Cao Zhen, Aharonian F. A., An Q. et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12  $\gamma$ -ray Galactic sources // *Nature*. — 2021. — Vol. 594, no. 7861. — P. 33–36.
11. Dzhappuev D. D., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M. et al. Observation of Photons above 300 TeV Associated with a High-energy Neutrino from the Cygnus Region // *ApJL*. — 2021. — Vol. 916, no. 2. — P. L22.
12. Bykov A. M., Petrov A. E., Kalyashova M. E., Troitsky S. V. PeV Photon and Neutrino Flares from Galactic Gamma-Ray Binaries // *ApJL*. — 2021. — Vol. 921, no. 1. — P. L10.
13. Lingenfelter Richard E. Cosmic rays from supernova remnants and superbubbles // *Advances in Space Research*. — 2018. — Vol. 62, no. 10. — P. 2750–2763.
14. Lingenfelter Richard E. The Origin of Cosmic Rays: How Their Composition Defines Their Sources and Sites and the Processes of Their Mixing, Injection, and Acceleration // *Astrophys. J. Suppl.*. — 2019. — Vol. 245, no. 2. — P. 30.
15. Bykov Andrei M. Nonthermal particles and photons in starburst regions and superbubbles // *Astron. Astrophys. Rev.*. — 2014. — Vol. 22. — P. 77.
16. Bykov Andrei M., Marcowith Alexandre, Amato Elena et al. High-Energy Particles and Radiation in Star-Forming Regions // *Space Sci. Rev.*. — 2020. — Vol. 216, no. 3. — P. 42.
17. Tatischeff Vincent, Raymond John C., Duprat Jean et al. The origin of Galactic cosmic rays as revealed by their composition // *MNRAS*. — 2021. — Vol. 508, no. 1. — P. 1321–1345.
18. Bykov A. M. Particle Acceleration and Nonthermal Phenomena in Superbubbles // *Space Science Reviews*. — 2001. — Vol. 99. — P. 317–326.
19. Bykov A. M., Ellison D. C., Gladilin P. E., Osipov S. M. Ultrahard spectra of PeV neutrinos from supernovae in compact star clusters // *MNRAS*. — 2015. — Vol. 453. — P. 113–121.
20. Klepach E. G., Ptuskin V. S., Zirakashvili V. N. Cosmic ray acceleration by multiple spherical shocks // *Astropart. Phys.*. — 2000. — Vol. 13. — P. 161–172.
21. Bykov A. M., Gladilin P. E., Osipov S. M. Non-linear model of particle acceleration at colliding shock flows // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 429. — P. 2755–2762.
22. Vieu T., Gabici S., Tatischeff V. Particle acceleration at colliding shock waves // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 494, no. 3. — P. 3166–3176.
23. Gupta Siddhartha, Nath Biman B., Sharma Prateek, Eichler David. Realistic modelling of wind and supernovae shocks in star clusters: addressing  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  and other problems in Galactic cosmic rays // *MNRAS*. — 2020. — Vol. 493, no. 3. — P. 3159–3177.

24. Morlino G., Blasi P., Peretti E., Cristofari P. Particle acceleration in winds of star clusters // MNRAS. — 2021. — Vol. 504, no. 4. — P. 6096–6105.
25. Aharonian Felix, Yang Ruizhi, de Oña Wilhelmi Emma. Massive stars as major factories of Galactic cosmic rays // Nature Astronomy. — 2019. — Vol. 3. — P. 561–567.
26. Strong Andrew W., Moskalenko Igor V., Ptuskin Vladimir S. Cosmic-Ray Propagation and Interactions in the Galaxy // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2007. — Vol. 57, no. 1. — P. 285–327.
27. Funk S. Ground- and Space-Based Gamma-Ray Astronomy // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2015. — Vol. 65. — P. 245–277.
28. Minter Anthony H., Spangler Steven R. Observation of Turbulent Fluctuations in the Interstellar Plasma Density and Magnetic Field on Spatial Scales of 0.01 to 100 Parsecs // ApJ. — 1996. — Vol. 458. — P. 194.
29. Han J. L., Ferriere K., Manchester R. N. The Spatial Energy Spectrum of Magnetic Fields in Our Galaxy // ApJ. — 2004. — Vol. 610, no. 2. — P. 820–826.
30. Jansson R., Farrar G. R. A New Model of the Galactic Magnetic Field // ApJ. — 2012. — Vol. 757. — P. 14.
31. Ackermann M., Ajello M., Allafort A. et al. A Cocoon of Freshly Accelerated Cosmic Rays Detected by Fermi in the Cygnus Superbubble // Science. — 2011. — Vol. 334. — P. 1103–.
32. Abeysekara A. U., Albert A., Alfaro R. et al. HAWC observations of the acceleration of very-high-energy cosmic rays in the Cygnus Cocoon // Nature Astronomy. — 2021. — Vol. 5. — P. 465–471.
33. Mestre Enrique, de Oña Wilhelmi Emma, Torres Diego F. et al. Probing the hadronic nature of the gamma-ray emission associated with Westerlund 2 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — Vol. 505, no. 2. — P. 2731–2740.
34. Yang Rui-zhi, de Oña Wilhelmi Emma, Aharonian Felix. Diffuse  $\gamma$ -ray emission in the vicinity of young star cluster Westerlund 2 // Astronomy & Astrophysics. — 2018. — Vol. 611. — P. A77.
35. Bykov Andrei M., Toptygin Igor' N. Reviews of topical problems: Particle kinetics in highly turbulent plasmas (renormalization and self-consistent field methods) // Physics Uspekhi. — 1993. — Vol. 36, no. 11. — P. 1020–1052.
36. Toptygin I. N. Cosmic rays in interplanetary magnetic fields. — Springer, Dordrecht, 1985.
37. Bykov A. M., Toptygin I. N. Effect of Shocks on Interstellar Turbulence and Cosmic-Ray Dynamics // Astrophysics and Space Science. — 1987. — Vol. 138, no. 2. — P. 341–354.
38. Norman Colin A., Ferrara Andrea. The Turbulent Interstellar Medium: Generalizing to a Scale-dependent Phase Continuum // The Astrophysical Journal. — 1996. — Vol. 467. — P. 280–306.
39. Foreman-Mackey Daniel, Hogg David W., Lang Dustin, Goodman Jonathan. emcee: The MCMC Hammer // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2013. — Vol. 125, no. 925. — P. 306.
40. Casse M., Paul J. A. On the stellar origin of the Ne-22 excess in cosmic rays // ApJ. — 1982. — Vol. 258. — P. 860–863.
41. Rate Gemma, Crowther Paul A., Parker Richard J. Unlocking Galactic Wolf-Rayet stars with Gaia DR2 - II. Cluster and association membership // MNRAS. — 2020. — Vol. 495, no. 1. — P. 1209–1226.
42. Maíz Apellániz J., Sota A., Morrell N. I. et al. First whole-sky results from the Galactic O-Star Spectroscopic Survey // Massive Stars: From alpha to Omega. — 2013. — P. 198.
43. Ekström S., Georgy C., Eggenberger P. et al. Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120 M at solar metallicity ( $Z = 0.014$ ) // A&A. — 2012. — Vol. 537. — P. A146.
44. Limongi Marco, Chieffi Alessandro. Presupernova Evolution and Explosive Nucleosynthesis of Rotating Massive Stars in the Metallicity Range  $-3 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0$  // Astrophys. J. Suppl.. — 2018. — Jul. — Vol. 237, no. 1. — P. 13.

45. Seo Jeongbhin, Kang Hyesung, Ryu Dongsu. The Contribution of Stellar Winds to Cosmic Ray Production // Journal of Korean Astronomical Society. — 2018. — Vol. 51, no. 2. — P. 37–48.
46. Leitherer Claus, Schaerer Daniel, Goldader Jeffrey D. et al. Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation // Astrophys. J. Suppl.. — 1999. — Vol. 123, no. 1. — P. 3–40.