

На правах рукописи

**Каляшова Мария Евгеньевна**

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

Специальность 1.3.1 — физика космоса, астрономия

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Научный руководитель: Быков Андрей Михайлович,  
д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН,  
руководитель отделения ОФПАФА  
ФТИ им. А. Ф. Иоффе,

Официальные оппоненты: Догель Владимир Александрович,  
д.ф.-м.н., проф.,  
главный научный сотрудник  
Физический Институт им. П. Н. Лебедева,

Лутовинов Александр Анатольевич,  
д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН,  
зам. директора  
Институт космических исследований РАН,

Ведущая организация: ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая  
обсерватория РАН

Защита состоится ... 2023 г. в ... на заседании диссертационного совета 34.01.04 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и на веб-сайте ФТИ [www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru).

Автореферат разослан ... 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к. ф.-м. н.

Штернин П.С.

## Общая характеристика работы

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

Поиск источников галактических КЛ, в том числе с энергиями выше петаэлектронвольт (ПэВ), является одной из важных и актуальных задач астрофизики высоких энергий [1, 2, 3]. Наиболее естественными кандидатами в ускорители КЛ, с точки зрения энергетике, являются остатки сверхновых звезд (ОСН), ударные волны (УВ) которых способны эффективно ускорять частицы за счет механизма Ферми I рода [1, 4, 5]. В то же время известно, что существенная доля сверхновых вспыхивает в результате коллапса ядер массивных звезд, часть из которых являются членами компактных или разреженных звездных скоплений [6].

Внутри звездных скоплений, богатых массивными звездами, выделяется огромная кинетическая энергия за счет вспышек сверхновых и звездных ветров, причем мощности этих двух источников сравнимы по величине. Эта энергия может идти на ускорение частиц, в частности, за счет коллективных плазменных эффектов [7]. Ускорение КЛ в звездных скоплениях является альтернативой стандартной парадигме ускорения КЛ ударными волнами одиночных, изолированных друг от друга сверхновых.

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  $\sim 100$  пк) каверны горячего и разреженного газа, которую называют сверхпузырем или сверхкаверной (superbubble). Ускорение частиц ансамблем УВ и их переускорение в сильно турбулентной перемежаемой среде в сверхкаверне может быть более эффективным, чем ускорение Ферми на одиночной УВ остатка сверхновой [8].

В последние годы на основе наблюдательных исследований компактных скоплений предприняты попытки моделирования в них процессов ускорения КЛ. Механизму ускорения КЛ на взаимодействующих УВ – сталкивающихся ветрах или УВ остатков сверхновых – посвящен ряд работ А.М. Быкова и соавторов [9, 10]. Эти авторы построили модель ускорения частиц на сходящихся быстрых магнитогидродинамических (МГД) течениях при столкновении ОСН и ветров звезд. Нелинейное моделирование распределения частиц в упрощенной геометрии предсказывает очень жесткий спектр частиц. Попытки учесть эффекты геометрии и зависимость от времени были предприняты в работах [10, 11]. Можно ожидать, что ускорение КЛ сверхновыми звездами в компактных звездных скоплениях обеспечит высокие максимальные энергии ускоренных частиц – выше так называемого «колена» в наблюдаемом спектре КЛ [10]. В компактном скоплении ускорение может происходить как в системах «ОСН-ветер» или «ветер-ветер», описанных выше, так и на УВ остановки коллективного ветра. Последнее было рассмотрено в работах [12, 13], авторы которых пришли к выводу, что максимальные энергии ускоренных частиц в таких системах также достигают ПэВ.

Проверка моделей ускорения КЛ в скоплениях звезд может быть выполнена средствами гамма-астрономии, которая позволяет изучать процессы в источниках КЛ. Современные гамма-телескопы — орбитальная обсерватория Fermi, а также наземные телескопы HESS, MAGIC, LHAASO, Tibet, Carpet-2 детектируют повышенные потоки гамма-излучения в направлении на скопления звезд [14, 15]. 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, соответствующий OB-ассоциации Лебедь OB2, сверхкаверна 30 Doradus C в Большом Магеллановом Облаке и другие источники. В частности, из анализа высокоэнергичного гамма-излучения компактных скоплений Westerlund 1 и 2 и OB-ассоциации Лебедь OB2 было найдено [14], 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. Кроме того, накапливающаяся статистика детектирования космических нейтрино высоких энергий обсерваториями IceCube и Байкал-GVD позволяет проводить их совместный анализ с данными гамма-обсерваторий и делать заключения об источниках и механизмах излучения (см., например, [16, 17]). Адекватная интерпретация этих наблюдений требует построения моделей излучения компактных и разреженных звездных скоплений за счет ускоренных частиц, что является одной из задач диссертационной работы.

Наблюдательная поддержка исследований звездных скоплений является важной частью научных программ действующих и планируемых рентгеновских, гамма- и других обсерваторий, что подтверждает актуальность темы. В последнее время было реализовано значительное количество наблюдений, позволяющих прямо или косвенно проверить применимость имеющихся моделей и оценить ключевые параметры, которые должны иметь скопления как предполагаемые источники КЛ. 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 звездных скоплений. Таким образом, тема работы и поставленные в ней цели и задачи являются актуальными.

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

Были поставлены следующие задачи:

1. Анализ предположения, что галактические компактные скопления являются источниками КЛ с энергиями выше 100 ПэВ. Исследование распространения КЛ высоких энергий, ускоренных в скоплениях звезд, в галактическом магнитном поле.
2. Моделирование спектров гамма-излучения OB-ассоциаций и компактных скоплений на основе модели транспорта частиц в турбулентной среде с ударными фронтами.

3. Моделирование обогащения космических лучей изотопами  $^{22}\text{Ne}$  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, в магнитном поле Галактики. На ее основе найдены величины анизотропии и потоков галактических КЛ 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. Построена модель обогащения космических лучей изотопами  $^{22}\text{Ne}$  в галактических звездных скоплениях, учитывающая современные модели эволюции массивных звезд и процессы ускорения частиц, влияющих на химический состав КЛ.

**Научная и практическая значимость.** В данной работе путем исследования наблюдаемых проявлений процессов ускорения в звездных скоплениях показано, что в этих объектах может рождаться существенная компонента галактических КЛ. В работе получены оценки мощности источников и эффективности ускорения частиц; эти оценки, в свою очередь, могут быть использованы в будущих более продвинутых моделях источников КЛ. Реализация моделирования включает в себя универсальные инструменты (код Монте-Карло для распространения частиц в магнитном поле Галактики, программа построения спектра гамма-излучения), которые могут быть полезны и для других расчетов. Наконец, в работе решены значимые задачи астрофизики КЛ: в рамках моделирования найдены возможные объяснения избытка  $^{22}\text{Ne}$  в КЛ и кусочной формы спектров гамма-излучения ряда звездных скоплений.

**Методология и методы исследования.** Методология исследования заключается в том, чтобы с помощью разработки новых и модификации существующих моделей 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 разработана аналитическая модель переноса частиц внутри звездного скопления, основанная на методе перенормировок кинетических коэффициентов частиц в сильно турбулентной плазме, предложенного в работах А.М.Быкова и И.Н. Топтыгина. В третьей главе выполнено моделирование химического состава ускоряемого в звездном скоплении вещества на основе существующих моделей звездного нуклеосинтеза, для которых сделаны интерполяции на все необходимые массы звезд.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Численный расчет диффузионных коэффициентов ускоренных частиц на основе наблюдательных данных о галактическом турбулентном магнитном поле позволяет построить модель распространения космических

лучей с энергиями выше ПэВ в Галактике, учитывающую геометрию Галактики, структуру регулярного и турбулентного магнитных полей и распределение источников космических лучей.

2. Молодые компактные галактические скопления могут быть источниками космических лучей сверхвысоких энергий (100-300 ПэВ); доля данных источников может составлять десятки процентов без превышения наблюдаемой дипольной анизотропии космических лучей.
3. Наблюдаемые спектры гамма-источников Cygnus Cocoon и Westerlund 2 удовлетворительно объясняются в рамках модели ускорения и переноса космических лучей в турбулентной плазме с ударными волнами в скоплениях молодых звезд.
4. Аномальное отношение изотопов  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ , наблюдаемое в низкоэнергичных космических лучах, может объясняться рождением значительной их части в молодых звездных скоплениях Галактики.

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

1. Все существующие модели, использованные в работе (например модели звездного нуклеосинтеза *Geneva* и *Frascati*), хорошо изучены, непротиворечивы, описаны в публикациях в реферируемых журналах и успешно используются для решения задач, сходных с задачами работы.
2. Все методы, использованные в работе (метод Монте-Карло, уравнения движения частиц и их численное и аналитическое решение, кинетические и МГД модели) адекватны поставленным задачам.
3. Все разработанные и использованные модели были протестированы на простых задачах, или сравнивались между собой.
4. Все полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с наблюдательными данными. Они также не противоречат друг другу.

**Апробация работы.** Основные результаты работы опубликованы в 7 статьях в реферируемых журналах. Результаты работы также были представлены на всероссийских и международных конференциях: «ФизикА.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).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 113 страниц с 32 рисунками и 8 таблицами. Список литературы включает в себя 131 наименование.

## Содержание работы

**Первая глава** посвящена исследованию анизотропии и потоков КЛ, ускоренных в компактных звездных скоплениях. Одиночные ОСН являются одними из наиболее вероятных источников КЛ с энергиями до сотен ТэВ, однако не могут ускорять КЛ до энергий  $\sim$  ПэВ и выше. Молодые компактные

скопления содержат большие популяции массивных звезд и, как следствие, имеют высокий темп вспышек сверхновых. В системе сходящихся потоков, такой, например, как взаимодействующие УВ сверхновой и быстрый ветер О- или В-звезды, происходит более эффективное удержание частиц, чем на отдельной УВ, что модифицирует механизм Ферми I рода и приводит к более высоким максимальным энергиям ускоренных частиц. Такие системы могут ускорять протоны до энергий порядка сотен ПэВ [10] и являются предполагаемыми галактическими источниками частиц таких энергий.

Оценить вклад галактических компактных скоплений в поток КЛ сверхвысоких энергий можно исследуя анизотропию КЛ от этих источников, при том, что внегалактические КЛ считаются приходящими изотропно. Наблюдательные данные по амплитуде анизотропии КЛ приводит наземная черенковская обсерватория Оже (Pierre Auger Observatory)[18] — в диапазоне энергий десятки ПэВ-десятки ЭэВ она не превышает 1%.

С целью исследования галактических компактных скоплений как источников КЛ с энергиями выше 100 ПэВ выполнено моделирование распространения частиц в магнитном поле Галактики от известных скоплений и расчет 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  $E_{CR} = 10^{17}$  эВ и  $E_{CR} = 3 \times 10^{17}$  эВ от галактических компактных скоплений методом Монте-Карло с учетом вращения частиц в регулярном магнитном поле Галактики;
3. Расчет амплитуды дипольной анизотропии и потока КЛ, ускоренных в галактических компактных скоплениях.

В работе использован двухкомпонентный спектр турбулентного магнитного поля Галактики, описанный в работах[19, 20]:

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

$$E_B(k) \propto \left( \frac{k}{k_0} \right)^{-5/3}, \quad 1/k < 0.5 \text{ кпк}. \quad (2)$$

Среднеквадратичное значение турбулентного магнитного поля было принято равным 6 мкГс. Турбулентное магнитное поле моделировалось как суперпозиция плоских волн со случайными направлениями, фазами и поляризациями, а амплитуда каждой моды определялась энергетическим спектром. Путем прямого численного решения уравнений движения тестовых частиц получены оценки на значения коэффициентов диффузии в заданном поле для частиц с энергиями  $10^{17}$  эВ и  $3 \times 10^{17}$  эВ — соответственно,  $2.2 \times 10^{30} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$  и  $4.9 \times 10^{30} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ .

В сформированной турбулентности с найденным коэффициентом диффузии  $\kappa$  методом Монте-Карло смоделирован транспорт частиц. Суть метода состоит в том, что тестовые частицы претерпевают малоугловое рассеяние с длиной свободного пробега, которая определяется найденным коэффициентом

том диффузии  $\kappa$ . Это имитирует рассеяние частиц в турбулентном магнитном поле. Параметры Галактики были приняты как 30 кпк — диаметр, и 10 кпк — высота гало. В качестве модельных источников были взяты 10 наиболее массивных скоплений Галактики, описанных в [21]. Предполагалось, что вспышка сверхновой в каждом скоплении происходит раз в  $\sim 20000$  лет, что для 10 скоплений дает частоту раз в  $\sim 2000$  лет.

Кроме того, учтено влияние крупномасштабного регулярного магнитного поля Галактики на потоки и анизотропию. В качестве модели регулярного поля использована модель, описанная в [22], включающая в себя 21 параметр. Амплитуда регулярного галактического поля достигает значений  $\sim 3$  мкГс, сравниваясь по порядку величины с амплитудой турбулентного поля. Учет регулярного поля был выполнен следующим образом: в промежутках между последовательными рассеяниями частица двигалась по винтовой линии вокруг направления регулярного магнитного поля.

Интенсивность КЛ в дипольном приближении равна:

$$I(\mu) = I_0 + I_1\mu, \quad (3)$$

где  $\mu = \cos \Theta$ , где  $\Theta$  — угол между исследуемым направлением, и направлением, в котором достигается максимальная интенсивность. Амплитуда дипольной анизотропии  $|A|$  определяется как разница между максимальной и минимальной интенсивностью:

$$|A| = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \left| \frac{I_1}{I_0} \right|. \quad (4)$$

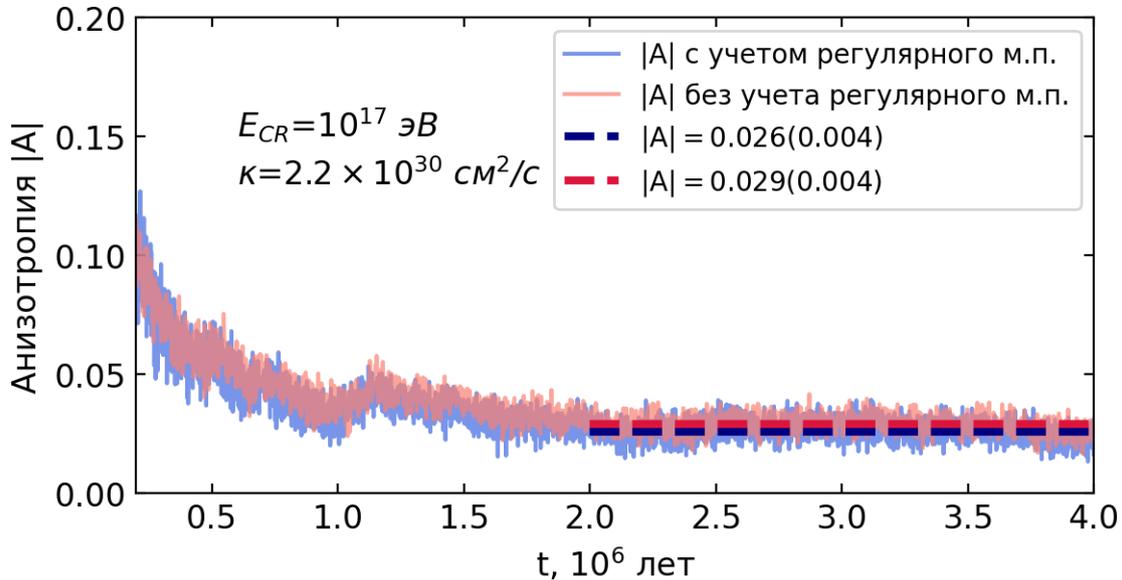


Рис. 1: Амплитуда анизотропии КЛ в зависимости от времени для протонов с энергией  $10^{17}$  эВ. Штриховыми линиями показаны средние значения  $|A|$  за последние  $2 \times 10^6$  лет. В скобках указаны ошибки численного расчета амплитуды анизотропии.

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 регулярном 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. Точность численного

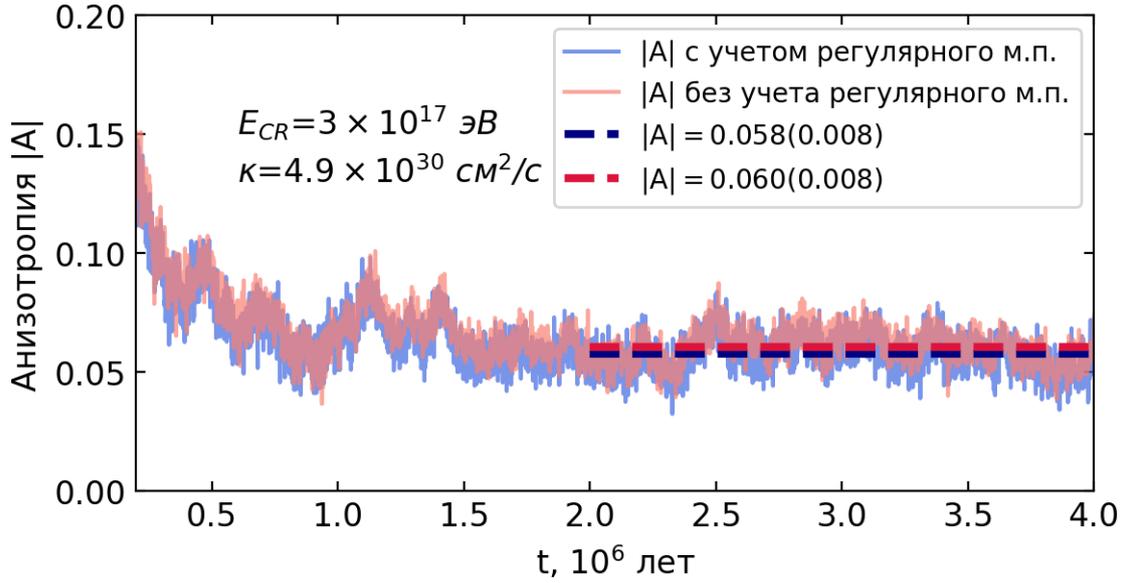


Рис. 2: Амплитуда анизотропии КЛ в зависимости от времени для протонов с энергией  $3 \times 10^{17}$  эВ. Штриховыми линиями показаны средние значения  $|A|$  за последние  $2 \times 10^6$  лет. В скобках указаны ошибки численного расчета амплитуды анизотропии.

расчета анизотропии не позволяет достоверно рассчитать влияние регулярного поля, однако можно утверждать, что различие анизотропии в расчетах с учетом и без учета регулярного поля не превышает 30%. Таким образом, учет регулярного поля мало влияет на результат.

Результаты моделирования приводят к значениям амплитуды анизотропии, в несколько раз превышающую наблюдаемую ( $\lesssim 0.01$ ). Уменьшить величину анизотропии может присутствие изотропной внегалактической компоненты КЛ. Сравнивая рассчитанные и наблюдаемые значения  $|A|$ , можно заключить, что компактные скопления могут обеспечивать до  $\sim 33\%$  потока 100-ПэВных и до  $\sim 16\%$  потока 300-ПэВных КЛ без превышения наблюдаемой амплитуды анизотропии.

На основе частоты и энергетики вспышек сверхновых в компактных скоплениях найдены модельные потоки КЛ исследуемых энергий. Из сравнения наблюдаемого и модельного потоков КЛ можно оценить эффективность ускорения, т.е. долю общей энергии вспышек сверхновых в скоплениях, которая должна идти в частицы, ускоренные предлагаемым механизмом. Для того, чтобы получить найденные выше доли КЛ от скоплений в общем потоке, требуется эффективность ускорения  $\simeq 7.5\%$ .

**Вторая глава** посвящена моделированию спектров  $\gamma$ -излучения ОВ-ассоциаций и компактных массивных скоплений. ОВ-ассоциации — разреженные скопления молодых звезд — содержат как большое количество массивных звезд О- и В- типов, так и множество маломассивных звезд, имея протяженность порядка десятков парсек. В работе [23] представлены наблюдения Fermi-LAT в ГэВном диапазоне протяженного  $\gamma$ -источника — Кокона Лебеда (Cygnus Socom), связанного со сверхкаверной, окружающей ассоциацию Лебедь ОВ2. Как показывает анализ данных Fermi-LAT, на ГэВных энергиях спектральное распределение энергии  $\gamma$ -излучения Кокона Лебеда подчиняется степенному закону с показателем степени  $\sim -2.1$ , тогда как исследования этой области в ТэВном диапазоне показали, что ТэВный спектр

Кокона Лебеда близок к степенному с показателем степени  $\sim -2.6$ , т.е. значительно смягчается по сравнению с ГэВным на переходной энергии  $\sim 0.5$  ТэВ [24]. Подобное поведение демонстрируют и некоторые компактные скопления, например, Westerlund 2 [25] — спектр  $\gamma$ -излучения Westerlund 2 так же, как и спектр Кокона Лебеда, имеет излом на энергии  $\sim 0.5$  ТэВ: показатель степени меняется с  $\sim -2.0$  до  $\sim -2.6$ .

В условиях МГД турбулентности с сильными ударными волнами возможно ускорение протонов КЛ посредством механизма Ферми II рода. В разделе 2.2 диссертации описано теоретическое моделирование процессов ускорения и переноса частиц в звездном скоплении на основе метода перенормировок [26]. Рассмотрены два режима транспорта КЛ (для низкоэнергичных и высокоэнергичных частиц) в турбулентной плазме с ударными фронтами.

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 с импульсом  $p$ . Длина свободного пробега частиц в результате рассеяния на магнитных флуктуациях может быть записана как [27]:

$$\Lambda(p) \simeq l_{\text{corr}} \cdot \left[ \frac{R_H(p)}{l_{\text{corr}}} \right]^{2-\nu}. \quad (5)$$

Здесь  $\nu$  — степенной индекс МГД турбулентности,  $R_H(p)$  — гирорадиус КЛ. Параметр  $l_{\text{corr}}$ , определенный таким образом, по порядку величины равен среднему расстоянию между сильными УВ в системе. Если  $l \ll l_{\text{corr}}$ , система является сильно перемежаемой для частиц, что означает, что их кинетика существенно разная в областях около ударных фронтов и между ними; перенос частиц происходит в основном за счет турбулентной адвекции. Если  $l \gg l_{\text{corr}}$ , то частица на длине своего пробега успевает провзаимодействовать с многими фронтами, распространение частиц в системе является преимущественно диффузионным. Переходный импульс  $p_*$ , на котором происходит смена режимов транспорта частиц, приближенно определяется выражением:  $v\Lambda(p_*) \simeq 3ul_{\text{corr}}$ . Спектр ускоренных частиц в зависимости от времени для низких энергий ( $p < p_*$ ) был рассчитан в работе [8] и может быть приближен степенным спектром с индексом, близким к  $-2$ :  $p^2 N(p) \sim p^{-2}$  (данные Ферми воспроизводятся, если спектр низкоэнергичных протонов имеет показатель  $\sim -2.1$ ).

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. Для таких частиц было рассмотрено две модели. Первая (Модель 1) подразумевает, что частицы диффузионно распространяются в турбулентной среде с сильными УВ остатков СН или ветров массивных звезд. В результате решения стационарного кинетического уравнения в сферически симметричном скоплении для этого случая получена функция распределения в пространстве импульсов:

$$N(p) = A_0(p/p_*)^{-(\nu+1)/2} K_a((p/p_*)^{2-\nu} \Delta), \quad (6)$$

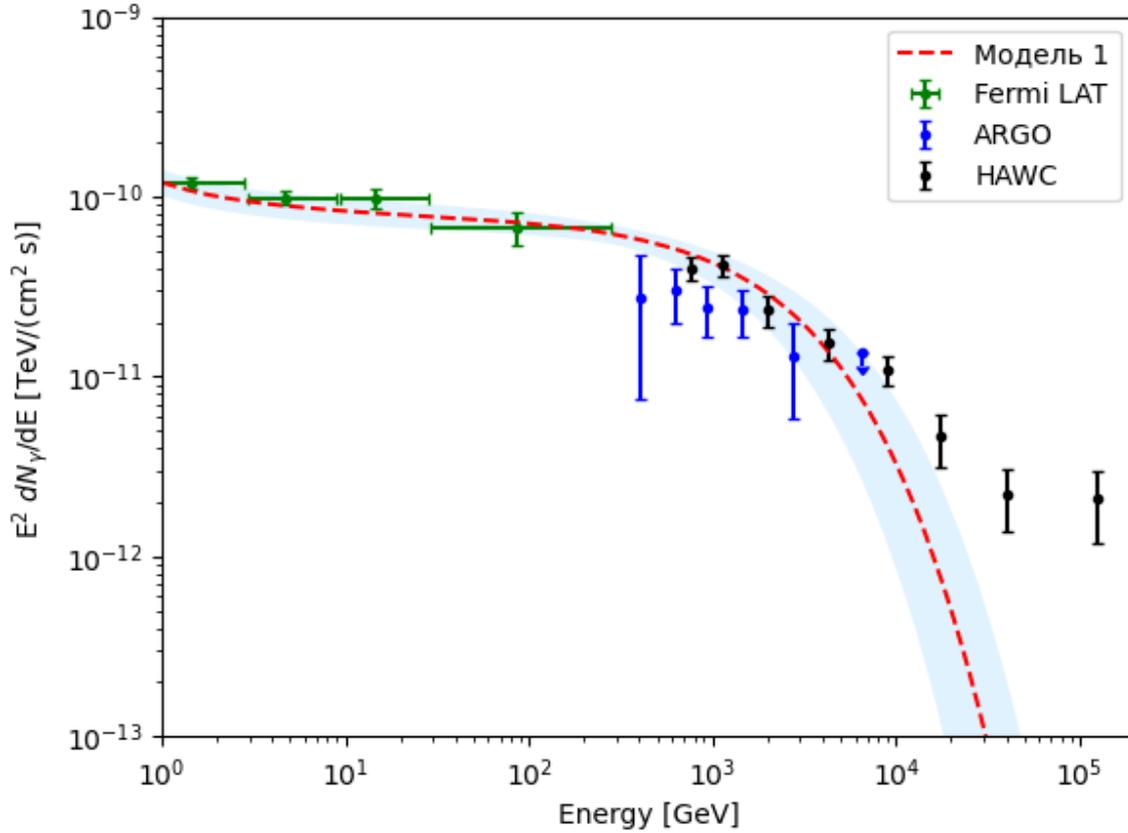


Рис. 3: Спектральное распределение гамма-излучения Кокона Лебеда в Модели 1 для следующих параметров:  $\nu = 1.51$ ,  $l_{\text{corr}} = 7.6$  пк. Остальные параметры зафиксированы на величинах  $B_0 = 15$  мкГс,  $R = 15$  пк,  $u = 1000$  км с $^{-1}$ . Полупрозрачная область соответствует трем стандартным отклонениям от медианного значения. Дополнительная неопределенность может возникнуть из-за неопределенности переходной области в между режимами.

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

$$\Delta = \frac{\pi}{2} \frac{c\Lambda(p_*)}{(2 - \nu)uR}. \quad (7)$$

Нормировка  $A_0$  зависит от мощности источника.

В разделах 2.3 и 2.4 приведены аппроксимации наблюдаемых спектров  $\gamma$ -излучения скоплений Лебедь OB2 и Westerlund 2 в рамках Модели 1. 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.

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  $u = 1000$  км с $^{-1}$  для Кокон Лебеда; для Westerlund 2 положено  $B_0 = 50$  мкГс,  $R = 2$  пк и  $u = 1500$  км с $^{-1}$ .

Для того, чтобы подогнать модельные спектры под данные наблюдений  $\gamma$ -излучения и найти соответствующие параметры, в работе использовался

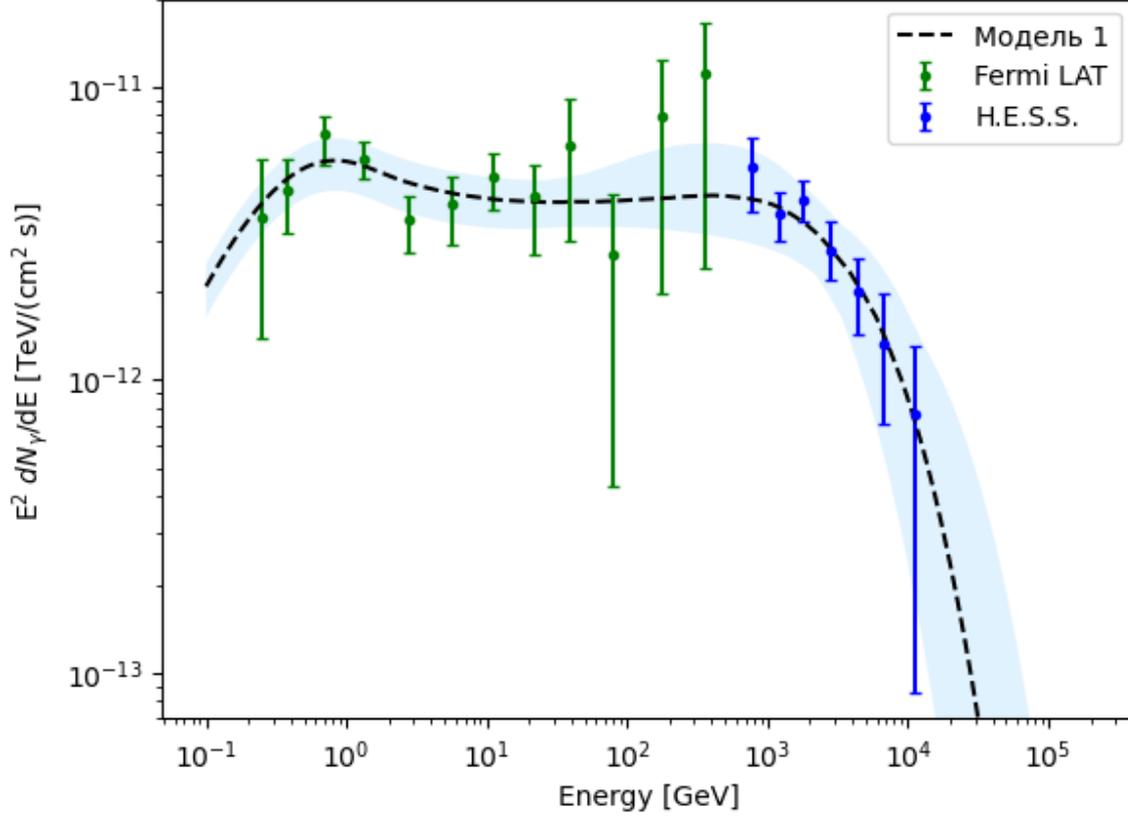


Рис. 4: Спектральное распределение гамма-излучения компактного скопления Westerlund 2 в Модели 1 для следующих параметров:  $\nu = 1.52$ ,  $l_{\text{corr}} = 0.55$  пк. Остальные параметры зафиксированы на величинах  $B_0 = 50$  мкГс,  $R = 2$  пк,  $u = 1500$  км с $^{-1}$ . Полупрозрачная область соответствует трем стандартным отклонениям от медианного значения.

аффинный метод Монте-Карло по схеме марковских цепей, реализованный в пакете *emcee* на Python [28]. Полученные значения параметров для Кокона Лебеда:

$$\nu \simeq 1.51_{-0.04}^{+0.04}, \quad l_{\text{corr}} \simeq 7.6_{-2.1}^{+6.1} \text{ пк}, \quad (8)$$

а для Westerlund 2:

$$\nu \simeq 1.52_{-0.12}^{+0.07}, \quad l_{\text{corr}} \simeq 0.55_{-0.12}^{+0.41} \text{ пк}. \quad (9)$$

Найденные значения параметров выглядят разумно, показатель спектра турбулентности  $\nu$  близок к показателю Крайшна (3/2). Более высокая средняя скорость турбулентных потоков ( $\sim 3000$  км с $^{-1}$ ) привела бы к спектру турбулентности, более близкому к Колмогоровскому ( $\nu \sim 1.63 - 1.68$ ). Спектры  $\gamma$ -излучения с найденными параметрами показаны на рис. 3, 4.

Модель 2 для частиц с  $p > p_*$  основана на том, что взаимодействие сильных УВ остатков сверхновых с флуктуациями плотности – облаками – может привести к формированию многочисленных слабых вторичных УВ. Как было показано в [29], коэффициент диффузии КЛ в присутствии слабых УВ становится энергонезависимым [29] в достаточно широком диапазоне энергий, что соответствует  $\nu = 2$ . В таком случае спектр ускоренных частиц, и соответствующий спектр  $\gamma$ -излучения являются степенными. На рис. 5 приведен

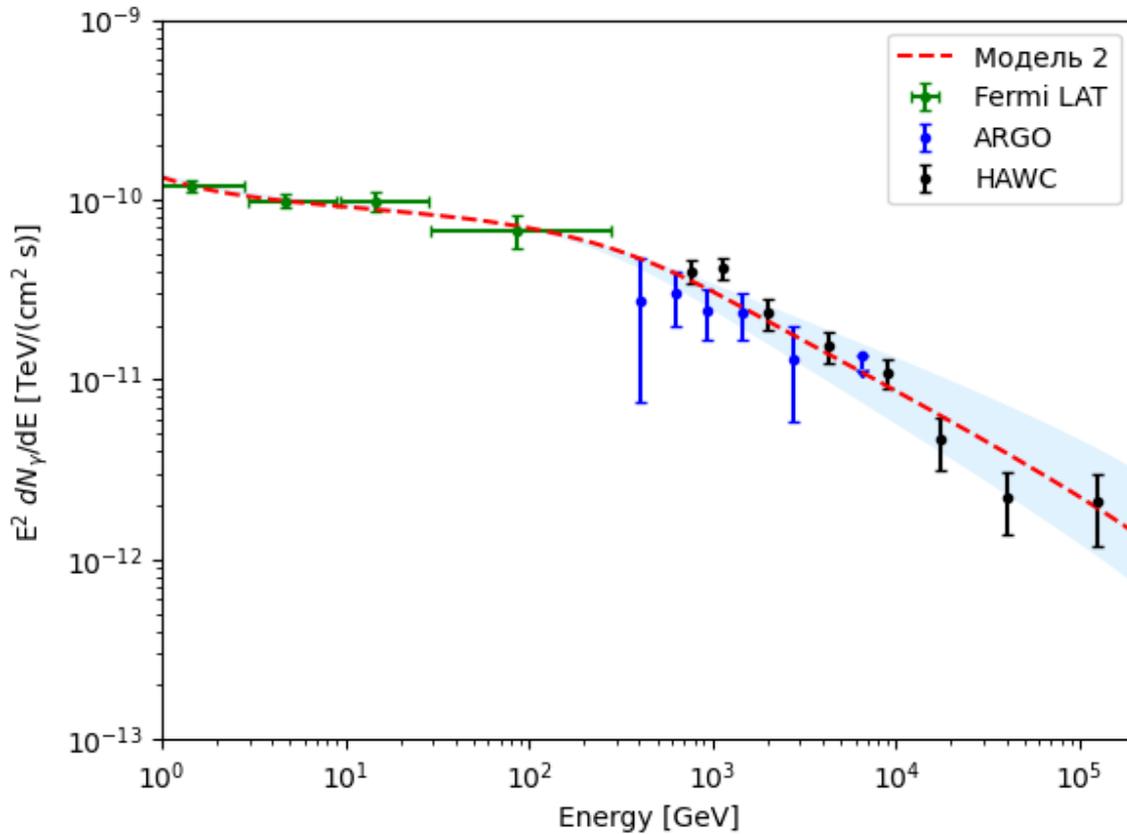


Рис. 5: Спектральное распределение гамма-излучения Кокона Лебеда в Модели 2, где  $\nu = 2$  и коэффициент диффузии в сверхкаверне не зависит от энергии и равен  $\kappa = 9.7 \times 10^{27} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ , а энергия перехода равна  $\epsilon_* = 2.2 \text{ ТэВ}$ . Полупрозрачная область соответствует ошибкам определения наклона ТэВного спектра в работе [24].

спектр  $\gamma$ -излучения для Модели 2 со слабыми ударными волнами в сверхкаверне Лебеда (ее размер не равен размеру ОВ-ассоциации и равен  $\sim 55$  пк). Наблюдаемый спектр Кокона Лебеда в области высоких энергий имеет степенной индекс  $-2.64_{-0.08}^{+0.14}$  [24]. Подобрано значение постоянного пространственного коэффициента диффузии  $\kappa$ . Для  $u = 1000 \text{ км с}^{-1}$   $\kappa = 9.7_{-0.2}^{+0.3} \times 10^{27} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ . Соответствующая энергия перехода между режимами должна быть 2.2 ТэВ. По уровню согласия с наблюдениями (рис. 3, 5), для Кокона Лебеда Модель 2 выглядит предпочтительнее Модели 1. Считается, что в скоплении Westerlund 2 еще не было вспышек сверхновых, поэтому к нему Модель 2 неприменима.

Рассмотрена энергетика источников. С учетом известных данных о кинетической мощности скоплений Лебедь ОВ2 и Westerlund 2 найдены значения эффективности конверсии механической энергии в ускорение частиц в этих скоплениях. Они равны  $\sim 3\%$  для скопления в Лебеде и  $\sim 2\%$  для Westerlund 2, что не превышает общепринятую оценку эффективности ускорения частиц на УВ – 10%.

Описанные модели могут успешно объяснить как наблюдаемое  $\gamma$ -излучение Кокона Лебеда, так и Westerlund 2. Это свидетельствует о том, что предложенный механизм ускорения и переноса частиц может быть при-

меним как к протяженным ОВ-ассоциациям, так и к компактным плотным скоплениям.

**Третья глава** посвящена моделированию обогащения КЛ изотопом  $^{22}\text{Ne}$  в скоплениях молодых массивных звезд. В результате многочисленных наблюдений установлено, что распространенности изотопов большинства химических элементов в солнечном ветре и в КЛ совпадают. Но имеются и несоответствия, наиболее значительным из которых является различие изотопного отношения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  на Солнце и в КЛ. Общепринятым источником обогащенного  $^{22}\text{Ne}$  вещества являются ветры углеродной последовательности звезд Вольфа-Райе (WR) [30], значительная часть которых находится в скоплениях молодых массивных звезд [6, 31].

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 из работы [32] (*Geneva*) и модель из работы [33] (*Frascati*). В разделе 3.2.3 описано сравнение моделей *Geneva* и *Frascati* для данной задачи – найдено среднее отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в скоплении с учетом только вещества, выбрасываемого ветрами. Модели оказались в удовлетворительном согласии.

Основными параметрами моделирования являлись:

1. Скорость начального вращения звезд в скоплении – рассматривались скорости 0, 150 км с<sup>-1</sup>, 300 км с<sup>-1</sup>;
2. Показатель степени начальной функции масс в скоплении – 1.8 – 2.6;
3.  $M_{\text{ВНС}}$  – начальная масса звезды, выше которой происходит прямой коллапс в черную дыру и, соответственно, не учитывается вещество, выбрасываемое при вспышке сверхновой – рассматривались массы 25  $M_{\odot}$ , 30  $M_{\odot}$ , 40  $M_{\odot}$ .

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

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 вещество, выбрасываемое на разных стадиях эволюции звезды, может ускоряться с разной эффективностью. Для оценки распределения вещества ОВ/WR/RSG в компактном скоплении использовано гидродинамическое моделирование с помощью кода PLUTO [34]. Оно выявило, что в компактном скоплении на 20% более эффективно удерживается вещество звезд WR, а также, что вещество сверхгигантов, скорее всего, ускоряется уже после начала вспышек сверхновых.

Слева на 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  $M_{\text{ВНС}}=25 M_{\odot}$ . Справа на рис. 6 приведены усредненные по времени удерж-

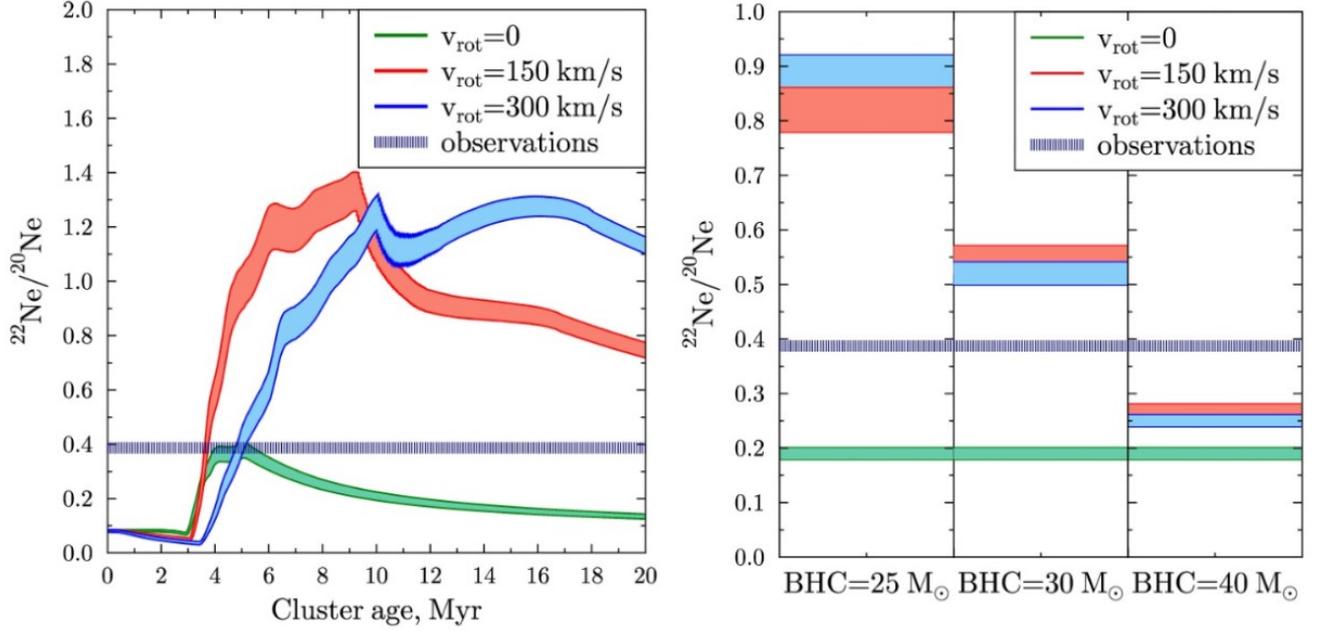


Рис. 6: Слева: Отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в веществе, ускоренном в массивном звездном скоплении в зависимости от его возраста с учетом различных скоростей вращения звезд и для интервала показателей степени начальной функции масс в скоплении 1.8-2.6 (верхний предел содержания  $^{22}\text{Ne}$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

жания КЛ в Галактике изотопные отношения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в КЛ, ускоренных в галактических молодых звездных скоплениях. Для  $M_{\text{BHC}}=25 M_{\odot}$  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  $v_{\text{rot}} = 300 \text{ км с}^{-1}$ ,  $\gamma_{\text{IMF}} = 1.8$ ,  $M_{\text{BHC}}=25 M_{\odot}$  и превышает наблюдаемое в КЛ более, чем в 2 раза.

В разделе 3.4 обсуждается энергетика предлагаемых источников. В работе [35] показано, что общая мощность ветров массивных звезд в Галактике составляет  $\simeq 1.1 \times 10^{41} \text{ эрг с}^{-1}$ . Исходя из [6, 31], мощность ветров массивных звезд в компактных скоплениях и ОВ-ассоциациях можно оценить как  $\simeq 6 \times 10^{40} \text{ эрг с}^{-1}$ . Доли механической энергии, выбрасываемой с ветрами массивных звезд и со вспышками сверхновых в одном звездном скоплении, рассчитаны с помощью моделирования кодом Starburst99 [36]. Найдено, что они соотносятся как  $\sim 1.4 : 1$ . Тогда полная мощность ветров+сверхновых в галактических скоплениях равна  $\simeq 1.5 \times 10^{41} \text{ эрг с}^{-1}$ . Принимая во внимание необходимую долю КЛ, которая должна быть ускорена в скоплениях на основе расчета  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  ( $\geq 37\%$ ), и эффективность ускорения КЛ ударными волнами ( $\sim 10\%$ ), можно получить полную мощность КЛ в рамках предложенной модели  $\sim 4 \times 10^{40} \text{ эрг с}^{-1}$ . Из наблюдений эта величина оценивается как  $(6 - 8) \times 10^{40} \text{ эрг с}^{-1}$ , т.е. в 1.5-2 раза больше, чем получено в модели. Этому может быть несколько объяснений: оценки мощности галактических ветров массивных звезд и содержания  $^{22}\text{Ne}$  в ветрах этих звезд могут быть

занижены, эффективность ускорения КЛ на сталкивающихся потоках в компактных скоплениях и ОВ-ассоциациях может быть больше, чем 10%.

Также рассмотрена гипотеза, что аномалия изотопного отношения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  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 диссертации получен ряд результатов, подтверждающих, 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, структуру галактического магнитного поля 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 космических 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 Лебедя и Westerlund 2 показана применимость модели к спектрам излучения ассоциаций звезд и найдены параметры модели, удовлетворяющие наблюдениям.
3. Построена модель обогащения  $^{22}\text{Ne}$  космических лучей, ускоренных на многочисленных ударных волнах от взаимодействующих ветров О-, В-звезд и звезд Вольфа-Райе в молодых массивных 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 КЛ, ускоренных в звездных скоплениях, а также рассмотрена модель локальных источников неоновой аномалии, получены оценки на необходимую кинетическую мощность близлежащих скоплений.

### Список публикаций по теме диссертации

- 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 (2019);
- 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 (2019);

- 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 (2020);
- A4. A. M. Bykov, M. E. Kalyashova Modeling of GeV-TeV gamma-ray emission of Cygnus Cocoon // *Advances in Space Research*, Volume 70, Issue 9, p. 2685-2695 (2022);
- 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 (2021);
- 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 (2021);

## Литература

1. Березинский В. С., Буланов С. В., Догель В. А. и др. *Астрофизика Космических Лучей*, М.Наука. — 1990.
2. Amato E. The origin of galactic cosmic rays // *International Journal of Modern Physics D*. — 2014. — Vol. 23, no. 7. — P. 1430013.
3. Blandford R., Simeon P., Yuan Y. 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. 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. Rate G., Crowther P. A., Parker R. J. Unlocking Galactic Wolf-Rayet stars with Gaia DR2 - II. Cluster and association membership // *MNRAS*. — 2020. — Vol. 495, no. 1. — P. 1209–1226.
7. Bykov A. M., Fleishman G. D. On non-thermal particle generation in superbubbles. // *MNRAS*. — 1992. — Mar. — Vol. 255. — P. 269–275.
8. Bykov A. M. Particle Acceleration and Nonthermal Phenomena in Superbubbles // *Space Science Reviews*. — 2001. — Vol. 99. — P. 317–326.
9. 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.
10. 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.
11. Vieu T., Gabici S., Tatischeff V. Particle acceleration at colliding shock waves // *MNRAS*. — 2020. — Vol. 494, no. 3. — P. 3166–3176.
12. Gupta S. Nath B. B., Sharma P., Eichler D. 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.
13. Morlino G., Blasi P., Peretti E., Cristofari P. Particle acceleration in winds of star clusters // *MNRAS*. — 2021. — Vol. 504, no. 4. — P. 6096–6105.

14. Aharonian F., Yang R., de Oña Wilhelmi E. Massive stars as major factories of Galactic cosmic rays // *Nature Astronomy*. — 2019. — Vol. 3. — P. 561–567.
15. Cao Zh., Aharonian F., 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.
16. 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.
17. 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.
18. Roulet E., Pierre Auger Collaboration. Large-scale anisotropies above 0.03 EeV measured by the Pierre Auger Observatory // 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). — Vol. 36 of International Cosmic Ray Conference. — 2019. — P. 408.
19. Minter A.H., Spangler S. 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.
20. 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.
21. Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gieles M. Young Massive Star Clusters // *ARA&A*. — 2010. — Vol. 48. — P. 431–493.
22. Jansson R., Farrar G. R. A new model of the Galactic magnetic field // *ApJ*. — 2012. — Vol. 757. — P. 14.
23. 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–.
24. 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.
25. Yang R., de Oña Wilhelmi E., Aharonian F. Diffuse  $\gamma$ -ray emission in the vicinity of young star cluster Westerlund 2 // *A&A*. — 2018. — Vol. 611. — P. A77.
26. Быков А. М., Топтыгин И. Н. Кинетика частиц в сильно турбулентной плазме (Методы перенормировок и самосогласованного поля) // *Усп. физ. наук*. — 1993. — Т. 163, № 11. — С. 19–56.
27. Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях, М.:Наука. — 1983.
28. Foreman-Mackey D., Hogg D. W., Lang D., Goodman J. emcee: The MCMC Hammer // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2013. — Vol. 125, no. 925. — P. 306.
29. 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.
30. Casse M., Paul J. A. On the stellar origin of the Ne-22 excess in cosmic rays // *ApJ*. — 1982. — Vol. 258. — P. 860–863.
31. 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.
32. Ekström S., Georgy C., Eggenberger P. et al. Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120  $M_{\odot}$  at solar metallicity ( $Z = 0.014$ ) // *A&A*. — 2012. — Vol. 537. — P. A146.
33. Limongi M., Chieffi A. Presupernova evolution and explosive nucleosynthesis of rotating massive stars in the metallicity range  $-3 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0$  // *ApJS*. — 2018. — Jul. — Vol. 237, no. 1. — P. 13.
34. Mignone A., Bodo G., Massaglia S. et al. PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics // *ApJS*. — 2007. — Vol. 170, no. 1. — P. 228–242.
35. Seo J., Kang H., Ryu D. The contribution of stellar winds to cosmic ray production // *Journal of Korean Astronomical Society*. — 2018. — Vol. 51, no. 2. — P. 37–48.
36. Leitherer C., Schaerer D., Goldader J. D. et al. Starburst99: Synthesis models for galaxies with active star formation // *ApJS*. — 1999. — Vol. 123, no. 1. — P. 3–40.