

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу Каляшовой Марии Евгеньевны «Скопления молодых массивных звезд как источники космических лучей и нетеплового излучения», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.1 — Физика космоса, астрономия

Диссертация посвящена компактным скоплениям молодых массивных звезд, а также ОВ-ассоциациям. В молодых звездных скоплениях за счет комбинированного действия ветров массивных звезд и сверхновых, которые выметают газ со скоростью $\sim(1-3)\times 10^8$ см/с, образуется область пониженной плотности размером ~ 100 пк – сверхкаверна. Процессы ускорения в этих кавернах или пузырях определяют спектры космических лучей и излучения. Стандартная модель ускорения КЛ в сверхновых была предложена Крымским (1977) и другими. Альтернативным процессом является ускорение КЛ в звездных скоплениях как результат коллективного эффекта ударных волн массивных звезд и сверхновых.

Наблюдения гамма-обсерваторий вместе с измерениями элементного и изотопного состава космических лучей предполагают, что молодые звездные скопления и сверхкаверны, вероятно, являются источником значительной доли галактических космических лучей. Наблюдения показывают, что спектры КЛ в этих областях более жесткие, чем в целом в Галактике. В своей работе диссертант представил модели генерации КЛ и излучения в скоплениях, а также интересную интерпретацию происхождения КЛ в этих объектах.

Одной из ключевых проблем происхождения КЛ является определение параметров диффузии в Галактике. В Главе 1 предполагается, что диффузия определяется «рассеянием» КЛ на флуктуациях магнитного поля. Предыдущие исследования определили спектр этой турбулентности в Галактике из потока радиоизлучения в направлении внегалактических источников. Спектр турбулентности в области для больших волновых чисел k Колмогоровский, $W(k)\sim k^{-5/3}$, а при малых k турбулентность описывается спектром с показателем $W(k)\sim k^{-0.37}$. Для нахождения коэффициентов диффузии в турбулентном поле М. Е. Каляшова предложила свой оригинальный метод. В модельных источниках запускались тестовые частицы, для которых численно решались уравнения движения в турбулентном поле. В результате были найдены коэффициенты диффузии в Галактике для частиц с энергиями 3×10^{15} – 3×10^{17} эВ. Эти результаты были использованы для определения анизотропии КЛ с энергиями 100 ПэВ и 300 ПэВ. Для полученных параметров диффузии методом Монте-Карло смоделировано трехмерное распространение высокоэнергичных частиц из источников. Показано, что энергетика галактических компактных скоплений позволяет обеспечить существенную долю в общем потоке КЛ. Таким образом, были получены важные и оригинальные результаты касательно происхождения КЛ в Галактике.

В Главе 1 был получен весьма важный результат для астрофизики, который позволяет понять физику распространения КЛ в Галактике, хотя есть ограничения модели, обусловленные тем, что наблюдательные данные во многих случаях неполны. В частности, спектры магнитных флуктуаций определяются интегралом в направлении внегалактических источников. Кроме того, произвольно предполагается, что средняя магнитная напряженность во всем объеме Галактики постоянна. Можно надеяться, что

более конкретные детали процессов распространения КЛ в Галактическом гало будут получены в рамках дальнейших исследований М. Е. Каляшовой.

В диссертации рассматривается диффузия в Галактике. Можно предположить две модели распространения КЛ. В первой из них предполагалось, что частицы заморожены в структуру магнитного поля и «рассеяние» частиц определяется флуктуациями магнитной линии вдоль среднего направления (приближение сильного магнитного поля). В частности, см., например, Zybin & Istomin, 1985, а также Dogiel et al. 1987 для галактических молекулярных облаков. Во второй из них рассматривается альтернативный процесс диффузии в Галактике за счет рассеяния КЛ на МГД-волнах (приближение слабого поля), где МГД-турбулентность генерируется, например, за счет потоковой неустойчивости (см., например, Dogiel et al. 2020 и монографию Березинский и др. 1990). Таким образом, вероятно, возможна интерпретация моделей из Глав 1 и 2 в терминах перечисленных выше процессов переноса в Галактике. В будущем можно надеяться, что развитый математический аппарат и обширный задел для диффузии, представленный в диссертации, может решить эту проблему в Галактике.

В классической работе А.М. Быкова и И.Н. Топтыгина 1993 г. были выведены сложные уравнения переноса частиц в среде с МГД-флуктуациями в турбулентной плазме и ударными фронтами. А. М. Быков и соавторы (см. обзор А. М. Вуков et al. 2020 и ссылки) предложили и развили две модели ускорения и распространения КЛ в компактных скоплениях и ОВ-ассоциациях. В первой из них ускорение КЛ происходит в галактических плотных скоплениях молодых звезд на взаимодействующих ударных волнах (Fermi 2). Во второй из них ускорение КЛ происходит в сходящихся потоках ветров от ударной волны молодой сверхновой и потоков массивных звезд в относительно разреженных ассоциациях ОВ (Fermi 1). В диссертации можно было бы аппроксимировать эти процессы двумя режимами: 1) в Модели 1: ускорение и распространение частиц описывается двумя диффузиями в координатном и импульсном пространствах, 2) а в Модели 2: диффузия + регулярное ускорение частиц на сходящихся потоках.

В диссертации М. Е. Каляшовой было показано, что модель прекрасно описывает спектры гамма-излучения компактного скопления Westerlund 2 в рамках Модели 1 и ОВ-каверны Кокон Лебеда в рамках Модели 2. В моем понимании, уравнения распространения КЛ в Главе 2 выводятся в другом приближении, чем в Главе 1, а именно, коэффициент пространственной диффузии определяется спектром МГД-флуктуаций (приближение слабого поля), а не спектром флуктуаций структуры магнитного поля (приближение сильного поля).

В третьей главе диссертации рассматривается природа избытка изотопного отношения $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в космических лучах. В диссертации проанализирован обширный наблюдательный и модельный материал, определен изотопный состав ветра звезд различных масс, и исследованы процессы звездной эволюции и нуклеосинтеза в скоплениях, а также процессы ускорения обогащенных ^{22}Ne КЛ в звездных скоплениях и ОВ-ассоциациях. Определены вариации отношения $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в массивных звездных скоплениях в зависимости от их возраста, скорости вращения звезд и других параметров. В диссертации получен весьма важный вывод: неоновая аномалия в потоке космических лучей Галактики может быть полностью объяснена ускорением ^{22}Ne в молодых массивных звездных скоплениях.

Я не нашел в работе каких-либо ошибок или некорректных утверждений. Поэтому я в отзыв включил скорее мои предложения на будущее.

1. В 1 Главе диссертации М. Е. Каляшова провела громоздкие численные расчеты методом Монте-Карло, где была получена величина анизотропии КЛ, учитывающая геометрию Галактики, структуру галактического магнитного поля и распределение источников КЛ. Сравнение результата, полученного в Главе 1 методом Монте-Карло и такого же, полученного в рамках стандартной диффузионной модели КЛ (см., например, Березинский и др. 1990) не показывают существенного различия, т.е., в моем понимании, можно было бы проще получить выводы без громоздких вычислений. Однако модель Монте-Карло с фиксированной структурой магнитных полей может быть основой для будущих расчетов, учитывающих упомянутые выше параметры, которые не учитываются в стандартной модели.
В модели принята произвольно величина гало 10 кпк (почему не 5 кпк или 20 кпк?). В общем случае размер гало не является свободным параметром, а оценивается, например, из кинетических уравнений для КЛ и магнитных флуктуаций. Однако, хотелось бы понять, насколько от структуры магнитных полей и размеров гало могут зависеть результаты, представленные в диссертации (как предположение для развития будущих исследований).
2. Скопления и каверны, в моем понимании, нестационарные, и их оболочки движутся вовне за счет выделения энергии источниками в центре, т.е. в общем случае размер оболочки $R(t) \neq \text{const}$. Анализ процессов распространения и разрушения таких оболочек был представлен в Schulreich & Breitschwerdt (2022). Является ли этот эффект нестационарности существенным для каверн/скоплений или он несущественен?
3. В скоплениях звезд и кавернах частицы инжектируются в процесс ускорения в потоках звездных ветров со скоростью $1000-3000 \text{ км с}^{-1}$, что соответствует энергии субрелятивистских частиц $< 100 \text{ кэВ}$. В то же время для интерпретации неоновой аномалии в спектре галактических КЛ необходимы энергичные ядра Ne с энергиями $< 1 \text{ ГэВ/нуклон}$. В диссертации отмечается, что отношение $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в релятивистской области должно быть сформировано за счет инжекции и ускорения частиц. Входящие данные представлены в третьей главе: источники 100 кэВ-ных ядер в скоплениях, вариации пространственных и временных параметров этих источников и т.д. Как мне кажется, это отношение $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в релятивистской области должно быть рассчитано так же, как и для протонов в Главе 2. Эволюция спектров релятивистских ядер Ne может быть получена из уравнений (2.9) и (2.25), где в правой части этих уравнений стоят источники 100 кэВ-ных частиц (на нуклон). Тогда математический аппарат, представленный в диссертации, может решить эту проблему, или такой анализ для $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ не требуется?

В диссертации М. Е. Каляшовой были получены реально важные результаты для астрофизики. М. Е. Каляшова обладает обширной базой математического аппарата, хорошо понимает теорию процессов в космических явлениях и разбирается в интерпретации наблюдательных данных. Текст диссертации написан ясным, и что важно, хорошим русским языком. Считаю, что диссертационная работа Каляшовой Марии Евгеньевны «Скопления молодых массивных звезд как источники космических лучей и нетеплового излучения» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Главный научный сотрудник, профессор
Физического института им. П. Н. Лебедева
В. А. Догель

06.04.2023

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53
Тел.: (+7 499) 132 62 35
e-mail: dogiel@td.lpi.ru