

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ФГБУН Главная (Пулковская)  
астрономическая обсерватория РАН  
доктор физ.-мат. наук Н.Р. Ихсанов

3 апреля 2023 г.

### О Т З Ы В ведущей организации

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

Диссертация посвящена процессам, происходящим в молодых массивных звездных скоплениях Галактики, особенностям ускоренных в этих объектах космических лучей и генерируемого ими гамма-излучения. Мощность ускорительных механизмов в Галактике, генерирующих частицы с энергиями в сотни ПэВ, в миллионы раз превышают возможности современных наземных ускорителей. Звёздные скопления являются альтернативой популярной модели ускорения космических лучей ударными волнами от изолированных сверхновых. В диссертации представлены и решены актуальные проблемы, каждой из которых посвящены отдельные главы: (1) проблема источников космических лучей в Галактике с энергиями выше ПэВ; (2) проблема происхождения гамма-спектров в интервале ГэВ-ТэВ в звёздных скоплениях; (3) проблема избытка изотопа  $^{22}\text{Ne}$  в космических лучах. Актуальность темы диссертации подтверждается многочисленными наблюдениями звездных скоплений в гамма- и рентгеновском диапазонах.

В первой главе диссертации выполнено моделирование анизотропии и потоков космических лучей с энергий порядка ПэВ и выше от компактных массивных звездных скоплений Галактики. На основе модели Галактического турбулентного магнитного поля с заданным спектром найдены коэффициенты диффузии в Галактике в широком диапазоне энергий. Исходя из полученных диффузионных коэффициентов методом Монте-Карло выполнено моделирование распространения ускоренных частиц от компактных галактических скоплений до Земли. Найдены значения анизотропии прихода космических лучей, около 3-6%, ускоренных в таких источниках. Важным результатом первой главы является вывод о том, что компактные звёздные скопления являются источниками значительной части потока космических лучей с энергией 100 ПэВ (~ 33%) и с энергией 300 ПэВ (~16%).

Во второй главе исследуются спектры гамма-излучения ОВ-ассоциаций и компактных звездных скоплений, имеющие особенность («излом») при энергии порядка ТэВ. В диссертации предположен протон-протонный механизм генерации гамма-излучения. Рассмотрены два режима переноса и ускорения протонов в турбулентной плазме с ударными фронтами. Показано, что на низких энергиях перенос обеспечивается в основном движениями среды (турбулентная адвекция), а на высоких энергиях перенос имеет диффузионный характер с длиной пробега, зависящей от среднего расстояния между сильными ударными волнами. Предложенная модель может объяснить наблюдаемые особенности в спектрах звездных скоплений. При исследовании энергетики ускорителей – скоплений Лебедь OB2 и Westerlund 2, сделан вывод о том, что на ускорение частиц расходуется 2-3% механической энергии скоплений.

Третья глава посвящена исследованию молодых галактических звездных скоплений как источников неоновой аномалии в космических лучах. Численно проверяется предположение, что источником повышенного содержания  $^{22}\text{Ne}$  в космических лучах являются ветры звезд Вольфа-Райе в массивных звездных скоплениях, где частицы ускоряются на совокупности ударных волн ветров массивных звезд и сверхновых. На основе моделей звездного нуклеосинтеза рассчитаны эволюция отношения  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в космических лучах, ускоренных в массивном звездном скоплении, и среднее отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в галактических космических лучах. Сделан вывод, что предлагаемые источники могут обеспечивать наблюдаемое обогащение космических лучей  $^{22}\text{Ne}$ .

По содержанию диссертации имеются следующие замечания.

В диссертации предполагается, что спектр флуктуаций магнитного поля на промежуточных масштабах,  $k = (2 - 3 \times 10^2) \text{кпк}^{-1}$ , является Колмогоровским, как и при  $k > 3 \times 10^2 \text{кпк}^{-1}$ . Поскольку это предположение относится к достаточно большому интервалу волновых чисел, не исключено, что коэффициент диффузии будет отличаться от найденного в диссертации. Кроме того, турбулентное магнитное поле, согласно Giacalone & Jokipii (1994), представлено суперпозицией плоских волн со случайными направлениями, фазами и поляризациями, но не указано, какому типу волн соответствуют эти флуктуации.

В диссертации не освещён вопрос о толщине мишени в компактных звёздных скоплениях, необходимой для генерации гамма-излучения интервале ГэВ-ТэВ космическими лучами.

В уравнение переноса частиц (2.25) входит время ускорения Ферми  $\tau_a = 9\kappa/u^2$ . Для представления о временном масштабе процесса ускорения в звёздных ассоциациях и компактных скоплениях было бы желательно привести порядок величины  $\tau_a$ , например, при

скорости ударного фронта  $u = 3000$  км/с. Тем более, что на стр. 27 указано время ускорения частиц модифицированным механизмом Ферми  $\sim 400$  лет при вспышке сверхновой.

Приведённые замечания и пожелания не снижают впечатления о диссертации М.Е. Каляшовой как о фундаментальном исследовании физических механизмов, приводящих к появлению в Галактике частиц сверхвысоких энергий и генерируемого ими гамма-излучения, что способствует пониманию природы процессов энерговыделения во Вселенной. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Результаты диссертации могут быть применены в ИНАСАН, АКЦ ФИАН, ИКИ РАН, ГАО РАН, САО РАН, КрАО РАН и ряде других научных учреждений.

Диссертационная работа М.Е. Каляшовой «Скопления молодых массивных звезд как источники космических лучей и нетеплового излучения» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Положением о присуждении учёных степеней ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Поставленные в диссертации задачи и полученные результаты соответствуют специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия, а её автор, Мария Евгеньевна Каляшова, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Содержание диссертации было представлено М.Е. Каляшовой на заседании объединенного семинара научных подразделений Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН 9 марта 2023 г. и одобрено единогласно.

Заместитель директора ГАО РАН  
по научной работе доктор физ.-мат. наук  
Ю.А. Наговицын

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская)  
астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН)

196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе д. 65, кор. 1