

На правах рукописи

Гладилин Пётр Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСКОРЕНИЯ
ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ
АКТИВНОГО ЗВЁЗДООБРАЗОВАНИЯ**

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в лаборатории астрофизики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель: – доктор физ.-мат. наук, профессор,
А.М. Быков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, заведующий лабораторией)

Официальные оппоненты: – доктор физ.-мат. наук, профессор,
В.А. Догель (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, главный научный сотрудник)

– кандидат физ.-мат. наук
В.Д. Пальшин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, старший научный сотрудник)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук
(Пулковское шоссе, д. 65/1, 196140, Санкт-Петербург)

Защита состоится 23 мая 2013 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д002.205.03 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Автореферат разослан 19 апреля 2013 года.

Учёный секретарь диссертационного совета:
кандидат физ.-мат. наук

А. М. Красильщиков

Содержание

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Ударные волны (УВ) в космическом пространстве — часто встречающееся явление, поскольку такие волны обычно сопровождают процессы быстрого выделения энергии. Большинство УВ в энергичных космических объектах являются бесстолкновительными. Такие УВ позволяют ускорять заряженные частицы до ультрарелятивистских энергий, причём формируемый спектр ускоренных частиц имеет, как правило, степенной вид. Ускорение на УВ является эффективным механизмом конверсии кинетической энергии потока космической плазмы в энергию небольшого количества ускоренных частиц [2, 18]. УВ в остатках сверхновых звезд считаются сейчас наиболее вероятными источниками галактических космических лучей вплоть до энергий $10^{16} - 10^{17}$ эВ [21]. Сверхновые, связанные с коллапсом массивных звезд, часто встречаются в звездных ассоциациях, где имеется много молодых звёзд с мощным звёздным ветром. Поэтому в таких объектах возможны более сложные конфигурации ударноволновых течений, чем в окрестности изолированного остатка сверхновой (ОСН), включающие разнонаправленные гидродинамические потоки.

Данные астрономических наблюдений последних лет говорят о том, что спектр Галактических космических лучей (ГКЛ) в диапазоне $10^{14} - 10^{16}$ эВ имеет слабо выраженные особенности на фоне общего степенного закона [14]. Было замечено, что показатель спектра не является постоянным в различных диапазонах энергий и испытывает флуктуации. Это может быть следствием работы неких пока не изученных источников космических лучей, спектры которых отличаются от стандартного степенного закона, возникающего при ускорении заряженных частиц на одиночной УВ.

Источники излучения в диапазоне $10^{12} - 10^{14}$ эВ с очень жёсткими спектрами не всегда легко идентифицируются в диапазоне $10^9 - 10^{10}$ эВ, и некоторые из них могут составлять популяцию так называемых "тёмных ускорителей". Например, источник этого класса обнаружен в окрестности массивного молодого звёздного кластера Westerlund-1 [10].

Сказанное выше указывает на то, что необходимо подробное исследование возможных механизмов ускорения космических лучей до ультрарелятивистских энергий в областях активного звёздообразования, которое позволило бы объяснить наблюдения гамма-источников в этих объектах и особенности поведения спектра ГКЛ в диапазоне энергий свыше 10^{12} эВ.

В настоящей диссертации исследован новый класс галактических источ-

ников нетеплового излучения, связанных с областями сходящихся магнито-гидродинамических (МГД) потоков. Такие течения космической плазмы могут встречаться в областях активного звёздообразования, содержащих много близко расположенных звёзд на разных стадиях эволюции. В ряде работ (например, [11, 23]) исследовалась гидродинамическая структура такого рода течений, отмечалась возможность более эффективного ускорения частиц в сходящихся МГД течениях, а также тот факт, что спектр ускоренных в такой системе частиц будет более жёстким по сравнению с процессом ускорения на одиночной УВ [8]. Тем не менее, последовательной аналитической модели таких источников, одновременно учитывающей особенности процессов ускорения и распространения заряженных частиц в окрестности УВ и гидродинамической структуры сходящихся МГД-течений, до сих пор построено не было. В диссертации построена модель ускорения заряженных частиц в сходящихся потоках космической плазмы, проведено исследование распределения ускоренных частиц и спектров их излучения, а результаты моделирования использованы для интерпретации наблюдательных данных.

Таким образом, тема диссертации представляется актуальной.

Цели работы

Цель диссертации – исследование процессов ускорения частиц и излучения в областях активного звёздообразования посредством аналитического и численного моделирования.

Задачами диссертации являются:

1. Аналитическое описание процесса ускорения и распространения заряженных частиц в системе сходящихся ударных волн. Теоретическое обоснование формирования жёстких спектров космических лучей в источниках, находящихся в областях активного звёздообразования, и в системах с множественными ударными волнами.

2. Создание математической модели распространения ударных волн и ускорения заряженных частиц в системе со сходящимися сверхзвуковыми МГД потоками. Проведение моделирования с учётом нелинейного влияния ускоренных частиц на структуру потока плазмы и оценка максимально возможных энергий космических лучей, ускоренных в таких системах.

3. Построение модельных спектров излучения от жёстких нетепловых источников, связанных с системами сходящихся МГД потоков, в широком диапазоне длин волн.

Научная новизна

1. Впервые дано аналитическое и численное описание кинетики объектов со сходящимися ударными волнами в областях активного звёздообразования

как возможных источников ультрарелятивистских частиц и нетеплового излучения.

2. Построена нелинейная нестационарная модель таких объектов, с помощью которой впервые получены спектры излучения областей с множественными УВ. Показана повышенная интенсивность излучения таких источников по сравнению с одиночными УВ.

3. Впервые проанализирована величина и временная эволюция максимальной энергии космических лучей, ускоренных в областях активного звёздообразования.

Достоверность научных результатов

Основные результаты работы получены с помощью широко известных аналитических и численных методов решения нелинейных уравнений, а также уравнений в частных производных. Телеграфные уравнения, приведённые в **главе 3**, были решены с помощью интегро-интерполяционного метода, который включает в себя решение системы линейных алгебраических уравнений методом матричной прогонки [19]. Достоверность этого метода подтверждена его многолетним использованием для решения всевозможных научно-технических задач. В нелинейной модели ускорения частиц в системах сходящихся УВ (**глава 2**) для численного решения нелинейных уравнений применялся метод Ньютона (или метод касательных). Он подробно изучен и, наряду с методом последовательных приближений, методом секущих и методом хорд, является классическим способом численного решения нелинейных уравнений.

Достоверность численных расчётов подтверждена также выполнением (с точностью до нескольких процентов) законов сохранения потоков вещества, энергии и импульса в нелинейной нестационарной модели системы сходящихся УВ.

В диссертации использованы физические параметры областей активного звёздообразования (значения плотности, магнитного поля, скоростей УВ и т.д.), соответствующие последним данным наблюдений и численному моделированию, выполненному другими авторами.

Научная и практическая ценность работы

В диссертации впервые получены аналитические соотношения, описывающие энергетический спектр частиц, ускоренных в сходящихся МГД потоках космической плазмы, проанализирована величина и временная эволюция максимальной энергии ускоренных частиц. Жёсткие спектры таких источников могут объяснить некоторые особенности поведения спектра ГКЛ в области "колена" ($10^{14} - 10^{15}$ эВ).

Представленные в диссертации модели ускорения частиц в сходящихся гидродинамических потоках космической плазмы могут быть полезны для расчётов конкретных кинетических моделей космических объектов, содержащих сходящиеся УВ. Модели применимы для объектов типа "остаток сверхновой – звезда класса О-В", для молодых звёзд классов О-В, движущихся со сверхзвуковой скоростью (так называемые "убегающие звёзды"), для массивных двойных систем, в частности, двойных систем со звёздами Вольфа-Райе и для других Галактических и внегалактических систем.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть применены для интерпретации наблюдений источников, обладающих исключительно жёсткими спектрами излучения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Нелинейная квазистационарная модель течений бесстолкновительной плазмы с релятивистскими частицами в астрофизических объектах с системами сходящихся ударных волн.

2. Нестационарная модель ускорения и распространения заряженных частиц в астрофизических объектах с системами сходящихся ударных волн.

3. Энергетические спектры протонов и электронов, ускоренных в системе сходящихся МГД ударных волн: показатели спектра, максимальные энергии частиц и их временная эволюция.

4. Модель ускорения космических лучей в остатках сверхновых звезд, взаимодействующих с ветрами массивных молодых звезд.

5. Жёсткие нетепловые спектры излучения источников в областях активного звездообразования.

Публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период с 2010 по 2013 г. и изложены в 9 печатных работах (включая 5 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК).

Апробация работы

Представленные результаты доложены на трёх всероссийских и одной международной конференции:

1. JENAM-2011, 4-8 July 2011, Saint-Petersburg, Russia; название доклада: "Supernova remnant colliding with a stellar wind: a new class of gamma-ray sources" 2. Всероссийская молодёжная конференция по физике и астрономии "Физика-СПб-2011" 26-27 октября 2011 г., Санкт-Петербург, Россия; название доклада: "Ускорение частиц в области взаимодействия звёздного ветра с

остатком сверхновой" 3. IX Конференция молодых учёных "Фундаментальные и прикладные космические исследования" 12-13 апреля 2012, Москва, Россия; название доклада: "Ускорение ультрарелятивистских частиц в области взаимодействия сходящихся ударных волн" 4. Всероссийская молодёжная конференция по физике и астрономии "ФизикА-СПб-2012" 24-25.10.2012, Санкт-Петербург, Россия; название доклада: "Ускорение частиц в системе сходящихся ударных волн".

Эти результаты также неоднократно докладывались на объединённом астрофизическом семинаре ФТИ имени А.Ф. Иоффе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 102 страницы печатного текста, 24 рисунка и список литературы, включающий 82 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к диссертации сформулированы цели и задачи работы, обоснованы актуальность работы, научная новизна и достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе **главы 1** дан обзор физических условий в областях активного звёздообразования, а также приведён обзор существующих моделей ускорения частиц на ударных волнах. В параграфе 1.2 отмечено, что процесс ускорения на УВ (или механизм ускорения Ферми I рода) считается основным механизмом, позволяющим ускорять частицы до энергий $10^{15} - 10^{16}$ эВ. Основные особенности этого механизма были исследованы более 30 лет назад в работах [3], [17], [4] и [6], в которых была показана высокая эффективность ускорения частиц в данном процессе.

Позднее многие авторы отмечали важность учёта нелинейных эффектов в этом механизме, связанных с влиянием давления ускоренных частиц на структуру сверхзвукового течения (см., например, [5], [15]). Отличительной особенностью при этом является степенной характер энергетического спектра ускоренных частиц, и для сильных УВ показатель спектра $\gamma = 2.0$.

В параграфе 1.3 отмечена важность процессов усиления магнитных полей в окрестности УВ для запуска эффективного механизма ускорения. Особое внимание уделено вопросу исследования длинноволновых неустойчивостей, которые имеют определяющее значение для ускорения частиц до энергий $10^{15} - 10^{17}$ эВ.

В параграфе 1.4 перечислены основные системы, к которым можно применить разработанную в диссертации модель ускорения – системы вида "ОСН

- звезда спектрального класса O-B'', двойные системы со звездой Вольфа-Райе, убегающие звёзды. Кроме того, в параграфе дан обзор существующих моделей встречных МГД течений, возникающих в различных космических объектах.

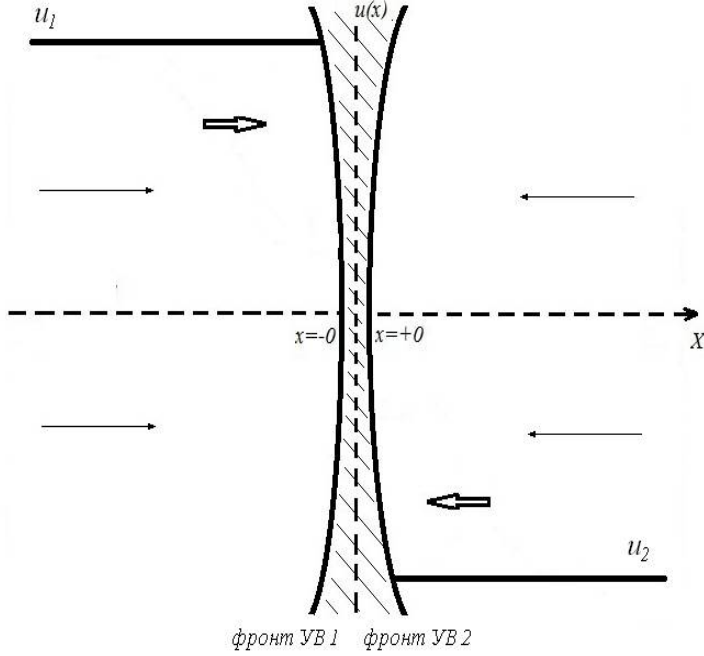


Рис. 1: Схема течений для линейной одномерной модели системы сходящихся УВ. u_1 и u_2 — скорости сходящихся потоков.

В параграфе 1.5 приведён аналитический вывод функции распределения заряженных частиц, ускоренных в системе двух сходящихся УВ, для линейной одномерной модели в приближении "тестовых частиц". Профили течений схематично изображены на рис. 1. Для вывода функции распределения частиц в указанной системе рассмотрено нестационарное диффузионно-конвективное уравнение [22]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i(t, x, p)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} D_i(x, p) \frac{\partial f_i(t, x, p)}{\partial x} - u_i \frac{\partial f_i(t, x, p)}{\partial x} + \\ & + \frac{p}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x} \frac{\partial f_i(t, x, p)}{\partial p} + Q_0 \delta(x) \delta(p - p_0) H(t - t_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где индекс $i = 1$ соответствует области $x < 0$, а $i = 2$ соответствует области $x > 0$ (см. рис. 1), Q_0 — член, описывающий скорость инжекции частиц в процесс ускорения, $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака, $H(\tau)$ — ступенчатая функция Хевисайда, $D_i(x, p)$ и u_i — коэффициент диффузии и скорость потока плазмы в предфронте 1 и 2. Путём применения преобразования Лапласа к уравнению (1) получены следующие выражения для функции распределения

Несмотря на большое количество работ, посвящённых гидродинамическому моделированию сходящихся УВ, последовательного моделирования процессов распространения частиц и генерации космического излучения таких объектов до сих пор сделано не было. В ряде работ отмечалась повышенная интенсивность излучения объектов со сходящимися УВ, в том числе, в двойных системах, имеющих звезду-компаньона типа Вольфа-Райе. В настоящей работе даётся физическая интерпретация природы происходящих в таких объектах процессов.

ускоренных частиц:

$$f_i(x, p, t) = \frac{3Q_0}{u_1 + u_2} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-3} H(p - p_0) H(t - \tau_a) \exp\left(-\frac{u_i|x|}{D_i(p)}\right) \propto \frac{1}{p^3}, \quad (2)$$

и для дифференциального спектра:

$$\frac{\partial N}{\partial p} \propto p^2 f \propto \frac{1}{p}, \quad (3)$$

где

$$\tau_a(p^*) = \int_{p_0}^{p^*} \frac{3}{(u_1 + u_2)} \left(\frac{D_1}{u_1} + \frac{D_2}{u_2} \right) \frac{dp}{p} \quad (4)$$

– время ускорения частицы до импульса p^* . Полученный результат отличается от хорошо известного решения $dN/dp \propto 1/p^2$ для изолированной УВ.

Обсуждаемый механизм ускорения способен создавать распределения высокоэнергичных нетепловых частиц с очень жёсткими спектрами, содержащие существенную часть кинетической энергии УВ сверхновой. Нетепловое излучение таких источников характеризуется жёстким спектральным распределением по энергии с пиком на максимальных энергиях фотонов.

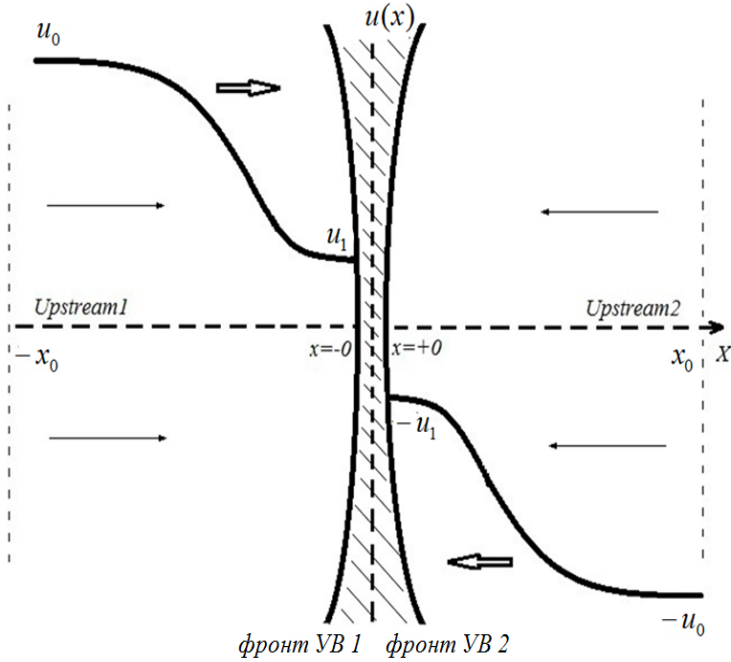


Рис. 2: Схема профилей скорости $u(x)$, модифицированных давлением космических лучей, в системе сходящихся ударных волн. x_0 – положение границы свободного ухода, $\pm u_0$ – скорость потока плазмы вдали от фронта УВ.

основан на комбинированном (численно-аналитическом) решении стационарного транспортного уравнения. В представленной модели данный подход мо-

В параграфе 1.6 выведены условия, необходимые для эффективности ускорения частиц в системе "ОСН – звёздный ветер". Показано, что для характерных скоростей сближения УВ и в предположении боровской диффузии время ускорения до энергий $10^{12} - 10^{14}$ эВ оказывается значительно меньшим, чем время существования системы.

Глава 2 посвящена обсуждению нелинейной квазистационарной модели ускорения заряженных частиц в сходящихся гидродинамических потоках. В основу модели лёг подход, предложенный в работах [1, 12] для описания ускорения частиц на одиночной УВ. Он

диффицирован для случая двух сходящихся потоков плазмы. Эта модель описывает высокоэнергичную часть распределения ускоренных частиц, которые перемещаются из предфронта первой УВ в предфронт второй УВ, не рассеиваясь в области между волнами. Проанализированы два варианта модели: модель с параметризацией максимального импульса ускоренной частицы и модель с пространственной границей свободного ухода.

В параграфе 2.1 обсуждены основные предположения модели – это приближение бомовской диффузии (т.е., равенства средней длины пробега частицы её гирорадиусу), одномерность и квазистационарность. Показано, что характерное время изменения гидродинамических параметров системы значительно больше, чем время ускорения частиц. Таким образом, использование стационарного транспортного уравнения является оправданным.

В параграфе 2.2 получено аналитическое соотношение, описывающее функцию распределения частиц на фронте УВ в модели с параметризацией максимального импульса ускоренной частицы:

$$f_0(p) = \frac{3\eta\rho_0}{8\pi m_p U_p(p)} \frac{1}{p^3}, \quad (5)$$

где $U_p \equiv u_p/u_0$,

$$u_p = u_1 - \frac{1}{f_0(p)} \int_{-\infty}^0 dx (du/dx) f(x, p)$$

– функция, которая описывает нелинейную модификацию профиля УВ ускоренными частицами, η – показатель скорости инжекции, ρ – плотность газа в префронте.

Для каждого импульса p функция $f_0(p) \propto 1/p^3$ с корректирующим фактором $U_p(p)$. Это означает, что спектр ускоренных частиц имеет степенной индекс, близкий к 3.0. На высоких энергиях спектр будет модифицирован нелинейными эффектами, описываемыми функцией $U_p(p)$.

В параграфе 2.3 получено аналогичное уравнению (5) выражение для функции распределения частиц в модели с границей свободного ухода. Соответствующая схема профилей скорости изображена на рис. 2.

При выводе соотношения для функции распределения в данной модели использовано аналитическое решение транспортного уравнения, полученное в работе [7]. Его решение, описывающее спектр частиц в системе сходящихся УВ в модели с границей свободного ухода, имеет вид:

$$f_0(p) = \frac{3\eta\rho_0}{8\pi m_p U_p(p)} \frac{1}{p^3} - \frac{3}{U_p(p)p^3} \int_{p_0}^p \phi_{esc} p'^2 dp', \quad (6)$$

где ϕ_{esc} – поток уходящих частиц.

Первое слагаемое в правой части уравнения (6) отражает инжекцию частиц и полностью совпадает с выражением для функции распределения (5), а второе слагаемое описывает уход частиц из области ускорения. Второе слагаемое наиболее важно для формы спектра ускоренных КЛ на высоких энергиях (т.е., при $p > p_*$, где длина свободного пробега частицы с импульсом p_* такова, что $\Lambda(p_*) \geq L_{12}$, L_{12} – расстояние между фронтами УВ). Параграф 2.4 посвящён описанию итерационного метода, применённого в расчётах. Он основан на последовательных приближениях к функции распределения, удовлетворяющей одновременно закону сохранения импульса и транспортному уравнению.

В параграфе 2.5 приведены результаты численных расчётов. На рис. 3 изображены спектры захваченных и уходящих частиц, полученные в расчётах моделей с границей свободного ухода и с ограничением максимального импульса. Из рис. 3 можно сделать вывод о том, что модели, описанные в параграфах 2.2 и 2.3, дают согласованные результаты.

Параграф 2.6 посвящён проверке закона сохранения потоков энергии в нелинейной модели. Показано, что закон сохранения выполняется с точностью 1 – 2%, что говорит о надёжности расчётов. В параграфе 2.7 проанализированы максимально возможные энергии частиц, ускоренных в системе двух УВ. Показано,

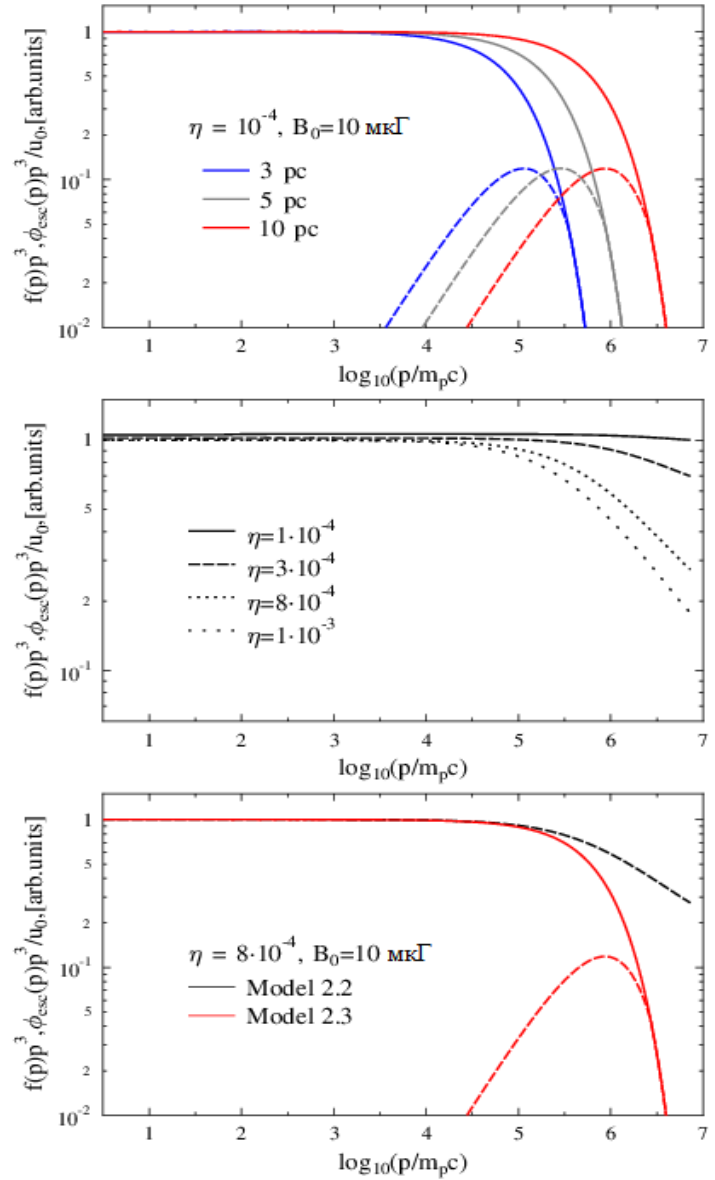


Рис. 3: Верхняя панель: спектры захваченных и уходящих частиц (протонов) в модели с границей свободного ухода для трёх различных расстояний между УВ и границей свободного ухода; средняя панель: спектр захваченных частиц для модели с параметризацией максимального импульса для различной инжекции η ; нижняя панель: сравнение результатов расчётов модели с параметризацией максимального импульса и модели с границей свободного ухода для одинаковых параметров поля и инжекции.

что для характерных значений магнитного поля и скоростей сходящихся потоков в системе "ОСН – звезда класса О-В" максимальные энергии протонов могут достигать $10^{16} - 10^{17}$ эВ.

Выводы к главе 2 сформулированы в параграфе 2.8.

Глава 3 посвящена описанию нестационарной модели ускорения и распространения частиц в системе сходящихся гидродинамических потоков. Эта модель позволяет рассчитывать функцию распределения частиц в любой точке между фронтами УВ, а также в предфронтах УВ. В параграфе 3.1 сформулированы основные предположения, принятые в модели. Параграф 3.2 посвящён описанию нестационарной модели и анализу результатов.

В рамках моделирования численно решались транспортные уравнения для усреднённых по углам функций распределения протонов $f_p(x, p, t)$ и электронов $f_e(x, p, t)$:

$$\tau(p) \frac{\partial^2 g_p}{\partial t^2} + \frac{\partial g_p}{\partial t} + u(x) \frac{\partial g_p}{\partial x} - \frac{1}{3} \frac{\partial u(x)}{\partial x} \left(\frac{\partial g_p}{\partial y} - 4g_p \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, p) \frac{\partial g_p}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$$\tau(p) \frac{\partial^2 g_e}{\partial t^2} + \frac{\partial g_e}{\partial t} + u(x) \frac{\partial g_e}{\partial x} - \frac{1}{3} \frac{\partial u(x)}{\partial x} \left(\frac{\partial g_e}{\partial y} - 4g_e \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, p) \frac{\partial g_e}{\partial x} \right) + \exp(y) \frac{\partial}{\partial y} [b \exp(-2y) g_e], \quad (8)$$

где $g_p = p^4 f_p$, $g_e = p^4 f_e$, $y = \ln(p)$. Безразмерный импульс частицы p выражен в единицах $m_p c$. Член, описывающий потери, $b(p) = -dp/dt$ описывает синхротронные и комптоновские потери на излучение (см., например, [16]). Здесь $\tau(p) = \Lambda(p)/v$ – усреднённое время между рассеяниями частицы КЛ. Транспортные уравнения (7) и (8) представляют собой комбинированные телеграфные уравнения [13]. Примечательной особенностью этих уравнений является то, что они позволяют описывать как диффузионное движение низкоэнергичных частиц с длиной свободного пробега, меньшей расстояния между фронтами УВ L_{12} , так и режим высокоэнергичного баллистического распространения без рассеяний для частиц с $p \gtrsim p_*$.

На рис. 4 слева представлен результат моделирования протонной функции распределения на основе нестационарной модели сходящихся УВ. Три панели показывают $f_p(x, p, t)$ в фазовом пространстве (p, x) в три последовательные момента времени, которые соответствуют расстояниям между фронтами УВ, равным 0.6 пк, 0.3 пк и 0.1 пк. Граница свободного ухода находится на расстоянии $x_b = 0.55$ пк от центра области моделирования. Три правые панели на рис. 4 показывают спектры протонов и электронов, $dN_p(p)/dp$ и $dN_e(p)/dp$, на

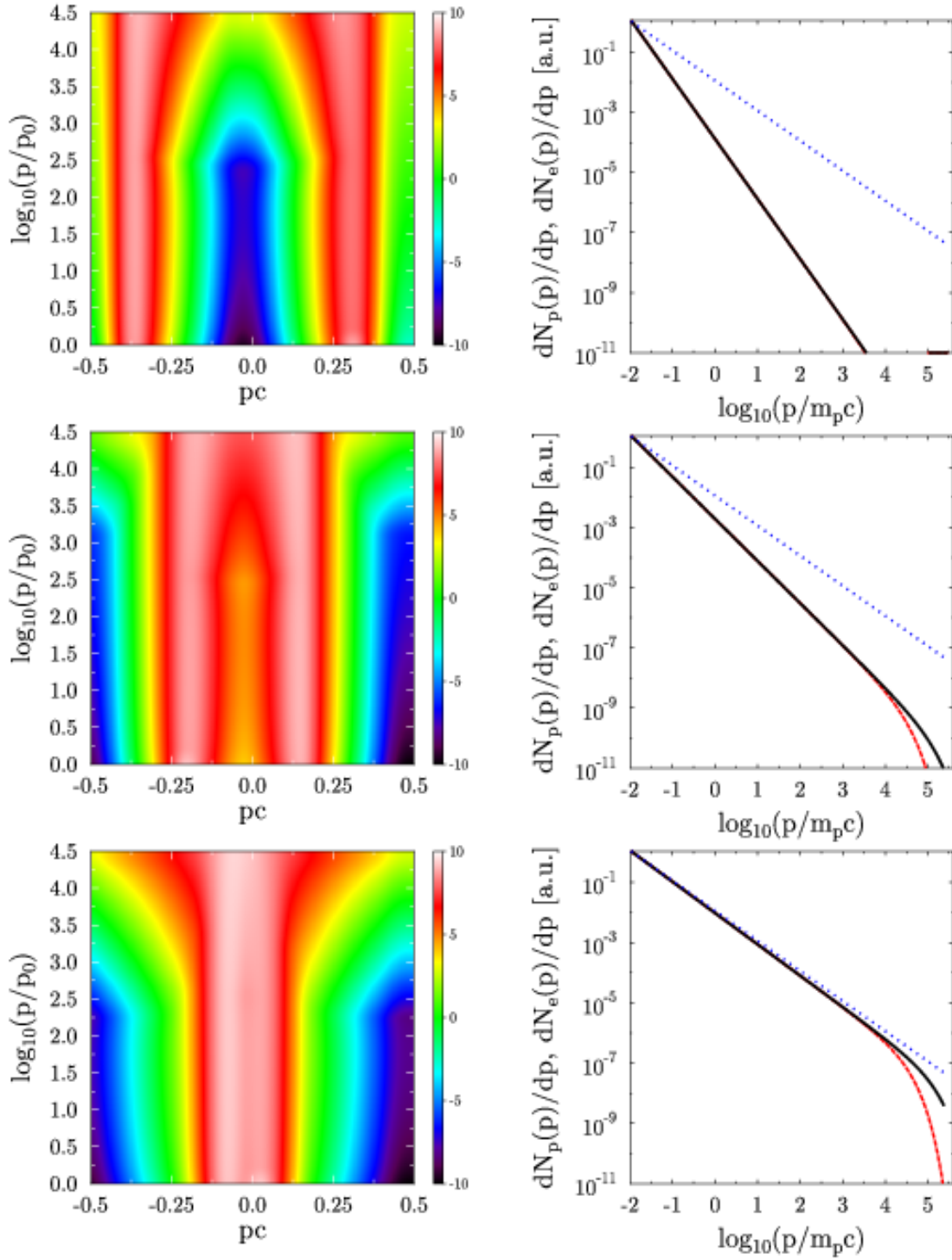


Рис. 4: Слева: функция распределения протонов $f(x, p) p^3$ в зависимости от импульса частицы и положения в пространстве x , представленная для трёх положений двух сближающихся фронтов УВ – сверху вниз: 0.6 пк, 0,3 пк, и 0.1 пк. Левая УВ распространяется в положительном направлении оси абсцисс, а правая движется в противоположном направлении. Скорости УВ одинаковы и равны 3000 км/с. Справа: спектры протонов и электронов на движущемся фронте левой УВ в моменты времени, соответствующие левым панелям. Сплошная кривая – вычисленный спектр протонов dN_p/dp , штриховая красная кривая – спектр электронов dN_e/dp . Синей точечной кривой показан асимптотический спектр $dN/dp \propto 1/p$.

движущемся фронте левой УВ в моменты времени, соответствующие левым панелям, в сравнении с аналитическим решением $dN/(p)/dp \sim 1/p$, полученным в главе 1. На рис. 4 видна эволюция спектра КЛ. Изначально протоны КЛ сконцентрированы в окрестности фронтов УВ, причём протонный спектр близок к теоретическому спектру УВ одиночного остатка сверхновой, $dN_p(p)/dp \propto 1/p^2$. Но по мере уменьшения расстояния между УВ, протонный и электронный спектры становятся жёстче, и КЛ начинают концентрироваться между фронтами УВ.

Параграф 3.3 посвящён анализу временной эволюции максимальной энергии частицы, ускоренной в области с множественными УВ. Показано, что при наличии второй УВ (например, УВ звёздного ветра) во внешней области УВ сверхновой, находящейся в седовской стадии расширения, максимальная энергия протона, ускоренного на УВ сверхновой, повышается в 5-6 раз за время действия эффективного механизма ускорения. В параграфе 3.4 сформулированы выводы к главе 3.

Глава 4 посвящена моделированию спектров излучения от объектов со сходящимися МГД потоками и приложениям к конкретным астрофизическим объектам.

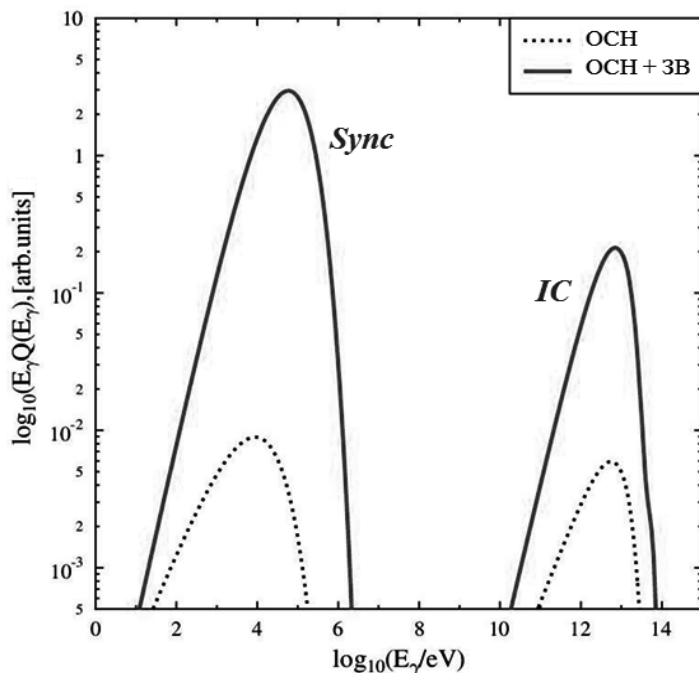


Рис. 5: Сравнение спектров синхротронного и обратного комптоновского излучения электронов, ускоренных на одиночном ОСН (штриховая кривая) и в системе "ОСН - звёздный ветер" (сплошная кривая).

полосных спектров излучения от объектов со сходящимися УВ.

В параграфе 4.3 проанализирована повышенная интенсивность синхротронного излучения и обратного комптоновского рассеяния электронов, уско-

В параграфе 4.1 дан обзор основных излучательных процессов в космическом пространстве. Параграф 4.2 посвящён описанию моделирования спектров излучения. Основное внимание уделено моделированию синхротронного излучения и обратного комптоновского эффекта, позволяющего ускорять электроны до ультрарелятивистских энергий, а также моделированию адронной компоненты излучения, связанной с $p-p$ взаимодействием и образованием π_0 -мезонов. На основе спектров ускоренных протонов и электронов, полученных в нестационарной модели (глава 3), проведено моделирование широко-

ренных в двухволновой системе, по сравнению с ускорением на одиночной УВ. На рис. 5 дана иллюстрация этого эффекта на примере спектров от одиночной УВ ОСН и спектров от системы "ОСН - звёздный ветер" при тех же параметрах УВ ОСН.

Параграф 4.4 посвящён объяснению необычно жёсткого нетеплового излучения от звезды HD 195592 в рамках рассматриваемой модели. Эта звезда является сверхгигантом спектрального класса O9.7Ia, движущимся со скоростью (27.0 ± 0.9) км/с [9]. В системе покоя звезды вблизи неё существуют две стационарные УВ: головная УВ ("bowshock") и УВ остановки звёздного ветра ("termination shock") с натекающими с противоположных сторон потоками вещества. Со стороны головной УВ – это движущийся со скоростью движения звезды поток межзвёздного вещества, а со стороны УВ остановки – мощный звёздный ветер самой звезды со скоростью 2900 км/с. Таким образом, в этой системе может работать механизм ускорения на сходящихся МГД потоках.

Данные комплекса VLA указывают на необычно жёсткий синхротронный спектр излучения этого объекта в радиодиапазоне. Его нельзя объяснить стандартным спектром $dN/dp \propto 1/p^2$ от одиночной УВ. Однако такой спектр можно успешно объяснить возникновением в области головной УВ этой звезды эффективного ускорительного механизма, разработанного в диссертации.

В **приложении** к диссертации перечислен список принятых условных сокращений, а также подробно описан способ задания сечений протон-протонного взаимодействия, заимствованный из работы [20], которые необходимы для расчёта излучения от распада π_0 - мезонов.

В **заключении** к диссертации сформулированы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Найдено аналитическое решение нестационарного одномерного транспортного уравнения в случае двух сходящихся УВ. Показано, что ускоренные заряженные частицы приобретают жёсткий энергетический спектр с показателем $\gamma \simeq 1.0$. Проведен анализ физических условий, необходимых для эффективного ускорения частиц в системе "УВ звёздного ветра - УВ ОСН". Показано, что для обычных параметров УВ и физических свойств межзвёздной среды в областях активного звёздообразования сходящиеся УВ являются чрезвычайно эффективными источниками космических лучей высоких энергий.

2. Построена нелинейная квазистационарная модель сходящихся потоков плазмы, с учётом модификации структуры фронта УВ давлением ускоренных частиц. Рассчитаны гидродинамические параметры системы (скорость

потока, давление космических лучей, магнитное поле). Проведено сравнение численных методов, основанных на приближении ограничения максимального импульса ускоренной частицы и приближении границы свободного ухода. Показана согласованность указанных подходов. Проанализирован энергетический спектр частиц, покидающих область ускорения.

3. Построена численная модель ускорения и распространения протонов и электронов в системе сходящихся УВ. Результаты моделирования показали повышение жёсткости энергетических спектров заряженных частиц в области между сходящимися фронтами УВ. Показано, что по мере сближения УВ, спектр ускоренных частиц приближается к аналитическому решению $dN/dp \propto 1/p$.

4. Проведён анализ временной эволюции максимальной энергии частиц, ускоренных на фронте УВ расширяющегося ОСН. Показано, что в случае расширения в окрестности звёздного ветра от молодых звёзд спектральных классов О или В максимальная энергия ускоренных протонов повышается в 5-6 раз за время взаимодействия двух УВ.

5. Проведён анализ максимально возможной энергии частиц, ускоренных в системе сходящихся УВ. Показано, что для системы "звёздный ветер - ОСН" для типичных параметров массивных звёзд и ОСН максимальные энергии протонов могут достигать $10^{15} - 10^{16}$ эВ, в зависимости от размеров остатка, скорости УВ ОСН и величины флуктуаций магнитного поля.

6. Построены модельные спектры излучения источников, связанных с областями сходящихся УВ. Получены спектры синхротронного, обратного Комптоновского излучения, а также адронной компоненты от $p-p$ взаимодействия. Показано, что интенсивность излучения областей со сходящимися УВ в несколько раз превосходит интенсивность излучения источников, связанных с УВ от изолированных расширяющихся ОСН. То, что такие источники имеют жёсткие спектры в рентгеновском и гамма-диапазонах энергий может объяснить природу некоторых наблюдаемых гамма-источников.

7. Результаты моделирования успешно применены для объяснения жёсткого синхротронного излучения от убегающей звезды HD 195592.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

[A1]. Bykov A.M., **Gladilin P.E.**, Osipov S.M. "Non-linear model of particle acceleration at colliding shock flows" Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 429, 2013, p. 2755-2762 (участие в постановке задачи, проведение аналитических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

[A2]. Bykov A.M., **Gladilin P.E.**, Osipov S.M. «Particle acceleration at supernova shocks in young stellar clusters» Memories of Society Astronomica

Italiana, 2011, Vol 82, p.800 (участие в постановке задачи, проведение аналитических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

[A3]. Быков А.М., **Гладилин П.Е.**, Осипов С.М., Г.Г. Павлов "Новый класс галактических рентгеновских источников как результат взаимодействия звёздного ветра с остатком сверхновой" Научно-Технические Ведомости СПбГПУ 1(115), 2011, с.106-110 (участие в постановке задачи, проведение аналитических расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

[A4]. A. M. Bykov, D. C. Ellison, **P. E. Gladilin**, and S. M. Osipov "Galactic cosmic ray origin sites: Supernova remnants and superbubbles" American Institute of Physics: Conference Proceedings, 1505, 2012, p.46 (участие в постановке задачи, проведение аналитических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

[A5]. Быков А.М., **Гладилин П.Е.**, Осипов С.М., Г.Г. Павлов "Роль планговой неустойчивости в ускорении заряженных частиц ударными волнами" Научно-Технические Ведомости СПбГПУ (153), 2012, с.195-201 (участие в постановке задачи, анализ результатов).

[A6]. Osipov S.M, **Gladilin P.E.**, Bykov A.M., G.G.Pavlov "Supernova remnant colliding with a stellar wind: a new class of gamma-ray sources"; Book of abstracts JENAM-2011, 4-8 july 2011, Saint-Petersburg, Russia, p.119 (участие в постановке задачи, проведение аналитических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка публикации).

[A7]. **Гладилин П.Е.**, Быков А.М., Осипов С.М. "Ускорение частиц в области взаимодействия звёздного ветра с остатком сверхновой"; Тезисы докладов Всероссийской молодёжной конференции по физике и астрономии "Физика-СПб-2011" 26-27 октября 2011 г., Санкт-Петербург, Россия, с.171-172; (участие в постановке задачи, проведение аналитических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка публикации).

[A8]. **Гладилин П.Е.**, Быков А.М., Осипов С.М. "Ускорение ультрарелятивистских частиц в области взаимодействия сходящихся ударных волн"; Тезисы докладов IX Конференции молодых учёных "Фундаментальные и прикладные космические исследования" 12-13 апреля 2012, Москва, Россия, с.29-30; (участие в постановке задачи, проведение аналитических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка публикации).

[A9]. **Гладилин П.Е.**, Быков А.М., Осипов С.М. "Ускорение частиц в системе сходящихся ударных волн"; Тезисы докладов Всероссийской молодёжной конференция по физике и астрономии "Физика-СПб-2012" 24-25 октября 2012, Санкт-Петербург, Россия, с.16-17; (участие в постановке задачи, проведение аналитических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка публикации).

Список литературы

- [1] *Amato E., Blasi P.* A general solution to non-linear particle acceleration at non-relativistic shock waves // *MNRAS*. — 2005. — Vol. 364. — Pp. L76–L80.
- [2] *Astrophysics of cosmic rays / V. S. Berezhinskii, S. V. Bulanov, V. A. Dogiel, V. S. Ptuskin.* — Amsterdam: North-Holland, 1990.
- [3] *Axford W. I., Leer E., Skadron G.* The acceleration of cosmic rays by shock waves // International Cosmic Ray Conference. — Vol. 11 of *International Cosmic Ray Conference*. — 1977. — Pp. 132–137.
- [4] *Bell A. R.* The acceleration of cosmic rays in shock fronts. I // *MNRAS*. — 1978. — Vol. 182. — Pp. 147–156.
- [5] *Berezhko E. G., Krymskii G. F.* REVIEWS OF TOPICAL PROBLEMS: Acceleration of cosmic rays by shock waves // *Soviet Physics Uspekhi*. — 1988. — Vol. 31. — Pp. 27–51.
- [6] *Blandford R. D., Ostriker J. P.* Particle acceleration by astrophysical shocks // *ApJ*. — 1978. — Vol. 221. — Pp. L29–L32.
- [7] *Caprioli D., Amato E., Blasi P.* Non-linear diffusive shock acceleration with free-escape boundary // *Astroparticle Physics*. — 2010. — Vol. 33. — Pp. 307–311.
- [8] *Casse F., Marcowith A.* Relativistic particle transport in extragalactic jets. I. Coupling MHD and kinetic theory // *A&A*. — 2003. — Vol. 404. — Pp. 405–421.
- [9] *De Becker M., Linder N., Rauw G.* Spectroscopic study of the O-type runaway supergiant HD 195592 // *New Astronomy*. — 2010. — Vol. 15. — Pp. 76–82.
- [10] Discovery of extended VHE γ -ray emission from the vicinity of the young massive stellar cluster Westerlund 1 / *A. Abramowski, F. Acero, F. Aharonian et al.* // *A&A*. — 2012. — Vol. 537. — P. A114.
- [11] *Drury L. O.* First-order Fermi acceleration driven by magnetic reconnection // *MNRAS*. — 2012. — Vol. 422. — Pp. 2474–2476.
- [12] Dynamical feedback of self-generated magnetic fields in cosmic ray modified shocks / *D. Caprioli, P. Blasi, E. Amato, M. Vietri* // *MNRAS*. — 2009. — Vol. 395. — Pp. 895–906.
- [13] *Earl J. A.* Coherent Propagation of Charged-Particle Bunches in Random Magnetic Fields // *ApJ*. — 1974. — Vol. 188. — Pp. 379–398.
- [14] *Hörandel J. R.* On the knee in the energy spectrum of cosmic rays // APS April Meeting Abstracts. — 2002.
- [15] *Jones F. C., Ellison D. C.* The plasma physics of shock acceleration // *Space Science Reviews*. — 1991. — Vol. 58. — Pp. 259–346.
- [16] *Kang H.* Energy Spectrum of Nonthermal Electrons Accelerated at a Plane Shock // *Journal of Korean Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 44. — Pp. 49–58.
- [17] *Krymskii G. F.* A regular mechanism for the acceleration of charged particles on the front of a shock wave // *Akademiia Nauk SSSR Doklady*. — 1977. — Vol. 234. — Pp. 1306–1308.
- [18] *Malkov M. A., O’C Drury L.* Nonlinear theory of diffusive acceleration of particles by shock waves // *Reports on Progress in Physics*. — 2001. — Vol. 64. — Pp. 429–481.
- [19] *Numerical recipes in C++ : the art of scientific computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery.* — William H. Press., 2002.
- [20] Parameterization of γ , $e^{+/-}$, and Neutrino Spectra Produced by p-p Interaction in Astronomical Environments / *T. Kamae, N. Karlsson, T. Mizuno et al.* // *ApJ*. — 2006. — Vol. 647. — Pp. 692–708.
- [21] *Ptuskin V., Zirakashvili V., Seo E.-S.* Spectrum of Galactic Cosmic Rays Accelerated in Supernova Remnants // *ApJ*. — 2010. — Vol. 718. — Pp. 31–36.
- [22] *Toptygin I. N.* Cosmic rays in interplanetary magnetic fields. — D. Reidel Publishing Co., 1985.
- [23] *Velázquez P. F., Koenigsberger G., Raga A. C.* A Supernova Remnant Collision with a Stellar Wind // *ApJ*. — 2003. — Vol. 584. — Pp. 284–292.