

На правах рукописи

Петров Алексей Евгеньевич

**Динамические магнитные структуры
в сильнонеравновесной релятивистской плазме
пульсарных туманностей**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в лаборатории астрофизики высоких энергий ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Научный руководитель: Быков Андрей Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФИРАН
Догель Владимир Александрович
доктор физико-математических наук,
чл.-корр. РАН, научный руководитель ГАО РАН,
Степанов Александр Владимирович,

Ведущая организация: ФГБУН Институт Космических исследований
Российской академии наук

Защита состоится 2018 г. в ... часов ... минут на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 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.

Автореферат разослан 2018 года.

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

А. М. Красильщиков

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации Космические источники излучения с экстремальным энерговыделением представляют особый интерес для астрофизики высоких энергий, поскольку позволяют изучать закономерности сильнонеравновесных состояний вещества. Наблюдения таких источников дают возможность понять природу физических процессов, в результате которых происходит эффективная конверсия в наблюдаемое излучение огромной энергии, выделяемой при коллапсе массивных звезд [1], слиянии компактных релятивистских звезд [2], аккреции вещества на такие звезды [3] и в релятивистских течениях в окрестности замагниченных компактных звезд. В частности, исследование широких спектров нетеплового излучения и сложных излучающих структур, наблюдаемых в остатках сверхновых звезд (ОСН) [4] и пульсарных туманностях (ПТ) [5], позволяет приблизиться к пониманию фундаментальных механизмов ускорения частиц и преобразования различных форм энергии в этих объектах. Для построения адекватных моделей таких источников необходимо исследовать динамику электромагнитных полей и связанные с ними механизмы ускорения релятивистских заряженных частиц [6, 7].

Нетепловое излучение ряда космических источников — в частности, ОСН и ПТ, обусловлено синхротронным механизмом — излучением заряженных релятивистских частиц в магнитном поле, о чем свидетельствуют спектральные и поляризационные наблюдения [8, 9]. В связи с этим, большую роль в изучении наблюдаемых в ОСН и ПТ ярких статических и динамических структур играет моделирование структуры и динамики межзвездных магнитных полей. Динамика поверхностной яркости некоторых источников [10] может быть связана с распространением возмущений магнитного поля, а некоторые статические структуры могут быть обусловлены синхротронным излучением в турбулентном магнитном поле, генерированном в результате ускорения частиц и возбуждения ими плазменных неустойчивостей.

Пульсарные туманности формируются релятивистскими пульсарными ветрами (ПВ), порождаемыми в магнитосферах быстро вращающихся нейтронных звезд с сильным магнитным полем, наблюдаемых как пульсары. Унося большую часть энергии вращения, теряемой звездой, ПВ представляет собой сильно замагниченный поток плазмы, состоящей в основном из позитронов и электронов [11, 12]. Вопрос о присутствии в ПВ ионной компоненты остается нерешенным и важен для понимания физики ПТ. Доля электромагнитной составляющей потока энергии, переносимого ветром, с удалением от пульсара снижается, но конкретные механизмы, определяющие этот процесс, до сих пор недостаточно изучены. Взаимодействие ветра с окружающей средой приводит к формированию ударной волны (УВ) торможения ветра, на которой энергия потока с высокой эффективностью преобразуется в энергию ускоренных заряженных частиц, производящих наблюдаемое синхротронное излучение туманности, при этом электроны и позитроны ускоряются до энергий вплоть до нескольких ПэВ ($1 \text{ ПэВ} = 10^{15} \text{ эВ}$) [12].

Изучение ПТ позволяет исследовать физические процессы в сильнонеравновесной релятивистской плазме, в частности, связанные с эффективным ускорением частиц ветра вблизи УВ торможения. В результате этого ускоре-

ния до $\sim 20\text{-}30\%$ энергии, теряемой пульсаром, переходит в энергию ускоренных заряженных частиц, испускающих наблюдаемое синхротронное излучение ПТ [8, 13]. Наблюдаемые в Крабовидной туманности (КТ) и ряде других ПТ спектры излучения могут быть объяснены как результат синхротронного излучения частиц, имеющих кусочно-степенное распределение по энергиям с показателем $s \sim 1.2 - 1.7$ на низких энергиях (менее 4×10^{11} эВ для КТ) и $s \sim 2.2 - 2.3$ на более высоких энергиях [14]. В то же время, конкретные механизмы ускорения частиц ПВ до сих пор не установлены — механизм Ферми I рода может объяснить лишь высокоэнергичную компоненту спектра частиц в предположении, что значение параметра магнетизации σ — отношения плотности потока электромагнитной энергии к плотности потока кинетической энергии — перед фронтом УВ торможения не превышает 10^{-3} [15]. В качестве механизмов формирования наблюдаемых спектров ПТ предлагались резонансное поглощение ионно-циклотронных (ИЦ) волн [16] — в случае, если большая часть потока энергии ПВ переносится ионами, — а также ускорение при пересоединениях на УВ торможения магнитного поля ветра [17], обладающего сложной структурой, включающей перемежающиеся области поля переменной полярности [18, 19].

Динамические жгутообразные структуры (wisps), наблюдаемые в Крабовидной туманности, распространяются с релятивистскими скоростями от области вблизи УВ торможения ПВ к периферии туманности [8]. Рождение «жгутов» вблизи УВ торможения делает их моделирование важным для понимания процессов ускорения частиц ветра в ПТ. Происхождение этих структур связывали, например, с особенностями внутренней структуры УВ торможения при наличии в плазме ионной компоненты [20] и с доплеровским усилением интенсивности синхротронного излучения сложными периодическими вихревыми течениями, возникавшими в релятивистских магнитогидродинамических моделях туманности [21]. Природа «жгутов» также может быть связана с распространением возмущений магнитного поля в релятивистской плазме ПТ, дисперсионные свойства которой могут существенно меняться в зависимости от ее состава ввиду генерации ИЦ волн, влияющих на рассеяние частиц на флуктуациях турбулентного магнитного поля. Таким образом, моделирование локальной динамики возмущений магнитного поля в плазме ПТ важно для адекватной интерпретации жгутообразных структур в Крабовидной туманности и дает возможность получить связь между компонентным составом ветра и наблюдаемой структурой возмущений.

Многие пульсары, формирующие ПТ, движутся сквозь межзвездную среду или вещество родительского ОСН со сверхзвуковой скоростью, что приводит к формированию головной УВ [22]. Ускорение ионов космических лучей (КЛ) на головной УВ способно приводить к усилению флуктуаций турбулентного магнитного поля [23]. Это, в свою очередь, создает условия для ускорения по механизму Ферми I рода на сходящихся потоках между двумя УВ позитронов и электронов релятивистского ветра, уже прошедших ускорение вблизи УВ торможения. Кинетическое моделирование ускорения частиц КЛ между сходящимися УВ — например, после взрыва одной из двойных звезд классов О-В, характеризующихся сильными ветрами, — показало, что в такой системе формируется жесткий спектр частиц с распределением $f(E) \propto E^{-s}$, $s \sim 1$ [24]. Спектры синхротронного рентгеновского излучения ряда ПТ, формируемых быстро движущимися пульсарами, характеризуются

жесткими фотонными индексами $\Gamma \lesssim 1.5$, что предполагает наличие жестких спектров частиц с $s < 2$ [25, 26, 27, 28]. Наконец, влияние сверхзвукового натекающего потока способно приводить к нетривиальным многоволновым морфологиям ПТ с головными УВ — в частности, в результате излучения ускоренных на сходящихся потоках частиц ПВ в усиленном ускорением КЛ турбулентном поле. В силу перечисленных соображений, актуальной задачей является кинетическое моделирование переноса частиц релятивистского ПВ через пульсарную туманность с головной УВ после прохождения ими УВ торможения.

Цель настоящей работы состояла в исследовании физических процессов, ответственных за наблюдаемое многоволновое излучение космических источников, связанных с пульсарными туманностями, и разработке моделей для корректной интерпретации наблюдаемых динамических структур, морфологических и спектральных особенностей этих источников.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование локальной динамики магнитных структур в сильнонеравновесной релятивистской плазме пульсарных туманностей.
2. Моделирование переноса и ускорения релятивистских частиц в пульсарной туманности с головной ударной волной, сформированной за ударной волной торможения релятивистского пульсарного ветра.
3. Моделирование изображений пульсарной туманности с головной ударной волной в различных спектральных диапазонах.
4. Моделирование наблюдаемых жестких спектров синхротронного рентгеновского излучения (с фотонными индексами $\Gamma < 1.5$) пульсарных туманностей с головными ударными волнами.

Научная новизна работы состоит в том, что следующие основные результаты получены впервые:

1. Построена аналитическая кинетическая модель локальной динамики возмущений магнитного поля конечной амплитуды в сильнонеравновесной релятивистской плазме пульсарной туманности с учетом эффектов, связанных с возможным присутствием в пульсарном ветре ионной компоненты.
2. Методом Монте-Карло построена модель переноса и ускорения релятивистских частиц в пульсарной туманности с головной ударной волной, учитывающая пространственную структуру туманности.
3. Построены модельные синхротронные изображения в различных диапазонах электромагнитных волн и рассчитаны спектры излучения туманности пульсара PSR J0437-4715.
4. Построена модель формирования жестких спектров синхротронного рентгеновского излучения в пульсарной туманности в созвездии Парусов в результате ускорения частиц пульсарного ветра на сходящихся потоках между УВ торможения и головной УВ.

Достоверность полученных результатов обоснована тем, что эти результаты получены с использованием широко известных методов аналитического и численного решения дифференциальных уравнений в частных

производных и метода Монте-Карло для численного моделирования переноса частиц. Решение системы кинетических уравнений в главе 2 реализовано с помощью методов теории возмущений, общая схема примененного метода с успехом использована для сходных задач в [29, 30]. Достоверность полученных в диссертации численных решений проверена путем применения сеток с различным шагом, с соблюдением условий устойчивости. Численное моделирование методом Монте-Карло широко применяется для моделирования ускорения частиц на ударных волнах и их диффузионно-конвективного переноса в космических источниках и является хорошо изученным и общепринятым методом кинетического моделирования [31, 32, 33, 34]. Достоверность результатов моделирования также подтверждается их совпадением с результатами наблюдений в тех случаях, когда такое сравнение возможно. Результаты, представленные в диссертации, неоднократно доложены на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в реферируемых международных журналах.

Научная и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Модель локальной динамики магнитных структур может быть использована для оценок параметров плазмы и состава релятивистского пульсарного ветра на основе наблюдений нетеплового излучения пульсарных туманностей.
2. Модель переноса релятивистских частиц в пульсарной туманности с головной ударной волной позволяет выполнять интерпретацию наблюдаемых структур и спектров пульсарных туманностей с головными ударными волнами в широком диапазоне энергий от эВ до МэВ.
3. Результаты моделирования ускорения частиц в пульсарной туманности с головной ударной волной используются для определения вклада близких пульсаров в наблюдаемые у орбиты Земли спектры позитронов космических лучей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Исследование динамики магнитных структур в сильнонеравновесной релятивистской электрон-позитронной плазме пульсарной туманности с учетом возможного присутствия в ней ионов; интерпретация наблюдаемой динамики мелкомасштабных излучающих структур в Крабовидной туманности.
2. Моделирование диффузионно-конвективного переноса частиц релятивистского пульсарного ветра через пульсарную туманность с головной ударной волной.
3. Моделирование жестких спектров синхротронного излучения пульсарной туманности, формирующихся при ускорении частиц пульсарного ветра на сходящихся потоках между ударной волной торможения и головной ударной волной.
4. Исследование морфологии туманности пульсара PSR J0437-4715 в дальнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Моделирование жестких спектров рентгеновского излучения пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela).

Апробация работы

Результаты, приведенные в диссертации, получены в период с 2013 по 2017 годы и опубликованы в **5** статьях в реферируемых международных журналах. Эти результаты были представлены на всероссийских и международных конференциях: «Физика А.СПб» (Санкт-Петербург, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017), «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2016), XIV конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, 2017), симпозиуме «The X-ray Universe 2017» (Рим, Италия, 2017), конференции «Physics of neutron stars» (Санкт-Петербург, 2017).

Личный вклад

Автор диссертации внес определяющий вклад во все основные результаты диссертации. За исключением обзорной части введения, все аналитические и численные расчеты, представленные в диссертации, проведены лично автором. Численное моделирование, представленное в диссертации, осуществлено с помощью программных кодов, разработанных и отлаженных автором. Автор активно участвовал в постановке задач и внес основной вклад в подготовку к печати всех опубликованных по теме диссертации работ.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет **124** страницы текста с **21** рисунком и **5** таблицами. Список литературы содержит **130** наименований.

Содержание работы

В первой главе — введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи, продемонстрированы научная новизна и научно-практическая значимость исследования, приведены список публикаций по теме диссертации, сведения об апробации работы и основные положения, выносимые на защиту. Дан обзор наблюдательных данных о ряде пульсарных туманностей (ПТ).

Вторая глава посвящена моделированию локальной динамики возмущений магнитного поля в сильнонеравновесной релятивистской плазме ПТ. Рассмотрено распространение возмущения магнитного поля конечной амплитуды поперек крупномасштабного поля ПТ, в плазме, состоящей, в основном, из электронов и позитронов, с учетом рассеяния частиц на флуктуациях турбулентного поля [A1]. Кинетическое моделирование локальной динамики магнитных структур сведено к вычислению отклика функции распределения (ФР) частиц плазмы и соответствующего токового отклика (ТО) на рассматриваемое возмущение, что позволило получить уравнение, описывающее эволюцию возмущения. Крупномасштабное магнитное поле B_0 , невозмущенная ФР фоновой плазмы и параметры рассеяния частиц считались однородными на пространственном масштабе L , много большем размеров возмущений, и задача состояла в описании эволюции структуры в ходе ее распространения в области размером $\sim L$. Рассмотрение проведено в длинноволновом пределе $\omega \ll \nu_{1,2} = a_{1,2}\Omega \leq \Omega$, где ω — характерные частоты возмущений, Ω — гиро-частота, $\nu_{1,2}$ — характерные частоты рассеяния позитронов (1) и электронов (2) на флуктуациях магнитного поля. Были учтены слабые дисперсионные

и нелинейные эффекты, способные привести к существенному искажению профиля возмущения по мере его распространения [35]. Особенность модели — введение различных частот рассеяния для позитронов и электронов, связанное с учетом возможного присутствия в плазме пульсарного ветра (ПВ) ионов: генерируемые ими циркулярно поляризованные ионно-циклотронные волны более эффективно взаимодействуют с позитронами, вращающимися в магнитном поле в том же направлении, что и вектор электрического поля этих волн в плоскости поляризации ([A3], см. также [36, 16]). Предполагалось, что $\delta\nu = (\nu_1 - \nu_2)/\Omega \ll 1$. Для вычисления искомого отклика ФР требовалось решить систему кинетических уравнений (КУ) для компонент плазмы, что было реализовано методами теории возмущений (ТВ), малым параметром которой служила амплитуда поля возмущения.

В разделе 2.2 система КУ была решена в первом — линейном приближении ТВ, что позволило получить решение дисперсионного уравнения для рассматриваемых волн и вычислить линейную составляющую отклика тока на возмущение поля. В разделе 2.3 во втором приближении ТВ был вычислен нелинейный ТО и получено эволюционное уравнение, имеющее форму уравнения Кортевега — де Фриса — Бюргерса. В разделе 2.4 проанализированы зависимости коэффициентов полученного уравнения — фазовой скорости возмущений, декремента затухания, дисперсионной длины, коэффициента при нелинейном слагаемом — от параметров плазмы и параметров рассеяния частиц [A3]. Показано, что видимые наблюдателем скорости структур, образованных распространением в экваториальной плоскости Крабовидной туманности (КТ) рассматриваемых возмущений, при учете эффектов движения фоновой плазмы и запаздывания, связанного с релятивистской скоростью распространения, оказались бы $\sim c$. Учет изменения параметров плазмы КТ с удалением от ударной волны (УВ) торможения приводит к оцениваемым значениям скоростей $u \sim 0.6 - 0.7c$ (на расстоянии $\sim 1-2$ характерных радиусов УВ от нее), довольно близким к оцененным из наблюдательных данных скоростям «жгутов» $\sim 0.3 - 0.5c$. Показано, что значения декремента затухания и дисперсионной длины зависят от расстройки частот рассеяния $\delta\nu$.

В конце раздела 2.4 представлены результаты моделирования эволюции начального возмущения при различных параметрах рассеяния. Показано, что при $\nu_{1,2} \sim \Omega$ и $\nu_{1,2} \ll \Omega$ характер эволюции существенно отличается [A2]. При малых частотах рассеяния и, соответственно, слабом затухании, эволюция профиля напоминает результаты аналогичного моделирования для уравнения Кортевега — де Фриса (см., например, [37]): формируется «гребенка» из уединенных пиков. При сильном затухании возмущение лишь приобретает крутой фронт и протяженный «хвост» (см. Рис. 2). Характерные ширины возмущений и заметное затухание структур на временах порядка нескольких месяцев согласуются с наблюдаемыми масштабами тонких структурных деталей ($\lesssim 10^{16}$ см) и временем затухания «жгутов» в КТ [A1, A2][8]. Кроме того, относительно медленное спадание поля возмущения от пика к «хвосту» может быть причиной систематических различий в наблюдаемых в оптическом и рентгеновском диапазонах положениях «жгутов» [38]. Ввиду различного уровня интенсивности фонового излучения КТ на разных частотах, создаваемое структурой возмущение интенсивности может иметь на них разные протяженности и, как следствие, по-разному наблюдаемые положения.

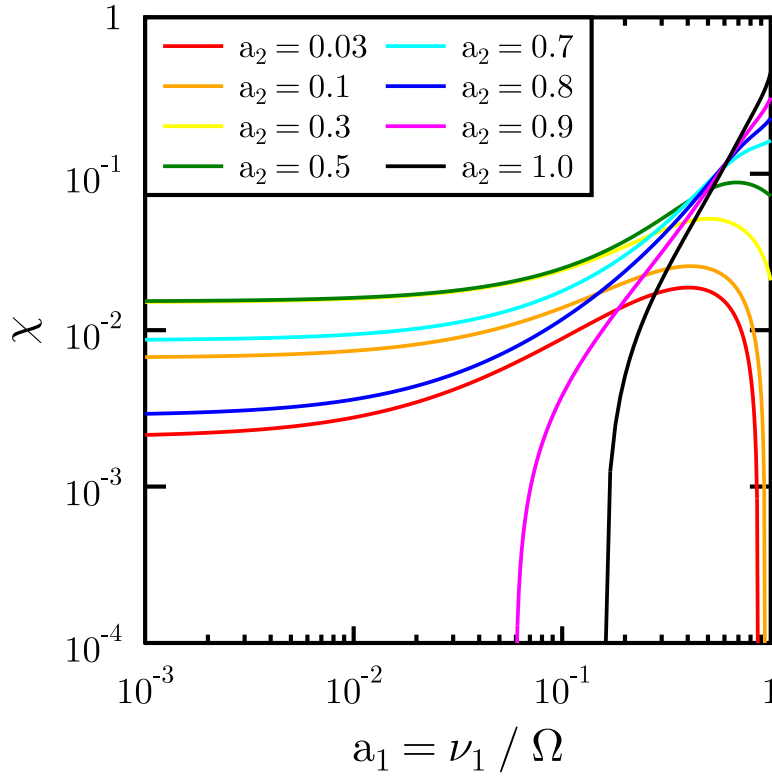


Рис. 1: Коэффициент затухания возмущений магнитного поля (χ). Здесь a_1 и a_2 — нормированные на гирочастоту Ω частоты рассеяний позитронов и электронов плазмы пульсарной туманности на флуктуациях турбулентного магнитного поля.

В разделе 2.4 также продемонстрировано, что при фиксированной частоте ν_2 результаты с $\delta\nu = 0$ и $\delta\nu \neq 0$ приводят к несколько различному характеру эволюции начального возмущения: с ростом $\delta\nu$ возмущения затухают быстрее и «гребенка» при малых $\nu_{1,2}$ формируется позже. Эти результаты представляют интерес с точки зрения наложения ограничений на состав пульсарного ветра. Предполагая, что наблюдаемые в ПТ динамические структуры — такие, как «жгуты» в КТ — являются результатом распространения изученных структур, можно провести микроскопическое моделирование влияния ионов ПВ на рассеяние позитронов, а затем отмоделировать структуры, создаваемые рассматриваемыми магнитными возмущениями в синхротронном излучении туманности при различных параметрах рассеяния и, сравнивая результаты с наблюдениями, установить ограничения на ряд параметров модели.

В разделе 2.5 представлены выводы, полученные на основе проведенного моделирования. Построенная модель описывает локальную динамику магнитных структур в сильнонеравновесной релятивистской плазме ПТ. Распространение возмущений магнитного поля в плазме ПТ может являться причиной наблюдаемых в ПТ динамических структур, таких, как «жгуты» в Крабовидной туманности. Зависимость величин, описывающих динамику структур, от расстройки частот рассеяния, обусловленной ионной компонентой ПВ, может позволить наложить наблюдательные ограничения на состав ПВ.

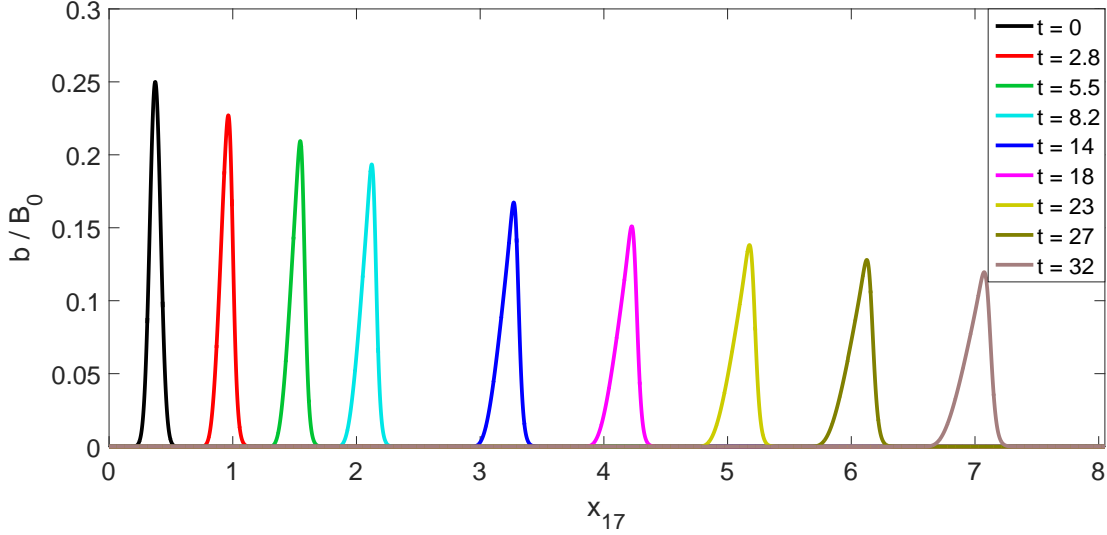


Рис. 2: Распространение возмущения магнитного поля в сильнонеравновесной релятивистской плазме Крабовидной туманности. Временная эволюция начального возмущения (гауссов пик со среднеквадратичным отклонением 3.5×10^{15} см). Разными цветами представлены профили возмущения в разные моменты времени, указанные в единицах мегасекунд. По оси абсцисс — координата (в системе покоя фоновой плазмы), нормированная на 10^{17} см, по оси ординат — амплитуда поля возмущения, нормированная на амплитуду крупномасштабного поля B_0 .

Третья глава посвящена детальному описанию модели переноса частиц релятивистского ПВ после прохождения им УВ торможения через ПТ с головной УВ [А4,А5]. Модель основана на методе Монте-Карло для стационарного случая и реализует распространение пробных частиц. Модель учитывает основные свойства пространственной структуры рассматриваемых источников, что важно для корректного учета ухода частиц из источника, необходимого при моделировании процессов их ускорения, а также для моделирования наблюдаемой морфологии источника. Целью моделирования являлось воспроизведение спектров высокоэнергичных частиц, длина свободного пробега которых больше или порядка размеров области со сложной структурой течений вблизи контактного разрыва (КР) между двумя УВ, и спектров синхротронного излучения этих частиц. Раздел 3.1 посвящен описанию модели распространения частиц в источнике, рассматриваемого в системе покоя пульсара. Источник рассмотрен в виде совокупности осесимметричных областей (см. Рис. 3) с заданными в каждой области распределением течений, средним значением магнитного поля, предполагаемого хаотически ориентированным, и коэффициентом диффузии — пространственно однородным, но зависящим от энергии частицы. Область (1) пульсарного ветра, прошедшего УВ торможения, отделена от области вблизи фронта головной УВ (3) т.н. «полостью» — областью вблизи КР (2), в которой можно пренебречь конвективным переносом частиц потоками вещества. В области (1) скорость течения ветра задана радиально направленной, $u = u_0 (r_{ts}/r)^2$, где r — расстояние от пульсара, r_{ts} — радиус УВ торможения, имеющей форму сферы; в области (3) и в невозмущенной межзвездной среде (МЗС; область 4) поле скорости однородно, и она равна по величине скорости пульсара u_{psr} относительно по-

коящейся МЗС. Границы области (3) заданы уравнением для формы головной УВ в приближении тонкой оболочки [39].

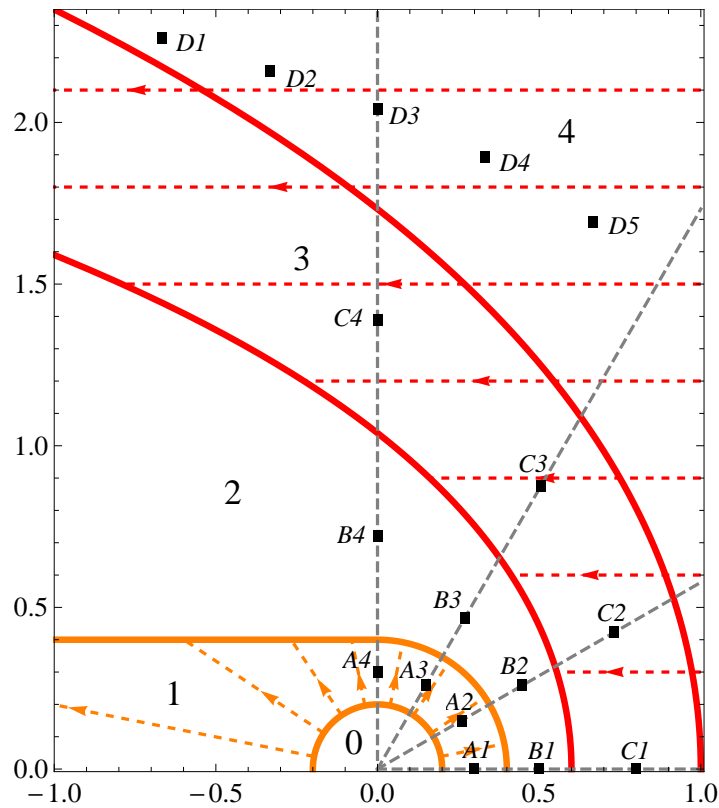


Рис. 3: Схема пространственной структуры пульсарной туманности с головной ударной волной: половина осевого сечения. Черными квадратами A1-D5 обозначены ячейки пространственной сетки, использованные при вычислении фотонных индексов.

Далее в главе 3 описана модель распространения частиц через источник. Частицы, инжектированные в источник на УВ торможения, предполагались уже прошедшими ускорение на ней и имеющими заданное распределение по энергии (участок степенного распределения с $s \sim 2.2 - 2.3$). Инжектированные частицы распространялись через источник, испытывая рассеяние, изотропное в локальной системе покоя плазмы, после каждого пролета по прямой расстояния, равного длине свободного пробега в данной области — этот цикл повторялся, пока частица не покидала источник через границу — поверхность свободного ухода. Важным фактором является ускорение частиц космических лучей (КЛ) на головной УВ, способное привести к усилению флуктуаций магнитного поля в диапазоне длин волн вплоть до масштаба $L_{cor} \gg R_{max}$, где R_{max} — гирорадиус протонов КЛ максимальной достигаемой в ускорении энергии [23]. Сильные длинноволновые флуктуации магнитного поля способны обеспечить в области между головной УВ и КР так называемый бомовский режим диффузии — с длиной свободного пробега, пропорциональной гирорадиусу частицы $r_g(\gamma)$ — для частиц с лоренц-фактором вплоть до γ_1 , где $r_g(\gamma_1) = L_{cor}$.

Результатом такого моделирования явились полученные с помощью описанного в разделе 3.1.3 подхода значения ФР частиц по импульсам, вычисленные в ячейках шестимерной дискретной сетки (3 пространственных + 3 импульсных измерения), пронизывающей фазовое пространство модели. Раз-

дел 3.2 посвящен описанию моделирования синхротронного излучения источника на основе полученной ФР. Вычисление интенсивности синхротронного излучения произведено с учетом анизотропии ФР.

Четвертая глава посвящена моделированию многоволновой морфологии и спектров туманности PSR J0437-4715 [A4, A5]. Старый миллисекундный пульсар J0437-4715, наблюдаемый в двойной системе с белым карликом, находится на расстоянии $d = 156.8 \pm 0.3$ пк, его оцененный темп потери вращательной энергии $\dot{E} \sim 6 \times 10^{33}$ эрг с^{-1} , а поперечная к лучу зрения составляющая собственной скорости $v_{\perp} = 104.1 \pm 0.2$ км с^{-1} [40]. Наблюдавшаяся в линии $H\alpha$ с помощью телескопа SOAR [41] дугообразная структура, ассоциируемая с головной УВ пульсара, была обнаружена в наблюдениях с телескопом им. Хаббла в дальнем ультрафиолетовом диапазоне (ДУФ; 1250 — 2000 Å, 6.2 — 9.9 эВ) [40], однако она отсутствует на рентгеновских изображениях (0.5 — 8 кэВ), полученных с помощью обсерватории Chandra. В рентгеновском диапазоне (РД) видна лишь слабая протяженная структура ПТ светимостью $L_X^{obs} \approx 3 \times 10^{28}$ эрг с^{-1} [40]. Аппроксимация спектра в РД степенным законом позволила оценить величину фотонного индекса $\Gamma = 1.8 \pm 0.4$. Светимость головной УВ в ДУФ $L_{FUV}^{obs} \approx 5 \times 10^{28}$ эрг с^{-1} примерно на порядок выше ее светимости в $H\alpha$.

Наблюдаемое излучение от головной УВ может объясняться как излучением нагретого межзвездного вещества, так и синхротронным излучением частиц ПВ, распространяющихся через ПТ с головной УВ. Представленная в главе 4 модель демонстрирует возможность второго сценария.

В разделе 4.1 оценены допустимые значения параметров модели — магнитных полей, геометрических параметров источника, энергетического распределения частиц, инжектируемых в систему. В разделе 4.2 представлены результаты моделирования спектров частиц в различных областях источника, модельные карты синхротронного излучения туманности в ДУФ и РД и результаты моделирования потоков синхротронного излучения от полученных в изображениях ярких структур — ПТ и области вблизи головной УВ. Результаты приведены для ряда расчетов с различными параметрами — варьировались скорость ПВ за УВ торможения u_0 и максимальный лоренц-фактор инжектируемого распределения частиц γ_{max} . Показано, что внутри источника формируется распределение частиц с жесткой компонентой $f(E) \propto E^{-s}$, $s < 2$ в некоторой области $E \leq E_{max}(u_0)$, причем E_{max} возрастает с ростом u_0 . Этот результат связан с ускорением на сходящихся потоках частиц, имеющих длины свободного пробега меньше размеров источника и способных многократно диффундировать через КР, набирая энергию. Результаты вычисления потоков излучения и синхротронные изображения источника демонстрируют, что модель качественно воспроизводит наблюдаемую морфологию источника в ДУФ и РД: в ультрафиолетовом диапазоне хорошо видна яркая дугообразная структура, связанная с головной УВ, тогда как в РД она отсутствует, а наблюдается лишь протяженная область излучения, связанная с ПТ. Вычислены светимости головной УВ в ДУФ L_{FUV} и в полосе 6550 — 6582 Å вблизи линии $H\alpha$ — $L_{H\alpha}$, а также светимость ПТ в РД. Расчетное отношение $L_{FUV}/L_{H\alpha}$ примерно на порядок выше измеренного, что не является противоречием: вполне вероятно, что большая часть светимости головной УВ в линии $H\alpha$ обусловлена излучением в этой линии нагретого

при прохождении УВ вещества МЗС. Полученное в ряде расчетов отношение $L_{FUV}/L_X \sim 1$ можно считать хорошо согласующимся с наблюдаемым (~ 1.7) ввиду, с одной стороны, ряда упрощений, лежащих в основе модели, с другой стороны – качества имеющихся наблюдательных данных. То же относится и к воспроизведению наблюдаемых рентгеновских фотонных индексов: моделирование позволило воспроизвести их в области мягкого рентгеновского излучения для энергии фотонов $E_{ph} \lesssim 1.5$ кэВ. Также следует учесть, что область, выбранная для анализа авторами [40], не включает область внутри радиуса $\sim 2''$ вблизи пульсара, в которой модель по построению дает уярчение наблюдаемой интенсивности в связи с эффектом Доплера: по этой причине реальная светимость рентгеновской туманности может быть недооценена.

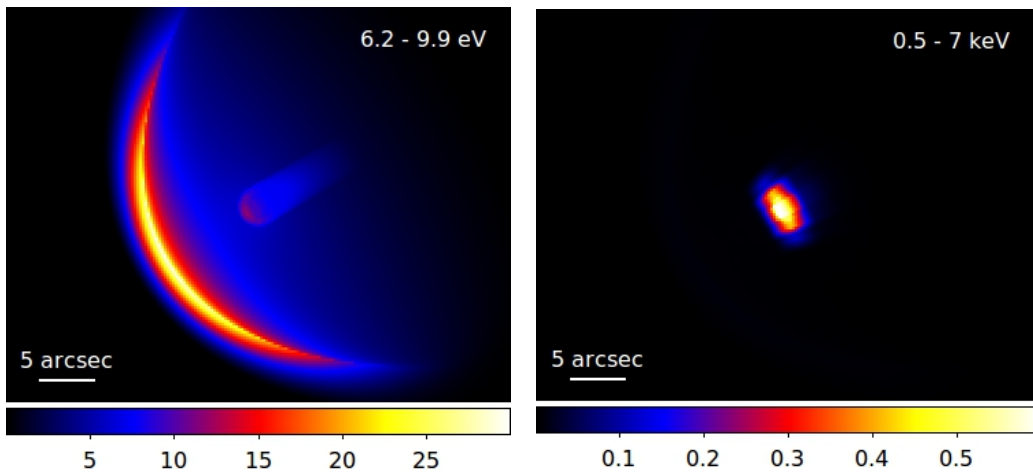


Рис. 4: Модельные карты интенсивности синхротронного излучения источника, связанного с PSR J0437-4715, в дальнем ультрафиолетовом (1250 – 2000 Å, слева) и рентгеновском (0.5 – 7 кэВ, справа) диапазонах. Интенсивность проинтегрирована по указанным диапазонам и дана в единицах 10^{-7} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$.

В разделе 4.3 подведены итоги главы: модель позволяет описать наблюдаемое излучение источника, связанного с PSR J0437-4715 в ДУФ и РД с точностью, адекватной качеству имеющихся наблюдательных данных и упрощениям, лежащим в ее основе. Таким образом, не только излучение ПТ в РД, но и излучение источника в ДУФ может в основном определяться синхротронным излучением электронов и позитронов ПВ.

В **пятой главе** представлена модель формирования жестких спектров рентгеновского излучения ПТ в созвездии Парусов [A4]. У медленно движущегося внутри родительского остатка сверхновой (ОСН) пульсара ($\dot{E} \sim 7 \times 10^{36}$ эрг с^{-1} , $d = 287_{-17}^{+19}$ пк, $v_{\perp} = 61 \pm 2$ км с^{-1}), питающего туманность, может быть сформирована головная УВ ввиду натекания слабо-сверхзвукового потока (со скоростью ~ 500 км с^{-1}) на переходной стадии эволюции ОСН. Соответственно, наблюдаемые жесткие рентгеновские спектры ПТ могут объясняться ускорением частиц на сходящихся потоках между УВ торможения ветра и головной УВ.

Заложенная в модели, описанной в главе 3, упрощенная структура течений в туманности, очевидно, не позволяет детально воспроизвести морфологию ярких структур, наблюдаемых в рентгеновском излучении ПТ в созвездии Парусов. Эти яркие области, очевидно, связаны с эффектом Доплера

в сложной структуре течений за УВ торможения ветра, подобной структурам моделированным в работах [42, 21, 43]. С другой стороны, результатом моделирования переноса частиц в ПТ с головной УВ являются жесткие компоненты спектров частиц внутри источника с $s < 2$. Эти компоненты спектров, обусловленные ускорением частиц на сходящихся потоках, позволяют объяснить жесткие спектры синхротронного излучения с $\Gamma < 1.5$, наблюдаемые, в том числе, в области вблизи предполагаемого положения головной УВ, где эффект Доплера, по-видимому, незначителен [25]. Ввиду перечисленного, в пятой главе не ставится задачи воспроизвести наблюдаемую морфологию рассматриваемой ПТ и приведены лишь спектральные распределения интенсивности излучения, проинтегрированной вдоль лучей зрения, минуя область сильного эффекта Доплера, который не учтен при вычислениях представленных спектров.

В разделе 5.1 представлено моделирование спектров частиц и излучения ПТ с головной УВ с параметрами, соответствующими ПТ в созвездии Парусов. Оценены допустимые значения параметров модели, приведены результаты моделирования локальных спектров частиц, спектров интенсивности синхротронного излучения, а также фотонные индексы. Показано, что в результате ускорения частиц на сходящихся потоках в областях вблизи КР и головной УВ могут формироваться спектры частиц с $s \sim 1$ вплоть до лоренц-фактора $\gamma \sim 10^8$. Это может приводить к формированию спектров излучения с жесткими фотонными индексами $\Gamma < 1.5$ для лучей зрения, проходящих сквозь эти области, в диапазоне единиц кэВ (см. Рис. 5), что согласуется с данными наблюдений. Дополнительно на Рис. 5 приведены кривые для фотонных индексов, которые получены по результатам расчета спектров излучения частиц ПВ в ОСН за пределами ПТ с головной УВ.

В разделе 5.2 подведен итог: наблюдаемые жесткие рентгеновские спектры ПТ в созвездии Парусов могут быть объяснены как результат ускорения частиц ПВ на сходящихся потоках между УВ торможения и головной УВ.

В **заключении** диссертации суммированы основные результаты работы:

1. Построена количественная нелинейная кинетическая модель локальной динамики магнитных структур, распространяющихся поперек крупномасштабного магнитного поля в сильнонеравновесной релятивистской электрон-позитронной плазме пульсарной туманности при наличии рассеяний частиц на флуктуациях магнитного поля, с учетом эффектов, связанных с присутствием в пульсарном ветре ионной компоненты. На основе построенной модели предложена интерпретация динамики наблюдаемых в Крабовидной туманности мелкомасштабных (10^{15} – 10^{16} см) излучающих структур — «жгутов» — как проявления эффектов распространения магнитных возмущений за фронтом ударной волны торможения. Кинетическая модель мелкомасштабных излучающих структур позволяет, посредством анализа наблюдений с высоким угловым разрешением, оценивать наличие ионов в пульсарном ветре.
2. Построена количественная модель переноса частиц релятивистского пульсарного ветра от ударной волны торможения через пульсарную туманность с головной ударной волной. Построена модель синхротронного излучения пульсарной туманности с головной ударной волной в диапазоне от эВ до нескольких МэВ.

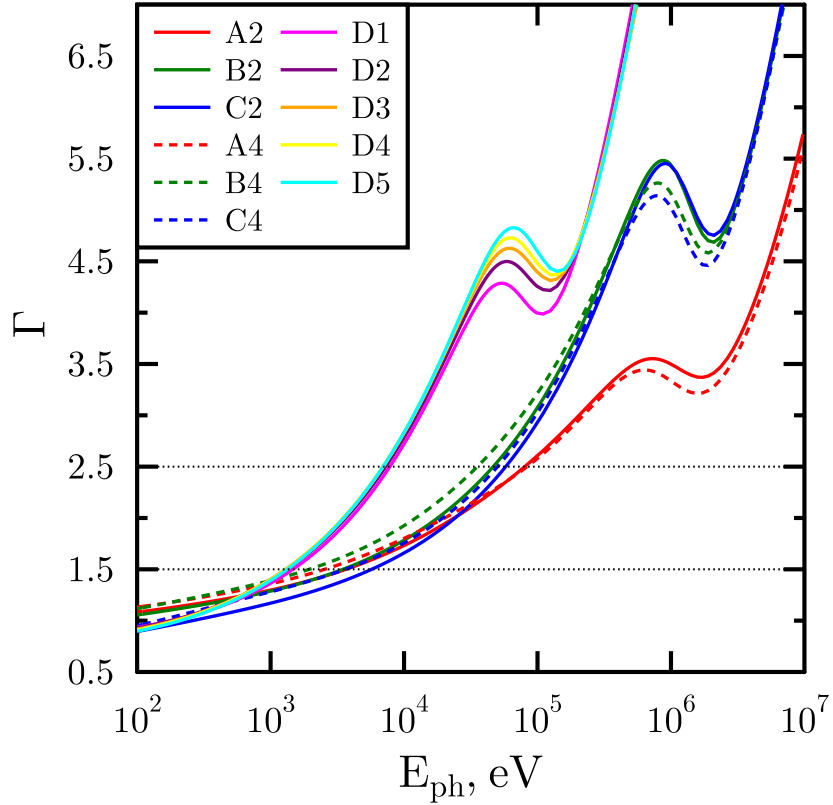


Рис. 5: Локальные фотонные индексы спектров синхротронного излучения пульсарной туманности в созвездии Парусов, проинтегрированных вдоль лучей зрения, проходящих через ячейки $A2-D5$, указанные на Рис. 3. Красные кривые соответствуют лучам зрения, проходящим через область (1) пульсарного ветра, нагретого на ударной волне (УВ) торможения, синие — через область (3) вблизи головной УВ, зеленые — через область (2) вблизи контактного разрыва. Кривые $D1-D5$ соответствуют лучам зрения, проходящим через вещество остатка сверхновой, минуя пульсарную туманность с головной УВ.

3. Выполнено моделирование переноса частиц пульсарного ветра в туманности пульсара PSR J0437-4715. Построены модельные карты синхротронного излучения этой туманности в дальнем ультрафиолетовом (1250-2000 Å) и рентгеновском (0.5 – 7 кэВ) диапазонах. Предложена интерпретация морфологии этой туманности, наблюдаемой на орбитальных телескопах Hubble Space Telescope и Chandra. Модельные спектры туманности согласуются с наблюдениями в линии H_{α} (6566 Å), выполненными с помощью телескопа SOAR.
4. Выполнено моделирование переноса частиц пульсарного ветра в пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela). Построены модельные спектры синхротронного излучения этой туманности. Предложена интерпретация наблюдаемых рентгеновских спектров пульсарной туманности в созвездии Парусов, обладающих жесткими фотонными индексами ($\Gamma \lesssim 1.5$), как результата ускорения частиц пульсарного ветра на сходящихся потоках между ударной волной торможения и головной ударной волной.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. A. E. Petrov, A. M. Bykov. Relativistic solitons in pulsar wind nebulae // Journal of Physics: Conference Series 2014. Vol. 572, Issue 1, article id. 012005;
- A2. A. E. Petrov, A. M. Bykov. Model of dynamical structures in synchrotron images of pulsar wind nebulae // Journal of Physics: Conference Series 2015. Vol. 661, Issue 1, article id. 012010;
- A3. A. E. Petrov, A. M. Bykov. Magnetic structures propagating in non-equilibrium relativistic plasma of pulsar wind nebulae // Journal of Physics: Conference Series 2016. Vol. 769, Issue 1, article id. 012008;
- A4. Bykov A. M., Amato E., Petrov A. E., Krassilchtchikov A. M., Levenfish, K. P. Pulsar Wind Nebulae with Bow Shocks: Non-thermal Radiation and Cosmic Ray Leptons // Space Sci. Rev. 2017. Vol. 207, Issue 1-4, pp. 235-290;
- A5. A. E. Petrov, A. M. Bykov, S. M. Osipov. Modeling of relativistic pulsar wind interaction with the interstellar medium // Journal of Physics: Conference Series 2017. Vol. 929, Issue 1, article id. 012015.

Литература, цитируемая в автореферате

1. Branch D., Wheeler J. C. Supernova Explosions, Springer-Verlag GmbH Germany. — 2017.
2. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger // ApJL. — 2017. — Vol. 848. — P. L12.
3. Shakura N. I., Postnov K. A., Kochetkova A. Y. et al. Wind accretion: Theory and observations // Astronomy Reports. — 2015. — Vol. 59. — P. 645–655.
4. Helder E. A., Vink J., Bykov A. M. et al. Observational Signatures of Particle Acceleration in Supernova Remnants // Space Sci. Rev. — 2012. — Vol. 173. — P. 369–431.
5. Reynolds S. P., Pavlov G. G., Kargaltsev O. et al. Pulsar-Wind Nebulae and Magnetar Outflows: Observations at Radio, X-Ray, and Gamma-Ray Wavelengths // Space Sci. Rev. — 2017. — Vol. 207. — P. 175–234.
6. Березинский В. С., Буланов С. В., Гинзбург В. Л., Догель В. А., Птускин В. С. Астрофизика космических лучей. — М.: Наука, 1984. — 360 с.
7. Blasi P. The origin of galactic cosmic rays // Astron. Astrophys. Rev. — 2013. — Vol. 21. — P. 70.
8. Hester J. J. The Crab Nebula: An Astrophysical Chimera // ARA&A. — 2008. — Vol. 46. — P. 127–155.
9. Oort J. H., Walraven T. Polarization and composition of the Crab nebula // Bull. Astron. Inst. Netherlands. — 1956. — Vol. 12. — P. 285.
10. Hester J. J., Mori K., Burrows D. et al. Hubble Space Telescope and Chandra Monitoring of the Crab Synchrotron Nebula // ApJL. — 2002. — Vol. 577. — P. L49–L52.
11. Arons J. Theory of Pulsar Winds // Neutron Stars in Supernova Remnants / Ed. by P. O. Slane, B. M. Gaensler. — Vol. 271 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2002. — P. 71.

12. Arons J. Pulsar Wind Nebulae as Cosmic Pevatrons: A Current Sheet's Tale // *Space Sci. Rev.* — 2012. — Vol. 173. — P. 341–367.
13. Olmi B., Del Zanna L., Amato E., Bucciantini N. Constraints on particle acceleration sites in the Crab nebula from relativistic magnetohydrodynamic simulations // *MNRAS.* — 2015. — Vol. 449. — P. 3149–3159.
14. Bucciantini N., Arons J., Amato E. Modelling spectral evolution of pulsar wind nebulae inside supernova remnants // *MNRAS.* — 2011. — Vol. 410. — P. 381–398.
15. Sironi L., Spitkovsky A., Arons J. The Maximum Energy of Accelerated Particles in Relativistic Collisionless Shocks // *ApJ.* — 2013. — Vol. 771. — P. 54.
16. Amato E., Arons J. Heating and Nonthermal Particle Acceleration in Relativistic, Transverse Magnetosonic Shock Waves in Proton-Electron-Positron Plasmas // *ApJ.* — 2006. — Vol. 653. — P. 325–338.
17. Sironi L., Spitkovsky A. Acceleration of Particles at the Termination Shock of a Relativistic Striped Wind // *ApJ.* — 2011. — Vol. 741. — P. 39.
18. Bogovalov S. V. On the physics of cold MHD winds from oblique rotators // *A&A.* — 1999. — Vol. 349. — P. 1017–1026.
19. Lyubarsky Y. E. On the structure of the inner Crab Nebula // *MNRAS.* — 2002. — Vol. 329. — P. L34–L36.
20. Gallant Y. A., Arons J. Structure of relativistic shocks in pulsar winds: A model of the wisps in the Crab Nebula // *ApJ.* — 1994. — Vol. 435. — P. 230–260.
21. Camus N. F., Komissarov S. S., Bucciantini N., Hughes P. A. Observations of ‘wisps’ in magnetohydrodynamic simulations of the Crab Nebula // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 400. — P. 1241–1246.
22. Hobbs G., Lorimer D. R., Lyne A. G., Kramer M. A statistical study of 233 pulsar proper motions // *MNRAS.* — 2005. — Vol. 360. — P. 974–992.
23. Bykov A. M., Brandenburg A., Malkov M. A., Osipov S. M. Microphysics of Cosmic Ray Driven Plasma Instabilities // *Space Sci. Rev.* — 2013. — Vol. 178. — P. 201–232.
24. 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.
25. Kargaltsev O., Pavlov G. G. Pulsar Wind Nebulae in the Chandra Era // *40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More* / Ed. by C. Bassa, Z. Wang, A. Cumming, V. M. Kaspi. — Vol. 983 of American Institute of Physics Conference Series. — 2008. — P. 171–185.
26. Posselt B., Pavlov G. G., Slane P. O. et al. Geminga's Puzzling Pulsar Wind Nebula // *ApJ.* — 2017. — Vol. 835. — P. 66.
27. Johnson S. P., Wang Q. D. The pulsar B2224+65 and its jets: a two epoch X-ray analysis // *MNRAS.* — 2010. — Vol. 408. — P. 1216–1224.
28. Ray P. S., Kerr M., Parent D. et al. Precise γ -ray Timing and Radio Observations of 17 Fermi γ -ray Pulsars // *ApJS.* — 2011. — Vol. 194. — P. 17.
29. Vainshtein S. I., Bykov A. M., Toptygin I. N. Turbulence, current sheets and shocks in cosmical plasma. — Moscow: Nauka, 1989. — P. 311. — ISBN: 5-02-000705-6.

30. Mikhailovskii A B, Onishchenko O G, Tatarinov E G. Alfvén solitons in a relativistic electron-positron plasma. II. Kinetic theory // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 1985. — Vol. 27, no. 5. — P. 539.
31. Ellison D. C., Eichler D. Monte Carlo shock-like solutions to the Boltzmann equation with collective scattering // *ApJ*. — 1984. — Vol. 286. — P. 691–701.
32. Ellison D. C., Baring M. G., Jones F. C. Nonlinear Particle Acceleration in Oblique Shocks // *ApJ*. — 1996. — Vol. 473. — P. 1029–+.
33. Vladimirov A. Modeling magnetic field amplification in nonlinear diffusive shock acceleration // Ph.D. thesis / North Carolina State University. — 2009.
34. Bykov A. M., Ellison D. C., Osipov S. M., Vladimirov A. E. Magnetic Field Amplification in Nonlinear Diffusive Shock Acceleration Including Resonant and Non-resonant Cosmic-Ray Driven Instabilities // *ApJ*. — 2014. — Vol. 789. — P. 137.
35. Novikov S., Manakov S. V., Pitaevskii L. P., Zakharov V. E. Theory of solitons: The inverse scattering method. — 1984.
36. Hoshino M., Arons J. Preferential positron heating and acceleration by synchrotron maser instabilities in relativistic positron-electron-proton plasmas // *Physics of Fluids B*. — 1991. — Vol. 3. — P. 818–833.
37. Zabusky N. J., Kruskal M. D. Interaction of “Solitons” in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States // *Physical Review Letters*. — 1965. — Vol. 15. — P. 240–243.
38. Schweizer T., Bucciantini N., Idec W. et al. Characterization of the optical and X-ray properties of the north-western wisps in the Crab nebula // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 433. — P. 3325–3335.
39. Wilkin F. P. Exact Analytic Solutions for Stellar Wind Bow Shocks // *ApJL*. — 1996. — Vol. 459. — P. L31.
40. Rangelov B., Pavlov G. G., Kargaltsev O. et al. First Detection of a Pulsar Bow Shock Nebula in Far-UV: PSR J0437-4715 // *ApJ*. — 2016. — Vol. 831. — P. 129.
41. Brownsberger S., Romani R. W. A Survey for H α Pulsar Bow Shocks // *ApJ*. — 2014. — Vol. 784. — P. 154.
42. Del Zanna L., Amato E., Bucciantini N. Axially symmetric relativistic MHD simulations of Pulsar Wind Nebulae in Supernova Remnants. On the origin of torus and jet-like features // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 421. — P. 1063–1073.
43. Bühler R., Giomi M. The imprint of pulsar parameters on the morphology of Pulsar Wind Nebulae // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 462. — P. 2762–2776.