

На правах рукописи

ЗЮЗИН ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПУЛЬСАРНЫЕ ТУМАННОСТИ В ОПТИЧЕСКОМ
И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН и ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук с.н.с. **Шибанов Ю.А.**
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Гнедин Ю.Н.**
Учреждение Российской академии наук Главная астрономическая обсерватория РАН;
доктор физико-математических наук, профессор **Малов И.Ф.**
Пуцинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН;

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Защита состоится 29 декабря 2011 г. в 15³⁰ на заседании диссертационного совета Д002.205.03 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

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

Автореферат разослан 28 ноября 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д002.205.03
кандидат физико-математических наук

Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Магнитосферы быстро вращающихся и сильно замагниченных нейтронных звезд (НЗ), наблюдаемых в качестве радио пульсаров, являются эффективными природными ускорителями заряженных частиц до релятивистских энергий, недостижимых даже на самых мощных ускорителях, построенных на Земле. Источником энергии таких природных ускорителей является вращение нейтронной звезды. Ускоренные частицы излучают нетепловые фотоны, которые детектируются с помощью наземных и космических телескопов, в спектральном диапазоне от метрового радиодиапазона до нескольких тераэлектронвольт (ТэВ). Покидающие магнитосферу пульсара ускоренные частицы образуют так называемый пульсарный ветер, который распространяется в окружающее пространство и несет с собой также и магнитное поле. При взаимодействии пульсарного ветра с межзвёздной средой возникают ударные волны, на фронтах которых происходит дополнительное ускорение частиц. Излучение этих частиц, в основном синхротронной природы, наблюдается в виде протяженных объектов, которые принято называть туманностями пульсарного ветра.

Классическим примером пульсарной туманности является Крабовидная туманность, которая имеет на рентгеновских и оптических изображениях ярко выраженную торообразную структуру со струйными выбросами вдоль оси симметрии тора [1]. В этой и ряде других туманностей обнаружена достаточно сильная стохастическая переменность на масштабах от нескольких часов до месяцев и лет. В частности, в Крабовидной туманности недавно детектированы два эпизода резкого повышения потока излучения в гамма диапазоне в 2-3 раза, длившиеся около суток [2, 3, 4]. Отдельные компактные структуры туманности перемещаются со скоростями, близкими к скорости света, что, по-видимому, свидетельствует о сильных магнитогидродинамических неустойчивостях пульсарного ветра. Из-за высокой энергетики пульсаров и пульсарных туманностей их часто рассматривают в качестве основных источников космических лучей сверхвысоких энергий, детектируемых на Земле и с помощью космических аппаратов таких как Pamela.

Многие детали механизмов ускорения частиц в магнитосферах пульсаров, образования пульсарного ветра, его структуры, переменности и взаимодействия с окружающей средой не вполне ясны. Поэтому ведутся интенсивные исследования этих объектов во всём наблюдаемом диапазоне длин волн [5, 6]. Наиболее перспективными являются наблюдения молодых пульсаров, которые находятся в остатках сверхновых и ещё не утратили высокую скорость вращения, полученную при их рождении в результате вспышки сверхновой. С возрастом вращение тормозится из-за потерь на магнитодипольное излучение нейтронной звезды и на генерацию пульсарного ветра. Вокруг достаточно старых пульсаров (с возрастом $> 10^5$ лет) туманности вырождаются или трансформируются в так называемые туманности головной ударной волны, образующейся из-за сверхзвукового движения нейтронной звезды в межзвёздной среде. Иногда также образуются туманности типа кометного хвоста.

Более 50-ти пульсарных туманностей было обнаружено в рентгеновском

диапазоне (0.2–10 КэВ) [7], столько же в радио и порядка 25 в ТэВ диапазоне. Однако, до начала работы над диссертацией всего две пульсарные туманности наблюдались в оптическом и инфракрасном (ИК) диапазонах: вокруг пульсара в Крабовидной туманности и вокруг пульсара PSR B0540–69.3 в остатке сверхновой в Большом Магеллановом Облаке (БМО). Эти две системы обладают схожими основными характеристиками (возраст, энергетика и период вращения пульсара; морфология и размеры туманности), однако их многоволновые спектры имеют разный вид, сильно отличаясь друг от друга в оптическом и инфракрасном диапазонах, где они имеют существенно разный наклон [8]. Причина этих различий не вполне ясна. Для надежных выводов необходимы более детальные исследования и отождествления большого числа туманностей в оптическом и инфракрасном диапазонах. Необходимость расширения набора данных по пульсарным туманностям в данных диапазонах определяет актуальность темы диссертации.

Также актуальны наблюдения самих пульсаров в этих диапазонах. Их излучение носит, в основном, нетепловой характер: спектр излучения аппроксимируется кусочно-степенным законом, с различными спектральными индексами в разных диапазонах. Анализ этого излучения актуален для исследования процессов, происходящих в магнитосферах НЗ.

НЗ являются достаточно слабыми оптическими объектами и в настоящее время в оптическом и ИК диапазонах обнаружено всего лишь 25 нейтронных звёзд из ~2000 обнаруженных в других диапазонах [9]. Только 12 из них являются пульсарами, излучающими за счет энергии вращения. Долгое время единственным детально исследованным объектом в оптическом и ИК диапазонах был самый яркий пульсар, пульсар в Крабовидной туманности. Этот объект 16-ой звёздной величины наблюдался как в широкополосных фильтрах, так и в спектральном режиме. Недавно также были получены спектры пульсаров PSR B0656+14, Вела, Геминга и PSR J0437-4715. Остальные пульсары наблюдались лишь в одном или нескольких широких фильтрах, большей частью в голубой области видимого диапазона. Столь скромный наблюдательный материал (по сравнению, например, с сотней пульсаров, которые наблюдаются в рентгеновском и гамма диапазоне) не позволяет сделать определённых выводов о характере и механизмах излучения пульсаров в оптическом диапазоне. Исследования, выполненные в данной работе, вносят дополнительный вклад в эту, пока ещё мало освоенную, область и потому весьма актуальны.

Цели работы

- 1.** Поиск пульсаров и пульсарных туманностей в оптическом и инфракрасном диапазонах
- 2.** Анализ распределения энергии излучения по спектру в данных диапазонах для этих объектов
- 3.** Сравнение с данными, полученными в других диапазонах
- 4.** Сравнительное исследование структуры пульсарных туманностей в инфракрасном, оптическом и рентгеновском диапазонах

Для выполнения поставленных целей использовались данные, полученные с использованием телескопов, которые обладают максимальными угловым разрешением и чувствительностью. В частности, были заказаны и прове-

дены наблюдения на телескопах Very Large Telescope (VLT), Nordic Optical Telescope (NOT) и Hubble Space Telescope (HST).

Научная новизна

Работа основана на оригинальных впервые проведенных глубоких наблюдениях полей пульсаров на телескопах VLT, NOT, HST и на неопубликованных архивных данных инфракрасных телескопов Spitzer и AKARI и рентгеновского телескопа Chandra.

Торообразные пульсарные туманности вокруг молодых пульсаров PSR J0205+6449 и PSR J1124–5916 в остатках сверхновых ЗС 58 и SNR G292.0+1.8 соответственно, впервые обнаружены в оптическом (0.4-0.9 микрон), ближнем (1.65-2.15 микрон) и среднем (3.6-24 микрон) ИК диапазонах. Впервые измерены потоки и проанализированы распределения энергии их излучения по спектру. Перион, наблюдаемый в радио и рентгеновском диапазонах в остатке сверхновой ЗС 58, впервые обнаружен в среднем ИК диапазоне. Оценены потоки излучения пульсаров, создающих эти пульсарные туманности, в оптическом и ближнем ИК диапазонах. Впервые детально исследована структура пульсарной туманности B0540-69.3 в оптическом и рентгеновском диапазонах.

Исследования, проведенные в данной диссертации, увеличивают количество пульсарных туманностей, наблюдаемых в оптическом и ИК диапазонах, в два раза.

Достоверность результатов.

Представленные в диссертации результаты получены с использованием самых современных и апробированных методов наблюдений, обработки и анализа данных. Уровень значимости всех детектируемых объектов существенно превышает 3σ . Также достоверность обеспечена сравнением результатов, где это возможно, с результатами других авторов и с данными в других диапазонах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Отождествление компактных торообразных частей пульсарных туманностей вокруг пульсаров PSR J0205+6449 и PSR J1124–5916 в оптическом и ИК диапазонах. Обнаружение протяженной структуры, плериона, вокруг пульсара PSR J0205+6449 в среднем ИК. Оценка потоков излучения пульсаров PSR J1124–5916 и PSR J0205+6449 в оптическом и ближнем ИК диапазонах.

2. Результаты анализа многоволновых спектров отождествленных пульсарных туманностей (п.1).

3. Обнаружение яркой компактной структуры на оптических изображениях пульсарной туманности B0540–69.3 и отождествление этой структуры в рентгеновском диапазоне. Построение реалистичного многоволнового спектра этой структуры с учетом межзвездного поглощения от Галактики, Большого Магелланового Облака и родительского остатка сверхновой. Построение спектра пульсара PSR B0540–69.3 и карты спектрального индекса всей пульсарной туманности в рентгеновском диапазоне.

Научная и практическая ценность работы

Полученные наблюдательные данные пригодны для непосредственного срав-

нения с теоретическими моделями и с результатами других наблюдений. Результаты данной работы могут применяться для теоретического моделирования излучения пульсарных туманностей, а также для планирования дальнейших более детальных наблюдений исследованных объектов и поиска других туманностей в оптическом и инфракрасном диапазонах.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (ИКИ, Москва, 2006, 2009, 2010), Physics of Neutron Stars – 2007 (С.-Петербург, 2007), MODE-SNR-PWN Workshop (Bordeaux, 2010), CompStar School and Workshop (Catania, 2011), Physics of Neutron Stars – 2011 (С.-Петербург, 2011); ФизикА.СПб (С.-Петербург, 2011), на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Основное содержание диссертации опубликовано в четырех работах в реферируемых научных журналах и в материалах конференций, перечисленных выше и в конце автореферата.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержит 123 страницы текста, в том числе 45 рисунков и 26 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 143 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** дан краткий обзор состояния исследования пульсаров и пульсарных туманностей в оптическом и инфракрасном диапазонах на момент начала данной работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научная новизна работы, достоверность результатов, практическая значимость и основные результаты, выносимые на защиту.

В **Главе 1** освещены методические вопросы наблюдений пульсаров и пульсарных туманностей. Описаны характеристики использовавшихся в работе телескопов и инструментов. Наблюдения проводились по нашим заявкам на телескопах NOT (Nordic Optical Telescope, 2.4 м), VLT (Very Large Telescope, 8.2 м) и HST (Hubble Space Telescope, 2.4 м) в оптических $UBVRI$ и ближнеинфракрасных NK_s широкополосных фильтрах. Использовались данные в среднем ИК из архивов космических телескопов Spitzer и AKARI. Использовались рентгеновские данные из архива космического телескопа Chandra. Описаны методы редукции наблюдательных данных, особенности фотометрии слабых объектов, абсолютной и относительной астрометрии.

Глава 2 посвящена исследованию пульсарной туманности вокруг пульсара PSR J0205+6449 в остатке сверхновой ЗС 58 в оптическом и инфракрасном диапазонах. Результаты этого исследования опубликованы в работах [1А, 5А, 8А]. В разделе 2.1 освещены предыдущие исследования этого объекта в разных диапазонах длин волн. Пульсар имеет период $P = 65.68$

миллисекунд [10], производную периода $\dot{P} = 1.93 \times 10^{-13}$, характеристический возраст $\tau = P/2\dot{P} \approx 5400$ лет, скорость потери энергии вращения $\dot{E} = 2.7 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} ; расстояние до него оценивается в 3.2 кпс. В разделе 2.2 описаны оригинальные наблюдения пульсарной туманности на телескопе NOT, выполненные в 2006 году, в оптических широкополосных фильтрах BV , архивные инфракрасные и рентгеновские наблюдательные данные орбитальных телескопов Spitzer и Chandra, соответственно, и анализ данных. В §2.2.1 описана обработка данных, включая первичную редукцию, фотометрическую калибровку и астрометрическую привязку. В §2.2.2 представлены результаты анализа наблюдений. Торообразная часть пульсарной туманности 3C 58, видимая с ребра и обнаруженная ранее в рентгеновском диапазоне [11], впервые идентифицирована по положению (с точностью совпадения $0''.2$) и морфологии в оптическом и инфракрасном диапазонах. Измерены потоки излучения и проанализирован рентгеновский спектр этого объекта. Наблюдаемые потоки излучения равны $0.95_{-0.06}^{+0.07} \mu\text{Jy}$, $2.04_{-0.09}^{+1.10} \mu\text{Jy}$, $138.0_{-43}^{+61.5} \mu\text{Jy}$, $144.5_{-44}^{+55} \mu\text{Jy}$, $218.8_{-49}^{+63} \mu\text{Jy}$, $263_{-50}^{+60} \mu\text{Jy}$ для оптических B (0.44 микрон) и V (0.53 микрон) фильтров и для средне-ИК фильтров с эффективными длинами волн в 3.6, 4.5, 5.6 и 8 микрон, соответственно. Рентгеновский спектр описывается степенным законом со спектральным индексом $\alpha_\nu = 0.88 \pm 0.08$ и нормировочной константой $C = (4.39 \pm 0.17) \times 10^{-4}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{КэВ}^{-1}$. Построен многоволновой спектр торообразной части пульсарной туманности. Установлены верхние пределы на поток излучения пульсара PSR J0205+6449 в оптическом диапазоне. Верхние пределы равны $0.1 \mu\text{Jy}$ и $0.21 \mu\text{Jy}$ для B и V фильтров, соответственно. В разделе 2.3 описаны последующие оригинальные наблюдения пульсарной туманности на телескопе NOT, выполненные в 2007 и 2008 годах, в оптических UI и ближне-инфракрасных HK_s широкополосных фильтрах, и описаны архивные данные инфракрасного космического телескопа AKARI. В §2.3.1 описана обработка данных, включая первичную редукцию данных, фотометрическую калибровку и астрометрическую привязку. В подразделах 2.3.2–2.3.4 представлены результаты анализа наблюдений. В §2.3.2 показано, что торообразная структура пульсарной туманности идентифицируется и на этих данных. Построено исправленное на межзвездное поглощение распределение энергии по спектру для торообразной структуры от рентгеновского до среднего ИК диапазонов (24 микрон–10 КэВ). Поглощение $A_V = 1.9$ определено по спектральным наблюдениям остатка сверхновой [12].

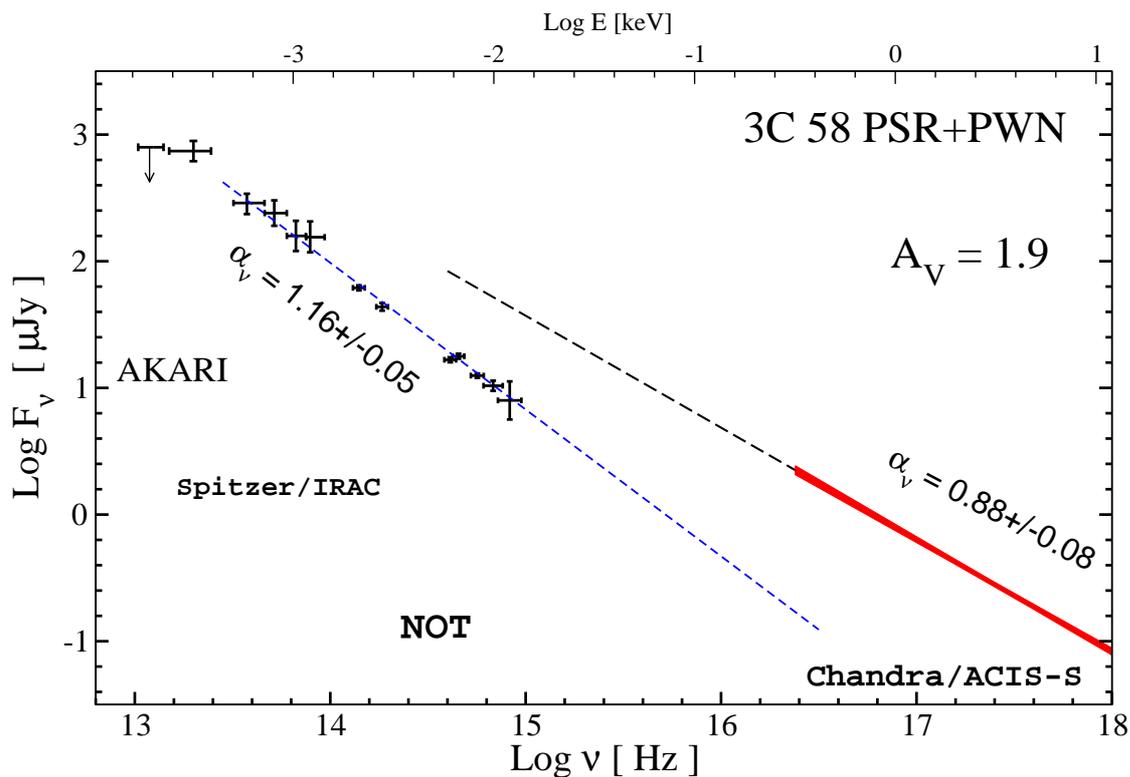


Рис. 1: Исправленный на межзвездное поглощение многоволновой спектр торообразной части пульсарной туманности 3C 58, составленный из данных, полученных на различных телескопах, названия которых отмечены на рисунке. Пунктирные линии соответствуют аппроксимациям данных степенными законами, индексы, α_ν , которых указаны на рисунке.

Спектр представлен на Рис.1. Красным показан рентгеновский спектр, который описывается степенным законом со спектральным индексом $\alpha_\nu = 0.88 \pm 0.08$ ($F_\nu \sim \nu^{-\alpha_\nu}$), черными точками показаны потоки излучения в оптическом и ИК диапазонах. Черной штриховой линией показана экстраполяция рентгеновского спектра в оптическую область (на меньшие частоты). Синий штриховой линией показана аппроксимация оптического/ИК спектра степенным законом со спектральным индексом $\alpha_\nu = 1.16 \pm 0.05$. Видно, что спектр не описывается единым степенным законом во всем диапазоне частот, а имеет значительно более крутой наклон в оптическом и инфракрасном диапазонах, по сравнению с рентгеном. Это подразумевает двойной излом в спектре между оптическим и рентгеновским диапазонами. Также наблюдается излом спектра в области 20 микрон ($\text{Log } \nu [\text{Гц}] \sim 13.15$). Такие же изломы наблюдаются в излучении пульсарной туманности, находящийся в остатке сверхновой V0540–69.3 [8]. Однако двойной излом не проявляется в Крабовидной туманности, спектр которой содержит только один излом между оптическим и рентгеновским диапазонами. Нетривиальный характер распределения энергии излучения по спектру говорит о сложном, не описываемом единым степенным законом, как предполагалось ранее, спектре частиц, инжектированных в туманность и ответственных за её излучение.

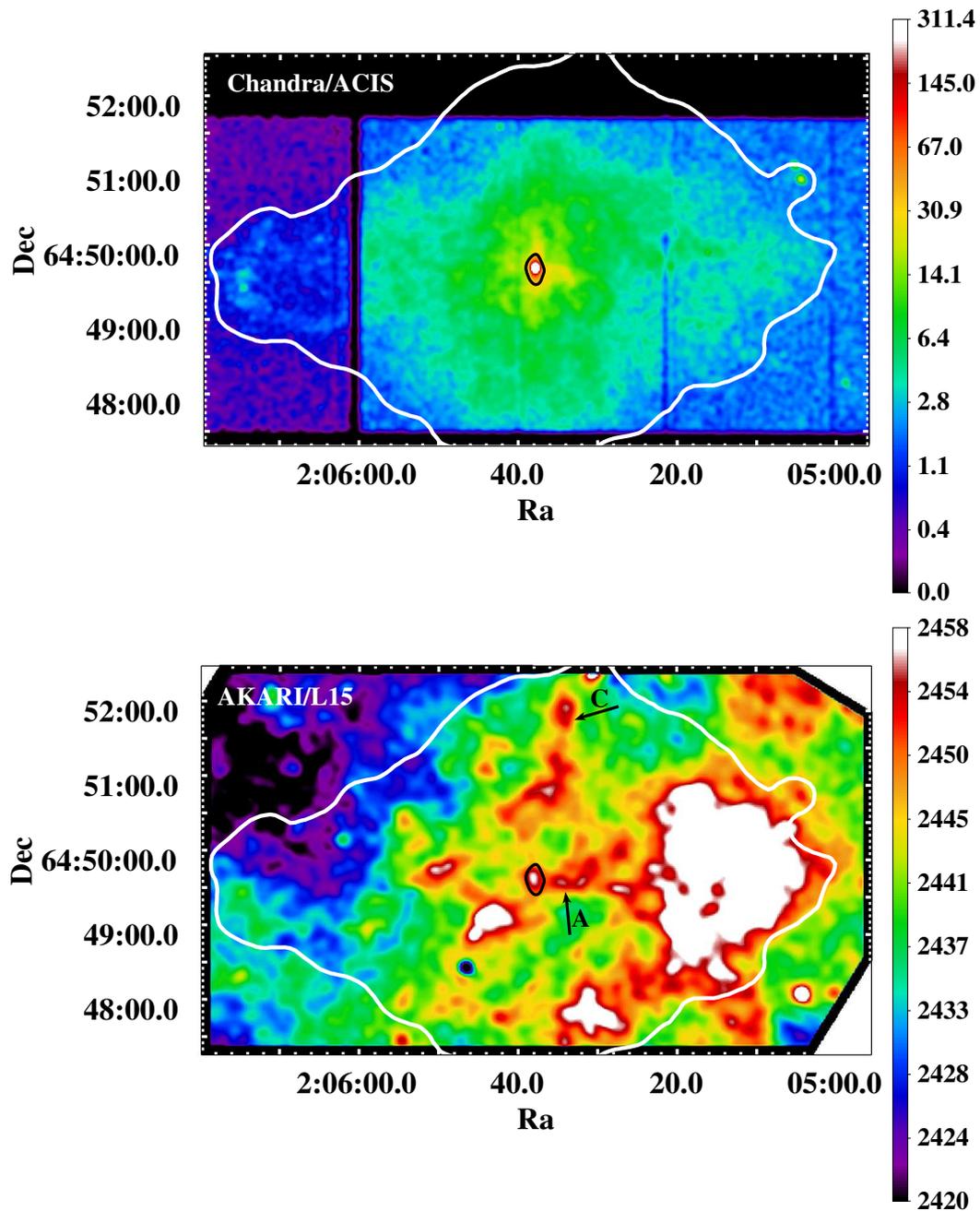


Рис. 2: Рентгеновское (вверху) и инфракрасное (внизу) изображения пульсарной туманности в остатке сверхновой 3С 58, полученные на инструментах Chandra/ACIS и AKARI/IRC в диапазонах (0.2 - 10 КэВ) и 15 микрон, соответственно. Внешний белый контур соответствует границе пульсарной туманности (плериона). Внутренний черный контур в центре изображений выявляет торообразную структуру, видимую с ребра, в центре туманности.

В §2.3.3 показано, что излучение протяженной структуры, так называемого плериона, наблюдаемого в рентгеновском и радио диапазонах вокруг торообразной структуры, обнаруживается также в среднем ИК диапазоне (7–24 микрон) (Рис.2). Измерены потоки излучения: $0.14 \pm 0.03 \text{ } Jy$, $0.13 \pm 0.05 \text{ } Jy$ и $0.4 \pm 0.1 \text{ } Jy$ для средне-ИК фильтров с эффективными длинами волн 11, 15 и 24 микрон, соответственно. Построен многоволновой спектр плериона с использованием ранее опубликованных радио и рентгеновского спектров. Показано, что спектр плериона описывается одним степенным законом от

ИК до рентгена, что говорит о единой синхротронной природе излучения в этих диапазонах (Рис. 3,верху) и об отсутствии тепловой компоненты от остатка сверхновой, которая наблюдается и является доминирующей над синхротронным излучением в среднем-ИК в других остатках сверхновых. В §2.3.4 делается вывод о возможном детектировании пульсара PSR J0205+6449 в ближнем ИК в фильтре K_s . Оценён его поток излучения в этой полосе, который равен $2.03_{-0.38}^{+0.44} \mu\text{Jy}$. Отношение найденного потока излучения к рентгеновскому составляет 460_{-90}^{+110} , что согласуется с эмпирическим соотношением указанных потоков для пульсаров Краб, Вела, В1509–58 и Геминга [13] ($\sim 600 - 1000$). Это позволяет утверждать, что ИК детектирование пульсара PSR J0205+6449 является правдоподобным. С учетом этого построен многоволновой спектр пульсара PSR J0205+6449 (Рис. 3) с использованием его рентгеновского спектра из работы [7] и измеренных нами верхних пределов в фильтрах BV . Показано, что спектр пульсара, скорее всего, также имеет двойной излом между оптическим и рентгеновским диапазонами, как и в случае торообразной части его туманности (и в случае пульсара В0540–69.3). Опровергается возможное обнаружение пульсара PSR J0205+6449 в оптической R полосе, заявленное в работе [14]. В разделе 2.4 кратко суммируются основные результаты Главы 2.

Глава 3 посвящена исследованию пульсарной туманности вокруг пульсара PSR J1124–5916 в остатке сверхновой SNR G292.0+1.8 в оптическом и инфракрасном диапазонах. Результаты этого исследования опубликованы в работах [2А, 3А, 5А, 7А, 8А]. В разделе 3.1 освещены предыдущие исследования этого объекта в разных диапазонах длин волн. Период пульсара, $P = 135$ миллисекунд, и производная периода $\dot{P} = 7.4 \times 10^{-13}$, дают характеристиче-

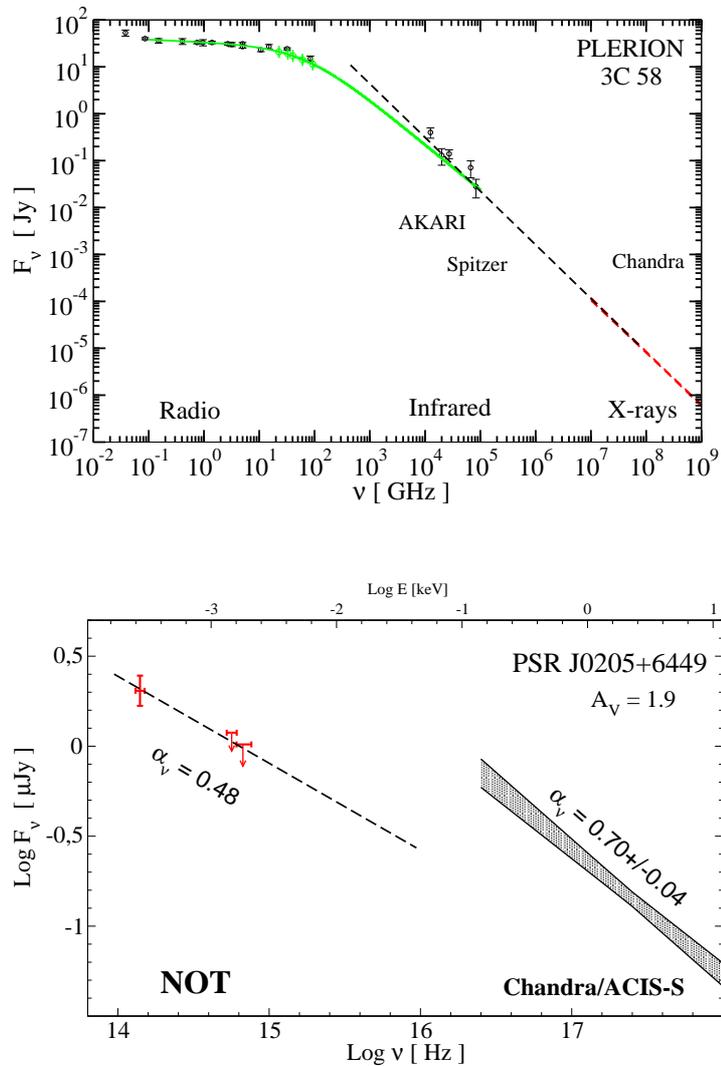


Рис. 3: Исправленные на межзвездное поглощение многоволновые спектры плериона 3С 58 (сверху) и пульсара PSR J0205+6449 (снизу)

ский возраст $\tau \approx 2900$ лет, согласующийся с возрастом остатка сверхновой 2700–3700 лет, найденного по скорости разлета и размерам остатка [17, 18]. Скорость потери энергии вращения равна $\dot{E} = 1.2 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} . Расстояние до него ≈ 6 кпс. В разделе 3.2 описаны оригинальные наблюдения пульсарной туманности, связанной с пульсаром PSR J1124–5916, на телескопе VLT в оптических широкополосных фильтрах *VRI* и архивные наблюдательные данные Chandra. В §3.2.1 описана обработка данных, включая первичную редукцию данных, фотометрическую калибровку и астрометрическую привязку. В §3.2.2 представлены результаты анализа наблюдений. Видимая с ребра торообразная пульсарная туманность вокруг пульсара PSR J1124–5916, обнаруженная ранее в рентгеновском диапазоне [15], впервые идентифицирована по положению и морфологии в оптическом диапазоне. Измерены оптические потоки излучения и проанализирован рентгеновский спектр этого объекта. Наблюдаемые потоки излучения равны $0.692_{-0.075}^{+0.084} \mu\text{Jy}$, $0.676_{-0.073}^{+0.083} \mu\text{Jy}$, $1.35_{-0.15}^{+0.16} \mu\text{Jy}$ для оптических *V*, *R* и *I* фильтров, соответственно. Рентгеновский спектр описывается степенным законом со спектральным индексом $\alpha_\nu = 0.85 \pm 0.02$ и нормировочной константой $C = (1.38 \pm 0.08) \times 10^{-4}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{КэВ}^{-1}$. Установлены верхние пределы на поток излучения пульсара PSR J1124–5916 и построен его ориентировочный многоволновой спектр, исправленный на межзвёздное поглощение, который представлен на Рис. 4 (внизу), с использованием оптических верхних пределов и рентгеновского спектра из работы [16]. Чтобы отождествить этот пульсар в оптическом диапазоне необходимы дальнейшие наблюдения с высоким пространственным разрешением и более длительной экспозицией. В §3.2.3 обсуждаются предварительные результаты. В разделе 3.3 подтверждается обнаружение пульсарной туманности в оптическом диапазоне за счет анализа архивных данных инфракрасного орбитального телескопа Spitzer в широких каналах с эффективными длинами волн 4.5, 8, 24 и 70 микрон. Торообразная пульсарная туманность вокруг пульсара PSR J1124–5916 обнаруживается в каналах 4.5 и 8 микрон. Источник не обнаружен в 24 и 70 микронах, в которых доминирует яркое излучение от оболочки и филаментов остатка сверхновой. Построен исправленный на поглощение $A_V = 1.86 - 2.10$, определенное по спектральным наблюдениям [19], многоволновой спектр пульсарной туманности от инфракрасного до рентгеновского диапазонов. Спектр представлен на Рис. 4 (вверху). Красным показан рентгеновский спектр, описывающийся степенным законом со спектральным индексом $\alpha_\nu = 0.85 \pm 0.02$, желтым показана аппроксимация оптического/ИК спектра степенным законом со спектральным индексом $\alpha_\nu = 1.48 \pm 0.16$. Видно, что характер спектра этого объекта подобен спектрам туманностей в остатках сверхновых 3C 58 (Глава 2) и B0540–69.3 [8]. Также наблюдаются двойной излом между оптическим/ИК и рентгеновским диапазонами и излом на ≈ 20 микрон ($\text{Log } \nu [\text{Гц}] \sim 13.15$). В разделе 3.4 дано заключение к Главе 3.

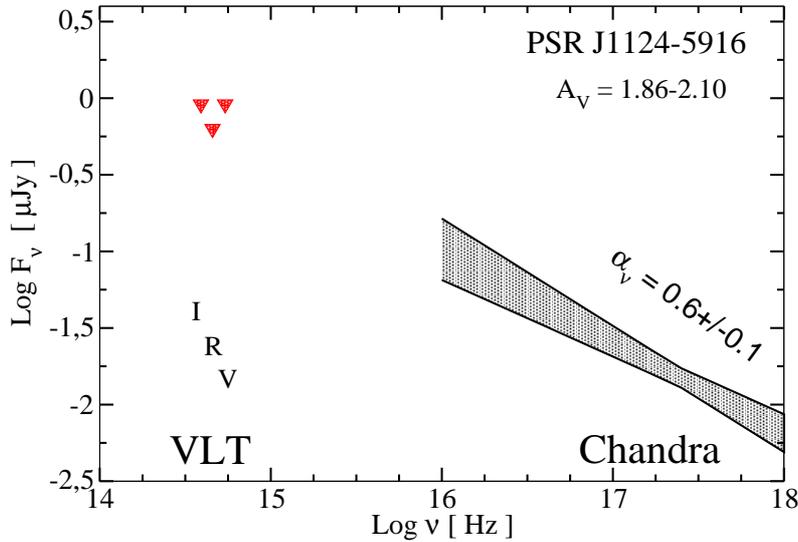
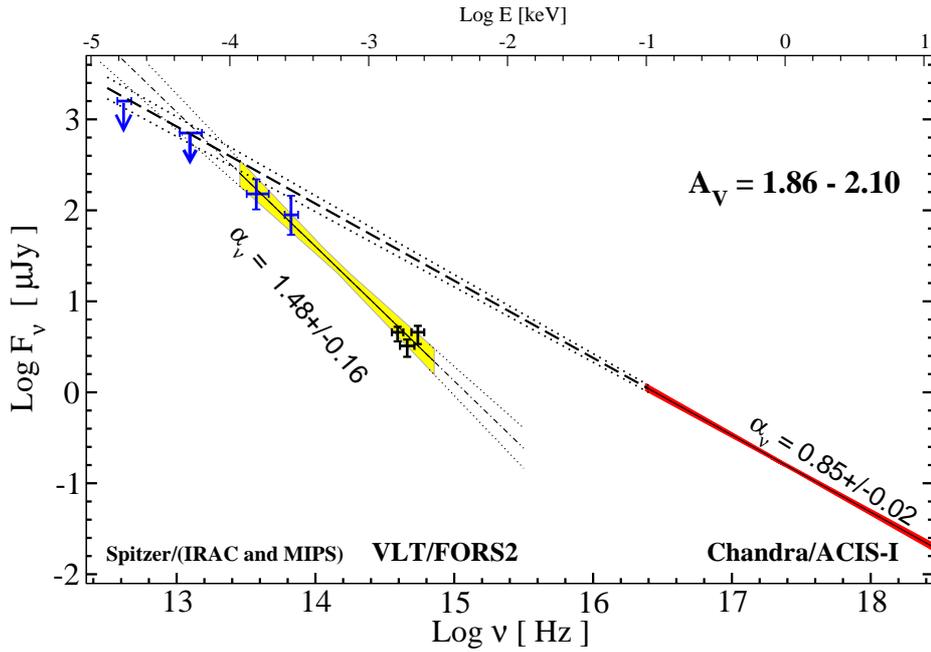


Рис. 4: Вверху: Многоволновой спектр пульсарной туманности вокруг пульсар PSR J1124–5916. Внизу: многоволновой спектр пульсара PSR J1124–5916, красными треугольниками обозначены верхние пределы на поток излучения пульсара

Глава 4 посвящена детальному исследованию в оптическом и рентгеновском диапазонах структуры торообразной туманности пульсара PSR B0540-69.3, связанного с одноименным остатком сверхновой в БМО. Результаты этого исследования опубликованы в работе [4A, 6A]. В разделе 4.1 освещена история предыдущих исследований этого объекта в разных диапазонах длин волн. Пульсар имеет период 50.2 миллисекунд [20], характеристический воз-

раст $\tau = P/2\dot{P} \approx 1660$ лет, скорость потери энергии вращения $\dot{E} = 1.5 \times 10^{38}$ эрг с^{-1} ; расстояние до него оценивается в 50 кпс. В разделе 4.2 описаны оригинальные оптические наблюдения пульсарной туманности на телескопе HST, а также архивные рентгеновские данные телескопа Chandra, и анализ данных.

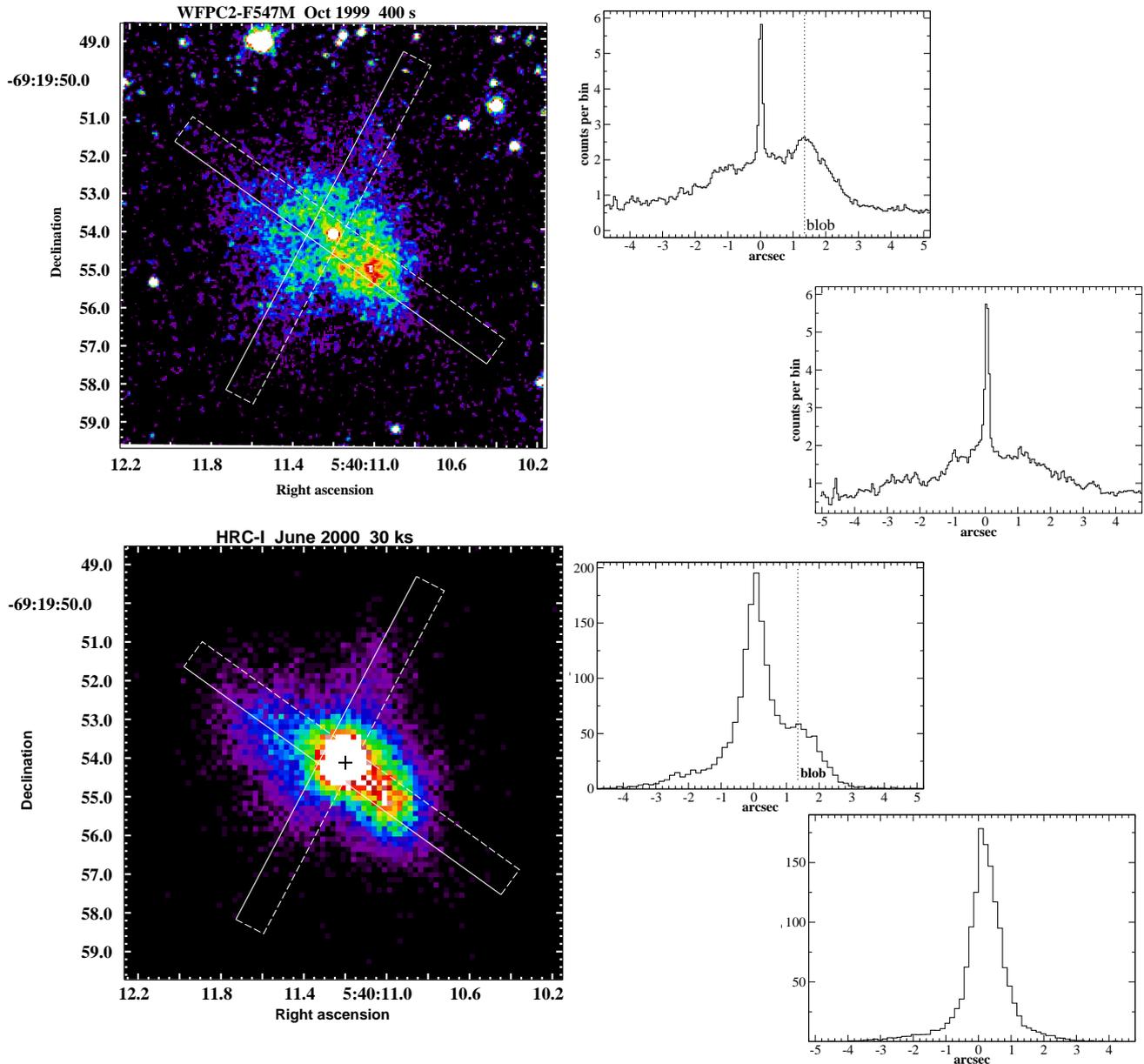


Рис. 5: $11'' \times 11''$ оптическое изображение пульсарной туманности B0540-69.3 (слева сверху), полученное в 1999 году на приборе HST/WFPC2 в фильтре F547M ($\lambda = 5400 \text{ \AA}$), и соответствующее рентгеновское изображение (слева внизу), полученное в 2000 году на приборе Chandra/HRC в диапазоне 0.2-10 КэВ. Белыми линиями помечены два разреза с размерами $0''.8 \times 10''$ вдоль главной и поперечной осей туманности, для которых построены одномерные профили яркости (средние и правые панели, соответственно). На всех профилях главный пик соответствует положению пульсара. Положение яркой компактной структуры ("blob") туманности, видимой на юго-западе от пульсара, указано вертикальной прямой на средних панелях.

В разделе 4.3 представлены результаты прямых и поляризационных наблюдений пульсара PSR B0540-69.3 и его туманности в оптическом диапазоне. Изображения с высоким пространственным разрешением получены

с помощью космического телескопа HST. Эти изображения сопоставлены с рентгеновскими данными, полученными обсерваторией Chandra. В §4.3.1 описана оптическая фотометрия отдельных частей пульсарной туманности. В частности, изучена яркая компактная область к юго-западу от пульсара, где в 1999 году наблюдался яркий сгусток излучения, который, как было отмечено в недавней работе [21], по-видимому, удаляется от пульсара с высокой скоростью $\sim 0.04c$, где c скорость света. В §4.3.2 построена поляризационная карта излучения пульсарной туманности в оптическом диапазоне. В §4.3.3 проведено отождествление яркого сгустка в рентгеновском диапазоне. На Рис. 5 представлены изображения пульсарной туманности в оптическом (сверху слева) и рентгеновском (снизу слева) диапазонах, полученные в сентябре 1999 года на HST в фильтре F547M ($\lambda = 5470 \text{ \AA}$) и в июне 2000 года на Chandra на приборе HRC (High Resolution Camera) в диапазоне 0.2 - 10 КэВ. Яркая компактная структура хорошо идентифицируется на одномерных профилях интенсивности (средние панели), её положение указано вертикальной прямой.

В §4.3.4 произведена рентгеновская спектроскопия отдельных частей пульсарной туманности с учетом поглощения на луче зрения совместно от Галактики, Большого Магелланового Облака и родительского остатка сверхновой.

Рентгеновский спектр

описывается наилучшим образом, если предположить наличие на луче зрения дополнительного кислорода, помимо кислорода межзвездного газа в БМО и Млечном Пути. Этот дополнительный кислород связан с богатым кислородом остатком сверхновой. Взяв необходимое количество дополнительного кислорода, получаем массу предсверхновой в диапазоне 20–25 M_{\odot} , что соответствует верхнему диапазону масс прародителя сверхновой типа IIp и согласуется со спектральными наблюдениями остатка сверхновой в оптическом и рентгеновском диапазонах.

С учетом этого найден фотонный индекс спектра пульсара ($\Gamma = 1.74 \pm 0.01$) и колонковая плотность вещества N_H^{SNR} в родительском остатке сверхновой.

С учетом этого найден фотонный индекс спектра пульсара ($\Gamma = 1.74 \pm 0.01$) и колонковая плотность вещества N_H^{SNR} в родительском остатке сверхновой.

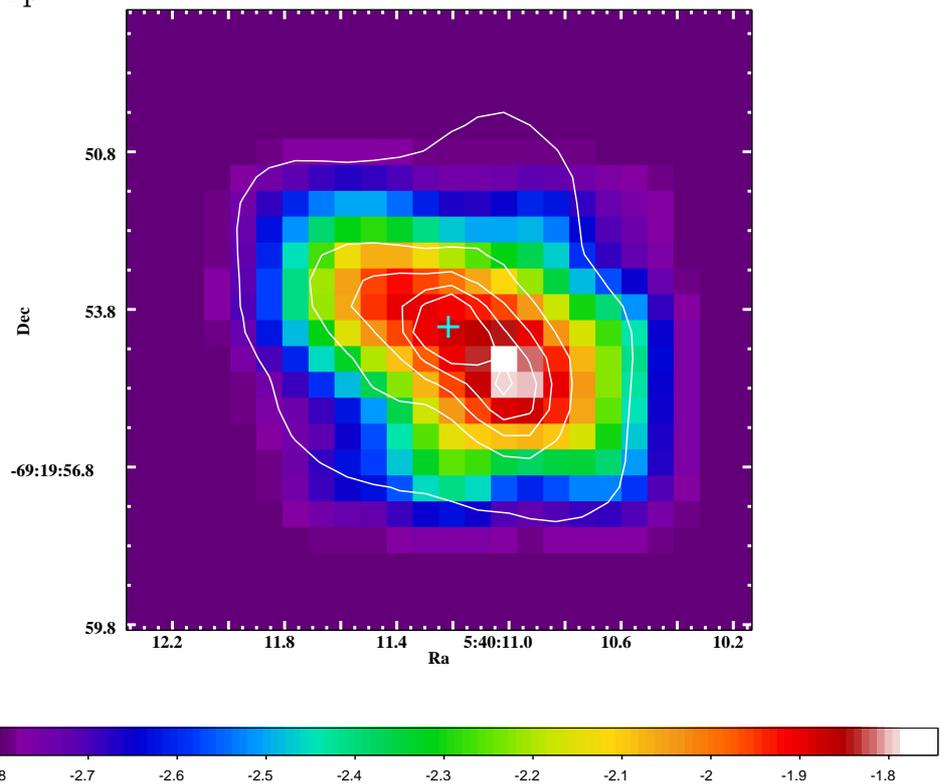


Рис. 6: Сглаженная карта фотонного индекса пульсарной туманности V0540-69.3 (значение индекса указано цветом). Контуры соответствуют уровням интенсивности рентгеновского излучения туманности. "+" обозначено положение пульсара.

Построена карта рентгеновского фотонного индекса туманности (Рис. 6), показывающая укрупнение спектра излучения при удалении от пульсара. Яркая структура хорошо выделяется на этой карте и характеризуется максимально жестким спектром по сравнению со всей туманностью и пульсаром. В §4.3.5 построен многоволновой спектр этой структуры от оптического до рентгеновского диапазона (Рис.7, сверху).

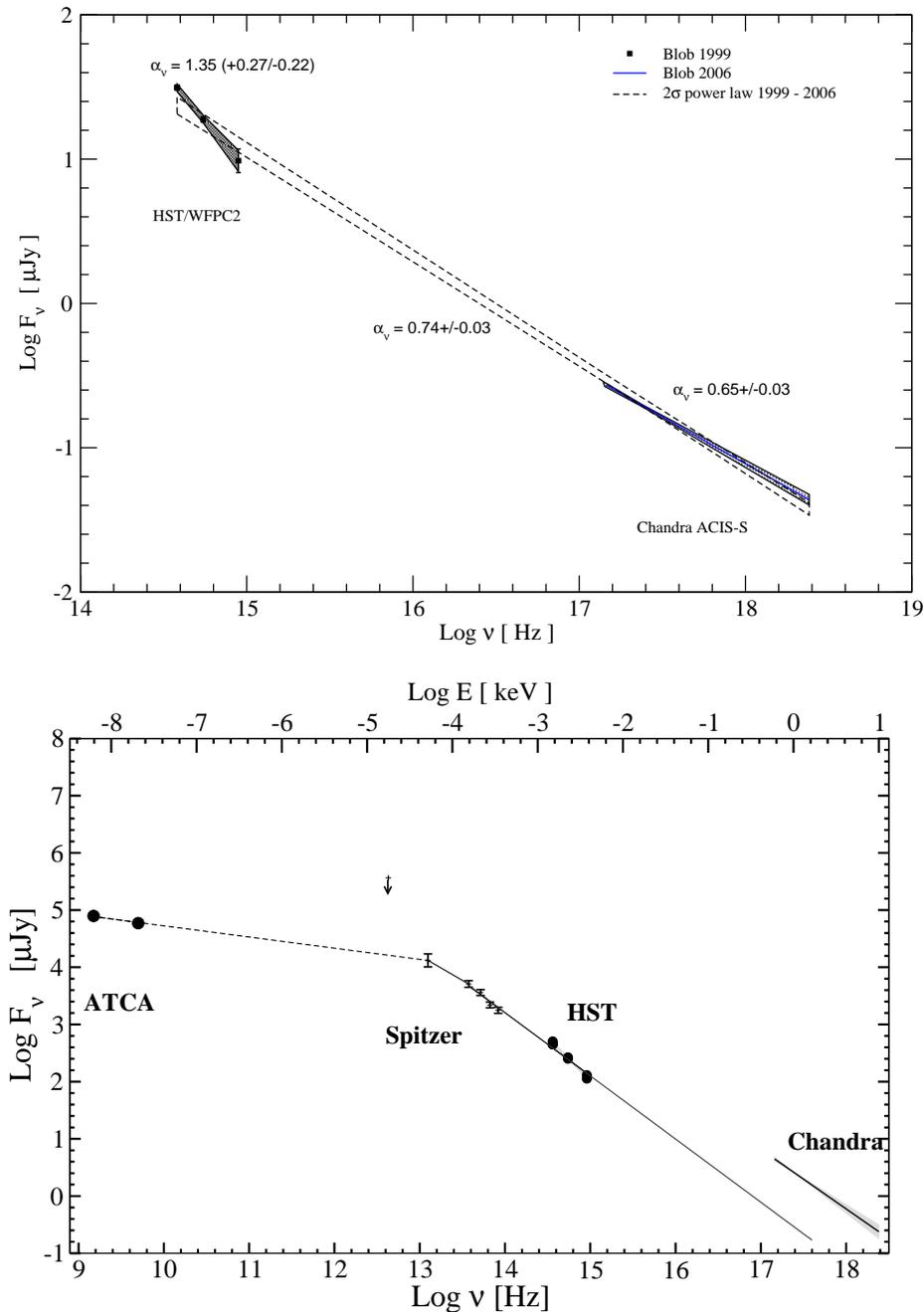


Рис. 7: Вверху: Многоволновой спектр яркой компактной части пульсарной туманности B0540-69.3 по данным в оптическом и рентгеновском диапазонах. Внизу: Многоволновой спектр пульсарной туманности B0540-69.3, составленный из радио, ИК, оптического и рентгеновского потоков.

Показано, что оптический и рентгеновский спектральные индексы сильно отличаются и равны $\alpha_\nu^O = 1.35 \pm 0.25$ и $\alpha_\nu^X = 0.65 \pm 0.04$, соответственно. Вме-

сте с тем, в среднем, плотность оптического потока на уровне 2σ сопоставима с экстраполяцией рентгеновского спектра в области низких частот. Отметим, что спектр всей туманности в оптическом/ИК и рентгеновском диапазонах также нельзя описать единым степенным законом (Рис. 7, внизу).

В разделе 4.4 суммируются результаты по Главе 4.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Обнаружена торообразная часть пульсарной туманности вокруг пульсара PSR J0205+6449 в остатке сверхновой 3C 58 в оптическом и инфракрасном диапазонах.

2. Обнаружен плерион в остатке сверхновой 3C 58 в среднем ИК. Показано, что спектр плериона описывается одним степенным законом от ИК до рентгена, что говорит о единой синхротронной природе излучения в этих диапазонах (Рис. 3, вверху) и об отсутствии тепловой компоненты от остатка сверхновой, которая доминирует над синхротронным излучением в среднем-ИК в других остатках сверхновых.

3. Получены данные, свидетельствующие о возможном детектировании пульсара PSR J0205+6449 в ближнем ИК. Установлены верхние пределы на поток его излучения в оптическом диапазоне.

4. Обнаружена пульсарная туманность вокруг пульсара PSR J1124–5916 в оптическом и инфракрасном диапазонах.

5. Установлены верхние пределы на потоки излучения пульсара PSR J1124–5916 в оптическом диапазоне.

6. Показано, что многоволновые спектры обеих торообразных пульсарных туманностей описываются степенными законами со значительно более крутыми наклонами в оптическом и инфракрасном диапазонах, чем в рентгене (Рис. 1, 4). Это подразумевает двойной излом в спектре между оптическим и рентгеновским диапазонами. Наблюдается также излом спектра в области 20 микрон для обоих объектов. Такие же изломы наблюдаются и в излучении пульсарной туманности, находящейся в остатке сверхновой B0540–69.3 (Рис. 7, внизу), но не проявляются в Крабовидной Туманности, чей спектр содержит только один излом между оптическим и рентгеновским диапазонами. Двойной излом говорит о сложном, не описываемом единым степенным законом, спектре частиц, инжектированных в туманность и ответственных за ее излучение.

7. Детально исследована структура пульсарной туманности B0540–69.3 в оптическом и рентгеновском диапазонах. Обнаружена яркая компактная структура на оптических изображениях пульсарной туманности B0540–69.3. Она отождествлена в рентгеновском диапазоне. Построен реалистичный многоволновой спектр этой структуры с учетом модели межзвездного поглощения, которая учитывает разные составляющие поглощения на луче зрения. С учетом этого получен также спектр пульсара PSR B0540–69.3 и построена карта спектрального индекса всей пульсарной туманности в рентгеновском диапазоне, из которой видно, что обнаруженная яркая компактная структура имеет максимально жесткий спектр по сравнению с остальными частями туманности.

8. Полученные результаты удваивают число пульсарных туманностей, отождествленных в оптическом и инфракрасном диапазонах. Наличие двойного

излома между оптическим и рентгеновским диапазонами в спектрах 3-х из 4-х отождествленных туманностей делают эту особенность достаточно распространенной, что необходимо учитывать при построении теоретических моделей данных объектов.

Публикации по теме диссертации

- [1A] Shibanov Yu. A., Lundqvist N., Lundqvist P., Sollerman J., Zyuzin D., 2008, *Astronomy and Astrophysics*, v. 486, pp. 273–282
- [2A] Zharikov S. V., Shibanov Yu. A., Zyuzin D. A., Mennickent R. E., Komarova V. N., 2008, *Astronomy and Astrophysics*, v. 492, pp. 805–814
- [3A] Zyuzin D. A., Danilenko A. A., Zharikov S. V., Shibanov Yu. A., 2009, *Astronomy and Astrophysics*, v. 508, pp. 855–858
- [4A] Lundqvist N., Lundqvist P., Björnsson C.-I., Olofsson G., Pires S., Shibanov Yu. A., Zyuzin D. A., 2011, *MNRAS*, v. 413, pp. 611–627
- [5A] Зюзин Д.А., Ю.А. Шибанов, С.В. Жариков, А.А. Даниленко, П. Люндквист, Е. Соллерман, Тезисы конференции Физика.СПб по физике и астрономии, 2011, стр. 24
- [6A] Д.А. Зюзин, Ю.А. Шибанов, *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2006*, Программа и тезисы, Москва, ИКИ РАН, 2006, стр. 10
- [7A] Д.А. Зюзин, Ю.А. Шибанов, Даниленко А.А., Жариков С.В., Комарова В.Н., Mennickent R.E., *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2009*, Программа и тезисы, Москва, ИКИ РАН, 2009, стр. 22
- [8A] Д.А. Зюзин, Ю.А. Шибанов, Жариков С.В., Даниленко А.А., Комарова В.Н., Lundqvist N., Lundqvist P., Sollerman J., Mennickent R.E., *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2010*, Программа и тезисы, Москва, ИКИ РАН, 2010, стр. 18

Список литературы

- [1] Hester, J. J., *ARAA*. – 2005. – Vol. 46. – pp. 127 – 155
- [2] Tavani, M. et al., 2011, *Science*, 331, 736
- [3] Abdo, A. et al., 2011, *Science*, 331, 739
- [4] Striani, E., Tavani, M., Piano, G, et al., 2011, *ApJ*, 741, 5
- [5] Slane, P., *High-Energy Emission from Pulsars and their Systems*, *Astrophysics and Space Science Proceedings*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, p. 373
- [6] Slane, P., *HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: Proceedings of the 4th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy*. AIP Conference Proceedings, vol. 1085, pp. 120-128 (2008)
- [7] Kargaltsev, O. & Pavlov, G. G.; *40 YEARS OF PULSARS: Millisecond Pulsars, Magnetars and More*. AIP Conference Proceedings, Volume 983, pp. 171-185 (2008).

- [8] Serafimovich, N. I.; Shibarov, Yu. A.; Lundqvist, P.; Sollerman, J. 2004, *A&A*, 425, pp. 1041-1060
- [9] Mignani, R.P., 2011, *AdSpR*, 47, 1281M
- [10] Murray, S., Slane, P.O., Seward, F.D., et al. 2002, *ApJ*, 568, 226
- [11] Slane, P., Helfand, D., van der Swaluw, E. & Murray, S., 2004, *ApJ*, 616, 403
- [12] Fesen, R., Rudie, G., Hurford, A., & Soto, A. 2008, *ApJS*, 174, 379
- [13] Kaplan, D. & Moon D.-S., 2006, *ApJ*, 644, 1056
- [14] Shearer, A. & Neustroev, V. V., 2008, *MNRAS*, 390, 235
- [15] Hughes, J. P., Slane, P. O., Burrows, D. N., Garmire, G., 2001, *ApJ*, L153
- [16] J. P. Hughes, P. O. Slane, D. N. Burrows, et al., 2001, *ApJL* 559, pp. 153–156
- [17] Camilo, F., Manchester, R. N., Gaensler, B. M., et al. 2002, *ApJ*, 567, L71
- [18] Chevalier, R. 2005, *ApJ*, 619, 839
- [19] Winkler, P.F., & Long, K.S 2006, *AJ*, 132, 360
- [20] Seward, F. D.; Harnden, F. R., Jr.; Helfand, D. J., 1984, *ApJ*, 287L, 19S
- [21] De Luca, A., Mignani, R. P., Caraveo, P. A. & Bignami, G. F., 2007, *ApJ*, 667, 77