

На правах рукописи

Даниленко Андрей Андреевич

Нейтронные звезды в оптическом
и инфракрасном диапазонах

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
Шибанов Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Гнедин Юрий Николаевич
(Главная астрономическая
обсерватория РАН,
заместитель директора)
доктор физико-математических наук,
профессор Малов Игорь Федорович
(Пушчинская радиоастрономическая
обсерватория АКЦ ФИАН,
главный научный сотрудник)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Защита состоится «28» февраля 2013 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан «28» января 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук _____ Красильщиков А. М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Нейтронные звезды (НЗ) – слабые оптические объекты, как правило слабее 23 звездной величины. К настоящему моменту, в оптическом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах обнаружено всего 25 нейтронных звёзд. Для сравнения, около 2000 НЗ обнаружено в радио диапазоне, около двух сотен в рентгеновском, и около сотни в γ -лучах. Наиболее детально изучен пульсар в Крабовидной туманности, самый яркий пульсар со звездной величиной $m_V = 16.6$. Также неплохо изучены в оптическом и ближнем ИК диапазонах пульсары V0656+14, J0437–471, V0540–69.3, V0833–45 (пульсар в созвездии Парусов или Вела) и J0633+1746 (Геминга). Еще меньше мы знаем об излучении пульсаров в среднем ИК (диапазоне обсерватории *Spitzer*). В этом диапазоне до сих пор был обнаружен только пульсар в Крабовидной туманности [1], а также два аномальных рентгеновских пульсара (АРП), 4U 0142+61 [2] и 1E 2259+586 [3]. Оба АРП демонстрируют избыток ИК излучения по сравнению с оптическим, в то время как спектр пульсара в Крабовидной туманности хорошо следует единому степенному закону от ультрафиолетового (УФ) до среднего ИК диапазона.

В итоге, имеющиеся данные пока не позволяют сделать определенные выводы о механизме излучения пульсаров в оптическом и ИК диапазонах. Поэтому получение новых данных об излучении НЗ в этих диапазонах весьма актуально.

Движущиеся со сверхзвуковыми скоростями НЗ идентифицируются в оптическом диапазоне также по $H\alpha$ -туманностям типа головной ударной волны. Всего обнаружено семь таких туманностей. Прогресс в понимании этих объектов важен как с точки зрения возможности исследовать параметры пульсаров и окружающей их межзвездной среды, так и с точки зрения изучения физики бесстолкновительных ударных волн, что является одной из центральных задач астрофизики. При том что спектроскопические наблюдения представляются наиболее перспективными для изучения $H\alpha$ -туманностей, до сих пор такие наблюдения были проведены всего для трех туманностей. Таким образом, спектроскопия $H\alpha$ -туманностей вокруг пульсаров также очень актуальна.

Цели работы. Поиск и идентификация пульсаров в оптическом и инфракрасном диапазонах. Анализ распределения энергии их излучения по спектру в данных диапазонах и сравнение с данными, полученными в других диапазонах. Исследование взаимодействия быстро движущихся НЗ с межзвездной средой посредством спектроскопии $H\alpha$ -туманностей вокруг таких НЗ. Оценка скоростей таких НЗ и расстояний до них. Для выполнения поставленных целей использовались данные, полученные с помощью телескопов, которые обладают максимальными угловым разрешением и чувствительностью. В частности, были проведены наблюдения на телескопах Very Large Telescope (VLT), Telescopio Nazionale Galileo (TNG) и Большом Телескопе Азимутальном РАН (БТА). Также использовались данные из архивов орбитальных обсерваторий *Spitzer*, *Chandra*, *XMM-Newton* и наземных телескопов СТЮ и KPNO.

Научная новизна. Впервые: (1) проведено отождествление пульсаров Вела и Геминга в среднем ИК диапазоне; (2) обнаружен оптический источник, кандидат в оптический двойник пульсара J1357–6429; (3) установлены глубокие

верхние пределы на оптические потоки пульсара J1048–5832; (4) обнаружена линия $H\gamma$ и исследован профиль линии $H\alpha$ излучения туманности Гитара.

Достоверность результатов. Представленные в диссертации результаты получены с использованием самых современных и апробированных методов наблюдений, обработки и анализа данных. Также достоверность обеспечена сравнением результатов, где это возможно, с результатами других авторов и с данными в других диапазонах.

Научная и практическая ценность. Полученные наблюдательные данные пригодны для непосредственного сравнения с теоретическими моделями и с результатами других наблюдений. Результаты данной работы могут применяться для теоретического моделирования излучения пульсаров, а также для планирования дальнейших более детальных наблюдений исследованных объектов и поиска других пульсаров в оптическом и ИК диапазонах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обнаружение линии $H\gamma$ в спектре туманности Гитара вокруг пульсара B2224+65 и получение новой оценки величины межзвездного поглощения в направлении на пульсар. Исследование профиля линии $H\alpha$ этой туманности и получение новых оценок скорости пульсара B2224+65 и расстояния до него.
2. Обнаружение точечного источника оптического излучения, вероятно связанного с пульсаром J1357–6429. Измерение потоков оптического излучения этого источника. Определение глубоких верхних пределов для потоков оптического излучения пульсара J1048–5832 и получение новой оценки величины межзвездного поглощения в направлении на пульсар. Анализ многоволновых спектров этих пульсаров с учетом оптических данных. Доказательство того, что оба пульсара являются неэффективными в оптическом диапазоне и, вместе с пульсаром Вела, образуют минимум на эмпирической зависимости «оптическая эффективность–возраст».
3. Отождествление пульсаров Вела и Геминга в среднем инфракрасном диапазоне и измерение потоков их инфракрасного излучения. Анализ многоволновых спектров этих пульсаров с учетом инфракрасной области и обнаружение избытка их инфракрасного излучения по сравнению с оптическим.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2005 по 2012 годы и опубликованы в трех статьях и в тезисах ряда конференций. Результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийская школа для молодых ученых “Современные методы астрономической спектроскопии” (Нижний Архыз, 2006); Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012); Всероссийская астрономическая конференция “От эпохи Галилея до наших дней” (Нижний Архыз, 2010); MODE-SNR-PWN Workshop (Bordeaux, 2010); CompStar School and Workshop (Catania, 2011); International conference on the Physics of Neutron Stars (С.-Петербург, 2011); “Electromagnetic radiation from pulsars and magnetars” (Zielona Góra, 2012);

Всероссийская молодежная астрономическая конференция “Наблюдаемые проявления эволюции звезд” (Нижний Архыз, 2012); SNR-PWN Workshop (Montpellier, 2012); на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержит 140 страниц текста, в том числе 32 рисунка и 14 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 145 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цели и научная новизна работы, достоверность результатов, их практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 является обзорной. В ней рассказывается о свойствах пульсаров в оптическом диапазоне и характеристиках приборов, использовавшихся для получения результатов диссертации. Наблюдения проводились на телескопах БТА (Большой Телескоп Азимутальный, 6 м), TNG (Telescopio Nazionale Galileo, 3.58 м) и VLT (Very Large Telescope, 8.2 м) Наблюдения на БТА и TNG проводились в полосе $H\alpha$, а на VLT в полосах VRI . Использовались данные в среднем ИК диапазоне из архива космической обсерватории *Spitzer*, рентгеновские данные из архивов космических обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton* и оптические данные из архивов наземных телескопов СТЮ (Cerro Tololo Inter-American Observatory, 4 м) и KPNO (Kitt Peak National Observatory, 4 м). Также описаны методы редукции наблюдательных данных, особенности фотометрии слабых объектов, абсолютной и относительной астросметрии.

Глава 2 посвящена исследованию $H\alpha$ -туманности типа головной ударной волны вокруг пульсара B2224+65 (туманности Гитара). В разделе 2.1 речь идет о предыдущих исследованиях туманности Гитара и аналогичных $H\alpha$ -туманностей, обнаруженных вокруг других пульсаров. Всего известно семь таких туманностей, и спектральные наблюдения проведены лишь для трех из них. Полученные спектры показали, что головные ударные волны вокруг пульсаров – это «бальмеровские», или безызлучательные ударные волны [4–6]. Они также наблюдаются в некоторых молодых остатках сверхновых (ОСН) [7].

Безызлучательными называются волны, излучение которых не влияет на динамику газа за ударным фронтом [8]. Существующие модели [7] предсказывают характерную двухкомпонентную структуру линий в спектре безызлучательных ударных волн. Одна компонента, узкая ($\sim 10 \text{ км с}^{-1}$), связана с излучением медленных нейтральных атомов межзвездной среды, которое возбуждается соударениями с ускоренными на ударном фронте протонами и электронами. Вторая компонента, широкая ($\sim 100\text{--}1000 \text{ км с}^{-1}$), связана с излучением быстрых нейтральных атомов, продуктов реакций перезарядки между медленными атомами и быстрыми протонами за фронтом ударной

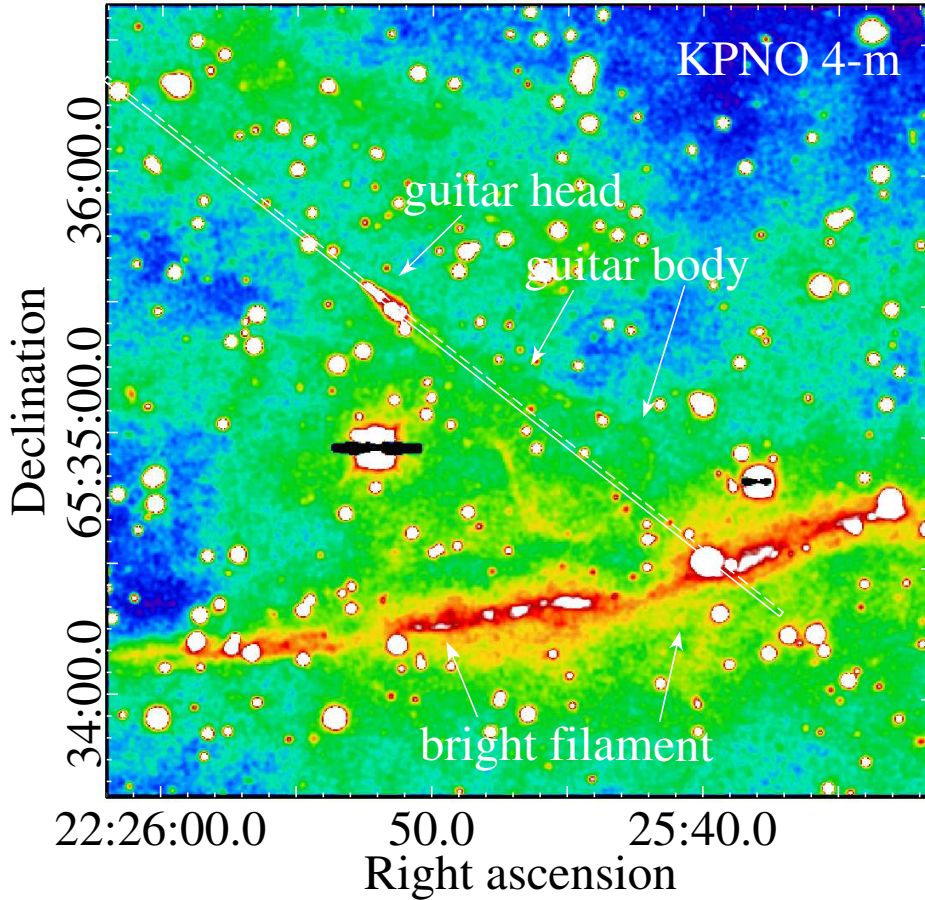


Рис. 1. Изображение поля туманности Гитара в полосе $H\alpha$ из архива 4 м телескопа KPNO. Стрелками показаны яркая «голова» и более тусклое «тело» Гитары, а также яркий филамент, расположенный к югу, природа которого до сих пор не известна и, в том числе, обсуждается в диссертации. Прямые линии показывают расположение щели спектрографа.

волны. Исследование структуры линии позволяет одновременно определить параметры (скорость и расстояние) соответствующих пульсаров и исследовать физику ударной волны, поскольку излучение безызлучательной ударной волны, в отличие от излучения излучательных волн, формируется непосредственно за ударным фронтом и потому несет информацию о бесстолкновительных процессах, происходящих на фронте. Важно, что мы в принципе можем измерить расстояние до пульсара и его тангенциальную скорость с очень хорошей точностью, гораздо точнее, чем это возможно для ударных волн в ОСН. Тщательно изучив свойства головных ударных волн вокруг пульсаров, мы в будущем сможем откалибровать формулы, используемые для описания ударных волн в ОСН, что, в том числе, позволит точнее определять расстояния до соответствующих ОСН, а значит и их возраст.

В разделе 2.2 описаны основные параметры использовавшихся приборов и условия наблюдений. Спектроскопия среднего разрешения с длинной щелью, с номинальным разрешением 57 км с^{-1} , в диапазоне $6232\text{--}6888 \text{ \AA}$, проводилась на телескопе TNG (3.6 м), при этом полная ширина на половине высоты (full width at half maximum, FWHM) $H\alpha$ линии неба составила 74 км с^{-1} , что дает

фактическое спектральное разрешение. На Рис. 1 показано как была расположена щель во время наблюдений. К сожалению, условия наблюдений, прежде всего атмосферное поглощение, были крайне нестабильными. Это связано с песком из Сахары, который несет ветер прямо над Канарскими островами, местом расположения телескопа. Из 12 экспозиций, было выбрано лишь пять, в течении которых условия наблюдений были наилучшими. Суммарное время этих пяти экспозиций составило 11.4 кс. Это достаточно много, но нужно учитывать, что даже для лучших пяти экспозиций поглощение было значительным. Из-за крайне нестабильных условий, сколь-нибудь надежно откалибровать данные TNG по потоку не представляется возможным, но это в данном случае не так критично, так как для нас было важно прежде всего исследовать профиль линии $H\alpha$.

Также на 6 метровом телескопе БТА Российской Академии Наук были проведены наблюдения с низким разрешением ($\sim 450 \text{ км с}^{-1}$) в более широком диапазоне, 3100–7300 Å. Полное время экспозиции составило 7.2 кс и главной целью было обнаружить линию $H\gamma$, что не было сделано в предыдущих наблюдениях [5]. Щель была расположена примерно также, как при наблюдениях на TNG (см. Рис. 1).

В разделе 2.3.1 обсуждается спектр, полученный на TNG, где видны линия $H\alpha$ «головы» Гитары и запрещенные линии $[N II] \lambda\lambda 6717, 6731$ и $[S II] \lambda\lambda 6548, 6584$ яркого филамента [A8]. В разделе 2.3.2 исследуется профиль линии $H\alpha$ яркой «головы» Гитары. Профиль хорошо описывается одной гауссианой, и таким образом состоит из одной компоненты. Это достаточно неожиданно с точки зрения существующей модели излучения бальмеровских ударных волн и наблюдений бальмеровских ударных волн в OCH, которые говорят, что всегда наблюдаются обе компоненты с отношением полных потоков, примерно равным единице [7]. FWHM гауссианы равна $162 \pm 7 \text{ км с}^{-1}$, значит эта единственная компонента является широкой компонентой, т.к. максимальная ширина узкой компоненты не может быть больше $\sim 50 \text{ км с}^{-1}$ [7]. Отношение полных потоков широкой и узкой компонент равно $I_b/I_n \gtrsim 7$. Оказалось, что линия $H\alpha$ «головы» Гитары также немного сдвинута в голубую сторону спектра, и сдвиг равен $\Delta = -(10 \pm 4) \text{ км с}^{-1}$. Используя параметры линии $H\alpha$, можно оценить скорость ударной волны, $v_s = 203 \pm 9 \text{ км с}^{-1}$, и угол между нормалью к поверхности ударной волны и лучом зрения, $i \sim 85^\circ$. Отсюда также можно оценить скорость пульсара, $v_p \sim 200 \text{ км с}^{-1}$, и, учитывая собственное движение $(182 \pm 3) \times 10^{-3} \text{ угл. сек. год}^{-1}$ [9], расстояние до пульсара, $D \sim 230 \text{ пк}$. Это значительно меньше расстояния по мере дисперсии (dispersion measure, DM), $D \sim 1.7 \text{ кпк}$ [9].

В разделе 2.3.3 обсуждается спектр низкого разрешения, полученный на БТА [A4]. В результате наблюдений, кроме линий $H\alpha$ и $H\beta$, на уровне $\sim 3.5\sigma$ впервые удалось обнаружить линию $H\gamma$. Отношение полных потоков $H\alpha/H\beta = 6.0 \pm 0.7$ в пределах ошибок согласуется с полученным в предыдущих наблюдениях значением $H\alpha/H\beta = 5.5 \pm 0.5$ [5]. Сравнив наблюдаемое отношение $H\alpha/H\gamma \sim 17$ с теоретическими пределами $7.5 \leq H\alpha/H\gamma \leq 9.0$ [10], мы получили оценку на величину межзвездного поглощения в видимом диапазоне, $A_V < 1$. Эта оценка сильнее той, что получается из сравнения наблюдаемого отношения $H\alpha/H\beta$ с теоретическими пределами $3 \leq H\alpha/H\beta \leq 5$

[10], $A_V < 1.65$. Кроме того, наша оценка лучше согласуется с оценкой $A_V < 0.5$, следующей из ограничения на колонковую плотность водорода, $N_H < 0.9 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, полученного в рентгеновских наблюдениях с обсерваторией *Chandra* [11]. Если оценивать колонковую плотность по мере дисперсии, $N_H \sim \text{DM}(0.03 \times 10^{21}) \text{ см}^{-2}$, предполагая степень ионизации вдоль луча зрения равной 0.1, получим, учитывая $\text{DM} = 36.079 \text{ пк см}^{-3}$ [12], $N_H \sim 1.1 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и $A_V \sim 0.6$. Исходя из последней оценки для A_V , можно получить “внутреннее” значение $\text{H}\alpha/\text{H}\beta \sim 4.2$.

В разделе 2.3.4 обсуждается спектр яркого филамента. Наблюдаемые отношения $[\text{S II}]/\text{H}\alpha \sim 1.45$ и $[\text{N II}]/\text{H}\alpha \sim 0.76$ свидетельствуют, что источником возбуждения скорее всего является ударная волна, а не фотоионизация. Эти отношения часто используются для того, чтобы отличить ОСН от зон Н II и планетарных туманностей [13]. Кроме того $[\text{S II}] 6717/6731 \sim 1.48$ соответствует электронной плотности $10\text{--}100 \text{ см}^{-3}$ [13], типичной для старых ОСН. Таким образом, спектральные наблюдения указывают на то, что яркий филамент, скорее всего, принадлежит некоторому ОСН, не связанному с пульсаром

Результаты главы обсуждаются в разделе 2.4. Неожиданными представляются наши оценки скорости и расстояния, а также отношения I_b/I_n . Подробно обсуждается, как можно согласовать наши результаты с тем, что уже известно о туманности Гитара и других $\text{H}\alpha$ -туманностях вокруг пульсаров, а также о безызлучательных ударных волнах в целом. Также обсуждаются дальнейшие наблюдения, которые помогут прояснить ситуацию.

В **главе 3** речь идет об исследовании пульсара J1048–5832. В разделе 3.1 обсуждаются важнейшие свойства пульсара. Пульсар J1048–5832 имеет период обращения $P = 124 \text{ мкс}$, характеристический возраст $\tau_c = P/2\dot{P} = 20400 \text{ лет}$ и связанную с замедлением вращения скорость потери энергии $\dot{E} = 2 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$; он был открыт в радио диапазоне [14], а затем обнаружен и в рентгеновском диапазоне [15]. Также в рентгеновском диапазоне была обнаружена туманность вокруг пульсара [15]. На телескопе VLT были проведены наблюдения с целью отождествления пульсара и его туманности в оптическом диапазоне, а также изучения свойств его оптического излучения.

В разделе 3.2.1 описаны условия наблюдений. В полосах V и R были получены глубокие, 24 кс и 16.8 кс, изображения PSR J1048–5832. Качество изображения во время наблюдений менялось от $0''.4$ до $1''.0$. Первичная редукция данных была произведена с помощью стандартных процедур пакетов IRAF и MIDAS. Астрометрия описана в разделе 3.2.2. Ошибки астрометрической привязки для оптических изображений составили $\lesssim 0''.2$. Также описана астрометрия архивных рентгеновских изображений. Фотометрическая калибровка описывается в разделе 3.2.3.

В разделе 3.3.1 поле пульсара в полосе V , составленное из двух чипов ПЗС матрицы прибора FORS2, сравнивается с изображениями в полосах 8 и 24 мкм из архива обсерватории *Spitzer* и изображением в полосе $\text{H}\alpha$, полученным на 4 м телескопе СТЮ. Обсуждается протяженная темная структура, видимая в полосах V и $\text{H}\alpha$ вокруг положения пульсара, вероятно связанная с газо-пылевыми облаками III-комплекса Карина, на границе которого находится пульсар.

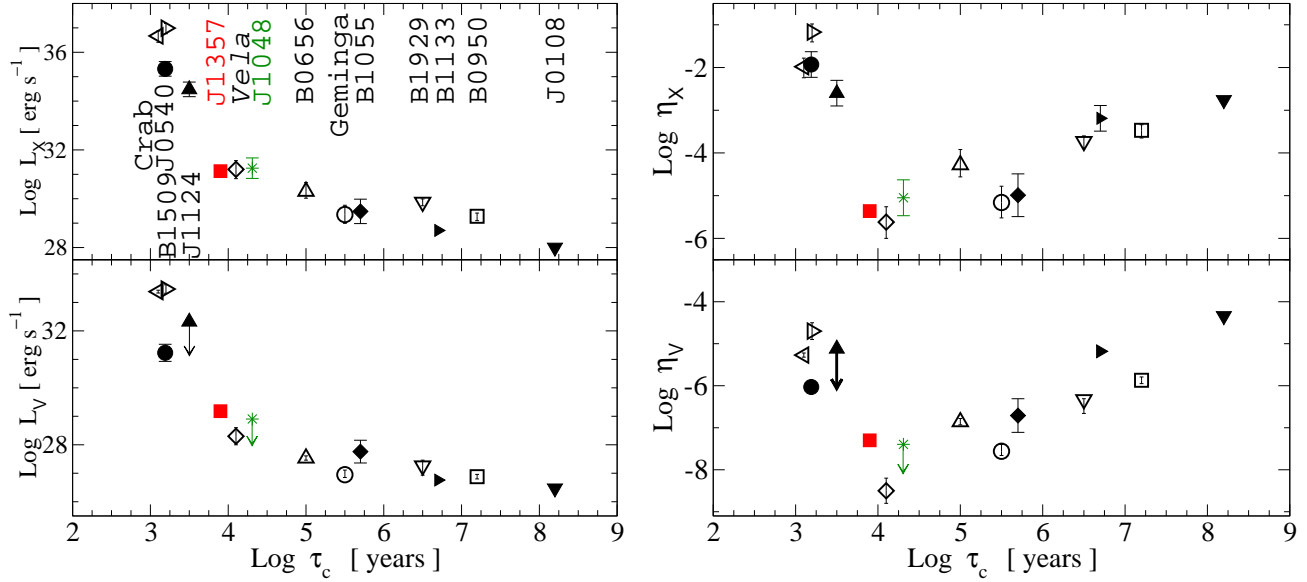


Рис. 2. Рентгеновские и оптические светимости (слева) и эффективности (справа) различных пульсаров в зависимости от возраста.

В разделе 3.3.2 исследуется непосредственная окрестность пульсара. Рядом с положением пульсара обнаружено несколько точечных источников. Фотометрия оптических изображений и построенная по результатам этой фотометрии диаграмма цвет–величина, включающая около 3500 звезд поля, обсуждаются в разделе 3.3.3. Оказалось, что один из источников вблизи пульсара имеет несколько необычный, по сравнению с подавляющим большинством звезд поля, цвет. Обсуждается связь источника с морфологической особенностью рентгеновской туманности, так называемым «виспом» (wisp). В результате наблюдений нам не удалось обнаружить PSR J1048–5832 в оптическом диапазоне, но зато удалось поставить предельно жесткие (исходя из возможностей современных приборов) и информативные верхние пределы на яркость пульсара J1048–5832 в оптических полосах, $V \gtrsim 28^m4$ и $R \gtrsim 28^m1$.

В разделе 3.3.5 описан анализ рентгеновских данных из архивов обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton*. Ранее, в работе [15], спектр пульсара фактически не исследовался, а исследовался только суммарный спектр туманности и пульсара. Мы заново проанализировали рентгеновские данные, чтобы сравнить полученные верхние пределы с рентгеновским спектром пульсара и, как следствие, получили оценку величины N_H в направлении на PSR J1048–5832. Эта оценка получилась несколько ниже той, что приведена в работе [15]. Из сравнения оптических и рентгеновских изображений видно, что юго-восточная область рентгеновской туманности перекрывается с темной, очевидно сильно поглощенной, областью на оптических изображениях. Нами был проанализирован рентгеновский спектр юго-восточной области. В результате, было установлено, что N_H для этой области действительно заметно (статистически значимо) выше, чем N_H для пульсара. В разделе 3.3.6, используя так называемые звезды красного сгущения в качестве стандартных свечей, мы построили зависимость поглощение–расстояние в направлении на PSR J1048–5832, которая вместе с оценкой расстояния по мере дисперсии поз-

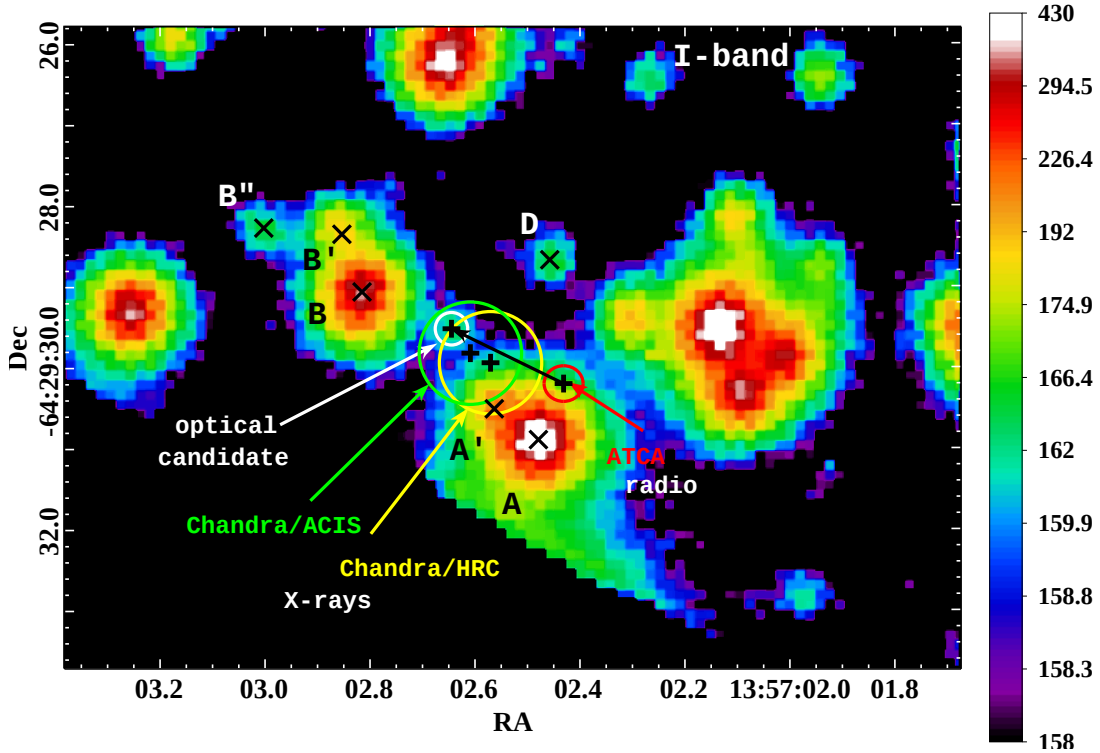


Рис. 3. Фрагмент изображения поля пульсара J1357–6429, полученного на VLT в полосе I . Показаны эллипсы ошибок рентгеновских и радио- положений пульсара. Показан оптический кандидат, а также фоновые звезды.

волила нам независимо оценить величину межзвездного поглощения, $A_V \approx 2$. Это согласуется с оценкой по N_H , полученной из анализа рентгеновского спектра пульсара, и меньше значения $A_V \approx 5$, которое следует из анализа суммарного спектра пульсара и туманности.

В разделе 3.3.7 анализируется многоволновой спектр пульсара, построенный с учетом оптических верхних пределов и оценки на межзвездное поглощение.

Полученные данные позволили нам установить верхний предел на оптическую светимость пульсара, $L_{opt} \lesssim 10^{28.9}$ эрг с^{-1} , откуда также следует ограничение на отношение оптической светимости к \dot{E} , т.е. эффективность пульсара, $\eta_{opt} \lesssim 10^{-7.4}$. В разделе 3.4 обсуждаются результаты и перспективы дальнейших наблюдений. На Рис. 2 оптические и рентгеновские светимости и эффективности различных пульсаров показаны в зависимости от возраста. Видно, что PSR J1048–5832, также как и пульсар Вела, является неэффективным в рентгеновском и оптическом диапазонах.

Глава 4 посвящена наблюдениям пульсара J1357–6429. В разделе 4.1 обсуждаются важнейшие свойства этого пульсара. Пульсар J1357–6429 был открыт в обзоре Паркса (the Parkes multi-beam survey of the Galactic plane) и имеет $P = 166$ мкс, $\tau_c = P/2\dot{P} = 7300$ лет и $\dot{E} = 3.1 \times 10^{36}$ эрг с^{-1} [16]. Затем пульсар был обнаружен в рентгеновском диапазоне с помощью орбитальных обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton* [17; 18]. Кроме того, в рентгеновском диапазоне была обнаружена протяженная туманность [17–20] и с высокой значимостью подтверждены рентгеновские пульсации [19; 20]. По результатам наблюдений, проведенных на орбитальной обсерватории *Fermi*, перио-

дические пульсации были открыты также в диапазоне ГэВ [20]. Также был обнаружен менее яркий и более протяженный рентгеновский плерион [19; 21], который пространственно совпадает с протяженным источником излучения в диапазоне ТэВ, HESS J1356–645 [21]. Источник HESS J1356–645 предположительно является так называемой реликтовой пульсарной туманностью. Также HESS J1356–64 пространственно совпадает с радио плерионом, кандидатом в ОСН G309.8–2.6.

В разделе 4.2.1 описаны условия наблюдений. Поле пульсара J1357–6429 наблюдалось в полосах V , R и I на телескопе VLT. Времена экспозиций в полосах V , R и I составили 12.3 кс, 7.6 кс и 7.8 кс соответственно. Качество изображения в полосах V , R и I составило $\approx 0''.59$, $0''.52$ и $0''.44$ соответственно. В разделе 4.2.2 описана астрометрия. Ошибка астрометрической привязки составила $\lesssim 0''.2$ для обеих координат для изображений во всех полосах. Также описывается астрометрическая привязка рентгеновских изображений, взятых из архива обсерватории *Chandra*, точность которой составила $0''.6$, что соответствует номинальной точности наведения. В разделе 4.2.3 описывается фотометрическая калибровка. Были получены следующие верхние пределы на обнаружение точечного источника на уровне 3σ : $V^{up} \approx 28^m.5$, $R^{up} \approx 28^m.0$ и $I^{up} \approx 27^m.2$.

В разделе 4.3.1 обсуждается обнаруженный в пределах эллипса ошибок рентгеновского положения пульсара точечный источник, кандидат в пульсары (или оптический кандидат) [A2; A3; A7]. На Рис. 3 показан фрагмент изображения в полосе I . В разделе 4.3.2 представлены результаты поиска пульсарной туманности. Следов пульсарной туманности в оптическом диапазоне обнаружено не было. В разделе 4.3.3 описываются результаты фотометрии. Звездные величины оптического кандидата составили $V = 27^m.3 \pm 0^m.3$, $R = 25^m.52 \pm 0^m.07$ и $I = 24^m.13 \pm 0^m.05$. В разделе 4.3.4 обсуждаются диаграммы цвет–величина и цвет–цвет. Диаграмма цвет–цвет, построенная примерно для тысячи звезд поля, показана на Рис. 4. Цвета оптического кандидата несколько отличаются от цветов звезд поля, в частности, тех, что находятся в окрестности рентгеновского и радио положений пульсара. Согласие положения оптического кандидата с рентгеновским положением пульсара и необычные цвета свидетельствуют в пользу справедливости отождествления объекта с пульсаром.

В разделе 4.3.5 обсуждается многоволновой спектр пульсара с учетом из-

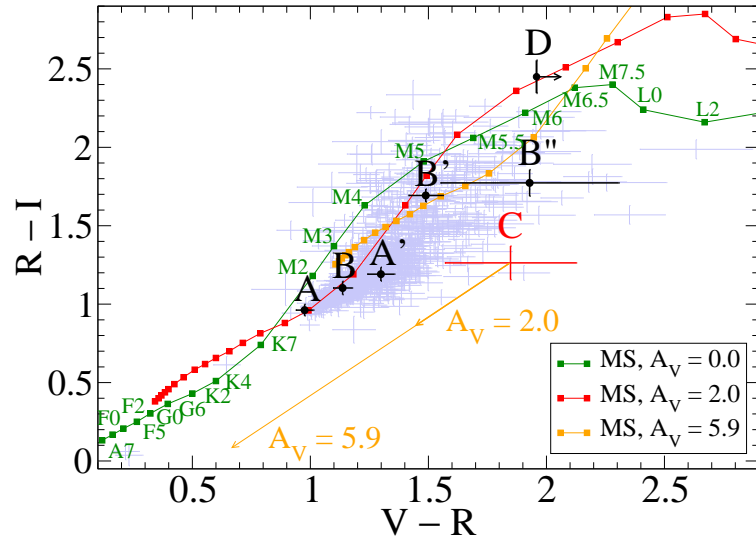


Рис. 4. Диаграмма цвет-цвет для звезд поля пульсара J1357–6429. Оптический кандидат обозначен буквой С. Также показаны фоновые звезды, отмеченные на Рис. 3. Разными цветами показаны эмпирические кривые главной последовательности поглощенные с нулевой, средней и максимальной в данном направлении Галактики величинами, $A_V = 0, 2.0$ и 5.9 .

меренных оптических потоков кандидата. Чтобы точнее оценить поглощение и расстояние до пульсара, мы заново проанализировали рентгеновские данные и, используя тот же метод звезд красного сгущения, что применялся нами для PSR J1048–5832, построили зависимость поглощение–расстояние в направлении на PSR J1357–6429. Результаты анализа рентгеновских данных согласуются с представленными в работах [19; 20]. Из сравнения рентгеновских данных и зависимости поглощение–расстояние мы заключили, что расстояние до PSR J1357–6429 находится в пределах 2–2.5 кпк, а $A_V \approx 0.8$.

В разделе 4.4 обсуждаются полученные результаты. Если отождествление оптического кандидата с PSR J1357–6429 справедливо, это приводит к двум важным следствиям.

Во-первых, угловое расстояние между положением оптического кандидата и радио-положением пульсара, измеренным 9 годами ранее, $1''.5 \pm 0''.32$ (Рис. 3), на расстоянии 2–2.5 кпк соответствует скорости 1600–2000 км с⁻¹. Направление предполагаемого собственного движения приблизительно совпадает с направлением отрезка, соединяющего положение пульсара и центр источника HESS J1356–64, а также с направлением, в котором вытянут хвост рентгеновской туманности [18; 19]. Реальность собственного движения подтверждается наличием существенного сдвига между рентгеновским и радио [16] положениями пульсара, а также между двумя рентгеновскими положениями, полученными в разные эпохи (см. Рис. 3). Если будущие наблюдения подтвердят высокое собственное движение PSR J1357–6429 и удастся измерить его параллакс, мы возможно получим самый быстрый пульсар из известных на данный момент, что очень важно для понимания природы высоких скоростей нейтронных звезд [9; 22].

Во-вторых, оптические потоки, исправленные за межзвездное поглощение, дают необычно крутой оптический спектр, со степенным индексом $\alpha_\nu \sim 5$, чего не наблюдалось ранее для пульсаров. Это обстоятельство работает против справедливости отождествления. Если же отождествление подтвердится, PSR J1357–6429 станет исключительно интересен также благодаря своему крутому оптическому спектру.

Мы также оценили светимость и эффективность пульсара J1357–6429 в оптическом диапазоне, $L_{opt} \approx 10^{29.2}$ эрг с⁻¹ и $\eta_{opt} \approx 10^{-7.3}$, и нанесли соответствующие точки на графики, представленные на Рис. 2. Как видно из Рис. 2, PSR J1357–6429 является неэффективным в рентгеновском и оптическом диапазонах. Таким образом, наблюдения PSR J1048–5832 и PSR J1357–6429 подтверждают, что все пульсары с возрастом примерно равным возрасту Велы (10⁴ лет) имеют низкую эффективность в рентгеновском и оптическом диапазонах. Заметим, что минимум, наблюдаемый в зависимостях рентгеновской и оптической эффективностей от возраста, не наблюдается для эффективности в гамма-диапазоне [23].

В **главе 5** речь идет об открытии инфракрасного излучения известных пульсаров Вела и Геминга. В разделе 5.1 обсуждаются важнейшие свойства пульсаров, известные из предыдущих наблюдений. Вела и Геминга были идентифицированы в различных спектральных диапазонах, от ближнего ИК диапазона до гамма-лучей. Оба пульсара демонстрируют слабый избыток излучения в ближнем ИК диапазоне по сравнению с излучением в оптическом

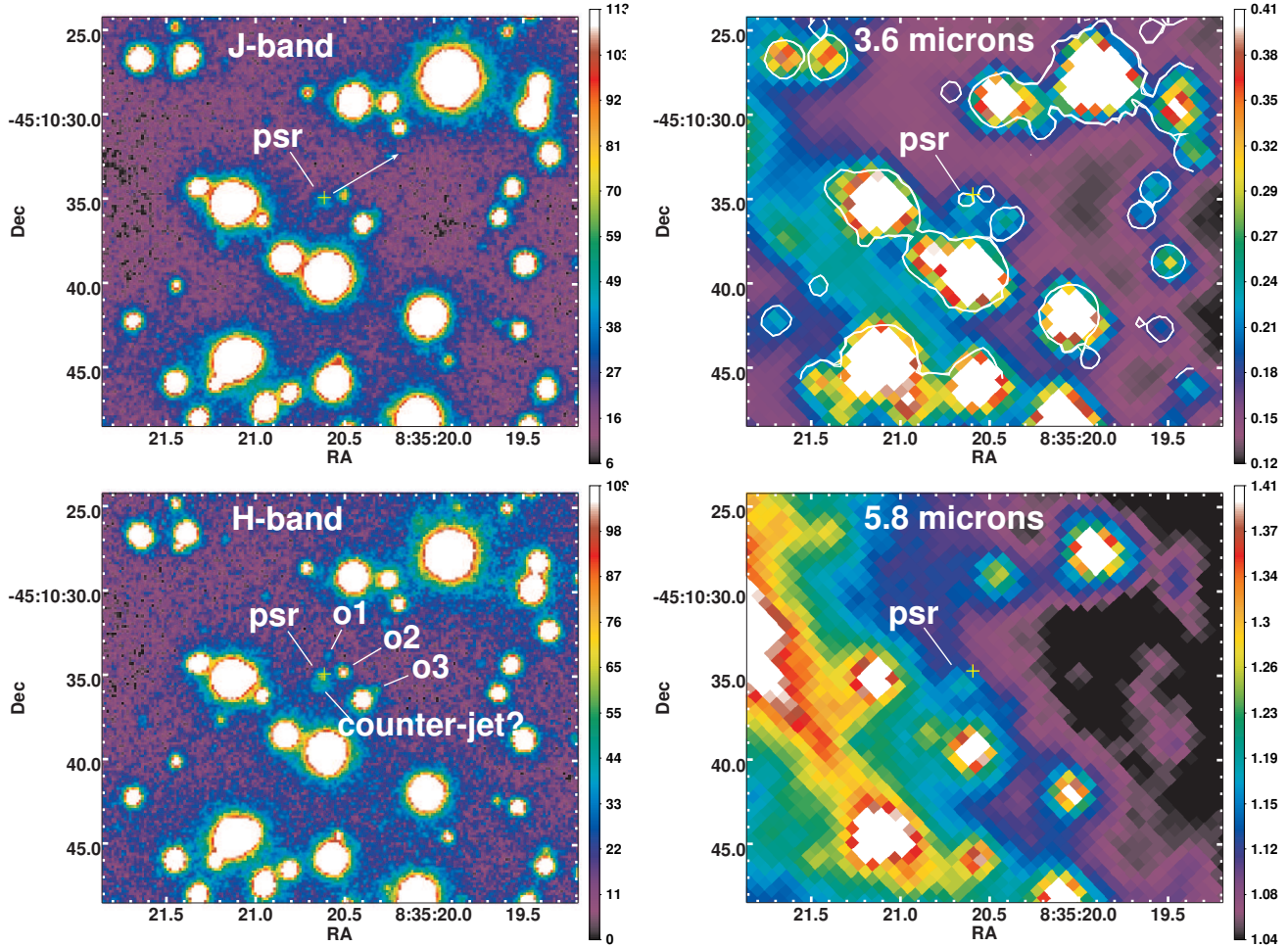


Рис. 5. Фрагмент ИК изображений поля пульсара Вела $\sim 20'' \times 25''$, полученных прибором VLT/ISAAC в полосах J и H (левая колонка) и прибором *Spitzer*/IRAC в полосах 3.6 и 5.8 мкм (правая колонка). Показано положение пульсара Вела. Стрелкой показано направление его собственного движения. Крестами отмечены радио-положения пульсара на эпохи наблюдений с VLT и обсерваторией *Spitzer*. Точечный узло-подобный объект «o1», протяженный в юго-западном направлении объект «counter jet?» и две фоновые звезды «o2» и «o3» отмечены на изображении в полосе H . Контуры на изображении в полосе 3.6 мкм – это линии постоянной интенсивности изображения в полосе J .

диапазоне (см. Рис. 6). Чтобы проверить, являются ли эти особенности реальными, мы проанализировали архивные широкополосные изображения, полученные орбитальным телескопом *Spitzer* в диапазоне 3.6–160 мкм, и сравнили их с данными в других спектральных диапазонах.

В разделе 5.2.1 описаны полные времена экспозиций в различных полосах, полученные обсерваторией *Spitzer*, поля зрения, размеры пикселей ПЗС матриц. В полосах 3.6 и 5.8 мкм на уровне значимости $\sim (4-5)\sigma$ обнаружен точечный источник, положение которого согласуется с положением пульсара Вела, и в полосе 3.6 мкм на уровне 2σ виден источник, положение которого согласуется с положением пульсара Геминга [A1; A5; A6]. В разделе 5.2.2 описана астрометрия. Для аккуратного сравнения положений обнаруженных источников с соответствующими положениями пульсаров в радио и оптическом диапазонах, известными с очень хорошей точностью [24–27], была произведена абсолютная астрометрическая привязка. Ошибка положения (1σ) составила $\lesssim 0''.4$ для обеих координат (при размере пиксела $1''.2$).

В разделе 5.3.1 подробно анализируются изображения пульсара Вела. На Рис. 5 показаны изображения окрестности пульсара Вела в полосах 3.6 и 5.8 мкм в сравнении с аналогичными изображениями, полученными телескопом VLT в полосах J и K [28]. Точечный источник, видимый в полосах 3.6 и 5.8 мкм, расположен в пределах неопределенности положения пульсара по данным в ближнем ИК. Следов пульсарной туманности на изображениях обсерватории *Spitzer* обнаружено не было, но в полосе 8 мкм была обнаружена структура коррелирующая с рентгеновским и радио- плерионом [29].

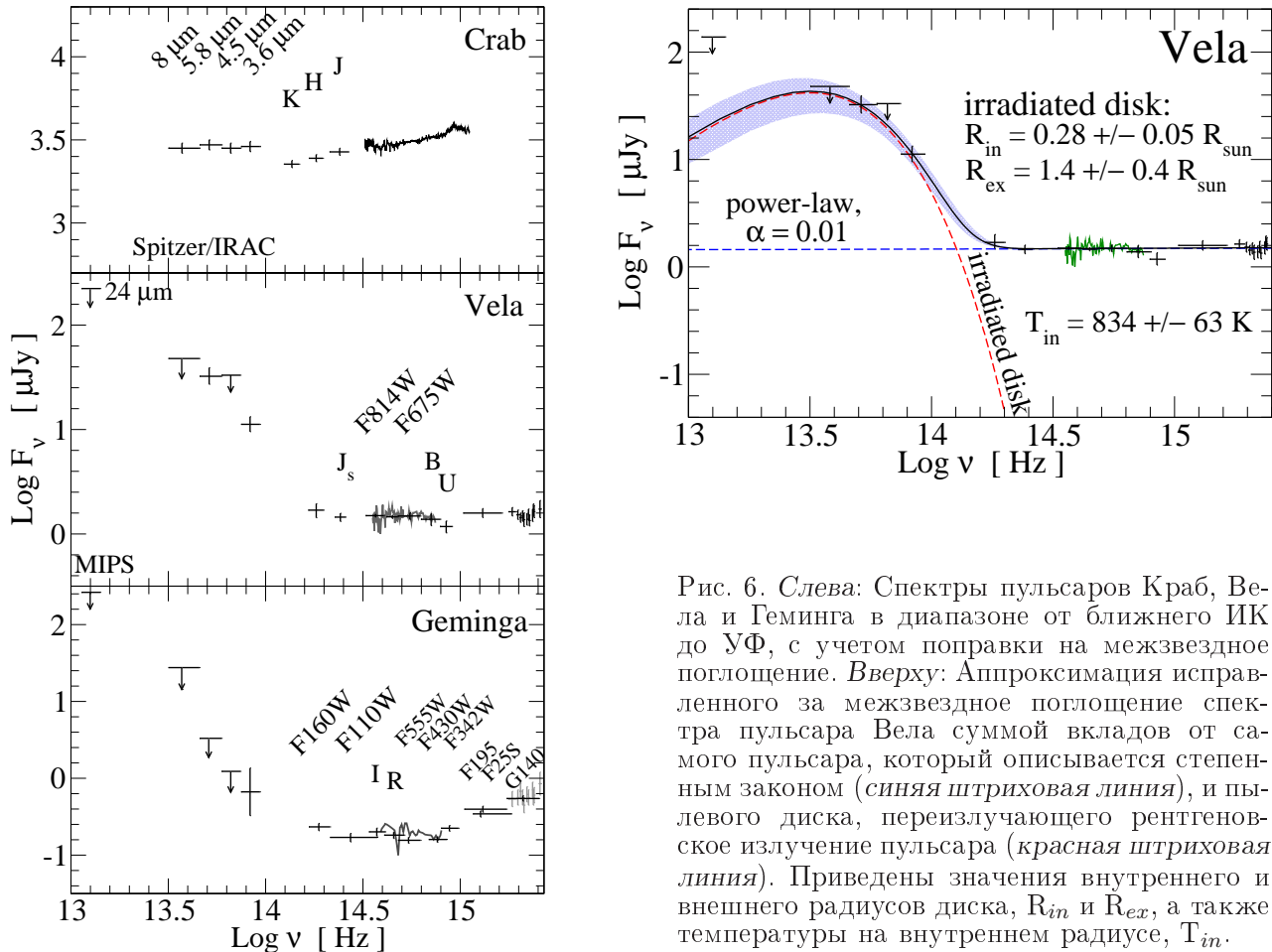


Рис. 6. Слева: Спектры пульсаров Краб, Вела и Геминга в диапазоне от ближнего ИК до УФ, с учетом поправки на межзвездное поглощение. Вверху: Аппроксимация исправленного за межзвездное поглощение спектра пульсара Вела суммой вкладов от самого пульсара, который описывается степенным законом (синяя штриховая линия), и пылевого диска, переизлучающего рентгеновское излучение пульсара (красная штриховая линия). Приведены значения внутреннего и внешнего радиусов диска, R_{in} и R_{ex} , а также температуры на внутреннем радиусе, T_{in} .

В разделе 5.3.2 описан анализ изображений пульсара Геминга. Изображения в полосе 3.6 мкм, где обнаружен точечный источник, сравниваются с изображением в полосе I полученным с телескопом Subaru [30]. Пульсар имеет высокое собственное движение, $(178 \pm 2) \times 10^{-3}$ угл. сек. год $^{-1}$ [27], и поэтому мы можем ожидать, что за шесть лет прошедших между наблюдениями на Subaru (2001 год) и на *Spitzer* положение пульсара сместилось на $\approx 1''.22$. Положение точечного источника согласуется с ожидаемым в пределах ошибок. Следов рентгеновской пульсарной туманности, как и в случае Велы, в среднем ИК диапазоне обнаружено не было.

В разделе 5.3.3 описаны результаты фотометрии обнаруженных источников. В тех полосах, где никаких источников обнаружено не было, были получены верхние пределы. В разделе 5.3.4 дано описание многоволновых спектров пульсаров с учетом потоков и верхних пределов в среднем ИК диапазоне.

На Рис. 6 спектры пульсаров от УФ диапазона до диапазона 24 мкм сравниваются с аналогичным спектром пульсара в Крабовидной туманности. Как видно, спектры обоих пульсаров, в отличие от пульсара в Крабовидной туманности, демонстрируют избыток ИК излучения по сравнению с оптическим. Особенно это справедливо для пульсара Вела. Таким образом избыток ИК излучения по сравнению с оптическим, ожидаемый согласно данным в ближнем ИК диапазоне [28; 30], подтверждается данными обсерватории *Spitzer* и оказывается значительным (по крайней мере для пульсара Вела) в среднем ИК диапазоне.

В разделе 5.4 обсуждаются полученные результаты. Обсуждаются возможные причины столь сильного избытка ИК излучения: реликтовые диски, переизлучающие рентгеновское излучение пульсара (см. Рис. 6), пространственно неразрешенные структуры пульсарного ветра, и пульсарные магнитосферы.

В **заклучении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. В спектре низкого разрешения туманности Гитары, полученном на телескопе БТА, впервые обнаружена линия $H\gamma$, что позволило ограничить величину межзвездного поглощения, $A_V \lesssim 1$. Это согласуется с ограничением на величину колонковой плотности, N_H , следующем из рентгеновских данных, а также с оценкой N_H по мере дисперсии. Спектроскопия среднего разрешения, выполненная на телескопе TNG, позволила впервые исследовать профиль линии $H\alpha$ яркой «головы» туманности Гитара и оценить его ширину в 162 ± 7 км с⁻¹. На основании этого были получены новые независимые оценки скорости пульсара B2224+65, $v_{psr} \sim 200$ км с⁻¹, угла наклона его траектории к лучу зрения, $i \sim 85^\circ$, а также расстояния до пульсара, $D \sim 230$ пк. Это расстояние в несколько раз меньше значения 2 кпк, которое получено по мере дисперсии.
2. Пульсар J1048–5832 не был обнаружен на глубоких оптических изображениях поля вплоть до 28 звездной величины. Пульсар расположен в регионе, относящемся к III-комплексу Карина, который заполнен клочковатыми, плотными газо-пылевыми облаками. Величина межзвездного поглощения здесь может существенно меняться даже на масштабе $10''$. Верхние пределы и анализ рентгеновских данных показывают, что оптические потоки пульсара не превышают экстраполяцию степенного рентгеновского спектра в оптический диапазон, что также наблюдается для других пульсаров. Сравнение верхнего предела на эффективность в полосе V , $\eta_V = L_V/\dot{E} \lesssim 10^{-7.4}$, с соответствующими значениями для других пульсаров показывает, что пульсар J1048–5832 является неэффективным в оптическом диапазоне, как и пульсар Вела.
3. Обнаружен оптический кандидат для пульсара J1357–6429. Он имеет чрезвычайно высокую тангенциальную скорость и необычайно крутой оптический спектр. Светимость и эффективность пульсара в полосе V составляют $L_V = 1.5 \times 10^{29}$ эрг с⁻¹ и $\eta_V = 4.8 \times 10^{-8}$ соответственно, он является неэффективным в оптическом диапазоне и вместе с пульсарами Вела и J1048–5832 образует выраженный минимум в зависимостях η_V от возраста. То же наблюдается и для рентгеновской эффективности. Это может означать, что в оптическом и рентгеновском диапазонах действует один и тот же механизм излучения.

4. Пульсар Вела идентифицирован в двух каналах, 3.6 и 5.8 мкм, телескопа *Spitzer*. Оказалось, что этот пульсар демонстрирует сильный избыток ИК излучения по сравнению с оптическим. То же верно и для более слабого пульсара Геминга, хотя он и был обнаружен только на уровне $\sim 2\sigma$ и только в одном канале 3.6 мкм.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1 The Vela and Geminga pulsars in the mid-infrared / A. A. Danilenko, D. A. Zyuzin, Yu. A. Shibano, S. V. Zharikov // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. – 2011. – Vol. 415. – Pp. 867–880
- A2 Possible optical counterpart of PSR J1357–6429 / A. Danilenko, A. Kirichenko, R. E. Mennickent, G. Pavlov, Yu. Shibano, S. Zharikov, D. Zyuzin // *Astronomy and Astrophysics*. – 2012. – Vol. 540. – P. A28
- A3 Optical observations of PSR J1357–6429 field / A. Kirichenko, A. Danilenko, R. E. Mennickent, G. Pavlov, Yu. Shibano, S. Zharikov, D. Zyuzin // *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. – 2012. – Vol. 466. – P. 29
- A4 Оптический спектр туманности типа головной ударной волны вокруг высокоскоростного пульсара PSR B2224+65 / А. А. Даниленко, В. Н. Комарова, Ю. А. Шибанов, А. В. Моисеев // Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”. Программа и тезисы – Москва, ИКИ РАН, 2006 – С. 8–9
- A5 Пульсары Вела и Геминга в среднем инфракрасном диапазоне / А. А. Даниленко, Д. А. Зюзин, С. В. Жариков, Ю. А. Шибанов // Всероссийская астрономическая конференция “От эпохи Галилея до наших дней”. Тезисы докладов – Нижний Архыз, САО РАН, 2010 – С. 74
- A6 The Vela and Geminga pulsars in the mid-infrared / A. Danilenko, Yu. Shibano, D. Zyuzin, S. Zharikov // International conference on the physics of neutron stars. Book of abstracts – Saint-Petersburg, Publishing house of Polytechnical University, 2011 – P. 32
- A7 A likely optical counterpart of PSR J1357–6429 / A. Kirichenko, A. Danilenko, Yu. Shibano, S. Zharikov, D. Zyuzin // International conference on the physics of neutron stars. Book of abstracts – Saint-Petersburg, Publishing house of Polytechnical University, 2011 – P. 71
- A8 Спектроскопия Н-альфа туманностей типа головной ударной волны вокруг пульсаров / А. Даниленко, Ю. Шибанов, П. Лундквист, Е. Соллерман, Н. Лундквист, Г. Меллема, В. Комарова, А. Моисеев, Е. Олива // Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”. Программа и тезисы – Москва, ИКИ РАН, 2012 – С. 41

Литература, цитируемая в автореферате

- [1] *Sandberg A., Sollerman J.* Optical and infrared observations of the Crab Pulsar and its nearby knot // *Astronomy and Astrophysics*. – 2009. – Vol. 504. – Pp. 525–530.

- [2] Wang Z., Chakrabarty D., Kaplan D. L. A debris disk around an isolated young neutron star // *Nature*. — 2006. — Vol. 440. — Pp. 772–775.
- [3] A Mid-Infrared Counterpart to the Magnetar 1E 2259+586 / D. L. Kaplan, D. Chakrabarty, Z. Wang, S. Wachter // *Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 700. — Pp. 149–154.
- [4] Aldcroft T. L., Romani R. W., Cordes J. M. Spectroscopy of the companion and bow-shock nebula of PSR 1957 + 20 // *Astrophysical Journal*. — 1992. — Vol. 400. — Pp. 638–646.
- [5] Cordes J. M., Romani R. W., Lundgren S. C. The Guitar nebula - A bow shock from a slow-spin, high-velocity neutron star // *Nature*. — 1993. — Vol. 362. — Pp. 133–135.
- [6] The Balmer-dominated Bow Shock and Wind Nebula Structure of γ -ray Pulsar PSR J1741-2054 / R. W. Romani, M. S. Shaw, F. Camilo et al. // *Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 724. — Pp. 908–914.
- [7] Raymond J. C. Optical and UV Diagnostics of Supernova Remnant Shocks // *Space Science Reviews*. — 2001. — Vol. 99. — Pp. 209–218.
- [8] McKee C. F., Hollenbach D. J. Interstellar shock waves // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1980. — Vol. 18. — Pp. 219–262.
- [9] A statistical study of 233 pulsar proper motions / G. Hobbs, D. R. Lorimer, A. G. Lyne, M. Kramer // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2005. — Vol. 360. — Pp. 974–992.
- [10] Chevalier R. A., Kirshner R. P., Raymond J. C. The optical emission from a fast shock wave with application to supernova remnants // *Astrophysical Journal*. — 1980. — Vol. 235. — Pp. 186–195.
- [11] Hui C. Y., Becker W. X-ray emission properties of the old pulsar PSR B2224+65 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Vol. 467. — Pp. 1209–1214.
- [12] Long-term timing observations of 374 pulsars / G. Hobbs, A. G. Lyne, M. Kramer et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2004. — Vol. 353. — Pp. 1311–1344.
- [13] Osterbrock D. E. Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei. — 1989.
- [14] A high-frequency survey of the southern Galactic plane for pulsars / S. Johnston, A. G. Lyne, R. N. Manchester et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 1992. — Vol. 255. — Pp. 401–411.
- [15] Chandra and XMM-Newton Observations of the Vela-like Pulsar B1046–58 / M. E. Gonzalez, V. M. Kaspi, M. J. Pivovarov, B. M. Gaensler // *Astrophysical Journal*. — 2006. — Vol. 652. — Pp. 569–575.
- [16] The Very Young Radio Pulsar J1357–6429 / F. Camilo, R. N. Manchester, A. G. Lyne et al. // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 611. — Pp. L25–L28.

- [17] Discovery of X-ray emission from the young radio pulsar PSR J1357–6429 / P. Esposito, A. Tiengo, A. de Luca, F. Mattana // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Vol. 467. — Pp. L45–L48.
- [18] *Zavlin V. E.* First X-Ray Observations of the Young Pulsar J1357–6429 // *Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 665. — Pp. L143–L146.
- [19] X-Ray Observations of the Young Pulsar J1357–6429 and Its Pulsar Wind Nebula / C. Chang, G. G. Pavlov, O. Kargaltsev, Y. A. Shibano // *Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 744. — P. 81.
- [20] Discovery of gamma- and X-ray pulsations from the young and energetic PSR J1357–6429 with Fermi and XMM-Newton / M. Lemoine-Goumard, V. E. Zavlin, M.-H. Grondin et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2011. — Vol. 533. — P. A102.
- [21] Discovery of the source HESS J1356–645 associated with the young and energetic PSR J1357–6429 / H.E.S.S. Collaboration, A. Abramowski, F. Acero et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2011. — Vol. 533. — P. A103.
- [22] Getting Its Kicks: A VLBA Parallax for the Hyperfast Pulsar B1508+55 / S. Chatterjee, W. H. T. Vlemmings, W. F. Brisken et al. // *Astrophysical Journal*. — 2005. — Vol. 630. — Pp. L61–L64.
- [23] The First Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars / A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello et al. // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2010. — Vol. 187. — Pp. 460–494.
- [24] *Bignami G. F., Caraveo P. A., Mereghetti S.* The proper motion of Geminga’s optical counterpart // *Nature*. — 1993. — Vol. 361. — Pp. 704–706.
- [25] The Distance to the Vela Pulsar Gauged with Hubble Space Telescope Parallax Observations / P. A. Caraveo, A. De Luca, R. P. Mignani, G. F. Bignami // *Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 561. — Pp. 930–937.
- [26] The Vela Pulsar’s Proper Motion and Parallax Derived from VLBI Observations / R. Dodson, D. Legge, J. E. Reynolds, P. M. McCulloch // *Astrophysical Journal*. — 2003. — Vol. 596. — Pp. 1137–1141.
- [27] *Faherty J., Walter F. M., Anderson J.* The trigonometric parallax of the neutron star Geminga // *Astrophysics and Space Science*. — 2007. — Vol. 308. — Pp. 225–230.
- [28] The Vela pulsar in the near-infrared / Y. A. Shibano, A. B. Koptsevich, J. Sollerman, P. Lundqvist // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 406. — Pp. 645–655.
- [29] The radio nebula surrounding the Vela pulsar / R. Dodson, D. Lewis, D. McConnell, A. A. Deshpande // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2003. — Vol. 343. — Pp. 116–124.
- [30] Subaru optical observations of the two middle-aged pulsars PSR B0656+14 and Geminga / Y. A. Shibano, S. V. Zharikov, V. N. Komarova et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2006. — Vol. 448. — Pp. 313–326.