

На правах рукописи

Кириченко Аида Юрьевна

**Многоволновые наблюдения  
гамма-пульсаров**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звёздная  
астрономия

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

- Научный руководитель: Шибанов Юрий Анатольевич,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
ФТИ им. А. Ф. Иоффе
- Официальные оппоненты: Малов Игорь Фёдорович,  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник  
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория  
АКЦ ФИАН
- Попов Сергей Борисович,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Государственный астрономический институт  
им. П. К. Штернберга МГУ
- Ведущая организация: Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Защита состоится 9 июня 2016 г. в 14 часов 30 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 института <http://www.ioffe.ru>.

Автореферат разослан 6 мая 2016 года.

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

А. М. Красильщиков

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы диссертации

Пульсар — это вращающаяся нейтронная звезда (НЗ), излучение которой детектируется в виде периодических импульсов с периодом вращения звезды. Пульсары считаются наиболее многочисленными источниками гамма-излучения в Галактике на энергиях порядка ГэВ [1]. Они наблюдаются в гамма-диапазоне со времён запуска первых космических гамма-обсерваторий. В частности, пульсары *Crab* и *Vela* были первыми источниками, идентифицированными миссиями *SAS-2* и *Cos-B* в 1970-х годах. С запуском гамма-обсерватории им. Комптона (*Compton Gamma Ray Observatory*) в 1990-х годах, установленным на её борту инструментом *EGRET* было достоверно детектировано по крайней мере семь пульсаров, а также три кандидата в пульсары [2]. С помощью инструмента *EGRET* было также обнаружено множество гамма-источников неизвестной природы. Предполагалось, что значительную часть из них составляют пульсары. Это предположение удалось подтвердить только с запуском обсерватории *Fermi* в 2008 году, которая совершила настоящий прорыв в гамма-астрономии. Только за первые пять лет работы обсерватории, с помощью установленного на её борту телескопа *LAT* (*The Large Area Telescope*) было обнаружено более сотни пульсаров, прежде наблюдавшихся, в основном, в радиодиапазоне. Кроме детектирования известных радиопульсаров в гамма-диапазоне, *Fermi LAT* также способен детектировать пульсары независимо в так называемых “поисках вслепую”. Эти поиски оказались успешными — в них было обнаружено около трёх десятков гамма-пульсаров [3].

Несмотря на то что пульсары интенсивно изучаются с момента их открытия почти 50 лет назад, до сих пор не существует общепризнанной теоретической модели, объясняющей их излучение по всему диапазону длин волн. Для понимания механизмов излучения НЗ и выявления возможной связи между процессами генерации излучения на высоких и низких энергиях, необходимо проведение многоволновых наблюдений. В частности, изучение гамма-пульсаров в рентгеновском диапазоне принесло существенные результаты — рентгеновские отождествления были найдены примерно для половины известных гамма-пульсаров [1]. Исследования гамма-пульсаров в рентгеновском диапазоне предоставляют ценную информацию о механизмах излучения НЗ, определяя, в частности, компоненты излучения магнитосферы и поверхности звезды. Наблюдения в этом диапазоне также позволяют детектировать области протяжённого синхротронного излучения, генерируемого релятивистскими частицами из магнитосферы пульсара (так называемые туманности пульсарного ветра). Помимо этого, рентгеновские наблюдения предоставляют возможность оценивать расстояния до пульсаров, температуры поверхности НЗ, а также эффективность трансформации вращательной энергии НЗ в нетепловое излучение магнитосферной природы.

Проявления пульсаров на более длинных волнах — в ультрафиолетовом (УФ), оптическом и инфракрасном (ИК) диапазонах — к настоящему моменту изучены в существенно меньшей степени. Большинство достоверно отождествлённых в этих частях спектра объектов были детектированы в гамма-диапазоне до запуска обсерватории *Fermi*. К ним относятся пульсары *Crab*, *Vela*, *B1509–58*, *B0656+14*, *Geminga* и *B1055–52* [2]. Все они являются молодыми или средневозрастными объектами ( $\sim 10^3$ – $10^6$  лет). Ещё один

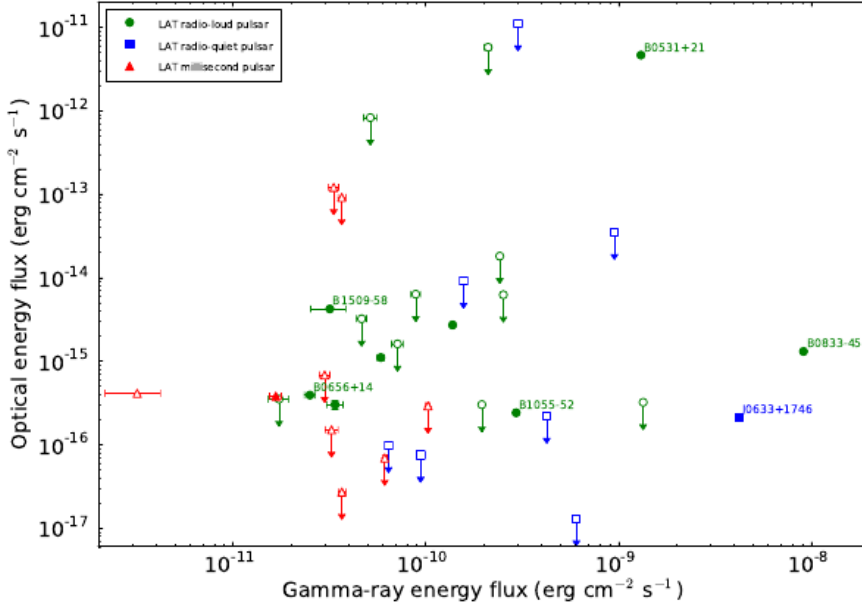


Рис. 1. Сопоставление потоков пульсаров в гамма и оптическом диапазонах. Зелёные и синие символы соответствуют данным для радиопульсаров и радиотихих пульсаров, а красные символы — для миллисекундных пульсаров. Рисунок позаимствован из работы [1] с разрешения авторов.

отождествлённый объект, J0437–4715, представляет собой миллисекундный пульсар в двойной системе (был детектирован только в ближнем УФ диапазоне). Кандидаты в оптические отождествления были найдены для пульсаров V1951+32 [4] и J1024–0719 [5]. Объекты J1124–5916 и J0205–6449 были ассоциированы с яркими оптическими пульсарными туманностями, хотя сами пульсары как точечные оптические источники отождествлены не были [6, 7].

Несмотря на то что открытия обсерватории *Fermi* существенно увеличили популяцию известных гамма-пульсаров, вопрос изучения этих объектов в УФ, оптическом и ИК диапазонах остаётся открытым. К настоящему моменту информация имеется для  $\approx 40$  объектов [1]. В основном, поиск оптического излучения проводился на архивных данных наблюдений, в полях которых пульсары не являлись целевыми источниками, или с помощью неглубоких экспозиций на телескопах 2-метрового класса. Насколько нам известно, в результате немногочисленных глубоких поисков, с момента запуска *Fermi* был предложен только один кандидат в оптическое отождествление (пульсар J1357–6429 [8]), а также в ближнем ИК диапазоне была обнаружена туманность, пространственно перекрывающаяся с позицией пульсара J1833–1034 [9]. В большинстве случаев по данным оптических наблюдений пульсаров представлялось возможным установить только верхние пределы на потоки их излучения.

На Рис. 1 приведено сопоставление оптических и гамма потоков или верхних пределов на поток для пульсаров, наблюдавшихся в обоих диапазонах. Из рисунка видно, что для всех пульсаров потоки в гамма-диапазоне существенно превосходят оптические. Частично это объясняется тем, что набор достоверно отождествлённых пульсаров в оптическом диапазоне небольшой. Распределение оптических верхних пределов также не является достаточно информативным, потому что оптические наблюдения проводились на разных уровнях чувствительности. Таким образом, к настоящему моменту нельзя сделать достоверные выводы о наличии возможной корреляции между потоками в гамма и оптическом диапазонах, предложенной на основе оптического отождествления гамма-пульсаров до эпохи *Fermi* [10]. Для получения достоверных выводов необходимы дальнейшие, более глубокие наблюдения.

Кроме вышесказанного, изучение пульсаров в УФ, оптическом и ближнем

ИК диапазонах позволяет решать ряд важных косвенных задач. В частности, в оптическом диапазоне представляется возможным изучение поляризации, измерение которой кроме последнего проводится только в радиодиапазоне. В отличие от наблюдений на высоких энергиях, наблюдения в УФ, оптическом и ИК диапазонах позволяют получать высокое пространственное разрешение. Это помогает исследовать структуру пульсарных туманностей и отделять компоненты излучения НЗ и туманности, что было сделано, например, для пульсара В0540–69 [11]. Высокое пространственное разрешение также способствует измерению более точных абсолютных позиций объектов, их собственного движения и параллаксов. Такие измерения проведены для пульсаров Vela [12], Geminga [13] и других (см. работу [14] и ссылки в ней).

### **Цели работы**

Основной целью диссертационной работы является наблюдательное исследование гамма-пульсаров в рентгеновском, оптическом и ближнем ИК диапазонах. В ряде случаев исследования проводились и в радиодиапазоне.

### **Научная новизна**

Работа основана на оригинальных наблюдениях гамма-пульсаров с помощью телескопов VLT, ATCA и GTC и на архивных данных наблюдений на телескопах ATCA, *Chandra* и *XMM-Newton*. Впервые обнаружен источник, который, вероятно, отвечает за оптическое излучение структуры рентгеновской туманности пульсара J1048–5832. Проведено измерение наиболее точной позиции пульсара J1357–6429 и поставлено ограничение на значение его собственного движения, а также впервые исследован спектр пульсара в диапазоне 1–3 ГГц. Впервые детектирован источник, который, вероятно, отвечает за излучение пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне. Проведены первые направленные поиски оптического излучения пульсаров J0357+3205 и J2021+3651 с глубиной поиска до 27–28 звёздной величины.

### **Достоверность результатов**

Представленные в работе результаты получены с использованием самых современных радио, оптических и рентгеновских телескопов. Используются верифицированные методы наблюдений, обработки и анализа данных. Достоверность результатов обеспечена сравнением с результатами других авторов, а также с данными, полученными для объектов исследования 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 гамма-пульсаров, а также для планирования дальнейших, более детальных многоволновых наблюдений исследуемых объектов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Обнаружение и фотометрия точечного оптического источника, который может ассоциироваться с яркой структурой рентгеновской туманности пульсара J1048–5832.

2. Детектирование пульсара J1357–6429 в полосе 1–3 ГГц, измерение потоков и поляризации его излучения и формы импульса. Наиболее точное измерение координат пульсара и постановка ограничения на его скорость. Анализ спектра пульсара J1357–6429 в радиодиапазоне. Независимая оценка меры вращения плоскости поляризации и галактического магнитного поля в направлении на пульсар.
3. Обнаружение точечного источника, предположительно отвечающего за излучение пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне. Измерение потоков и анализ многоволнового спектра объекта с учётом рентгеновских данных. Вывод о том, что пульсар J1357–6429 может обладать повышенной, по сравнению с большинством других пульсаров, эффективностью в ближнем ИК диапазоне.
4. Определение глубокого верхнего предела на поток излучения пульсара J0357+3205 в оптическом диапазоне. Анализ его многоволнового спектра с учётом рентгеновских данных. Вывод о наличии излома в нетепловом спектре пульсара между оптическим и рентгеновским диапазонами. Независимое определение температуры поверхности НЗ по рентгеновским данным и подтверждение вывода о том, что J0357+3205 является одной из самых холодных среди изолированных НЗ схожего возраста.
5. Определение глубокого верхнего предела на поток излучения пульсара J2021+3651 в оптическом диапазоне. Независимая оценка расстояния до пульсара по оптическим и рентгеновским данным. Анализ многоволнового спектра пульсара J2021+3651 с учётом рентгеновских данных. Вывод о наличии излома в нетепловом спектре пульсара между оптическим и рентгеновским диапазонами. Выявление низкой эффективности пульсара в оптическом и рентгеновском диапазонах.

### Апробация работы и публикации

Результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях: “Gravitational Waves and Electromagnetic Radiation from Compact Stars” (Catania, 2011); “Physics of Neutron Stars” (Санкт-Петербург, 2011); “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, 2011, 2013); “Electromagnetic radiation from pulsars and magnetars” (Zielona Góra, 2012); “Наблюдаемые проявления эволюции звёзд” (Нижний Архыз, 2012); “SNR-PWN Workshop” (Montpellier, 2012); “The Fast and the Furious: Energetic Phenomena in Isolated Neutron Stars, Pulsar Wind Nebulae and Supernova Remnants” (Madrid, 2013); “The Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death” (Florence, 2014); “The X-ray Universe 2014” (Dublin, 2014); “Физика” (Санкт-Петербург, 2014, 2015). Результаты работы также неоднократно доложены на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Результаты, приведённые в настоящей работе, получены в период с 2010 по 2015 гг. и опубликованы в шести статьях в ведущих международных реферируемых журналах, входящих в Перечень ВАК, а также в сборниках тезисов указанных выше конференций.

### Личный вклад

В результатах, вынесенных на защиту, вклад автора является определяющим. Автором были проведены радиоинтерферометрические наблюдения, а также обработка и анализ оптических и радиоинтерферометрических данных. Автор принимал активное участие в постановке задач, написании заявок

на наблюдательное время, формулировке выводов и подготовке публикаций по всем полученным результатам, вынесенным на защиту.

### Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 102 страницы, в том числе 28 рисунков и 7 таблиц. Список литературы насчитывает 132 наименования.

## Основное содержание диссертации

Во **Введении** кратко описаны изучаемый предмет и состояние исследований на момент начала данной работы. Обоснована актуальность исследований, сформулированы цели и научная новизна работы, достоверность результатов, их научная и практическая значимость, а также обозначен личный вклад автора. Приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** освещены методические вопросы многоволновых наблюдений гамма-пульсаров. В ней описаны характеристики использовавшихся телескопов, а также методы редукции и анализа данных наблюдений в оптическом, ближнем ИК и радио диапазонах. Наблюдения проведены на телескопах VLT (Very Large Telescope), ATCA (Australia Telescope Compact Array) и GTC (Gran Telescopio Canarias). Использованы также архивные данные, полученные с помощью телескопов *Chandra*, *XMM-Newton* и ATCA.

**В Главе 2** приведены результаты оптических наблюдений пульсара J1048–5832. Часть результатов наблюдений была вынесена на защиту в работе [15]. Ниже приведены результаты, выносимые на защиту в данной диссертации и опубликованные в работе [A1].

В Разд. 2.1 дана сводка основных параметров пульсара, а также история предшествовавших исследований. Пульсар J1048–5832 имеет период 124 мс, характеристический возраст  $2 \times 10^4$  лет и скорость потери вращательной энергии  $\dot{E} = 2 \times 10^{36}$  эрг  $s^{-1}$ . Впервые пульсар был обнаружен в радиодиапазоне [16]. После этого он был отождествлён в рентгеновском диапазоне, в котором была также обнаружена слабая хвостобразная пульсарная туманность [17]. Объект классифицирован как слабый гамма-пульсар в работе [2] по данным наблюдений на инструменте EGRET. Дальнейшие исследования на обсерватории *Fermi* подтвердили наличие пульсаций объекта в гамма-диапазоне [18].

В Разд. 2.2.1 представлены результаты наблюдений в фильтрах  $V$  и  $R$  на телескопе VLT, проведённых с целью отождествления пульсара J1048–5832 и/или его туманности в оптическом диапазоне [A1]. Показано, что в пределах рентгеновского позиционного эллипса пульсара на полученных оптических изображениях не детектируется никакого источника [15]. Однако на них присутствуют другие источники, позиции которых перекрываются с рентгеновским контуром пульсарной туманности и позиционным эллипсом пульсара по радиоинтерферометрическим данным. В Разд. 2.2.2 исследована возможная связь этих источников с пульсаром или его туманностью. Приводится диаграмма цвет-величина, построенная по результатам фотометрии источников поля. Анализ показал, что цвет ( $V - R \approx 0.6$ ) одного из ближайших

к пульсару источников соответствует характерным цветам структур туманностей пульсаров. Оказалось, что источник пространственно перекрывается с компактной структурой туманности пульсара на рентгеновском изображении. Пространственное совпадение и цвет источника указывают на достоверность оптического отождествления структуры туманности.

В разделе 2.3 приведены основные выводы и перспективы дальнейших наблюдений. Дальнейшее изучение пульсара J1048–5832 должно осуществляться на более длинных волнах, преимущественно в ИК диапазоне, где излучение источников менее подвержено влиянию межзвёздного поглощения.

В **Главе 3** представлен анализ радиоинтерферометрических наблюдений пульсара J1357–6429, опубликованный в работе [A4]. В Разд. 3.1 приведено обоснование наблюдений, а также основные характеристики пульсара и обзор предшествовавших исследований. Пульсар J1357–6429 является молодым (характеристический возраст  $7 \times 10^3$  лет) и энергичным (скорость потери вращательной энергии  $\dot{E} = 3.1 \times 10^{36}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ ) радиопульсаром с периодом 166 мс [19]. Объект был отождествлён в рентгеновском диапазоне, где была также обнаружена компактная хвостообразная туманность. Форма туманности указывает на наличие значительного собственного движения [20, 21]. При последующем изучении пульсара на высоких энергиях были обнаружены пульсации в рентгеновском и гамма диапазонах [22, 23].

В работе [8] приведены результаты наблюдений пульсара J1357–6429 в фильтрах  $V$ ,  $R$  и  $I$  на телескопе VLT, проведённых в 2009 году. Авторы описывают детектирование слабого источника, который предлагается как кандидат в оптическое отождествление пульсара J1357–6429, а также указывают на наличие значительного несоответствия ( $1''.54 \pm 0''.32$ ) положения кандидата с координатами пульсара, измеренными по данным радиоинтерферометрических наблюдений 2000 года [19]. Исходя из этого, в работе [8] было высказано предположение, что пульсар может иметь экстремально высокую поперечную скорость 1300–2500 км  $\text{с}^{-1}$ . Чтобы проверить это предположение, было необходимо получить точную позицию объекта на новую эпоху. В связи с этим в 2013 году были проведены новые радиоинтерферометрические наблюдения пульсара на телескопе АТСА [A4].

В Разд. 3.2 представлены наблюдения, а также детали обработки и анализа полученных данных. Основной целью наблюдений являлось измерение точного положения пульсара. В связи с этим была использована конфигурация интерферометра с максимальной базой (около 6 км). Наблюдения проводились в диапазоне 1–3 ГГц. Для того чтобы измерить собственное движение пульсара, был проведён также независимый анализ архивных данных, полученных в результате наблюдений на телескопе АТСА в 2000 году. Базы использовавшейся конфигурации интерферометра примерно соответствовали базам конфигурации новых наблюдений.

В Разд. 3.3.1 показан фрагмент поля пульсара, полученный в результате новых наблюдений, а также дано описание источников поля. Пульсар был детектирован на уровне  $10\sigma$ .

Астрометрия пульсара и измерение собственного движения описаны в Разд. 3.3.2. Для оценки собственного движения использованы методы абсолютной и относительной астрометрии. В первом случае измерение позиции пульсара проведено на старых и новых данных относительно калибровочных источников, позиции которых известны с высокой точностью. После этого полученные позиции были сравнены. Во втором случае измерение собственного



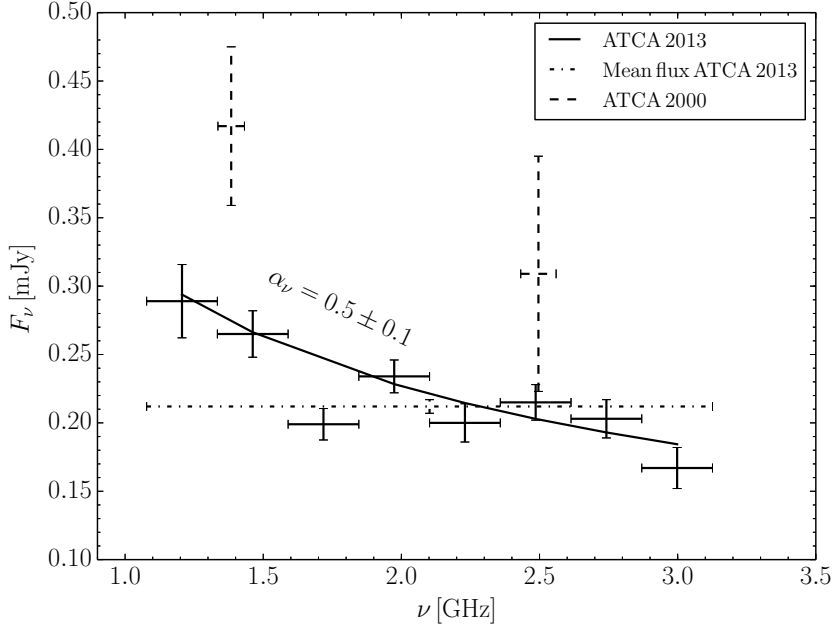


Рис. 2. Спектр пульсара J1357–6429 по данным наблюдений на телескопе АТСА. Сплошные кресты соответствуют потокам на данных 2013 года и их ошибкам на уровне  $1\sigma$ . Линия демонстрирует лучшую аппроксимацию степенным законом со спектральным индексом  $\alpha_\nu$ , указанным на рисунке. Средние потоки по полосе показаны штрихпунктирным (для данных 2013 года) и пунктирными (для данных 2000 года) крестами для сравнения.

движения пульсара проведено относительно источников поля. В результате анализа никакого существенного сдвига пульсара за время между наблюдениями обнаружено не было, поэтому был определён только верхний предел на собственное движение пульсара  $\mu \lesssim 106$  миллисекунд дуги год $^{-1}$  (на уровне 90%), что соответствует пределу на поперечную скорость  $v_{tr} \lesssim 1300$  км с $^{-1}$ .

В Разд. 3.3.3 проанализирован спектр пульсара в диапазоне 1–3 ГГц. Измеренные потоки показаны на Рис. 2. Средний поток пульсара по всей полосе для новых данных составляет  $212 \pm 5$  мкЯн. Полученный спектр может быть аппроксимирован степенным законом  $F_\nu \propto \nu^{-\alpha_\nu}$  со спектральным индексом  $\alpha_\nu = 0.5 \pm 0.1$ . Анализ показал, что поток пульсара в данных 2000 года на частоте  $\approx 1.4$  ГГц превосходит поток в данных 2013 года на той же частоте на уровне  $2.5\sigma$  (см. Рис. 2). Показано, что изменение потока может объясняться эффектами межзвёздных мерцаний.

В Разд. 3.3.4 представлен анализ профиля импульса и поляризации пульсара J1357–6429. Показано, что профиль имеет единственный пик с шириной около  $32^\circ$ . Излучение пульсара практически полностью поляризовано, что характерно для молодых пульсаров с аналогичным значением  $\dot{E}$ . Изменения степени линейной поляризации по спектру выявлены не были. Форма профиля импульса и свойства поляризации согласуются с полученными по данным наблюдений на частоте 1.4 ГГц на телескопе Parkes [19, 22], а также с архивными данными наблюдений на телескопе АТСА. Показано, что наблюдаемое увеличение ширины импульса на данных 2000 года может объясняться более низким спектральным разрешением.

Выполнена оценка меры вращения плоскости поляризации в направлении на пульсар J1357–6429. Полученное значение,  $-43 \pm 1$  рад м $^{-2}$ , сопоставимо на уровне  $2\sigma$  с предыдущими измерениями, но является более надёжным, т.к. получено с использованием более широкого частотного диапазона. Проведена оценка среднего значения галактического магнитного поля вдоль направления на пульсар. Полученное значение,  $-0.41 \pm 0.01$  мкГс, согласуется с оценками для большинства других пульсаров, расположенных в пределах  $2^\circ$  от позиции пульсара J1357–6429.

В Разд. 3.4 дана сводка основных результатов, полученных в главе, и даль-

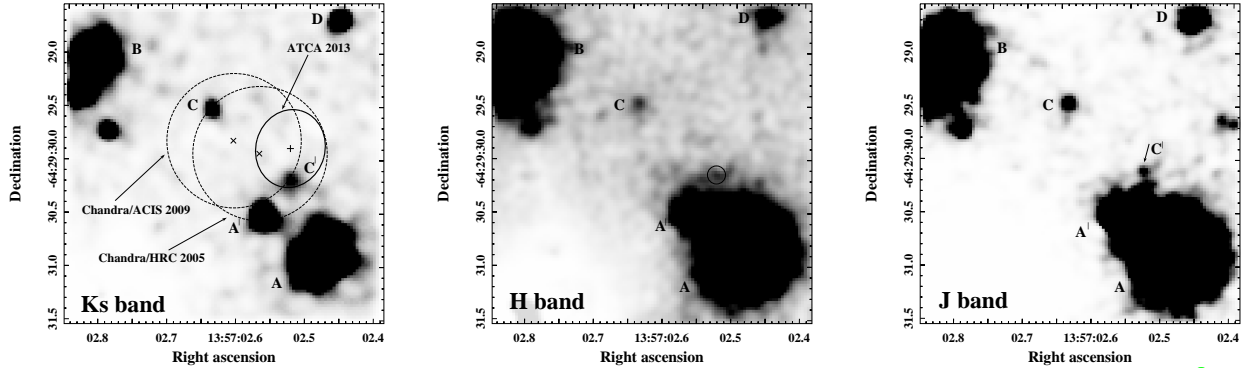


Рис. 3. Фрагменты изображений поля пульсара J1357–6429, полученных на телескопе VLT в фильтрах  $K_s$ ,  $H$  и  $J$ . Позиционные эллипсы демонстрируют неопределённость положения пульсара на уровне  $1\sigma$ . Буквами  $A$ ,  $A'$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  обозначены объекты поля [8].

нейшие перспективы. Причиной отличия предложенной ранее экстремально высокой поперечной скорости пульсара J1357–6429 от полученного в диссертации результата является сильная недооценка ошибок координат пульсара по данным наблюдений 2000 года на телескопе АТСА, описанных в работе [19]. Анализ показал, что последующие радионаблюдения с таким же пространственным разрешением, как наблюдения 2013 года, позволят определить значение собственного движения пульсара с точностью  $\lesssim 0''.15$  [A4]. Исходя из полученных координат пульсара, кандидат в оптическое отождествление, предложенный в работе [8], исключается на уровне 99%. Ввиду густой заселённости поля пульсара звёздами, дальнейшие поиски его оптического излучения должны осуществляться в наблюдениях с высоким пространственным разрешением, что возможно на космических обсерваториях или наземных оптических телескопах с системами адаптивной оптики.

В **Главе 4** представлены наблюдения пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне. Результаты главы опубликованы в работе [A6]. В Разд. 4.2.1 приведены детали наблюдений и обработки данных. Поле пульсара наблюдалось на телескопе VLT с применением системы адаптивной оптики в фильтрах  $J$ ,  $H$  и  $K_s$ . Качество полученных суммарных изображений в этих фильтрах соответствовало  $\approx 0''.10$ ,  $0''.13$  и  $0''.08$ , а полное время экспозиции каждого изображения составило 2 кс. В Разд. 4.2.2 и Разд. 4.2.3 описаны процедуры астрометрической привязки и фотометрической калибровки.

В Разд. 4.3.1 представлены фрагменты полученных изображений (Рис. 3). Рентгеновские позиции пульсара, определённые по данным наблюдений на обсерваториях *Chandra*/HRC и *Chandra*/ACIS, а также новая радиоинтерферометрическая позиция пульсара, полученная в Главе 3 по данным наблюдений на телескопе АТСА, показаны на изображении в фильтре  $K_s$ . Как видно из рисунка, в пределах радиоинтерферометрического позиционного эллипса детектирован единственный точечный источник  $C'$ . Источник перекрывается с рентгеновскими позиционными эллипсами пульсара. В фильтрах  $J$  и  $K_s$  объект детектирован на уровне  $\approx 4.5\sigma$ . Из-за недостаточно высокого качества изображения, в фильтре  $H$  надёжно детектировать источник не представляется возможным. Далее в работе объект  $C'$  рассмотрен как возможное отождествление пульсара в ближнем ИК диапазоне.

В Разд. 4.3.2 приведены результаты фотометрии ближайших к позиции пульсара источников поля, включая объект  $C'$ , а в Разд. 4.4 проанализи-

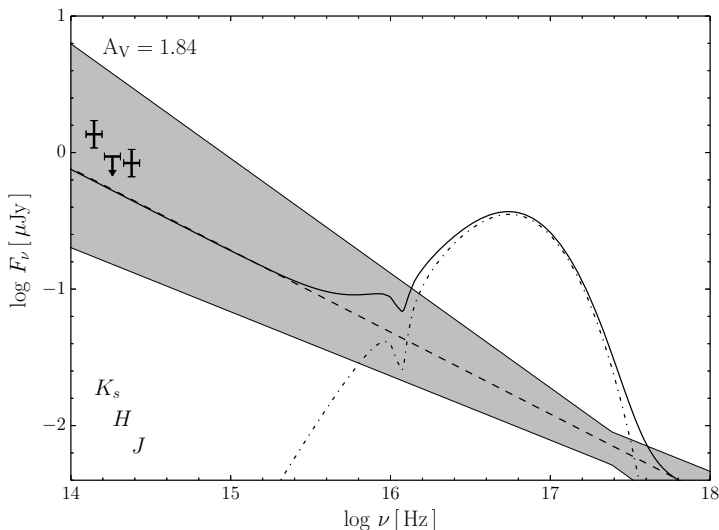


Рис. 4. Предположительный многоволновой непоглощённый спектр пульсара J1357–6429. Рентгеновская часть, полученная по архивным данным с телескопов *Chandra* и *XMM-Newton*, описывается моделью намагниченной водородной атмосферы и степенной моделью [8]. Сплошная, пунктирная и штрихпунктирная линии соответствуют полному рентгеновскому спектру и вкладам степенной и атмосферной компонент. Серый регион соответствует неопределённости степенной компоненты. Непоглощённые потоки в фильтрах *J* и *K<sub>s</sub>*, а также верхний предел в фильтре *H* объекта *C'* показаны жирными крестами.

рована их возможная связь с пульсаром или его туманностью. Величины источника *C'* в фильтрах *J* и *K<sub>s</sub>* составляют, соответственно,  $23.51 \pm 0.24$  и  $21.82 \pm 0.25$ . В фильтре *H* был оценён верхний предел на величину источника 22.8. По результатам фотометрии построена диаграмма цвет-цвет, которая часто используется для отождествления пульсаров по их необычным цветам [8, 24]. Однако такой анализ цветов пульсаров в ближнем ИК диапазоне оказался неинформативным.

Приведено сопоставление потоков объекта *C'* в ближнем ИК диапазоне с рентгеновскими данными (Рис. 4). Непоглощённый рентгеновский спектр воспроизведён с использованием спектральных параметров из работы [8]. Как видно из рисунка, потоки в ближнем ИК диапазоне сопоставимы на уровне  $1\sigma$  с экстраполяцией рентгеновского спектра. Подобная ситуация наблюдается в случае пульсара V0656+14 [24]. Для других пульсаров ИК-потоки в 10–100 раз ниже рентгеновской экстраполяции в ближний ИК диапазон. Таким образом, если объект *C'* является отождествлением пульсара J1357–6429, по своим многоволновым спектральным свойствам этот пульсар может быть похож на пульсар V0656+14.

В Разд. 4.4 приведены результаты анализа эффективностей трансформации энергии вращения пульсаров в рентгеновское и ИК излучение. Эффективности определяются параметрами  $\eta_X \equiv L_X/\dot{E}$  и  $\eta_{K_s} \equiv L_{K_s}/\dot{E}$ , в которых  $L_X$  и  $L_{K_s}$  соответствуют нетепловой светимости в рентгеновском диапазоне и светимости в фильтре *K<sub>s</sub>*. Показано, что для всех пульсаров, достоверно детектированных в ИК и рентгеновском диапазонах, наблюдается корреляция между параметрами  $\text{Log } \eta_{K_s}$  и  $\text{Log } \eta_X$  на соответствующей диаграмме. Позиции этих пульсаров на диаграмме могут быть аппроксимированы линейной регрессией с коэффициентом корреляции 0.99. Исключением является средневозрастной пульсар V0656+14, превосходящий аппроксимацию на порядок величины в линейной шкале. Показано, что если объект *C'* отвечает за ИК-излучение пульсара J1357–6429, то это ещё один пример пульсара с такой необычно высокой эффективностью. Такие примеры важны для понимания природы излучения пульсаров в оптическом и ИК диапазонах.

В Разд. 4.5 обсуждены основные выводы главы и перспективы исследований. Для подтверждения пульсарной природы объекта *C'* необходимы наблюдения в оптическом диапазоне с использованием инструментов с высоким

пространственным разрешением.

В **Главе 5** представлен анализ многоволновых наблюдений пульсара J0357+3205. Результаты главы опубликованы в работе [A2]. В Разд. 5.1 приведены параметры пульсара и сводка результатов предыдущих исследований. Радиотихий пульсар J0357+3205 с периодом 444 мс и характеристическим возрастом  $5.4 \times 10^5$  лет был обнаружен в гамма-диапазоне обсерваторией *Fermi* [25]. Расстояние до пульсара в 500 пк оценено с помощью эмпирического соотношения, используемого для определения расстояний до гамма-пульсаров с неизвестным значением меры дисперсии [26]. Пульсар и его туманность были обнаружены в рентгеновском диапазоне по данным наблюдений на обсерватории *Chandra* [26]. Последующие наблюдения на рентгеновской обсерватории *XMM-Newton* показали, что излучение самого пульсара является преимущественно нетепловым, но имеет мягкую тепловую компоненту [27]. Чтобы отождествить пульсар J0357+3205 и/или его туманность в оптическом диапазоне, были проведены наблюдения на телескопе GTC [A2]. В Разд. 5.2.1 приведены детали наблюдений и обработки данных. Пульсар наблюдался с помощью инструмента OSIRIS в фильтре  $g'$ . В результате было получено суммарное изображение со средним качеством 0".9 и полным временем экспозиции 9.8 кс. В Разд. 5.2.2 приведены астрометрическая привязка изображения и фотометрическая калибровка.

В Разд. 5.3.1 представлены фрагменты полученного изображения. В пределах рентгеновского позиционного эллипса пульсара на изображении никакого источника детектировано не было. По имеющимся оптическим данным была сделана консервативная оценка верхнего предела на звёздную величину пульсара  $g' \gtrsim 28^m.1$  на уровне  $3\sigma$ . Соответствующий предел на поток,  $\lesssim 0.023$  мкЯн, к настоящему моменту является наиболее жёстким ограничением потока пульсара в оптическом диапазоне. Рентгеновская туманность пульсара на оптическом изображении отождествлена не была.

В Разд. 5.3.2 представлен независимый анализ архивных данных рентгеновских наблюдений пульсара. Рентгеновский спектр объекта может быть аппроксимирован моделью, состоящей из степенной (PL) и тепловых эмиссионных компонент. Они отвечают, соответственно, за излучение магнитосферы и поверхности НЗ. Для тепловой компоненты использованы модели чернотельного излучения (BB) и намагниченной водородной атмосферы НЗ (NSA и NSMAX). Обе модели позволяют выполнить приемлемые аппроксимации, параметры которых приведены в Разд. 5.3.2. Показано, что радиус излучающей области для тепловой компоненты ( $0.5_{-0.2}^{+0.4}$  км), определяемый из модели BB, оказывается значительно меньше радиуса НЗ. Он согласуется с каноническим радиусом полярной шапки пульсара [28], который составляет около 0.32 км. В то же время модели NSA и NSMAX дают радиусы излучающей поверхности значительно больше радиуса шапки — соответственно,  $6_{-5}^{+10}$  км и  $8_{-5}^{+12}$  км. Эти значения в пределах неопределённости согласуются со стандартным радиусом НЗ (10–20 км). Несмотря на то что лучшие аппроксимации моделей NSA и NSMAX дают согласующиеся параметры, в работе приняты параметры аппроксимации модели NSMAX, т.к. данная модель учитывает частичную ионизацию атмосферной плазмы. Этот эффект важен для намагниченных водородных атмосфер с эффективными температурами менее 90 эВ [29], что имеет место в случае пульсара J0357+3205.

В Разд. 5.4 приведены результаты многоволнового анализа. Выполне-

на оценка минимального расстояния до объекта с использованием значения межзвёздного поглощения в направлении на пульсар. Полученное значение расстояния,  $\sim 270$  пк, сопоставимо с предыдущими оценками и со значением расстояния до пульсара в 500 пк, принятым для рентгеновского анализа. Адекватность оценки расстояния 500 пк в работе подтверждена независимо через расчёт светимостей пульсара в оптическом и рентгеновском диапазонах. Показано, что полученные значения для расстояния 500 пк,  $L_V \lesssim 1.1 \times 10^{27}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  и  $L_X = 6.0 \times 10^{29}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , согласуются с эмпирическими зависимостями светимости и эффективности от возраста для пульсаров, детектированных в оптическом и рентгеновском диапазонах.

В Разд. 5.4 также приведено сопоставление непоглощённых спектров пульсара в рентгеновском и гамма диапазонах с полученным оптическим верхним пределом. Оптический верхний предел лежит на два порядка ниже, чем экстраполяция спектральной компоненты PL в оптический диапазон. Это указывает на наличие излома в спектре степенной компоненты между оптическим и рентгеновским диапазонами. Такой излом наблюдается для всех средневозрастных пульсаров, детектированных в обоих диапазонах. Экстраполяция степенного спектра пульсара из гамма-диапазона находится существенно ниже оптического верхнего предела.

Исходя из направления и величины собственного движения и возраста пульсара, в Разд. 5.4 высказано предположение о месте его рождения. Предполагается, что это звёздное скопление, содержащее звезду  $\lambda$ -Ориона. Это активная область звёздообразования возрастом  $5 \times 10^6$  лет, расположенная в  $\sim 32^\circ$  от пульсара на расстоянии  $\sim 450 \pm 50$  пк от Земли. Некоторые авторы предполагают, что расширяющееся молекулярное кольцо, окружающее скопление, является остатком сверхновой, оставленным взрывом сверхновой II типа массивного компаньона звезды  $\lambda$  Ori около миллиона лет назад [30]. Исходя из этого предположения, в работе независимо оценён возраст пульсара,  $(0.2-1.3) \times 10^6$  лет. Полученное значение сопоставимо с возрастом пульсара, оценённым по замедлению вращения.

Полученный диапазон значений возраста пульсара и эффективная температура НЗ  $36_{-6}^{+8}$  эВ, определённая из аппроксимации моделью NSMAX+PL, в Разд. 5.4 сопоставлены с теоретическими кривыми остывания НЗ. Показано, что пульсар J0357+3205 находится среди самых холодных из известных остывающих НЗ с измеренными температурами.

В Разд. 5.5 кратко описаны основные результаты главы и дальнейшие перспективы. Глубокие наблюдения пульсара J0357+3205 не выявили его отождествления в оптическом диапазоне. Однако из сопоставления полученного оптического верхнего предела на поток излучения пульсара с его тепловым спектром сделан вывод, что тепловое излучение полной поверхности НЗ может быть детектировано в УФ диапазоне, в котором оно, вероятно, преобладает над нетепловым излучением и излучением горячих пятен пульсара. Таким образом, пульсар J0357+3205 является интересным объектом для изучения в УФ диапазоне.

**Глава 6** посвящена анализу многоволновых наблюдений пульсара J2021+3651 в туманности Dragonfly (Стрекоза). Результаты представленного анализа опубликованы в работах [A3] и [A5]. В Разд. 6.1 приведены сводка параметров пульсара и история его наблюдений. Объект был обнаружен в радиодиапазоне на телескопе Arecibo [31]. По своим характеристикам

(период 104 мс, возраст  $17 \times 10^3$  лет, скорость потери вращательной энергии  $\dot{E} \approx 3.4 \times 10^{36}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ ) пульсар J2021+3651 является одним из самых молодых и энергичных среди известных пульсаров. Гамма-наблюдения с помощью обсерваторий *AGILE* [32] и *Fermi* [33] выявили, что профиль импульса излучения пульсара имеет двойной пик [1]. По данным наблюдений на обсерватории *Chandra* пульсар был идентифицирован в рентгеновском диапазоне, в котором были выявлены и слабые пульсации объекта с двухпиковым профилем на уровне  $4\sigma$  [33, 34]. В рентгеновских наблюдениях была также обнаружена протяжённая пульсарная туманность G75.2+0.1, самая яркая часть которой имеет торообразную морфологию с джетами вдоль оси тора. По своим многоволновым свойствам пульсар J2021+3651 и его туманность напоминают систему пульсара Vela, но, в отличие от последней, система этого пульсара никогда не изучалась в оптическом диапазоне. В работе представлены результаты первых глубоких оптических наблюдений поля пульсара, проведённых на телескопе GTC [A3, A5]. В Разд. 6.2.1 приведены детали наблюдений и обработки данных. Пульсар наблюдался с помощью прибора OSIRIS в фильтре  $r'$ . В результате наблюдений было получено суммарное изображение со средним качеством  $0''.9$  и полным временем экспозиции  $\approx 2.5$  кс. Процедуры астрометрической привязки и фотометрической калибровки описаны в Разд. 6.2.2.

Фрагменты полученного изображения представлены в Разд. 6.3.1. Излучение рентгеновской туманности на оптическом изображении отождествлено не было. В пределах рентгеновского позиционного эллипса пульсара также не было обнаружено никаких достоверно детектируемых точечных источников. По этой причине в работе приведены оценки верхних пределов на потоки пульсара и туманности на уровне  $3\sigma$ , соответственно,  $\lesssim 0.04$  мкЯн ( $r' \gtrsim 27.2$ ) и  $\lesssim 0.36$  мкЯн ( $r' \gtrsim 24.8$ ).

В Разд. 6.3.2 представлено соотношение поглощение-расстояние в направлении на пульсар, построенное с помощью звёзд красного сгущения как стандартных свечей. Оно было использовано для независимой оценки расстояния до пульсара.

В Разд. 6.3.3 представлен анализ рентгеновских данных. Для моделирования спектра пульсара применялась сумма поглощённых степенной и тепловой компонент. Для тепловой компоненты использованы чернотельная модель и модель намагниченной водородной атмосферы НЗ. Как и в предыдущей главе, в рассмотрении модели намагниченной атмосферы выбор был сделан в пользу семейства моделей NSMAX. Показано, что спектр туманности может быть описан однокомпонентной степенной моделью. Параметры всех аппроксимаций представлены в Разд. 6.3.3. Из соотношения поглощение-расстояние, представленного в Разд. 6.3.2, и полученных параметров аппроксимаций рентгеновского спектра получено значение расстояния до пульсара J2021+3651 в  $1.8_{-1.4}^{+1.7}$  кпк.

В Разд. 6.3.4 приведён многоволновой спектр пульсара. Показано, что верхний предел на оптический поток пульсара не превосходит экстраполяцию рентгеновского спектра в оптический диапазон. Это типично для изученных в обоих диапазонах пульсаров, излучающих за счёт потерь вращательной энергии. Однако для них обычно наблюдается излом в нетепловом спектре между оптическим и рентгеновским диапазонами, с характерным уплотнением в оптическом диапазоне. Наличие подобного излома не исключается и в случае пульсара J2022+3842, хотя экстраполяция рентгеновской степенной

компоненты имеет большую неопределённость и оптический верхний предел недостаточно глубокий. Показано, что верхний предел на оптический поток туманности превосходит экстраполяцию соответствующего рентгеновского спектра, поэтому наличие излома в её спектре остаётся под вопросом.

В Разд. 6.4 и Разд. 6.5 приведены обсуждение, перспективы исследований и сводка полученных результатов главы. Соотношение поглощение-расстояние для пульсара, построенное с использованием звёзд красного сгущения и использованное в рентгеновском спектральном анализе, указывает на то, что пульсар, вероятно, находится намного ближе, чем определяется из меры дисперсии и модели галактического распределения свободных электронов. Полученная оценка,  $D = 1.8_{-1.4}^{+1.7}$  кпк, в пределах ошибок соответствует значению, полученному по данным наблюдений в гамма-диапазоне. Если оценка верна, то представляется возможным измерение параллакса и собственного движения пульсара методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами.

Значение непоглощённого нетеплового рентгеновского потока пульсара в диапазоне 2–10 кэВ, полученного из рентгеновских спектральных аппроксимаций, составляет  $\log F_X = -13.5_{-0.8}^{+0.7}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. С учётом полученного в работе диапазона расстояний, была сделана оценка на соответствующие рентгеновские светимость и эффективность  $\log L_X = 31.1_{-2.1}^{+1.3}$  эрг с<sup>-1</sup> и  $\log \eta_X = -5.4_{-2.0}^{+1.3}$ . Аналогичные оценки пределов на оптические светимость и эффективность пульсара составляют  $\log L_{\text{Opt}} \lesssim 29.9$  эрг с<sup>-1</sup> и  $\log \eta_{\text{Opt}} \lesssim -6.7$ . Приводится сравнение светимостей и эффективностей пульсара J2021+3651 в обоих диапазонах с данными для других пульсаров. Из сравнения следует, что пульсар J2021+3651 является неэффективным в оптическом и рентгеновском диапазонах, если сравнивать его с другими, существенно более молодыми и более старыми пульсарами. Таким образом, обнаружен и исследован новый объект из набора пульсаров, схожих по характеристикам с пульсаром Vela и формирующих минимум в точке  $\sim 10^4$  лет на зависимостях оптической и рентгеновской эффективностей пульсаров от возраста [35]. Такой минимум не наблюдается на соответствующей зависимости для гамма-диапазона [1]. Эта и другие наблюдаемые характеристики, описанные выше, подтверждают схожесть системы Dragonfly с пульсаром Vela и его туманностью.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы. Проведены детальные исследования четырёх гамма-пульсаров на основе оригинальных наблюдений в оптическом, ИК и радио диапазонах, а также архивных радио и рентгеновских данных. Получены следующие результаты:

1. По данным наблюдений пульсара J1048–5832 в фильтрах  $V$  и  $R$  на телескопе VLT детектирован слабый оптический источник. Показано, что источник пространственно перекрывается с яркой компактной структурой рентгеновской туманности пульсара, детектируемой на изображениях с телескопа *Chandra*. Проведена фотометрия оптического источника в обоих фильтрах. Полученный цвет,  $V - R \approx 0.6$ , согласуется с типичными цветами структур туманностей пульсаров, детектируемых в оптическом диапазоне. Это говорит о том, что источник может являться оптическим отождествлением структуры туманности пульсара J1048–5832.
2. Радиоинтерферометрические наблюдения пульсара J1357–6429 в диапазоне 1–3 ГГц на телескопе АТСА позволили измерить его точную пози-

цию, которая исключает предложенное ранее оптическое отождествление пульсара. Изучены спектр и поляризация объекта. Получена независимая оценка меры вращения плоскости поляризации в направлении на пульсар  $-43 \pm 1$  рад  $\text{м}^{-2}$ . Соответствующее среднее значение галактического магнитного поля вдоль направления на пульсар,  $-0.41 \pm 0.01$  мкГс, близко к значениям для большинства других пульсаров, расположенных в пределах  $2^\circ$  от позиции J1357–6429. Проведён независимый анализ архивных радиоинтерферометрических данных наблюдений пульсара. Сопоставление всех данных позволило установить верхний предел на собственное движение объекта,  $106$  миллисекунд дуги  $\text{год}^{-1}$ , что соответствует пределу на поперечную скорость  $v_{tr} \lesssim 1300$  км  $\text{с}^{-1}$ .

3. По данным наблюдений поля пульсара J1357–6429 в фильтрах  $J$ ,  $H$  и  $K_s$  на телескопе VLT детектирован слабый источник, который может отвечать за излучение пульсара в ближнем ИК диапазоне. Его величины составляют  $J = 23.51 \pm 0.24$  и  $K_s = 21.82 \pm 0.25$ . В фильтре  $H$  установлен верхний предел на его яркость  $H \gtrsim 22.8$ . Поток источника сопоставимы с экстраполяцией рентгеновского спектра пульсара в ближний ИК диапазон. Если обнаруженный источник действительно отвечает за излучение пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне, то пульсар демонстрирует необычно высокую эффективность по отношению к рентгеновской в сравнении с другими пульсарами, детектированными в обоих диапазонах.
4. По данным наблюдений поля пульсара J0357+3205 в фильтре  $g'$  на телескопе GTC был получен верхний предел на поток объекта в оптическом диапазоне  $\lesssim 0.023$  мкЯн ( $g' \gtrsim 28.1$ ). Сопоставление верхнего предела с рентгеновскими данными выявило сильный излом в спектре излучения между оптическим и рентгеновским диапазонами. Независимый анализ архивных рентгеновских данных позволил определить температуру поверхности НЗ  $36_{-6}^{+8}$  эВ. Такое значение подтверждает вывод о том, что J0357+3205 является одной из самых холодных среди НЗ с измеренными температурами.
5. По данным глубоких наблюдений пульсара J2021+3651 и его туманности Dragonfly на телескопе GTC в фильтре  $r'$  выполнены оценки верхних пределов на потоки излучения пульсара и туманности,  $\lesssim 0.04$  мкЯн ( $r' \gtrsim 27.2$ ) и  $\lesssim 0.36$  мкЯн ( $r' \gtrsim 24.8$ ), соответственно. Проведена независимая оценка расстояния до пульсара с учётом архивных данных рентгеновских наблюдений и соотношения межзвёздное поглощение-расстояние, построенного с использованием звёзд красного сгущения как стандартных свечей. Полученное значение,  $D = 1.8_{-1.4}^{+1.7}$  кпк, и многоволновой анализ указывают на то, что пульсар J2021+3651 является неэффективным в оптическом и рентгеновском диапазонах, хотя его эффективность в гамма-диапазоне соответствует среднему для гамма-пульсаров подобного возраста.

Таким образом, в результате целенаправленных многоволновых наблюдений получены важные спектральные и энергетические характеристики исследованных гамма-пульсаров и новые ограничения на физические параметры НЗ, в том числе в тех случаях, когда их отождествления в каком-либо из спектральных диапазонов не удалось достичь. Указаны перспективные направления дальнейшего исследования рассмотренных объектов.



## Публикации по теме диссертации

- A1** Deep optical imaging of the  $\gamma$ -ray pulsar J1048–5832 with the VLT / A. Danilenko, A. Kirichenko, J. Sollerman et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2013. — Vol. 552. — P. A127.
- A2** Deep optical observations of the  $\gamma$ -ray pulsar J0357+3205 / A. Kirichenko, A. Danilenko, Y. Shibano et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2014. — Vol. 564. — P. A81.
- A3** Optical Observations of PSR J2021+3651 in the Dragonfly Nebula With the GTC / A. Kirichenko, A. Danilenko, P. Shternin et al. // *Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 802. — P. 17.
- A4** Observations of PSR J1357–6429 at 2.1 GHz with the Australia Telescope Compact Array / A. Kirichenko, Y. Shibano, P. Shternin et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 452. — Pp. 3273–3280.
- A5** Optical observations of PSR J2021+3651 with the GTC / E. B. Ryspaeva, A. Y. Kirichenko, Y. A. Shibano et al. // *Journal of Physics Conference Series*. — 2015. — Vol. 661, no. 1. — P. 012011.
- A6** Near-infrared observations of PSR J1357–6429 / D. Zyuzin, S. Zharikov, Y. Shibano et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2016. — Vol. 455. — Pp. 1746–1750.

## Список литературы

- [1] The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-Ray Pulsars / A. A. Abdo, M. Ajello, A. Al-lafort et al. // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2013. — Vol. 208. — P. 17.
- [2] *Thompson D. J.* Gamma ray astrophysics: the EGRET results // *Reports on Progress in Physics*. — 2008. — Vol. 71, no. 11. — P. 116901.
- [3] Discovery of Nine Gamma-Ray Pulsars in Fermi Large Area Telescope Data Using a New Blind Search Method / H. J. Pletsch, L. Guillemot, B. Allen et al. // *Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 744. — P. 105.
- [4] *Butler R. F., Golden A., Shearer A.* Detection of new optical counterpart candidates to PSR B1951+32 with HST/WFPC2 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — Vol. 395. — Pp. 845–851.
- [5] Deep optical observations of the fields of two nearby millisecond pulsars with the VLT / F. K. Sutaria, A. Ray, A. Reisenegger et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 406. — Pp. 245–252.
- [6] A likely optical counterpart of the G292.0+1.8 pulsar wind nebula / S. V. Zharikov, Y. A. Shibano, D. A. Zyuzin et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2008. — Vol. 492. — Pp. 805–814.
- [7] Optical identification of the 3C 58 pulsar wind nebula / Y. A. Shibano, N. Lundqvist, P. Lundqvist et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2008. — Vol. 486. — Pp. 273–282.
- [8] Possible optical counterpart of PSR J1357-6429 / A. Danilenko, A. Kirichenko, R. E. Mennickent et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 540. — P. A28.
- [9] Infrared imaging and polarimetric observations of the pulsar wind nebula in SNR G21.5-0.9 / A. Zajczyk, Y. A. Gallant, P. Slane et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 542. — P. A12.
- [10] *Shearer A., Golden A.* Implications of the Optical Observations of Isolated Neutron Stars // *Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 547. — Pp. 967–972.
- [11] Spectral evolution and polarization of variable structures in the pulsar wind nebula of PSR B0540-69.3 / N. Lundqvist, P. Lundqvist, C.-I. Björnsson et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 413. — Pp. 611–627.
- [12] 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.

- [13] Parallax Observations with the Hubble Space Telescope Yield the Distance to Geminga / P. A. Caraveo, G. F. Bignami, R. Mignani, L. G. Taff // *Astrophysical Journal*. — 1996. — Vol. 461. — P. L91.
- [14] *Mignani R. P.* Multi-Wavelength Observations of Pulsars // Electromagnetic Radiation from Pulsars and Magnetars / Ed. by W. Lewandowski, O. Maron, J. Kijak. — Vol. 466 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2012. — P. 3.
- [15] *Даниленко А. А.* — Нейтронные звёзды в оптическом и инфракрасном диапазонах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 2013.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] *Zavlin V. E.* First X-Ray Observations of the Young Pulsar J1357-6429 // *Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 665. — Pp. L143–L146.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] *Durant M., Kargaltsev O., Pavlov G. G.* Multiwavelength Spectroscopy of PSR B0656+14 // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 743. — P. 38.
- [25] Detection of 16 Gamma-Ray Pulsars Through Blind Frequency Searches Using the Fermi LAT / A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello et al. // *Science*. — 2009. — Vol. 325. — Pp. 840–.
- [26] Discovery of a Faint X-Ray Counterpart and a Parsec-long X-Ray Tail for the Middle-aged,  $\gamma$ -Ray-only Pulsar PSR J0357+3205 / A. De Luca, M. Marelli, R. P. Mignani et al. // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 733. — P. 104.
- [27] PSR J0357+3205: The Tail of the Turtle / M. Marelli, A. De Luca, D. Salvetti et al. // *Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 765. — P. 36.
- [28] *Sturrock P. A.* A Model of Pulsars // *Astrophysical Journal*. — 1971. — Vol. 164. — P. 529.
- [29] *Potekhin A. Y., Chabrier G., Shibano Y. A.* Partially ionized hydrogen plasma in strong magnetic fields // *Physical Review E*. — 1999. — Vol. 60. — Pp. 2193–2208.
- [30] *Dolan C. J., Mathieu R. D.* A Photometric Study of the Young Stellar Population throughout the  $\lambda$  Orionis Star-Forming Region // *Astronomical Journal*. — 2002. — Vol. 123. — Pp. 387–403.
- [31] PSR J2021+3651: A Young Radio Pulsar Coincident with an Unidentified EGRET  $\gamma$ -Ray Source / M. S. E. Roberts, J. W. T. Hessels, S. M. Ransom et al. // *Astrophysical Journal*. — 2002. — Vol. 577. — Pp. L19–L22.
- [32] Discovery of High-Energy Gamma-Ray Pulsations from PSR J2021+3651 with AGILE / J. P. Halpern, F. Camilo, A. Giuliani et al. // *Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 688. — Pp. L33–L36.
- [33] Pulsed Gamma-rays from PSR J2021+3651 with the Fermi Large Area Telescope / A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello et al. // *Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 700. — Pp. 1059–1066.
- [34] Observations of PSR J2021+3651 and its X-Ray Pulsar Wind Nebula G75.2+0.1 / J. W. T. Hessels, M. S. E. Roberts, S. M. Ransom et al. // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 612. — Pp. 389–397.
- [35] *Zharikov S., Shibano Y., Komarova V.* Radiation efficiencies of the pulsars detected in the optical range // *Advances in Space Research*. — 2006. — Vol. 37. — Pp. 1979–1983.