

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

На правах рукописи

Кириченко Аида Юрьевна

Многоволновые наблюдения гамма-пульсаров

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Диссертация

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

Шибанов Ю. А.

Санкт-Петербург

2016

Оглавление

Введение	4
1 Методы исследования	12
1.1 Телескопы и методы наблюдений	12
1.2 Редукция и анализ данных	13
1.2.1 Наблюдения в оптическом и ближнем ИК диапазонах	13
1.2.2 Радиointерферометрические наблюдения	15
2 Оптические наблюдения гамма-пульсара J1048–5832 на телескопе VLT	18
2.1 Введение	18
2.2 Результаты	19
2.2.1 Окрестность пульсара	19
2.2.2 Поиск пульсара и/или структуры его туманности	19
2.3 Заключение к главе	22
3 Наблюдения гамма-пульсара J1357–6429 на частоте 2.1 ГГц на телескопе ATCA	25
3.1 Введение	25
3.2 Наблюдения и обработка данных	26
3.3 Результаты	28
3.3.1 Поле пульсара	28
3.3.2 Астрометрия и собственное движение пульсара	31
3.3.3 Плотности потока и спектр пульсара	37
3.3.4 Профиль импульса и поляризация	39
3.4 Заключение к главе	43
4 Наблюдения гамма-пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне	45
4.1 Введение	45
4.2 Данные телескопа VLT	45
4.2.1 Наблюдения и обработка данных	45

4.2.2	Астрометрия	46
4.2.3	Фотометрическая калибровка	47
4.3	Результаты	47
4.3.1	Поиск излучения пульсара	47
4.3.2	Фотометрия	49
4.4	Обсуждение	49
4.5	Заключение к главе	55
5	Глубокие оптические наблюдения гамма-пульсара J0357+3205	56
5.1	Введение	56
5.2	Данные наблюдений на телескопе GTC	57
5.2.1	Наблюдения и обработка данных	57
5.2.2	Астрометрическая привязка и фотометрическая калибровка	58
5.3	Результаты	58
5.3.1	Поле пульсара	58
5.3.2	Независимый анализ рентгеновского спектра	60
5.4	Обсуждение	65
5.5	Заключение к главе	69
6	Оптические наблюдения гамма-пульсара J2021+3651 в туманности Dragonfly на телескопе GTC	71
6.1	Введение	71
6.2	Данные наблюдений на телескопе GTC	73
6.2.1	Наблюдения и обработка данных	73
6.2.2	Астрометрическая привязка и фотометрическая калибровка	73
6.3	Результаты	73
6.3.1	Поиск оптического излучения пульсара и туманности	73
6.3.2	Расстояние и межзвёздное поглощение	76
6.3.3	Рентгеновский спектральный анализ	78
6.3.4	Многоволновой спектр пульсара и туманности	81
6.4	Обсуждение	83
6.5	Заключение к главе	87
	Заключение	88
	Литература	91

Введение

Актуальность темы диссертации

Пульсар — это вращающаяся нейтронная звезда, 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, знаменитые 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 (см. работу [2] и Таблицу 1). 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” [3]. Эти поиски оказались успешными — в них было обнаружено около трёх десятков гамма-пульсаров (см., например, работы [4] и [5]). Карта распределения гамма-пульсаров по Галактике приведена на Рис. 1 (см. работу [1] и ссылки в ней).

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 нейтронных звёзд 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 резуль-

Name	P (s)	τ (Ky)	\dot{E} (erg/s)	F_E (erg/cm ² s)	d (kpc)	L_{HE} (erg/s)	η (E>1 eV)
Crab	0.033	1.3	4.5×10^{38}	1.3×10^{-8}	2.0	5.0×10^{35}	0.001
B1509–58	0.150	1.5	1.8×10^{37}	8.8×10^{-10}	4.4	1.6×10^{35}	0.009
Vela	0.089	11	7.0×10^{36}	9.9×10^{-9}	0.3	8.6×10^{33}	0.001
B1706–44	0.102	17	3.4×10^{36}	1.3×10^{-9}	2.3	6.6×10^{34}	0.019
B1951+32	0.040	110	3.7×10^{36}	4.3×10^{-10}	2.5	2.5×10^{34}	0.007
Geminga	0.237	340	3.3×10^{34}	3.9×10^{-9}	0.16	9.6×10^{32}	0.029
B1055–52	0.197	530	3.0×10^{34}	2.9×10^{-10}	0.72	1.4×10^{33}	0.048
B1046–58	0.124	20	2.0×10^{36}	3.7×10^{-10}	2.7	2.6×10^{34}	0.013
B0656+14	0.385	100	4.0×10^{34}	1.6×10^{-10}	0.3	1.3×10^{32}	0.003
J0218+4232	0.002	460,000	2.5×10^{35}	9.1×10^{-11}	2.7	6.4×10^{33}	0.026

Таблица 1. Сводка гамма-пульсаров, детектированных инструментом EGRET (гамма-обсерватория им. Комптона). Приведённые параметры соответствуют (слева направо) периоду, возрасту, скорости потери вращательной энергии, потоку на высоких энергиях, расстоянию, светимости на высоких энергиях и эффективности трансформации вращательной энергии в излучение на высоких энергиях. В верхней и нижней частях таблицы приводятся, соответственно, достоверно детектированные пульсары и кандидаты в пульсары. Таблица позаимствована из работы [2] с разрешения автора.

таты – рентгеновские отождествления были найдены примерно для половины известных гамма-пульсаров [1]. Исследования гамма-пульсаров в рентгеновском диапазоне предоставляют ценную информацию о механизмах излучения нейтронных звёзд, 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 нейтронных звёзд, а также эффективность трансформации вращательной энергии нейтронных звёзд 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 (см. Таблицу 1). Все они являются молодыми или средневозрастными объектами ($\sim 10^3$ - 10^6 лет). Ещё один 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 В1951+32 [6] и J1024–0719 [7]. Объекты J1124–5916 и J0205–6449 были ассоциированы с яркими оптическими пульсарными туманностями, хотя сами пульсары как точечные оптические источники отождествлены не были [8, 9].

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 ≈ 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 [10]), а также в ближнем ИК диапазоне была обнаружена туманность, пространственно перекрывающаяся с позицией пульсара J1833–1034 [11]. В большинстве случаев по данным оптических наблюдений пульсаров представлялось возможным установить только верхние пределы на потоки их излучения.

На Рис. 2 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* [12]. 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 звезды и туманности, что было сделано, например, для пульсара В0540–69 [13, 14]. Высокое пространственное разрешение также способствует

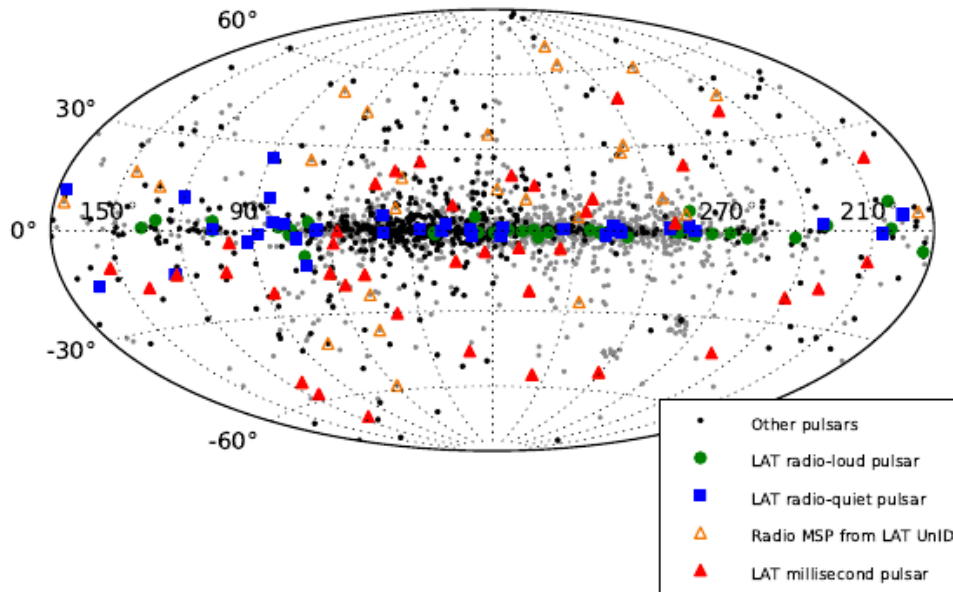


Рис. 1. Карта распределения гамма-пульсаров в галактических координатах. Зелёные и синие символы соответствуют данным для радиопульсаров и радиотихих пульсаров. Красным и белым треугольниками обозначены данные для миллисекундных пульсаров с, соответственно, детектированными и недетектированными пульсациями в гамма-диапазоне. Чёрные точки демонстрируют данные для других пульсаров с недетектированными пульсациями в гамма-диапазоне. Рисунок позаимствован из работы [1] с разрешения авторов.

измерению более точных абсолютных позиций объектов, их собственного движения и параллаксов. Такие измерения проведены для пульсаров Vela [15], Geminga [16] и других (см. работу [17] 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

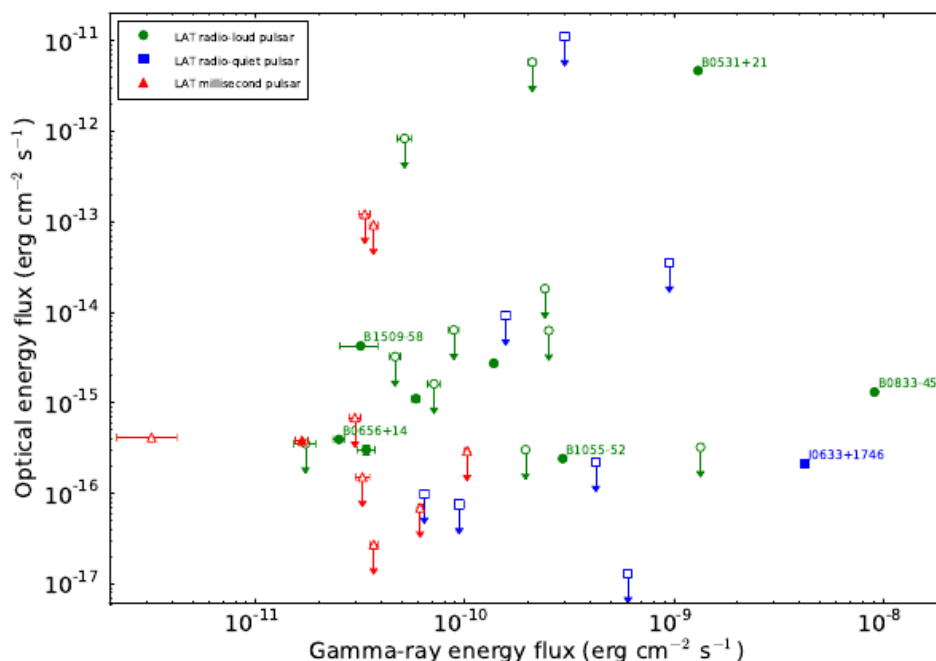


Рис. 2. Сопоставление потоков пульсаров в гамма и оптическом диапазонах. Символы соответствуют приведённым на Рис. 1. Рисунок позаимствован из работы [1] с разрешения авторов.

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 его потоков, поляризации 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 нейтронной звезды по рентгеновским данным и подтверждение вывода о том, что J0357+3205 является одной из самых холодных среди изолированных нейтронных звёзд 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

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 РАН.

Публикации по теме диссертации

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. Публикации с результатами работы в реферируемых журналах включают:

- A1** Deep optical imaging of the γ -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 γ -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.

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.

Глава 1

Методы исследования

1.1 Телескопы и методы наблюдений

VLT, Very Large Telescope – комплекс, состоящий из четырёх оптических телескопов, каждый из которых имеет диаметр зеркала 8.2 м. Телескопы объединены в единую систему, построенную и управляемую Европейской Южной Обсерваторией (European South Observatory, ESO). Оптические данные, анализируемые в работе, были получены с помощью установленного на телескопе UT1 прибора Focal Reducer and low dispersion Spectrograph (FORIS¹). В режиме стандартного разрешения прибор предоставляет масштаб изображения и поле зрения, соответственно, $\sim 0''.2/\text{пиксель}$ и $\sim 6'.8 \times 6'.8$. В работе также анализируются данные наблюдений в ближнем ИК диапазоне, полученные прибором Near-Infrared Imager and Spectrograph (CONICA) с помощью системы адаптивной оптики Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS) (сокращённо NaCo) на телескопе UT4. Используемая инструментальная мода предоставляет масштаб изображения $0''.027/\text{пиксель}$ и поле зрения $\sim 27'' \times 27''$.

GTC, The Gran Telescopio CANARIAS – оптический телескоп с сегментированным зеркалом диаметром 10.4 м, являющийся в настоящее время самым крупным оптическим телескопом в мире. Телескоп принадлежит обсерватории Roque de los Muchachos. Для получения данных, рассматривающихся в настоящей работе, был использован детектор Optical System for Imaging and low Resolution Integrated Spectroscopy (OSIRIS²). В режиме стандартного разрешения масштаб изображения и поле зрения прибора составляют, соответственно, $0''.254/\text{пиксель}$ и $7'.8 \times 7'.8$.

ATCA, Australia Telescope Compact Array – радиоинтерферометр, состоящий из шести ан-

¹см. <http://www.eso.org/instruments/fors/>

²см. <http://www.gtc.iac.es/instruments/osiris/>

тени диаметром 22 м. Интерферометр принадлежит организации The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Размер максимальной базы интерферометра составляет около 6 км. Для наблюдений, описанных в этой работе, использовался режим коррелятора “пульсарный бининг”, который позволяет проводить наблюдения с высоким временным разрешением. Режим бининга разрешает фазу наблюдаемого пульсара, разделяя при этом его полный период на 32 независимых временных бина.

1.2 Редукция и анализ данных

1.2.1 Наблюдения в оптическом и ближнем ИК диапазонах

Для данных наблюдений, полученных в оптическом и ближнем ИК диапазонах, в работе используются стандартные методы обработки и анализа. Методы включают несколько этапов: первичную редукцию, вычитание неба, астрометрическую привязку и фотометрию. В настоящей работе все приведённые пункты осуществляются с помощью пакетов программ Image Reduction and Analysis Facility (IRAF³) и Munich Image Data Analysis System (MIDAS⁴).

Первичная редукция, в свою очередь, состоит из стандартных процедур, включающих вычитание электронного смещения, коррекцию на плоское поле и удаление следов космических лучей. Подробное описание природы соответствующих эффектов приводится в руководствах по редукции данных⁵. В ближнем ИК диапазоне после первичной редукции выполняется вычитание фона неба, который существенно варьируется во время наблюдений.

Для определения точных координат целевых источников необходимо проведение астрометрической привязки изображений. Для этого пиксельные координаты ярких объектов, детектируемых на изображении, сопоставляются соответствующим мировым координатам этих объектов из открытых каталогов. Для более точной привязки в каталогах выбираются источники с небольшими позиционными ошибками и незначительным собственным движением. При этом номинальная точность лучших астрометрических каталогов составляет 0".2. Астрометрическая привязка осуществляется с помощью процедуры `ccmap/cctran`⁶ пакета IRAF.

Фотометрию изображений можно выполнять разными способами, однако в настоящей

³см. <http://iraf.noao.edu/>

⁴см. <http://www.eso.org/sci/software/esomididas/>

⁵см., например, “A User’s Guide to CCD Reductions with IRAF”, Philip Massey, 1997, <ftp://iraf.noao.edu/ftp/docs/>

⁶см. <http://stdas.stsci.edu/cgi-bin/gethelp.cgi?ccmap>

работе обсуждается только метод апертурной фотометрии. Суть метода заключается в подсчёте суммы всех каунтов источника в некой апертуре с внесением поправки на уровень фона. При этом средний уровень фона измеряется в кольце вокруг источника. Таким образом, поток источника вычисляется как

$$f = sum - area \times msky, \quad (1.1)$$

где sum – сумма каунтов, $area$ – площадь апертуры, а $msky$ – средний уровень фона.

Соответствующая ошибка на поток определяется как

$$\Delta f = \sqrt{\frac{f}{epadu} + area \times stdev^2 + area^2 \times \frac{stdev^2}{nsky}}, \quad (1.2)$$

где $epadu$, $stdev$ и $nsky$ соответствуют коэффициенту усиления ПЗС, стандартному отклонению каунтов и количеству пикселей в апертуре.

Используя значения полного времени экспозиции t_{exp} и нуля-пункта m_0 , по полученному значению потока можно вычислить звёздную величину объекта

$$m = m_0 - 2.5 \times \lg f + 2.5 \times \lg t_{exp} \quad (1.3)$$

с соответствующей ошибкой

$$\Delta m = 1.0857 \times \frac{\Delta f}{f}. \quad (1.4)$$

Если целевой объект не детектируется на изображениях, проводится оценка верхнего предела на поток его излучения. Величина верхнего предела определяется как

$$m = -2.5 \times \lg \left(3\sigma\sqrt{A}/t_{exp} \right) + m_0, \quad (1.5)$$

где A – площадь апертуры, σ – стандартное отклонение фона на изображениях, а m_0 – соответствующий нуль-пункт.

Нуль-пункт m_0 в уравнениях (1.4) и (1.5) определяет переход от инструментальных величин к стандартным. Он оценивается сопоставлением инструментальных значений потоков звёзд-стандартов, которые наблюдаются в ночи вместе с целевым источником, и соответствующих им стандартных потоков из каталогов. Для каждой фотометрической системы применяются свои уравнения перехода от инструментальных величин к стандартным, поэтому в настоящей работе мы не будем их приводить⁷.

Для получения конечного значения величины потока или верхнего предела, необходимо внесение поправок на конечную апертуру и атмосферное поглощение. Чтобы провести

⁷см., например, “A User’s Guide to Stellar CCD Photometry with IRAF”, P. Massey and L. Davis, <http://iraf.net/irafdocs/> и The OSIRIS User Manual, http://www.gtc.iac.es/instruments/osiris/media/OSIRIS-USER-MANUAL_v3_1.pdf

апертурную коррекцию, нужно выбрать несколько ненасыщенных изолированных звёзд поля, соотношение сигнал/шум для которых составляет не меньше 1000, и измерить их потоки. Конечная поправка соответствует разности потока звезды в той минимальной апертуре, начиная с которой он становится постоянным, и соответствующего потока звезды в апертуре, используемой для фотометрии целевого источника. В свою очередь, поправка на атмосферное поглощение соответствует отношению коэффициента k_m атмосферной экстинкции и $\cos Z$, где Z – зенитное расстояние.

Из конечного значения величины можно определить поток в единицах эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{Гц}^{-1}$ как

$$\lg F = -0.4 \times (m + m^0), \quad (1.6)$$

где величина m^0 является нормирующей константой. Её значения для каждого фильтра определяются соответствующей фотометрической системой (см., например, работу [18]).

1.2.2 Радиоинтерферометрические наблюдения

В основе радиоинтерферометрических наблюдений положено получение функции видности, которая измеряется с помощью корреляции выходных сигналов системы антенн:

$$R(\vec{B}) = \int_{\Omega} A(s) I_{\nu}(s) \exp \left(i 2\pi \nu \left(\frac{1}{c} \vec{B} \cdot \vec{s} - \tau_i \right) \right) d\Omega d\nu. \quad (1.7)$$

В этом выражении величина $I_{\nu}(s)$ описывает распределение радиояркости, а $A(s) I_{\nu}(s) d\Omega d\nu$ соответствует получаемой мощности при ширине полосы $d\nu$ от элемента источника $d\Omega$, где $A(s)$ – эффективная собирающая площадь в направлении \vec{s} . При этом τ_i соответствует инструментальной задержке по времени, а \vec{B} – вектору базы.

Обработка данных радиоинтерферометрических наблюдений состоит из нескольких этапов: флажирования радиочастотной интерференции (удаления радиопомех), калибровки и синтеза изображений. В настоящей работе приводятся данные наблюдений, полученные на радиоинтерферометре АТСА. Редукция и анализ, включающие приведённые пункты, проводились с использованием пакета MIRIAD [19], который стандартно применяется для данных этого интерферометра.

Калибровка данных выполняется по полосе пропускания и плотности потока (первичная), а также по фазе (вторичная). Первичная калибровка определяет изменение отклика системы антенн. В настоящей работе рассматриваются данные наблюдений в непрерывном спектре, для которых коэффициенты усиления системы антенн в первичной калибровке определяются и калибруются только как функция частоты. Соответствующий калибратор обычно наблюдается один раз за наблюдательную сессию, до или после наблюдений

целевого источника. В свою очередь, вторичная калибровка определяет инструментальную фазу $2\pi\nu\tau_i$ в уравнении (1.7) и её изменение по времени и положению. Калибровка осуществляется посредством сравнения наблюдаемых фаз одного или более источников с идеальной моделью фазы. Фазовый калибратор, как правило, является точечным или неразрешённым источником с координатами, известными с точностью до тысячных угловой секунды, например, из наблюдений методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Его наблюдения проводятся попеременно с целевым источником. В качестве первичного и вторичного калибраторов обычно используются яркие внегалактические объекты.

Синтез изображений подразумевает получение распределения интенсивности $I_\nu(s)$ из измеряемой функции видности $R(\vec{B})$. Чтобы это сделать, необходимо обратить уравнение (1.7). Для этого нужно ввести координатную систему для величин \vec{s} и \vec{B} . Центр изображения можно поместить в положение нулевой фазы, если ввести единичный вектор \vec{s} и направить его в начало координат:

$$\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{\sigma}, |\vec{\sigma}| = 1, \quad (1.8)$$

где \vec{s}_0 – положение, близкое к центру исследуемой области. Уравнение (1.7) теперь можно записать таким образом:

$$R(\vec{B}) = \exp\left(i\omega\left(\frac{1}{c}\vec{B}\cdot\vec{s}_0 - \tau_i\right)\right) d\nu \int_S A(\vec{\sigma}) I_\nu(\vec{\sigma}) \exp\left(i\frac{\omega}{c}\vec{B}\cdot\vec{\sigma}\right) d^2\sigma. \quad (1.9)$$

Экспоненциальный множитель за знаком интеграла определяет фазу для центра изображения, а сам интеграл – это функция видности $V(\vec{B})$:

$$V(\vec{B}) = \int_S A(\vec{\sigma}) I_\nu(\vec{\sigma}) \exp\left(i\frac{\omega}{c}\vec{B}\cdot\vec{\sigma}\right) d^2\sigma. \quad (1.10)$$

Выберем координатную систему так, что

$$\frac{\omega}{2\pi c}\vec{B} = (u, v, w), \quad (1.11)$$

где u, v, w измеряются в единицах длины волны. Направление $(0, 0, 1)$ параллельно \vec{s}_0 , параметры u и v указывают, соответственно, в восточном и северном направлениях, а вектор $\sigma = (x, y, z)$ определяется так, что x и y являются направляющими косинусами к осям u и v . Таким образом, плоскость xu является проекцией небесной сферы на касательную плоскость с точкой касания в s_0 (см. [20]). Если производится построение карты только малой области неба, то уравнение (1.10) во введённой координатной системе примет вид

$$V(u, v, w) e^{-i2\pi w} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, y) I_\nu(x, y) e^{i2\pi(u x + v y)} dx dy. \quad (1.12)$$

Совершив обратное преобразование Фурье, получаем:

$$I'_\nu(x, y) = A(x, y) I_\nu(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} V(u, v, 0) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv. \quad (1.13)$$

Полученное уравнение описывает так называемую грязную карту, которая представляет собой распределение интенсивности по некоторой области неба. Однако грязная карта, как правило, содержит существенные искажения, такие как, например, артефакты с отрицательной интенсивностью. Она также обладает небольшим динамическим диапазоном, который определяется отношением максимального уровня яркости к шуму на изображении. Чтобы улучшить качество карты и увеличить её динамический диапазон, используются различные методы. В настоящей работе применяются два основных подхода, которые мы кратко опишем ниже.

Одним из наиболее распространённых методов восстановления изображения является итерационный алгоритм чистки CLEAN. Алгоритм заключается в нахождении пиковой интенсивности для каждого источника на грязной карте и вычитании отклика на точечный источник вместе с полной диаграммой направленности с центром в выбранной точке. Максимальная амплитуда вычитаемого точечного источника равна амплитуде соответствующей точки на карте, умноженной на некоторый коэффициент. Этот коэффициент обычно равен нескольким десяткам. Сами итерации продолжаются до тех пор, пока интенсивности оставшихся пиков не станут ниже некоторого уровня. После этого результирующая модель точечного источника сворачивается с чистой диаграммой направленности. Она имеет форму гауссианы с шириной на уровне половины амплитуды. В настоящей работе используется алгоритм MF CLEAN, который применяется в случае многочастотного синтеза с большим динамическим диапазоном. От алгоритма CLEAN его отличает возможность учёта спектральных вариаций источника по частоте.

Как обсуждалось выше, грязная карта обычно строится исходя из калибровки фазы инструмента, которая осуществляется с использованием наблюдаемых фазовых калибраторов. Но фазу инструмента можно также определить с использованием модели исследуемого поля, которая получается в результате процедуры чистки. Такой метод улучшения изображений называется самокалибровкой. Эта процедура тоже является итеративной и заключается в калибровке по одному или двум ярким источникам поля. Метод самокалибровки может существенным образом смягчить эффект рассеяния мощности вдоль изображения, который присутствует в рамках стандартной калибровки из-за фазовых ошибок. Детальное описание процедур синтеза и улучшения качества изображений описывается в работах [20] и [21].

Глава 2

Оптические наблюдения гамма-пульсара J1048–5832 на телескопе VLT

2.1 Введение

В этой главе описываются результаты полученных нами оптических наблюдений гамма-пульсара J1048–5832. Часть результатов наблюдений была вынесена на защиту в работе [22]. Здесь мы ограничимся сводкой параметров пульсара и представим результаты, выносимые на защиту в данной диссертации.

Пульсар J1048–5832 имеет период 124 мс, характеристический возраст 2×10^4 лет и скорость потери вращательной энергии $\dot{E} \approx 2 \times 10^{36}$ эрг с^{-1} (детектирование в радиодиапазоне описано в работе [23]). Этот объект был отождествлён в рентгеновском диапазоне [24], в котором была также обнаружена слабая хвостобразная пульсарная туманность. Объект классифицировался 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 [25]. Расстояние до пульсара ≈ 2.7 кпк оценивалось по мере дисперсии.

С целью отождествления пульсара и/или его туманности в оптическом диапазоне, мы провели наблюдения в фильтрах *V* и *R* с помощью инструмента FORS2 на телескопе VLT.

2.2 Результаты

2.2.1 Окрестность пульсара

Фрагменты изображений поля пульсара в фильтрах VR и в рентгеновском диапазоне¹ представлены на Рис. 2.1. Рентгеновское изображение скорректировано на карту экспозиции и сглажено гауссианой, чтобы лучше продемонстрировать форму туманности. На рисунке отмечены рентгеновская позиция пульсара и её ошибка на уровне 1σ , а также неопределённости позиций, полученные по данным радиоинтерферометрических наблюдений² [26] и таймингу³ [27], на уровне 1σ . Из Рис. 2.1 видно, что рентгеновская позиция хорошо согласуется с интерферометрической. К тому же, рентгеновская астрометрическая привязка является довольно точной. Позиция по таймингу существенным образом сдвинута и, вероятно, подвержена систематическим ошибкам.

В пределах рентгеновского позиционного эллипса на оптических изображениях не детектируется никакого источника. Тем не менее, на изображениях есть несколько источников, которые перекрываются с контуром рентгеновской туманности и радиоинтерферометрическим эллипсом. Эти источники пронумерованы на изображениях и могут рассматриваться как потенциальные отождествления пульсара (в случае если объект имеет высокое собственное движение) или структур его туманности.

2.2.2 Поиск пульсара и/или структуры его туманности

Цвета пульсаров и туманностей обычно отличаются от цветов обычных звёзд. Чтобы понять, связаны ли отмеченные источники с пульсаром и/или его туманностью, была проведена фотометрия и построена диаграмма цвет-величина (см. Рис. 2.2).

Отмеченные на Рис. 2.1 источники выделены на диаграмме и пронумерованы как на оптических изображениях. За исключением объекта 5, все источники находятся в пределах распределения, сформированного большинством звёзд поля. Вероятно, они принадлежат ветви главной последовательности, в связи с чем, скорее всего, не могут ассоциироваться с пульсаром.

В пределах ошибок цвет $V - R = 0.6 \pm 0.3$ источника 5 сопоставим с типичным цветом пульсаров и их туманностей $V - R \lesssim 0.7$ в оптическом диапазоне. Например, для пульсара в Крабовидной туманности и структур его туманности наблюдаемые цвета $V - R$ составляют, соответственно, 0.4 [28] и 0.7 [29]. Ассоциация источника 5 с пульсаром исключается из-за большого несоответствия в положении, $1''.7 \pm 0''.7$, с рентгеновской позицией пульсара.

¹Использованы рентгеновские данные из архива телескопа *Chandra*.

²По данным телескопа ATCA, 13-05-1997, эпоха 50581, RA = 10:48:12.6(3), Dec = -58:32:03.75(1) J2000.

³По данным телескопа Parkes, 25-02-1993–29-03-1997, эпоха 49043–50536, RA = 10:48:12.2(1), Dec = -58:32:05.8(8) J2000.

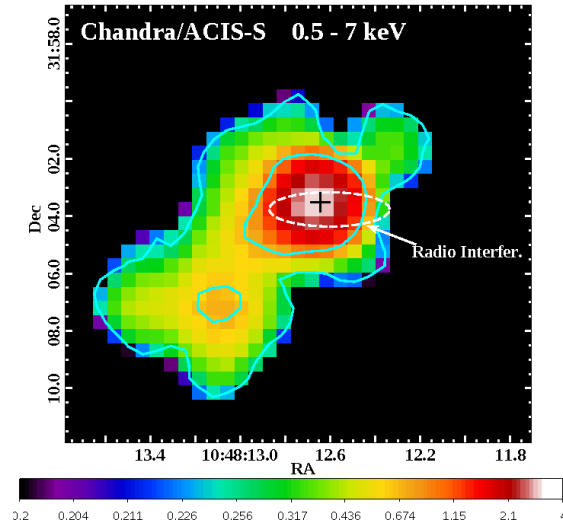
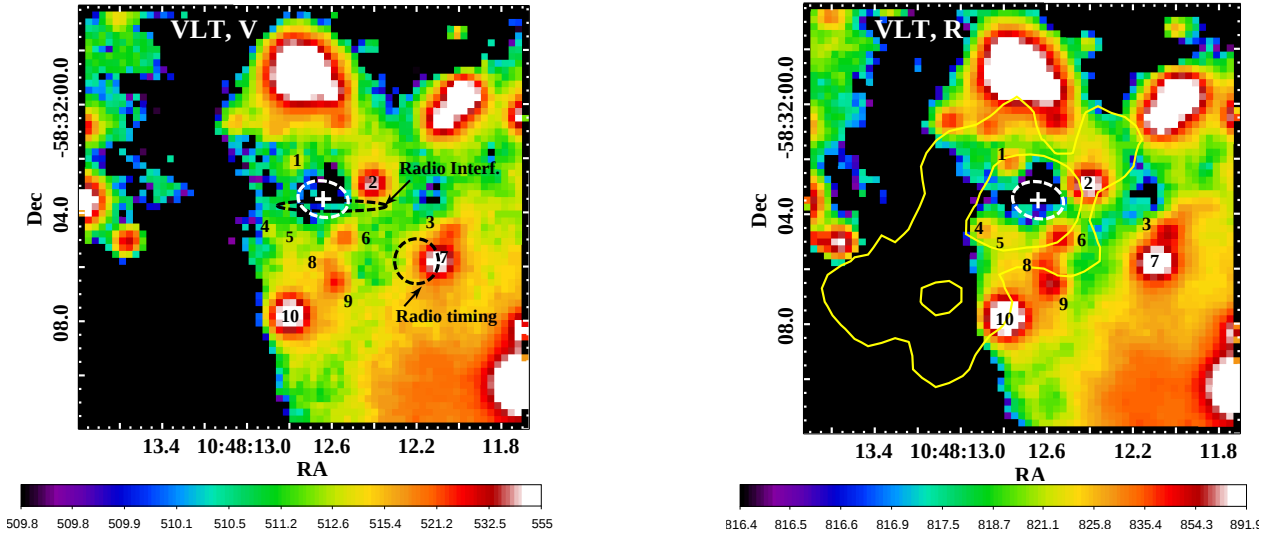


Рис. 2.1. Фрагмент изображения поля пульсара в фильтрах V и R (верхние левый и правый, соответственно) и в рентгеновском диапазоне на энергиях 0.5–7 кэВ по данным телескопа *Chandra* (нижний). Изображение с телескопа *Chandra* сглажено гауссианой с ядром в 4 пикселя. Цветовая шкала показывает яркость в единицах 1000 каунтов на оптических изображениях и в единицах каунтов на рентгеновском изображении. Рентгеновская позиция пульсара и её неопределённость на уровне 1σ показаны крестом и белым пунктирным эллипсом, соответственно. Чёрными пунктирными эллипсами показаны неопределённости позиций пульсара на уровне 1σ по данным двух радионаблюдений. Жёлтые контуры переложены на изображение в фильтре R с рентгеновского изображения для демонстрации пульсарной туманности. Оптические источники, перекрывающиеся с эллипсами ошибок и рентгеновской туманностью, помечены цифрами. Размер оптических фрагментов составляет $\sim 14'' \times 14''$. Рисунок также представлен в работе [22].

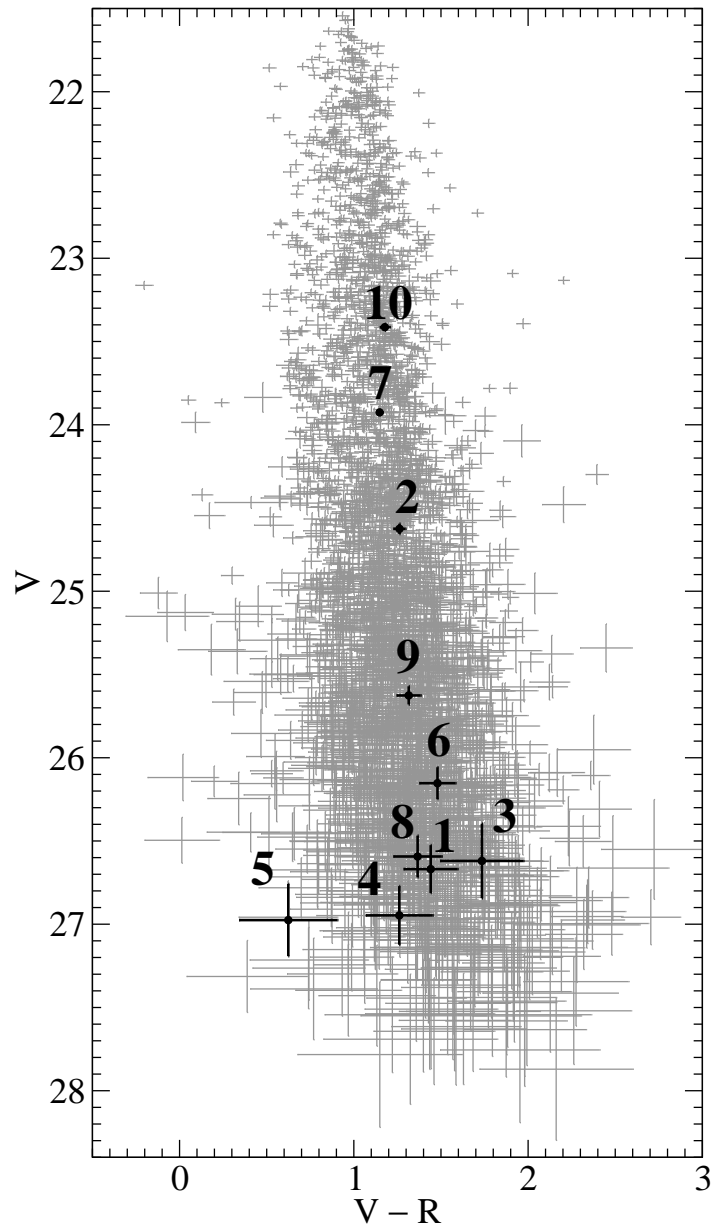


Рис. 2.2. Диаграмма цвет-величина для звёзд поля пульсара J1048–5832. Нумерация выделенных объектов соответствует нумерации на Рис. 2.1. Рисунок также представлен в работе [22].

Если принять расстояние $d = 2.7$ кпк, то ассоциация с пульсаром означала бы нереалистично высокую поперечную скорость⁴ пульсара 3100 ± 1300 км с⁻¹. К тому же, отсутствие значимого сдвига в положении за 6 лет между интерферометрическими и рентгеновскими наблюдениями исключает возможность высокого собственного движения.

На Рис. 2.3 приведено сравнение рентгеновского изображения с фрагментом поля пульсара в фильтре R , на котором звёзды поля, за исключением источника 5, были вычтены. На рентгеновском изображении детектируется компактная структура в пределах $2''.0$ к юго-востоку от пульсара на уровне 4σ . Структура находится вне пространственного профиля пульсара и содержит ~ 12 – 14 каунтов в пределах жёлтого региона, который показывает её границы. Она напоминает структуры туманности пульсара в Крабовидной туманности, наблюдаемые в оптическом и рентгеновском диапазонах. На рентгеновском изображении она отмечена как “wispr ?” (см. Рис. 2.3). Структура пространственно совпадает с источником 5 на оптическом изображении. Это подтверждается пространственными профилями яркости, построенными вдоль главной оси рентгеновской туманности. Предполагаемая структура также разрешается в рентгеновском профиле, приведённом в работе [24].

Поверхностная плотность источников, наблюдаемых в поле пульсара в диапазоне яркости $26^m9 \lesssim V \lesssim 28^m4$ (которому соответствует и источник 5), составляет ~ 0.008 объектов на квадратную угловую секунду. Соответствующая вероятность ложного отождествления составляет примерно $\sim 2\%$. Значение уменьшится до $\sim 0.2\%$, если мы дополнительно ограничим цвет $(V - R) \lesssim 0.9$.

На изображениях с вычтенными звёздами нет других источников, которые могли бы ассоциироваться со структурами рентгеновской туманности. Увеличение потока, видимое в пределах рентгеновского позиционного эллипса пульсара на уровне 1.5σ на изображении в фильтре R , может указывать на наличие объекта, но оно также соответствует уровню флуктуаций фона и верхним пределам детектирования (см. работу [22]).

2.3 Заключение к главе

На изображениях, полученных по данным наблюдений поля пульсара в фильтрах VR на телескопе VLT, оптическое излучение пульсара J1048–5832 обнаружено не было. Однако был детектирован слабый оптический источник, расположенный в $\sim 2''$ от позиции пульсара и пространственно совпадающий с компактной структурой рентгеновской туманности пульсара (см. Рис. 2.3). Цвет источника, $V - R \approx 0.6$, соответствует типичным цветам структур туманностей пульсаров. Это говорит о достоверности оптического отождеств-

⁴Исходя из интервала в 7 лет между наблюдениями на обсерваториях *Chandra* и VLT.

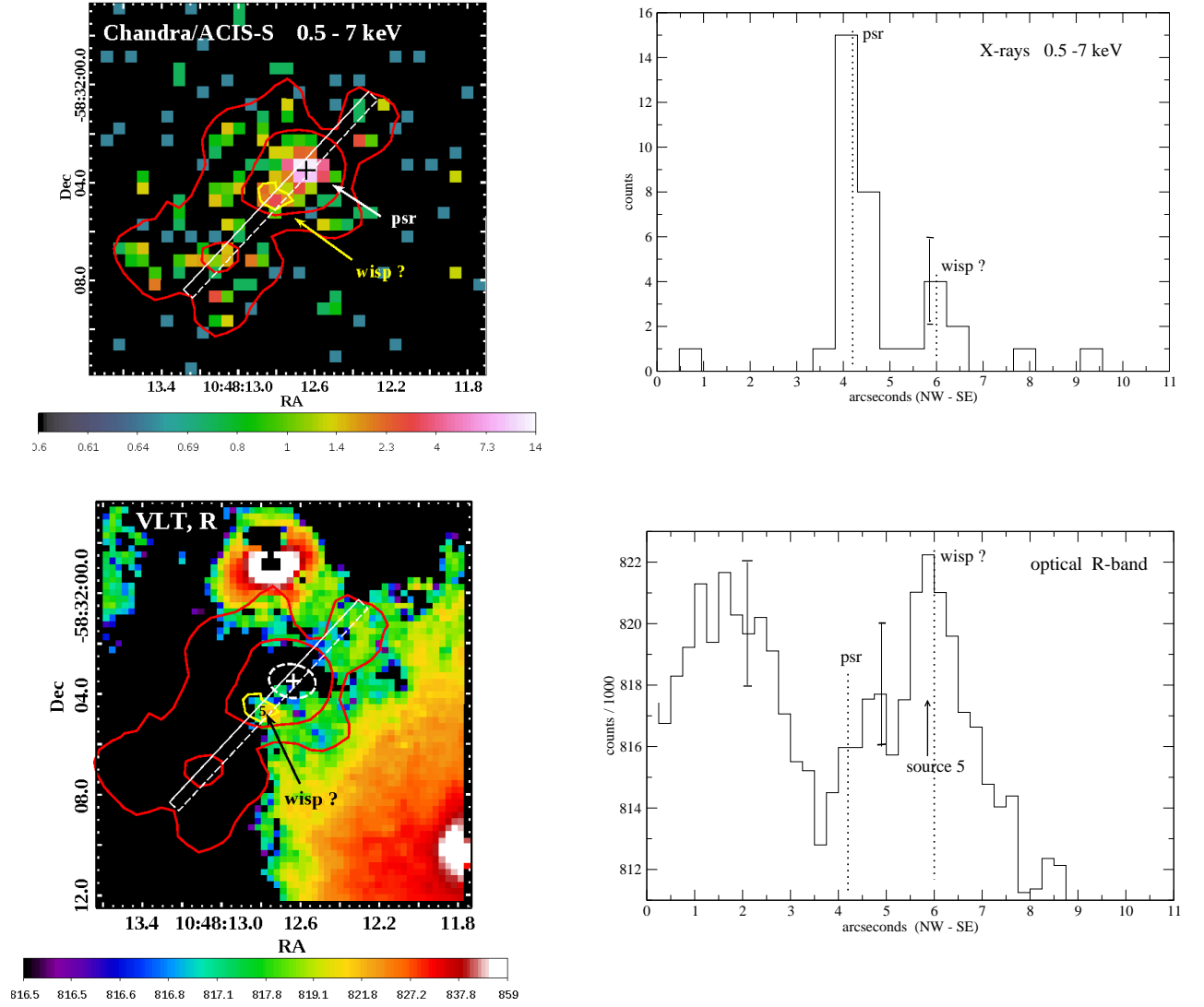


Рис. 2.3. Фрагменты изображений поля пульсара по данным телескопов *Chandra* (сверху слева) и VLT с вычтенными звездами поля (снизу слева). Контуры соответствуют контурам рентгеновской туманности на Рис. 2.1. Крестом и пунктирным эллипсом отмечены, соответственно, позиция пульсара и неопределённость на уровне 1σ . Жёлтый контур окружает структуру рентгеновской туманности. Пространственные профили яркости, извлечённые из среза вдоль главной оси туманности, показаны на верхнем и нижнем изображениях справа. Рисунок также представлен в работе [22].

ления. Тем не менее, невысокая статистика рентгеновских данных не позволяет сделать какие-либо выводы о многоволновом спектре источника (см. работу [22]), поэтому точно установить его природу не представляется возможным.

Дальнейшее изучение пульсара должно осуществляться на более длинных волнах, где излучение источников менее подвержено влиянию межзвёздного поглощения.

Глава 3

Наблюдения гамма-пульсара J1357–6429 на частоте 2.1 ГГц на телескопе АТСА

3.1 Введение

Рождаясь во взрывах сверхновых, нейтронные звёзды обычно достигают скоростей в несколько раз больших, чем их звёздные предшественники. Согласно статистическому анализу, приведённому в работе [30], средние трёхмерные скорости нейтронных звёзд, полученные в основном по данным радионаблюдений, составляют примерно 400 км с^{-1} . Рекордная достоверно измеренная поперечная скорость принадлежит пульсару В1508+55 и составляет $1080 \pm 100 \text{ км с}^{-1}$ [31].

Первоначальный отскок, происходящий во время взрыва сверхновой, принято считать причиной высоких скоростей пульсаров. Однако природа этого отскока до сих пор остаётся неясной. В работе [32] обсуждается несколько классов механизмов, предсказывающих отскок звезды, но не вполне понятно, могут ли эти механизмы полностью объяснить самые высокие скорости нейтронных звёзд [31]. Для постановки дополнительных ограничений на модели, которые используются в последних моделированиях взрывов сверхновых [33], необходимы новые детектирования высокоскоростных пульсаров. Измерения скоростей также потенциально важны для выявления возможной связи между скоростью и другими параметрами нейтронных звёзд [32].

Пульсар J1357–6429 является молодым (характеристический возраст 7300 лет) и энергичным (скорость потери вращательной энергии $\dot{E} = 3.1 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$) радиопульсаром с периодом 166 мс [34]. Профиль импульса и поляризация пульсара изучались на телескопе Parkes на частоте 1.4 ГГц [35, 36, 37]. Объект был отождествлён в рентгеновском

диапазоне, где была также обнаружена компактная хвостобразная туманность. Форма туманности указывала на наличие высокого собственного движения [38, 39]. При последующем изучении пульсара на высоких энергиях были обнаружены пульсации объекта в рентгеновском и гамма диапазонах [36, 40]. Был также обнаружен плерион пульсара в рентгеновском диапазоне и на энергиях порядка ТэВ [40, 41]. В работе [41] обсуждается возможная ассоциация плериона с предполагаемым остатком сверхновой G309.8–2.6 [42]. Исходя из несоответствия положения пульсара с центром плериона, в работе [41] была сделана оценка на высокую поперечную скорость пульсара $650d_{2.4}\tau_{7.3}^{-1}$ км с⁻¹, где $\tau_{7.3}$ соответствует возрасту пульсара в единицах 7300 лет, а $d_{2.4}$ — расстоянию до пульсара в единицах 2.4 кпк. Однако в работе [41] было также подмечено, что сдвинутое положение плериона может объясняться обратной ударной волной, которая распространилась внутрь остатка сверхновой [43]. В этом случае скорость пульсара может быть меньше. Расстояние до пульсара J1357–6429 в 2.4 кпк оценивалось исходя из меры дисперсии $DM = 128.5$ пк см⁻³ в работе [34].

В работе [10] приводятся результаты наблюдений пульсара J1357–6429 в фильтрах *VRI* на телескопе VLT, проведённых в 2009 году. Авторы описывают детектирование слабого источника, совпадающего по положению с рентгеновскими координатами пульсара. Источник предлагается как кандидат в оптическое отождествление пульсара J1357–6429. В работе [10] также указывается на значительное несоответствие ($1''54 \pm 0''32$) положения кандидата с координатами пульсара, измеренными по данным радиоинтерферометрических наблюдений 2000 года [34]. Исходя из этого, авторы высказали предположение, что пульсар может иметь значительное собственное движение, соответствующее экстремально высокой поперечной скорости между 1300 км с⁻¹ и 2500 км с⁻¹.

Чтобы проверить это предположение, нужно получить точную позицию объекта на новую эпоху. В связи с этим нами были проведены новые радиоинтерферометрические наблюдения пульсара на телескопе АТСА. Другой целью наблюдений являлось более подробное изучение пульсара в радиодиапазоне.

В Разд. 3.2 описываются наблюдения и обработка данных. Результаты, а также независимый анализ архивных данных приводятся в Разд. 3.3 и Разд. 3.4.

3.2 Наблюдения и обработка данных

Наблюдения поля пульсара проводились на телескопе АТСА 3 июня 2013 года. Наблюдательная сессия началась в 4:30 по всемирному времени и продолжалась 9.5 часов. Основной целью наблюдений являлось измерение точного положения пульсара. В связи с этим использовалась конфигурация интерферометра с максимальной базой (около 6 км).

Наблюдения велись с помощью коррелятора CABB (Compact Array Broadband Backend) в режиме “пульсарный бининг”, который позволяет проводить наблюдения с высоким временным разрешением [44]. Режим бининга разрешает фазу пульсара, разделяя при этом полный период пульсара на 32 независимых временных бина. Наблюдения проводились в диапазоне 1.078–3.126 ГГц с центральной частотой 2.102 МГц. Полоса состояла из 512 спектральных каналов, определяющих спектральное разрешение 4 МГц. В качестве первичного стандарта для калибровки по плотности потока и полосе пропускания в начале сессии наблюдался источник PKS B1934–638. Чтобы учесть фазовые неустойчивости, наблюдались два вторичных калибратора 1329–665 и 1325–55. Наблюдения пульсара и фазовых калибраторов осуществлялись в десятиминутном цикле, в котором каждый калибратор наблюдался в течение двух минут. Использование сразу двух калибраторов было необходимо для оценки систематических ошибок на положение пульсара. С помощью пакета MIRIAD [19] на данных была проведена стандартная редукция, включающая флажирование радиочастотной интерференции и калибровку. Для визуализации данных использовался пакет Karma [45].

Полученные данные по полной полосе были разделены на 4 подполосы, каждая из которых имела частотную ширину 512 МГц. Центральные частоты подполос составили 1.334 ГГц, 1.846 ГГц, 2.358 ГГц и 2.870 ГГц. Калибровка вторичным калибратором проводилась отдельно для каждой подполосы.

Создание изображений осуществлялось с помощью процедуры *invert*. При этом параметр робастного взвешивания “robust” был установлен равным нулю. Такой выбор предоставляет оптимальное согласование между соотношением сигнал/шум и подавлением боковых лепестков диаграммы направленности. Чистка изображений проводилась с помощью алгоритма *mfclean*. Для абсолютной астрометрии использовались полученные “чистые” изображения без дополнительной калибровки.

Также на данных была проведена фазовая самокалибровка для улучшения качества изображения. Компоненты модели с плотностями потока $\gtrsim 1$ мЯн, полученные после первой итерации *mfclean*, были использованы для многочастотной фазовой самокалибровки, которая существенным образом уменьшила остаточные фазовые ошибки. После этого более слабые источники, детектируемые на чистых изображениях, были включены в модель самокалибровки. В результате нескольких итераций очистки и самокалибровки образы боковых лепестков диаграммы направленности источников поля стали сопоставимы с тепловым шумом, который составил ≈ 50 мкЯн для подполосы с центральной частотой 1.334 ГГц и ≈ 25 –30 мкЯн для трёх других подполос.

Размер главного лепестка синтезированной диаграммы направленности составил $8''.3 \times 5''.1$ и $4''.5 \times 2''.6$, соответственно, для нижней (1.334 ГГц) и верхней (2.870 ГГц) частотных

подполос, при значении позиционного угла $PA \approx -24^\circ$. Полная ширина на половине максимума главного лепестка диаграммы направленности одной антенны АТСА была $42'$ для нижней подполосы и $15'$ для верхней подполосы. Выбранный размер изображения для всех подполос составил $\sim 160' \times 160'$.

Для того чтобы измерить собственное движение пульсара, был проведён также независимый анализ архивных данных, полученных в результате наблюдений на телескопе АТСА¹. Наблюдения проводились 29 августа 2000 года. Базы использовавшейся конфигурации примерно соответствовали базам конфигурации наблюдений 2013 года. Однако, в отличие от последних, наблюдения 2000 года проводились сразу в двух диапазонах с центральными частотами 1.376 ГГц и 2.496 ГГц². Ширина каждой полосы при этом составляла 128 МГц, что существенно меньше по сравнению с наблюдениями 2013 года, а спектральный диапазон полос состоял из 14 каналов [34]. Обработка данных и создание изображений были аналогичны тем, что проводились для наблюдений 2013 года. Отличие заключалось в том, что данные 2000 года не разбивались на подполосы, а фазовая калибровка проводилась единственным наблюдавшимся вторичным калибратором 1329–665. Размер главного лепестка синтезированной диаграммы направленности составил $12''.7 \times 5''.6$ для полосы с центральной частотой 1.376 ГГц и $7''.3 \times 2''.2$ для полосы с центральной частотой 2.496 ГГц. Позиционные углы составили $PA \approx 48^\circ$ и $PA \approx 40^\circ$ для подполос с центральными частотами 1.376 ГГц и 2.496 ГГц, соответственно. На изображении, полученном из данных для полосы с центральной частотой 1.376 ГГц, был выявлен точечный источник. Он был окружён концентрическими кольцами, похожими на боковые лепестки диаграммы направленности. Источник находился близко к фазовому центру и пульсару, а также он не был идентифицирован на изображениях 2013 года. Тщательный анализ данных показал, что источник проявляется только на изображениях по данным каналов 13 и 14. В связи с этим источник, вероятнее всего, является артефактом. Ввиду того что артефакт находится близко к положению пульсара, мы использовали только каналы 1–12 с целью исключения артефакта и его концентрических колец, которые могли повлиять на измерения положения и потоков пульсара.

3.3 Результаты

3.3.1 Поле пульсара

На Рис. 3.1 показано самокалиброванное изображение поля пульсара для подполосы с центральной частотой 1.846 ГГц. Для сравнения на Рис. 3.1 также приведено изображение

¹<http://atoa.atnf.csiro.au, project CX001>.

²Данные для полосы с центральной частотой 2.496 ГГц не приводились в оригинальной работе [34].

поля пульсара, полученное с помощью телескопа MOST (Molonglo Observatory Synthesis Telescope) на частоте 843 МГц. Для последнего размер главного лепестка диаграммы направленности составляет $\approx 104''$ [46]. Многие точечные источники, присутствующие на этом изображении, отождествляются и на изображении с телескопа АТСА. На изображении с телескопа АТСА, показанном на Рис. 3.1, пульсар детектируется как точечный источник на уровне 10σ . Также он отождествляется и на изображении с телескопа MOST.

Изображение с телескопа АТСА имеет более высокое пространственное разрешение. В связи с этим некоторые источники, детектирующиеся на изображении с телескопа MOST, разрешаются как группы отдельных объектов. Например, яркий протяжённый объект около северного края изображения с телескопа MOST разрешается как три компактных объекта. В то же время, неполное покрытие uv -плоскости, а также отсутствие коротких баз в выбранной конфигурации делают интерферометр нечувствительным к большим протяжённым структурам. По этой причине протяжённое излучение от кандидата сверхновой G309.8–2.6 [42] и другие протяжённые структуры, видимые на изображении с телескопа MOST, не могут быть идентифицированы на изображении с телескопа АТСА.

Компактная структура пульсарной туманности, наблюдаемая около пульсара в рентгеновском диапазоне [40], не детектируется на этих изображениях.

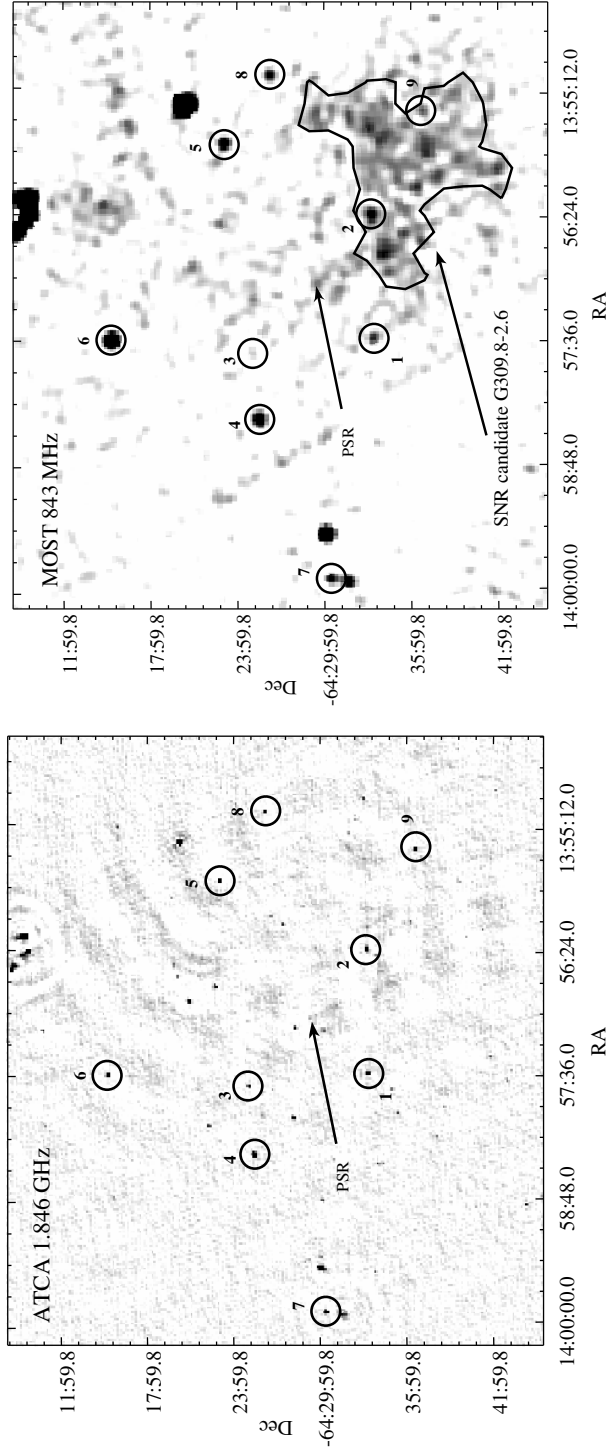


Рис. 3.1. Слева: фрагмент поля пульсара J1357–6429 размером $50' \times 50'$ с центром в положении пульсара, полученный на частоте 1.846 ГГц с помощью телескопа ATCA. Справа: фрагмент соответствующей части поля, полученный на частоте 843 МГц с использованием телескопа MOST. Положения пульсара и прояжённого излучения от кандидата сверхновой G309.8–2.6, окружённого контуром, показаны стрелками. Девять ярких точечных объектов, которые использовались для относительной астрометрии изображений (см. текст), пронумерованы и отмечены круговыми регионами.

3.3.2 Астрометрия и собственное движение пульсара

Для того чтобы оценить собственное движение пульсара, мы использовали два астрометрических подхода. Первый, который мы будем называть “абсолютная астрометрия”, позволяет измерять координаты источников относительно фазовых калибраторов, позиции которых известны с высокой точностью (см. Разд. 1.2). Вторым методом, который мы будем называть “относительная астрометрия”, основан на измерениях изменения положения источника между наблюдениями относительно источников поля.

Чтобы измерить положения объекта, во всех случаях использовались данные только с пульсирующей компонентой, полученные из калиброванных видностей. С использованием команды *psrfix* пакета MIRIAD временные бины фазы пульсара были привязаны к соответствующей фазе кривой блеска с учётом известных значений меры дисперсии 128.5 пк см^{-3} и периода пульсара 166 мс. Вычитание неппульсирующей компоненты, в результате которого значительным образом уменьшается зашумление объекта фоном, проводилось с помощью команды *psrbl*.

3.3.2.1 Абсолютная астрометрия

По данным 2013 года было получено 8 положений пульсара — для каждой из четырёх спектральных подполос в двух калибровках. Положения были определены с помощью команды *imfit*. Ошибка на положение, определяемая с помощью этой команды, некоторым образом зависит от размера региона, в котором производится аппроксимация. В каждой подполосе мы использовали регион, который в два раза больше размера главного лепестка синтезированной диаграммы направленности. Полученные позиционные ошибки были сопоставимы с оценкой, базирующейся на размере главного лепестка и соотношении сигнал/шум. Соотношение сигнал/шум составляло 11.2, 9.1, 10.8 и 6.4, соответственно, для подполос с центральными частотами 1.334 ГГц, 1.846 ГГц, 2.358 ГГц и 2.780 ГГц. Чтобы сделать измерения более точными, пиксельная сетка на изображениях с пульсирующей компонентой была сдвинута таким образом, чтобы пульсар попадал точно в центр пикселя. Позиции, полученные для каждой подполосы, согласуются друг с другом в пределах ошибок. Это значит, что никакой поправки на систематические ошибки по координатам между подполосами вносить не нужно [47].

В результате было получено два положения пульсара, каждое из которых оценивалось усреднением координат по четырём подполосам: $RA = 13:57:02.526(15)$, $Dec = -64:29:29.95(15)$ и $RA = 13:57:02.524(14)$, $Dec = -64:29:29.85(12)$ ³. Позиции соответствуют калибровкам по источникам 1325–665 и 1329–55. Положения, а также эллипсы их ошибок показаны на

³Числа в скобках являются ошибками на уровне 1σ , относящимися к последней значимой цифре, эпоха J2000.0.

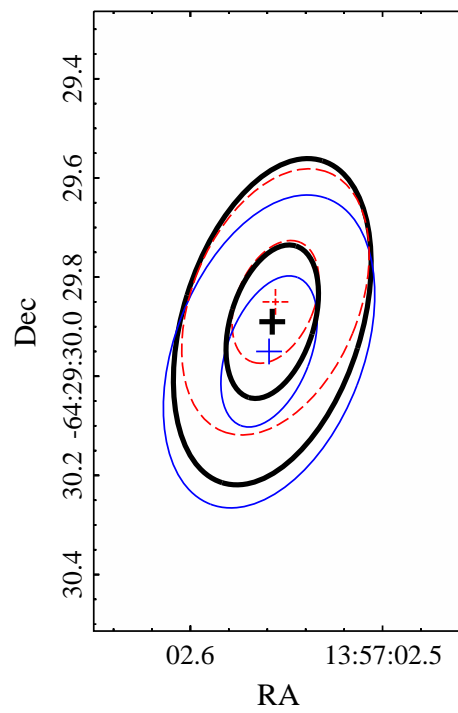


Рис. 3.2. Эллипсы ошибок на положение пульсара, измеренные на доверительных уровнях 40% и 90% в диапазоне с центральной частотой 2.102 ГГц. Кресты и эллипсы, изображённые сплошными и пунктирными линиями, соответствуют калибровкам стандартами 1329–665 и 1325–55. Крест и эллипсы, показанные сплошными жирными линиями, соответствуют взвешенной средней позиции.

Рис. 3.2 крестами и тонкими сплошными и пунктирными эллипсами, соответственно, для калибровок калибраторами 1325–65 и 1329–55. Позиционный эллипс ошибок, проецированный на неопределённость на доверительном уровне 1σ , является двумерным доверительным регионом на уровне 40% (см., например, [48]). На рисунке также показаны доверительные эллипсы на уровне 90%, которые больше по размеру в ≈ 2.14 раза. Между двумя полученными позициями наблюдается разница по восхождению величиной $\approx 0'.12$. Это соответствует разнице, полученной после кросс-калибровки стандартов 1325–665 и 1329–55 и измерения их позиций. Согласно Рис. 3.2, оценённая систематическая ошибка вдоль главной оси главного лепестка сопоставима с формальной статистической ошибкой на уровне 1σ . Таким образом, два положения источника были взвешены соответствующими ковариационными матрицами, чтобы учесть корреляции между ошибками по прямому восхождению и склонению, после чего суммированы. Полученная средняя позиция с ошибками на уровнях 40% и 90% показана на Рис. 3.2 жирными крестом и эллипсами. Ошибки были получены добавлением оценённой систематической ковариационной матрицы к взвешенной средней статистической ковариационной матрице. В результате были получены координаты $RA = 13:57:02.525(14)$ и $Dec = -64:29:29.89(15)$, в которых ошибки на уровне 1σ соответствуют внутреннему жирному эллипсу на Рис. 3.2.

Полученная позиция отличается от позиции $RA = 13:57:02.43(2)$ и $Dec = -64:29:30.2(1)$, приведённой в работе [34] для наблюдений 2000 года на частоте 1.376 ГГц. Это указывает на смещение пульсара между эпохами наблюдений 2000 и 2013 года.

Чтобы оценить значимость сдвига, было проведено независимое измерение положения пульсара по данным 2000 года с использованием только пульсирующей компоненты. На этих данных пульсар детектируется с соотношением сигнал/шум ≈ 13 . На частоте 2.496 ГГц пульсар детектируется на более низком соотношении сигнал/шум, что делает измерения положения менее точными. Координаты для данных 2000 года на частоте 1.376 ГГц составляют $RA = 13:57:02.546(76)$ и $Dec = -64:29:29.64(55)^4$. На уровне 1σ они не соответствуют приведённым в работе [34]. К тому же, опубликованные ошибки оказались значительно меньше, чем оценка, основанная на размере главного лепестка синтезированной диаграммы направленности и соотношении сигнал/шум для пульсара. Таким образом, можно заключить, что опубликованные ошибки на положение были существенным образом недооценены.

На Рис. 3.3 показаны изображения для данных только с пульсирующей компонентой по всей полосе для обеих эпох в одной калибровке (1329–665). Позиции пульсара для двух наблюдательных эпох с соответствующими эллипсами ошибок на доверительных уровнях

⁴Ввиду того что в данном случае наблюдался только один фазовый калибратор, систематические ошибки не могут быть оценены.

40% и 90%, которые учитывают упомянутые выше систематики, переложены на изображения. Никакого существенного сдвига пульсара не наблюдается, поэтому можно установить только верхний предел, составляющий $\approx 1''.28$ (на доверительном уровне 90%). Учитывая этот верхний предел и время между наблюдениями 12.76 лет, мы определили верхний предел на собственное движение пульсара $\mu \lesssim 100$ мсд год $^{-1}$ на доверительном уровне 90%.

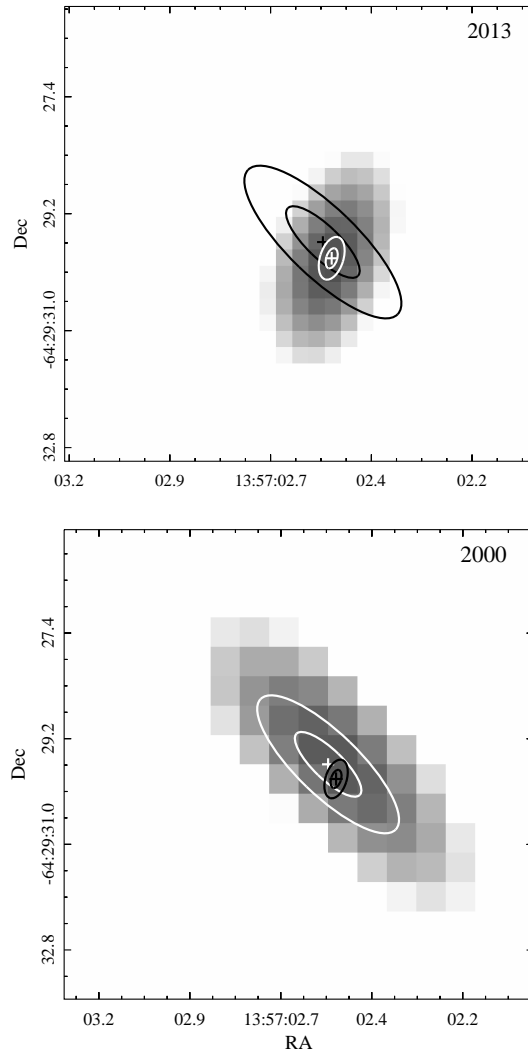


Рис. 3.3. Фрагменты изображений, полученных по данным наблюдений на телескопе АТСА, размером $8'' \times 8''$ и в центре с пульсаром J1357–6429. Изображения получены из несомакалиброванных данных на частоте 2.102 ГГц в 2013 году (сверху) и на частоте 1.376 ГГц в 2000 году (снизу) с использованием одного калибратора. Размер пикселя составляет, соответственно, $0''.25$ и $0''.5$. Для данной эпохи измеренная позиция пульсара и эллипсы ошибок на уровне 40% и 90% показаны, соответственно, белыми крестом и эллипсами. Чёрные крест и эллипсы относятся к другой эпохе. Изображения были использованы для абсолютной астрометрии.

3.3.2.2 Относительная астрометрия

Относительная астрометрия является более надёжным методом. Она позволяет учесть систематические эффекты, которые не представляется возможным исключить заранее. Например, сравнивая положения разных источников поля по данным 2000 и 2013 года, мы обнаружили, что они демонстрируют систематические сдвиги между эпохами, направленные почти радиально от фазового центра. При этом размер сдвига от фазового центра оказывался пропорциональным расстоянию от него. Это “растяжение” может быть результатом размытия полосы, которое несколько отличалось для данных старого и нового корреляторов. Также может наблюдаться поворот между изображениями данных двух эпох, объясняющийся различиями в расчётах эфемерид для старого и нового корреляторов.

Чтобы увеличить динамический диапазон и уменьшить позиционные ошибки, мы использовали самокалиброванные изображения для каждой подполосы наблюдений 2013 года и для полной полосы наблюдений 2000 года. На них соотношение сигнал/шум для пульсара выше, если сравнивать с несомакалиброванными изображениями. На изображениях 2013 года оно соответствует $\approx 18, 9.9, 11.8$ и 8.1 для подполос с центральными частотами 1.334 ГГц, 1.846 ГГц, 2.358 ГГц и 2.780 ГГц, в то время как на изображении 2000 года соотношение сигнал/шум остаётся таким же. Пять изображений были привязаны с помощью программы, которая учитывает сдвиги, повороты и растяжения. Для привязки было использовано 9 относительно ярких точечных источников, детектированных на всех изображениях с соотношением сигнал/шум $\gtrsim 30$ (показаны на Рис. 3.1). Их положения определялись с помощью процедуры *imfit* с точностью $\lesssim 0''.07$. По отношению к изображениям 2013 года, изображение 2000 года было растянуто в $1.0021(3)$ раз. Поворот изображения 2000 года по отношению к изображению 2013 года был незначительным и составил $1'.2(6)$. Никакого значимого растяжения или поворота между подполосами наблюдений 2013 года не наблюдалось. В результате привязки позиции источников на всех изображениях совпали друг с другом в пределах ошибок.

На Рис. 3.4 приведено сопоставление усреднённой позиции пульсара по привязанным изображениям подполос 2013 года с положением пульсара на изображении 2000 года. Расположение эллипсов ошибок для эпох 2000 и 2013 года немного отличается от полученного в абсолютной астрометрии (см. Рис. 3.3), в то время как никакого значимого сдвига между двумя эпохами не наблюдается. Доверительные контуры на уровне 40%, 90% и 99.73% на собственное движение пульсара показаны на Рис. 3.5. Верхний предел на собственное движение пульсара на уровне 90% составляет $\mu \lesssim 106$ мсд год $^{-1}$. Такое значение сопоставимо с результатом, полученным из абсолютной астрометрии, хотя и несколько превышает его. Причиной этому является недооценка позиционных ошибок для данных 2000 года в абсолютной астрометрии, так как систематические ошибки неизвестны. Таким образом,

результат, полученный в относительной астрометрии, представляется более надёжным.

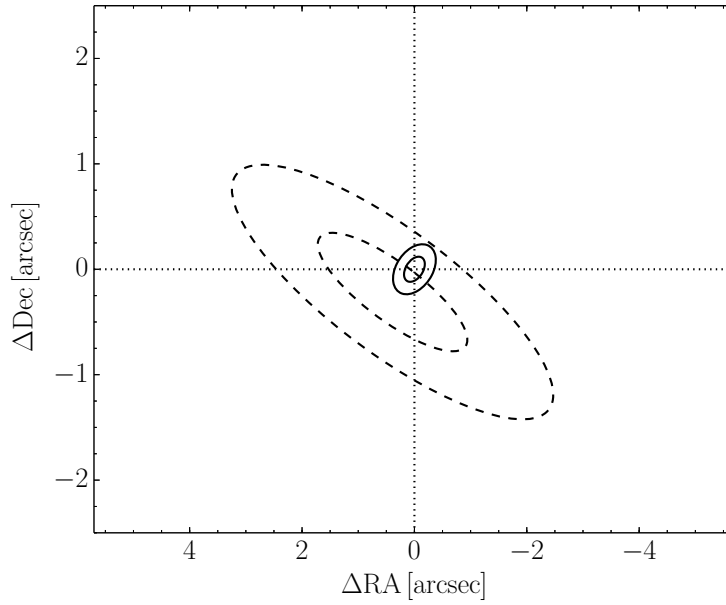


Рис. 3.4. Позиционные эллипсы, полученные по результатам относительной астрометрии. Эллипсы демонстрируют ошибку на положение пульсара на уровне 40% и 90%. Позиции на 2013 и 2000 год изображены, соответственно, сплошными и пунктирными эллипсами. Позиции показаны относительно усреднённой позиции пульсара на эпоху 2013 года.

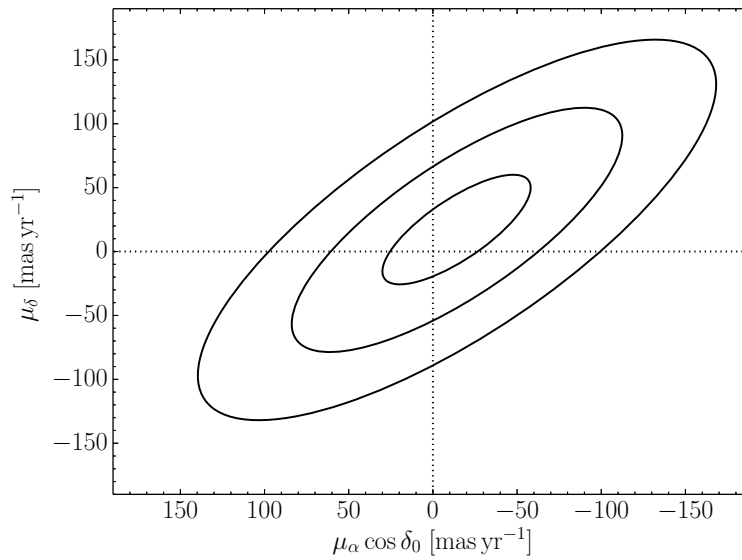


Рис. 3.5. Доверительные регионы для собственного движения пульсара на уровне 40%, 90% и 99.73% по результатам относительной астрометрии. $\cos \delta_0 \approx 0.43$, где δ_0 соответствует склонению фазового центра на данных 2013 года.

3.3.3 Плотности потока и спектр пульсара

Для того чтобы измерить поток пульсара, были использованы самокалиброванные видности только с пульсирующей компонентой. Для детального изучения спектра каждая имеющаяся подполоса с частотной шириной 512 МГц была дополнительно разделена ещё на две подполосы. Чтобы исключить возможные ошибки, связанные с нелинейностью алгоритма *mfclean*, потоки измерялись непосредственно на видностях с использованием команды *uvfit*. Положение пульсара, однако, было зафиксировано на значениях, полученных из процедуры *imfit* на соответствующих изображениях. Измеренные потоки показаны на Рис. 3.6 сплошными крестами. Средний поток по всей полосе для данных 2013 года составляет 212 ± 5 мкЯн. Спектральное распределение энергии излучения показывает заметный спад потока на частоте ≈ 1.7 ГГц. Полученный спектр, за исключением этой точки, может быть аппроксимирован степенным законом со спектральным индексом $\alpha_\nu = 0.5 \pm 0.1$ ($\chi^2 \approx 0.8$ с одной степенью свободы). Выпадение точки спада потока по отношению к аппроксимации составляет $\approx 3\sigma$. Использование точки делает аппроксимацию неприемлемой ($\chi^2 \approx 2.3$ с одной степенью свободы). Маловероятно, что спад потока может объясняться абсорбционными линиями ОН на 1.665 ГГц и 1.667 ГГц. Известно только 3 пульсара, для которых наблюдаются слабые признаки поглощения на линиях ОН с полной шириной на половине максимума $1.5\text{--}3$ км с⁻¹ (см., например, работу [49]). Они не могут привести к наблюдаемому в нашем случае спаду потока. Кроме того, мы проанализировали источники в поле пульсара и нашли подобный спад потока на той же частоте в спектрах источников, расположенных в пределах ≈ 2.5 от фазового центра. В то же время, источники, расположенные на большем угловом расстоянии, и калибраторы не проявляют подобный спад потока. Основываясь на этом, можно предположить, что спад потока на 1.7 ГГц является следствием систематического артефакта. В связи с этим соответствующая ему точка была исключена из общей аппроксимации спектра пульсара⁵.

Потоки пульсара на данных 2000 года были измерены с использованием самокалиброванных видностей полных полос с центральными частотами 1.376 ГГц и 2.496 ГГц. Соответствующие потоки пульсара, 417 ± 58 мкЯн и 309 ± 86 мкЯн, показаны на Рис. 3.6 пунктирными крестами. Принимая во внимание величину ошибок на эти потоки, довольно сложно сделать какое-либо заключение о спектральном индексе. Тем не менее, потоки 2000 года выше потоков 2013 года на тех же частотах, по крайней мере для меньшей частоты. Поток пульсара на частоте 1.376 ГГц в данных 2000 года отличается от потока пульсара в данных 2013 года на той же частоте на 2.5σ , учитывая калибровочные ошибки

⁵ Согласно сообщению команды технической поддержки телескопа, спад потока может быть обусловлен проблемой коррелятора в режиме “пульсарный бининг”.

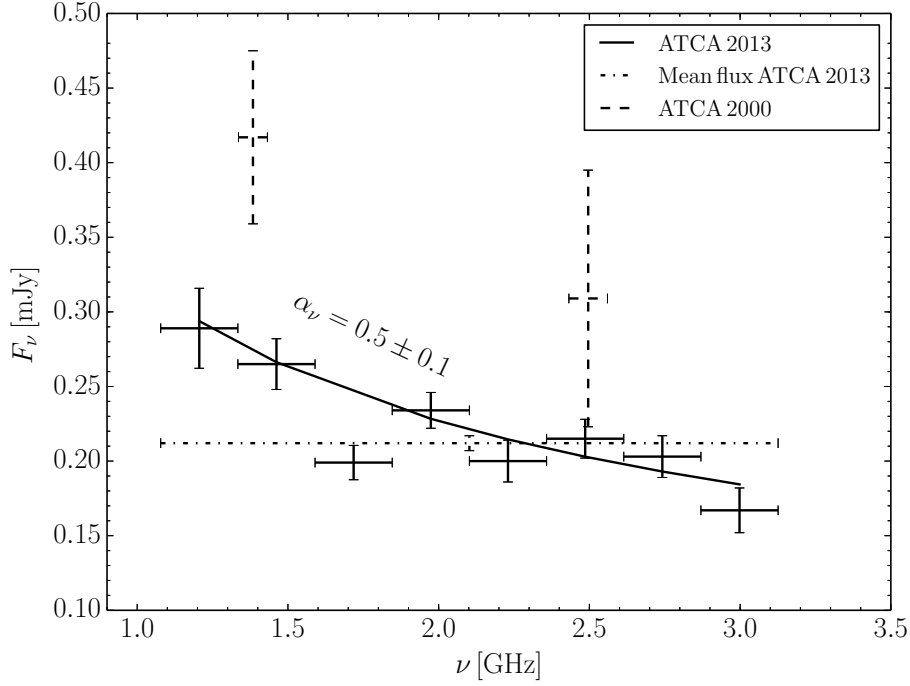


Рис. 3.6. Спектр пульсара J1357–6429 по данным наблюдений на телескопе АТСА. Сплошные вертикальные линии соответствуют плотностям потока и их ошибкам на уровне 1σ для каждой подполосы в диапазоне от 1.1 ГГц до 3.1 ГГц. Линия демонстрирует лучшую аппроксимацию степенным законом $F_\nu \propto \nu^{-\alpha_\nu}$ со спектральным индексом α_ν , указанным на рисунке. Средние по полосе плотности потока показаны штрихпунктирными (для полосы 2.102 ГГц) и пунктирными (для полос 1.376 ГГц и 2.496 ГГц) линиями для сравнения. Систематические ошибки калибровки по потоку, составляющие $\lesssim 2\%$, пренебрежимы в данной шкале.

на поток в 2% ⁶. Таким образом, значимость разницы оценивается на уровне 99%.

Возможно, что изменение потока может объясняться эффектами мерцаний на рефракционном масштабе (см., например, [50]). С использованием галактической модели электронной плотности NE2001 [51], мы оценили длину когерентности поля $s_0 \approx 4900$ км, масштаб Френеля $l_F \approx 1.6 \times 10^6$ км и масштаб рефракции $l_R = l_F^2/s_0 \approx 5.2 \times 10^8$ км в направлении на пульсар на частоте 1.376 ГГц. Учитывая, что $l_F \ll l_R$, индекс рефракционных мерцаний может оцениваться как $m_R = (s_0/l_R)^{1/6} \approx 0.15$ [50]. Такое значение сопоставимо с наблюдаемым на частоте 1.376 ГГц между двумя эпохами $(F_{2000} - F_{2013})/(F_{2000} + F_{2013}) = 0.16 \pm 0.08$. В предположении спектра турбулентности Колмогорова, индекс мерцаний меняется с частотой как $m_R \propto \nu^{0.56}$ и на частоте 2.496 ГГц увеличивается в 1.4 раза по сравнению с частотой 1.376 ГГц. Это не исключается данными. Временные масштабы рефракционных мерцаний $\Delta t_R = l_R/v_{tr}$ определяются поперечной скоростью пульсара v_{tr} . С использованием полученного верхнего предела на поперечную скорость пульсара, мы

⁶См., например, http://www.narrabri.atnf.csiro.au/observing/users_guide/html/chunked/ch02s02.html

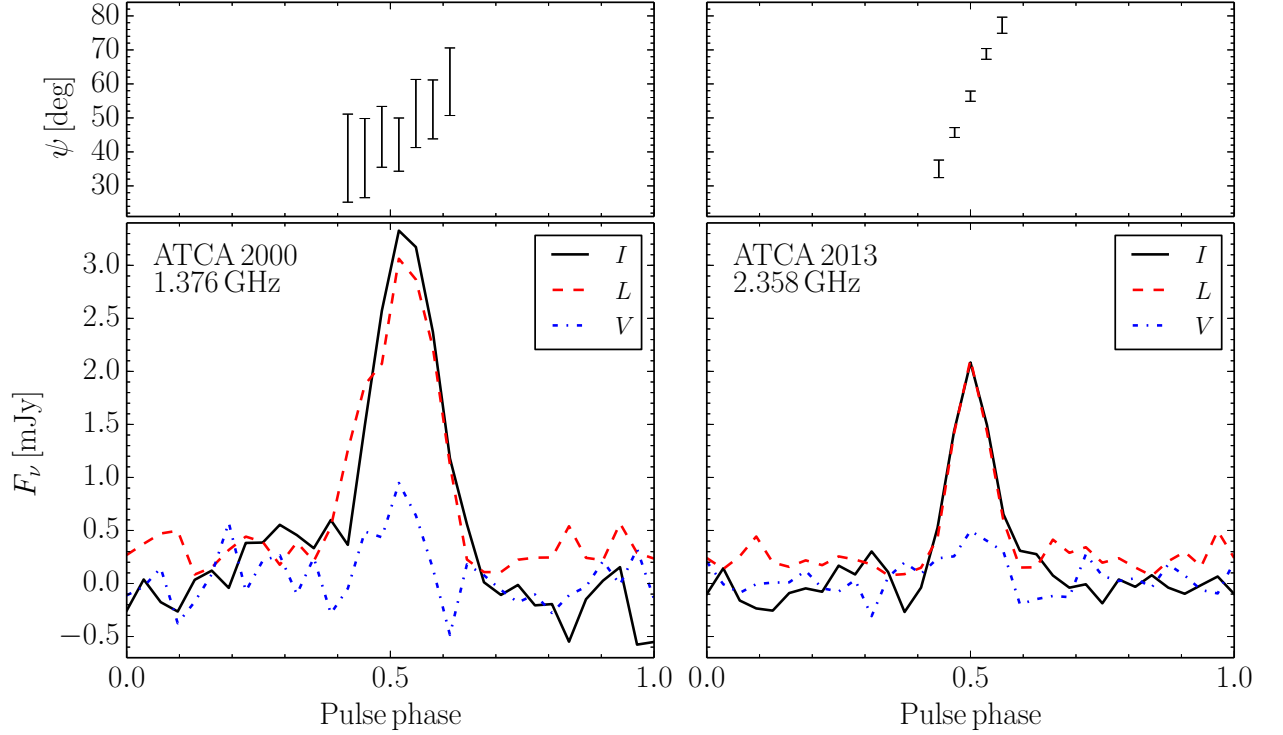


Рис. 3.7. Профили импульса и поляризации (*снизу*) и угол линейной поляризации ψ (*сверху*) для пульсара J1357–6429, измеренные на телескопе АТСА на частоте 1.376 ГГц (*слева*) и 2.358 ГГц (*справа*). Показан полный период пульсара. Сплошные, пунктирные и штрихпунктирные линии соответствуют полной интенсивности I , линейно поляризованной компоненте $L = (Q^2 + U^2)^{1/2}$ и круговой поляризации V . Значения ψ с внесённой поправкой на меру вращения показаны для фаз пульсирующей компоненты. Фаза 0.5 помещена в пик потока.

оценили нижний предел $\Delta t_R \gtrsim 6$ дней, что существенно выше длительности наших наблюдений.

3.3.4 Профиль импульса и поляризация

Мы изучили профили импульса и поляризацию на данных 2013 года в восьми подполосах. Разрешённые по фазе пульсара параметры Стокса I , Q , U и V были извлечены с использованием команды *psrplt* пакета MIRIAD. Излучение пульсара наблюдается в пяти фазовых бинах. Никаких значимых изменений ширины профиля и поляризации с частотой идентифицировано не было. Как пример, полученные профили импульса для параметра Стокса I , круговой поляризации V и линейно поляризованной компоненты $L = (Q^2 + U^2)^{1/2}$ в подполосе с центральной частотой 2.358 ГГц показаны в нижней правой части Рис. 3.7. Профиль интенсивности характеризуется единственной и относительно широкой компонентой. Полная ширина на половине максимума, полученная аппроксимацией профиля гауссианой, составляет $32^\circ \pm 3^\circ$. Этот результат и значения линейной и круговой поляри-

заций полностью сопоставимы с данными по наблюдениям с более высоким временным разрешением на частоте 1.4 ГГц на телескопе Parkes [35, 37]. Для сравнения, такие же профили были построены для подполосы с центральной частотой 1.376 ГГц из данных 2000 года (см. Рис. 3.7). Профиль интенсивности в этом случае шире, с полной шириной на половине максимума $\approx 43^\circ \pm 4^\circ$. Разница может частично объясняться размытием импульса на $\approx 9^\circ$ ввиду более низкого спектрального разрешения (ширина канала на данных 2000 года составляет ≈ 9 МГц против 4 МГц на данных 2013 года). Размытие на той же частоте на данных 2013 года менее значительно ($\approx 4^\circ$) и не влияет на профили импульса на более высоких частотах. С учётом размытия и ошибок аппроксимации, ширины импульса на данных 2000 и 2013 года сопоставимы друг с другом.

Достаточно широкая полоса в данных 2013 года позволила определить меру вращения в направлении на пульсар с использованием зависимости позиционного угла линейной поляризации ψ от квадрата длины волны. Значения ψ , а также его ошибки были определены из параметров Стокса Q и U, измеренных в пяти фазовых бинах пульсирующей компоненты с помощью процедуры *uvfit* в каждой из восьми подполос. Линейная аппроксимация наблюдаемой зависимости $\psi(\lambda^2)$ проводилась для каждого фазового бина, чтобы выявить наличие возможного изменения меры вращения по фазе [52]. Было выявлено, что полученные значения меры вращения согласуются друг с другом в пределах ошибок, потому общая аппроксимация зависимости $\psi(\lambda^2)$ проводилась одновременно по пяти бинам. Полученная аппроксимация оказалась неприемлемой ($\chi^2 = 1.79$ с 34 степенями свободы). Это указывает на недооценку ошибок позиционного угла или наличие его нетривиального спектрального поведения. Действительно, данные для двух низкочастотных подполос демонстрируют более пологое изменение ψ , чем в других шести подполосах. Причина такому поведению остаётся неясной, поэтому мы увеличили ошибки на измеренные значения ψ , чтобы сделать значение χ^2 равным единице. В итоге было получено значение меры вращения -43 ± 1 рад м⁻², которое меньше, но в целом сопоставимо со значением -47 ± 2 рад м⁻², полученным по данным наблюдений на телескопе Parkes с центральной частотой 1.4 ГГц в узкой полосе [35]. Аппроксимация зависимости для шести верхних частот является приемлемой без всякой перенормировки ошибок, хотя даёт меньшее значение меры вращения -37 ± 1 рад м⁻². Таким образом, нельзя исключить изменения меры вращения по спектру, которые наблюдаются для некоторых пульсаров [53]. Иллюстрация зависимости $\psi(\lambda^2)$ для центрального фазового бина показана на Рис. 3.8. Сплошная линия с серым заштрихованным регионом на Рис. 3.8 показывает лучшую аппроксимацию и ошибку аппроксимации на уровне 68%.

Иллюстрация поведения позиционного угла по фазе в пяти бинах пульсирующей компоненты, поправленного на меру вращения, приведена в правой верхней части Рис. 3.7.

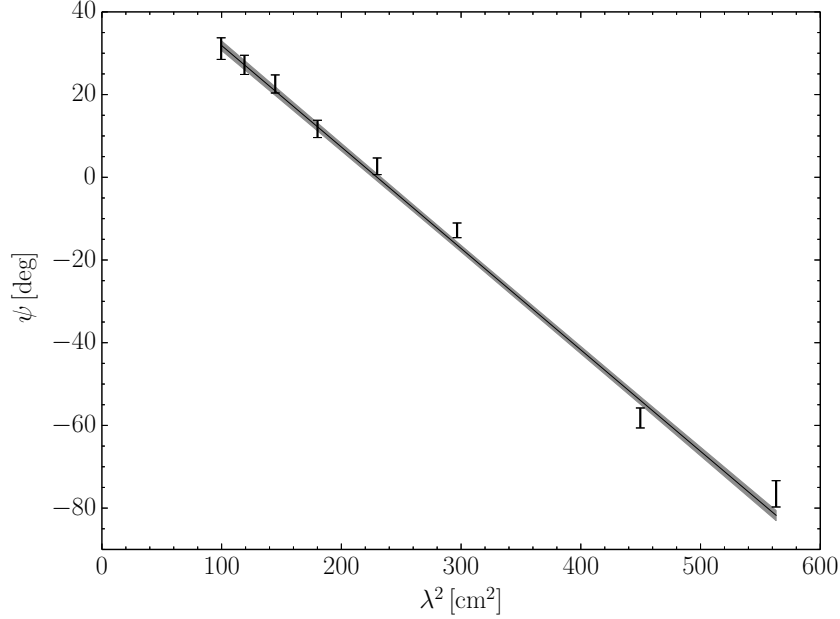


Рис. 3.8. Позиционный угол ψ в зависимости от квадрата длины волны λ . Серый заштрихованный регион показывает ошибку линейной аппроксимации на уровне 68%.

Зависимость является линейной с угловым коэффициентом $C = 0.96 \pm 0.03$. Как и ожидалось, результаты для данных с центральной частотой 1.376 ГГц наблюдений 2000 года сопоставимы с измерениями 2013 года (Рис. 3.7, верхняя левая часть). Измерения также сопоставимы с данными, полученными на телескопе Parkes [37] на более высоком временном разрешении. Зависимость практически не демонстрирует изгибов, ввиду чего определить параметры геометрии пульсара (в рамках модели RVM [54]), аппроксимируя ход позиционного угла, без привлечения дополнительной информации не представляется возможным. С использованием более детальной кривой ψ , в работе [37] были получены приблизительные оценки на угол α между магнитной и вращательной осями. Тем не менее, авторы предпочли модель почти соосного пульсара с $\alpha \approx 7^\circ$.

Модель RVM не вносит дополнительные ограничения на геометрию излучения пульсара по данным АТСА. Тем не менее, представляется возможным использовать наблюдаемую ширину профиля импульса и статистические данные по другим пульсарам. В работе [55] показано, что угловой радиус конуса излучения ρ_q (на некотором относительном уровне интенсивности q) может быть связан с наблюдаемой шириной импульса W_q на том же уровне как

$$\cos \rho_q = \cos \alpha \cos(\alpha + \beta) + \sin \alpha \sin(\alpha + \beta) \cos(W_q/2), \quad (3.1)$$

где $\alpha + \beta$ — угол между лучом зрения и осью вращения пульсара. Производная пози-

ционного угла связана с углами α и β через соотношение [56]

$$\sin \alpha = C \sin \beta. \quad (3.2)$$

Используя эти уравнения и принимая в качестве значения полной ширины на половине максимума импульса величину $W_{50} = 32^\circ$, можно найти углы α , β и ρ_{50} при любой позиции луча зрения $\zeta = \alpha + \beta$. Полученное решение меняется в широком диапазоне, но отношение $|\beta|/\rho_{50}$, т.е. отношение минимального расстояния между лучом зрения и осью трубки к радиусу трубки, находится в узком диапазоне 0.93–1 для всех ζ . Похожее решение с $W_{10} = 70^\circ$ дают $|\beta|/\rho_{10} \in (0.77, 1)$. Это говорит о том, что луч зрения проходит по краю трубки с вращением звезды. Можно оценить значение ρ , используя статистику по другим пульсарам. Распределение пульсаров на диаграмме W–P имеет нижнюю границу $W=\rho$, которая соответствует ортогональным пульсарам ($\alpha \approx \pi/2$) с $\beta \approx 0$ [57, 58]. В этом случае основное отличие наблюдаемой ширины импульса от минимальной описывается через соотношение [57, 58]

$$W_{\text{obs}} = \frac{W_{\text{min}}}{\sin \alpha}. \quad (3.3)$$

Эта формула позволяет оценить угол α из значений нижней границы W_{min} и наблюдаемой ширины профиля импульса W_{obs} . Используя значение W_{min} из работы [58], получаем $\alpha \approx 10^\circ$. Однако данный метод приводит к завышенным значениям угла α в случаях пульсаров, близких к соосным. Ввиду того что в случае пульсара J1357–6429 наблюдается высокое значение линейной поляризации и низкое значение круговой поляризации, вероятно, что однокомпонентный импульс пульсара J1357–6429 обусловлен прохождением луча зрения вблизи края пульсарной трубки. Это приводит к заметному уменьшению наблюдаемой ширины импульса W_{10} по сравнению с рассчитанным по формуле (3.3) [59]. В работе [60] показано, что использование формулы (3.3) применимо к коническим профилям, если угол β мал. Как было показано выше, это маловероятно в случае пульсара J1357–6429. Относительные вклады уширения импульса за счёт α и сужения импульса за счёт β заранее не известны. По этой причине мы используем метод, предложенный в работе [61]. В ней рекомендуется использовать значение наблюдаемой ширины импульса, усреднённое по всем пульсарам с данным периодом P , в качестве удвоенного значения ρ_q . Подставляя в формулу (9) из работы [61] значение периода пульсара J1357–6429, получаем $\rho_{10} \approx 13^\circ$. Используя уравнения (3.1) и (3.2), мы опять получаем $\alpha \approx 10^\circ$, что согласуется с простой оценкой из уравнения (3.3) и предпочтительному решению из работы [37].

3.4 Заключение к главе

Новые радиоинтерферометрические наблюдения на телескопе АТСА позволили детектировать пульсар J1357–6429 в диапазоне 1.1–3.1 ГГц, измерить его точную позицию, построить профили интенсивности и поляризации, изучить его спектр и определить меру вращения в направлении на пульсар в широком диапазоне частот. Сравнивая данные с архивными радиоинтерферометрическими данными 2000 года, мы изучили изменение потоков, профиля импульса и поляризации пульсара, а также ограничили его собственное движение.

Было показано, что пульсар имеет единственную пульсирующую компоненту с шириной импульса около 32° , которая не меняется по всему диапазону от 1.078 ГГц до 3.126 ГГц. Излучение пульсара практически полностью поляризовано (линейная поляризация достигает почти 100%), что наблюдается для молодых пульсаров с $\dot{E} \gtrsim 10^{34}$ эрг с^{-1} [62]. 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 [34, 35, 36, 37], а также с архивными данными наблюдений на частоте 1.376 ГГц на телескопе АТСА. Наблюдаемое увеличение ширины импульса на данных 2000 года объясняется размытием меры дисперсии ввиду более низкого спектрального разрешения. Спектральный индекс, оценённый из спектрального распределения энергии излучения пульсара по новым данным, составляет ≈ 0.5 . Значения потоков пульсара на данных 2000 года превышают потоки на данных 2013 года, по крайней мере для низкой частоты. Изменения потока могут объясняться эффектами межзвёздных рефракционных мерцаний на временных масштабах, существенно превосходящих длительность наблюдений. Чтобы проверить это предположение, необходим тщательный мониторинг пульсара (см., например, работу [63]).

Оценка меры вращения -43 ± 1 рад м^{-2} сопоставима в пределах 2σ с предыдущими измерениями, но является более надёжной, т.к. получена с использованием более широкого частотного диапазона. Основываясь на полученном значении меры вращения, мы оценили среднее значение галактического магнитного поля вдоль направления на пульсар $\bar{B} = 1.23 \times 10^{-6}$ RM/DM = -0.41 ± 0.01 мкГс. Такое значение близко к полученным для большинства других пульсаров из каталога ATNF⁷, расположенных в пределах 2° от позиции пульсара.

Используя методы абсолютной и относительной астрометрии, мы не детектировали собственное движение пульсара. Была произведена оценка верхнего предела на его собственное движение, 100 мсд год^{-1} (на уровне 90%), что соответствует поперечной скорости

⁷<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>, [64].

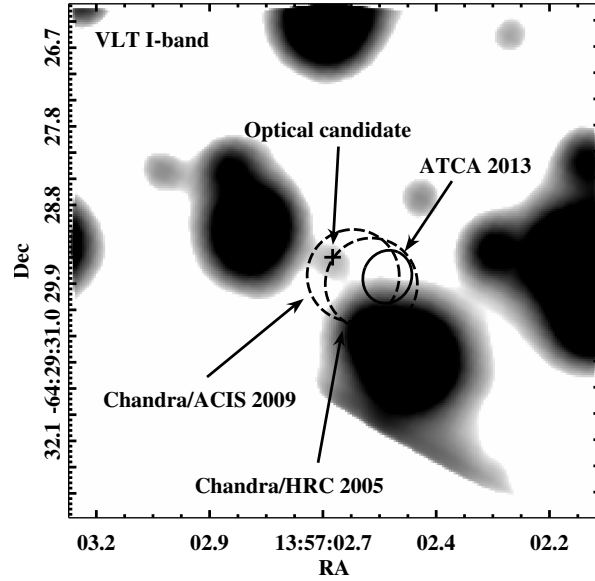


Рис. 3.9. Фрагмент изображения поля пульсара, полученного с помощью телескопа VLT в фильтре I (см. работу [10]). Кандидат в оптическое отождествление пульсара отмечен крестом. На фрагменте приведены позиционные эллипсы пульсара на уровне 1σ по данным наблюдений на телескопах *Chandra* и АТСА. Эти эллипсы также учитывают ошибку оптической астрометрической привязки, составляющую $0''.2$.

пульсара $v_{tr} \lesssim 1200 \text{ км с}^{-1}$ для расстояния 2.5 кпк, оценённого по мере дисперсии. Такая оценка не противоречит значению, предложенному в работе [41] и оценённому исходя из расстояния пульсара от центра протяжённого источника HESS J1356–645. Причиной отличия от экстремально высокой поперечной скорости пульсара, предложенной в работах [10] и [65], является сильная недооценка ошибок координат пульсара по данным наблюдений 2000 года на телескопе АТСА, описанных в работе [34]. Наш анализ показывает, что последующие наблюдения с по крайней мере таким же пространственным разрешением, как наблюдения 2013 года, позволят определить смещение пульсара с точностью $\lesssim 0''.15$.

Новую позицию пульсара по данным АТСА можно сопоставить с позицией кандидата в оптическое отождествление пульсара, предложенного в работе [10]. Позиционный эллипс с ошибкой на уровне 68% переложён на изображение, полученное на телескопе VLT в фильтре I и приведённое в работе [10] (см. Рис. 3.9). На рисунке также показаны рентгеновские позиции пульсара, полученные с помощью телескопа *Chandra*. Ввиду более высокой точности положения пульсара по данным АТСА по сравнению с рентгеновскими позициями, кандидат в оптическое отождествление исключается на уровне 99%. На расстоянии $\sim 1''$ к югу от нового положения пульсара расположена относительно яркая звезда, поэтому поиски его оптического излучения должны осуществляться в наблюдениях с высоким пространственным разрешением, что возможно на обсерватории HST или наземных оптических телескопах с системами адаптивной оптики.

Глава 4

Наблюдения гамма-пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне

4.1 Введение

В предыдущей главе описывается измерение точной позиции пульсара J1357–6429 по данным новых радиоинтерферометрических наблюдений. Используя полученную позицию, мы опровергли кандидат в оптическое отождествление пульсара J1357–6429, предложенный в работе [10], на доверительном уровне 99%. В настоящей главе описываются наблюдения пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне на телескопе VLT. Важным отличием этих наблюдений от представленных в работе [10] является возможность получения высокого углового разрешения, для чего используются системы адаптивной оптики. Такие наблюдения позволяют детектировать источники, скрываемые в “крыльях” ярких звёзд на изображениях с ограниченным качеством. В Разд. 4.2 описываются наблюдения и обработка данных. Результаты приводятся в Разд. 4.3 и обсуждаются в Разд. 4.4.

4.2 Данные телескопа VLT

4.2.1 Наблюдения и обработка данных

Поле пульсара наблюдалось в фильтрах J , H и K_s с помощью прибора Near-Infrared Imager and Spectrograph (CONICA) и системы адаптивной оптики Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS) (сокращённо NaCo) на телескопе VLT/UT4 (см. Разд. 1.1) в течение 2012–2013 гг. Для коррекции волнового фронта использовался прибор NAOS Dichroic Wavefront sensor, а также яркая звезда величиной $V \approx 13.8$, расположенная в $\approx 11''2$ от координат целевого источника. В каждом фильтре было снято несколько серий экспозиций длитель-

Таблица 4.1. Дневник наблюдений пульсара J1357–6429, программа 089.D-0956A.

Дата	Фильтр	Длительность экспозиции × количество [с]	Средний показатель воздушной массы	Качество изображения [сд]
2013-04-17	<i>J</i>	200×10	1.31	0.70–0.80
2013-03-15	<i>H</i>	200×10	1.32	0.83–0.89
2013-04-29	<i>K_s</i>	200×10	1.31	0.69–0.88

ностью 200 с. После предварительного просмотра данных были выбраны только те серии, в которых наблюдательные условия были относительно стабильными и фотометрическими, с качеством изображения в пределах $0''.7$ и $0''.9$ (см. Таблицу 4.1).

На данных была проведена стандартная редукция, включавшая вычитание электронного смещения, коррекцию на плоское поле, вычитание фона неба и удаление космических лучей. Качество изображения составило $\approx 0''.10$, $0''.13$ и $0''.08$, соответственно, для фильтров *J*, *H* и *K_s*. Средний показатель воздушной массы в каждом фильтре составило ≈ 1.3 , а полное время экспозиции каждого суммированного изображения – 2 кс.

4.2.2 Астрометрия

В качестве опорного изображения для астрометрической привязки использовалось изображение, полученное на телескопе VLT в фильтре *I* и представленное в работе [10]. Это изображение имеет значительно большее поле зрения, и точность его собственной астрометрической привязки составляет $\lesssim 0''.2$ (см. работу [10]). В качестве вторичных астрометрических стандартов на этом изображении было выбрано 15 изолированных ненасыщенных звёзд. Все звёзды присутствуют и на изображении с лучшим качеством, полученном в фильтре *K_s*. Абсолютные мировые координаты звёзд были определены на изображении в фильтре *I*. Их пиксельные координаты на изображении в фильтре *K_s* были определены с использованием команды *imcenter*. Точность определения составила $\lesssim 0.025$ пикселя. Команды *scmap/cctran* применялись для астрометрической трансформации изображения. Формальные ошибки *rms* астрометрической аппроксимации составили $\Delta RA \lesssim 0''.05$ и $\Delta Dec. \lesssim 0''.02$. Полученные изображения в фильтрах *J* и *H* были привязаны к изображению в фильтре *K_s* с точностью $\lesssim 0''.02$. Суммируя все ошибки и учитывая ошибку оптической астрометрической привязки, мы оценили консервативную ошибку астрометрической привязки для ИК изображений во всех фильтрах как $\lesssim 0''.21$ для обеих координат.

4.2.3 Фотометрическая калибровка

Для фотометрической калибровки использовались стандарты 9157, 9144 и 9150 [66], наблюдавшиеся в те же ночи, что и целевой источник. Использовались средние значения коэффициентов атмосферной экстинкции, представленные на сайте VLT¹: $k_J = 0.11$, $k_H = 0.06$ и $k_{K_s} = 0.07$. В результате для суммированных изображений были получены величины нуль-пунктов: $J^{ZP} = 24.03 \pm 0.02$, $H^{ZP} = 23.87 \pm 0.01$ и $K_s^{ZP} = 22.99 \pm 0.01$. Пределы детектирования точечного источника в пределах нескольких угловых секунд от целевого источника на уровне 3σ составили $J \approx 24.7$, $H \approx 23.2$ и $K_s \approx 22.7$.

4.3 Результаты

4.3.1 Поиск излучения пульсара

Фрагменты полученных изображений в фильтрах JHK_s представлены на Рис. 4.1. Все источники, детектированные ранее в оптическом диапазоне и проанализированные в работе [10], помечены, следуя номенклатуре авторов. Обозначения включают объект C , который в работе [10] был предложен как возможное оптическое отождествление пульсара. На изображениях в фильтрах JHK_s все объекты разрешаются лучше, чем на оптических изображениях. Рентгеновские позиции пульсара, определённые по данным наблюдений на обсерваториях *Chandra*/HRC (2005 г.) и *Chandra*/ACIS (2009 г.), а также новая позиция пульсара, полученная в предыдущей главе, показаны на изображении в фильтре K_s вместе с соответствующими позиционными эллипсами на уровне 1σ . Эллипсы учитывают неопределённости рентгеновских и радио измерений, а также ошибку астрометрической привязки изображения в ближнем ИК диапазоне. Как видно из рисунка, наиболее точные координаты пульсара, RA = 13:57:02.525(14) и Dec. = -64:29:29.89(15), определены по данным радионаблюдений (см. Разд. 3.3).

В пределах позиционного эллипса, полученного по данным радионаблюдений, детектируется точечный источник. Это слабый объект, отмеченный как C' на Рис. 4.1. Он также перекрывается с неопределённостями на уровне 1σ рентгеновских позиций пульсара. Координаты источника составляют RA=13:57:02.52 и Dec.= -64:29:30.15. Неопределённость на уровне 1σ для обеих координат составляет $0''.22$. В фильтрах J и K_s объект детектируется на уровне $\approx 4.5\sigma$. Наблюдается также след источника и в фильтре H , но из-за недостаточно высокого качества изображения в этом фильтре надёжно детектировать источник не представляется возможным. На оптических изображениях, имеющих не такое высокое пространственное разрешение ($0''.5$), объект C' скрыт в “крыльях” пространствен-

¹http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/decommissioned/isaac/tools/imaging_standards.html

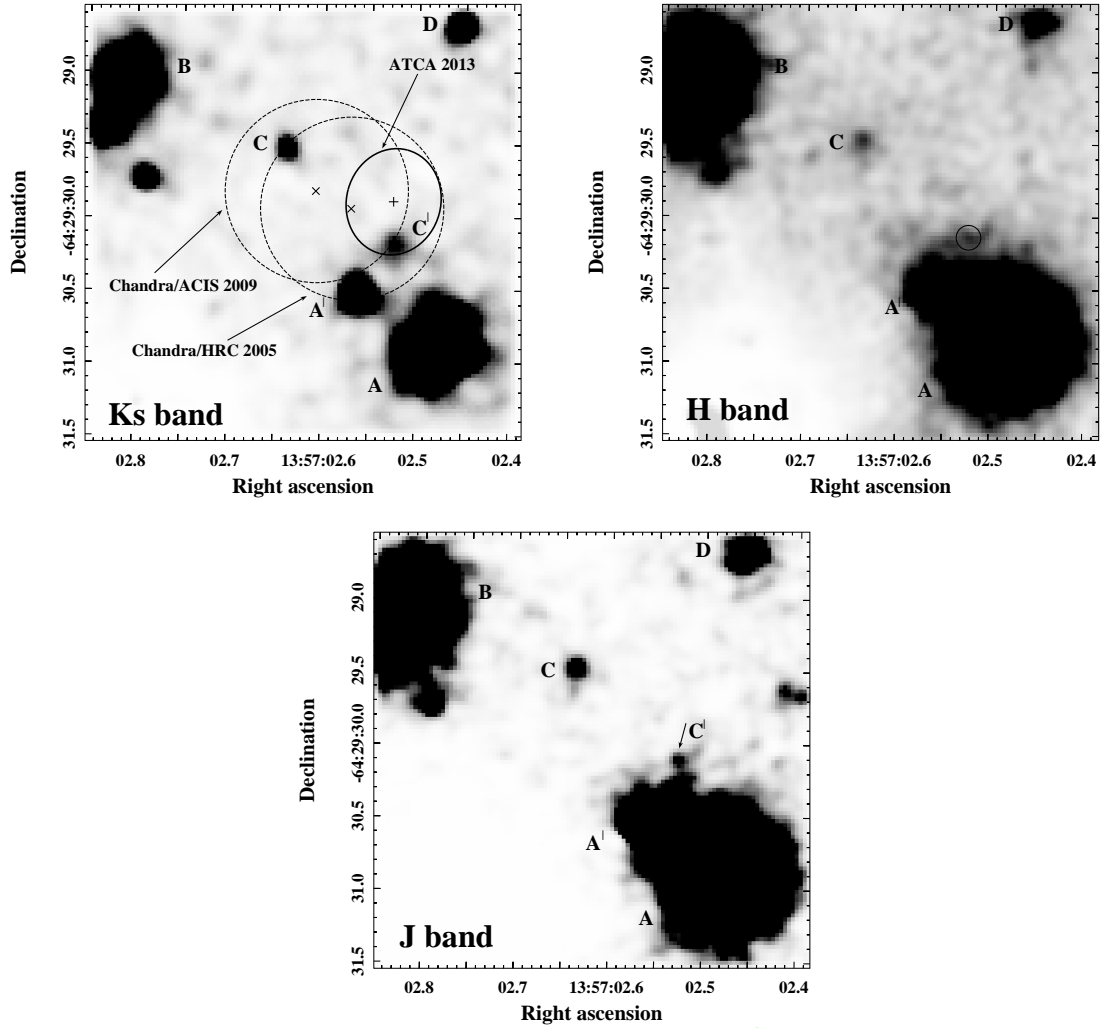


Рис. 4.1. Фрагменты изображений поля пульсара J1357–6429, полученных на телескопе VLT в фильтрах K_s (сверху слева), H (сверху справа) и J (снизу). Позиции пульсара по данным рентгеновских наблюдений и их ошибки на уровне 1σ показаны, соответственно, знаками X и пунктирными круговыми регионами на изображении в фильтре K_s . Знак $+$ и жирный эллипс соответствуют позиции пульсара по данным новых интерферометрических наблюдений и её ошибке на уровне 1σ , соответственно. Буквами A , A' , B , C и D обозначены те же объекты, что и в работе [10]. Новый кандидат в оптическое отождествление пульсара отмечен как C' . Он не детектируется на изображении в фильтре H из-за худшего качества, хотя на месте его положения в пределах кругового региона наблюдается некоторое повышение потока.

Таблица 4.2. Измеренные величины JHK_s точечных объектов, детектированных в окрестности пульсара и показанных на Рис. 4.1.

Источник	J	H	K_s
A	18.84(1)	18.15(1)	17.78(1)
A'	20.89(3)	20.02(4)	19.68(3)
B	19.43(1)	18.67(1)	18.32(1)
C	22.92(12)	22.06(15)	21.33(15)
C'	23.51(24)	$\gtrsim 22.8$	21.82(25)
D	21.89(5)	20.88(5)	20.38(6)

ных профилей относительно ярких звезд A и A' (см. работу [10]).

Как и в оптическом диапазоне [10], протяжённое рентгеновское излучение туманности пульсара в ближнем ИК диапазоне детектировано не было.

4.3.2 Фотометрия

Мы провели апертурную фотометрию всех точечных источников, помеченных на Рис. 4.1. Соответствующие апертурные поправки были оценены и применены посредством фотометрии расположенных около позиции пульсара ярких ненасыщенных источников поля. Также мы определили верхний предел на величину объекта C' на уровне 3σ в фильтре H . Результаты представлены в Таблице 4.2. Ошибки учитывают статистические неопределённости измерений, калибровочных нуль-пунктов и апертурной коррекции. Мы также оценили верхние пределы на величину объекта C' на изображениях в фильтрах VRI , представленных в работе [10]: $V \gtrsim 24.6$, $R \gtrsim 24.2$ и $I \gtrsim 23.2$.

4.4 Обсуждение

Для поиска излучения пульсара в оптическом и ближнем ИК диапазонах мы будем использовать наиболее точную позицию пульсара, полученную по данным радиоинтерферометрических наблюдений и представленную в предыдущей главе. Радиоинтерферометрические и ИК наблюдения пульсара проводились почти одновременно.

Источник C' — это единственный объект, находящийся в пределах радиоинтерферометрического позиционного эллипса (см. Рис. 4.1). Исходя из рентгеновских данных [10], представляется маловероятным, что наблюдаемая величина пульсара меньше $K_s \approx 20.5$. В поле зрения изображения в ближнем ИК диапазоне поверхностная плотность наблю-

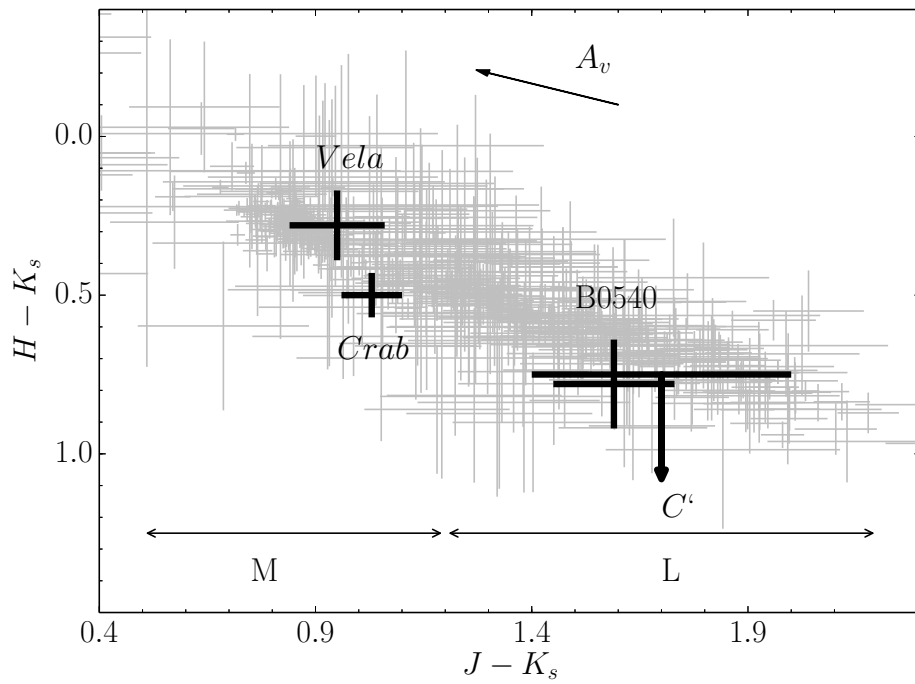


Рис. 4.2. Диаграмма цвет-цвет карликов классов М и L. На диаграмму нанесены наблюдаемые цвета объекта C' . Диапазоны цветов карликов L и M показаны стрелками с соответствующими подписями. Вектор поглощения “ A_V ” показывает направление и величину сдвига объекта C' на диаграмме для $A_V = 2$. Для сравнения на диаграмме также приведены цвета пульсаров Vela, Crab и B0540–69 (показаны с соответствующими ошибками).

даемых точечных источников величиной, начиная с $K_s \gtrsim 20.5$ и до величины предела детектирования 22.7, составляет ≈ 0.16 объектов на квадратную угловую секунду. Вероятность детектирования не относящегося к пульсару объекта с аналогичной яркостью в пределах позиционного эллипса составляет ≈ 0.08 . Далее мы будем рассматривать объект C' как возможное отождествление пульсара в ближнем ИК диапазоне.

Диаграммы цвет-величина и цвет-цвет часто используются для отождествления пульсаров по их необычным цветам (см., например, работы [10, 65, 67]). Используя данные из архивов 2MASS Data Mining and the M, L and T Dwarf Archives [68], мы построили диаграмму цвет-цвет для источников в ближнем ИК диапазоне (Рис. 4.2). Источники в архивных данных ассоциируются с карликами, находящимися в пределах 100 пк. Для таких расстояний экстинкция пренебрежимо мала, поэтому цвета звёзд сопоставимы со своими собственными цветами. Цвет $J - K_s$ объекта C' не отличается от цветов других объектов и мог бы соответствовать цветам карликов типа L (см. Рис. 4.2). Однако, как видно из Рис. 4.2, цвета других пульсаров, детектированных в ближнем ИК диапазоне (например, пульсаров Crab, Vela и B0540–69), также неотличимы от цветов последовательности карликов M-L. Таким образом, анализ цветов в ближнем ИК диапазоне не является информативным и не позволяет подтвердить или опровергнуть отождествление пульсара.

Другой способ установить природу объекта C' – это сравнение его потоков в ближнем ИК диапазоне с рентгеновскими спектральными данными. Предположительный спектр пульсара показан на Рис. 4.3. Потоки объекта C' поправлены на межзвёздное поглощение $A_V \approx 1.84$ в направлении на пульсар, оценённое в работе [10]. Непоглощённый рентгеновский спектр пульсара J1357–6429 воспроизведён с использованием спектральных параметров из работы [10]. Рентгеновское излучение пульсара на низких энергиях одинаково хорошо описывается моделью намагниченной атмосферы нейтронной звезды и чернотельной моделью. Высокоэнергичная часть спектра описывается степенным законом. В качестве примера на Рис. 4.3 приведён результат для атмосферной модели.

Как видно из Рис. 4.3, потоки пульсара в ближнем ИК диапазоне сопоставимы в пределах 1σ с экстраполяцией рентгеновского спектра. Замена атмосферной модели чернотельной не меняет этого результата. Схожая ситуация наблюдается для средневозрастного пульсара B0656+14 [69, 67]. Для других пульсаров, детектированных в ближнем ИК диапазоне, потоки в 10–100 раз ниже рентгеновской экстраполяции (см, например, работы [70, 71]). Таким образом, если объект C' является отождествлением пульсара J1357–6429, по своим многоволновым спектральным свойствам этот пульсар может быть схожим с пульсаром B0656+14, который демонстрирует необычно высокую яркость в ближнем ИК диапазоне.

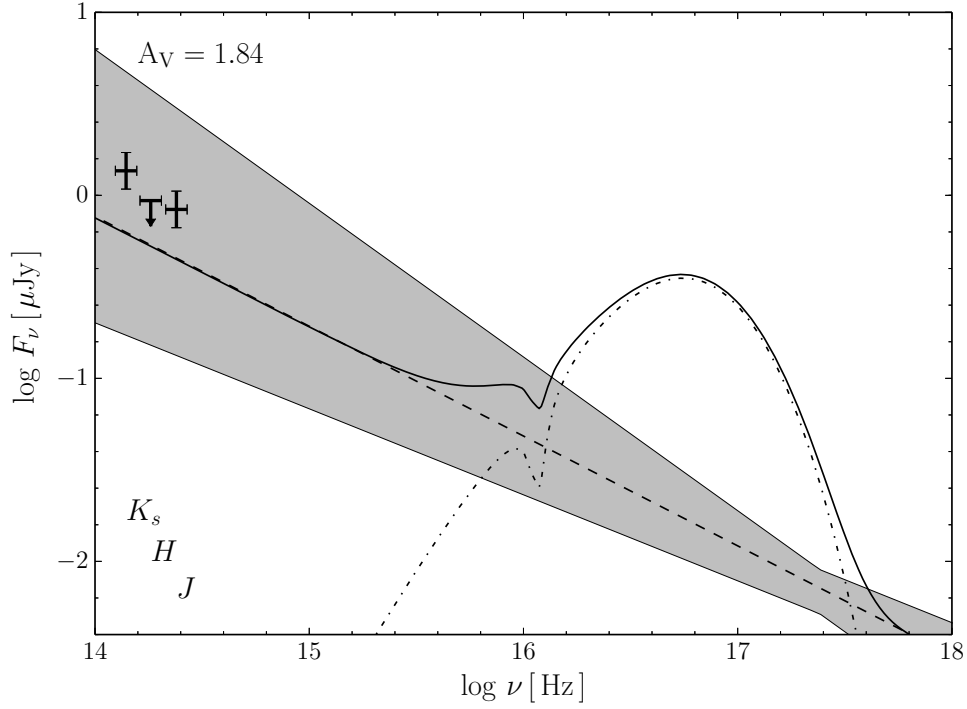


Рис. 4.3. Предположительный многоволновой непоглощённый спектр пульсара J1357–6429. Рентгеновская часть описывается моделью намагниченной водородной атмосферы и степенной моделью (см. работу [10]). Сплошная, пунктирная и штрихпунктирная линии соответствуют полному рентгеновскому спектру и вкладам степенной и атмосферной компонент. Рентгеновский спектр экстраполирован в ближний ИК диапазон. Непоглощённые потоки в фильтрах JK_s и верхний предел в фильтре H объекта C' показаны жирными крестами.

Последнее утверждение также подтверждается результатом анализа эффективностей трансформации энергии вращения пульсаров в нетепловое 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_s . В Таблице 4.3 собраны все соответствующие данные для восьми пульсаров, наблюдаемых в ближнем ИК и рентгеновском диапазонах (включая пульсар J1357–6429). Только пять из приведённых объектов надёжно отождествляются в ближнем ИК диапазоне. Кандидат для пульсара B1509–58 [72] ещё не был подтверждён, а для пульсара J1124–5916 [73] есть только верхний предел на поток. На Рис. 4.4 показано сопоставление $\text{Log } \eta_{K_s}$ и $\text{Log } \eta_X$. Из рисунка видно, что параметры сильно коррелируют. Коэффициент корреляции составляет 0.99. Позиции четырёх пульсаров, достоверно детектируемых в ИК диапазоне, на диаграмме $\text{Log } \eta_X$ – $\text{Log } \eta_{K_s}$ могут быть аппроксимированы линейной регрессией. Лучшая аппроксимация и её неопределённость на уровне 1σ показаны пунктирной линией и серым заполненным регионом, соответственно. На диаграмме также приведены параметры регрессии. Единственный пульсар, превосходящий аппроксимацию (примерно на 3σ), это пульсар B0656+14. В линейной шкале он превосходит лучшую аппроксимацию на порядок величины. В работе [67] обсуждается, что это может наблюдаться из-за присутствия пассивного реликтового диска, образовавшегося в результате падения вещества остатка сверхновой на нейтронную звезду. Однако нельзя исключать, что необычная эффективность пульсара B0656+14 в ближнем ИК диапазоне является особым свойством излучения его магнитосферы.

Из Рис. 4.4 видно, что если пульсарная природа объекта C' будет подтверждена, то это будет ещё один пример пульсара с такой необычно высокой эффективностью. Последнее может быть важно для понимания природы излучения пульсаров в оптическом и ближнем ИК диапазонах. Если же объект C' не имеет отношения к пульсару J1357–6429, то, исходя из расположения предела детектирования наших наблюдений на диаграмме (см. Рис. 4.4) по отношению к лучшей аппроксимации, можно заключить, что пульсар может быть на две величины слабее, чем объект C' .

Верхние пределы на оптические потоки кандидата, полученные по данным наблюдений на телескопе VLT, $F_V \lesssim 2.9$ мкЯн, $F_R \lesssim 2.6$ мкЯн и $F_I \lesssim 3.8$ мкЯн, превосходят экстраполяцию рентгеновского спектра и по этой причине являются неинформативными.

Таблица 4.3. Параметры пульсаров в ближнем ИК и рентгеновском диапазонах. Наблюдаемые величины в фильтре K_s и значения A_V для всех пульсаров, кроме J1357–6429 и Vela, взяты из работы [73]. Наблюдаемая величина в фильтре K_s для пульсара Vela позаимствована из работы [74]. Рентгеновские данные и другие параметры пульсаров взяты из работы [75]. Данные для пульсара J1357–6429 в ИК диапазоне представлены данными для кандидата C' и пределом детектирования наблюдений. Также приводятся верхний предел на величину пульсара J1124–5916 в ближнем ИК диапазоне [73] и данные для кандидата в отождествление пульсара B1509–58 [72].

Пульсар	$\log \tau$	$\log \dot{E}$	расстояние	A_V	K_s	$\log L_{K_s}$	$\log \eta_{K_s}$	$\log L_x^{**}$	$\log \eta_x$
	лет	эрг с^{-1}	кпк	величина	величина	эрг с^{-1}	эрг с^{-1}	эрг с^{-1}	
Crab	3.1	38.65	1.73(28)	1.62	13.77(5)	32.33(17)	-6.32(17)	36.19(1)	-2.47(1)
PSR 0540-69	3.2	38.17	50	0.62	18.55(10)	33.30(4)	-4.87(4)	36.41(10)	-1.76(10)
PSR B1509-58	3.2	37.25	5.2(1.4)	4.8	19.4(1)	31.18(30)	-6.1(3)	35.04(8)	-2.21(8)
PSR 1124-5916	3.5	37.08	~ 6.0	1.98(12)	≥ 22.7	≤ 29.9	≤ -7.2	33.56(5)	-3.52(5)
PSR J1357-6429	3.8	36.49	2.5	1.84	21.82(25)	29.40(11)	-7.09(11)	31.7(1)	-4.8(1)
					≥ 22.7	≤ 29.05	≤ -7.44		
Vela	4.1	36.84	$0.293^{+0.019}_{-0.017}$	0.170(16)	21.76(6)	27.52(8)	-9.32(8)	31.48(15)	-5.36(15)
PSR B0656+14	5.0	34.58	$0.288^{0.033}_{-0.027}$	0.09(6)	22.11(13)*	27.38(16)	-7.2(16)	30.25(1)	-4.33(1)
Geminga	5.5	34.51	$0.250^{+0.120}_{-0.060}$	0.12(9)	23.4(2)*	26.7(3)	-7.8(3)	30.32(4)	-4.19(4)

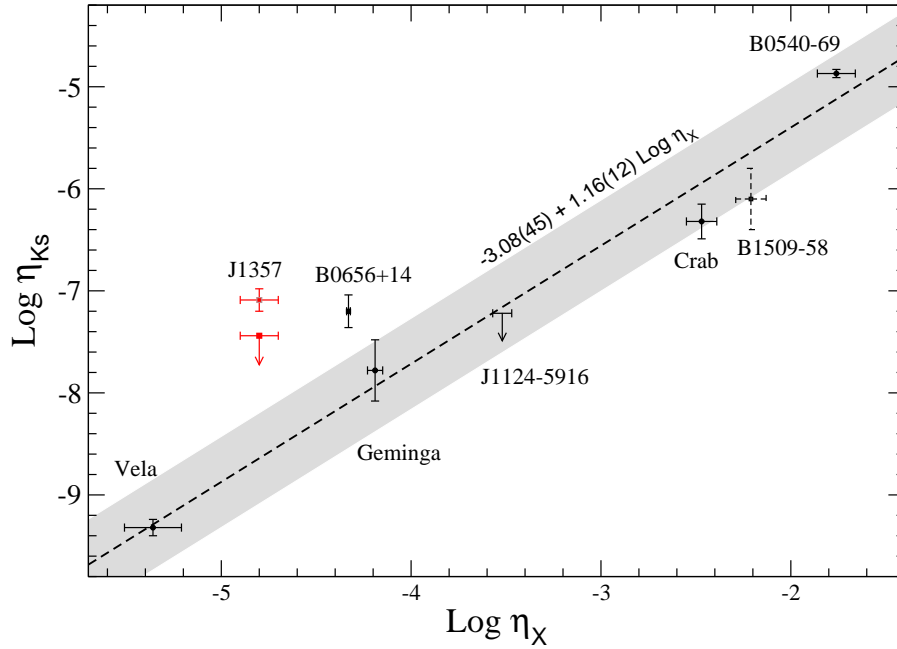


Рис. 4.4. Сравнение эффективностей пульсаров в фильтре K_s и рентгеновском диапазоне. Пунктирная линия и серый регион показывают лучшую аппроксимацию данных с неопределённостью на уровне 1σ для положений надёжно детектированных пульсаров в ближнем ИК диапазоне (помечены чёрными точками), за исключением пульсара B0656+14. Пульсар J1357–6429 представлен кандидатом C' и пределом детектирования наблюдений. Для сравнения показаны кандидат в отождествление пульсара B1509–58 в ближнем ИК диапазоне и верхний предел на поток пульсара J1124–5916.

4.5 Заключение к главе

По данным наблюдений поля пульсара в фильтрах JHK_s на телескопе VLT был детектирован точечный источник, который может являться отождествлением пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне. Величины источника в фильтрах J и K_s составляют, соответственно, 23.51 ± 0.24 и 21.82 ± 0.25 . В фильтре H был оценён только верхний предел на величину источника, 22.8. Непоглощённые потоки источника сопоставимы с экстраполяцией рентгеновского спектра пульсара в ближний ИК диапазон. Подобная ситуация наблюдается и для средневозрастного пульсара B0656+14. Таким образом, если кандидат действительно является отождествлением пульсара J1357–6429 в ближнем ИК диапазоне, то оба объекта демонстрируют необычно высокую эффективность по отношению к рентгеновской в сравнении с другими пульсарами, детектированными в обоих диапазонах.

Наблюдения поля пульсара J1357–6429 в оптическом диапазоне с использованием инструментов с высоким пространственным разрешением, таких как HST, необходимы для подтверждения пульсарной природы объекта C' . Важны также и дальнейшие измерения собственного движения пульсара в радио и ближнем ИК диапазонах.

Глава 5

Глубокие оптические наблюдения гамма-пульсара J0357+3205

5.1 Введение

Радиотихий пульсар J0357+3205 с периодом 444 мс и характеристическим возрастом 5.4×10^5 лет был обнаружен обсерваторией *Fermi* в одном из “поисков вслепую” [76]. Расстояние до пульсара в 500 пк оценивалось в работе [77] с помощью эмпирического соотношения, используемого для определения расстояний до гамма-пульсаров с неизвестным значением меры дисперсии (см., например, работу [78]). Пульсар был отождествлён в рентгеновском диапазоне по данным первых рентгеновских наблюдений его поля, проведённых на обсерватории *Chandra*. В наблюдениях было также обнаружено протяжённое (9 угловых минут) рентгеновское излучение — так называемый “хвост” [77]. Последующие наблюдения на рентгеновской обсерватории *XMM-Newton* показали, что излучение самого пульсара является преимущественно нетепловым, но имеет мягкую тепловую компоненту [79]. Поле пульсара также наблюдалось в оптическом и ближнем ИК диапазонах на телескопах с диаметром зеркала 2.5–4 м. Пульсар не был отождествлён в этих наблюдениях (верхний предел $V \gtrsim 26^m.7$ [77]).

Чтобы отождествить пульсар J0357+3205 и/или его туманность, мы провели оптические наблюдения на телескопе GTC (диаметр зеркала 10.4 м) на более высоком уровне чувствительности. Описание наблюдений и редукции данных приведено в Разд. 5.2. Результаты наблюдений, а также независимый анализ архивных рентгеновских данных приведены в Разд. 5.3 и обсуждаются в Разд. 5.4.

Таблица 5.1. Дневник наблюдений пульсара J0357+3205 с помощью инструмента OSIRIS на телескопе GTC.

Дата	Фильтр	Длительность экспозиции × количество [с]	Средний показатель воздушной массы	Качество изображения [сд]
2012-12-06	g'	700×4	1.07	0.8
2012-12-16	g'	700×4	1.13	0.9–1.0
2013-01-05	g'	700×2	1.09	0.9–1.0
2013-01-13	g'	700×4	1.18	0.8

5.2 Данные наблюдений на телескопе GTC

5.2.1 Наблюдения и обработка данных

Наблюдения поля пульсара проводились в декабре 2012 и январе 2013 года с помощью инструмента OSIRIS в слоановском фильтре g' на телескопе GTC (см. Разд. 1.1). Условия во время наблюдений были фотометрические, а качество изображений варьировалось в пределах $0''.8$ и $1''.0$ (см. Таблицу 5.1). В результате мы получили четыре серии наблюдений, каждая из которых содержала несколько экспозиций по 700 с. Все наблюдения проводились в условиях засветки неполной Луной. Пульсар экспонировался на вторую ПЗС матрицу детектора.

На полученных данных была проведена стандартная редукция, включающая вычитание электронного смещения, коррекцию на плоское поле и удаление космических лучей. Последующий анализ данных показал, что каждая экспозиция зашумлена неоднородным фоном. Причиной этому являлся наклон оси барабана фильтров детектора на $10^\circ.5$ относительно оптической оси телескопа. Из-за наклона центральная частота полосы пропускания каждого фильтра сдвигается в синюю сторону. Для широкополосных фильтров этот эффект, как правило, незначителен¹, но становится заметным в случае яркого фона, как и на наших изображениях. Для того чтобы убрать загрязнение, была проведена коррекция засветки в каждой серии наблюдений.

С использованием набора ненасыщенных звёзд, все скорректированные экспозиции были привязаны к “лучшей” экспозиции, имеющей самое высокое качество изображения.

¹Эффект приводит к смещению в 30 \AA для слоановского фильтра g' , пояснение см. в руководстве по использованию детектора http://www.gtc.iac.es/instruments/osiris/media/OSIRIS-USER-MANUAL_v2.1.pdf

Точность привязки составила $\lesssim 0.1$ пикселя. В результате было получено суммарное изображение со средним качеством $0''.9$, средним показателем воздушной массы 1.12 и полным временем экспозиции 9.8 кс.

5.2.2 Астрометрическая привязка и фотометрическая калибровка

Для проведения точной астрометрической привязки были использованы положения астрометрических стандартов из астрометрического каталога USNO-B1². Ну суммированном изображении было выбрано 10 изолированных ненасыщенных звёзд. Точные пиксельные координаты этих звёзд были определены с помощью команды *imcenter* из пакета IRAF с точностью $\lesssim 0.003$ пикселя. Для астрометрического преобразования применялась команда *ssarp*. Формальные ошибки астрометрической привязки составили $\lesssim 0''.123$ для прямого восхождения и $\lesssim 0''.155$ для склонения, что сопоставимо с номинальной ошибкой каталога $\approx 0''.2$. Полученная консервативная ошибка на уровне 1σ на привязку суммированного изображения составила $\lesssim 0''.23$ для прямого восхождения и $\lesssim 0''.25$ для склонения.

Для фотометрической калибровки был использован слоановский стандарт G158-100 [80], наблюдавшийся в те же ночи, что и поле пульсара. Коэффициент атмосферной экстинкции для фильтра g' , позаимствованный из руководства по использованию детектора, составляет 0.16(1). Полученная величина нуль-пункта для суммированного изображения составляет 28.64(5).

5.3 Результаты

5.3.1 Поле пульсара

На Рис. 5.1 слева представлена часть суммированного изображения поля пульсара в слоановском фильтре g' . На изображении показан регион с центром в положении пульсара на эпоху оптических наблюдений (RA = 03:57:52.293 и Dec = +32:05:20.970). Координаты оценивались исходя из рентгеновского положения пульсара, определённого по данным наблюдений 2009 года на обсерватории *Chandra* (см. работу [77]), и с учётом собственного движения пульсара $0''.165 \pm 0''.030$ лет⁻¹ [81], которое даёт существенный вклад в изменение положения объекта по данным рентгеновских наблюдений 2009 года и оптических наблюдений 2012–2013 гг. Регион, показанный на изображении, имеет радиус $\sim 1''.1$ и соответствует неопределённости положения пульсара на уровне 3σ . Радиус был оценён с учётом ошибок оптической астрометрической привязки, собственного движения объекта и рентгеновского положения пульсара³.

²См. <http://www.nofs.navy.mil/data/fchpix/>

³Учитывалась ошибка на положение объекта $0''.25$, полученная по данным рентгеновских наблюдений и позаимствованная из работы [77].

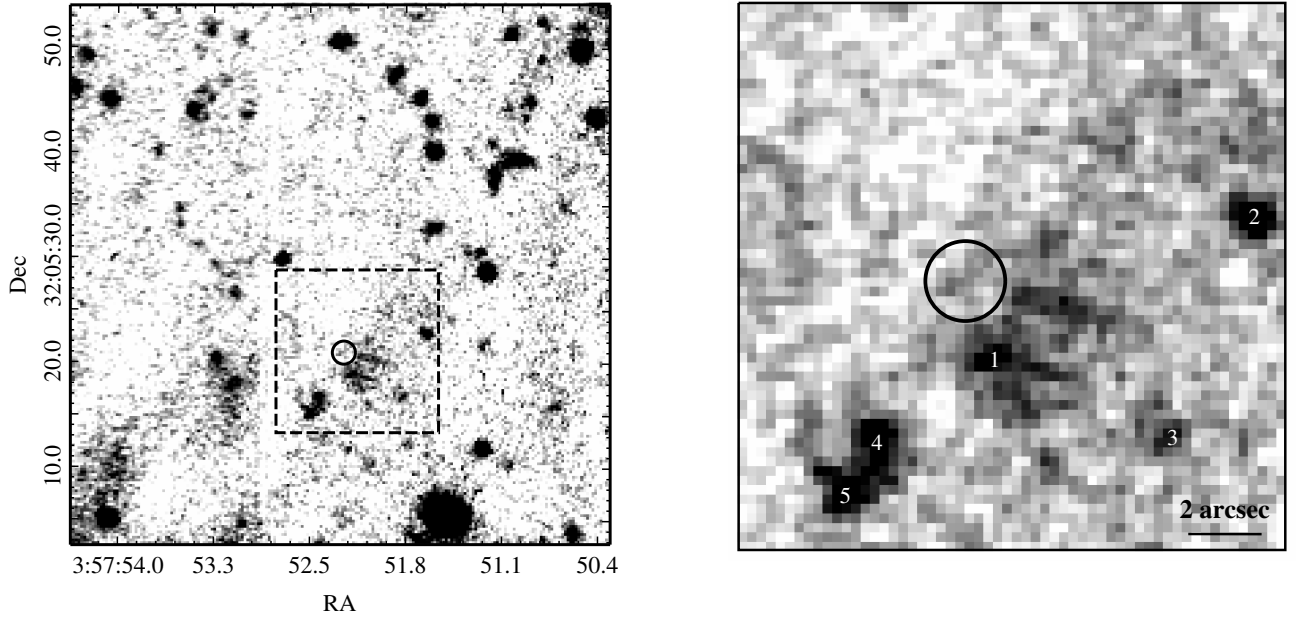


Рис. 5.1. Слева: Фрагмент изображения поля пульсара, полученного детектором OSIRIS на телескопе GTC в слоановском фильтре g' . Круговой регион с центром в рентгеновской позиции пульсара показывает неопределенность его положения на уровне 3σ на эпоху оптических наблюдений (см. текст). Размер фрагмента составляет $\sim 51'' \times 51''$. Справа: Выделенная прямоугольником на изображении слева окрестность пульсара в увеличенном виде. Изображение сглажено гауссианой с ядром в один пиксель. Источники, обсуждающиеся в тексте, обозначены цифрами. Размер изображения составляет $15'' \times 15''$.

Окрестность пульсара обозначена пунктирным прямоугольником и в увеличенном виде представлена на Рис. 5.1 справа. С использованием команды *daofind* в этом регионе было детектировано пять компактных источников на уровне $\gtrsim 3\sigma$. На Рис. 5.1 эти объекты обозначены цифрами. Ближайший к пульсару источник “1” в фильтре g' имеет величину $26^m6(1)$. Он расположен в $2''.2$ от рентгеновского положения пульсара, что соответствует примерно 6σ . Такое значительное несогласование с положением пульсара указывает на то, что источник “1” не может рассматриваться как оптическое отождествление пульсара. Исходя из пространственного профиля яркости объекта, невозможно определить, является ли он точечным источником или яркой частью протяженной структуры, находящейся к юго-западу от пульсара. Объекты “2” и “3” с соответствующими величинами $26^m4(1)$ и $26^m8(2)$ являются, вероятно, точечными. Они находятся ещё дальше от положения пульсара, поэтому с большой вероятностью не имеют к нему отношения. Протяженные объекты “4” и “5” с величинами $25^m9(1)$ и $26^m3(1)$, соответственно, являются, по всей видимости, галактиками или неразрешёнными группами объектов. В пределах позиционного эллипса присутствует компактное повышение уровня фона. Однако его значение не превышает уровень флуктуаций фона в этом регионе, поэтому нет сильных аргументов в пользу того,

что это реальный объект.

Ввиду вышеизложенного, по имеющимся оптическим данным можно сделать лишь консервативную оценку верхнего предела на поток пульсара. Следуя стандартной процедуре, описанной, например, в работе [82], мы получили верхний предел на поток точечного источника $\lesssim 0.023$ мкЯн ($g' \gtrsim 28^m 1$) на уровне 3σ . К настоящему моменту эта оценка является наиболее точным ограничением потока пульсара в оптическом диапазоне.

Никакого протяженного излучения, кроме структуры, расположенной около источника “1” к юго-западу от пульсара, обнаружено не было. Эта структура не может быть ассоциирована с длинным рентгеновским “хвостом”, расположенным к юго-востоку от пульсара, хотя его самые яркие части не попадают в поле зрения оптического изображения. Таким образом, природа протяжённой структуры остаётся неясной. Возможно, это межзвездное облако в окрестности пульсара, частично ионизованное его излучением и излучающее в эмиссионных линиях [OIII]5007/4969Å. Эти линии попадают в диапазон фильтра g' . Для выявления природы источника необходимы наблюдения в других широкополосных и узкополосных фильтрах.

5.3.2 Независимый анализ рентгеновского спектра

Чтобы оценить, насколько информативным является верхний предел на поток пульсара, нужно сравнить его с рентгеновскими спектральными данными. Для этого был проведён независимый анализ архивных рентгеновских данных, полученных с помощью обсерваторий *Chandra*⁴ и *XMM-Newton*⁵. Для извлечения спектров пульсара были использованы апертуры, содержащие $\gtrsim 90\%$ излучения пульсара. Радиусы апертур составили $2''$ и $30''$, соответственно, для данных *Chandra* и *XMM-Newton*. Для извлечения использовались утилиты *specextract* и *especget* пакетов CIAO v.4.5 и SAS 13.0. В результате было получено ~ 3500 каунтов источника по данным *XMM-Newton*/EPIC и ~ 1000 каунтов по данным *Chandra*/ACIS. С использованием пакета XSPEC v.12.8.1 мы аппроксимировали спектры в диапазоне 0.3–10 кэВ поглощённой спектральной моделью. Модель состоит из степенной и тепловых эмиссионных компонент, происходящих, соответственно, из магнитосферы и с поверхности нейтронной звезды. Была использована фотоэлектрическая абсорбционная модель *phabs* из пакета XSPEC с обилием элементов *angr* [83] и сечениями фотопоглощения *vsms* [84]. Тестировались также другие обилия элементов и сечения фотопоглощения, доступные в пакете XSPEC⁶, но они не изменили статистику аппроксима-

⁴ACIS-S, идентификационные номера 11239, 12008 и 14207 (даты 2009.10.26, 2009.10.25 и 2011.12.24), время экспозиции 46 кс + 29 кс + 29 кс, главный исследователь A. de Luca.

⁵EPIC-MOS и PN, идентификационный номер 0674440101, дата 2011.09.15, время экспозиции 110 кс, главный исследователь A. de Luca.

⁶См. <http://heasarc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/XSmodelPhabs.html>

Таблица 5.2. Параметры лучших аппроксимаций рентгеновского спектра пульсара. Температуры T^∞ и радиусы излучающей поверхности R^∞ являются параметрами, измеряемыми удалённым наблюдателем. N_H — поглощающая колонковая плотность межзвёздного вещества. PL_{norm} и Γ — нормировка степенного закона и спектральный индекс, соответственно. Ошибки приводятся на уровне 90%.

Модель	N_H 10^{21} см^{-2}	Γ	PL_{norm} $10^{-5} \text{ фотон кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	T^∞ эВ	R^∞ $d_{500pc} \text{ км}$	χ^2/dof (dof)
BB+PL	$1.4^{+0.5}_{-0.4}$	$2.2^{+0.2}_{-0.2}$	$1.1^{+0.2}_{-0.2}$	93^{+9}_{-9}	$0.5^{+0.4}_{-0.2}$	1.05 (244)
NSA+PL	$1.6^{+0.9}_{-0.6}$	$2.1^{+0.3}_{-0.3}$	$1.0^{+0.3}_{-0.3}$	37^{+12}_{-8}	6^{+10}_{-5}	1.05 (244)
NSA+PL (фиксированная нормировка NSMAX)	$2.4^{+0.2}_{-0.3}$	$2.3^{+0.1}_{-0.2}$	$1.2^{+0.2}_{-0.1}$	30^{+1}_{-1}	15.73	1.07 (245)
NSMAX+PL	$1.7^{+0.6}_{-0.5}$	$2.0^{+0.2}_{-0.2}$	$0.9^{+0.2}_{-0.2}$	36^{+8}_{-6}	8^{+12}_{-5}	1.05 (244)
NSMAX+PL (фиксированная нормировка NSMAX)	$2.1^{+0.2}_{-0.2}$	$2.0^{+0.2}_{-0.2}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	31^{+1}_{-1}	15.73	1.05 (245)

ции (χ^2) существенным образом, и параметры аппроксимации остались в пределах своих доверительных интервалов. Для тепловой компоненты использовались модели чернотельного излучения (BB) и намагниченной водородной атмосферы нейтронной звезды (NSA и NSMAX) [85, 86]. Все модели давали приемлемые аппроксимации.

Параметры лучшей аппроксимации для поглощённых моделей BB+PL, NSA+PL и NSMAX+PL приведены в Таблице 5.2. Приведённые ошибки соответствуют доверительному интервалу 90%. В модели NSA были зафиксированы масса нейтронной звезды M , радиус R и магнитное поле поверхности B на значениях $1.4M_\odot$, 13 км и 10^{12} Гс, соответственно. В модели NSMAX был зафиксирован параметр красного смещения $1+z$ на значении 1.21, которое соответствует тем же M и R . Была выбрана модель 1200 из семейства NSMAX, которая описывает атмосферу с полем $B = 10^{12}$ Гс. Ввиду искривления пространства-времени около нейтронной звезды, её кажущийся радиус $R^\infty(1+z) = 15.73$ км. Температуры T^∞ и радиусы излучающей поверхности R^∞ (в единицах d_{500pc} км) являются параметрами, измеряемыми удалённым наблюдателем. Для всех моделей R^∞ определён из нормировки модели.

Излучающая чернотельное излучение область оказывается значительно меньше, чем

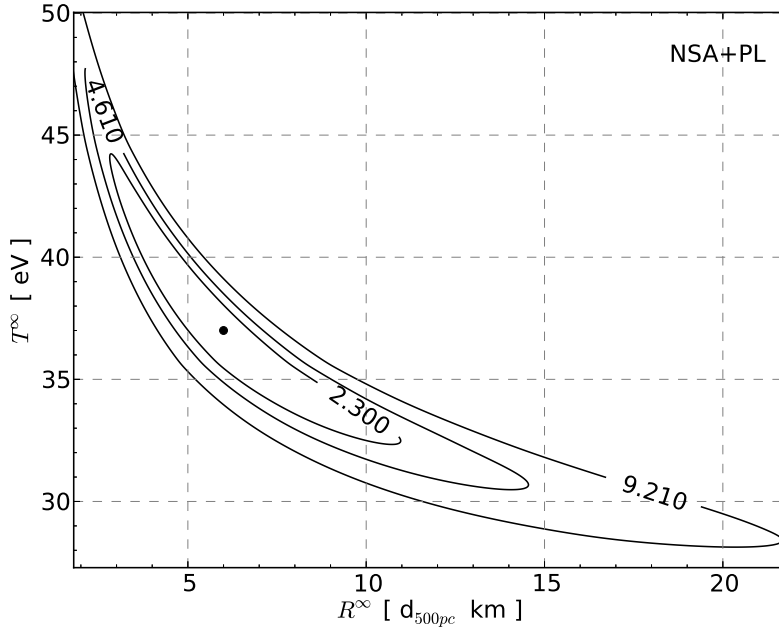


Рис. 5.2. Доверительные контуры эффективной температуры и радиуса излучающей поверхности нейтронной звезды для поглощённой модели NSA+PL на доверительных уровнях 68%, 90% и 99% ($\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi_{min}^2 = 2.3, 4.61$ и 9.21 , соответственно). Точкой показаны параметры лучшей аппроксимации (см. Таблицу 5.2).

вся поверхность нейтронной звезды. Размер области согласуется с каноническим размером полярной шапки пульсара [87], который составляет около 0.32 км. Такое значение определяется для нейтронной звезды с радиусом 13 км и периодом 444 мс. В то же время модели NSA и NSMAX дают радиус излучающей поверхности значительно больше радиуса шапки. Этот радиус хорошо согласуется со стандартным кажущимся радиусом нейтронной звезды (10–20 км), особенно если учитывать ошибки на расстояние (см. ниже). Это также демонстрируется доверительными контурами $T^\infty - R^\infty$, представленными на Рис. 5.2 и Рис. 5.3. К тому же, если нормировки для обеих моделей водородной атмосферы зафиксированы на расстоянии 500 пк, — в соответствии с кажущимся радиусом излучающей области 15.73 км — то аппроксимация также будет статистически приемлемой (см. третий и пятый ряды в Таблице 5.2). Несмотря на то что лучшие аппроксимации моделей NSA и NSMAX дают согласующиеся параметры (см. Таблицу 5.2), параметры аппроксимации модели NSMAX считаются более подходящими, т.к. данная модель учитывает частичную ионизацию атмосферной плазмы. Этот эффект важен для намагниченных водородных атмосфер с эффективными температурами менее 90 эВ [88], что имеет место в нашем случае.

Мы также оценили верхний предел на температуру полной поверхности звезды в мо-

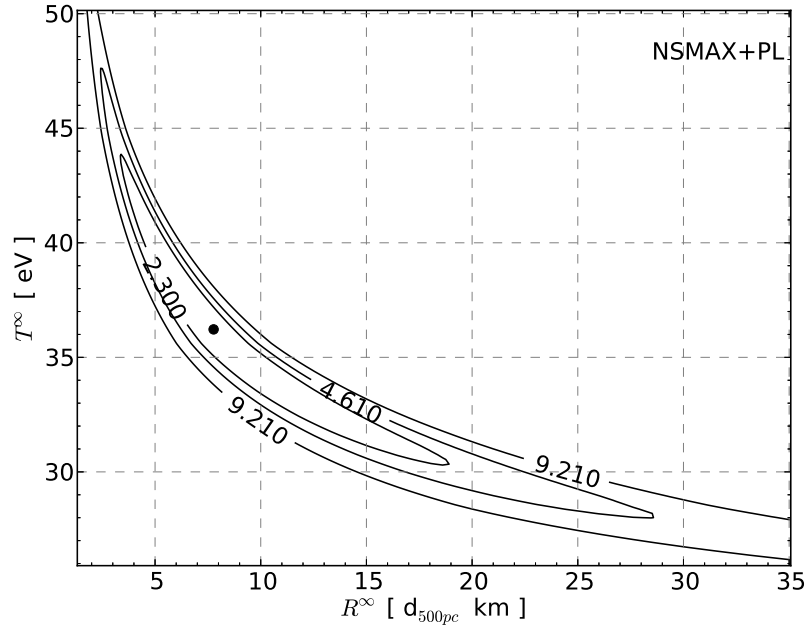


Рис. 5.3. То же, что и на Рис. 5.2, но для поглощённой модели NSMAX+PL.

дели ВВ+PL с использованием метода, который применялся для пульсара в Крабовидной туманности [89]. Мы добавили в модель дополнительную компоненту ВВ, которая не требуется для описания данных, а также не влияет на первоначальную лучшую аппроксимацию. Верхний предел определяется из верхней границы доверительных контуров R^∞ - T^∞ для новой компоненты. Соответствующие контуры для доверительных уровней 90% и 99% показаны на Рис. 5.4. На них шкала R^∞ соответствует диапазону радиусов нейтронной звезды, учитывая ошибки на расстояние до пульсара (см. ниже). Для $R^\infty = 15.73 d_{500pc}$ км верхний предел на температуру полной поверхности нейтронной звезды составляет 40 эВ (на уровне 99%).

Результаты для модели ВВ+PL согласуются с результатами, полученными в работе [79]. Однако результаты в модели NSA+PL и значение верхнего предела на поверхностную температуру в чернотельной модели отличаются от полученных этими авторами. Разница в полученных значениях верхнего предела на температуру обусловлена разными значениями магнитного поля, которые использовались в аппроксимациях. Действительно, для $B = 10^{13}$ Гс наши результаты согласуются с результатами из работы [79]. Мы используем $B = 10^{12}$ Гс, которое ближе по значению к определяемому из измерений скорости торможения пульсара. Верхний предел, приведённый в работе [79], составляет 38 эВ для радиуса звезды 10 км и расстояния 500 пк. Согласно Рис. 5.4, верхний предел для этих параметров ($R^\infty \approx 13$ км для нейтронной звезды с массой $1.4M_\odot$) должен быть 42 эВ. К со-

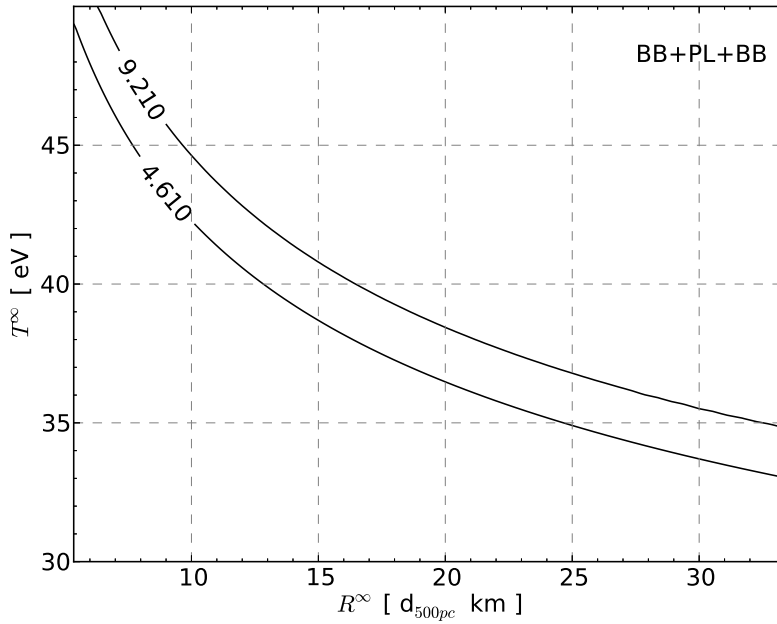


Рис. 5.4. Верхние границы доверительных контуров эффективной температуры в зависимости от радиуса излучающей поверхности во второй тепловой компоненте, добавленной в поглощённую модель BB+PL. Границы показаны на доверительных уровнях 90% и 99% ($\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi_{min}^2 = 4.61$ и 9.21 , соответственно).

жалению, авторы не описывают свой метод получения такого значения, поэтому причина разногласия остается неясной.

Чернотельная модель и модель водородной атмосферы одинаково подходят для интерпретации тепловой компоненты излучения. Чернотельная модель может интерпретировать излучение железной атмосферы или конденсированной поверхности нейтронной звезды (см., например, работу [90], а также приведённые в ней ссылки). Чтобы понять, какая из двух моделей на самом деле описывает излучение пульсара, необходимы более глубокие рентгеновские наблюдения, позволяющие проводить спектральный анализ на различных фазах вращения пульсара. Параметры степенной компоненты, доминирующей на энергиях $\gtrsim 1$ кэВ, практически не зависят от типа тепловой компоненты, используемой в общей модели (см. Таблицу 5.2).

Спектр пульсара не может описываться однокомпонентной моделью. Например, поглощённые модели PL, BB и NSA дают значения $\chi^2/(\text{dof})$, соответственно, $1.30/(246)$, $2.52/(246)$ и $2.22/(246)$. Замена PL второй тепловой компонентой, представляющей собой излучение с другой области нейтронной звезды, не даёт подходящий результат. Например, смешанные поглощённые модели BB+BB, NSA+NSA и NSMAX+NSMAX дают соответствующие значения $\chi^2/(\text{dof}) = 1.27/(244)$, $1.68/(244)$ и $2.50/(244)$.

5.4 Обсуждение

Из трёх статистически приемлемых рентгеновских моделей — BB+PL, NSA+PL и NSMAX+PL — две последние дают сопоставимые параметры теплового излучения пульсара. Однако, модель NSMAX является физически более приемлемой. По этой причине далее мы не будем рассматривать модель NSA+PL.

Чтобы сопоставить рентгеновские данные и оптический верхний предел, значение последнего должно быть поправлено на межзвездное поглощение A_V . Для оценки A_V можно использовать стандартное соотношение A_V-N_H [91]. Спектральные аппроксимации BB+PL и NSMAX+PL дают значение N_H в диапазоне $(1.0-2.3) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (см. Таблицу 5.2). Это соответствует значению A_V в диапазоне 0.6–1.4. Однако A_V не может превышать полное галактическое поглощение 0.8 в этом направлении, оценённое в работе [92]. Поэтому мы принимаем значение 0.8 как консервативное значение поглощения A_V для соответствующей поправки оптического верхнего предела. В то же время истинное значение N_H может быть больше, чем $1.4 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, которое соответствует этому значению A_V . Например, в работе [79] полное галактическое $N_H = (2.1 \pm 0.2) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ оценивается из спектрального анализа внегалактических источников, находящихся в поле пульсара.

Учитывая полутолщину ~ 100 пк галактического газового диска, широту пульсара $b = -16^\circ$ и минимальное значение $A_V = 0.6$ ($N_H = 10^{21} \text{ см}^{-2}$), можно оценить минимальное расстояние до пульсара ~ 270 пк. Такое значение определяется из предположения, что поглощающая среда распределяется равномерно по всему диску. Верхний предел на расстояние ~ 900 пк оценивался в работе [79], исходя из предположения, что собственная светимость пульсара в гамма-диапазоне не может превышать уровень потери энергии за счёт вращения. Расстояние 500 пк, принятое ранее, сопоставимо с этой оценкой.

Оптическая (в фильтре V) и нетепловая рентгеновская (в диапазоне 2–10 кэВ) светимости пульсара на расстоянии 500 пк составляют $L_V \lesssim 1.1 \times 10^{27} \text{ эрг с}^{-1}$ и $L_X = 6.0 \times 10^{29} \text{ эрг с}^{-1}$. Учитывая потерю энергии вращения $\dot{E} = 5.8 \times 10^{33} \text{ эрг с}^{-1}$ [76], из них можно получить оптическую и рентгеновскую эффективности пульсара $L_V/\dot{E} \lesssim 10^{-6.7}$ и $L_X/\dot{E} \approx 10^{-4.0}$. Эти значения согласуются с эмпирическими зависимостями светимости и эффективности от возраста для пульсаров, детектированных в оптическом и рентгеновском диапазонах (см., например, работы [82, 93]), что также подтверждает оценку на расстояние в 500 пк.

На Рис. 5.5 приведены сравнения непоглощённых спектров пульсара в рентгеновском и гамма диапазонах с оптическим верхним пределом, 0.052 мкЯн, оценённым по данным наблюдений на телескопе GTC и поправленным на межзвёздное поглощение $A_V = 0.8$. Оптический верхний предел лежит на два порядка ниже, чем экстраполяция спектраль-

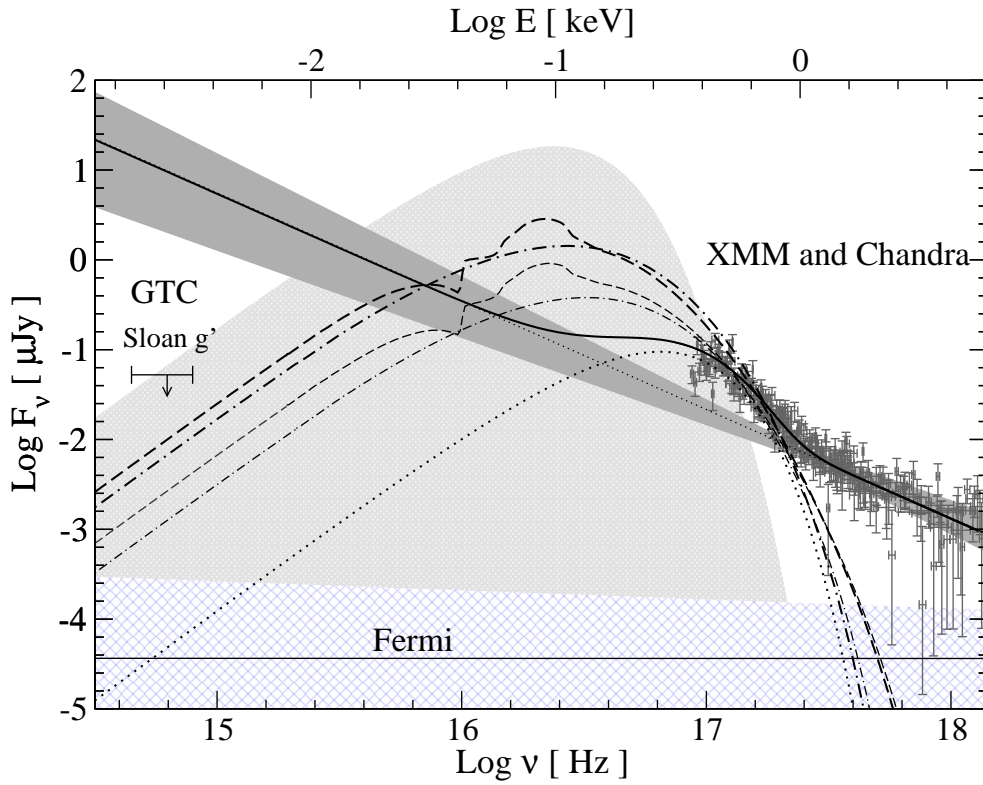


Рис. 5.5. Непоглощённый спектр пульсара J0357+3205 в оптическом и рентгеновском диапазонах. Верхний предел на поток пульсара в фильтре g' помечен горизонтальной чертой со стрелкой. Данные наблюдений на телескопах *XMM-Newton* и *Chandra* показаны серыми линиями. Толстая сплошная линия показывает лучшую аппроксимацию рентгеновских данных моделью $BB+PL$. Тонкой пунктирной линией с тёмно-серым сплошным регионом отмечены степенная компонента и её ошибки на уровне 90%. Толстой пунктирной линией показана тепловая компонента горячего пятна. Толстые и тонкие штрихпунктирные и штриховые линии показывают лучшие аппроксимации компонентами NSA и $NSMAX$ с переменными и зафиксированными нормировками (см. Таблицу 5.2). Верхний предел на тепловой спектральный поток со всей поверхности нейтронной звезды, полученный с помощью модели $BB+PL+BB$, показан светло-серым сплошным регионом. Экстраполяция спектра из гамма-диапазона с ошибками показана тонкой сплошной линией с заштрихованным регионом.

ной 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 [69]. Экстраполяция степенного спектра пульсара (см. Рис. 5.5) из гамма-диапазона находится существенно ниже оптического верхнего предела.

Спектральные компоненты лучшей аппроксимации модели NSMAX с переменными и зафиксированными нормировками показаны, соответственно, тонкой и толстой штриховыми линиями на Рис. 5.5. На рисунке также приведены спектральные компоненты модели NSA (штрихпунктирные линии). Из рисунка видно, что для ограничения теплового излучения нейтронной звезды в этих моделях нужны оптические наблюдения до $\sim 30^m0$, что недостижимо на современных телескопах. Для детектирования чернотельной спектральной компоненты горячего пятна, полученной из рентгеновских данных с помощью модели BB+PL (пунктирная линия на Рис. 5.5), нужны еще более глубокие наблюдения. Светлосерый регион на Рис. 5.5 содержит все варианты мягкой тепловой компоненты в модели BB+BB+PL для разрешённого диапазона R^∞ в соответствии с контурами на уровне 99% (Рис. 5.4). Можно заключить, что оптический верхний предел не вносит дополнительных ограничений на тепловое излучение с поверхности нейтронной звезды.

Однако, согласно Рис. 5.5, тепловая спектральная компонента полной поверхности нейтронной звезды может быть детектирована в УФ диапазоне. Она также может преобладать над степенной компонентой, если степенная компонента является плоской в оптическом и УФ диапазонах. Последнее наблюдается для других средневозрастных пульсаров и должно выявиться на более длинных волнах, излучение на которых менее подвержено межзвёздному поглощению. Таким образом, УФ наблюдения пульсара J0357+3205 нужны для определения температуры его поверхности. Известно только несколько пульсаров, тепловое излучение которых детектируется в УФ диапазоне, а именно, пульсары B0656+14 [67], B1055–52 [94], J0437–4715 [95] и Geminga [96]. Кроме того, в работе [97] описано детектирование теплового излучения в УФ диапазоне нескольких изолированных нейтронных звёзд. Во всех случаях сведения о тепловом излучении существенно дополняли рентгеновские данные.

Учитывая направление собственного движения пульсара и возраст, оценённый по замедлению, можно предположить, что местом его рождения является звёздное скопление, содержащее звезду λ -Ориона. Это активная область звёздообразования возрастом 5×10^6 лет, расположенная в $\sim 32^\circ$ от пульсара на расстоянии $\sim 450 \pm 50$ пк от Земли [98]. Некоторые авторы предполагают, что расширяющееся молекулярное кольцо, окружающее скопление, является остатком сверхновой, оставленным взрывом сверхновой II типа массивного компаньона звезды λ Ori около миллиона лет назад (см., например, работы [99, 100]).

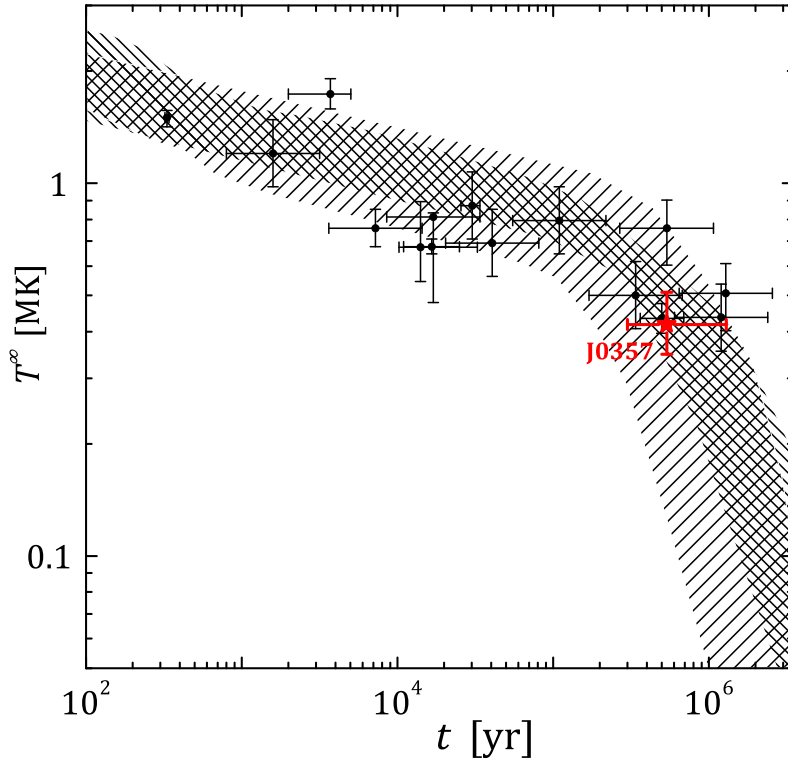


Рис. 5.6. Измеренные температуры полной поверхности T^∞ (точки с ошибками) для нейтронных звёзд разного возраста t в сравнении со сценариями теорий остывания (заштрихованные регионы). Плотно заштрихованный регион соответствует стандартной теории остывания, в то время как неплотно заштрихованный регион демонстрирует минимальный сценарий остывания. Жирная звёздочка с ошибками показывает температуру поверхности пульсара J0357+3205.

Полагая, что скопление является местом рождения пульсара, можно независимо оценить возраст пульсара в $(0.2-1.3) \times 10^6$ лет, учитывая ошибки на собственное движение, а также диапазоны расстояний до пульсара и скопления. Это значение сопоставимо с возрастом пульсара, оценённым по замедлению вращения (0.54×10^6 лет).

Полученный диапазон значений возраста пульсара, а также эффективную температуру нейтронной звезды 36_{-6}^{+8} эВ, определённую из аппроксимации моделью NSMAX+PL, можно сопоставить с кривыми остывания нейтронных звёзд. Положение пульсара J0357+3205 на диаграмме температура–возраст показано на Рис. 5.6 звёздочкой. Данные для других изолированных нейтронных звёзд (точки с ошибками) позаимствованы из работы [101]. Из рисунка видно, что пульсар J0357+3205 находится среди самых холодных из известных остывающих нейтронных звёзд. Плотно заштрихованный регион показывает диапазон температур нейтронных звёзд, который может определяться из стандартной теории остывания. В этой теории модифицированные Urca процессы считаются главным механизмом нейтринного излучения (см., например, работу [102]). Положение пульсара J0357+3205 на диаграмме хорошо согласуется со стандартной теорией остывания. Однако, как видно из Рис. 5.6, стандартная теория остывания не описывает все известные из наблюдений температуры нейтронных звёзд. Поэтому на Рис. 5.6 также приводится диапазон кривых остывания, который определяется минимальным сценарием остывания (показан неплотно заштрихованным регионом) [103, 104, 105]. Этот сценарий учитывает наличие барионной сверхтекучести в нейтронных звёздах. Специфические процессы нейтринного излучения из-за формирования куперовских пар лучше способствуют эффективному остыванию звезды, чем модифицированный Urca процесс. К настоящему моменту все параметры сверхтекучести могут подбираться соответственно для аппроксимации всех наблюдаемых температур нейтронных звёзд [103], включая быстроостывающую нейтронную звезду в остатке сверхновой Cas A [101]. Температура пульсара J0357+3205 согласуется и с минимальным сценарием остывания.

В то же время, согласно Рис. 5.4, температура полной поверхности в чернотельной спектральной модели ограничена недостаточно, принимая во внимание ошибки на радиус нейтронной звезды и расстояние до пульсара. Таким образом, сравнение результатов аппроксимации моделью BB+BB+PL с теориями остывания является неинформативным.

5.5 Заключение к главе

Глубокие оптические наблюдения поля пульсара J0357+3205 в слоановском фильтре g' на телескопе GTC позволили ограничить нетепловое излучение пульсара, выявив сильный излом в спектре излучения между оптическим и рентгеновским диапазонами. Независимый

анализ рентгеновских данных позволил нам ограничить тепловой спектр нейтронной звезды и измерить эффективную температуру поверхности нейтронной звезды $T^\infty = 36_{-6}^{+8}$ эВ. Сопоставив оптический верхний предел с тепловым спектром нейтронной звезды, мы можем сделать вывод, что тепловое излучение полной поверхности нейтронной звезды может детектироваться в УФ диапазоне, в котором оно, вероятно, преобладает над нетепловым излучением и излучением горячих пятен пульсара. Вышеперечисленное делает пульсар J0357+3205 интересным объектом для изучения в УФ диапазоне.

Глава 6

Оптические наблюдения гамма-пульсара J2021+3651 в туманности Dragonfly на телескопе GTC

6.1 Введение

Пульсар J2021+3651 был обнаружен в радиодиапазоне на телескопе Arecibo во время глубокого поиска радиопульсаций рентгеновских источников неизвестной природы, идентифицированных в гамма-диапазоне по данным наблюдений на обсерватории *EGRET* [106]. По своим характеристикам (период 104 мс, возраст 17×10^3 лет и скорость потери вращательной энергии $\dot{E} \approx 3.4 \times 10^{36}$ эрг с^{-1}) пульсар J2021+3651 является одним из самых молодых и энергичных среди известных пульсаров. Каноническое значение дипольного магнитного поля пульсара, оценённое из периода и его производной, составляет 3.2×10^{12} Гс. Предположительное детектирование гамма-пульсаций с периодом пульсара по данным наблюдений на обсерватории *EGRET* описывалось в работе [107]. Последующие гамма-наблюдения с помощью обсерваторий *AGILE* [108] и *Fermi* [109] выявили, что пульсар имеет профиль импульса с двойным пиком и степенной спектр со спектральным индексом $\Gamma \sim 1.7$ и экспоненциальным обрезанием ~ 2.9 ГэВ [1]. По данным наблюдений на обсерватории *Chandra* пульсар был идентифицирован в рентгеновском диапазоне, в котором были детектированы и слабые пульсации объекта с двухпиковым профилем на уровне 4σ [109, 110]. Рентгеновский спектр пульсара состоит из тепловой и нетепловой компонент, происходящих с поверхности и из магнитосферы нейтронной звезды, соответственно [111]. 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. В связи со своей специфичной пространственной формой, туманность была

названа Dragonfly [111]. Слабое диффузное излучение наблюдается в пределах нескольких угловых минут от пульсара.

Положение пульсара проецируется на регион Cygnus-X, который является одним из самых активных из известных регионов звёздообразования в Галактике. В этом регионе был идентифицирован яркий протяжённый источник MGRO J2019+37 на энергиях порядка ТэВ по данным обзора *Milagro* [112]. Поток источника на энергиях 20 ТэВ составляет 80% потока Крабовидной туманности. Источник ассоциируется с туманностью Dragonfly. Наблюдения на обсерватории VERITAS показали, что источник разрешается на два объекта [113]. Более яркий, VER J2019+368, имеет жёсткий спектр, напоминающий спектр туманности Vela X. Последняя связана с пульсаром Vela и детектируется на энергиях порядка ТэВ. Источник VER J2019+368 также совпадает с протяжённым регионом нетеплового радиоизлучения.

Расстояние до пульсара оценивалось несколькими способами. Из модели распределения свободных электронов по Галактике NE2001 [51] в направлении на пульсар ($l = 75^\circ 21'$, $b = 0^\circ 11'$) и меры дисперсии $DM \approx 370$ пк см⁻³ можно получить значение расстояния $D \approx 12$ кпк (см., например, работу [106]). Сравнивая водородную поглощающую колонковую плотность, полученную из первых рентгеновских наблюдений, и полную галактическую колонковую плотность HI в направлении на пульсар, авторы работы [110] предложили расстояние $D \approx 10$ кпк. В работе [111] проведён аналогичный анализ последующих более глубоких рентгеновских наблюдений и получено значение расстояния 3–4 кпк. Мера вращения поляризации пульсара предполагает минимальное расстояние $D \approx 5$ кпк [109]. Принимая последнее значение и предполагая, что пульсар был рождён в центре источника VER J2019+368, авторы работы [113] оценили возможную поперечную к лучу зрения компоненту скорости пульсара ~ 840 км с⁻¹, которая почти в три раза выше средних скоростей пульсаров [30]. Расстояние может составлять 1.5 кпк, если пульсар расположен в регионе Cygnus-X. Это согласуется со значением $D \sim 1$ кпк, полученным из эмпирического соотношения для определения расстояний до пульсаров в гамма-диапазоне [78].

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 данной работе приводятся результаты первых глубоких оптических наблюдений поля пульсара, проведённых на телескопе GTC, и сравнение оптических данных с рентгеновскими. Также мы приводим независимую оценку на расстояние, полученную с использованием архивных рентгеновских данных и звёзд красного сгущения как стандартных свечей. Детали наблюдений и редукации данных описываются в Разд. 6.2, результаты приведены в Разд. 6.3 и обсуждаются в Разд. 6.4.

6.2 Данные наблюдений на телескопе GTC

6.2.1 Наблюдения и обработка данных

Поле пульсара наблюдалось с помощью прибора OSIRIS в слоановском фильтре r' на телескопе GTC 28 сентября 2011 года. Было получено 16 экспозиций длительностью 158 с. Целевой источник экспонировался на вторую ПЗС-матрицу детектора. Наблюдения проводились при фотометрических условиях без засветки. Качество изображения менялось в пределах $0''.8$ и $1''.1$.

С помощью пакета IRAF проводилась стандартная редукция данных, включавшая вычитание электронного смещения и коррекцию на плоское поле. Для удаления сдвигов между индивидуальными экспозициями все изображения были привязаны к изображению с лучшим качеством. Точность привязки составила $\lesssim 0.1$ пикселя. После привязки все экспозиции были суммированы. Полученное суммарное изображение имело качество $0''.9$, средний показатель воздушной массы 1.8 и полное время экспозиции ≈ 2.5 кс.

6.2.2 Астрометрическая привязка и фотометрическая калибровка

Для астрометрической привязки были использованы положения 10 астрометрических стандартов из каталога USNO-B1.0¹. Их пиксельные координаты измерялись на суммарном изображении с помощью команды *imcenter*. Для астрометрической трансформации изображения применялась процедура *scmap*. Формальные ошибки *rms* астрометрической привязки суммарного изображения составили $\Delta RA \lesssim 0''.17$ и $\Delta Dec \lesssim 0''.13$. С учётом номинальной ошибки каталога $\approx 0''.2$, консервативные ошибки астрометрической привязки составили $\lesssim 0''.26$ для прямого восхождения и $\lesssim 0''.24$ для склонения.

Фотометрическая калибровка выполнялась и использованием слоановского стандарта G158-100, наблюдавшегося в ту же ночь, что и целевой источник. Значение атмосферной экстинкции 0.10 ± 0.01 для слоановского фильтра r' было позаимствовано из руководства по использованию детектора OSIRIS. Полученное значение нуля-пункта для суммарного изображения составило $29^m13 \pm 0^m02$.

6.3 Результаты

6.3.1 Поиск оптического излучения пульсара и туманности

Фрагмент изображения поля пульсара, полученного на телескопе GTC, показан в верхней левой части Рис. 6.1. Размер изображения составляет $60'' \times 60''$. Изображение сглажено

¹<http://www.nofs.navy.mil/data/fchpix/>

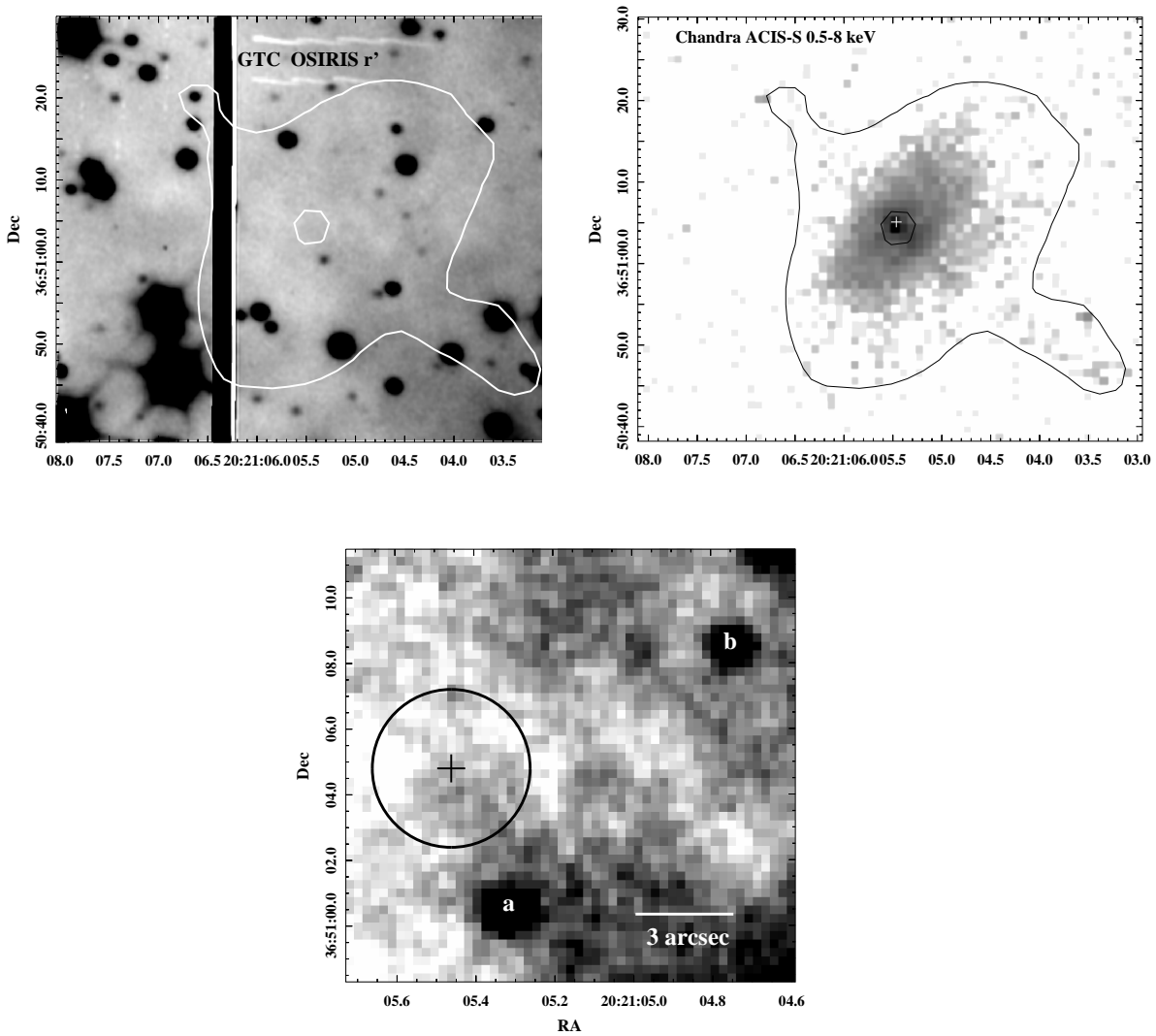


Рис. 6.1. Сверху: Фрагменты изображений поля пульсара по данным наблюдений на телескопе GTC в фильтре r' (слева) и на обсерватории *Chandra* (справа). На рентгеновском изображении пульсар отмечен знаком "+". Контуры, показывающие границу рентгеновской туманности пульсара и регион локализации пульсара, показаны на обоих изображениях. Размеры изображений составляют $\sim 60'' \times 60''$. Снизу: Фрагмент окрестности пульсара в оптическом диапазоне. Круговой регион показывает неопределённость положения пульсара на уровне 3σ . Ближайшие к пульсару источники обозначены буквами. Размер фрагмента составляет $13'' \times 13''$.

гауссианой с ядром в два пикселя. Для сравнения приводится соответствующее рентгеновское изображение, полученное на телескопе *Chandra* в диапазоне 0.5–8 кэВ (см. Рис. 6.1). Изображение было получено посредством суммирования всех имеющихся архивных данных² (общая эффективная экспозиция 112 кс), на которых была проведена независимая редукция с использованием пакета CIAO v.4.6 *chandra_repro* с калибровочным пакетом CALDB v.4.5.9. Рентгеновское изображение сбинировано по два пикселя, сглажено гауссианой с ядром в один пиксель и показано в логарифмическом масштабе. Рентгеновская пульсарная туманность состоит из джета, располагающегося с юга на запад, контр-джета, располагающегося с севера на восток, а также двух арок, ориентированных перпендикулярно джетам. Считается, что арки ассоциируются с экваториальным тором туманности, видимым почти с ребра [110, 111]. Контурные линии на рентгеновском изображении соответствуют внешней границе торообразной туманности, где она сливается с фоном, а также региону вокруг пульсара (пульсар помечен белым крестом). Рентгеновские контуры переложены на оптическое изображение (см. Рис. 6.1). Вертикальная широкая полоса, пересекающая левую часть оптического изображения, является частью “пика” от насыщенной яркой звезды поля, расположенной за фрагментом. Две волнообразные горизонтальные кривые около верхней части изображения являются артефактами детектора. Сравнивая оптическое и рентгеновское изображения, мы не нашли никаких значимых протяжённых оптических структур, коррелирующих с рентгеновской морфологией компактной пульсарной туманности. Тем не менее, на изображении есть некоторые вариации фона, содержащие яркие и тёмные регионы. Регионы видимы также на всех индивидуальных экспозициях. Детальное изучение изображений поля H α из фотометрического обзора INT северного неба [114] показывает, что эти вариации коррелируют с вариациями излучения в H α .

Ближайшая окрестность пульсара в увеличенном виде представлена в нижней части Рис. 6.1. На ней круговой регион радиусом $r \approx 2''.4$ помещён в центр рентгеновского положения пульсара с координатами RA = 20:21:05.46 и Dec = +36:51:04.8 [110]. Он соответствует неопределённости положения пульсара на уровне 3σ , которая учитывает ошибки оптической астрометрической привязки и рентгеновского положения пульсара. Никаких достоверно детектируемых точечных источников в позиционном регионе пульсара обнаружено не было. Ближайший достоверно детектируемый точечный источник “а” величиной $24^m.40 \pm 0^m.04$ расположен на расстоянии $4''.8$ от рентгеновского положения пульсара, что соответствует $\approx 6\sigma$. Более удалённый объект “б” имеет яркость $25^m.01 \pm 0^m.05$ и расположен на расстоянии $\approx 9''.4$ или 12σ от пульсара. Ввиду большой удалённости, оба источника

² *Chandra*/ACIS-S, серия наблюдений 3901, дата наблюдений 2003-02-12, экспозиция 19 кс, главный исследователь Roberts; *Chandra*/ACIS-S, серии наблюдений 7603 и 8502, дата наблюдений 2006-12-29, экспозиция 59+34 кс, главный исследователь Romani.

не могут иметь отношение к пульсару.

Таким образом, используя наше оптическое изображение, мы можем оценить только верхние пределы на поток пульсара и его туманности в фильтре r' . Для пульсара мы использовали среднее стандартное отклонение фона в круговой апертуре с радиусом 4 пикселя ($\approx 1''$) и с центром в позиции пульсара. Была учтена апертурная коррекция $0^m 1$, оценённая с использованием ярких звёзд поля. Полученный верхний предел на плотность потока на уровне 3σ составляет $\lesssim 0.04$ мкЯн ($r' \gtrsim 27.2$). Для туманности была использована эллиптическая апертура с центром в позиции пульсара, с полуосями $6'' 2$ и $10'' 6$ и позиционным углом 137° , которая содержит большую часть рентгеновского излучения экваториального тора туманности. Верхний предел на уровне 3σ на интегральную плотность потока туманности составляет $\lesssim 0.36$ мкЯн ($r' \gtrsim 24.8$).

6.3.2 Расстояние и межзвёздное поглощение

Для проведения независимой оценки расстояния до пульсара можно построить соотношение поглощение-расстояние в направлении на пульсар с использованием звёзд красного сгущения как стандартных свечей. Этот метод описывался, например, в работах [115] и [116]. Метод был ранее использован для оценки расстояния и поглощения для нескольких объектов. Например, для рентгеновской двойной 4U 1608–52 [117], для шести аномальных рентгеновских пульсаров [118], а также для гамма-пульсаров J1048–5832 [22] и J1357–6429 [10].

В верхней части Рис 6.2 показана диаграмма цвет-величина звёзд каталога 2MASS All-Sky Point Source Catalogue³, расположенных в пределах $0^\circ 3$ от позиции пульсара. На диаграмме помечены ветви звёзд красного сгущения (RC), главной последовательности (MS), а также асимптотическая ветвь гигантов (AGB). Диаграмма была разделена по величине на несколько бинов. В каждом бине цветовое распределение $J - K$ было аппроксимировано набором из двух гауссиан, соответствующих ветвям MS и RC. Звёзды AGB при этом не рассматривались. Полученные цвета $J - K$ звёзд красного сгущения с ошибками были преобразованы в значения расстояний и межзвёздного поглощения A_V с использованием соотношений из работы [119] и предполагая, что абсолютная величина и собственный цвет звёзд красного сгущения составляют, соответственно, $M_K = -1.62 \pm 0.03$ и $(J - K)_0 = 0.68 \pm 0.07$ (см. работы [115] и [116]). Значения поглощения были переведены в значения поглощающей водородной колонковой плотности N_H с использованием стандартного эмпирического соотношения $N_H = A_V \times (1.79 \pm 0.03) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ [91].

Полученная зависимость N_H -расстояние показана в нижней части Рис 6.2. Значение N_H увеличивается с расстоянием, достигая предел $(15 \pm 4) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ на расстояниях

³см. <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DataTag/>, DataTag = ADS/IRSA.Gator#2014/0814/100517_7624

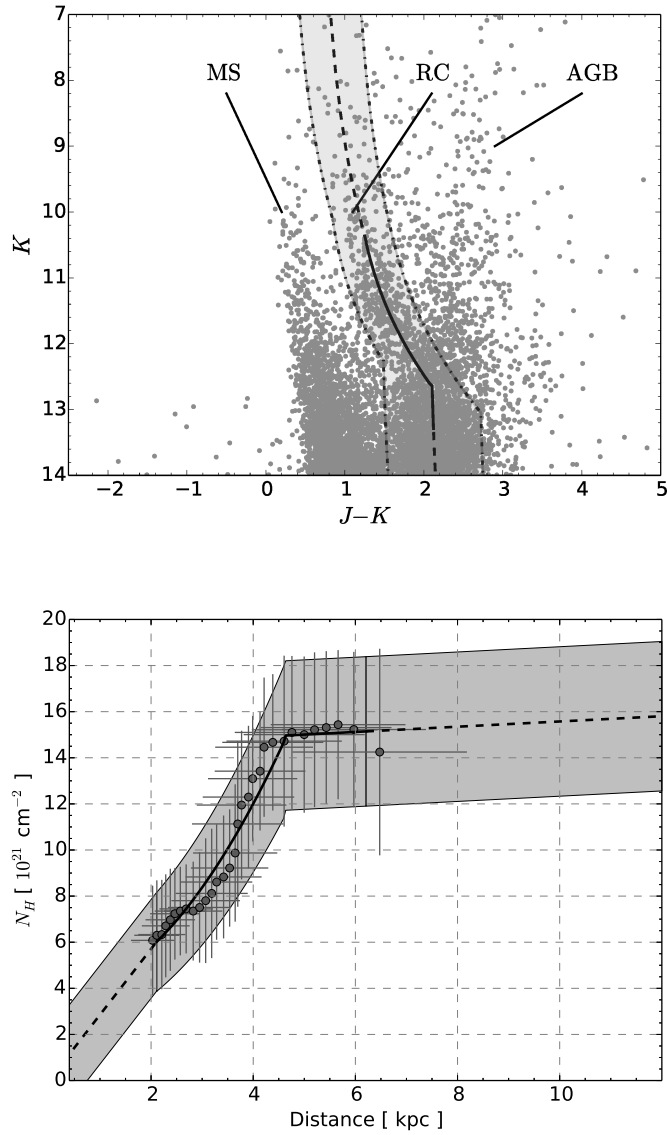


Рис. 6.2. *Сверху:* Диаграмма цвет-величина звёзд из каталога 2MASS All-Sky Point Source Catalogue, расположенных в пределах $0^{\circ}3$ от позиции пульсара ($l = 75^{\circ}22$, $b = 0^{\circ}11$). На диаграмме показаны ветви главной последовательности (MS), красного сгущения (RC), а также асимптотическая ветвь гигантов (AGB). Сплошной линией показана сглаженная аппроксимация сплайном усреднённых цветов звёзд красного сгущения, а пунктирные сегменты — её экстраполяции в сторону больших и меньших величин K . Серый регион, окружённый штрихпунктирными линиями, содержит 95% (2σ) звёзд красного сгущения. *Снизу:* Эмпирическое соотношение N_H –расстояние в направлении на пульсар, определённое с использованием цветов звёзд красного сгущения из диаграммы. Изображённые ошибки соответствуют неопределённостям на уровне 1σ . Сплошная линия и серый заполненный регион соответствуют сглаживающим аппроксимациям сплайном и их ошибкам. Они экстраполированы в сторону малых и больших расстояний (пунктирные линии).

$\gtrsim 5$ кпк. В пределах ошибок оно согласуется со значениями полного галактического N_{H} в направлении на пульсар $\approx 12 \times 10^{21}$ и $\approx 9.7 \times 10^{21}$ см $^{-2}$, оценёнными по картам HI в работах [120] и [121]. Соответствующее $A_V = 8.4 \pm 2.2$ также сопоставимо с оценкой на полное галактическое поглощение $\sim 11^m 0$ [92], хотя карта, представленная в работе [92], считается ненадёжной для $b \lesssim 5^\circ$.

6.3.3 Рентгеновский спектральный анализ

Мы провели независимый анализ архивных данных, полученных на телескопе *Chandra*. Спектры пульсара были извлечены из всех серий данных с использованием апертуры радиусом $0''.74$ с центром в позиции пульсара. Извлечение проводилось с помощью утилиты *spxextract* пакета CIAO v. 4.6. Мы также извлекли спектр туманности из эллиптического региона с полуосями $6''.2$ и $10''.6$ и позиционным углом 137° , в который входит большая часть излучения экваториального тора туманности. Круговая апертура вокруг пульсара радиусом $2''$ была исключена из региона. Фон извлекался с детектора ACIS-S3, на котором туманность детектируется во всех трёх сериях данных с соответствующими экспозициями 19, 59 и 43 кс. Общее число каунтов пульсара и туманности составило, соответственно, ≈ 1270 и ≈ 5250 .

Чтобы оценить правдоподобие, была использована статистика χ^2 . Для моделирования спектра пульсара применялась комбинация поглощённых степенной и тепловой компонент. Аппроксимация единственной компонентой не описывала данные. Для тепловой компоненты использовались чернотельная модель и модель намагниченной водородной атмосферы нейтронной звезды (см. [85] и [86]). Для межзвёздного поглощения была использована фотоэлектрическая абсорбционная модель *phabs* с сечениями фотопоглощения *vstpc* [84] и обилием элементов *angr* [83].

Для моделирования вклада туманности в спектр, извлечённый из апертуры пульсара, мы добавили вторую степенную компоненту в спектральную модель пульсара и аппроксимировали спектры пульсара и туманности одновременно в спектральном диапазоне 0.3–10 кэВ. Предполагалось, что значение N_{H} одинаково для пульсара и туманности.

Соотношение N_{H} –расстояние и его ошибки были аппроксимированы сглаживающими сплайнами, показанными линией и серым заполненным регионом в нижней части Рис. 6.2. Оно далее использовалось как априорная информация для Байесовского анализа в процедуре спектральной аппроксимации (см. [122]). Был проведён анализ Монте-Карло по схеме марковских цепей с использованием алгоритма Goodman-Weare [123].

Таблица 6.1. Медианные значения параметров с интервалами неопределенности на уровне 90% для спектров пульсара (psr) и экваториального тора туманности (pwn). Модели BB+PL и NSMAX+PL описывают спектр пульсара, а модель PL - спектр туманности.

‡Модель	N_{H} 10^{21} см^{-2}	Γ_{psr}	K^{psr} 10^{-5} фотон $\text{кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	T эВ	R км	D кпк	Γ_{pwn}	K^{pwn} 10^{-5} фотон $\text{кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	χ^2 (dof)
BB+PL	$5.8^{+0.5}_{-0.5}$	$1.8^{+0.6}_{-0.6}$	$1.0^{+1.0}_{-0.6}$	155^{+14}_{-14}	$1.3^{+1.5}_{-1.0}$	$1.8^{+1.5}_{-1.4}$	$1.4^{+0.1}_{-0.1}$	$9.7^{+1.0}_{-0.9}$	459(469)
NSMAX+PL	$6.0^{+0.5}_{-0.5}$	$1.3^{+0.7}_{-0.8}$	$0.5^{+0.7}_{-0.4}$	63^{+9}_{-8}	$12.0^{+19.5}_{-9.6}$	$1.8^{+1.7}_{-1.4}$	$1.4^{+0.1}_{-0.1}$	$10.0^{+1.0}_{-0.9}$	472(469)

Результирующие медианные значения спектральных параметров вместе с интервалами неопределенности на уровне 90% для моделей BB+PL и NSMAX+PL приведены в Таблице 6.1⁴. Тест goodness-of-fit (значения χ^2 приведены в Таблице 6.1) показывает, что обе модели одинаково согласуются с данными. Мы приводим результаты аппроксимации только для одной модели водородной атмосферы, NSMAX 1260, которая соответствует магнитному полю поверхности $B = 4 \times 10^{12}$ Гс [86].

Тепловая компонента может быть одинаково хорошо аппроксимирована моделью водородной атмосферы или любой другой моделью из серии NSMAX, т.к. получаемые параметры несильно зависят от выбора конкретной атмосферной модели. Модели NSA были созданы для полностью ионизованных атмосфер нейтронной звезды. А ввиду того что более новые модели NSMAX учитывают частичную ионизацию в звёздных атмосферах, эффекты которой важны при низких температурах (как в нашем случае), выбор был сделан в пользу последних.

Полученные результаты сопоставимы с результатами, приведёнными в работах [110] и [111]. Однако, в отличие от описанного в работе [111] метода, в нашем анализе N_H не фиксировался на значении из лучшей аппроксимации, определённом в независимом анализе рентгеновского спектра туманности. Тем не менее, полученное значение N_H определяется главным образом спектром туманности и согласуется со значением, полученным в работе [111] в пределах ошибок. Таким образом, оно несильно зависит от конкретной модели, используемой для описания спектра пульсара, и от конкретного соотношения $N_H - D$. Расстояние $D = 1.8_{-1.4}^{+1.7}$ кпк⁵ главным образом определяется N_H и соотношением $N_H - D$. В этом случае только два параметра определяются тепловой компонентой: радиус R и эффективная температура T излучающей поверхности. Важно отметить, что мы получили абсолютное значение радиуса R , а не только соотношение R/D , что было бы без учёта соотношения $N_H - D$. Для чернотельной модели R в 10 раз меньше и T в 2.5 раза больше, чем соответствующие значения в модели водородной атмосферы. Это типично для пульсаров, в которых рентгеновские спектральные данные могут быть одинаково хорошо аппроксимированы чернотельной и атмосферной моделями (см., например, работу [124] и

⁴В Таблице 6.1 N_H соответствует поглощающей колонковой плотности. Температуры T и радиусы излучающей поверхности R для спектральных компонент BB и NSMAX являются параметрами, измеряемыми удалённым наблюдателем. Для компоненты NSMAX параметр $1+z = (1 - 2.952M/R)^{-0.5}$, где M и R соответствуют массе и истинному радиусу в единицах солнечной массы и километрах, зафиксирован на 1.21. $K^{\text{psr,pwn}}$ и $\Gamma_{\text{psr,pwn}}$ соответствуют нормировкам и спектральным индексам для пульсара (psr) и туманности (pwn). Все ошибки приведены на уровне 90% и определены из моделирования по методу Монте-Карло. Потоки пульсара в диапазоне 2–10 кэВ составляют $\log F_X^{\text{psr}} = -13.5_{-0.8}^{+0.7}$, $-13.4_{-1.2}^{+1.0}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, соответственно, для моделей BB+PL и NSMAX+PL. Поток туманности в этом же диапазоне составляет $\log F_X^{\text{pwn}} = -12.2_{-0.1}^{+0.1}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в обеих моделях.

⁵Здесь и ниже мы обсуждаем наибольший диапазон D из Таблицы 6.1.

предыдущую главу). Для последней, $R = 12_{-10}^{+20}$ км предполагает, что излучение может исходить со всей поверхности нейтронной звезды с эффективной температурой поверхности $T = 63_{-8}^{+9}$ эВ, поправленной на красное смещение. Это значение близко к значению для пульсара Vela [124]. В чернотельной модели $R = 1.3_{-1.0}^{+1.5}$ км, что сопоставимо с каноническим радиусом полярной шапки ~ 0.6 км для пульсара с периодом 100 мс [87].

6.3.4 Многоволновой спектр пульсара и туманности

Из значений N_{H} , полученных из рентгеновского спектрального анализа, следует значение суммарного межзвёздного поглощения в направлении туманности Dragonfly, $A_V \approx 3.3$. Используя стандартное соотношение с $R_V = 3.1$ [125], из $A_V \approx 3.3$ можно получить значение поглощения $A_{r'} \approx 2.8$ в фильтре r' . Используя последнее, мы оценили верхние пределы на непоглощённый поток пульсара и туманности, 0.57 мкЯн и 4.85 мкЯн, соответственно. На Рис. 6.3 эти пределы сопоставлены с непоглощёнными рентгеновскими спектрами пульсара (верхняя часть) и туманности (нижняя часть), аппроксимированными, соответственно, моделями ВВ+PL и PL. Для туманности оптические и рентгеновские данные происходят из одного и того же пространственного региона, охватывающего излучение рентгеновского экваториального тора (см. Рис. 6.1 и текст выше). Сплошная линия в верхней части Рис. 6.3 показывает лучшую аппроксимацию общей моделью, которая учитывает вклад нетепловых фотонов туманности в спектр из пульсарной апертуры. Пунктирная линия показывает только степенную компоненту пульсара. Как видно из рисунка, вклад туманности существенен только на высоких энергиях.

Как видно из Рис. 6.3, верхний предел на оптический поток пульсара не превосходит экстраполяцию рентгеновского спектра в оптический диапазон. Это типично для изученных в обоих диапазонах пульсаров, которые излучают за счёт потерь вращательной энергии [67, 69, 94, 126]. Для каждого из таких пульсаров нетепловая компонента доминирует в оптическом диапазоне. Однако эта компонента обычно имеет излом между оптическим и рентгеновским диапазонами, с характерным уплощением в оптическом диапазоне. Наши данные не исключают наличие подобного излома для пульсара J2022+3842, хотя экстраполяция рентгеновской степенной компоненты имеет большую неопределённость, и оптический верхний предел недостаточно глубокий. Модель NSMAX+PL, которая хорошо описывает данные, не меняет эти заключения.

Все торообразные пульсарные туманности, которые были детектированы в обоих спектральных диапазонах, также демонстрируют уплощение спектра в оптическом диапазоне в сравнении с рентгеновским (см., например, работу [82]). Однако в случае туманности Dragonfly ситуация ещё более неопределённая, чем для пульсара. Верхний предел на оптический поток туманности превосходит экстраполяцию рентгеновского спектра (см. Рис.

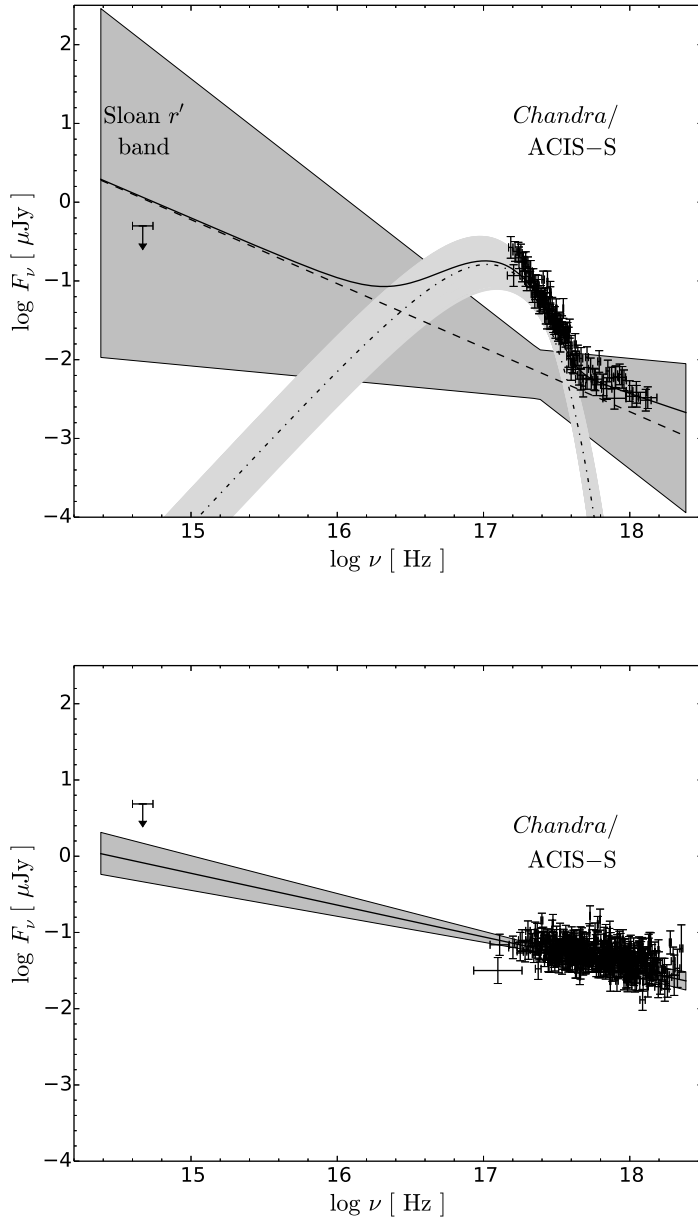


Рис. 6.3. *Сверху:* Непоглощённый спектр пульсара J2021+3651. Сплошной линией показана лучшая аппроксимация рентгеновского спектра, включающая компоненты BB и PL и вклад туманности в апертуру извлечения спектра пульсара (см. текст). Спектр экстраполирован в оптический диапазон. Непоглощённый верхний предел на оптический поток пульсара на уровне 3σ в фильтре r' показан чертой и стрелкой. Штрихпунктирная и пунктирная линии со светлым и тёмным регионами соответствуют чернотельной и степенной компонентам и их ошибкам на уровне 90%. Разница между сплошной и пунктирной линиями видна в “хвосте” туманности и указывает на вклад туманности. *Снизу:* Сплошная линия и серый регион соответствуют лучшей аппроксимации степенной моделью рентгеновского спектра экваториального тора туманности с ошибками на уровне 90%. Здесь также показан непоглощённый верхний предел на оптический поток этой области на уровне 3σ в фильтре r' .

6.3), и наличие излома в спектре туманности остаётся под вопросом.

Поправленные на межзвездную экстинкцию верхние пределы были получены с использованием соотношения $A_V - N_H$ из работы [91]. Существуют также другие подобные эмпирические соотношения. Например, в работе [127] приводится $N_H = A_V \times (2.21 \pm 0.09) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, которое согласуется с результатами из работы [128]. Если использовать это соотношение, то получим меньшее значение, $A_V \approx 2.7$, и, соответственно, непоглощённые верхние пределы меньше в 1.6 раза, что не меняет общие заключения.

6.4 Обсуждение

Наблюдения системы Dragonfly на телескопе GTC в фильтре r' позволили нам установить верхние пределы на оптические потоки пульсара J2021+3651 и его туманности. Недетектирование этой системы в оптическом диапазоне может объясняться высоким значением межзвёздного поглощения в направлении на объект, которое составляет примерно 3^m для фильтра r' . Учитывая данные для других пульсаров, детектированных в оптическом и рентгеновском диапазонах, можно заключить, что для детектирования пульсара J2021+3651 и обнаружения излома в спектре необходимы наблюдения глубже на 1–2 величины. Такие наблюдения возможны на телескопах с диаметром зеркала 8–10 м (таких как GTC) с использованием экспозиции в несколько часов при хорошем качестве изображения. Однако предпочтительнее были бы наблюдения в других диапазонах, которые менее подвержены влиянию межзвёздного поглощения. Такие наблюдения могли бы быть также полезны для ограничения оптических и рентгеновских спектральных свойств туманности.

Соотношение N_H –расстояние для пульсара, построенное с использованием метода звёзд красного сгущения и использованное в рентгеновском спектральном анализе, подтверждает предположения, что пульсар, вероятно, находится намного ближе, чем определяется из меры дисперсии и модели галактического распределения свободных электронов NE2001. Полученная нами оценка $D = 1.8_{-1.4}^{+1.7}$ кпк в пределах ошибок соответствует диапазону расстояний 3–4 кпк, предложенному в работе [111]. Тем не менее, наш диапазон сдвинут в сторону меньших значений расстояний. Это не исключает возможную ассоциацию пульсара с регионом Cygnus-X, расположенным в пределах 2 кпк от Солнца. Также наша оценка согласуется со значением в ~ 1 кпк, полученным по данным *Fermi*. В предположении наименьшего значения расстояния, представляется возможным измерение параллакса и собственного движения пульсара методами РСДБ. Как было показано выше, возможным источником систематических ошибок в методе определения расстояния является неточность в соотношениях $A_V - N_H$. Аналогичный проведённый анализ, но с использованием соотношения из работы [127], даёт ещё меньшее значение расстояния, $1.3_{-1.1}^{+1.5}$ кпк.

Из сравнения электронной колонковой плотности $N_e \approx 1.14 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ с $N_H \approx 6 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ следует среднее значение степени ионизации 19% в направлении на пульсар, которое не сильно превосходит усреднённое значение 10% (см., например, работу [129]). С другой стороны, модель электронной плотности NE2001 в направлении на пульсар даёт меньшее значение $N_e = 0.7_{-0.6}^{+1.2} \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ для диапазона расстояний $D = 1.8_{-1.4}^{+1.7}$ кпк. Существует несколько аргументов в пользу того, что модель NE2001 сильно недооценивает N_e в окрестности направления на пульсар [130, 131, 132]. Например, есть ещё один объект с очень высоким значением $DM = 429 \text{ пк см}^{-2}$. Это пульсар J2022+3842, который находится на расстоянии 1.8 от пульсара J2021+3651. Для него модель NE2001 даёт очевидно переоценённое значение расстояния $D > 50$ кпк [132]. Это значит, что в регионе Cygnus-X есть плотные облака, которые не учитываются в модели NE2001 [106].

Что же касается рентгеновской тепловой компоненты пульсара, то невозможно достоверно сказать, происходит ли она с полярной шапки пульсара или со всей поверхности нейтронной звезды. Это зависит от применения конкретной модели для описания теплового излучения. Для выбора модели необходима спектроскопия на разных фазах вращения пульсара. Однако, если тепловое излучение происходит со всей поверхности нейтронной звезды (как в случае атмосферной модели), у пульсара будет наблюдаться относительно маленькая температура поверхности для своего возраста. Согласно теориям остывания, такая температура не может объясняться стандартным сценарием остывания. Однако звезда может иметь подобную температуру, если учитывать эффекты сверхтекучести в её недрах (см. Разд. 5.4).

Светимость пульсара $L_\gamma \approx 5.9 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$ в диапазоне 0.1–100 ГэВ и эффективность $\eta_\gamma = L_\gamma / \dot{E} \approx 1.8$, оценённые исходя из расстояния 10 кпк [110] и представленные в работе [1], представляются нереалистично высокими. В этом случае пульсар попадает в верхнюю часть распределений L_γ и η_γ . Исходя из расстояния $D = 1.8_{-1.4}^{+1.7}$ кпк, полученного в нашем анализе, аналогичные значения оцениваются как $\log L_\gamma = 35.3_{-1.3}^{+0.6} \text{ эрг с}^{-1}$ и $\log \eta_\gamma = -1.2_{-1.3}^{+0.6}$, что соответствует средним значениям из распределений для гамма-пульсаров со схожими характеристическим возрастом и/или значением \dot{E} (см. работу [1]).

Значение непоглощённого нетеплового рентгеновского потока пульсара в диапазоне 2–10 кэВ, полученного из рентгеновских спектральных аппроксимаций, составляет $\log F_X = -13.5_{-0.8}^{+0.7} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Принимая полученный в настоящей работе диапазон расстояний, можно оценить соответствующие рентгеновские светимость и эффективность как $\log L_X = 31.1_{-2.1}^{+1.3} \text{ эрг с}^{-1}$ и $\log \eta_X = -5.4_{-2.0}^{+1.3}$.

Для верхнего предела на расстояние $D = 3.5$ кпк на уровне 90%, верхние пределы на оптическую светимость и эффективность в фильтре V в предположении плоского спектра составляют, соответственно, $\log L_{\text{Opt}} \lesssim 29.9 \text{ эрг с}^{-1}$ и $\log \eta_{\text{Opt}} \lesssim -6.7$. На Рис. 6.4 приве-

дено сравнение полученных рентгеновских и оптических эффективностей и светимостей с данными для других пульсаров, наблюдаемых в обоих диапазонах. Согласно Рис. 6.4, пульсар J2021+3651 является неэффективным в этих диапазонах, если сравнивать с другими, существенно более молодыми и более старыми пульсарами. Таким образом, мы получили 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 эффективности пульсаров от возраста (описан в работе [93]). Такой минимум не наблюдается на соответствующей зависимости для гамма-диапазона [1]. Эта и другие наблюдаемые характеристики, описанные выше, делают систему Dragonfly существенно схожей с пульсаром Vela и его туманностью.

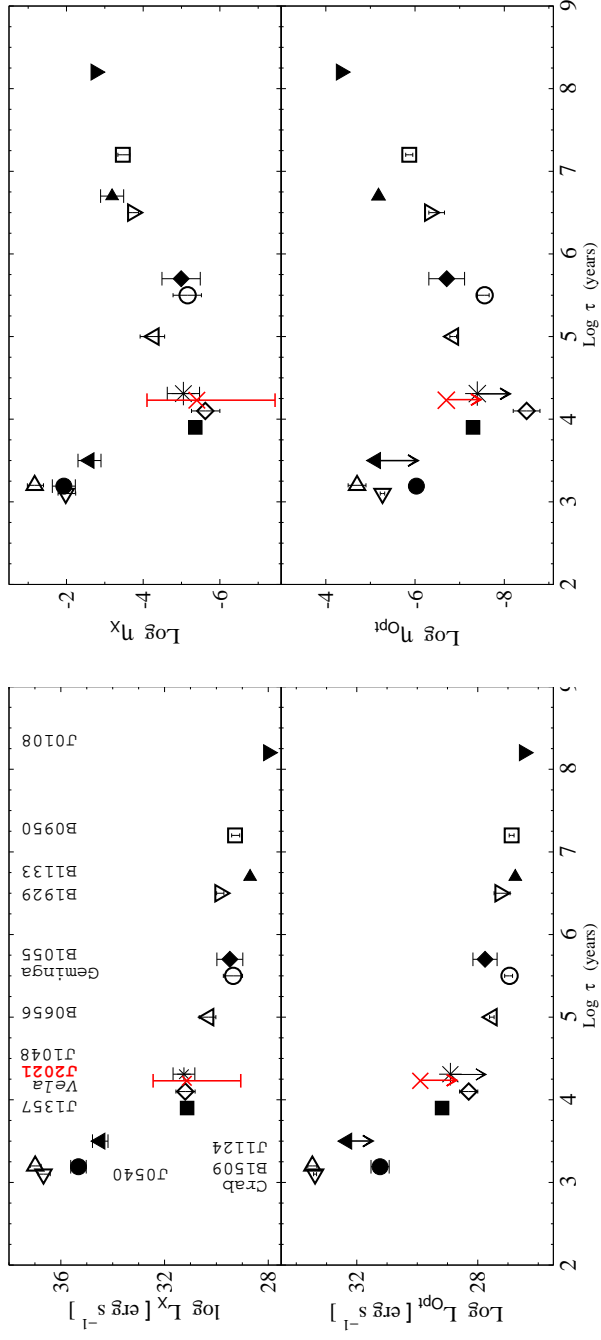


Рис. 6.4. Рентгеновские и оптические светимости, L_X и L_{Opt} , и соответствующие эффективности, η_X и η_{Opt} , пульсаров с разным характеристическим возрастом τ , детектированных в обоих спектральных диапазонах. Пульсары помечены разными символами. Пульсары также помечены для пульсара J2021+3651, определённые в настоящей работе (помечены звёздочкой).

6.5 Заключение к главе

В результате глубоких оптических наблюдений на телескопе GTC в фильтре r' пульсар J2021+3651 и структуры туманности Dragonfly отождествлены не были. На потоки излучения пульсара и туманности были установлены верхние пределы $r' \gtrsim 27.2$ и $r' \gtrsim 24.8$, соответственно. Был проведён независимый анализ архивных данных рентгеновских наблюдений пульсара с учётом соотношения межзвёздное поглощение – расстояние, построенного с использованием звёзд красного сгущения как стандартных свечей. Такой анализ позволил нам сделать оценку расстояния до объекта, $D = 1.8_{-1.4}^{+1.7}$. Исходя из полученных значений расстояния и верхнего предела на оптический поток пульсара, можно сделать вывод, что пульсар J2021+3651, как и пульсар Vela, является неэффективным в оптическом и рентгеновском диапазонах. В то же время, его эффективность в гамма-диапазоне соответствует средним для гамма-пульсаров подобного возраста. Верхний предел на поток пульсара в оптическом диапазоне согласуется с экстраполяцией рентгеновского спектра, в то время как верхний предел на оптический поток туманности не ограничивает соответствующую экстраполяцию. Полученное значение расстояния указывает на перспективность измерений собственного движения пульсара, например, методами РСДБ.

Заключение

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 позицию, которая исключает предложенное ранее оптическое отождествление пульсара. Изучены спектр и поляризация объекта. Получена независимая оценка меры вращения плоскости поляризации в направлении на пульсар -43 ± 1 рад м^{-2} . Соответствующее среднее значение галактического магнитного поля вдоль направления на пульсар, -0.41 ± 0.01 мкГс, близко к значениям для большинства других пульсаров, расположенных в пределах 2° от позиции J1357–6429. Проведён независимый анализ архивных радиоинтерферометрических данных наблюдений пульсара. Сопоставление всех данных позволило установить верхний предел на собственное движение объекта, 106 мсд год^{-1} , что соответствует пределу на поперечную скорость $v_{tr} \lesssim 1300$ км 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 $H \gtrsim 22.8$. Потoki 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 нейтронной звезды 36_{-6}^{+8} эВ. Такое значение подтверждает вывод о том, что J0357+3205 является одной из самых холодных среди нейтронных звёзд 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 нейтронных звёзд, 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.

Я бы хотела выразить благодарность своему научному руководителю Ю. А. Шибанову, а также всем соавторам публикаций и коллегам, в частности, Д. П. Барсукову, М. А. Воронкову, А. А. Даниленко, С. В. Жарикову, Д. А. Зюзину, К. П. Левенфиш, П. С. Штернину и другим. Хотела бы также поблагодарить сотрудников сектора теоретической астрофизики и лаборатории астрофизики высоких энергий за бесценный опыт, прекрасные условия для выполнения данной работы, а также за финансовую поддержку для работы над задачами диссертации. Отдельно благодарю Диму Барсукова за помощь в оформлении работы. Я также очень признательна семье и друзьям за поддержку и понимание.

Литература

- [1] The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-Ray Pulsars / A. A. Abdo, M. Ajello, A. Allafort 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] Fermi LAT Discovery of Gamma-ray Pulsars in a Blind Search / P. M. Saz Parkinson, M. Dormody, M. Ziegler, for the LAT Collaboration // *ArXiv e-prints*. — 2009.
- [4] *Saz Parkinson P. M., Fermi LAT Collaboration.* Fermi-LAT searches for γ -ray pulsars // IAU Symposium / Ed. by J. van Leeuwen. — Vol. 291 of *IAU Symposium*. — 2013. — Pp. 81–86.
- [5] 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.
- [6] *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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] Possible optical counterpart of PSR J1357-6429 / A. Danilenko, A. Kirichenko, R. E. Mennickent et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 540. — P. A28.
- [11] 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.
- [12] *Shearer A., Golden A.* Implications of the Optical Observations of Isolated Neutron Stars // *Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 547. — Pp. 967–972.
- [13] Hubble Space Telescope Multiepoch Imaging of the PSR B0540-69 System Unveils a Highly Dynamic Synchrotron Nebula / A. De Luca, R. P. Mignani, P. A. Caraveo, G. F. Bignami // *Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 667. — Pp. L77–L80.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] *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.
- [18] *Fukugita M., Shimasaku K., Ichikawa T.* Galaxy Colors in Various Photometric Band Systems // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1995. — Vol. 107. — P. 945.
- [19] *Sault R. J., Teuben P. J., Wright M. C. H.* A Retrospective View of MIRIAD // *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV* / Ed. by R. A. Shaw, H. E. Payne, J. J. E. Hayes. — Vol. 77 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1995. — P. 433.
- [20] *Wilson T. L., Rohlfs K., Huttemeister S.* Tools of Radio Astronomy, 5th edition. — 2012.

- [21] *Thompson A. R., Moran J. M., Swenson Jr. G. W.* Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 2nd Edition. — 2001.
- [22] *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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] *Stappers B. W., Gaensler B. M., Johnston S.* A deep search for pulsar wind nebulae using pulsar gating // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 1999. — Vol. 308. — Pp. 609–617.
- [27] Glitches in southern pulsars / N. Wang, R. N. Manchester, R. T. Pace et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2000. — Vol. 317. — Pp. 843–860.
- [28] The Crab pulsar in the visible and ultraviolet with 20 microsecond effective time resolution / J. W. Percival, J. D. Biggs, J. F. Dolan et al. // *Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 407. — Pp. 276–283.
- [29] *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.
- [30] 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.
- [31] 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.

- [32] *Lai D., Chernoff D. F., Cordes J. M.* Pulsar Jets: Implications for Neutron Star Kicks and Initial Spins // *Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 549. — Pp. 1111–1118.
- [33] *Wongwathanarat A., Janka H.-T., Müller E.* Three-dimensional neutrino-driven supernovae: Neutron star kicks, spins, and asymmetric ejection of nucleosynthesis products // *Astronomy and Astrophysics*. — 2013. — Vol. 552. — P. A126.
- [34] 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.
- [35] *Johnston S., Weisberg J. M.* Profile morphology and polarization of young pulsars // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2006. — Vol. 368. — Pp. 1856–1870.
- [36] 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.
- [37] *Rookyard S. C., Weltevrede P., Johnston S.* Constraints on viewing geometries from radio observations of γ -ray-loud pulsars using a novel method // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 446. — Pp. 3367–3388.
- [38] 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.
- [39] *Zavlin V. E.* First X-Ray Observations of the Young Pulsar J1357-6429 // *Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 665. — Pp. L143–L146.
- [40] 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.
- [41] Discovery of the source HESS J1356-645 associated with the young and energetic PSR J1357-6429 / A. Abramowski, F. Acero, F. Aharonian et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2011. — Vol. 533. — P. A103.
- [42] Supernova remnant candidates from the Parkes 2.4-GHz survey / A. R. Duncan, R. T. Stewart, R. F. Haynes, K. L. Jones // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 1997. — Vol. 287. — Pp. 722–738.
- [43] *Blondin J. M., Chevalier R. A., Frierson D. M.* Pulsar Wind Nebulae in Evolved Supernova Remnants // *Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 563. — Pp. 806–815.

- [44] The Australia Telescope Compact Array Broad-band Backend: description and first results / W. E. Wilson, R. H. Ferris, P. Axtens et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 416. — Pp. 832–856.
- [45] *Gooch R.* Karma: a Visualization Test-Bed // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / Ed. by G. H. Jacoby, J. Barnes. — Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1996. — P. 80.
- [46] The second epoch Molonglo Galactic Plane Survey: compact source catalogue / T. Murphy, T. Mauch, A. Green et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2007. — Vol. 382. — Pp. 382–392.
- [47] *Deller A. T., Tingay S. J., Brisken W.* Precision Southern Hemisphere Pulsar VLBI Astrometry: Techniques and Results for PSR J1559-4438 // *Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 690. — Pp. 198–209.
- [48] *Numerical recipes in C++ : the art of scientific computing* / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. — 2002.
- [49] *Minter A. H.* Detection of OH Absorption Against The Pulsar B1718-35 // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. — Vol. 37 of *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 2005. — P. 1301.
- [50] *Lorimer D. R., Kramer M.* Handbook of Pulsar Astronomy. — 2012.
- [51] *Cordes J. M., Lazio T. J. W.* NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations // *ArXiv Astrophysics e-prints*. — 2002.
- [52] Phase-resolved Faraday rotation in pulsars / A. Noutsos, A. Karastergiou, M. Kramer et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2009. — Vol. 396. — Pp. 1559–1572.
- [53] A study of multifrequency polarization pulse profiles of millisecond pulsars / S. Dai, G. Hobbs, R. N. Manchester et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 449. — Pp. 3223–3262.
- [54] *Radhakrishnan V., Cooke D. J.* Magnetic Poles and the Polarization Structure of Pulsar Radiation // *Astrophysics Letters*. — 1969. — Vol. 3. — P. 225.
- [55] *Gil J., Gronkowski P., Rudnicki W.* Geometry of the emission region of PSR 0950+08 // *Astronomy and Astrophysics*. — 1984. — Vol. 132. — Pp. 312–316.

- [56] *Komesaroff M. M.* Possible Mechanism for the Pulsar Radio Emission // *Nature*. — 1970. — Vol. 225. — Pp. 612–614.
- [57] *Rankin J. M.* Toward an empirical theory of pulsar emission. IV - Geometry of the core emission region // *Astrophysical Journal*. — 1990. — Vol. 352. — Pp. 247–257.
- [58] *Maciesiak K., Gil J.* On the pulse-width statistics in radio pulsars - II. Importance of the core profile components // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 417. — Pp. 1444–1453.
- [59] *Lyne A. G., Manchester R. N.* The shape of pulsar radio beams // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 1988. — Vol. 234. — Pp. 477–508.
- [60] *Maciesiak K., Gil J., Melikidze G.* On the pulse-width statistics in radio pulsars - III. Importance of the conal profile components // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2012. — Vol. 424. — Pp. 1762–1773.
- [61] *Malov I. F., Nikitina E. B.* The geometry of radio pulsar magnetospheres // *Astronomy Reports*. — 2011. — Vol. 55. — Pp. 878–889.
- [62] *Weltevrede P., Johnston S.* Profile and polarization characteristics of energetic pulsars // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2008. — Vol. 391. — Pp. 1210–1226.
- [63] *Bhat N. D. R., Rao A. P., Gupta Y.* Long-Term Scintillation Studies of Pulsars. I. Observations and Basic Results // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1999. — Vol. 121. — Pp. 483–513.
- [64] The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue / R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, M. Hobbs // *Astronomical Journal*. — 2005. — Vol. 129. — Pp. 1993–2006.
- [65] VLT observations of the two Fermi pulsars PSR J1357-6429 and PSR J1048-5832 / R. P. Mignani, A. Shearer, A. de Luca et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2011. — Vol. 533. — P. A101.
- [66] A New System of Faint Near-Infrared Standard Stars / S. E. Persson, D. C. Murphy, W. Krzeminski et al. // *Astronomical Journal*. — 1998. — Vol. 116. — Pp. 2475–2488.
- [67] *Durant M., Kargaltsev O., Pavlov G. G.* Multiwavelength Spectroscopy of PSR B0656+14 // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 743. — P. 38.

- [68] *Kirkpatrick J. D.* 2MASS Data Mining and the M, L, and T Dwarf Archives // Brown Dwarfs / Ed. by E. Martín. — Vol. 211 of *IAU Symposium*. — 2003. — P. 189.
- [69] 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.
- [70] The near-infrared detection of PSR B0540-69 and its nebula / R. P. Mignani, A. De Luca, W. Hummel et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 544. — P. A100.
- [71] A Broadband X-Ray Study of the Geminga Pulsar with NuSTAR and XMM-Newton / K. Mori, E. V. Gotthelf, F. Dufour et al. // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 793. — P. 88.
- [72] *Kaplan D. L., Moon D.-S.* A Near-Infrared Search for Counterparts to Three Pulsars in Young Supernova Remnants // *Astrophysical Journal*. — 2006. — Vol. 644. — Pp. 1056–1062.
- [73] The PSR J1124-5916 wind nebula in the near-infrared / S. V. Zharikov, D. A. Zyuzin, Y. A. Shibano, R. E. Mennickent // *Astronomy and Astrophysics*. — 2013. — Vol. 554. — P. A120.
- [74] The Vela Pulsar and Its Likely Counter-jet in the K_s Band / D. Zyuzin, Y. Shibano, A. Danilenko et al. // *Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 775. — P. 101.
- [75] *Kargaltsev O., Pavlov G. G.* Pulsar Wind Nebulae in the Chandra Era // 40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More / Ed. by C. Bassa, Z. Wang, A. Cumming, V. M. Kaspi. — Vol. 983 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2008. — Pp. 171–185.
- [76] 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–.
- [77] Discovery of a Faint X-Ray Counterpart and a Parsec-long X-Ray Tail for the Middle-aged, γ -Ray-only Pulsar PSR J0357+3205 / A. De Luca, M. Marelli, R. P. Mignani et al. // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 733. — P. 104.
- [78] Eight γ -ray Pulsars Discovered in Blind Frequency Searches of Fermi LAT Data / P. M. Saz Parkinson, M. Dormody, M. Ziegler et al. // *Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 725. — Pp. 571–584.

- [79] PSR J0357+3205: The Tail of the Turtle / M. Marelli, A. De Luca, D. Salvetti et al. // *Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 765. — P. 36.
- [80] The u'g'r'i'z' Standard-Star System / J. A. Smith, D. L. Tucker, S. Kent et al. // *Astronomical Journal*. — 2002. — Vol. 123. — Pp. 2121–2144.
- [81] PSR J0357+3205: A Fast-moving Pulsar with a Very Unusual X-Ray Trail / A. De Luca, R. P. Mignani, M. Marelli et al. // *Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 765. — P. L19.
- [82] Zharikov S., Mignani R. P. On the PSR B1133+16 optical counterpart // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 435. — Pp. 2227–2233.
- [83] Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements - Meteoritic and solar // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 1989. — Vol. 53. — Pp. 197–214.
- [84] Balucinska-Church M., McCammon D. Photoelectric absorption cross sections with variable abundances // *Astrophysical Journal*. — 1992. — Vol. 400. — P. 699.
- [85] Neutron Star Atmospheres / G. G. Pavlov, Y. A. Shibano, V. E. Zavlin, R. D. Meyer // NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C / Ed. by M. A. Alpar, U. Kiziloglu, J. van Paradijs. — Vol. 450 of *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*. — 1995. — P. 71.
- [86] Ho W. C. G., Potekhin A. Y., Chabrier G. Model X-Ray Spectra of Magnetic Neutron Stars with Hydrogen Atmospheres // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2008. — Vol. 178. — Pp. 102–109.
- [87] Sturrock P. A. A Model of Pulsars // *Astrophysical Journal*. — 1971. — Vol. 164. — P. 529.
- [88] 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.
- [89] Chandra Phase-resolved X-Ray Spectroscopy of the Crab Pulsar / M. C. Weisskopf, A. F. Tennant, D. G. Yakovlev et al. // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 743. — P. 139.
- [90] Radiation from Condensed Surface of Magnetic Neutron Stars / M. van Adelsberg, D. Lai, A. Y. Potekhin, P. Arras // *Astrophysical Journal*. — 2005. — Vol. 628. — Pp. 902–913.
- [91] Predehl P., Schmitt J. H. M. M. X-raying the interstellar medium: ROSAT observations of dust scattering halos. // *Astronomy and Astrophysics*. — 1995. — Vol. 293. — Pp. 889–905.

- [92] *Schlafly E. F., Finkbeiner D. P.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 737. — P. 103.
- [93] *Zharikov S., Shibanov Y., Komarova V.* Radiation efficiencies of the pulsars detected in the optical range // *Advances in Space Research*. — 2006. — Vol. 37. — Pp. 1979–1983.
- [94] *Mignani R. P., Pavlov G. G., Kargaltsev O.* Optical-Ultraviolet Spectrum and Proper Motion of the Middle-aged Pulsar B1055-52 // *Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 720. — Pp. 1635–1643.
- [95] *Kargaltsev O., Pavlov G. G., Romani R. W.* Ultraviolet Emission from the Millisecond Pulsar J0437-4715 // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 602. — Pp. 327–335.
- [96] Ultraviolet, X-Ray, and Optical Radiation from the Geminga Pulsar / O. Y. Kargaltsev, G. G. Pavlov, V. E. Zavlin, R. W. Romani // *Astrophysical Journal*. — 2005. — Vol. 625. — Pp. 307–323.
- [97] New Optical/Ultraviolet Counterparts and the Spectral Energy Distributions of Nearby, Thermally Emitting, Isolated Neutron Stars / D. L. Kaplan, A. Kamble, M. H. van Kerkwijk, W. C. G. Ho // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 736. — P. 117.
- [98] *Mayne N. J., Naylor T.* Fitting the young main-sequence: distances, ages and age spreads // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2008. — Vol. 386. — Pp. 261–277.
- [99] *Cunha K., Smith V. V.* Is the expanding molecular cloud surrounding λ Orionis caused by a Supernova? // *Astronomy and Astrophysics*. — 1996. — Vol. 309. — Pp. 892–894.
- [100] *Dolan C. J., Mathieu R. D.* A Photometric Study of the Young Stellar Population throughout the λ Orionis Star-Forming Region // *Astronomical Journal*. — 2002. — Vol. 123. — Pp. 387–403.
- [101] Cooling neutron star in the Cassiopeia A supernova remnant: evidence for superfluidity in the core / P. S. Shternin, D. G. Yakovlev, C. O. Heinke et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 412. — Pp. L108–L112.
- [102] *Yakovlev D. G., Pethick C. J.* Neutron Star Cooling // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Vol. 42. — Pp. 169–210.

- [103] Enhanced cooling of neutron stars via Cooper-pairing neutrino emission / M. E. Gusakov, A. D. Kaminker, D. G. Yakovlev, O. Y. Gnedin // *Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Vol. 423. — Pp. 1063–1071.
- [104] Minimal Cooling of Neutron Stars: A New Paradigm / D. Page, J. M. Lattimer, M. Prakash, A. W. Steiner // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2004. — Vol. 155. — Pp. 623–650.
- [105] Neutrino Emission from Cooper Pairs and Minimal Cooling of Neutron Stars / D. Page, J. M. Lattimer, M. Prakash, A. W. Steiner // *Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 707. — Pp. 1131–1140.
- [106] PSR J2021+3651: A Young Radio Pulsar Coincident with an Unidentified EGRET γ -Ray Source / M. S. E. Roberts, J. W. T. Hessels, S. M. Ransom et al. // *Astrophysical Journal*. — 2002. — Vol. 577. — Pp. L19–L22.
- [107] *McLaughlin M. A., Cordes J. M.* Gamma-Ray Pulsars: Modeling and Searches // *ArXiv Astrophysics e-prints*. — 2003.
- [108] 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.
- [109] 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.
- [110] 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.
- [111] *Van Etten A., Romani R. W., Ng C.-Y.* Rings and Jets around PSR J2021+3651: The “Dragonfly Nebula” // *Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 680. — Pp. 1417–1425.
- [112] TeV Gamma-Ray Sources from a Survey of the Galactic Plane with Milagro / A. A. Abdo, B. Allen, D. Berley et al. // *Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 664. — Pp. L91–L94.
- [113] Spatially Resolving the Very High Energy Emission from MGRO J2019+37 with VERITAS / E. Aliu, T. Aune, B. Behera et al. // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 788. — P. 78.

- [114] The second data release of the INT Photometric H α Survey of the Northern Galactic Plane (IPHAS DR2) / G. Barentsen, H. J. Farnhill, J. E. Drew et al. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 444. — Pp. 3230–3257.
- [115] Old stellar Galactic disc in near-plane regions according to 2MASS: Scales, cut-off, flare and warp / M. López-Corredoira, A. Cabrera-Lavers, F. Garzón, P. L. Hammersley // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — Vol. 394. — Pp. 883–899.
- [116] *Cabrera-Lavers A., Garzón F., Hammersley P. L.* The thick disc component of the Galaxy from near infrared colour-magnitude diagrams // *Astronomy and Astrophysics*. — 2005. — Vol. 433. — Pp. 173–183.
- [117] The Distance, Mass, and Radius of the Neutron Star in 4U 1608-52 / T. Güver, F. Özel, A. Cabrera-Lavers, P. Wroblewski // *Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 712. — Pp. 964–973.
- [118] *Durant M., van Kerkwijk M. H.* Distances to Anomalous X-Ray Pulsars Using Red Clump Stars // *Astrophysical Journal*. — 2006. — Vol. 650. — Pp. 1070–1081.
- [119] *Rieke G. H., Lebofsky M. J.* The interstellar extinction law from 1 to 13 microns // *Astrophysical Journal*. — 1985. — Vol. 288. — Pp. 618–621.
- [120] *Dickey J. M., Lockman F. J.* H I in the Galaxy // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1990. — Vol. 28. — Pp. 215–261.
- [121] The Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic HI. Final data release of the combined LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections / P. M. W. Kalberla, W. B. Burton, D. Hartmann et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2005. — Vol. 440. — Pp. 775–782.
- [122] Bayesian data analysis / A. Gelman, J. B. Carlin, H. S. Stern, D. B. Rubin. — Taylor & Francis, 2014. — Vol. 2.
- [123] emcee: The MCMC Hammer / D. Foreman-Mackey, D. W. Hogg, D. Lang, J. Goodman // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2013. — Vol. 125. — Pp. 306–312.
- [124] The X-Ray Spectrum of the Vela Pulsar Resolved with the Chandra X-Ray Observatory / G. G. Pavlov, V. E. Zavlin, D. Sanwal et al. // *Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 552. — Pp. L129–L133.

- [125] *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // *Astrophysical Journal*. — 1989. — Vol. 345. — Pp. 245–256.
- [126] The Vela and Geminga pulsars in the mid-infrared / A. A. Danilenko, D. A. Zyuzin, Y. A. Shibano, S. V. Zharikov // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 415. — Pp. 867–880.
- [127] *Güver T., Özel F.* The relation between optical extinction and hydrogen column density in the Galaxy // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2009. — Vol. 400. — Pp. 2050–2053.
- [128] *Gorenstein P.* Empirical relation between interstellar X-ray absorption and optical extinction // *Astrophysical Journal*. — 1975. — Vol. 198. — Pp. 95–101.
- [129] *He C., Ng C.-Y., Kaspi V. M.* The Correlation between Dispersion Measure and X-Ray Column Density from Radio Pulsars // *Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 768. — P. 64.
- [130] Radio Detection of LAT PSRs J1741-2054 and J2032+4127: No Longer Just Gamma-ray Pulsars / F. Camilo, P. S. Ray, S. M. Ransom et al. // *Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 705. — Pp. 1–13.
- [131] PSR J2030+3641: Radio Discovery and Gamma-Ray Study of a Middle-aged Pulsar in the Now Identified Fermi-LAT Source 1FGL J2030.0+3641 / F. Camilo, M. Kerr, P. S. Ray et al. // *Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 746. — P. 39.
- [132] *Arumugasamy P., Pavlov G. G., Kargaltsev O.* XMM-Newton Observations of Young and Energetic Pulsar J2022+3842 // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 790. — P. 103.