

На правах рукописи

Карпова Анна Викторовна

**Гамма-пульсары J1741–2054 и
J0633+0632, радиотуманность DA 495
и остаток сверхновой G350.0–2.0
в рентгеновском диапазоне**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная
астрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2016

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

- Научный руководитель: Шибанов Юрий Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФТИ им. А. Ф. Иоффе
- Официальные оппоненты: Лутовинов Александр Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
заведующий лабораторией
Институт космических исследований РАН
- Постнов Константин Александрович,
доктор физико-математических наук,
профессор,
зам. директора по научной работе
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга МГУ
- Ведущая организация: Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория РАН

Защита состоится 29 декабря 2016 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и на веб-сайте института <http://www.ioffe.ru>.

Автореферат разослан 28 ноября 2016 года.

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

А. М. Красильщиков

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Пульсары – это быстро вращающиеся нейтронные звезды (НЗ), излучение которых приходит на Землю в виде периодических импульсов. Рождение пульсаров происходит в результате коллапса ядер массивных звезд и сопровождается вспышкой сверхновой. Пульсары теряют энергию, испуская электромагнитное излучение и потоки заряженных частиц (так называемый пульсарный ветер). Взаимодействие пульсарного ветра с межзвездной средой порождает туманности пульсарного ветра, или плерионы. Пульсары формируют компактную часть остатков родительских сверхновых (ОСН). Остальная, более протяженная часть ОСН формируется взрывом звезды-прародительницы и взаимодействием разлетающегося со сверхзвуковой скоростью вещества с окружающей средой. Наблюдаются остатки оболочечного типа, остатки со смешанной морфологией (в радиодиапазоне излучает оболочка, а рентгеновское излучение заполняет область внутри нее) и комбинированные остатки (оболочка плюс плерион).

В настоящий момент известно более 2500 пульсаров¹. Примерно 95% из них детектировано в радиодиапазоне. В рентгеновском диапазоне обнаружено около 100 пульсаров, излучающих за счет энергии вращения. Что касается ОСН, то в нашей Галактике их известно около 300², в рентгеновском диапазоне наблюдается около 40% от этого числа. Также ОСН наблюдаются в близких галактиках – Магеллановых Облаках, галактике Андромеда и др. Туманностей пульсарного ветра в рентгеновском диапазоне известно несколько десятков (см., например, [1]).

Пульсары были открыты почти 50 лет назад, но до сих пор остаются неразрешенными многие фундаментальные вопросы: как связаны различные типы НЗ? Каковы диапазоны масс и радиусов НЗ, а также их состав? Какие механизмы отвечают за магнитосферное излучение по всему диапазону волн? Для ответов на эти вопросы необходимы наблюдения пульсаров в различных диапазонах электромагнитного спектра. Рентгеновские наблюдения позволяют оценивать расстояния до пульсаров, что особенно важно в случае радиотихих НЗ, для которых невозможно определить расстояние по мере дисперсии. В случае обнаружения теплового излучения, идущего со всей поверхности НЗ, возможно сделать оценку радиуса и температуры звезды и провести сравнение с существующими теориями строения и остывания НЗ и таким образом исследовать вещество сверхъядерной плотности в их недрах. По наличию в рентгеновском спектре каких-либо особенностей можно судить о химическом составе атмосферы НЗ, гравитационном красном смещении (по смещению спектральных линий), и следовательно, об отношении массы звезды к ее радиусу, а также о величине магнитного поля (по циклотронным линиям).

Изучение ОСН дает информацию о межзвездной среде и о взаимодействии с ней ударных волн, о механизме взрыва сверхновой и о том, какие химические элементы формируются при взрыве, о характеристиках компактных остатков и т. д. [2]. Рентгеновские наблюдения ОСН очень важны, так как позволяют определять обилие альфа-элементов и элементов группы железа,

¹<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

²<https://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/>

спектральные линии которых лежат в диапазоне 0.5–10 килоэлектронвольт при температурах, характерных для плазмы, нагретой ударными волнами от вспышек сверхновых. Излучение в линиях позволяет определять температуру и ионизационное состояние плазмы. Отсутствие линий (или слабое излучение в линиях) в спектрах молодых ОСН обычно указывает на значительную долю синхротронного излучения. Исследование синхротронного излучения, в свою очередь, позволяет изучать ускорение частиц на фронтах ударных волн. Построение изображений в различных диапазонах позволяет исследовать пространственное распределение температуры и химических элементов по ОСН, а также отделять тепловое излучение от нетеплового.

Цели работы

Основной целью диссертационной работы является исследование рентгеновского излучения нейтронных звезд и ассоциированных с ними протяженных объектов.

1. Исследование рентгеновского излучения гамма-пульсаров J1741–2054 и J0633+0632.
2. Исследование рентгеновского излучения радиотуманности DA 495 и ее центрального объекта, которые предположительно образуют систему пульсар плюс пульсарная туманность.
3. Исследование в рентгеновском диапазоне остатка сверхновой G350.0–2.0 и точечного источника 1RXS J172653.4–382157, предположительно являющегося нейтронной звездой, в его поле.

Научная новизна

Работа основана как на архивных данных наблюдений пульсаров и ОСН на телескопах *Chandra* и *XMM-Newton*, так и на оригинальных наблюдениях на телескопе *XMM-Newton*. Впервые представлен спектральный анализ рентгеновского излучения пульсара J1741–2054. Впервые детально исследован спектр пульсара J0633+0632 и его туманности пульсарного ветра в рентгеновском диапазоне. Получены новые ограничения на параметры радиотуманности DA 495 и ее центрального объекта J1952.2+2925, которые предположительно образуют систему пульсар плюс пульсарная туманность. Впервые представлен спектральный анализ G350.0–2.0 и точечного источника 1RXS J172653.4–382157 в рентгеновском диапазоне. Обнаружен кандидат в оптическое отождествление и установлен верхний предел на долю пульсирующего излучения точечного источника. Для всех исследуемых объектов получены независимые оценки расстояния на основе соотношений «межзвездное поглощение–расстояние».

Достоверность результатов

Представленные в работе результаты получены с использованием современных верифицированных методов наблюдений, обработки и анализа данных современных рентгеновских телескопов. Достоверность результатов обеспечена сравнением, где это возможно, с результатами других авторов, а также с данными, полученными для объектов исследования в других диапазонах электромагнитного спектра.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты пригодны для непосредственного сравнения с результатами других наблюдений и теоретическими моделями. Результаты дан-

ной работы могут применяться для построения теоретических моделей излучения пульсаров и пульсарных туманностей, а также остатков сверхновых с морфологией смешанного типа и для планирования дальнейших наблюдений исследуемых объектов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты спектрального анализа излучения пульсара J1741–2054 в рентгеновском диапазоне. Вывод о том, что спектр J1741–2054 может быть описан моделью степенной закон плюс чернотельное излучение и не может быть описан моделями водородных атмосфер нейтронных звезд. Определение температуры чернотельной компоненты излучения J1741–2054, составившей 7×10^5 К. Ограничение расстояния до пульсара на уровне 0.7–0.9 килопарсек (кпк), которое указывает, что чернотельное излучение может идти со всей поверхности нейтронной звезды.
2. Результаты спектрального анализа рентгеновского излучения пульсара J0633+0632 и его пульсарной туманности. Вывод о том, что тепловая компонента спектра J0633+0632 может быть одинаково хорошо описана моделью чернотельного излучения с температурой 1.3×10^6 К и моделью водородных атмосфер нейтронных звезд с температурой 6×10^5 К. Ограничение расстояния до пульсара на уровне 1–4 кпк, указывающее, что в обоих случаях тепловое излучение может идти со всей поверхности звезды. Вывод о том, что в первом случае пульсар может быть горячее, чем предсказывает стандартный сценарий остывания нейтронных звезд, а во втором – является одной из самых холодных среди известных нейтронных звезд среднего возраста.
3. Результаты спектрального анализа рентгеновского излучения радиотуманности DA 495 и ее центрального точечного источника J1952.2+2925, которые предположительно образуют систему пульсар плюс пульсарная туманность. Подтверждение на более высоком уровне значимости предыдущих выводов о чисто тепловом спектре J1952.2+2925. Вывод о том, что его спектр может быть одинаково хорошо описан моделью чернотельного излучения с температурой 2.5×10^6 К и радиусом излучающей области 0.6 км и моделью водородной атмосферы нейтронной звезды с температурой поверхности $(9-10) \times 10^5$ К. Установка верхних пределов на нетепловую светимость и долю пульсирующего излучения J1952.2+2925. Ограничения на поведение спектра туманности между радио- и рентгеновским диапазоном.
4. Результаты пространственного и спектрального анализа остатка сверхновой (ОСН) G350.0–2.0 и источника 1RXS J172653.4–382157 в его поле в рентгеновском диапазоне. Вывод о том, что G350.0–2.0 относится к остаткам смешанного типа. Определение природы рентгеновского излучения ОСН, которое, в основном, исходит от нагретой фронтом ударной волны до температуры 9×10^6 К межзвездной среды. Независимая оценка расстояния до G350.0–2.0. Определение природы объекта 1RXS J172653.4–382157 как катаклизмической переменной. Установление верхнего предела на долю пульсирующего рентгеновского излучения этого источника.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях: «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2014, 2015); «Пулковская молодежная астрономическая конференция» (Санкт-Петербург, 2014, 2016); «Physics of Neutron Stars» (Санкт-Петербург, 2014); «The X-ray Universe 2014» (Dublin, 2014); «Физика» (Санкт-Петербург, 2015). Результаты работы также были неоднократно доложены на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Результаты, приведенные в настоящей работе, получены в период с 2013 по 2016 гг. и опубликованы в четырех статьях в ведущих международных реферируемых журналах, входящих в Перечень ВАК, а также в сборниках тезисов указанных выше конференций.

Личный вклад

В результатах, вынесенных на защиту, вклад автора является определяющим. Опубликованные работы выполнены в соавторстве с научным руководителем и сотрудниками ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Автор принимал активное участие в постановке задач исследования, обработке и анализе данных, формулировании выводов и подготовке публикаций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 106 страниц, в том числе 28 рисунков и 14 таблиц. Список литературы насчитывает 139 наименований.

Основное содержание диссертации

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научная новизна работы, обоснована достоверность результатов и их практическая значимость, приведены основные результаты, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации, обозначен личный вклад автора.

В главе 1 дан обзор типичных характеристик излучения пульсаров и остатков сверхновых в рентгеновском диапазоне, описаны характеристики использовавшихся в работе орбитальных рентгеновских телескопов *Chandra* и *XMM-Newton* и редукция наблюдательных данных.

Глава 2 посвящена исследованию гамма-пульсара среднего возраста J1741–2054 (далее J1741). Результаты исследования опубликованы в работе [A1].

В разделе 2.1 дан обзор предыдущих исследований объекта. J1741 имеет период $P=413$ мс, характеристический возраст $\tau_c=390$ тыс. лет и величину магнитного поля $B=2.7 \times 10^{12}$ Гс, темп потери энергии вращения $\dot{E}=9.5 \times 10^{33}$ эрг с^{-1} [3]. Расстояние до пульсара оценивается в 380 парсек (пк). Обсерваторией *Chandra* детектирован пульсар, компактная туманность пульсарного ветра и кометообразный «хвост» (см. Рис. 1).

В разделе 2.2 представлен анализ архивных данных обсерватории *Chandra*. Спектр пульсара аппроксимирован моделью степенной закон (power

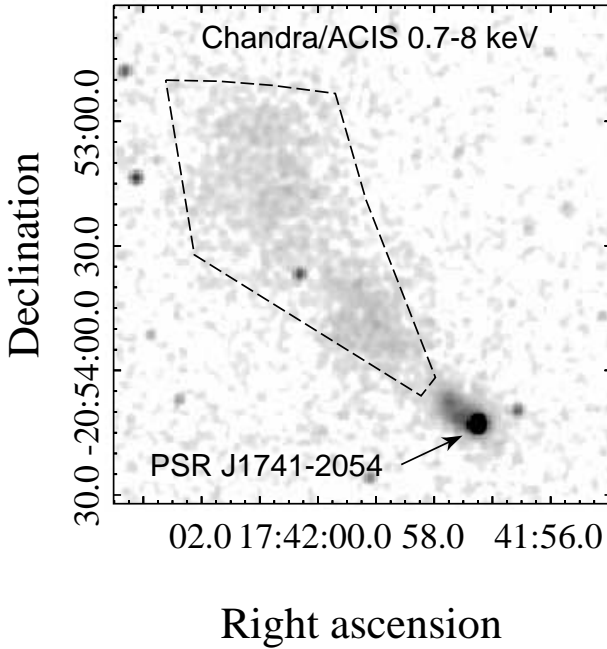


Рис. 1. Фрагмент изображения поля пульсара J1741–2054 в диапазоне 0.7–8 кэВ по данным обсерватории *Chandra*. Кометообразный «хвост» обведен многоугольником.

Right ascension

law, PL) плюс тепловая компонента. Для описания тепловой компоненты использованы модели водородных атмосфер нейтронных звезд (НЗ) NSA и NSMAX [4, 5] и модель чернотельного излучения (black body, BB). Модели NSA+PL, NSMAX+PL, BB, PL и BB+BB были отвергнуты вследствие высокого значения критерия правдоподобия χ^2 , отнесенного к числу степеней свободы ν (degrees of freedom, d.o.f.) – χ_ν^2 . Приемлемой оказалась модель BB+PL: $\chi_\nu^2 = 1.06$ (d.o.f. = 557). Получены следующие параметры наилучшей аппроксимации³: приведенная колонковая плотность поглощающего вещества $N_{\text{H}} = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, фотонный индекс $\Gamma = 2.7 \pm 0.1$, температура $T = 60 \pm 2 \text{ эВ}$ и радиус излучающей области $R = 17_{-3}^{+3.5} D_{\text{крс}}$ км, где $D_{\text{крс}}$ – расстояние до источника в килопарсеках.

Спектр излучения «хвоста», соответствующего многоугольнику на Рис. 1, был аппроксимирован степенным законом с $N_{\text{H}} = (1.6 \pm 0.5) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и $\Gamma = 1.8 \pm 0.2$. Эти параметры согласуются с результатами работы [6] и значением N_{H} , полученным для пульсара. Это позволяет сделать вывод об ассоциации «хвоста» и J1741.

В разделе 2.3.1 исследован вопрос о расстоянии до пульсара. Если чернотельное излучение идет со всей поверхности НЗ с каноническим радиусом 10 км, то пульсар находится на расстоянии 0.8 ± 0.2 кпк. Это значение подтверждено оценками расстояния, полученными с помощью эмпирических соотношений «межзвездное поглощение–расстояние» [7, 8].

В разделе 2.3.2 дано сравнение характеристик J1741 с «Тремя мушкетерами» – хорошо изученными пульсарами среднего возраста [9]. Все объекты излучают мягкую тепловую компоненту, которая может быть описана моделью чернотельного излучения, тогда как модели водородных атмосфер оказываются неприемлемыми. Однако рентгеновский спектр J1741 не содержит дополнительной горячей компоненты. Это может быть объяснено тем, что его фотонный индекс ($\Gamma \approx 2.7$) больше, чем у «Трех мушкетеров» ($\Gamma \lesssim 2$),

³Везде в тексте ошибки соответствуют 90%-ному доверительному интервалу, если не указано иное.

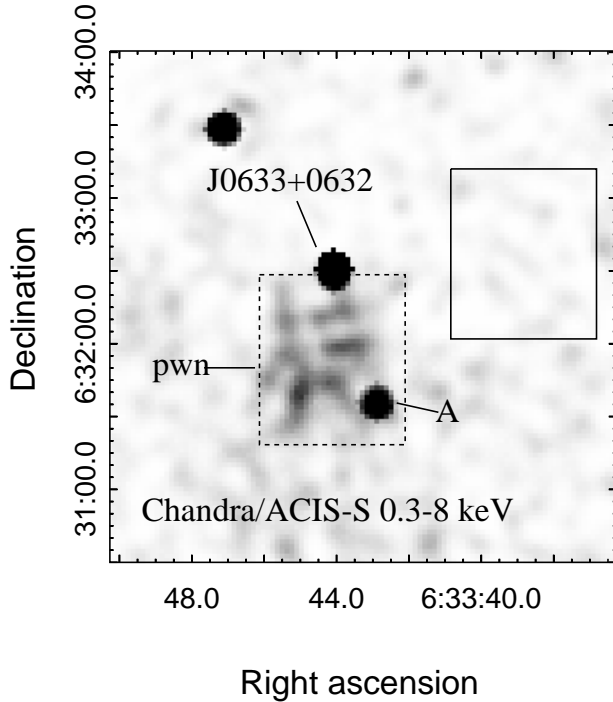


Рис. 2. Изображение поля пульсара J0633+0632 в диапазоне 0.3–8 кэВ по данным обсерватории *Chandra*. Пульсарная туманность обозначена штриховым прямоугольником. Сплошным прямоугольником показана фоновая область. Также отмечен фоновый источник «А», проецирующийся на область туманности.

и дополнительная компонента может быть «спрятана» под степенной компонентой.

В разделе 2.3.3 J1741 рассмотрен с точки зрения теории остывания НЗ. Температура пульсара несколько выше, чем предсказывает стандартный сценарий остывания (см., например, [10]), но согласуется с предсказаниями минимальной теории остывания [11]. Указана необходимость исследования пульсара в ультрафиолетовом диапазоне для получения более строгих ограничений на температуру поверхности звезды.

Глава 3 посвящена анализу рентгеновского излучения радиотихого гамма-пульсара J0633+0632 (далее J0633). Результаты исследования опубликованы в работе [A2].

В разделе 3.1 дан обзор предыдущих исследований этого пульсара. J0633 имеет период $P=297.4$ мс, характеристический возраст $\tau \approx 60$ тыс. лет и величину магнитного поля $B=4.9 \times 10^{12}$ Гс, темп потери энергии вращения $\dot{E}=1.2 \times 10^{35}$ эрг с^{-1} [3]. На основе эмпирического соотношения между расстоянием и потоком излучения в гамма-диапазоне [12] расстояние до объекта было оценено в 1 кпк. J0633 имеет протяженную пульсарную туманность (см. Рис. 2). Анализируя данные обсерватории *Chandra*, Рэй и др. [13] обнаружили, что спектр J0633 содержит тепловую и нетепловую (степенную) компоненты.

В разделе 3.2 представлен независимый анализ данных обсерватории *Chandra*, в ходе которого было обнаружено, что в спектре пульсара, возможно, имеется особенность. Спектр пульсара был аппроксимирован моделью степенной закон (PL) плюс тепловая компонента, спектр туманности – степенным законом.

В разделе 3.3 проанализирована возможность существования особенности в спектре J0633 и ее параметры. Спектр пульсара и модель $BB+PL$ показаны на Рис. 3 слева. Вблизи энергии 0.8 кэВ данные отклоняются от модели,

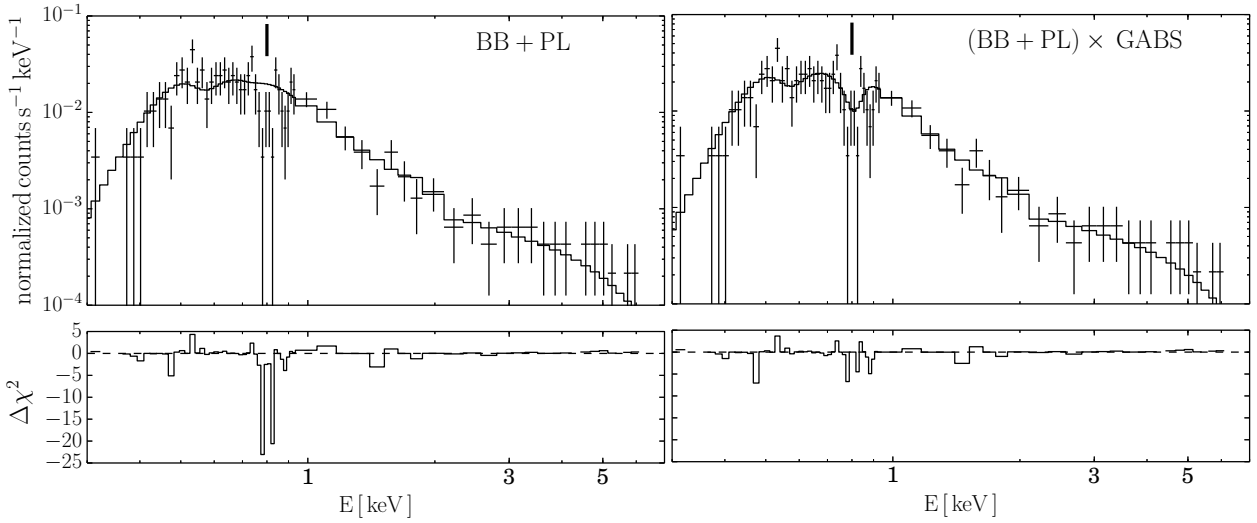


Рис. 3. Спектр пульсара J0633+0632. Сплошные линии показывают модели наилучшей аппроксимации – BB+PL слева и (BB+PL)×GABS справа (см. текст). Положение спектральной особенности показано вертикальной чертой. Невязки аппроксимаций приведены внизу.

поэтому в модель была добавлена абсорбционная гауссовская линия (GABS). Спектр пульсара и новая модель показаны на Рис. 3 справа. Для сравнения моделей был использован тест отношения правдоподобия. p -значение составило 0.002, что обосновывает добавление в модель абсорбционной линии. Профиль линии не разрешается в рассматриваемых данных, однако ее интенсивность можно характеризовать эквивалентной шириной, которая слабо зависит от формы линии и составляет около 63 эВ.

В разделе 3.4 представлен анализ спектра пульсара в предположении существования линии поглощения. В качестве тепловой компоненты использована модель NSMAX 1260 [5] с $B=5 \times 10^{12}$ Гс, близким к значению поля J0633, и модель ВВ. Результаты согласуются с полученными в работе [13]. Байесовский подход позволил включить в анализ соотношение «межзвездное поглощение–расстояние» ($N_{\text{H}}-D$) в качестве априорной информации. Соотношение $N_{\text{H}}-D$ было получено с использованием корреляций между расстоянием и экстинкцией A_V [8] и между A_V и N_{H} [14]. Результирующие параметры аппроксимации показаны в Таблице 1. Для обеих моделей тепловое излучение может идти со всей поверхности звезды. Модель ВВ также не исключает возможности излучения от горячего пятна размером около 1 км.

В разделе 3.5.1 обсуждена природа линии поглощения. Это может быть циклотронная линия, но если она формируется вблизи поверхности НЗ, то соответствующие ей значения величины магнитного поля не согласуются с существующей оценкой этой величины. Однако циклотронная линия может формироваться электронами в магнитосфере НЗ [15] на высоте 30–40 км от поверхности звезды. Другое объяснение – атомные переходы в звездной атмосфере или межзвездной среде. На основе вариации обилия элементов в модели межзвездного поглощения было показано, что линия с энергией 0.8 кэВ может объясняться избытком железа на луче зрения в направлении на пульсар, но обилие железа должно быть 10 раз больше солнечного, что выглядит неправдоподобно. К тому же, такое обилие повлияло бы на спектр пульсар-

Таблица 1. Результаты аппроксимации спектра J0633 разными моделями с учетом соотношения «межзвездное поглощение–расстояние». Температуры T и радиусы R излучающей области даны такими, какими их измерил бы удаленный наблюдатель (т. е. с учетом гравитационного красного смещения).

| Параметры | BB+PL | NSMAX+PL |
|--|----------------------|----------------------|
| Фотонный индекс пульсара Γ_{psr} | $1.6^{+0.6}_{-0.6}$ | $1.2^{+0.6}_{-0.6}$ |
| Температура T , эВ | 108^{+22}_{-14} | 53^{+12}_{-7} |
| Радиус излучающей области R , км | 5^{+11}_{-4} | 12^{+8}_{-9} |
| Расстояние D , кпк | $2.1^{+2.2}_{-1.3}$ | $1.3^{+1.1}_{-0.6}$ |
| Фотонный индекс туманности Γ_{pwn} | $1.2^{+0.3}_{-0.3}$ | $1.1^{+0.2}_{-0.2}$ |
| Светимость пульсара $\log L_{\text{X}}^{\text{psr}}$, эрг с^{-1} | $31.4^{+0.6}_{-0.8}$ | $31.0^{+0.5}_{-0.6}$ |
| Эффективность пульсара $\log \eta_{\text{X}}^{\text{psr}}$ | $-3.7^{+0.6}_{-0.8}$ | $-4.1^{+0.5}_{-0.6}$ |
| Светимость туманности $\log L_{\text{X}}^{\text{pwn}}$, эрг с^{-1} | $32.1^{+0.6}_{-0.8}$ | $31.7^{+0.5}_{-0.5}$ |

ной туманности, в котором намеков на линию обнаружено не было. Наконец, если линии поглощения формируются в атмосфере НЗ, то обычно они более слабые и широкие [16].

В разделе 3.5.2 параметры J0633 сопоставлены с предсказаниями теории остывания НЗ [10]. Если тепловое излучение пульсара описывается атмосферной моделью, то он является одной из самых холодных НЗ среднего возраста ($\lesssim 10^5$ лет) с измеренной температурой поверхности. Если же использовать модель BB, то температура выше, чем предсказывает стандартный сценарий.

В разделе 3.5.3 приведены потоки излучения пульсарной туманности и нетеплового излучения пульсара в диапазоне 2–10 кэВ для моделей с учетом соотношения $N_{\text{H}}-D$. Соответствующие нетепловые светимости $L_{\text{X}}^{\text{pwn}}$ и $L_{\text{X}}^{\text{psr}}$ приведены в Таблице 1. Также приведена эффективность $\eta_{\text{X}}^{\text{psr}}$ трансформации энергии вращения пульсара в рентгеновское излучение.

В разделе 3.5.4 обсуждено место рождения пульсара. Морфология пульсарной туманности в виде «хвоста», тянущегося за пульсаром, позволяет предположить направление и оценить значение собственного движения пульсара (80 миллисекунд дуги в год). Сделан вывод о том, что местом его рождения может являться туманность Розетка – молодая область звездообразования, расстояние до которой составляет ~ 1.5 кпк [17], что согласуется со значениями, полученными для J0633 в результате спектрального анализа.

Глава 4 посвящена исследованию радиотуманности DA 495, которая предположительно является туманностью пульсарного ветра, в рентгеновском диапазоне. Результаты исследования опубликованы в работе [A3].

В разделе 4.1 приведен обзор предыдущих исследований DA 495. В радио-

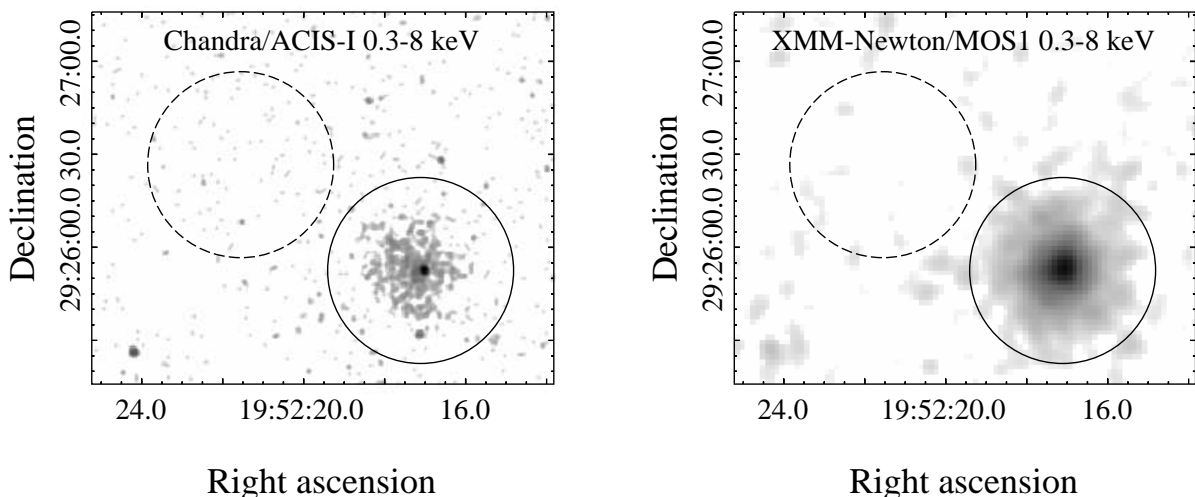


Рис. 4. Изображения DA 495 по данным обсерваторий *Chandra* (слева) и *XMM-Newton* (справа) в диапазоне 0.3–8 кэВ. Сплошные и штриховые окружности показывают области, которые использовались для извлечения спектра системы J1952+туманность и фона, соответственно.

диапазоне DA 495 имеет необычную кольцеобразную структуру. Расстояние до нее по одним оценкам составляет ≈ 2.1 кпк [18], по другим – 1–1.5 кпк [19, 20]. Котес и др. [20] обнаружили в спектре DA 495 излом на частоте 1.3 ГГц. Спектральные индексы $\alpha_\nu = 0.45 \pm 0.20$ и $\alpha_\nu = 0.87 \pm 0.10$ ниже и выше излома, соответственно⁴. Рентгеновские наблюдения выявили компактный источник 1WGA J1952.2+2925 (далее J1952). Предполагается, что он является пульсаром, питающим туманность. Из данных телескопа *ASCA* был получен верхний предел на долю пульсирующего излучения – 50% для периодов $\gtrsim 30$ мс. Анализ наблюдений обсерватории *Chandra* [21], показал, что J1952 является точечным источником, окруженным туманностью размером $\sim 40''$. Спектр туманности может быть описан степенным законом, а чисто тепловой спектр J1952 – моделями NSA [4, 22] и ВВ. Также было сделано предположение, что источник 3FGL J1951.6+2926 является отождествлением DA 495 в гамма-диапазоне [23].

В разделе 4.2 дан обзор архивных данных обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton*. Изображения поля DA 495 приведены на Рис. 4.

В разделе 4.3 получен верхний предел на долю пульсирующего излучения J1952, который составил 40% для периодов $\gtrsim 12$ мс в диапазоне 0.5–1.4 кэВ.

В разделе 4.4 приведено соотношение между расстоянием D и колонковой плотностью N_H , которое использовалось при спектральном анализе.

В разделе 4.5 представлен спектральный анализ J1952 и DA 495. Области, из которых извлекались спектры, показаны на Рис. 4. Спектр туманности аппроксимирован степенным законом (PL), а спектр J1952 – моделями NSA [22], NSMAX [5] и ВВ. Байесовский подход позволил включить в анализ соотношение N_H – D в качестве априорной информации. Для получения этого соотношения использовались результаты работы [24]. Степенная компонен-

⁴Предполагается, что спектральная плотность потока излучения $F_\nu \propto \nu^{-\alpha_\nu}$, где ν – частота.

Таблица 2. Результаты аппроксимации спектров J1952 и пульсарной туманности моделями 1 – ВВ, 2 – NSMAX ($B = 10^{12}$ Гс) и 3 – NSMAX ($B = 10^{13}$ Гс). Значения радиуса R и температуры T соответствуют тем, которые измерил бы удаленный наблюдатель. Светимость туманности L_{pwn} приведена для диапазона 0.5–8 кэВ. $L_{\text{psr}}^{\text{pl}}$ – 3σ верхний предел на нетепловую компоненту светимости точечного источника в диапазоне 0.5–8 кэВ.

| Модель | D , кпк | R , км | T , эВ | Γ_{pwn} | $\log L_{\text{psr}}^{\text{pl}}$, эрг с $^{-1}$ | $\log L_{\text{pwn}}$, эрг с $^{-1}$ | $\chi^2/\text{d.o.f.}$ |
|--------|---------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|--|--|------------------------|
| 1. | $2.4^{+1.3}_{-1.1}$ | $0.6^{+0.6}_{-0.3}$ | 215^{+23}_{-23} | $1.7^{+0.1}_{-0.1}$ | < 31.51 | $32.2^{+0.4}_{-0.5}$ | 455/461 |
| 2. | $3.3^{+1.7}_{-1.3}$ | 10^{+21}_{-7} | 76^{+19}_{-16} | $1.8^{+0.1}_{-0.1}$ | < 31.66 | $32.5^{+0.4}_{-0.5}$ | 455/461 |
| 3. | $3.2^{+1.5}_{-1.2}$ | $6^{+9}_{-3.5}$ | 91^{+17}_{-15} | $1.8^{+0.1}_{-0.1}$ | < 31.72 | $32.5^{+0.4}_{-0.4}$ | 454/461 |

та была добавлена к тепловой модели J1952 для оценки верхнего предела на нетепловую светимость $L_{\text{J1952}}^{\text{pl}}$. Результаты представлены в Таблице 2. Модели NSMAX и ВВ одинаково хорошо описывают спектр J1952. Модели NSMAX предполагают, что излучение идет со всей поверхности НЗ. В случае модели ВВ излучает горячее пятно. К данной модели была добавлена вторая ВВ компонента для определения 3σ верхнего предела на температуру всей поверхности НЗ, который составил ≈ 60 эВ.

В разделе 4.6.1 обсуждены результаты спектрального и временного анализа данных по J1952. Подтвержден вывод, сделанный в работе [21], что J1952 имеет чисто тепловой спектр, получены более строгие ограничения на его параметры. Полученный 40% верхний предел на долю пульсирующего излучения находится выше, чем ожидаемые значения в 10–30% для теплового излучения с поверхностями НЗ [25, 26].

В разделе 4.6.2 показано, что расстояние до DA 495 может быть больше, чем предполагалось ранее, и достигать 5 кпк.

В разделе 4.6.3 дан анализ многоволнового спектра туманности. Спектральные индексы α_ν , полученные из рентгеновских данных для различных моделей системы J1952+туманность, в пределах ошибок согласуются друг с другом и с α_ν , полученным из радиоданных для частот выше 1.3 ГГц [20]. Для проверки наличия второго излома между радио- и рентгеновскими диапазонами, рентгеновские спектры были аппроксимированы совместно с радиоданными. Спектр туманности промоделирован степенным законом с одним изломом и с двумя изломами (broken power law, BPL). Частота первого излома составила ≈ 2 ГГц. Если спектр системы J1952 плюс туманность описывается моделями NSMAX+BPL, второй излом не является необходимым. Для модели ВВ+BPL он необходим и ведет к уплощению спектра в рентгеновском диапазоне. Положение второго излома недостаточно точно определяется и лежит в диапазоне 10^{14} – 10^{17} Гц.

В разделе 4.6.4 приведены ограничения на возраст, светимость и темп по-

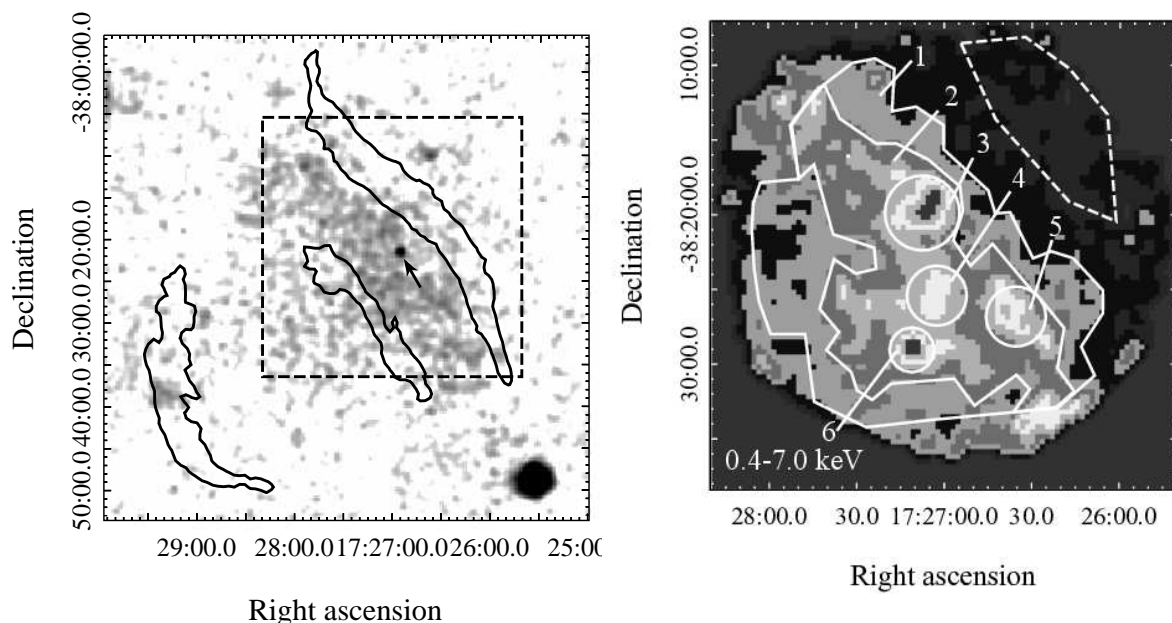


Рис. 5. Слева: Изображение поля G350.0–2.0 в диапазоне 0.1–2.4 кэВ по данным обсерватории *ROSAT*. Источник J172653.4–382157 отмечен стрелкой. Также нанесены радиоконтурсы остатка сверхновой. Справа: Изображение поля G350.0–2.0 в диапазоне 0.4–7.0 кэВ, построенное по данным обсерватории *XMM-Newton*. Соответствующая область показана на левой панели штриховым квадратом. Указаны области, использовавшиеся для извлечения спектров ОСН (1–6), и фона (штриховой многоугольник).

тери энергии вращения пульсара, которые остаются весьма неопределенными. Если излом в спектре туманности на частоте ≈ 2 ГГц возникает вследствие синхротронных потерь, то возраст DA 495 составляет ≈ 30 –130 тыс. лет. С другой стороны, значения светимости туманности L_{pwn} , верхний предел на нетепловую светимость J1952 $L_{\text{psr}}^{\text{pl}}$ и эмпирические зависимости $L_{\text{pwn}}(\dot{E})$, $L_{\text{psr}}^{\text{pl}}(\dot{E})$, $L_{\text{pwn}}(L_{\text{psr}}^{\text{pl}})$, $\dot{E}(t)$ и $L_{\text{pwn}}(t)$ [1], дают значения возраста 7–155 тыс. лет и $\log \dot{E} = 34.7$ –37.1.

В разделе 4.6.5 обсуждено отождествление системы в гамма-диапазоне. Ранее предполагалось, что гамма-источник 3FGL J1951.6+2926, пространственно совпадающий с DA 495 [23], является отождествлением туманности в гамма-диапазоне. Однако такая интерпретация требует неправдоподобно большого избытка излучения на высоких энергиях в спектральном распределении энергии. Следовательно, гамма-источник, скорее всего, является отождествлением пульсара J1952, а не туманности DA 495.

Глава 5 посвящена исследованию остатка сверхновой (ОСН) G350.0–2.0. Результаты исследования опубликованы в работе [A4].

В разделе 5.1 дан обзор предыдущих исследований объекта. В радиодиапазоне ОСН представлен тремя областями оболочечной формы. (см. Рис. 5 слева). Возраст G350.0–2.0 был оценен в ~ 10 тыс. лет [27], а расстояние до него – в 3.7 кпк [28]. Точечный источник неизвестной природы 1RXS

J172653.4–382157 (далее J1726) был детектирован в поле ОСН обсерваторией *ROSAT*. Диффузное рентгеновское излучение заполняет северо-западную часть остатка. Сравнение изображений в радио- и рентгеновском диапазонах показало, что G350.0–2.0 является ОСН со смешанной морфологией, однако имевшиеся данные не позволяли провести детальный морфологический и спектральный анализ.

В разделе 5.2 приведены данные обсерватории *XMM-Newton*. Для исследования морфологии G350.0–2.0 были построены изображения в различных диапазонах энергии, точечные источники при этом были удалены. Изображение диффузного излучения в диапазоне 0.4–7 кэВ представлено на Рис. 5 справа. Признаков рентгеновского излучения от радиооболочек не обнаружено, однако имеется несколько ярких областей, помеченных на Рис. 5 цифрами 3–6. Области 3–5 ярче проявляют себя в диапазоне 0.7–1.2 кэВ, которая соответствует излучению линий L-серии железа. Спектр области 6 отличается от спектра остальной части остатка, его излучение более жесткое.

В разделе 5.3 приведен спектральный анализ остатка. Для описания спектра остатка была использована модель равновесной плазмы VAPES из пакета программ XSPEC⁵ с солнечным обилием элементов. Для областей 1–5 в модель была добавлена эмиссионная гауссовская линия, чтобы убрать «горб» в невязке на энергии ≈ 1.25 кэВ. Для областей 3–5 было обнаружено избыточное содержание железа, превышающее солнечное в ≈ 2.3 раза в области 3 и в ≈ 1.8 раз в областях 4–5. Спектр области 6 требует добавления в модель степенной компоненты (PL) с фотонным индексом $\Gamma \approx 1.8$. Температуры (≈ 0.8 кэВ) и колонковые плотности ($\approx 6.5 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$), полученные для различных областей остатка, согласуются друг с другом. Эмиссионную линию с энергией ≈ 1.25 кэВ можно интерпретировать как излучение линий L-серии железа, которые образуются при переходе с уровней с высокими значениями главного квантового числа [29].

В разделе 5.4.1 получен верхний предел на долю пульсирующего излучения точечного источника J1726, который составил 27% для периодов 0.15–4000 с в диапазоне 0.3–10 кэВ.

В разделе 5.4.2 представлен анализ спектра J1726. В предположении, что источник является нейтронной звездой или катаклизмической переменной, для описания спектра использованы модели PL, PL+BB, PL+NSA [22] и двухтемпературная модель оптически тонкой плазмы (2-T MEKAL из пакета XSPEC). Любая из двухкомпонентных моделей одинаково хорошо описывает данные. В случае модели PL+BB колонковая плотность $N_{\text{H}} = 5 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ фотонный индекс $\Gamma = 1.7$, температура $T \approx 140$ эВ, а радиус излучающей области (при расстоянии 3.7 кпк) $R \approx 5$ км. Полученные параметры типичны для излучения пульсаров. В то же время модель водородной атмосферы с массой НЗ $M_{\text{NS}} = 1.4M_{\odot}$ (M_{\odot} – масса Солнца), радиусом НЗ $R_{\text{NS}} = 13$ км и температурой $T = 73$ эВ также хорошо описывает тепловую компоненту. В случае модели 2-T MEKAL полученные температуры 0.8 и 8.6 кэВ типичны для катаклизмических переменных (см., например, [30]). Колонковая плотность при этом составила $\approx 2 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$.

В разделе 5.4.3 представлен анализ данных, полученных в ультрафиолетовом, оптическом и инфракрасном диапазонах. Слабый источник был обнаружен на изображении, полученном оптическим монитором *XMM-Newton*/OM

⁵<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

в фильтре U . Возможно, он является отождествлением J1726. Источник также был найден на архивных изображениях, полученных в ходе обзоров VISTA Variables in the Via Lactea Survey (VVV) и VST Photometric $H\alpha$ Survey of the Southern Galactic Plane and Bulge (VPHAS+)⁶, что позволило построить его оптический спектр.

В разделе 5.5.1 представлены результаты анализа G350.0–2.0. Спектры областей 1–2 характерны для излучения межзвездного вещества, нагретого ударной волной от взрыва сверхновой. Избыток железа в областях 3–5 может быть обусловлен наличием выброшенного при взрыве сверхновой вещества или разрушением пылевых частиц. Расстояние до ОСН, оцененное с помощью соотношения «межзвездное поглощение–расстояние» [8], составило ≈ 3 кпк, что согласуется с существующей оценкой [28]. Концентрация водорода в ОСН оценена как $\approx 0.05\text{--}0.06\text{ см}^{-3}$. Полная масса водорода и гелия в остатке составляет около $15M_{\odot}$. Радио и рентгеновская морфология G350.0–2.0 может объясняться эволюцией ОСН в среде со скачком плотности (см., например, [31]).

В разделе 5.5.2 приведены результаты анализа излучения области 6. Для описания ее спектра требуется дополнительная степенная компонента. Два точечных источника обнаружены в этой области. Излучение одного из них более жесткое, чем у другого. В совокупности это может представлять систему пульсар плюс пульсарная туманность, связанную с ОСН. На имеющихся радиоизображениях различить признаки этой системы, которая проецируется на внутреннюю радиоарку ОСН, не удастся из-за сравнительно низкого пространственного разрешения радио данных.

В разделе 5.5.3 приведены результаты анализа J1726. Его спектр может быть описан моделью PL+BB(NSA) с параметрами, типичными для пульсаров, излучающих за счет энергии вращения. Соответствующая колонковая плотность согласуется с полученной для ОСН, являясь аргументом в пользу того, что J1726 может быть НЗ. Пульсации найдены не были, но период предполагаемой НЗ может быть меньше, чем возможно измерить с помощью имеющихся данных ($\lesssim 150$ мс). Однако, на рентгеновском положении J1726 был найден оптический источник. Если в оптике и рентгене это один и тот же объект, то его оптический спектр и отношение его потоков в рентгеновском и оптическом диапазонах делают маловероятной интерпретацию J1726 как НЗ. Приемлемое описание рентгеновского спектра моделью 2-T MEKAL и избыток излучения в полосе $H\alpha$ приводит к выводу, что J1726 скорее всего, является катаклизмической переменной, которая проецируется на ОСН, находясь на более близком расстоянии.

В Заключение сформулированы основные результаты работы. Проведены детальные исследования двух гамма-пульсаров J1741–2054 и J0633+0632, радиотуманности DA 495 и ассоциированного с ней точечного источника, а также остатка сверхновой G350.0–2.0 и точечного источника в его поле на основе наблюдений в рентгеновском диапазоне. Получены следующие результаты:

1. Спектр рентгеновского излучения гамма-пульсара J1741–2054 хорошо описывается моделью степенной закон плюс чернотельное излучение и не может быть описан моделями водородных атмосфер нейтронных звезд. Чернотельная компонента имеет температуру ≈ 60 эВ. Если тепловое излучение идет со всей поверхности нейтронной звезды, то расстояние до

⁶<http://www.eso.org/sci/observing/PublicSurveys.html>

пульсара составляет ≈ 0.8 кпк, что подкрепляется независимыми оценками, выполненными с помощью соотношений «межзвездное поглощение–расстояние», и J1741–2054 оказывается горячее, чем предсказывает стандартный сценарий остывания нейтронных звезд.

2. Анализ архивных рентгеновских данных по гамма-пульсару J0633+0632 привел к возможному обнаружению линии поглощения с энергией ≈ 0.8 кэВ. Было подтверждено заключение, сделанное в работе [13], что спектр пульсара содержит степенную и тепловую компоненты. Последняя хорошо описывается как моделью чернотельного излучения, так и моделью замагниченных атмосфер нейтронных звезд. В случае модели чернотельного излучения температура поверхности составляет ≈ 110 эВ, в случае модели водородной атмосферы нейтронной звезды – ≈ 50 эВ. В обоих случаях тепловое излучение может идти со всей поверхности звезды. В первом случае J0633+0632 горячее, чем предсказывает стандартный сценарий остывания нейтронных звезд, а во втором – является одной из самых холодных нейтронных звезд среднего возраста с измеренными температурами. Выполнена независимая оценка расстояния до пульсара с использованием соотношения «межзвездное поглощение–расстояние»; расстояние составило 1–4 кпк. Местом рождения пульсара, возможно, является молодая область звездообразования туманность Розетка.
3. Проведен спектральный и временной анализ рентгеновского излучения радиотуманности DA 495 и ее центрального объекта J1952.2+2925, которые предположительно образуют систему пульсар плюс пульсарная туманность. J1952.2+2925 имеет тепловой спектр, который может быть описан моделью чернотельного излучения с температурой ≈ 200 эВ и радиусом излучающей области ≈ 0.6 км, а также моделями атмосфер нейтронных звезд с температурами 80–90 эВ. В последнем случае излучение идет со всей поверхности звезды. Полученные параметры согласуются с теми, что были получены другими исследователями при анализе данных обсерватории *Chandra*, но включение данных обсерватории *XMM-Newton* позволило существенно лучше их ограничить. Верхний предел на долю пульсирующего излучения J1952.2+2925 составил 40%. Независимые оценки расстояния до DA 495 с использованием соотношения «межзвездное поглощение–расстояние» показали, что оно может быть больше (до 5 кпк), чем предполагалось ранее. Если спектр системы DA 495 плюс J1952.2+2925 описывается моделью чернотельное излучение плюс степенной закон, то спектр туманности в рентгеновском диапазоне становится более плоским, чем в радиодиапазоне при частотах выше 2 ГГц, что указывает на еще один спектральный излом. Источник 3FGL J1951.6+2926, скорее всего, является отождествлением J1952.2+2925 в гамма-диапазоне.
4. С помощью обсерватории *XMM-Newton* проведено исследование Галактического остатка сверхновой G350.0–2.0. G350.0–2.0 относится к типу остатков со смешанной морфологией. Рентгеновский спектр большей части остатка может быть описан моделью равновесной плазмы с температурой около 0.8 кэВ. В излучении остатка доминирует межзвездный газ, нагретый ударной волной, образованной взрывом сверхновой. В остатке присутствует несколько ярких областей, в некоторых из которых обнаружен избыток железа. Расстояние до остатка, полученное с помощью соотношения «межзвездное поглощение–расстояние», составило ≈ 3 кпк. Спектр самого яркого точечного источника 1RXS J172653.4–382157 в поле остатка может быть описан типичной для пульсаров моделью, состоя-

щей из степенной и тепловой компонент. Величина колонковой плотности при этом совпадает с той, которая получена для остатка, то есть предполагаемый пульсар может быть связан с остатком. Однако обнаружение оптического источника с эмиссионной линией в полосе $H\alpha$, положение которого согласуется с рентгеновским положением 1RXS J172653.4–382157, делает маловероятной пульсарную интерпретацию. Скорее всего, 1RXS J172653.4–382157 является катаклизмической переменной. Его рентгеновский спектр хорошо описывается двухтемпературной моделью оптически тонкой плазмы, характерной для объектов этого класса. Верхний предел на долю пульсирующего излучения составил 27%.

Публикации по теме диссертации

- A1** Thermal properties of the middle-aged pulsar J1741–2054 / A. Karpova, A. Danilenko, Yu. Shibano et al. // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 789. — P. 97.
- A2** The γ -ray pulsar J0633+0632 in X-rays / A. Danilenko, P. Shternin, A. Karpova et al. // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. — 2015. — Vol. 32. — P. e038.
- A3** Constraining the parameters of the pulsar wind nebula DA 495 and its pulsar with *Chandra* and *XMM-Newton* / A. Karpova, D. Zyuzin, A. Danilenko et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 453. — P. 2241.
- A4** *XMM-Newton* studies of the supernova remnant G350.0–2.0 / A. Karpova, P. Shternin, D. Zyuzin et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Vol. 462. — P. 3845.

Список литературы

- [1] *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.
- [2] *Vink J.* Supernova remnants: the X-ray perspective // *Astronomy and Astrophysics Review*. — 2012. — Vol. 20. — P. 49.
- [3] 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.
- [4] Neutron Star Atmospheres / G. G. Pavlov, Y. A. Shibano, V. E. Zavlin, R. D. Meyer // *The Lives of the Neutron Stars* / Ed. by M. A. Alpar, U. Kiziloglu, J. van Paradijs. — 1995. — P. 71.
- [5] *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.
- [6] The Balmer-dominated Bow Shock and Wind Nebula Structure of γ -ray Pulsar PSR J1741-2054 / R. W. Romani, M. S. Shaw, F. Camilo et al. // *Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 724. — Pp. 908–914.
- [7] Comparison of two different extinction laws with HIPPARCOS observations / B. Chen, J. L. Vergely, B. Valette, G. Carraro // *Astronomy and Astrophysics*. — 1998. — Vol. 336. — Pp. 137–149.
- [8] *Drimmel R., Cabrera-Lavers A., López-Corredoira M.* A three-dimensional Galactic extinction model // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 409. — Pp. 205–215.
- [9] *Becker W.* X-Ray Emission from Pulsars and Neutron Stars // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by W. Becker. — Vol. 357 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2009. — P. 91.
- [10] *Yakovlev D. G., Pethick C. J.* Neutron Star Cooling // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Vol. 42. — Pp. 169–210.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] Precise γ -ray Timing and Radio Observations of 17 Fermi γ -ray Pulsars / P. S. Ray, M. Kerr, D. Parent et al. // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2011. — Vol. 194. — P. 17.
- [14] *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.
- [15] Absorption Features in the X-ray Spectrum of an Ordinary Radio Pulsar / O. Kargaltsev, M. Durant, Z. Misanovic, G. G. Pavlov // *Science*. — 2012. — Vol. 337. — Pp. 946–.
- [16] *Mori K., Ho W. C. G.* Modelling mid-Z element atmospheres for strongly magnetized neutron stars // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2007. — Vol. 377. — Pp. 905–919.
- [17] *Ogura K., Ishida K.* UVB Photometry of NGC2244 // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 1981. — Vol. 33. — P. 149.
- [18] *Landecker T. L., Caswell J. L.* DA 495 - an unusual supernova remnant with resemblances to the Crab nebula // *Astronomical Journal*. — 1983. — Vol. 88. — Pp. 1810–1815.
- [19] *Kothes R., Landecker T. L., Wolleben M.* H I Absorption of Polarized Emission: A New Technique for Determining Kinematic Distances to Galactic Supernova Remnants // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 607. — Pp. 855–864.
- [20] DA 495: An Aging Pulsar Wind Nebula / R. Kothes, T. L. Landecker, W. Reich et al. // *Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 687. — Pp. 516–531.
- [21] Chandra Confirmation of a Pulsar Wind Nebula in DA 495 / Z. Arzoumanian, S. Safi-Harb, T. L. Landecker et al. // *Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 687. — Pp. 505–515.
- [22] *Zavlin V. E., Pavlov G. G., Shibano Y. A.* Model neutron star atmospheres with low magnetic fields. I. Atmospheres in radiative equilibrium. // *Astronomy and Astrophysics*. — 1996. — Vol. 315. — Pp. 141–152.
- [23] Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog / F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello et al. // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2015. — Vol. 218. — P. 23.
- [24] Modelling the Galactic interstellar extinction distribution in three dimensions / D. J. Marshall, A. C. Robin, C. Reyl e et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2006. — Vol. 453. — Pp. 635–651.
- [25] *Zavlin V. E.* Theory of radiative transfer in neutron star atmospheres and its applications // *Neutron Stars and Pulsars* / Ed. by W. Becker. — 2009. — Vol. 357 of *Astrophysics and Space Science Library*. — Pp. 181–209.
- [26] *Pavlov G. G., Zavlin V. E.* Thermal Radiation from Isolated Neutron Stars // *Highly Energetic Physical Processes and Mechanisms for Emission from Astrophysical Plasmas* / Ed. by P. C. H. Martens, S. Tsuruta, M. A. Weber. — Vol. 195 of *IAU Symposium*. — 2000. — P. 103.
- [27] *Helfand D. J., Chanan G. A., Novick R.* Thermal X-ray emission from neutron stars // *Nature*. — 1980. — Vol. 283. — Pp. 337–343.
- [28] *Case G. L., Bhattacharya D.* A New Σ -D Relation and Its Application to the Galactic Supernova Remnant Distribution // *Astrophysical Journal*. — 1998. — Vol. 504. — Pp. 761–772.
- [29] Coronal Structure and Abundances of Capella from Simultaneous EUVE and ASCA Spectroscopy / N. S. Brickhouse, A. K. Dupree, R. J. Edgar et al. // *Astrophysical Journal*. — 2000. — Vol. 530. — Pp. 387–402.
- [30] A deep Chandra survey of the globular cluster 47 Tucanae: catalog of point sources / C. O. Heinke, J. E. Grindlay, P. D. Edmonds et al. // *Astrophysical Journal*. — 2005. — Vol. 625. — Pp. 796–824.
- [31] *Schneider E. M., de La Fuente E., Velázquez P. F.* Simulated X-ray emission from a single-explosion model for a supernova remnant 3C 400.2 // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. — 2006. — Vol. 371. — Pp. 369–374.