

Абрамкин Вадим Юрьевич

**ТЕПЛОВОЕ И НЕТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
ОДИНОЧНЫХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД В ОПТИЧЕСКОМ И
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНАХ**

Специальность 1.3.1 – физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в лаборатории прикладной математики и математической физики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Научный руководитель:

Шибанов Юрий Анатольевич

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Научный консультант:

Карпова Анна Викторовна,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Попов Сергей Борисович
доктор физико-математических наук,
профессор РАН
ведущий научный сотрудник ГАИШ МГУ

Жариков Сергей Викторович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Института астрономии Национального
Автономного Университета Мексики

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

Защита состоится 30 сентября 2026 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.04.25 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

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

Автореферат разослан 2026 г.

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

П. С. Штернин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Нейтронные звезды (НЗ) являются финальным этапом эволюции достаточно массивных звезд и представляют собой очень компактные объекты с радиусом порядка 12 км и массой примерно 1–2 массы Солнца. В недрах и окрестностях НЗ материя находится в экстремальных физических условиях, поэтому их можно использовать для проверки фундаментальных теорий в различных областях физики и астрофизики. Например, скорость остывания НЗ зависит от состава и состояния вещества в их недрах, поэтому изучение их тепловой эволюции является важным инструментом для исследований фундаментальных свойств материи.

Большинство известных на настоящий момент НЗ наблюдаются как радиопульсары. Постепенное замедление их вращения служит источником энергии нетеплового излучения, которое создается релятивистскими частицами в магнитосфере и наблюдается в диапазоне от радиоволн до гамма-излучения. Помимо этого, в более узком спектральном диапазоне – от оптического до мягкого рентгеновского – можно наблюдать тепловое излучение с поверхности НЗ. У молодых пульсаров оно скрыто мощным магнитосферным излучением, но выходит на первый план при достижении возраста около 100 тыс. лет с максимумом в дальнем ультрафиолетовом (УФ) или мягком рентгеновском диапазонах [1]. К возрасту более 1 млн лет, по мере охлаждения НЗ, тепловое излучение основной поверхности смещается в УФ- и оптическую области спектра [2].

Быстрое вращение НЗ с сильным магнитным полем также разгоняет пульсарный ветер. Взаимодействуя с внешней средой, он может формировать туманность пульсарного ветра (PWN). При движении НЗ сквозь внешнюю среду со сверхзвуковой скоростью впереди нее может формироваться головная ударная волна. Если окружающая межзвездная среда (МЗС) содержит достаточное количество нейтральных атомов, в этой области возникает излучение в оптическом диапазоне – преимущественно в линиях серии Бальмера. В результате образуется туманность типа головной ударной волны [3, 4, 5]. Некоторые из таких туманностей наблюдаются и в дальнем УФ-диапазоне, где природа их излучения остается не вполне ясной [6, 7]. Это делает актуальными наблюдения в дальнем УФ-диапазоне пульсаров, у которых туманности типа головной ударной волны обнаружены в оптическом диапазоне.

Еще одним интересным классом объектов является семейство близких изолированных радиотихих НЗ, обнаруженных по тепловому рентгеновскому излучению. У них был выявлен избыток потока и отличие формы спектра в оптическом и УФ-диапазонах по сравнению с рэлей-джинсовским хвостом их рентгеновского теплового спектра [8]. Для выяснения природы этих несоответствий необходимы дополнительные детальные наблюдения в оптическом, УФ- и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах.

Данная работа посвящена наблюдениям близких одиночных НЗ в опти-

ческом и УФ-диапазонах, в отдельных случаях дополненным наблюдениями в ближнем инфракрасном (ИК) и рентгеновском диапазонах. Нужно отметить, что за исключением трех молодых пульсаров большинство одиночных НЗ представляют собой экстремально слабые оптические объекты со звездными величинами $\gtrsim 25^m$. Поэтому их обнаружение является сложной задачей даже для крупнейших наземных телескопов. По этой причине в оптическом и УФ-диапазонах обнаружено значительно меньше НЗ, чем в радио-, рентгеновском и гамма-диапазонах, что делает наблюдения в этой спектральной области актуальной задачей.

Поскольку угловое разрешение космического телескопа им. Хаббла (HST) близко к дифракционному пределу, он обладает неоспоримыми преимуществами перед наземными инструментами при наблюдении столь слабых точечных источников. Кроме того, из-за атмосферного поглощения наблюдения в дальнем УФ-диапазоне с поверхности Земли в принципе невозможны. Нахождение на низкой околоземной орбите, и наличие на борту специализированных детекторов, таких как ACS/SBC делает HST наилучшим инструментом для таких исследований.

Цели и задачи работы. Целями данной работы являлись исследования четырех одиночных НЗ, перспективных для решения упомянутых выше актуальных задач, по данным астрономических наблюдений.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Исследование очень старого пульсара PSR J0108-1431 по данным наблюдений на HST в оптическом и УФ-диапазоне и архивным данным других обсерваторий. Отождествление пульсара в УФ-диапазоне, оценка параметров его спектра и установление ограничений на температуру поверхности.
2. Исследование старого пульсара PSR B0950+08 по наблюдениям на HST в оптическом диапазоне. Получение изображений пульсара с высоким угловым разрешением и разрешение его от фонового объекта в красной области спектра. Оценка параметров спектра в оптической и УФ-областях и температуры поверхности НЗ.
3. Определение природы излучения пульсара среднего возраста PSR J1741-2054 в дальнем УФ-диапазоне, исследование его многоволнового спектра в интервале от оптического до рентгеновского диапазона, а также оценка температуры поверхности.
4. Исследование туманности типа головной ударной волны пульсара PSR J1741-2054, впервые детектированной в дальнем УФ-диапазоне.

5. Исследование излучения изолированной НЗ RX J2143.0+0654 в оптическом, ближнем ИК- и дальнем УФ-диапазонах. Определение параметров ее спектра в указанных областях.

Научная новизна. Работа выполнена на основе оригинальных наблюдений изолированных НЗ на HST в оптическом, УФ- и ближнем ИК-диапазонах. Также для одного из объектов использовались оригинальные наблюдения в рентгеновском диапазоне на космической обсерватории XMM-Newton. Впервые получены следующие результаты:

1. Обнаружен кандидат на отождествление PSR J0108-1431, сделана оценка его плотности потока в дальнем УФ-диапазоне. Измерены верхние пределы на плотность потока PSR J0108-1431 в оптическом и ближнем УФ-диапазонах. Получена новая оценка температуры поверхности этой НЗ, которая существенно ниже существовавшей ранее.
2. Получены изображения PSR B0950+08 в двух оптических фильтрах, где пульсар хорошо разрешен от протяженного фонового объекта. Это позволило аккуратно измерить плотность потока в красной области оптического диапазона. С учетом новых данных получены параметры аппроксимации спектра этого объекта в оптической и УФ-областях: пологий наклон степенной компоненты $\alpha \sim -0.3$ и эффективная температура для удаленного наблюдателя в диапазоне $T_\infty = (6-12) \times 10^4$ К. Наиболее консервативное ограничение на температуру основной части поверхности НЗ составило $T_\infty < 1.7 \times 10^5$ К.
3. Пульсар PSR J1741-2054 и его туманность типа головной ударной волны впервые детектированы в дальнем УФ-диапазоне. Измерены плотности потока в этой области для пульсара и туманности. Получены оценки параметров спектра пульсара в оптическом и УФ-диапазонах. Также получены ограничения на параметры спектра туманности и ее светимость в дальнем УФ-диапазоне.
4. Изолированная НЗ RX J2143.0+0654 детектирована в ближнем УФ- и ближнем ИК-диапазонах. Путем аппроксимации УФ-ИК-спектра получены оценки температуры НЗ и наклона степенной компоненты спектра. Описан спектр этого объекта в диапазоне длин волн 0.14 – 1.7 мкм по результатам измерений средних плотностей потока в пяти фильтрах. Показано, что в УФ-части спектра этого объекта доминирует рэлей-джинсовский хвост теплового излучения, в то время как степенная компонента с наклоном $\alpha \approx -0.8$ преобладает в ближнем ИК-диапазоне.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена тем, что они базируются на данных астрономиче-

ских наблюдений, выполненных на крупнейших и наиболее современных телескопах. Применявшиеся для обработки методы и программное обеспечение являются общепринятыми в мировом научном сообществе, а также рекомендованными в руководствах к используемым инструментам. В тех случаях, когда это было возможно, результаты обработки архивных данных сопоставлялись с результатами независимых предшествующих исследований.

Научная и практическая значимость. Получены оценки температуры поверхности двух старых НЗ: PSR J0108-1431 и PSR B0950+08. Найденные значения существенно ниже предыдущих результатов, но все еще значительно превышают температуры, предсказываемые теорией пассивного остывания НЗ. Данный факт может свидетельствовать о наличии источников подогрева в их недрах, механизмы которого определяются фундаментальными свойствами сверхплотной материи.

Обнаруженная в дальнем УФ-диапазоне у пульсара J1741-2054 туманность типа головной ударной волны является одной из всего лишь трех известных объектов такого типа и обладает наибольшей яркостью среди них. Это делает ее наилучшим кандидатом для спектральных наблюдений, которые должны прояснить природу излучения подобных объектов в дальнем УФ-диапазоне.

Показано, что спектр радиотихой изолированной НЗ RX J2143.0+0654 в УФ-ИК-диапазоне значительно отличается от простого продолжения рентгеновского теплового спектра в сторону низких энергий и состоит из рэлей-джинсовского хвоста теплового излучения и нетепловой компоненты, которую можно описать степенным законом. Данный результат представляет собой наиболее детальное на сегодняшний день исследование изолированной радиотихой НЗ в УФ-ИК-диапазоне и может быть использован при дальнейшем изучении и моделировании этого и других объектов такого класса.

Положения, выносимые на защиту

1. Наблюдения HST на уровне значимости детектирования 3σ указывают на наличие излучения пульсара J0108-1431 в дальнем УФ-диапазоне. В этом случае средняя плотность потока в фильтре F140LP составляет $f_{\nu,140} = 9 \pm 3$ нЯн. Если поток в дальнем УФ-диапазоне обусловлен только тепловым излучением, температура поверхности НЗ лежит в интервале $T_{\infty} \approx (3-5) \times 10^4$ К. Консервативное ограничение на температуру поверхности составляет $T_{\infty} < 6 \times 10^4$ К.
2. Средние плотности потока пульсара B0950+08 в оптических фильтрах F475X и F775W по данным HST составляют 60 ± 6 нЯн и 53 ± 7 нЯн соответственно. Спектр этого объекта в оптической и УФ-областях удовлетворительно описывается суммой модели чернотельного излучения

с эффективной температурой $T_\infty = (6-12) \times 10^4$ К и степенной компоненты с пологим наклоном $\alpha = -0.3 \pm 0.3$. Наиболее консервативное ограничение на температуру поверхности НЗ составляет $T_\infty < 1.7 \times 10^5$ К.

3. Средние плотности потока излучения пульсара J1741-2054 в фильтрах F125LP и F140LP дальнего УФ-диапазона составляют $f_{\nu,125} = 113 \pm 11$ нЯн и $f_{\nu,140} = 148 \pm 30$ нЯн. Наблюдаемый поток от туманности типа головной ударной волны этого пульсара в диапазоне 1250–1850 Å составляет $\sim 10^{-13}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$. При этом описание спектра пульсара в оптическом и УФ-диапазонах требует либо необычно большого положительного значения наклона степенного закона $\alpha \sim 1$, либо добавления к нему тепловой компоненты с эффективной температурой ~ 50 эВ.
4. Наблюдения радиотихой изолированной НЗ RX J2143.0+0654 на HST в диапазоне длин волн 0.14–1.7 мкм показали, что УФ-часть спектра этого объекта согласуется с рэлей-джинсовским хвостом теплового спектра, в то время как степенная компонента с наклоном $\alpha \sim -0.8$ доминирует в оптическом и ближнем ИК-диапазонах.

Апробация работы. Описанные в диссертации результаты опубликованы в 4 научных статьях в рецензируемых журналах, были представлены на всероссийских конференциях «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, ИКИ РАН, 2023) и «Физика нейтронных звезд» (Санкт-Петербург, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2026), а также семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Личный вклад Соискатель выполнил обработку и анализ наблюдательных данных, аппроксимации спектров различными моделями и написал необходимые для этого программные коды. Также, совместно с соавторами, он произвел интерпретацию полученных результатов. В положениях, выносимых на защиту, вклад автора диссертации является основным и определяющим.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 120 страниц с 27 рисунками и 19 таблицами. Список литературы включает в себя 181 наименование на 13 страницах.

Содержание работы

Первая глава посвящена исследованию пульсара PSR J0108-1431 (далее J0108) по результатам наблюдений на HST и архивным данным VLT и XMM-Newton. Он имеет период $P = 0.808$ с и производную периода $\dot{P} = 6.51 \times 10^{-17}$

с s^{-1} и является одним из наиболее старых классических изолированных радиопульсаров, с характеристическим возрастом 196 млн лет. Расстояние до J0108 составляет 210^{+90}_{-50} пк и получено из измерений радиопараллакса [9]. При первом наблюдении J0108 на VLT в 2000 г. был обнаружен предполагаемый кандидат на отождествление [10]. Потoki в фильтрах U и B соответствовали рэлей-джинсовскому закону с температурой $\sim 2.3 \times 10^5$ К для НЗ радиусом 13 км, находящейся на расстоянии 210 пк [11, 12].

Для подтверждения оптического отождествления J0108, оценки его спектра и установки ограничений на температуру поверхности НЗ были проведены новые наблюдения на HST в оптическом и УФ-диапазонах, которые описаны в разделе 1.2. Объект наблюдался с использованием детектора WFC3/UVIS в трех широких фильтрах: F438W, F336W и F225W, в то время как фильтр F140LP с очень широкой полосой пропускания был использован вместе с детектором ACS/SBC.

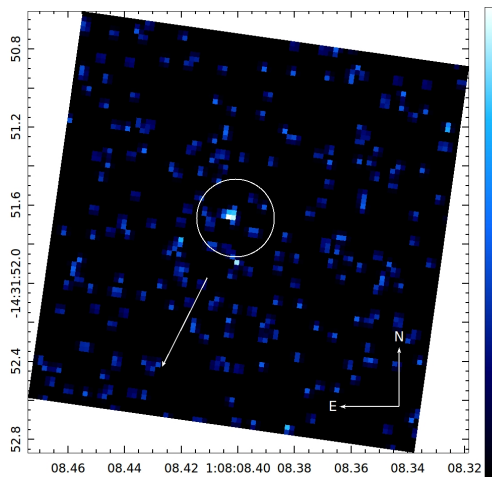


Рисунок 1: Участок размером $2'' \times 2''$ изображения поля пульсара, полученного в фильтре F140LP на детекторе ACS/SBC. Цветовая шкала показывает интенсивность на изображении в отсчетах на пиксель. Окружность радиусом $0.2''$ и стрелка показывают 1σ неопределенность положения пульсара и направление его собственного движения. Слабый, похожий на точечный, объект хорошо виден внутри окружности.

На изображении в фильтре F140LP был обнаружен слабый точечный источник с координатами, согласующимися с ожидаемыми координатами радиопульсара на эпоху наблюдений (Рис. 1). В результате фотометрии этого источника, описанной в разделе 1.4.1, была получена средняя плотность потока $f_\nu = 9 \pm 3$ нЯн в фильтре F140LP. Поскольку кандидат на отождествление детектирован лишь на уровне 3σ , нельзя исключить, что повышение скорости счета около положения пульсара вызвано некоторой флуктуацией фона. В этом случае можно оценить 3σ верхний предел, который составил $f_\nu^{\text{ub}} = 14$ нЯн. Ввиду отсутствия кандидата на отождествление на изображениях, сделанных детектором UVIS, были вычислены верхние пределы плотности потока (раздел 1.4.2).

Для проверки согласованности наблюдений на HST и VLT архивные данные VLT в фильтрах U , B и V были обработаны заново. Более точная астрометрия поддерживает предположение о том, что объект, обнаруженный VLT на уровне 2σ в фильтрах U и B , является кандидатом на отождествление. Для прояснения природы предполагаемого отождествления пульсара на VLT были вычислены верхние пределы для наблюдений HST в точке, где пульсар (и источник, обнаруженный VLT) располагался на эпоху наблюдений VLT.

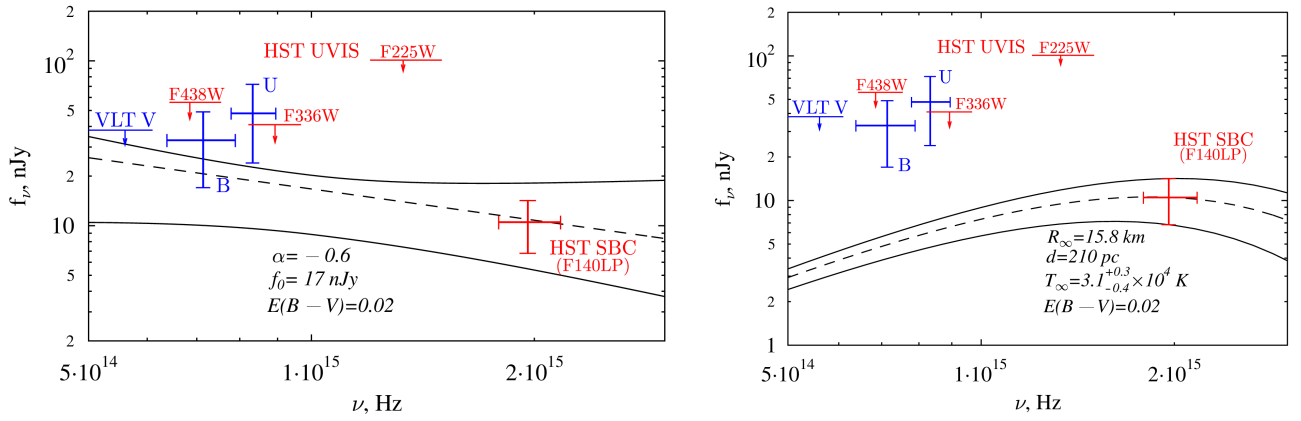


Рисунок 2: Слева: исправленный за поглощение спектр источника в оптическом и УФ-диапазонах для $E(B - V) = 0.02$. Красные и синие точки с планками ошибок и направленные вниз стрелки обозначают средние плотности потоков и 3σ верхние пределы, измеренные по данным HST и VLT соответственно, в фильтрах, обозначенных на рисунке. Пунктирная и сплошные линии обозначают наилучшую аппроксимацию данных степенной моделью и ее 90%-й доверительный интервал. Справа: спектр в оптическом и УФ-диапазонах, исправленный за межзвездное поглощение, в предположении, что поток в фильтре F140LP полностью обусловлен тепловым излучением.

Исходя из полученных результатов, нельзя исключить возможность того, что в обоих наблюдениях – VLT (фильтры U и B) и HST (фильтр F140LP) – действительно был обнаружен пульсар.

Многоволновой спектр J0108 описывается в разделе 1.5.2. В предположении, что оба детектирования – в оптическом (B и U) и УФ (F140LP) диапазонах – являются реальными, можно попытаться описать средние плотности потока в этих фильтрах, исправленные за межзвездное поглощение, степенной моделью (см. левую панель Рис. 2). При фиксированном значении $E(B - V) = 0.02$ наклон спектра составил $\alpha = -0.6^{+0.8}_{-0.5}$. Полученные ограничения на спектральный индекс нетеплового излучения пульсара совместимы с типичным диапазоном $-0.7 \lesssim \alpha \lesssim 0.2$ для других пульсаров, наблюдавшихся в оптическом и УФ-диапазонах [12, 13]. С учетом неопределенности расстояния и параметров модели, эффективность преобразования энергии вращения в излучение в оптическом и УФ-диапазонах может лежать в диапазоне $0.7 \lesssim \eta_{\text{opt-UV}}/10^{-4} \lesssim 5.9$. Даже для наименьшего значения из этого интервала J0108 остается самым эффективным источником нетеплового излучения среди пульсаров, детектированных в оптическом или УФ-диапазонах.

С другой стороны, УФ-излучение может иметь тепловую природу. Если детектирование в фильтрах U и B не связано с пульсаром, то поток в фильтре F140LP может быть обусловлен тепловым излучением относительно холодной основной части поверхности НЗ. В предположении, что спектр излучения поверхности НЗ является чернотельным, ее яркостная температура может быть оценена из наблюдаемой плотности потока.

Для наиболее вероятных значений расстояния $d = 210$ пк, избытка цвета $E(B - V) = 0.02$ и радиуса для удаленного наблюдателя $R_\infty = 16$ км, измеренная плотность потока в дальнем УФ-диапазоне соответствует температуре

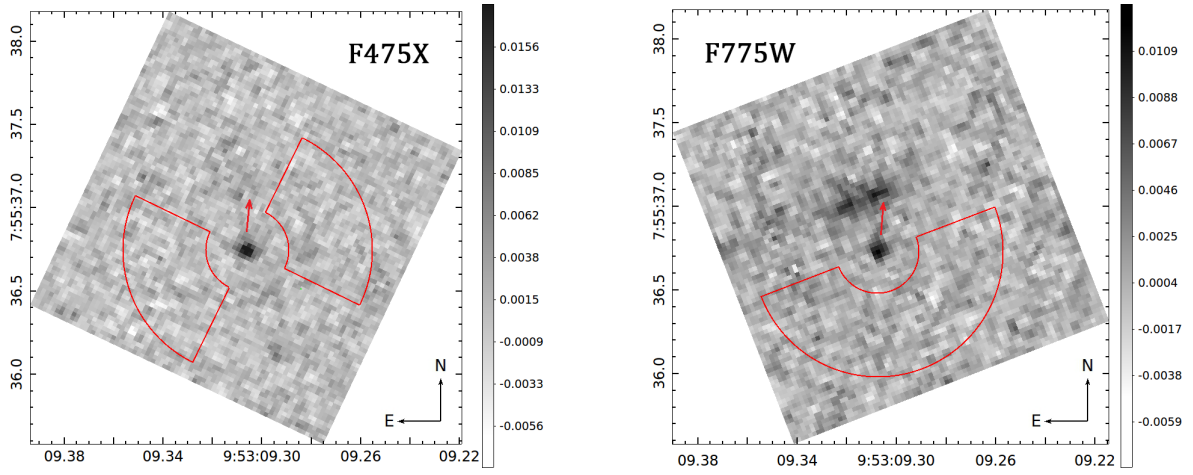


Рисунок 3: Изображения окрестности B0950 размером $2'' \times 2''$. Пульсар – точечный объект в центре. Стрелкой обозначено направление его собственного движения. Красными контурами обозначены области, выбранные для измерения фона.

для удаленного наблюдателя $T_\infty = 3.1_{-0.4}^{+0.3} \times 10^4$ К. Оптическая и УФ-части этого теплового спектра показаны на правой панели Рис. 2. Если предположить, что детектирование в фильтре F140LP не было реальным, тогда 3σ верхний предел на плотность потока в дальнем УФ-диапазоне задает верхний предел на температуру – например, $T_\infty < 5.9 \times 10^4$ К для $d = 300$ пк, $R_\infty = 13$ км и $E(B - V) = 0.03$. Подтверждение детектирования теплового излучения J0108 могло бы означать, что это самая холодная НЗ, тепловое излучение которой было обнаружено.

Вторая глава посвящена оптическим наблюдениям старого пульсара PSR B0950+08 (далее B0950) на HST. Он имеет период $P = 253$ мс, характеристический возраст $\tau_{\text{sd}} = 18$ млн лет и находится на расстоянии $d = 262 \pm 5$ пк [14]. Ранее при УФ-наблюдениях B0950 на HST [15] было обнаружено, что плотность потока существенно превосходит продолжение оптического степенного спектра в сторону этой области. Это позволило авторам связать избыток потока с тепловым излучением [15]. Аппроксимация данных двухкомпонентной моделью (степенная и тепловая чернотельная компоненты) дала спектральный индекс $\alpha \sim -1.2$ и эффективную температуру $(1-3) \times 10^5$ К. Однако эти выводы основывались на оптических данных с большими неточностями, вызванными влиянием красного протяженного фонового объекта, расположенного близко к пульсару.

Для измерения оптического спектра, свободного от влияния фонового объекта, были проведены новые наблюдения B0950 на HST в двух оптических фильтрах, которые описаны в разделе 2.2. Наблюдения проводились в экстремально широком голубом фильтре F475X на детекторе WFC3/UVIS и фильтре F775W (аналог SDSS i) с детектором ACS/WFC.

В разделе 2.3.1 описана астрометрическая привязка изображений. На Рис. 3 показана окрестность пульсара на изображениях UVIS и WFC. Фотометрия описана в разделе 2.3.2. Средние плотности потока составили $f_\nu = 60 \pm 6$ нЯн в фильтре F475X и $f_\nu = 53 \pm 7$ нЯн в фильтре F775W. Результаты

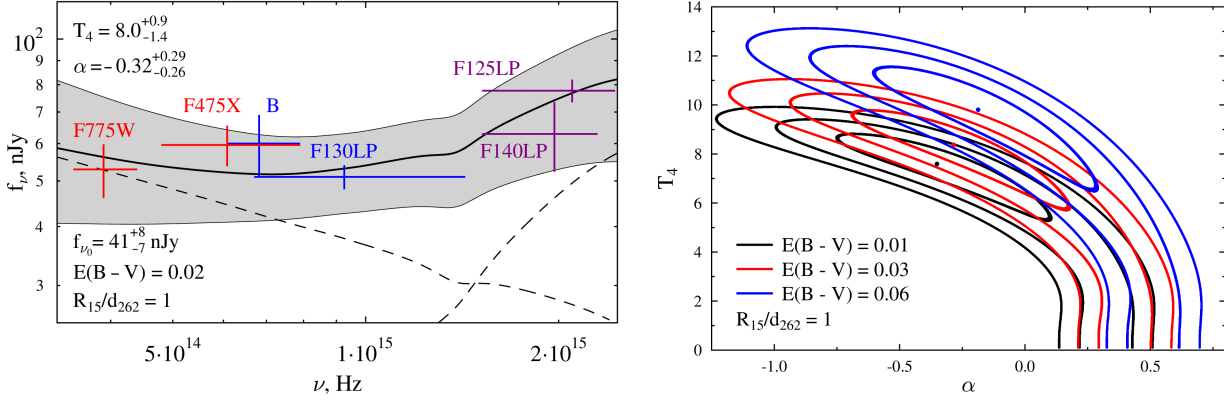


Рисунок 4: Слева: Наблюдаемый спектр пульсара в оптическом и УФ-диапазонах. Толстая непрерывная линия показывает наилучшую аппроксимацию данных HST и Subaru (B) моделью PL+BB при фиксированных значениях $E(B - V) = 0.02$ и $R_{15}/d_{262} = 1$. Прерывистые линии показывают компоненты модели, а закрашенная область – неопределенности на уровне 68%. Справа: Доверительные контуры в плоскости α – T_∞ на уровнях 68.3%, 95.5% и 99.7% для $R_{15}/d_{262} = 1$ и значений избытка цвета, указанных на рисунке.

фотометрии в дальнем УФ-диапазоне из работы [15] были скорректированы с учетом новой калибровки детектора SBC [16].

Спектр в оптическом и УФ-диапазонах описывается в разделе 2.3.3 с использованием модели, состоящей из суммы степенного закона и спектра абсолютно черного тела, с учетом межзвездного поглощения (модель PL+BB):

$$f_\nu^{\text{mod}} = \left[f_{\nu_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^\alpha + \frac{R_\infty^2}{d^2} \pi B_\nu(T_\infty) \right] \times 10^{-0.4A_\nu}, \quad (1)$$

где $\nu_0 = 10^{15}$ Гц – опорная частота для степенной компоненты модели, $d = 262d_{262}$ пк – расстояние, T_∞ и R_∞ – температура и радиус НЗ, измеряемые удаленным наблюдателем, и B_ν – функция Планка. Далее будут использоваться обозначения $R_\infty = 15R_{15}$ км и $T_\infty = 10^4 T_4$ К. Были использованы все доступные наблюдения HST и наблюдение Subaru в фильтре B , поскольку на него не повлиял красный фоновый объект к северу от пульсара.

Пример аппроксимации для наиболее правдоподобных значений $E(B - V) = 0.02$ и $R_{15}/d_{262} = 1$ показан на левой панели Рис. 4, где также указаны наилучшие параметры. Для непосредственного сравнения с результатами работы [15] также была проведена подгонка модели с $R_{15}/d_{262} = 0.8$. Полученные параметры достаточно сильно отличаются: $T_4 = 10.1^{+1.5}_{-2.0}$, $\alpha = -0.28^{+0.28}_{-0.26}$ против $T_4 = 16.8 \pm 2.6$, $\alpha = -1.17 \pm 0.43$ в работе [15]. Меньшая температура и более пологий наклон степенной компоненты обусловлены снижением плотности потока: в дальнем УФ – за счет уточненной калибровки SBC, а в красной оптической области – благодаря исключению влияния близкого фонового источника.

Нижняя граница температуры стремится к нулю при повышении доверительного уровня. Например, для $E(B - V) = 0.02$, $R_{15}/d_{262} = 1$ мы получаем $T_4 = 8.0^{+1.4}_{-2.8}$ на уровне 90%. Эта зависимость проиллюстрирована на пра-

вой панели Рис. 4. Наиболее консервативная верхняя граница температуры для $R_{15}/d_{262} = 0.8$ и $E(B - V) = 0.06$ составляет $T_4 < 17$ на уровне 99%. Полученные на доверительном уровне 90% температуры намного выше, чем предсказанные моделями пассивного остывания НЗ для возраста $\gtrsim 10$ млн лет.

В **третьей главе** представлены результаты обнаружения пульсара среднего возраста PSR J1741–2054 (далее J1741) и его туманности типа головной ударной волны в дальнем УФ-диапазоне с помощью HST. Изначально этот объект был детектирован как источник гамма-излучения [17], а затем обнаружен и в радиодиапазоне [18]. Период $P = 413.7$ мс и производная периода $\dot{P} = 1.698 \times 10^{-14}$ с с⁻¹ соответствуют характеристическому возрасту $\tau = 400$ тыс. лет. Мера дисперсии соответствует расстоянию $d = 270$ пк в модели распределения электронов в Галактике Яо и др. [19] или $d = 380$ пк в модели Кордеса и Лацио [20]. Рентгеновские свойства пульсара были изучены с помощью обсерваторий Chandra [21, 22, 4] и XMM-Newton [23]. Интегрированный по фазе вращения рентгеновский спектр J1741 можно описать как комбинацию тепловой и нетепловой компонент. Тепловая компонента характеризуется температурой черного тела $kT \simeq 60$ эВ и радиусом эквивалентной излучающей сферы $R \simeq 3.5d_{270}$ км. На рентгеновских изображениях была обнаружена PWN, компактная часть которой окружена подковообразной Н α -туманностью [4]. Наблюдения на VLT в фильтрах b_{high} и v_{high} позволили обнаружить вероятного кандидата на отождествление пульсара [24].

Наши наблюдения J1741 на HST в дальнем УФ-диапазоне проводились с использованием детектора ACS/SBC и фильтров F125LP и F140LP. На изображениях (Рис. 5) видны протяженная структура и два точечных источника. Протяженная структура является УФ-аналогом туманности, видимой в линии Н α . Изображения не охватывают туманность полностью, так как были центрированы на устаревших координатах J1741. Тусклый точечный источник, видимый на Рис. 5 и расположенный примерно в $1.0''$ – $1.2''$ за апексом ударной волны, является кандидатом на отождествление пульсара.

В разделе 3.3.2 описана фотометрия пульсара и туманности. Средние плотности потока пульсара в фильтрах F125LP и F140LP составили 113 ± 11 нЯн и 148 ± 30 нЯн соответственно. Измерения потока туманности проводились в шести пространственных областях (показаны на Рис. 5), выделенных с учетом морфологии объекта. Наиболее яркая из них – область «Арех» – представляет собой компактный регион вблизи вершины головной ударной волны. Для остальных областей получены оценки интегральных потоков и скоростей счета, характеризующие пространственное распределение излучения по эллипсоидальной структуре туманности

В разделе 3.4.1 описывается аппроксимация спектра J1741 в оптическом и УФ-диапазонах. Сначала использовалась простая степенная модель с учетом поглощения. Для расстояния 270 пк современная карта межзвездного поглощения Эденхофера и др. [25] дает $E(B - V) = 0.22$. Также были рассмотре-

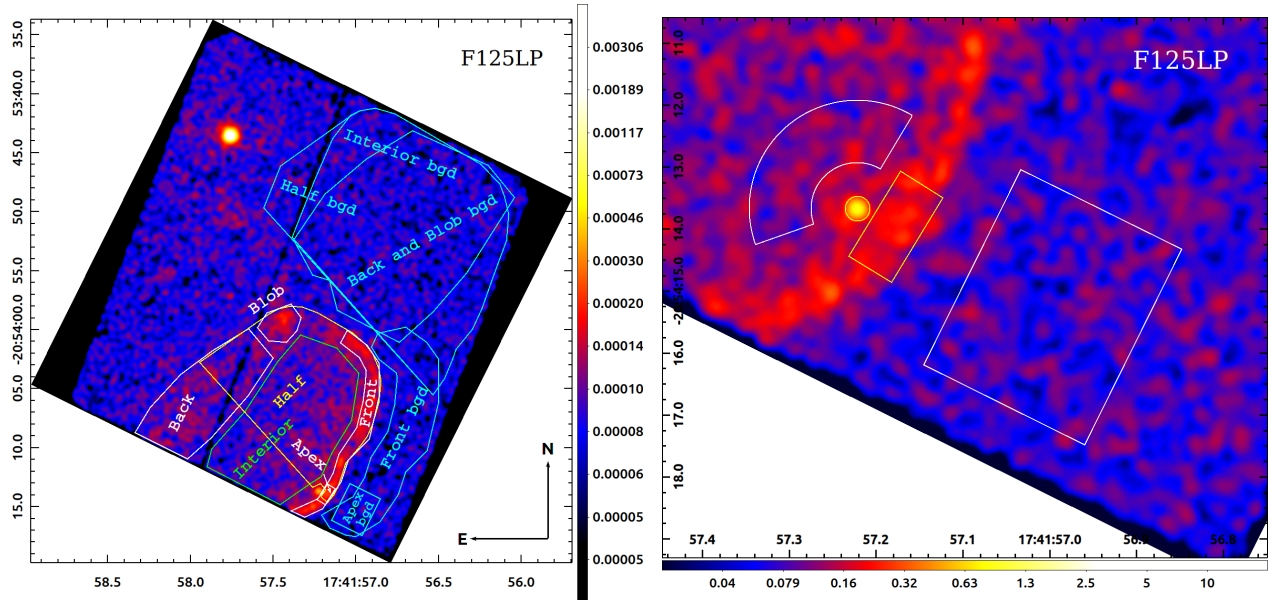


Рисунок 5: Слева: изображение в фильтре F125LP полного поля зрения ACS/SBC. Шесть областей внутри желтого, зеленого и белых контуров были использованы для измерений потоков от отдельных частей туманности. Фон для этих измерений извлекался из областей внутри соответствующих бирюзовых контуров. Справа: изображение непосредственных окрестностей пульсара. Желтая прямоугольная область использовались для измерения поверхностной яркости апекса туманности. Желтый круг обозначает апертуру, использованную для измерения потока кандидата на отождествление пульсара. Белый сегмент кольца и белый прямоугольник обозначают области фона для кандидата на отождествление пульсара и апекса туманности соответственно.

ны карты из работ [26, 27, 28], которые показали схожие значения. Поэтому $E(B - V) \simeq 0.22$ было принято в качестве наиболее вероятного значения избытка цвета. Для модели степенного закона с поглощением мы получили $\alpha = +1.0 \pm 0.2$. Наилучший спектр и остальные его параметры показаны синим цветом на левой панели Рис. 6. Кроме того, что результат такой аппроксимации формально неприемлем, столь большие положительные значения наклона спектра α не наблюдались в оптическом и УФ-диапазонах у других пульсаров. Следовательно, можно предположить, что поток от пульсара в дальнем УФ, по крайней мере частично, обусловлен тепловым излучением. Поэтому мы выполнили аппроксимацию плотностей потока в оптическом и УФ-диапазонах с использованием модели PL+BB. Основные параметры оказались следующими: $kT = 48 \pm 4$ эВ и $\alpha = -3.3 \pm 2.2$ при фиксированных значениях $E(B - V) = 0.22$ и $R_{15}/d_{270} = 1$. Из правой панели Рис. 6 видно, что результаты подгонки почти не зависят от значения наклона спектра при $\alpha \lesssim -2$ из-за малого количества точек данных, поэтому можно попытаться выполнить подгонку модели BB+PL с фиксированным значением наклона спектра $\alpha = -2$. Наилучшие параметры такой аппроксимации представлены на левой панели Рис. 6 черным цветом.

В разделе 3.4.2 описана аппроксимация данных в оптическом и УФ-диапазонах совместно с архивными рентгеновскими спектрами, полученными с помощью обсерватории Chandra. Нетепловое излучение описывалось степен-

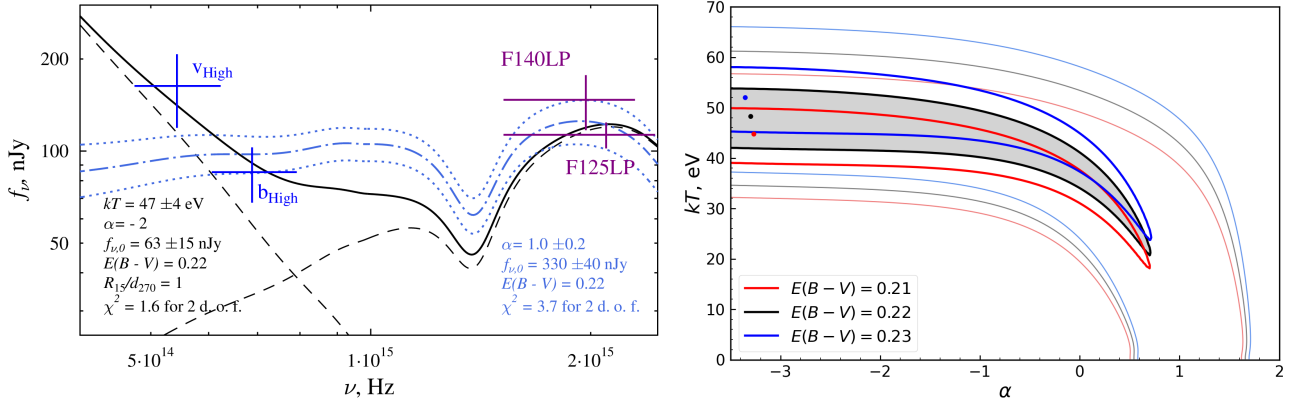


Рисунок 6: Слева: аппроксимации спектра J1741 в оптическом и УФ-диапазонах. Штрих-пунктирная и пунктирные синие линии показывают наилучшую степенную модель и ее 68% неопределенности. Сплошная и прерывистые линии показывают пример PL+BB модели с фиксированными значениями $\alpha = -2$, $R_{15}/d_{270} = 1$ при $E(B - V) = 0.22$ и ее компоненты. Справа: доверительные контуры на уровнях 68.3% и 99.7% в плоскости α – kT при $R_{15}/d_{270} = 1$.

ной моделью с изломом, к ней были добавлены одна или две тепловые чернотельные компоненты.

Раздел 3.4.3 посвящен оценкам потока и поверхностной яркости для различных областей туманности и ограничениям на форму ее спектра на основе отношения скоростей счета в двух фильтрах дальнего УФ-диапазона. В предположении, что спектр можно описать степенной моделью, поправленный за поглощение поток в диапазоне 1250–1850 Å для всей туманности был оценен как $F_{\text{FUV}} \approx 5.4 \times 10^{-13}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ при $E(B - V) = 0.22$, а нижняя граница наблюдаемого потока составила 5.8×10^{-14} эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$.

В разделе 3.5.1 обсуждаются обнаруженные свойства J1741 и сравниваются с характеристиками трех хорошо исследованных близких пульсаров среднего возраста – V0656+14, V1055-52 и Геминги.

В разделе 3.5.2 рассматриваются возможные механизмы излучения туманности J1741 и аналогичных объектов в дальнем УФ-диапазоне. Показано, что поправленные за поглощение поток и светимость в дальнем УФ-диапазоне превышают аналогичные величины для линии H α примерно в 8–14 раз. Также приводится сравнение этой туманности с двумя ранее известными туманностями типа головной ударной волны у миллисекундных пульсаров J0437-4715 и J2124-3358. Продемонстрировано, что туманность J1741 имеет наибольшую поверхностную яркость среди объектов этого класса.

Четвертая глава посвящена исследованию изолированной НЗ RX J2143.0+0654 (далее J2143), относящейся к так называемой «Великолепной Семерке» – группе близких радиотихих изолированных НЗ. Эти молодые ($\lesssim 1$ млн лет), медленно вращающиеся ($P = 3$ –12 с) НЗ демонстрируют преимущественно тепловые рентгеновские спектры с температурами $kT \sim 50$ –100 эВ. Далее они будут называться XTINS (X-ray thermal isolated neutron stars).

J2143 была обнаружена с помощью ROSAT [29]. Наблюдения на XMM-

Newton позволили авторам работы [30] обнаружить пульсации с периодом $P = 9.437$ с и долей пульсирующего излучения $3.6 \pm 0.6\%$. Описывая спектр моделью излучения черного тела с добавлением гауссовой линии поглощения, они оценили эффективную температуру $kT = 104.0 \pm 0.4$ эВ.

На основе рентгеновских данных ожидалось, что спектры XTINS в оптическом и УФ-диапазонах представляют собой рэлей-джинсовские хвосты теплового излучения. Однако наблюдения пяти XTINS на HST в интервалах $1380\text{--}1570 \text{ \AA}$ и $4000\text{--}5600 \text{ \AA}$ [8] выявили более сложную картину: плотности потоков превышают экстраполяцию рентгеновского чернотельного спектра, а наклоны степенных спектров для четырех объектов несовместимы с законом Рэлея-Джинса. Особенно сильное расхождение было обнаружено у J2143, поэтому он был выбран для детального исследования спектра в широком интервале от УФ до ИК.

Для решения этой задачи были выполнены новые наблюдения с помощью HST, охватывающие диапазон $0.14\text{--}1.7$ мкм с использованием пяти широкополосных фильтров, которые описаны в разделе 4.2. Были проведены повторные наблюдения в дальнем УФ- и оптическом диапазонах с использованием фильтров F140LP и F475W соответственно. Кроме того, объект наблюдался в очень широком фильтре ближнего УФ-диапазона F300X, а также в двух фильтрах ближнего ИК-диапазона – F110W и F160W. Для изучения связи спектра в УФ-ИК-диапазоне с рентгеновским были также выполнены одновременные наблюдения на XMM-Newton.

В разделе 4.3.1 обсуждается фотометрия и спектр объекта в диапазоне от ближнего ИК до дальнего УФ. Прямые измерения расстояния до J2143 отсутствуют, однако величину экстинкции (а значит, и расстояние) можно ограничить значением $A_V \approx 0.07\text{--}0.18$ исходя из колонковой плотности водорода $N_H \approx (2\text{--}5) \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, оцененной по рентгеновскому спектру. Согласно трехмерной карте Эденхофера и др. [25], указанному диапазону поглощения соответствует узкий интервал расстояний $d \approx 240\text{--}270$ пк. В связи с этим дальнейший анализ параметров объекта проводился относительно опорных значений $A_V = 0.12$ и $d = 260$ пк.

Как видно из данных, представленных на левой панели Рис. 7, спектр J2143 в рассматриваемом диапазоне качественно отличается от простого степенного закона или теплового спектра. Тем не менее, его можно описать как сумму степенного закона и рэлей-джинсовского хвоста тепловой компоненты на низких и высоких частотах соответственно. Степенная спектральная компонента падает с ростом частоты, например, $\alpha = -0.80 \pm 0.15$ при $A_V = 0.12$. Как видно из правой панели Рис. 7, наклон степенной компоненты слегка увеличивается с ростом экстинкции, однако в разумном интервале $0.05 \lesssim A_V \lesssim 0.2$ изменение наилучшего значения α меньше его статистической неопределенности на уровне 1σ . Тепловая компонента доминирует в УФ-диапазоне при длинах волн $\lambda \lesssim 3000 \text{ \AA}$. С учетом того, что яркостная температура в режиме Рэлея-Джинса пропорциональна $(d/R)^2$, показанная

на левой панели Рис. 7 аппроксимация соответствует $kT_{\text{uv}} \sim 22 (d_{260}/R_{10})^2$ эВ, где $R_{10} = R_{\text{uv}}/10$ км, $d_{260} = d/260$ пк.

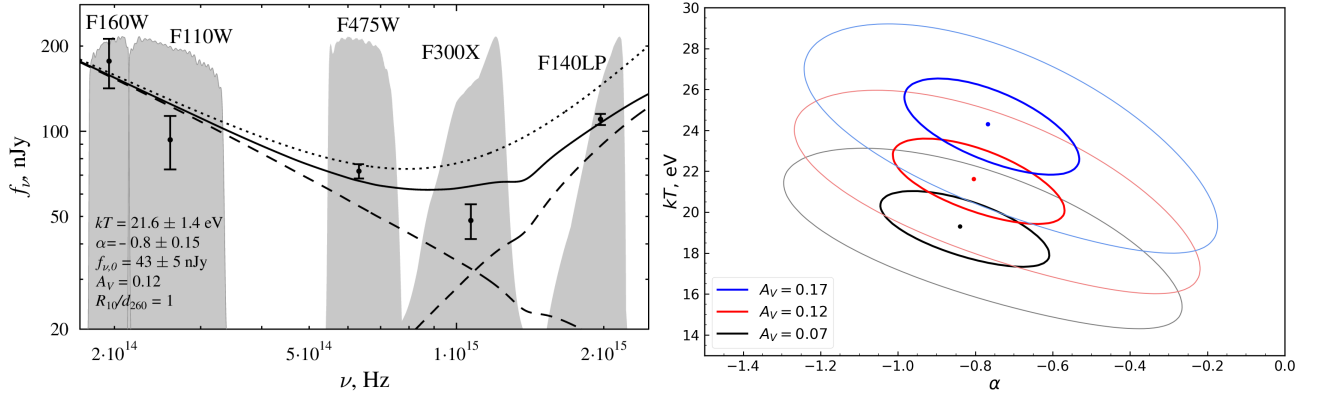


Рисунок 7: Слева: Спектр J2143 в УФ-ИК-диапазоне. Точки данных с планками погрешностей показывают измеренные средние плотности потока со статистическими ошибками на уровне 1σ . Заштрихованные области показывают условно масштабированные функции пропускания системы с фильтрами. Сплошная линия демонстрирует наилучшую аппроксимацию для модели PL+BB при $A_V = 0.12$ и $R_{10}/d_{260} = 1$. Штриховые линии показывают степенную и тепловую компоненты, а пунктирная – наилучшую аппроксимацию спектра, поправленную на поглощение. Справа: Доверительные контуры для параметров аппроксимации УФ-ИК-спектра моделью PL+BB на уровнях 68.3% и 99.7% в плоскости α - kT для $R_{10}/d_{260} = 1$ и при значениях экстинкции, указанных на рисунке.

Раздел 4.3.2 посвящен временному и спектральному анализу данных XMM-Newton, который проводился в диапазоне 0.2–2 кэВ. Для сравнения с предыдущими результатами использовались одно- или двухкомпонентные модели чернотельного излучения. Однокомпонентная модель без спектральных особенностей (модель 1BB0G) имеет значительные расхождения с данными вблизи 0.7 кэВ. При включении одной гауссовой линии поглощения (1BB1G) мы получаем лучшую аппроксимацию с примерно теми же температурой $kT \approx 106$ эВ и радиусом $R \approx 1.5d_{260}$ км. Линия поглощения центрирована на энергии $E_c = 0.74$ кэВ. Добавление второй линии, центрированной на энергии около ~ 0.4 кэВ, (1BB2G), предложенное в работе [31], немного улучшает качество аппроксимации. Однако оно не оказывает существенного влияния на свойства тепловой компоненты и линии на энергии 0.74 кэВ. Вслед за авторами работы [32], предположившими наличие второй, более холодной компоненты, мы также рассмотрели модели с двумя тепловыми компонентами и линиями поглощения (2BB1G и 2BB2G).

Дополнительные ограничения на температуру поверхности и тепловое излучение НЗ могут быть получены из совместной аппроксимации спектров в рентгеновском и УФ-ИК-диапазонах, чему посвящен раздел 4.3.3. Предполагая, что одни и те же две тепловые компоненты могут вносить вклад в поток как в рентгеновском, так и в УФ-ИК-диапазонах, мы добавили степенную компоненту в УФ-ИК-диапазоне к моделям 2BB1G и 2BB2G и выполнили подгонку объединенных моделей в диапазоне от 0.5 эВ до 2 кэВ. Параметры горячей чернотельной компоненты (BB_{hot}) и линий поглощения в совместных

подгонках рентгеновских и УФ-ИК-спектров близки к результатам, полученным для моделей 1BBnG по одним рентгеновским данным, и составляют: $kT_{\text{hot}} \approx 105\text{--}106$ эВ, $R_{\text{hot}}/d_{260} \approx 1.5\text{--}1.6$ км, $E_{c1} \approx 0.73\text{--}0.75$ кэВ, $E_{c2} \approx 0.39\text{--}0.41$ кэВ и т. д. При этом радиус для холодной компоненты – $R_{\text{cold}}/d_{260} \approx 5.5\text{--}7$ км – оказывается значительно меньше, а ее температура – $kT_{\text{cold}} \approx 30\text{--}50$ эВ – существенно выше по сравнению с соответствующими параметрами моделей 2BBnG, полученными только по рентгеновскому спектру. Из Рис. 8 видно, что в дальнем УФ-диапазоне доминирует компонента BB_{cold} . Однако BB_{hot} и степенная компонента также вносят вклад, каждая на уровне $\sim 10\%$. Наклон степенной компоненты, которая доминирует в оптическом и ИК-диапазонах ($-0.9 \lesssim \alpha \lesssim -0.6$) очень близок к наклону, полученному при аппроксимации данных в УФ-ИК-диапазоне отдельно.

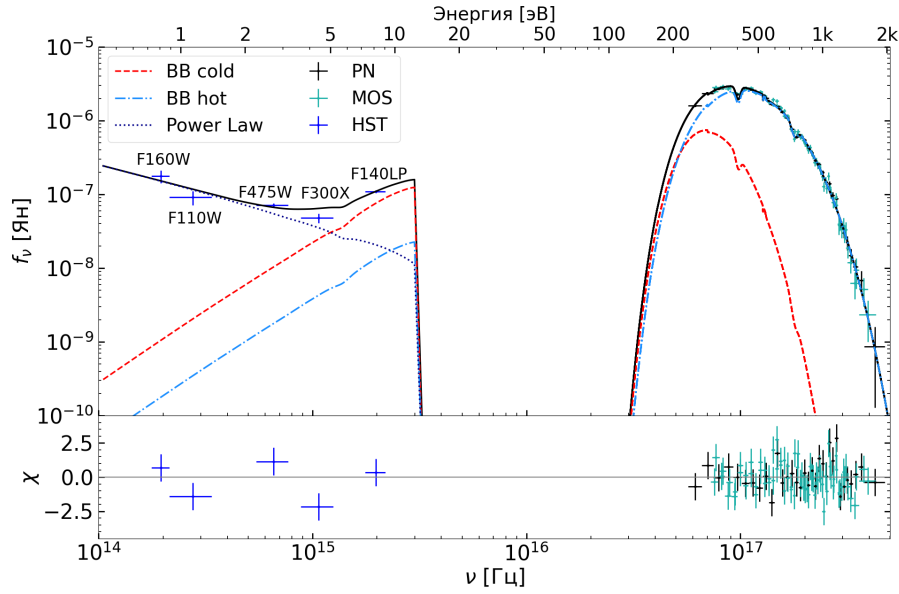


Рисунок 8: Восстановленный спектр J2143, полученный с помощью XMM-Newton EPIC и HST, в сравнении с наилучшей аппроксимацией моделью 2BB2G+PL, которая включает межзвездное поглощение, компоненты BB_{hot} и BB_{cold} , две абсорбционные особенности в мягком рентгеновском диапазоне, а также степенную компоненту в УФ-ИК-диапазоне. На нижней панели показаны невязки аппроксимации.

В разделе 4.4.1 обсуждается нетепловая компонента, обнаруженная в оптическом и ИК-диапазонах. Это может быть магнитосферным излучением, аналогичным нетепловому излучению обычных пульсаров, источником энергии которого служит замедление вращения. Кроме того, степенная компонента в УФ-ИК-излучении J2143 может быть обусловлена необычной пульсарной туманностью, которая не проявляется за пределами этого диапазона. Еще одна возможность заключается в том, что данная компонента излучается диском обратного падения, температура которого убывает по мере удаления от центра. Раздел 4.4.2 посвящен тепловому излучению J2143. Многоволновой тепловой спектр не может быть описан однокомпонентной чернотельной моделью (как и в случае других XTINS). Это может быть обусловлено двумя факторами: неоднородностью температуры поверхности НЗ и отличием

реального теплового спектра от спектра абсолютно черного тела.

В **заключении** перечислены основные результаты работы и выводы:

1. В дальнем УФ-диапазоне обнаружен кандидат на отождествление старого пульсара J0108-1431. Это позволило оценить температуру его поверхности в диапазоне $(3-6) \times 10^4$ К и обосновать, что она не превышает 6×10^4 К для удаленного наблюдателя.
2. Старый пульсар B0950+08 был детектирован в двух оптических фильтрах с помощью HST с высоким угловым разрешением. Это позволило отделить пульсар от близкого ($0.5''$) фонового объекта и измерить плотность потока в красной области с высокой точностью. В результате была получена новая оценка на температуру поверхности НЗ, которая составила $(0.5-1.3) \times 10^5$ К. По самой же консервативной оценке, температура поверхности не превышает 1.7×10^5 К для удаленного наблюдателя.
3. Пульсар среднего возраста J1741-2054 и его туманность типа головной ударной волны впервые зарегистрированы в дальнем УФ-диапазоне. Показано, что излучение пульсара в оптической/УФ-области, наиболее вероятно, состоит из тепловой (с поверхности НЗ с температурой 40–50 эВ) и нетепловой (магнитосферной) составляющих. Получены ограничения на спектральные параметры туманности и ее отдельных структурных элементов, а также оценки потока в диапазоне 1250–1850 Å, указывающие на то, что данная туманность является наиболее яркой среди трех объектов такого класса, известных в настоящее время.
4. Анализ наблюдений изолированной НЗ RX J2143.0+0654 показал, что ее спектр от ближнего ИК- до дальнего УФ-диапазона (0.14–1.7 мкм) состоит из тепловой и нетепловой компонент. В УФ-диапазоне доминирует рэлей-джинсовская часть тепловой компоненты с эффективной температурой порядка $kT_{\text{uv}} \sim 22 (d_{260}/R_{10})^2$ эВ при величине межзвездного поглощения $A_V = 0.12$. Многоволновой спектр объекта адекватно описывается моделью, включающей одну или две чернотельные компоненты, линию поглощения на энергии 0.75 кэВ (с возможным наличием второй линии около 0.4 кэВ) и дополнительную степенную компоненту в оптическом и ИК-диапазонах.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В публикациях, где соискатель является первым автором, его вклад является определяющим. В публикации, где соискатель не является первым автором, личный вклад указан в скобках.

1. Abramkin V., Shibano Y., Mignani R. P., Pavlov G. G. Hubble Space Telescope Observations of the Old Pulsar PSR J0108-1431 // *Astroph. J.* – 2021. – Vol. 911, no. 1. – P. 1.

2. Abramkin V., Pavlov G. G., Shibano Y., Kargaltsev O. Thermal and Nonthermal Emission in the Optical-UV Spectrum of PSR B0950+08 // *Astroph. J.* – 2022. – Vol. 924, no. 2. – P. 128.
3. Abramkin V., Pavlov G. G., Shibano Y. et al. The middle-aged pulsar PSR J1741–2054 and its bow-shock nebula in the far-ultraviolet // *Astron. Astroph.* – 2025. – Vol. 696. – P. A121.
4. Pavlov G. G., Abramkin V., Posselt B. UVOIR Spectrum, X-Ray Emission, and Proper Motion of the Isolated Neutron Star RX J2143.0+0654 // *Astroph. J.* – 2026. Vol. 996, no. 1. – P. 79. (Анализ спектра в диапазоне от УФ до ИК, обработка и анализ рентгеновских данных, проверка и обсуждение результатов)

Литература, цитируемая в автореферате

1. Kargaltsev O., Pavlov G. Ultraviolet emission from young and middle-aged pulsars // *Astroph. Space Sci.* — 2007. — Vol. 308, no. 1-4. — P. 287–296.
2. Pavlov G. G., Stringfellow G. S., Cordova F. A. Hubble Space Telescope Observations of Isolated Pulsars // *Astroph. J.* — 1996. — Vol. 467. — P. 370.
3. Brownsberger S., Romani R. W. A Survey for H α Pulsar Bow Shocks // *Astroph. J.* — 2014. — Vol. 784, no. 2. — P. 154.
4. Romani R. W., Shaw M. S., Camilo F. et al. The Balmer-dominated Bow Shock and Wind Nebula Structure of γ -ray Pulsar PSR J1741-2054 // *Astroph. J.* — 2010. — Vol. 724, no. 2. — P. 908–914.
5. de Vries M., Romani R. W., Kargaltsev O. et al. A Quarter Century of Guitar Nebula/Filament Evolution // *Astroph. J.* — 2022. — Vol. 939, no. 2. — P. 70.
6. Rangelov B., Pavlov G. G., Kargaltsev O. et al. First Detection of a Pulsar Bow Shock Nebula in Far-UV: PSR J0437-4715 // *Astroph. J.* — 2016. — Vol. 831, no. 2. — P. 129.
7. Rangelov B., Pavlov G. G., Kargaltsev O. et al. Hubble Space Telescope Detection of the Millisecond Pulsar J2124-3358 and its Far-ultraviolet Bow Shock Nebula // *Astroph. J.* — 2017. — Vol. 835, no. 2. — P. 264.
8. Kaplan D. L., Kamble A., van Kerkwijk M. H., Ho W. C. G. New Optical/Ultraviolet Counterparts and the Spectral Energy Distributions of Nearby, Thermally Emitting, Isolated Neutron Stars // *Astroph. J.* — 2011. — Vol. 736, no. 2. — P. 117.
9. Deller A. T., Tingay S. J., Bailes M., Reynolds J. E. Precision Southern Hemisphere VLBI Pulsar Astrometry. II. Measurement of Seven Parallaxes // *Astroph. J.* — 2009. — Aug. — Vol. 701, no. 2. — P. 1243–1257.
10. Mignani R. P., Manchester R. N., Pavlov G. G. Search for the Optical Counterpart of the Nearby Pulsar PSR J0108-1431 // *Astroph. J.* — 2003. — Jan. — Vol. 582, no. 2. — P. 978–983.
11. Mignani R. P., Pavlov G. G., Kargaltsev O. A possible optical counterpart to the old nearby pulsar J0108-1431 // *Astron. Astroph.* — 2008. — Sep. — Vol. 488, no. 3. — P. 1027–1030.
12. Mignani R. P., Pavlov G. G., Kargaltsev O. VLT observations of the candidate counterpart to PSR J0108-1431 // *Astron. Astroph.* — 2011. — Jul. — Vol. 531. — P. A105.
13. Mignani R. P., Shearer A., de Luca A. et al. The First Ultraviolet Detection of the Large Magellanic Cloud Pulsar PSR B0540-69 and Its Multi-wavelength Properties // *Astroph. J.* — 2019. — Vol. 871, no. 2. — P. 246.

14. Brisen W. F., Benson J. M., Goss W. M., Thorsett S. E. Very Long Baseline Array Measurement of Nine Pulsar Parallaxes // *Astroph. J.* — 2002. — Vol. 571, no. 2. — P. 906–917.
15. Pavlov G. G., Rangelov B., Kargaltsev O. et al. Old but Still Warm: Far-UV Detection of PSR B0950+08 // *Astroph. J.* — 2017. — Vol. 850, no. 1. — P. 79.
16. SBC Absolute Flux Calibration : Rep. ; Executor: R. J. Avila, R. Bohlin, N. Hathi et al. : 2019. — Oct. — P. 5.
17. Hartman R. C., Bertsch D. L., Bloom S. D. et al. The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources // *Astroph. J. Suppl.* — 1999. — Vol. 123, no. 1. — P. 79–202.
18. Camilo F., Ray P. S., Ransom S. M. et al. Radio Detection of LAT PSRs J1741-2054 and J2032+4127: No Longer Just Gamma-ray Pulsars // *Astroph. J.* — 2009. — Vol. 705, no. 1. — P. 1–13.
19. Yao J. M., Manchester R. N., Wang N. A New Electron-density Model for Estimation of Pulsar and FRB Distances // *Astroph. J.* — 2017. — Vol. 835, no. 1. — P. 29.
20. Cordes J. M., Lazio T. J. W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations // *arXiv e-prints.* — 2002. — P. astro-ph/0207156.
21. Auchettl K., Slane P., Romani R. W. et al. X-Ray Analysis of the Proper Motion and Pulsar Wind Nebula for PSR J1741-2054 // *Astroph. J.* — 2015. — Vol. 802, no. 1. — P. 68.
22. Karpova A., Danilenko A., Shibano Yu. et al. Thermal Properties of the Middle-aged Pulsar J1741-2054 // *Astroph. J.* — 2014. — Vol. 789, no. 2. — P. 97.
23. Marelli M., Belfiore A., Saz Parkinson P. et al. X- and γ -Ray Pulsations of the Nearby Radio-faint PSR J1741-2054 // *Astroph. J.* — 2014. — Vol. 790, no. 1. — P. 51.
24. Mignani R. P., Testa V., Marelli M. et al. A Candidate Optical Counterpart to the Middle Aged γ -RAY Pulsar PSRJ1741-2054 // *Astroph. J.* — 2016. — Vol. 825, no. 2. — P. 151.
25. Edenhofer G., Zucker C., Frank P. et al. A parsec-scale Galactic 3D dust map out to 1.25 kpc from the Sun // *Astron. Astroph.* — 2024. — Vol. 685. — P. A82.
26. Lallement R., Vergely J. L., Babusiaux C., Cox N. L. J. Updated Gaia-2MASS 3D maps of Galactic interstellar dust // *Astron. Astroph.* — 2022. — Vol. 661. — P. A147.
27. Vergely J. L., Lallement R., Cox N. L. J. Three-dimensional extinction maps: Inverting inter-calibrated extinction catalogues // *Astron. Astroph.* — 2022. — Vol. 664. — P. A174.
28. Green G. M., Schlafly E., Zucker C. et al. A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS // *Astroph. J.* — 2019. — Vol. 887, no. 1. — P. 93.
29. Zampieri L., Campana S., Turolla R. et al. 1RXS J214303.7+065419/RBS 1774: A new Isolated Neutron Star candidate // *Astron. Astroph.* — 2001. — Vol. 378. — P. L5–L9.
30. Zane S., Cropper M., Turolla R. et al. XMM-Newton Detection of Pulsations and a Spectral Feature in the X-Ray Emission of the Isolated Neutron Star 1RXS J214303.7+065419/RBS 1774 // *Astroph. J.* — 2005. — Vol. 627, no. 1. — P. 397–403.
31. Cropper M., Zane S., Turolla R. et al. XMM-Newton observations of the isolated neutron star 1RXS J214303.7+065419/RBS1774 // *Astroph. Space Sci.* — 2007. — Vol. 308, no. 1-4. — P. 161–166.
32. Schwöpe A. D., Erben T., Kohnert J. et al. The isolated neutron star RBS1774 revisited. Revised XMM-Newton X-ray parameters and an optical counterpart from deep LBT-observations // *Astron. Astroph.* — 2009. — Vol. 499, no. 1. — P. 267–272.