

Отзыв официального оппонента  
на диссертацию **Карповой Анны Викторовны**  
«Гамма-пульсары J1741–2054 и J0633+0632, радиотуманность DA 495  
и остаток сверхновой G350.0–2.0 в рентгеновском диапазоне»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

В диссертации проведено исследование рентгеновского излучения нейтронных звезд и ассоциированных с ними протяженных объектов на примере нескольких пульсаров и остатков сверхновых. Полученные результаты основаны на данных наблюдений лучших на сегодняшний день рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM-Newton, работающих в диапазоне энергий до 10 кэВ, и современных расчетах уравнений состояния нейтронных звезд.

Несмотря на то, что нейтронные звезды были открыты почти полвека назад, до сих пор остается много неразрешенных вопросов, связанных с этими объектами. Ключевым из них является вопрос о диапазонах масс и радиусов нейтронных звезд, а также их внутреннем составе. Изучение нейтронных звезд в рентгеновском диапазоне длин волн, обнаружение возможного теплового излучения, идущего с поверхности нейтронной звезды, позволяет фактически напрямую получить оценку радиуса и температуры звезды, провести сравнение с существующими теориями строения и остывания нейтронных звезд, исследовать вещество при сверхъядерных плотностях. В свою очередь, исследование туманностей пульсарного ветра имеет важное значение для понимания свойств их пульсаров, механизмов ускорения частиц и процессов взаимодействия релятивистского пульсарного ветра с окружающей средой. Таким образом, тема диссертации, несомненно, актуальна.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 106 страниц и включает 28 рисунков, 14 таблиц, а также список литературы из 139 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены основные результаты, выносимые на защиту, и обоснована их достоверность, а также указаны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации, обозначен личный вклад автора.

В главе 1 приводится обзор типичных характеристик излучения пульсаров и остатков сверхновых в рентгеновском диапазоне, описаны характеристики орбитальных рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM-Newton и процесс обработки наблюдательных данных.

Глава 2 посвящена исследованию гамма-пульсара J1741–2054. Показано, что его рентгеновский спектр может быть описан двухкомпонентной моделью, состоящей из степенного закона и модели чернотельного излучения с температурой около 60 эВ. Расстояние до объекта оценивается в 0.8 кпк. Полученные в работе оценки свидетельствуют о том, что пульсар J1741–2054 оказывается горячее, чем

предсказывает стандартный сценарий, и требуются его дальнейшие исследования для уточнения существующих теорий остывания нейтронных звезд.

В главе 3 представлены результаты исследования радиотихого гамма-пульсара J0633+0632. Показано, что спектр пульсара описывается моделью, включающей тепловую компоненту и степенной закон. При этом тепловое излучение может идти со всей поверхности нейтронной звезды, а ее спектр может быть описан как моделью чернотельного излучения, так и моделью замагниченной водородной атмосферы. Спектральный анализ позволил автору оценить расстояние до пульсара и сделать вывод о том, что местом его рождения является туманность Розетка. Полученный результат является важным, так как определить расстояние по мере дисперсии невозможно, поскольку J0633+0632 является радиотихим пульсаром. В спектре пульсара на энергии  $\sim 0.8$  кэВ была обнаружена особенность в поглощении, интерпретированная как возможная циклотронная линия поглощения. Этот результат выглядит многообещающим, так как дает возможность прямого измерения магнитного поля нейтронной звезды, однако требует дальнейшего подтверждения дополнительными наблюдениями или другими обсерваториями.

Глава 4 посвящена исследованию радиотуманности DA 495 и ее центрального источника, пульсара J1952.2+2925, для которых получены новые ограничения параметров. В частности, показано, что пульсар J1952 имеет чисто тепловой спектр, который может быть описан как моделью чернотельного излучения, так и моделями водородных атмосфер нейтронных звезд. В первом случае излучение идет от горячего пятна с температурой около 200 эВ, во втором – от значительной части поверхности нейтронной звезды с температурой  $T=80-90$  эВ. Полученные значения согласуются с теми, что были получены раньше, но использование данных обсерватории XMM-Newton позволило автору существенно лучше их ограничить. Измеренные значения температуры согласуются с предсказаниями стандартного сценария остывания нейтронных звезд. С помощью соотношения  $N_H-D$  была получена независимая оценка расстояния до DA 495, показавшая, что оно может быть больше, чем считалось раньше. Сравнение светимости пульсарной туманности и верхнего предела на нетепловую светимость J1952 со значениями для других систем позволило получить ограничение на возраст DA 495.

В главе 5 проведено исследование остатка вспышки сверхновой G350.0-2.0. Показано, что в излучении остатка доминирует межзвездный газ, нагретый ударной волной, образованной взрывом сверхновой, а его рентгеновский спектр может быть описан моделью равновесной плазмы с температурой около 0.8 кэВ. В остатке обнаружены несколько ярких областей, в некоторых из которых регистрируется избыток железа. С помощью соотношения «межзвездное поглощение–расстояние» независимым образом получена оценка на расстояние до остатка  $\sim 3$  кпк. Подробный анализ самого яркого точечного источника 1RXS J172653.4-382157, находящегося в поле остатка, проведенный в разных диапазонах длин волн, показал, что он является катаклизмической переменной, возможно, не связанной с самим остатком.

В Заключение кратко сформулированы полученные результаты.

Представленные в диссертации результаты получены на качественно высоком уровне. Особенно хочется отметить хорошее знание автором экспериментальной

части, связанной с анализом данных рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM-Newton, очень аккуратный подход к обработке данных и учету инструментальных эффектов (последнее является весьма нетривиальной задачей). Кроме того, можно также указать на грамотное использование автором данных наблюдений, полученных в других диапазонах длин волн. Еще одним достоинством диссертации является хороший и понятный стиль изложения материала и минимальное количество опечаток.

Выносимые на защиту положения хорошо обоснованы, достоверны и значимы для астрофизики высоких энергий. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах и конференциях высокого уровня, опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

У оппонента есть несколько небольших замечаний и вопросов к диссертации.

В главе 2, при обсуждении пульсара J1741-2054 отмечено, что вокруг него присутствует пульсарная туманность, однако никаких характеристик ее излучения не приводится и не обсуждается. Принимая во внимание, что исследование пульсарных туманностей имеет важное значение для понимания свойств их пульсаров, было бы интересно и полезно сравнить соответствующие характеристики для объекта J1741-2054.

В параграфе 2.3.1 использован термин "толщина диска в этом направлении". Желательно пояснить смысл этого термина.

В параграфе 3.3 сказано, что эквивалентная ширина линии хорошо определяется, но из Таблицы 3.1 видно, что ее значимость все-таки невелика, около 3 сигма.

Согласно формуле для модели GABS и полученным в работе значениям ширины линии и глубины, оптическая глубина в центре линии составляет около 0.014, что представляет собой достаточно малую величину. Было бы интересно и полезно сравнить ее с другими похожими пульсарами, где она наблюдается.

В обсуждении возможности объяснения регистрируемой линии поглощения инструментальным артефактом сказано, что провести соответствующее тестирование на других объектах наблюдаемого поля не представлялось возможным ввиду слабости их излучения. Проводилось ли подобное тестирование с использованием данных других, близких по времени наблюдений?

Из текста диссертации не совсем понятно, по каким данным получена Таблица 4.2 (XMM-Newton, Chandra или это аппроксимация совместных спектров). В последнем случае необходимо пояснить, вводилась ли кросс-калибровочная константа, учитывающая разные калибровки инструментов и возможную переменность самого объекта, и какова ее величина.

На рис. 5.6 было бы полезно нарисовать для сравнения SED для известных катаклизмических переменных. Рецензент согласен, что это источник с высокой вероятностью является объектом этого класса, и это один из очень интересных и многообещающих результатов диссертации, но непосредственное сравнение с известными источниками сделало бы результат более наглядным.

Необходимо отметить, что указанные замечания не являются существенными и никак не влияют на высокое научное значение диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, а ее автор **Карпова Анна Викторовна**, заслуживает присвоения ей степени кандидата физико-математических наук.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Заведующий лабораторией релятивистских компактных объектов  
и рентгеновской навигации отдела астрофизики  
высоких энергий ФГБУН Институт космических  
исследований Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН

А.А.Лутовинов

Почтовый адрес: 117997 Москва,  
ул. Профсоюзная 84/32,  
ФГБУН Институт космических  
исследований Российской академии наук  
Телефон: 495 3332222  
Электронный адрес: [aal@iki.rssi.ru](mailto:aal@iki.rssi.ru)

Отзыв заверяю:  
Ученый секретарь ИКИ РАН,  
доктор физико-математических наук

А.В. Захаров

09 декабря 2016 г.