

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук  
Отделение твердотельной электроники  
Лаборатория прикладной математики и математической физики

На правах рукописи

Танашкин Артём Сергеевич

**Многоволновые исследования пульсаров J0554+3107,  
J1023+0038 и B1727-47: новые наблюдательные  
проявления и анализ их природы, параметры и  
эволюционный статус этих нейтронных звёзд**

Научный доклад

Направление: 03.06.01 — Физика и астрономия  
Специальность: 01.03.01 — Физика космоса, астрономия

Санкт-Петербург

2022

**Научный руководитель: Шибанов Юрий Анатольевич**

д. ф.-м. н.,

ведущий научный сотрудник

**Рецензенты:**

**Барсуков Дмитрий Петрович**

к. ф.-м. н.,

старший научный сотрудник

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

**Комарова Виктория Николаевна**

к. ф.-м. н.,

старший научный сотрудник

Специальная астрофизическая обсерватория

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Нейтронные звёзды (НЗ) являются уникальными природными лабораториями, в которых естественным образом реализуются физические условия, недостижимые на Земле. В частности, плотность вещества в их недрах в несколько раз превышает характерную ядерную плотность, а величина магнитного поля на поверхности может достигать  $\sim 10^{15}$  Гс. Кроме того, радиус НЗ всего в несколько раз превышает гравитационный радиус, что делает существенными эффекты общей теории относительности. Многие вопросы о свойствах вещества при таких экстремальных условиях по сей день остаются открытыми, и изучение НЗ является единственной возможностью поиска ответов на эти вопросы. Разрабатываемые теоретические модели нуждаются в проверке на наблюдательном материале, основным источником которого являются электромагнитные наблюдения НЗ в различных диапазонах спектра.

Наблюдательные проявления НЗ крайне разнообразны, и зависят от их окружения и эволюционного статуса. Удобно разделять все наблюдаемые НЗ на одиночные и составляющие двойные системы (в исключительных случаях — системы большей кратности). К первой группе относятся классические радиопульсары — относительно молодые НЗ, высвечивающие энергию своего вращения в радиодиапазоне. Поскольку скорость распространения радиоволн зависит от их частоты, то в ряде случаев по мере дисперсии удаётся оценить расстояние до пульсара — одну из важнейших его характеристик. Кроме того, при помощи наблюдений на интерферометрах со сверхдлинными базами иногда удаётся измерить параллакс пульсара, что даёт прямое, модельно-независимое определение расстояния до него. Сравнение этой величины с оценками по мере дисперсии позволяет уточнять модели распределения электронной плотности в Галактике на луче зрения в направлении на пульсар, являющиеся важным элементом целого ряда астрофизических за-

дач. Этому направлению посвящена работа с радиопульсаром B1727-47 (далее B1727).

Особый интерес представляют одиночные НЗ среднего возраста, от которых наблюдается тепловое рентгеновское излучение, связанное с их остыванием. Определение возрастов и болометрических тепловых светимостей для большого количества таких НЗ позволяет налагать ограничения на их параметры, в частности, осуществлять проверки различных моделей уравнения состояния вещества, поскольку от них сильно зависят теоретические кривые остывания НЗ, представляющие собой зависимости их тепловой светимости (или, эквивалентно, эффективной поверхностной температуры) от времени. На текущий момент известны лишь несколько десятков НЗ, для которых удалось получить одновременно оценки на возраст и тепловую светимость, поэтому исследование новых объектов представляет собой крайне актуальную задачу. Ей посвящена работа с пульсарами J0554+3107 (далее J0554) и B1727.

Среди пульсаров, входящих в тесные двойные системы, в последние годы особое внимание уделяется недавно открытым переходным миллисекундным пульсарам. Эти объекты, которых на данный момент известно всего несколько штук, представляют собой связующее звено между аккрецирующими НЗ в маломассивных рентгеновских двойных системах, которые в результате переноса углового момента раскручиваются до миллисекундных периодов, и миллисекундными радиопульсарами. Они характеризуются чрезвычайно богатыми наблюдательными проявлениями во всех энергетических диапазонах, многие из которых ещё ждут своего объяснения. Часть представленной работы посвящена оптическим наблюдениям одного из таких пульсаров, J1023+0038 (далее J1023).

## Цели и задачи работы

Целью работы является обработка и анализ наблюдений в рентгеновском (J0554), оптическом (J1023) и радиодиапазонах (B1727) трёх нейтронных звёзд. Поставленными задачами являлись:

- Обработка рентгеновских наблюдений гамма-пульсара среднего возраста J0554, выполненных при помощи обсерватории XMM-Newton. Поиск пульсаций, построение кривой блеска, расчёт доли пульсирующей составляющей. Спектральный анализ, отбор теоретических моделей, способных описать наблюдаемый спектр источника в диапазоне 0.2–10 кэВ. В частности, рассмотрение атмосферных моделей с дипольным магнитным полем, оценка параметров НЗ, таких как расстояние масса, радиус, температура и др. Анализ тепловой эволюции в рамках различных сценариев остывания.
- Обработка оптических наблюдение переходного миллисекундного пульсара J1023, выполненных на 6-метровом телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории. Поиск пульсаций, построение кривых блеска в двух каналах ("красном" и "синем"), оценка распределения энергии в спектре пульсирующей компоненты. Исследование вариаций орбитальной фазы излучающей области и параметров кривых блеска. Построение качественной модели взаимодействия НЗ с компаньоном, согласующейся с наблюдательными особенностями.
- Обработка радиоинтерферометрических наблюдений радиопулсара B1727, выполненных при помощи австралийского интерферометра LBA (Large Baseline Array). Определение собственного движения и параллакса пульсара, оценка расстояния до него. Исследование его связи с остатком вспышки сверхновой RCW 114. Анализ рентгеновских данных в свете полученного расстояния до пульсара.

## Научная новизна

Работа полностью основана на оригинальных наблюдениях, выполненных нашей группой при помощи рентгеновской обсерватории XMM-Newton, оптического телескопа БТА и радиointерферометра ЛВА. Основные результаты:

- Выполнено надёжное отождествление точечного рентгеновского источника с гамма-пульсаром J0554. Впервые обнаружены пульсации J0554 в рентгеновском диапазоне (0.2–2 кэВ), определены форма и параметры кривой блеска. Впервые показано, что в спектре пульсара доминирует тепловая составляющая с поверхности НЗ, получена оценка на эффективную температуру. Обнаружена линия поглощения на энергиях  $\sim 0.35$  кэВ неизвестной природы. Выполнена оценка массы и радиуса НЗ, а также расстояния до неё. Рассмотрены самосогласованные сценарии её остывания для двух моделей уравнения состояния (BSk24 и APR\*).
- Зарегистрированы оптические пульсации от переходного миллисекундного пульсара J1023, по характеристикам схожие с наблюдаемыми другими авторами. Однако, впервые это сделано не в белом свете, а одновременно в двух каналах — ”красном” ( $\lambda_{\text{eff}} = 5730 \text{ \AA}$ ) и ”синем” ( $\lambda_{\text{eff}} = 4220 \text{ \AA}$ ), что позволяет анализировать распределение энергии в спектре пульсирующей компоненты. Также впервые обнаружена резкая смена состояний источника — переход от двухпиковых пульсаций к однопиковым с увеличением амплитуды и перераспределением энергии в спектре. Обнаружены хаотичные изменения орбитальной фазы излучающей области в двойной системе, свидетельствующие о её смещениях на существенные расстояния от НЗ.
- Впервые выполнены наблюдения радиопулсара B1727 при помощи радиointерферометра со сверхдлинными базами. Измерены координаты пульсара с точностью, на 2 порядка превосходящей предыдущие измере-

ния, вычислено его собственное движение. Получена предварительная оценка на параллакс пульсара и, соответственно, расстояние до него. Выполнен анализ систематических ошибок астрометрических привязок к калибраторам J1738-4838, J1719-4818 и J1716-4702.

## **Апробация работы**

Результаты научно-квалификационной работы были представлены на астрофизических семинарах ФТИ им. А. Ф. Иоффе (2019, 2020, 2021), а также в устных и стендовых докладах на конференциях: «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, ИКИ РАН, 2019, 2021), «Всероссийская астрономическая конференция» (Москва, ГАИШ МГУ, 2021), «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения» (Нижний Архыз, САО РАН, 2022), «Физика А.Спб» (Санкт-Петербург, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2022, доклад одобрен).

## **Личный вклад автора**

Вклад автора в ключевые результаты работы является определяющим. Отдельные разделы работы выполнены в соавторстве с сотрудниками ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Специальной астрофизической обсерватории и Института астрономии и астрофизики Тюбингенского университета. Единственным существенным элементом, выполненным без прямого участия автора, является расчёт атмосферных моделей НЗ (А. Ю. Потехин, ФТИ им. А. Ф. Иоффе; В. Ф. Сулейманов, Тюбингенский университет) и кривых остывания для различных уравнений состояния вещества НЗ (А. Ю. Потехин).

# Основное содержание работы

## Гамма-пульсар J0554+3107

J0554 — радиотихий гамма-пульсар среднего возраста, открытый по данным обсерватории Fermi в 2013 году [1]. Его период вращения  $P = 465$  мс, характеристический возраст  $t_c = 52$  тысячи лет, потери вращательной энергии  $\dot{E} = 5.6 \times 10^{34}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  и характеристическое магнитное поле  $B_c = 8.2 \times 10^{12}$  Гс. Пульсар ассоциируется с остатком вспышки сверхновой G179.0+2.6, расстояние до которого по разным оценкам составляет от 0.9 до 6 кпк [2–5]. ”Псевдорасстояние” до пульсара, которое оценивается по эмпирическому соотношению между расстоянием и потоком в гамма-диапазоне, составляет 1.9 кпк [6].

Предположительный кандидат на отождествление J0554 в рентгеновском диапазоне был обнаружен нашей группой в данных обсерватории Swift [7]. Он оказался мягким источником, спектр которого описывался моделью теплового излучения с поверхности НЗ с температурой 50–100 эВ. Поскольку было зарегистрировано всего 17 фотонов, аккуратный спектральный анализ был невозможен, как невозможны были и поиски пульсаций на частоте J0554 с целью надёжного отождествления рентгеновского источника с пульсаром. Поэтому нами были проведены более глубокие ( $\sim 45$  тысяч секунд) наблюдения этого объекта при помощи обсерватории XMM-Newton (ObsID 0883760101, PI А. Карова).

После фильтрации данных от следов космических лучей время экспозиции составило 44.3, 44.5 и 38.8 тысяч секунд для детекторов MOS1, MOS2 и rp, соответственно. Комбинированное изображение поля пульсара представлено на Рис 1. Хорошо виден мягкий точечный источник, положение которого (R.A. =  $05^{\text{h}}54^{\text{m}}05^{\text{s}}.067(10)$ , Dec. =  $+31^{\circ}07'41''.40(13)$ ) полностью согласуется с координатами J0554 в гамма-диапазоне [1]. Следов диффузного излучения

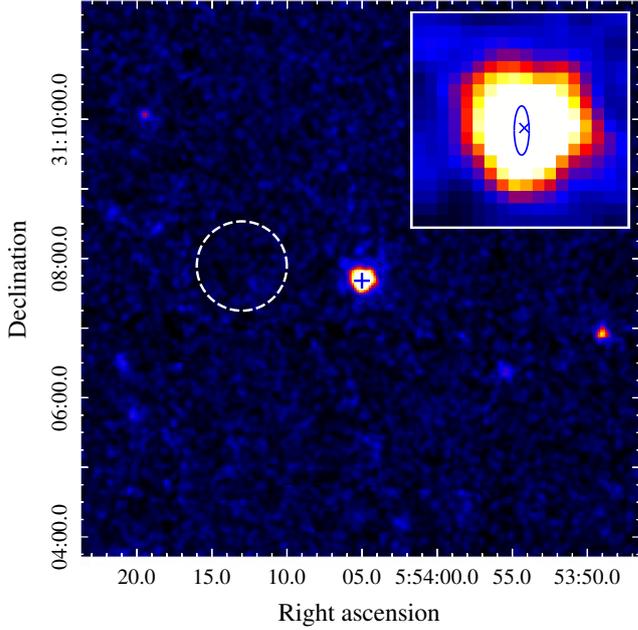


Рис. 1: Изображение  $8' \times 8'$  поля J0554. Его положение в гамма-диапазоне [1] отмечено крестиком. Пунктирным кружком отмечена область, используемая для оценки вклада фона. На увеличенном изображении  $0'.6 \times 0'.6$  показана область вблизи рентгеновского источника, положение которого отмечено символом 'X'. Эллипсом показаны неопределённости на уровне  $1\sigma$  положения пульсара в гамма-диапазоне.

(например, от пульсарной туманности) не обнаружено.

Для поиска пульсаций с известным периодом пульсара мы использовали данные рп камеры, временное разрешение которой составляет  $\approx 48$  мс. Мы рассматривали фотоны в диапазоне энергий 0.2–2 кэВ в рамках круговой апертуры радиусом  $22''$ . Общее количество отсчётов от источника составило 1026 штук. Для поиска сигнала применялся  $Z_n^2$ -тест [8] в диапазоне частот 2.1501–2.1509 Гц, где количество гармоник  $n$  варьировалось от 1 до 5. Мы обнаружили сигнал на частоте 2.150493(2) Гц, со статистически значимым вкладом от первых двух гармоник, и с величиной  $Z_2^2 = 42.7$ , что соответствует уровню значимости  $\approx 4.7\sigma$ .

Измеренная частота немного превышает значение 2.150474376(14), рассчитанное по данным Fermi [1] на эпоху наших наблюдений на XMM-Newton. Однако, между наблюдениями в гамма и рентгеновском диапазонах прошло около 8 лет, и такое расхождение вполне возможно как результат временного шума или глитчей. Обнаружение пульсаций с частотой, близкой к частоте J0554, является несомненным аргументом в пользу того, что обнаруженный источник действительно является искомым пульсаром.

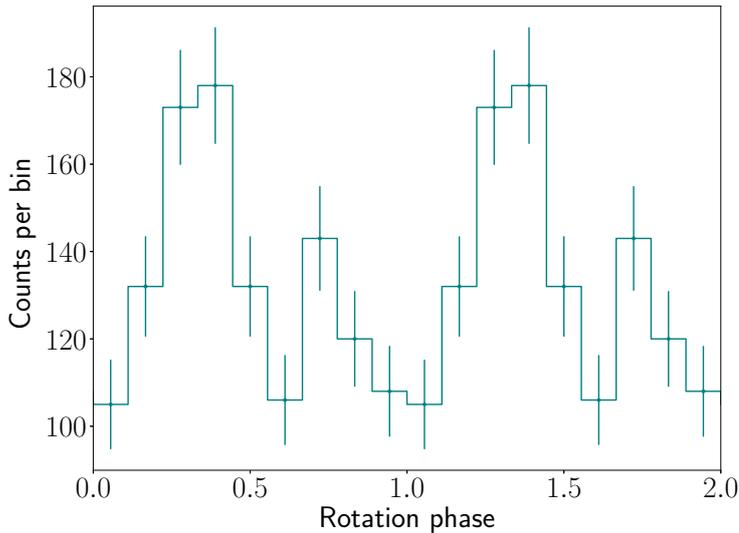


Рис. 2: Профиль импульса в диапазоне 0.2–2 кэВ. Ярко выражена двухпиковая структура. Доля пульсирующей компоненты равна  $25 \pm 6\%$ . Уровень фона приблизительно составляет 19 отсчётов на бин (не показан).

Сфазированная кривая блеска J0554 в диапазоне 0.2–2 кэВ, обладающая выраженной двухпиковой структурой, представлена на Рис 2. Доля пульсирующей составляющей после учёта вклада фона, рассчитанная по методу, предложенному в работе [9], равна  $25 \pm 6\%$ . На энергиях выше 2 кэВ количество фотонов слишком мало для решения вопроса о наличии или отсутствии пульсаций.

Для спектрального анализа мы извлекали спектры MOS и rp данных из круговой апертуры радиусом  $19''$ . Для оценки вклада фона использовалась область, отмеченная кружком на Рис 1. Спектры фитировались в диапазоне 0.2–10 кэВ при помощи пакета XSPEC v.12.11.1 [10]. Для учёта межзвёздного поглощения использовалась модель tbabs с обилием элементов wilm [11].

Для предварительного отбора моделей по критерию  $\chi^2$  мы группировали спектры по 25 или более отсчётов на бин. Модель степенного излучения powerlaw (PL), используемая для учёта нетеплового излучения от магнитосферы НЗ, хотя и даёт статистически приемлемый фит, требует величину фотонного индекса  $\Gamma \approx 7$ , тогда как типичные значения для пульсаров не превышают  $\approx 3$  [12]. Такая большая величина фотонного индекса обычно свидетельствует о наличии тепловой компоненты в спектре. Для её описания мы разработали набор моделей водородных атмосфер НЗ с дипольным

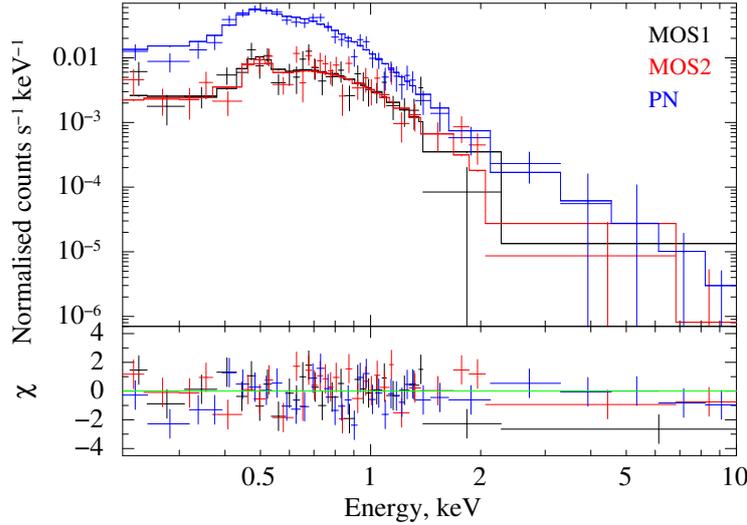


Рис. 3: Спектр J0554 по данным MOS1, MOS2 и pn. Сплошными линиями изображена наилучшая модель. На нижней панели показаны невязки между наблюдаемыми данными и моделью.

магнитным полем `nsmdintb` [13–15]. Величина магнитного поля на полюсе  $B_p$  была выбрана равной  $10^{13}$  Гс, близкой к значению характеристического поля. Варьируемыми параметрами модели являются масса  $M$  и радиус  $R$  НЗ, угол  $\alpha$  между осью вращения НЗ и магнитной осью, угол  $\zeta$  между осью вращения и лучом зрения, расстояние  $D$ , и эффективная температура поверхности  $T^\infty = T/(1 + z_g)$ , где  $z_g$  — гравитационное красное смещение. Такая модель фитирует спектр неудовлетворительно, с  $\chi^2/\text{d.o.f.} = 62/39$ . Фит становится статистически приемлемым ( $\chi^2/\text{d.o.f.} = 41/36$ ) при добавлении гауссовой линии поглощения `gabs` на энергиях  $\approx 35$  кэВ. Кроме того, остаточные невязки указывают на некоторый избыток излучения в жёстком диапазоне ( $\gtrsim 2$  кэВ), поэтому мы добавили в модель PL компоненту, что привело к  $\chi^2/\text{d.o.f.} = 39/34$ .

Поскольку количество отсчётов от пульсара невелико, для более точного определения параметров модели мы перегруппировали спектры по 1 или более отсчёту на бин и использовали W-статистику [16], подходящую для пуассоновских данных. К этим спектрам применялся байесовский метод оценки параметров, реализованный при помощи пакета `emcee` [17, 18] языка `python`. Такой подход позволяет накладывать приорные ограничения на параметры при фитировании. Мы использовали 3D-карту поглощения в Галактике [19] для оценки расстояния до пульсара. Избыток цвета  $E(B - V)$  пересчитывал-

Таблица 1: Наилучшие параметры для модели nsmdintb. Ошибки указаны на уровне 68%.  $E_0$  и EW — положение и эквивалентная ширина гауссовой линии поглощения. Углы  $\alpha$  и  $\zeta$  ограничиваются плохо и здесь не указаны.  $W/\text{d.o.f.} = 228/211$  и  $\chi^2/\text{d.o.f.} = 43/34$ .

$N_{\text{H}}$ ,	$D$ ,	$M$ ,	$R$ ,	$T^\infty$ ,	$\Gamma$	$E_0$ ,	EW,
$10^{21} \text{ cm}^{-2}$	кпк	$M_\odot$	км	эВ		эВ	эВ
$1.62^{+0.08}_{-0.06}$	$2.0^{+0.2}_{-0.4}$	$1.9 \pm 0.2$	$13.5^{+1.2}_{-1.7}$	$47 \pm 2$	$2.2^{+0.6}_{-0.4}$	$340 \pm 40$	$150^{+120}_{-40}$

ся в эквивалентную колонковую плотность водорода на луче зрения  $N_{\text{H}}$  по соотношению из работы [20]. Также в процедуре фитирования мы ограничивали фотонный индекс  $\Gamma$  нетепловой компоненты в диапазоне от 0.5 до 3, разумном для пульсаров [12]. Полученные параметры представлены в Табл 1. На Рис. 3 показан спектр J0554, наилучшая модель и невязки между ними.

Физическая природа наблюдаемой линии поглощения неясна. Если она образуется вблизи поверхности НЗ, то её положение в локальной системе отсчёта соответствует энергиям  $\sim 0.4\text{--}0.5$  кэВ. Для электронной циклотронной линии соответствующая величина магнитного поля составляет  $4 \times 10^{10}$  Гс, что существенно меньше характеристического значения  $B_c = 8.2 \times 10^{12}$  Гс и может свидетельствовать об образовании линии в радиационных поясах НЗ [21]. С другой стороны, для протонной циклотронной линии требуемая величина магнитного поля составляет  $\gtrsim 7 \times 10^{13}$  Гс, на порядок выше характеристического поля  $B_c$  и поля, используемого в нашей атмосферной модели. Такая линия может свидетельствовать о наличии сильных недипольных составляющих поля [22–24]. Другой возможной причиной образования линии могут быть связанно-связанные переходы в атмосфере НЗ, имеющей в составе химические элементы тяжелее водорода [25]. Наконец, мы не можем

исключить возможность инструментального артефакта. Малая яркость других источников в поле не позволяет проверить наличие такой же линии в их спектрах.

Полученная болометрическая светимость НЗ  $L_{\text{bol}} \approx 1.8 \times 10^{32}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  при возрасте звезды 52 тысячи лет оказывается существенно ниже, чем ожидаемая в рамках так называемого сценария наименьшего остывания [26, 27], при котором основные потери тепла происходят за счёт нейтринного излучения, источником которого являются модифицированные урка-процессы. С другой стороны, эта светимость существенно больше величины, предсказываемой сценарием ускоренного остывания, включающего в себя прямые урка-процессы, которые запускаются при массах НЗ больше порогового значения  $M_{\text{DU}}$  [28]. Согласование теоретических кривых остывания с наблюдаемой светимостью возможно несколькими путями. Во-первых, реальный возраст J0554 может быть существенно меньше характеристического, что не редкость для пульсаров [29]. В этом случае справедлив сценарий ускоренного остывания. Во-вторых, масса НЗ может лишь слегка превышать  $M_{\text{DU}}$ , в результате чего прямые урка-процессы протекают лишь в малом объёме ядра НЗ. Наконец, масса НЗ может быть немного меньше  $M_{\text{DU}}$ . В этом случае нейтринные потери тепла в результате модифицированных урка-процессов существенно возрастают, как недавно было показано в работе [30]. Величина  $M_{\text{DU}}$  на текущий момент не определена однозначно, она зависит от состава и уравнения состояния вещества НЗ, и сильно меняется в зависимости от рассматриваемой модели. Например, для модели Bsk24  $M_{\text{DU}} \approx 1.6M_{\odot}$  [31], тогда как модель APR\* предсказывает  $M_{\text{DU}} \approx 2.0M_{\odot}$  [32]. Оба эти значения лежат в интервале  $2\sigma$  полученной из спектрально фита величины  $M$ .

Для выбора какой-либо модели уравнения состояния, а также для лучшего ограничения параметров НЗ и прояснения природы линии поглощения, требуются дальнейшие наблюдения.

# Миллисекундный оптический пульсар J1023+0038

Переходные пульсары представляют собой подкласс миллисекундных пульсаров в тесных двойных системах, демонстрирующих переключения между двумя принципиально различными режимами взаимодействия НЗ с её компаньоном: эпизоды интенсивной аккреции, в течение которых система наблюдается как маломассивная рентгеновская двойная, сменяются спокойными состояниями, в которых НЗ наблюдается как миллисекундный радиопульсар. Архетипичный представитель этого класса, J1023+0038, обладает чрезвычайно богатым набором наблюдательных свойств. Одним из наиболее интригующих являются миллисекундные оптические пульсации, впервые обнаруженные в работе [33] и затем подтверждённые в ряде других работ [34, 35]. Пульсирующее оптическое излучение характеризуется двухпиковой структурой с переменными во времени амплитудами пиков, в максимуме достигающими приблизительно 1%. Одновременные наблюдения в оптике и рентгене также выявили сильную корреляцию между свойствами пульсирующего оптического излучения и поведением системы в рентгеновском диапазоне [35].

Система расположена на расстоянии 1.4 кпк [36] и состоит из НЗ с периодом вращения  $P_s = 1.69$  мс [37] и массой  $M_{\text{ns}} = 1.7M_{\odot}$  [36], и её компаньона — нормальной звезды G класса с массой около  $0.2M_{\odot}$ . Орбитальный период системы составляет  $P_{\text{orb}} = 4.75$  ч [37].

Мы наблюдали J1023 в течение семи ночей в промежутке между 17 февраля 2017 года и 5 января 2020 года на 6-метровом телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории. Наблюдения выполнялись с использованием панорамного фотометра-поляриметра [38], работающего в двухканальном режиме, что позволяет одновременно регистрировать фотоны в "красном" ( $\lambda_{\text{eff}} = 5640$  Å, GaAs фотокатод) и "синем" ( $\lambda_{\text{eff}} = 4170$  Å, мультищелочной фотокатод) каналах с эффективным временным разрешением порядка 1 микросекунды. Суммарная продолжительность данных составила около 10

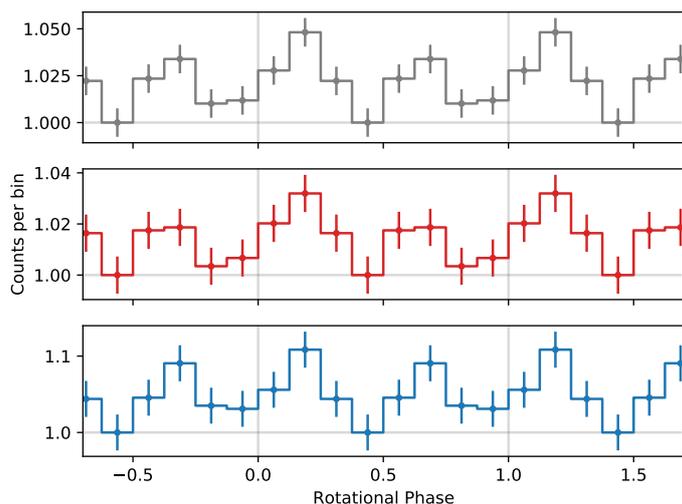


Рис. 4: Типичные профили импульсов в белом свете (верх), красном (середина) и синем (низ) каналах. Отсчёты нормированы на их количество в минимальном бине.

часов.

Времена приходов фотонов пересчитывались к барицентру Солнечной системы. Кроме того, при поиске периодического сигнала необходимо учитывать орбитальное движение НЗ в двойной системе. Известно, что система характеризуется сложной эволюцией орбитальных параметров, поэтому на начальном этапе необходимо определять оптимальную орбитальную фазу излучающей области для каждого сегмента данных (см., например, работу [39] с описанием стандартного метода поиска оптимальной фазы).

В большей части данных мы видим двухпиковые пульсации в переменными амплитудами пиков, схожие с отмечаемыми другими авторами (Рис.). Однако, в ночь на 15 ноября 2017 года имела место резкая смена режимов взаимодействия НЗ с её компаньоном. В течение приблизительно 230 секунд вместо типичных двухпиковых пульсаций (нижняя панель Рис.) наблюдались однопиковые с увеличенной в несколько раз амплитудой. Профиль импульса принял практически синусоидальную форму (верхняя панель Рис.), и распределение энергии в спектре пульсирующей компоненты стало мягче. Кроме того, в данном эпизоде наблюдалась сильная вспышечная активность источника. К сожалению, отсутствие одновременных рентгеновских наблюдений не позволяет связать наблюдавшиеся особенности с какими-либо известными

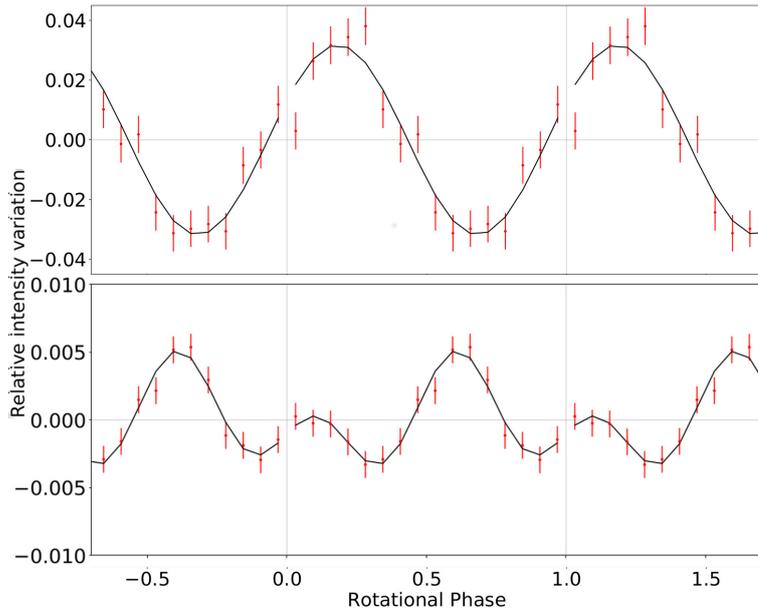


Рис. 5: Вверху: профиль импульса в красном канале в течение 230-секундного интервала. Структура близка к синусоидальной. Внизу: профиль импульса в течение остальной ночи, двухпиковая структура типична для J1023.

проявлениями активности в рентгеновском диапазоне.

Другой интересной особенностью, обнаруженной в данных, является хаотичная переменность орбитальной фазы области, ответственной за пульсирующее излучение. Ранее этот эффект был известен, однако считалось, что характерные времена изменений существенно превышают дни или даже недели. Мы же наблюдаем такие изменения на временах порядка суток. Максимальные орбитальные смещения составляют около 25 секунд, что соответствует линейному расстоянию около 3000 км. Эта особенность указывает на то, что источник пульсирующего излучения не может быть жёстко связан с НЗ. В частности, он не может быть расположен вблизи светового цилиндра НЗ, как предлагается в некоторых моделях. Более вероятным представляется, что в различных облаках вещества, распределённых вдоль орбиты НЗ, случайным образом создаются условия, благоприятствующие переизлучению энергии пульсарного ветра в оптическом диапазоне.

## Радиопульсар B1727-47

Радиопульсар B1727 был открыт обсерваторией Молонгло [40] вскоре после открытия первых пульсаров. Его период составляет 0.83 с, темп потерь вращательной энергии  $\sim 10^{34}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , магнитное поле  $\sim 10^{13}$  Гс и характеристический возраст 80 тысяч лет. Величина меры дисперсии 123 пк  $\text{см}^{-3}$  соответствует расстоянию до пульсара 2.7 кпк [41] или 5.6 кпк [42], в зависимости от используемой модели распределения электронной плотности в Галактике. В работе [43] впервые было измерено собственное движение пульсара  $\mu = 151 \pm 19$  угловых миллисекунд в год, которое при расстоянии до него  $\gtrsim 2.7$  кпк соответствует линейной скорости движения  $\gtrsim 1900$  км  $\text{с}^{-1}$ . В то же время, экстраполяция траектории его движения назад во времени на момент рождения указывает на центр остатка сверхновой RCW 114 (Рис. 6), что делает вероятным эволюционную связь этих двух объектов. В этом случае пульсар находится существенно ближе ( $\sim 0.6$  кпк), он младше ( $\sim 50$  тысяч лет), а его линейная скорость ( $\sim 400$  км  $\text{с}^{-1}$ ) согласуется с наблюдаемым распределением скоростей пульсаров в Галактике.

Для измерения параллакса пульсара и, соответственно, модельно-независимого определения расстояния до него, нами была проведена серия радиоинтерферометрических наблюдений при помощи австралийской системы LBA (Long Baseline Array). Всего было получено 8 точек за промежуток времени с июля 2018 по июль 2021 года. Стандартная процедура определения положения пульсара на каждую из эпох наблюдений заключается в определении его положения относительно калибратора (квазара), положение которого известно с хорошей точностью и считается неизменным во времени. Для этого в течение суток наблюдения пульсара перемежаются наблюдениями калибратора (или нескольких калибраторов, в нашем случае трёх) и затем выполняется привязка (англ. phase-referencing) пульсара к калибратору. При этом все поправки к фазе сигнала, регистрируемого от пульсара каждой из вклю-

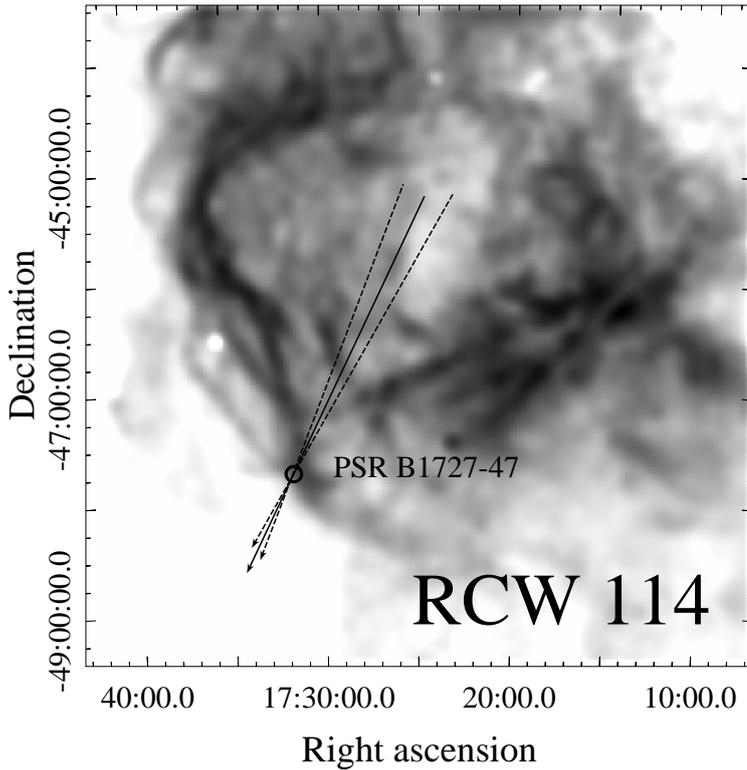


Рис. 6: Остаток вспышки сверхновой RCW 114 в линии  $H\alpha$ . Положение B1727 отмечено кружком. Сплошной линией показана экстраполяция собственного движения пульсара на предполагаемую эпоху рождения. Пунктирными линиями показан диапазон неопределённостей на уровне  $1\sigma$ . Воспроизведено из работы [44] с разрешения авторов.

чённых в интерферометрическую сеть антенн, определяются по поправкам к фазе сигнала от калибратора, надёжно определяемым благодаря его яркости.

Основным источником ошибок в данном подходе является различие физических условий в ионосфере и тропосфере Земли на пути излучения от пульсара и калибратора, что приводит к различию поправок к фазам сигнала. В следствие этого критическим является угловое расстояние между пульсаром и калибратором. В идеале, для частоты 1.4 ГГц, на которой велись наблюдения, оно не должно превышать 1 градуса. Однако, ближайшим к B1727 хорошим калибратором является J1738-4838, удалённый от пульсара на 1.5 градуса. Для оценки величины систематических ошибок, возникающих в следствие указанных выше причин, нами были проведены перекрёстные привязки (англ. cross-phase-referencing) калибраторов друг к другу для определения их координат и сравнения их с данными каталогов. Было обнаружено, что для далёких пар (J1738-4838 и J1719-4818, расстояние 3.2 градуса; J1738-4838 и J1716-4702, расстояние 4.0 градуса) величина систематических ошибок, как и

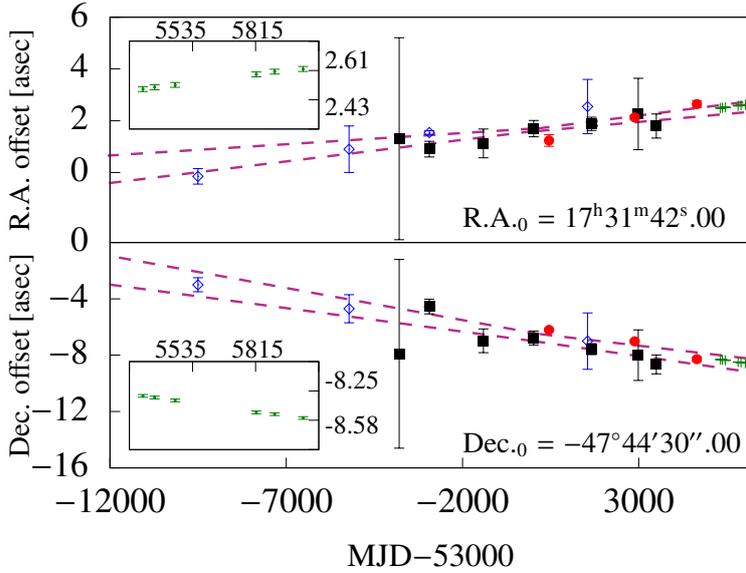


Рис. 7: Положения пульсара на разные эпохи. Зелёными крестиками в правой части показаны результаты наших измерений по первым 6 точкам. Другими символами показаны результаты других работ. На вставках показаны наши измерения в увеличенном масштабе.

ожидалось, может достигать 15 угловых миллисекунд. Однако, для близкой пары, J1719-4818 и J1716-4702, с расстоянием между ними 1.34 градуса, мы не обнаружили смещений, превышающих ошибки их положений, указанных в каталогах. Таким образом, для пары B1727 и J1738-4838, расстояние между которыми лишь слегка превосходит расстояние между J1719-4818 и J1716-4702, мы ожидаем систематические ошибки на уровне не выше  $\approx 1$  угловой миллисекунды.

На данный момент выполнена предварительная обработка первых шести точек. Полученные положения пульсара полностью согласуются с ожидаемым по результатам предыдущих работ собственным движением (см. Рис 7). Измеренное нами по 6 точкам собственное движение ( $\mu_\alpha = 63 \pm 1$ ,  $\mu_\delta = -125 \pm 1$ ,  $\mu = 140 \pm 1$  угловых миллисекунд в год) также согласуется с полученным в работе [43], однако имеет существенно превосходящую точность. Кроме того, выполнены первые оценки параллакса B1727, полученная величина  $\pi = 2.2 \pm 0.4$  угловых миллисекунд соответствует расстоянию  $450_{-70}^{+100}$  пк, что свидетельствует в пользу ассоциации пульсара с остатком вспышки сверхновой RCW114. Поперечная скорость движения НЗ в таком случае составляет  $\approx 300$  км с $^{-1}$ , что является типичным значением для пульсаров.

В текущий момент продолжается работа по анализу различных источни-

ков ошибок и обработке последних двух точек.

## Заключение

Основные результаты, полученные в научно-квалификационной работе, сводятся к следующему:

1. Обработаны и проанализированы рентгеновские наблюдения гамма-пульсара J0554+3107, выполненные при помощи обсерватории XMM-Newton. На месте пульсара обнаружен мягкий точечный источник, демонстрирующий сильные пульсации с частотой, близкой к частоте пульсаций J0554, известной по данным в гамма-диапазоне, что без сомнений указывает на верность отождествления. Кривая блеска имеет плавную двухпиковую структуру, доля пульсирующей компоненты составляет  $25 \pm 6\%$ . В спектре источника доминирует тепловая составляющая, хорошо описываемая комбинацией модели водородной атмосферы НЗ с дипольным магнитным полем, степенного закона с показателем степени  $2.2_{-0.4}^{+0.6}$  и гауссовой линии поглощения на энергиях  $\approx 0.35$  кэВ. Эффективная температура поверхности НЗ в этом случае составляет  $47 \pm 2$  эВ, её масса лежит в диапазоне  $1.7\text{--}2.1 M_{\odot}$ , радиус равен  $13.5_{-1.7}^{+1.2}$  км. Расстояние до пульсара, оцененное по трёхмерной карте поглощения в Галактике, составляет  $\approx 2$  кпк. Его болометрическая тепловая светимость  $L_{\text{bol}} \approx 1.8 \times 10^{32}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  предполагает несколько возможных сценариев остывания НЗ. Если реальный возраст пульсара существенно меньше характеристического, тогда его светимость согласуется с предсказанием модели BSk24 при массе около  $1.6 M_{\odot}$  и наличии аккрецированной теплоизолирующей оболочки. Если же реальный возраст близок к характеристическому, то наблюдаемая светимость ожидается в рамках модели APR\* при массе около  $2 M_{\odot}$  и неаккрецированной оболочке.
2. Обработаны и проанализированы оптические наблюдения переходно-

го миллисекундного пульсара J1023+0038, выполненные на телескопе БТА. Одновременно в двух каналах зарегистрированы пульсации с характеристиками, схожими с наблюдаемыми другими авторами. Вместе с тем, впервые обнаружена резкая смена состояния системы, изменение формы профиля импульса с двухпиковой на однопиковую с увеличением амплитуды пульсаций и смягчением распределения энергии в спектре пульсирующей компоненты. Также обнаружены хаотичные изменения орбитальной фазы области генерации пульсирующего излучения, максимальные смещения порядка 30 секунд соответствуют линейным расстояниям около 3000 км, что исключает жёсткую связь этой области с НЗ.

3. Получены первые результаты в рамках эксперимента по измерению параллакса радиопулсара B1727-47 при помощи радиоинтерферометра со сверхдлинными базами ЛВА. Выполнен анализ ожидаемых систематических ошибок определения положения пульсара на каждую эпоху наблюдений, показана принципиальная возможность измерения параллакса при ожидаемом расстоянии до пульсара  $\sim 500$  пк. Выполнены предварительные измерения собственного движения B1727, результат  $\mu = 140 \pm 1$  угловых миллисекунд в год согласуется с результатами предыдущих работ. Получена предварительная оценка величины параллакса пульсара,  $\pi = 2.2 \pm 0.4$  угловых миллисекунд, что соответствует расстоянию  $450_{-70}^{+100}$  пк и может свидетельствовать в пользу ассоциации B1727 с остатком вспышки сверхновой RCW 114.

## Публикации по теме исследования

1. A. Tanashkin, G. Beskin, S. Karpov, V. Plokhotnichenko, Yu. Shibanov, D. Zyuzin *Change of the structure and physical properties of optical pulsations from transitional millisecond pulsar J1023+0038*, Proceedings of the VAK-

2021 conference, 2021, p. 299, DOI: 10.51194/VAK2021.2022.1.1.115

2. A. S. Tanashkin, A. V. Karpova, A. Y. Potekhin, Y. A. Shibano, D. A. Zyuzin  
*XMM-Newton observations of the middle-aged  $\gamma$ -ray pulsar J0554+3107: pulsing thermal emission from a cooling high-mass neutron star*, submitted to Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022
3. A. S. Tanashkin, A. V. Karpova, Y. A. Shibano, A. Y. Potekhin, D. A. Zyuzin  
*Middle-aged  $\gamma$ -ray pulsar J0554+3107 in X-rays*, submitted to Journal of Physics: Conference Series, 2022

## Цитированная литература

- [1] Pletsch H. J. et al. Einstein@Home Discovery of Four Young Gamma-Ray Pulsars in Fermi LAT Data // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 779, no. 1. — P. L11.
- [2] Case G. L., Bhattacharya D. A New  $\Sigma$ -D Relation and Its Application to the Galactic Supernova Remnant Distribution // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 504, no. 2. — P. 761–72.
- [3] The relation between the surface brightness and the diameter for galactic supernova remnants / Guseinov O. H., Ankaý A., Sezer A., and Tagieva S. O. // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* — 2003. — Vol. 22. — P. 273.
- [4] Updated Radio Sigma-D Relation for Galactic Supernova Remnants / Pavlovic M. Z., Dobardzic A., Vukotic B., and Urosevic D. // *Serbian Astronomical Journal.* — 2014. — Vol. 189. — P. 25–40.
- [5] A Systematic Study of the Dust of Galactic Supernova Remnants. I. The Distance and the Extinction / Zhao H., Jiang B., Li J., Chen B., Yu B., and Wang Y. // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 891, no. 2. — P. 137.

- [6] Saz Parkinson P. M. et al. Eight  $\gamma$ -ray Pulsars Discovered in Blind Frequency Searches of Fermi LAT Data // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 725, no. 1. — P. 571–84.
- [7] Zyuzin D. A., Karpova A. V., Shibanov Y. A. X-ray counterpart candidates for six new  $\gamma$ -ray pulsars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 476, no. 2. — P. 2177–85.
- [8] Buccheri R. et al. Search for pulsed gamma-ray emission from radio pulsars in the COS-B data // *Astron. Astrophys.* — 1983. — Vol. 128. — P. 245–51.
- [9] Swanepoel J. W. H., de Beer C. F., Loots H. Estimation of the Strength of a Periodic Signal from Photon Arrival Times // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 467. — P. 261.
- [10] Arnaud K. A. XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / ed. by Jacoby G. H., Barnes J. — 1996. — Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — P. 17.
- [11] Wilms J., Allen A., McCray R. On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 542, no. 2. — P. 914–24.
- [12] Kargaltsev O., Pavlov G. G. Pulsar Wind Nebulae in the Chandra Era // *40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More* / ed. by Bassa C., Wang Z., Cumming A., Kaspi V. M. — 2008. — Vol. 983 of *American Institute of Physics Conference Series*. — P. 171–85.
- [13] Suleimanov V., Potekhin A. Y., Werner K. Models of magnetized neutron star atmospheres: thin atmospheres and partially ionized hydrogen atmospheres with vacuum polarization // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 500, no. 2. — P. 891–9.

- [14] Potekhin A. Y., De Luca A., Pons J. A. Neutron Stars—Thermal Emitters // *Sp. Sci. Rev.* — 2015. — Vol. 191, no. 1-4. — P. 171–206.
- [15] Middle aged  $\gamma$ -ray pulsar J1957+5033 in X-rays: pulsations, thermal emission, and nebula / Zyuzin D. A., Karpova A. V., Shibano Y. A., Potekhin A. Y., and Suleimanov V. F. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 501, no. 4. — P. 4998–5011.
- [16] Wachter K., Leach R., Kellogg E. Parameter estimation in X-ray astronomy using maximum likelihood. // *Astrophys. J.* — 1979. — Vol. 230. — P. 274–87.
- [17] emcee: The MCMC Hammer / Foreman-Mackey D., Hogg D. W., Lang D., and Goodman J. // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 2013. — Vol. 125, no. 925. — P. 306.
- [18] Goodman J., Weare J. Ensemble samplers with affine invariance // *Communications in Applied Mathematics and Computational Science.* — 2010. — Vol. 5, no. 1. — P. 65–80.
- [19] A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS / Green G. M., Schlafly E., Zucker C., Speagle J. S., and Finkbeiner D. // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 887, no. 1. — P. 93.
- [20] Probing X-Ray Absorption and Optical Extinction in the Interstellar Medium Using Chandra Observations of Supernova Remnants / Foight D. R., Güver T., Özel F., and Slane P. O. // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 826. — P. 66.
- [21] Luo Q., Melrose D. Pulsar radiation belts and transient radio emission // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 378, no. 4. — P. 1481–90.

- [22] Bilous A. V. et al. A NICER View of PSR J0030+0451: Evidence for a Global-scale Multipolar Magnetic Field // *Astrophys. J. Lett.* — 2019. — Vol. 887, no. 1. — P. L23.
- [23] X-ray light curves from realistic polar cap models: inclined pulsar magnetospheres and multipole fields / Lockhart W., Gralla S. E., Özel F., and Psaltis D. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 490, no. 2. — P. 1774–83.
- [24] Mereghetti S., Pons J. A., Melatos A. Magnetars: Properties, Origin and Evolution // *Sp. Sci. Rev.* — 2015. — Vol. 191, no. 1-4. — P. 315–38.
- [25] Mori K., Ho W. C. G. Modelling mid-Z element atmospheres for strongly magnetized neutron stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 377, no. 2. — P. 905–19.
- [26] Enhanced cooling of neutron stars via Cooper-pairing neutrino emission / Gusakov M. E., Kaminker A. D., Yakovlev D. G., and Gnedin O. Y. // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 423. — P. 1063–71.
- [27] Minimal Cooling of Neutron Stars: A New Paradigm / Page D., Lattimer J. M., Prakash M., and Steiner A. W. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2004. — Vol. 155. — P. 623–50.
- [28] Potekhin A. Y., De Luca A., Pons J. A. Neutron Stars — Thermal Emitters // *Space Sci. Rev.* — 2015. — Vol. 191. — P. 171–206.
- [29] Thermal luminosities of cooling neutron stars / Potekhin A. Y., Zyuzin D. A., Yakovlev D. G., Beznogov M. V., and Shibano Y. A. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 496, no. 4. — P. 5052–71.

- [30] Shternin P. S., Baldo M., Haensel P. In-medium enhancement of the modified Urca neutrino reaction rates // *Physics Letters B.* — 2018. — Vol. 786. — P. 28–34.
- [31] Unified equations of state for cold non-accreting neutron stars with Brussels-Montreal functionals - I. Role of symmetry energy / Pearson J. M., Chamel N., Potekhin A. Y., Fantina A. F., Ducoin C., Dutta A. K., and Goriely S. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 481. — P. 2994–3026.
- [32] Akmal A., Pandharipande V. R., Ravenhall D. G. Equation of state of nucleon matter and neutron star structure // *Phys. Rev. C.* — 1998. — Vol. 58, no. 3. — P. 1804–28.
- [33] Optical pulsations from a transitional millisecond pulsar / Ambrosino F., Papitto A., Stella L., Meddi F., Cretaro P., Burderi L., Di Salvo T., Israel G. L., Ghedina A., Di Fabrizio L., and Riverol L. // *Nature Astronomy.* — 2017. — Vol. 1. — P. 854–858. — 1709.01946.
- [34] Precise optical timing of PSR J1023+0038, the first millisecond pulsar detected with Aqueye+ in Asiago / Zampieri L., Burtovoi A., Fiori M., Naletto G., Spolon A., Barbieri C., Papitto A., and Ambrosino F. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 485, no. 1. — P. L109–L113. — 1903.08930.
- [35] Pulsating in unison at optical and X-ray energies: simultaneous high-time resolution observations of the transitional millisecond pulsar PSR J1023+0038 / Papitto A., Ambrosino F., Stella L., Torres D. F., Coti Zelati F., Ghedina A., Meddi F., Sanna A., Casella P., Dallilar Y., Eikenberry S., Israel G. L., Onori F., Piranomonte S., Bozzo E., Burderi L., Campana S., de Martino D., Di Salvo T., Ferrigno C., Rea N., Riggio A., Serrano S., Veledina A., and Zampieri L. // *arXiv e-prints.* — 2019. — P. arXiv:1904.10433. — 1904.10433.

- [36] A Parallax Distance and Mass Estimate for the Transitional Millisecond Pulsar System J1023+0038 / Deller A. T., Archibald A. M., Brisken W. F., Chatterjee S., Janssen G. H., Kaspi V. M., Lorimer D., Lyne A. G., McLaughlin M. A., Ransom S., Stairs I. H., and Stappers B. // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 756, no. 2. — P. L25. — 1207.5670.
- [37] A Radio Pulsar/X-ray Binary Link / Archibald A. M., Stairs I. H., Ransom S. M., Kaspi V. M., Kondratiev V. I., Lorimer D. R., McLaughlin M. A., Boyles J., Hessels J. W. T., Lynch R., van Leeuwen J., Roberts M. S. E., Jenet F., Champion D. J., Rosen R., Barlow B. N., Dunlap B. H., and Remillard R. A. // *Science*. — 2009. — Vol. 324, no. 5933. — P. 1411. — 0905.3397.
- [38] High-temporal resolution multimode photospectropolarimeter / Plokhotnichenko V. L., Beskin G. M., de Bur V. G., Karpov S. V., Bad'in D. A., Lyubetskaya Z. V., Lyubetskij A. P., and Pavlova V. V. // *Astrophysical Bulletin*. — 2009. — Vol. 64, no. 3. — P. 308–316.
- [39] Timing Observations of PSR J1023+0038 During a Low-mass X-Ray Binary State / Jaodand A., Archibald A. M., Hessels J. W. T., Bogdanov S., D'Angelo C. R., Patruno A. r., Bassa C., and Deller A. T. // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 830, no. 2. — P. 122. — 1610.01625.
- [40] Large M. I., Vaughan A. E., Wielebinski R. Pulsar Search at the Molonglo Radio Observatory // *Nature*. — 1968. — Vol. 220, no. 5169. — P. 753–756.
- [41] 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. — astro-ph/0207156.
- [42] Yao J. M., Manchester R. N., Wang N. A New Electron-density Model for Estimation of Pulsar and FRB Distances // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 835, no. 1. — P. 29. — 1610.09448.

- [43] Tracking the Footprints of the Radio Pulsar B1727-47: Proper Motion, Host Supernova Remnant, and the Glitches / Shternin P., Kirichenko A., Zyuzin D., Yu M., Danilenko A., Voronkov M., and Shibano Y. // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 877, no. 2. — P. 78. — 1904.06368.
- [44] Proper motion of the radio pulsar B1727-47 and its association with the supernova remnant RCW 114 / Shternin P. S., Yu M., Kirichenko A. Y., Shibano Y. A., Danilenko A. A., Voronkov M. A., and Zyuzin D. A. // *Journal of Physics Conference Series.* — 2017. — Vol. 932 of *Journal of Physics Conference Series.* — P. 012004. — 1711.02517.