

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук

Тезисы докладов Всероссийской конференции

# ФИЗИКА НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

10 – 14 июля 2023 г.

Санкт-Петербург, 2023

УДК 524.35  
ББК 22.63

**Физика нейтронных звёзд:** тезисы докладов всероссийской конференции  
(Санкт-Петербург, 10–14 июля 2023 г.) / Под ред. А.Ю. Потехина и Д.Г. Яковлева  
– СПб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2023. – 65 с., илл., эл. изд. – ISBN 978-5-93634-071-0.

**Организатор**

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

**При поддержке**

ООО «ИННО-МИР»

**Программный комитет**

А.Ю. Потехин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) – сопредседатель  
Д.Г. Яковлев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) – сопредседатель  
С.И. Блинников (ККТЭФ НИЦ Курчатовский институт, Москва)  
А.М. Быков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург)  
М.Р. Гильфанов (ИКИ РАН, Москва, Санкт-Петербург)  
К.А. Постнов (ГАИШ МГУ, Москва, Санкт-Петербург)  
Ю.Й. Поутанен (Университет Турку, Турку, Финляндия)  
С.А. Тюльбашев (АКЦ ФИАН, Москва)  
П.С. Штернин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург)

**Организационный комитет**

А.А. Кожберов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) – председатель  
Д.А. Байко (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
С.А. Балашев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
Д.П. Барсуков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
А.В. Бобаков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
О.А. Гогличидзе (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
А.В. Иванчик (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
А.Д. Каминкер (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
А.В. Карпова (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
А.Ю. Потехин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
А.И. Чугунов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
Ю.А. Шибанов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
П.С. Штернин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)  
Д.Г. Яковлев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Сборник содержит краткие тезисы докладов на Всероссийской конференции «Физика нейтронных звёзд – 2023». Это двенадцатое широкомасштабное научное мероприятие, посвящённое обсуждению физики и астрофизики нейтронных звёзд и связанных с ними явлений. Оно продолжило серию совещаний и конференций по данной тематике в Санкт-Петербурге, организованных на базе ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 1988, 1992, 1995, 1997, 1999, 2001, 2005, 2008, 2011, 2014 и 2017 годах.

## Содержание

<b>Программа конференции</b>	<b>4</b>
<b>Тезисы докладов</b>	<b>8</b>
М. Д. Афонина, С. Б. Попов, А. В. Бирюков. Магнитовращательная эволюция одиночных нейтронных звёзд . . . . .	8
Д. А. Байко. Об избыточной энтропии и скрытой теплоте в кристаллизирующихся белых карликах . . . . .	9
М. В. Барков. Быстрые радиовсплески . . . . .	9
Д. П. Барсуков, И. К. Морозов, А. Н. Попов. Влияние мелкомасштабного поля на нагрев полярной шапки радиопульсара J0901–4046 . . . . .	10
В. С. Бескин. Три старых вопроса про радиопульсары . . . . .	10
Н. Г. Бескровная, Н. Р. Ихсанов. Альтернативный сценарий нетипичной эволюции периода рентгеновского пульсара 4U 1626–67 . . . . .	11
А. В. Бирюков, Г. М. Бескин. Зависимость наблюдаемого замедления одиночных радиопульсаров от магнитного угла . . . . .	12
С. И. Блинные. Вторичные максимумы потока сверхновых из-за переменности пульсарной накачки и по другим причинам . . . . .	13
А. В. Бобаков, А. В. Карпова, Д. А. Зюзин, Ю. А. Шибанов, А. Ю. Кириченко, С. В. Жариков. Оптические спектроскопические наблюдения четырёх компаньонов миллисекундных пульсаров . . . . .	13
Е. А. Брылякова, С. А. Тюльбашев, М. А. Китаева, В. С. Тюльбашев. Поиск вращающихся радиотранзиентов на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц . . . . .	14
А. С. Винокуров, К. Е. Атапин. Исследование ультраяркого рентгеновского источника V7 Zw 403 ULX в рентгеновском и оптическом диапазонах . . . . .	15
М. А. Гарасёв, Е. В. Деришев, Вл. В. Кочаровский. Формирование циклотронных линий и кинетические неустойчивости в плазме в атмосферах нейтронных звёзд . . . . .	15
М. В. Глушихина, Г. С. Бисноватый-Коган. Нелинейный эффект Холла в цилиндре . . . . .	16
О. А. Гогличидзе, М. Е. Гусаков. Диффузия в сверхтекучих ферми-жидкостных смесях . . . . .	16
М. И. Горностаев. Термализация рентгеновского излучения в водородных атмосферах нейтронных звёзд . . . . .	17
С. А. Гребенев, С. Ю. Жуков, А. В. Худов. Выход излучения ультраярких рентгеновских пульсаров из оболочки, оттекающей от сверхкритического аккреционного диска . . . . .	18
Е. В. Деришев. Послесвечение гамма-всплесков: новые наблюдения и согласованная модель релятивистской ударной волны . . . . .	19
Н. А. Земляков, Н. Н. Щечилин, А. И. Чугунов, М. Е. Гусаков. Мантия нейтронных звёзд: что предсказывают расширенный метод Томаса-Ферми и сжимаемая капельная модель? . . . . .	20
Н. А. Земляков, А. И. Чугунов. Влияние конечных размеров нуклонных кластеров на упругие свойства внутренней коры и мантии нейтронной звезды . . . . .	21
Д. А. Зюзин, А. В. Карпова, Ю. А. Шибанов, С. В. Жариков, А. Ю. Кириченко. Оптические наблюдения двойных систем 4FGL J1838.2+3233 и PSR J1622–0315 . . . . .	21
И. Л. Иосилевский, В. К. Грязнов. Аномальная термодинамика энтропийных фазовых переходов . . . . .	22
А. Ю. Истомина, В. С. Бескин, П. Е. Литвинов. Линия смерти радиопульсаров – «долина смерти» . . . . .	23
Н. Р. Ихсанов, В. Ю. Ким, Н. Г. Бескровная. Темп раскрутки аккреционных пульсаров . . . . .	24
А. Д. Каминкер, А. Ю. Потехин, Д. Г. Яковлев. Внешняя кора нейтронных звёзд как резервуар энергии и регулятор её распространения . . . . .	25
П. Е. Кашаргин, С. В. Сушков. Нейтронные звёзды в теории гравитации с неминимальной производной связью скалярного поля и тензора Эйнштейна . . . . .	26
М. А. Китаева, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей. Влияние межпланетной плазмы на поиск импульсных диспергированных сигналов . . . . .	27
Ф. А. Князев, В. С. Бескин, А. Ю. Истомина, А. Г. Михайленко. О природе трёхгорбых профилей пульсаров . . . . .	28

Ю. А. Ковалев. Эффект Джозефсона в нейтронных звёздах как ключ к физике быстрых радиовсплесков (БРВ, FRB) и пульсаров . . . . .	29
Е. Э. Коломейцев, Д. Н. Воскресенский. Уравнения состояния ядерного вещества. Самоогласованные подходы . . . . .	30
С. А. Корягин. Токовый слой как оптимальный синхротронный мазер на радиопульсаре . . . . .	31
Вл. В. Кочаровский, В. В. Вдовин, А. С. Гаврилов, Е. Р. Кочаровская, С. В. Логвиненко, Е. М. Лоскутов, В. М. Малофеев. Корреляционный анализ динамического спектра радиопульсара B0329+54 методом периодических главных компонент: Определение частотного периода, фазы и дрейфа фарадеевского вращения девяти компонент импульса и структура источника излучения . . . . .	32
К. Ю. Краав, М. Е. Гусаков, Е. М. Кантор. Окна неустойчивости релятивистских $r$ -мод . . . . .	33
Н. И. Крамарев, А. В. Юдин. Учёт раскрутки массивного компонента в модели обдирания нейтронных звёзд для коротких гамма-всплесков . . . . .	33
А. В. Кузин, Г. В. Липунова, Д. Д. Лисицин. Структура аккреционных дисков вокруг нейтронных звёзд . . . . .	34
К. П. Левенфиш, Г. А. Пономарёв, А. Е. Петров, С. С. Фатева, А. Н. Фурсов. Природа двойного тора и прочих рентгеновских структур пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela) . . . . .	34
Г. В. Липунова. Модели сверхкритической аккреции на замагниченные нейтронные звёзды . . . . .	35
Д. Д. Лисицин, Н. И. Шакура. Эффекты перестановочной неустойчивости при дисковой аккреции на замагниченные нейтронные звёзды . . . . .	35
А. А. Лутовинов. Аккрецирующие нейтронные звёзды по наблюдениям СРГ . . . . .	36
И. Ф. Малов, З. В. Кенько. Эволюция углов между осью вращения и магнитным моментом в радиопульсарах . . . . .	36
В. М. Малофеев, Т. В. Смирнова, С. А. Тюльбашев, М. А. Китаева. Новый метод измерения дрейфа субимпульсов пульсаров . . . . .	37
И. Д. Маркозов, А. Ю. Потехин, А. Д. Каминкер. Гидродинамическое моделирование структуры аккреционной колонки рентгеновского пульсара с учётом резонансного рассеяния . . . . .	37
А. А. Матевосян, Д. П. Барсуков. Влияние искривления пространства на момент инерции магнитного поля радиопульсара . . . . .	38
С. А. Михеев, Д. Е. Ланской, А. И. Насакин, С. В. Сидоров, Т. Ю. Третьякова. Влияние особенностей гиперон-нуклонного взаимодействия на характеристики нейтронных звёзд . . . . .	38
С. Г. Моисеенко, Г. С. Бисноватый-Коган. Магниторотационный механизм вспышек сверхновых . . . . .	39
С. В. Мольков, А. А. Лутовинов, В. А. Арефьев, А. Ю. Ткаченко. Наблюдение рентгеновских миллисекундных пульсаров телескопом ART-XC обсерватории СРГ . . . . .	39
Д. И. Нагирнер, Д. Туричина. Однофотонные процессы в сильном магнитном поле . . . . .	40
А. В. Нестеренок. Прохождение гамма-всплеска через молекулярное облако . . . . .	40
Д. Д. Офенгейм, П. С. Штернин, Ц. Пиран. Свойства самоподобия уравнений состояния и кривых масса–радиус нейтронных звёзд . . . . .	41
Д. Д. Офенгейм, М. Е. Гусаков, А. Ю. Потехин. Диссипация магнитного поля в ядрах нейтронных звёзд с мюонами . . . . .	42
И. В. Панов. Проблемы нуклеосинтеза тяжёлых элементов и килоновые . . . . .	43
Г. А. Переверзев, А. В. Бирюков. Оценка параметров эволюции магнитного поля радиопульсаров с учётом эволюции магнитного угла . . . . .	44
А. Е. Петров, К. П. Левенфиш, Г. А. Пономарёв. Реверберация торов двухторовой рентгеновской пульсарной туманности в созвездии Парусов . . . . .	45
Г. А. Пономарёв, К. П. Левенфиш, А. Е. Петров. Джет пульсарной туманности как индикатор движения пульсара относительно среды . . . . .	45
С. Б. Попов. Эволюция магнитного поля нейтронных звёзд . . . . .	46
Н. К. Порайко и Европейская пульсарная сеть. Последние результаты в области детектирования гравитационно-волнового фона с помощью метода пульсарных сетей . . . . .	46
В. А. Потапов, С. А. Андрианов, А. В. Фраерман. Исследование квазипериодических вариаций МПИ пульсаров B0329+54 и B1642–03. Анализ гипотез о планетной системе и медленных глитчах . . . . .	47

М. С. Пширков, С. Б. Попов, П. Г. Тиняков. Нейтронные звёзды и астрофизика частиц . . .	48
А. В. Ридная, Д. Д. Фредерикс, Д. С. Свинкин, А. Л. Лысенко, А. Е. Цветкова, М. В. Уланов. Жёсткое электромагнитное излучение, связанное с быстрыми радиовсплесками, по данным эксперимента <i>Konus-Wind</i> . . . . .	49
Д. А. Румянцев, Т. А. Пухов, М. В. Чистяков. Влияние внешней активной среды на процесс двойного комптоновского рассеяния . . . . .	49
Е. Б. Рыспаева, А. Ф. Холтыгин. Возможное нетепловое рентгеновское излучение звезды HD 110432 . . . . .	50
А. Салганик, С. С. Цыганков, В. Дорошенко, С. В. Мольков, А. А. Лутовинов, А. А. Муштуков, Ю. Поутанен. RX J0440.9+4431: сверхкритический рентгеновский пульсар . . .	51
М. Н. Сатыбалдиев, И. А. Мереминский, А. А. Лутовинов, Д. И. Карасев. Спектральный и временной анализ быстрого рентгеновского транзиента IGR J16195–4945 по данным наблюдений <i>SPG/ART-XC</i> . . . . .	52
Д. С. Свинкин, Д. Д. Фредерикс. Гигантские вспышки магнитаров в близких галактиках .	52
Т. В. Смирнова, М. О. Торопов, С. А. Тюльбашев, В. А. Самодуров. Исследование переменности излучения пульсара B0823+26 от секунд до нескольких лет . . . . .	53
Д. Н. Собьянин. Сверхмедленный радиопульсар со сверхсильным магнитным полем . . . .	53
В. Ф. Сулейманов. Массы и радиусы нейтронных звёзд по данным наблюдений . . . . .	54
Д. А. Теплых, В. М. Малофеев, О. И. Малов, М. А. Тимиркеева, И. Ф. Малов. Обнаружение радиоизлучения от Геминга-подобного гамма-пульсара J1836+5925 . . . . .	54
М. А. Тимиркеева, И. Ф. Малов. Углы между магнитным моментом и осью вращения. Структура магнитосферы пульсаров . . . . .	55
Е. А. Токарева, А. В. Бирюков. Начальное распределение магнитных углов классических радиопульсаров . . . . .	56
С. А. Трушкин, Н. Н. Бурсов, П. Г. Цыбулев, Н. А. Нижельский, А. В. Шевченко. Радиосвойства нейтронных звёзд в рентгеновских двойных системах. Радиопульсары и магнитары . . . . .	57
С. А. Тюльбашев, Г. Э. Тюльбашева, М. А. Китаева, И. Л. Овчинников. Поиск пульсаров на склонениях от $-9^\circ$ до $+55^\circ$ . . . . .	58
Ю. А. Уваров, А. М. Быков. Исследование влияния неоднородностей магнитного поля на спектр излучения гамма-всплеска . . . . .	59
С. С. Фатеева, Г. А. Пономарёв, К. П. Левенфиш, А. Е. Петров, А. Н. Фурсов. Ударно-волновое «начало» подветренного джета двухторовых пульсарных туманностей . . .	59
А. Н. Фурсов, Г. А. Пономарёв, К. П. Левенфиш, А. Е. Петров, С. С. Фатеева. Рентгеновские узелки в пульсарной туманности в созвездии Парусов: цепочка гигантских плазмOIDов? . . . . .	60
А. Д. Хохрякова, А. И. Чугунов, С. Б. Попов, М. Е. Гусаков, Е. М. Кантор. Возможность наблюдения HOFNARs на <i>SRG/eROSITA</i> . . . . .	60
С. С. Цыганков. Поляризованное излучение рентгеновских пульсаров по данным обсерватории <i>IXPE</i> . . . . .	61
В. Д. Чернососов, В. И. Цуркис, Д. С. Загоруля, В. С. Бескин. К морфологии средних профилей ортогональных интеримпульсных пульсаров . . . . .	61
А. Ю. Чигвинцев, И. Л. Иосилевский, Л. Ю. Ногинова, И. Г. Зорина. Аномалии равновесного профиля пространственного заряда как специфическое проявление фазовых переходов в модифицированной модели однокомпонентной плазмы . . . . .	62
А. И. Чугунов. Фундаментальные свойства коры нейтронных звёзд . . . . .	62
А. И. Чугунов, Д. А. Зюзин, А. В. Карпова, А. Ю. Кириченко, М. Е. Гусаков. Источник X5 в шаровом скоплении 47 Тукана: HOFNAR или qLMXB? . . . . .	63
Е. М. Чуразов. Диагностика газа в гало Галактики остатками вспышек сверхновых . . . .	64
Ю. А. Шибанов, В. Ю. Абрамкин, Д. А. Зюзин, А. В. Карпова, А. Ю. Потехин, А. С. Танашкин. Наблюдения нейтронных звёзд в одиночных и двойных системах на крупных телескопах и космических обсерваториях . . . . .	64
П. С. Штернин, Д. Д. Оффенгейм, С. О. Heinke, W. C. G. Ho. Остывание нейтронной звезды в остатке сверхновой Кассиопея А по данным наблюдений <i>Chandra</i> во всех режимах наблюдений . . . . .	65
А. В. Юдин. Гамма-всплески в модели обдирания двойных нейтронных звёзд . . . . .	65

## ПРОГРАММА

Значком † отмечены докладчики, выступающие удалённо по видеосвязи.

### 10 июля, понедельник

- 09:15 Регистрация
- 10:15 Открытие конференции
- 10:25 А.А. Лутовинов. Аккрецирующие нейтронные звёзды по наблюдениям СРГ
- 11:05 С.В. Мольков. Наблюдение рентгеновских миллисекундных пульсаров телескопом ART-XC обсерватории СРГ
- 11:30 Перерыв на кофе
- 12:00 Е.М. Чуразов.† Диагностика газа в гало Галактики остатками вспышек сверхновых
- 12:40 Д.И. Нагирнер. Однофотонные процессы в сильном магнитном поле
- 13:05 И.Д. Маркозов. Гидродинамическое моделирование структуры аккреционной колонки рентгеновского пульсара с учётом резонансного рассеяния
- 13:30 ОБЕД
- 15:00 Г.В. Липунова.† Модели сверхкритической аккреции на замагниченные нейтронные звёзды
- 15:40 А.В. Кузин. Структура аккреционных дисков вокруг нейтронных звёзд
- 16:05 Д.Д. Лисицин. Эффекты перестановочной неустойчивости при дисковой аккреции на замагниченные нейтронные звёзды
- 16:30 Перерыв на кофе
- 17:00 А. Салганик. RX J0440.9+4431: сверхкритический рентгеновский пульсар
- 17:25 Е.В. Деришев. Послесвечение гамма-всплесков: новые наблюдения и согласованная модель релятивистской ударной волны
- 18:05 А.В. Нестеренок. Прохождение гамма-всплеска через молекулярное облако
- 18:30 Окончание 1-го дня заседаний

**11 июля, вторник**

- 10:00 Ю.А. Шибанов. Наблюдения нейтронных звёзд в одиночных и двойных системах на крупных телескопах и космических обсерваториях
- 10:40 Д.А. Зюзин. Оптические наблюдения двойных систем 4FGL J1838.2+3233 и PSR J1622–0315
- 11:05 Е.Б. Рыспаева. Возможное нетепловое рентгеновское излучение звезды HD 110432
- 11:30 Перерыв на кофе
- 12:00 В.Ф. Сулейманов.† Массы и радиусы нейтронных звёзд по данным наблюдений
- 12:40 Д.Н. Собьянин. Сверхмедленный радиопульсар со сверхсильным магнитным полем
- 13:05 Н.Р. Ихсанов. Темп раскрутки аккреционных пульсаров
- 13:30 ОБЕД
- 15:00 М.В. Барков. Быстрые радиовсплески
- 15:40 А.В. Ридная. Жёсткое электромагнитное излучение, связанное с быстрыми радиовсплесками, по данным эксперимента Konus-Wind
- 16:05 Д.С. Свинкин. Гигантские вспышки магнитаров в близких галактиках
- 16:30 С.Г. Моисеенко. Магниторотационный механизм вспышек сверхновых
- 17:10 Окончание устных докладов. Обсуждение стендовых докладов.

**12 июля, среда**

- 10:00 Е.Э. Коломейцев. Уравнения состояния нейтронных звёзд
- 10:40 С.А. Михеев. Влияние особенностей гиперон-нуклонного взаимодействия на характеристики нейтронных звёзд
- 11:05 Д.Д. Офенгейм.† Свойства самоподобия уравнений состояния и кривых масса–радиус нейтронных звёзд
- 11:30 Перерыв на кофе
- 12:00 С.И. Блинные. Вторичные максимумы потока сверхновых из-за переменности пульсарной накачки и по другим причинам
- 12:25 А.В. Юдин. Гамма-всплески в модели обдираания двойных нейтронных звёзд
- 13:05 Н.И. Крамарев. Учёт раскрутки массивного компонента в модели обдираания нейтронных звёзд для коротких гамма-всплесков
- 13:30 ОБЕД
- 15:00 И.В. Панов. Проблемы нуклеосинтеза тяжёлых элементов и килоновые
- 15:40 С.А. Гребенев. Выход излучения ультраярких рентгеновских пульсаров из оболочки, оттекающей от сверхкритического аккреционного диска
- 16:05 А.С. Винокуров. Исследование ультраяркого рентгеновского источника VII Zw 403 ULX в рентгеновском и оптическом диапазонах
- 16:30 Перерыв на кофе
- 17:00 С.С. Цыганков.† Поляризованное излучение рентгеновских пульсаров по данным обсерватории IXPE
- 17:40 А.Д. Хохрякова.† Возможность наблюдения HOFNARs на SRG/eROSITA
- 18:05 Окончание 3-го дня заседаний

**13 июля, четверг**

- 10:00 М.С. Пширков. Нейтронные звёзды и астрофизика частиц
- 10:40 Д.А. Теплых. Обнаружение радиоизлучения от Геминга-подобного гамма-пульсара J1836+5925
- 11:05 В.М. Малофеев. Новый метод измерения дрейфа субимпульсов пульсаров
- 11:30 Перерыв на кофе
- 12:00 С.А. Трушкин. Радиосвойства нейтронных звёзд в рентгеновских двойных системах. Радиопульсары и магнитары
- 12:40 С.А. Тюльбашев. Поиск пульсаров на склонениях от  $-9^\circ$  до  $+55^\circ$
- 13:05 Вл.В. Кочаровский. Корреляционный анализ динамического спектра радиопульсара PSR B0329+54 методом периодических главных компонент: Определение частотного периода, фазы и дрейфа фарадеевского вращения девяти компонент импульса и структура источника излучения
- 13:30 ОБЕД
- 15:00 Т.В. Смирнова. Исследование переменности излучения пульсара B0823+26 от секунд до нескольких лет
- 15:25 В.А. Потапов. Исследование квазипериодических вариаций МПИ пульсаров B0329+54 и B1642-03. Анализ гипотез о планетной системе и медленных глитчах
- 15:50 В.С. Бескин. Три старых вопроса про радиопульсары
- 16:30 Перерыв на кофе
- 17:00 А.В. Бирюков. Зависимость наблюдаемого замедления одиночных радиопульсаров от магнитного угла
- 17:25 И.Ф. Малов. Эволюция углов между осью вращения и магнитным моментом в радиопульсарах
- 17:50 М.А. Тимиркеева. Углы между магнитным моментом и осью вращения. Структура магнитосферы пульсаров
- 18:15 Окончание 4-го дня заседаний
- 19:00 БАНКЕТ



**14 июля, пятница**

- 10:15 К.П. Левенфиш. Природа двойного тора и прочих рентгеновских структур пульсарной туманности в созвездии Парусов
- 10:40 Г.А. Пономарёв. Джет пульсарной туманности как индикатор движения пульсара относительно среды
- 11:05 А.Е. Петров. Реверберация торов двухторовой рентгеновской туманности пульсара в созвездии Парусов
- 11:30 Перерыв на кофе
- 12:00 А.И. Чугунов. Фундаментальные свойства коры нейтронных звёзд
- 12:40 Н.А. Земляков. Мантия нейтронных звёзд: что предсказывают расширенный метод Томаса-Ферми и сжимаемая капельная модель?
- 13:05 И.Л. Иосилевский.† Аномальная термодинамика энтропийных фазовых переходов
- 13:30 ОБЕД
- 15:00 Д.А. Байко. Об избыточной энтропии и скрытой теплоте в кристаллизующихся белых карликах
- 15:25 А.Д. Каминкер. Внешняя кора нейтронных звёзд как резервуар энергии и регулятор её распространения
- 15:50 С.Б. Попов.† Эволюция магнитного поля нейтронных звёзд
- 16:30 Перерыв на кофе
- 17:00 Н.К. Порайко. Последние результаты в области детектирования гравитационно-волнового фона с помощью метода пульсарных сетей
- 17:25 П.С. Штернин. Остывание нейтронной звезды в остатке сверхновой Кассиопея А по данным наблюдений Chandra во всех режимах наблюдений
- 17:50 Закрытие конференции
- 

Значком † отмечены докладчики, выступающие удалённо по видеосвязи.

## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

(Подчёркиванием отмечены соавторы, представляющие доклад.)

### Магнитовращательная эволюция одиночных нейтронных звёзд

М. Д. Афонина<sup>1\*</sup>, С. Б. Попов<sup>2,1</sup>, А. В. Бирюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ

<sup>2</sup>ИСТР, Триест, Италия

Среди нейтронных звёзд, излучающих в рентгеновском диапазоне, до сих пор не известно ни одного представителя одиночных аккрецирующих нейтронных звёзд. Однако с помощью приборов спутника Спектр-РГ потенциально возможно обнаружение аккрецирующих одиночных нейтронных звёзд в качестве слабых источников рентгеновского излучения; поэтому задача изучения этой популяции объектов представляет интерес. Недавнее обнаружение двух долгопериодических источников радиоизлучения, пульсара PSR J0901–4046 [1] и GLEAM-X J162759.3–523504.3 (далее – GLEAM-X J1627) [2] с периодами 76 с и 1091 с соответственно, показало наличие популяции объектов – источников периодического радиоизлучения с большими периодами. Такие объекты имеют большой шанс в скором времени в ходе магнитовращательной эволюции стать представителями ещё не открытого класса объектов: одиночных аккрецирующих нейтронных звёзд. Так как эволюция нейтронных звёзд зависит от многих процессов и параметров, в нашей работе представлены исследования простой модели магнитовращательной эволюции одиночной нейтронной звезды с учётом явлений, которые могут оказать наибольшее влияние. Например, в начале своей эволюции нейтронная звезда может испытать короткий этап аккреции внутренних оболочек сверхновой (явление возвратной аккреции [3]), что может значительно изменить магнитное поле или период вращения. Эволюция нейтронной звезды во многом зависит от значения напряжённости магнитного поля, поэтому также важно рассмотрение различных моделей затухания поля. В нашей работе представлены результаты моделирования эволюции одиночной нейтронной звезды с учётом возвратной аккреции и разных моделей затухания магнитного поля. Рассмотрение эволюции долгопериодических радиосточников PSR J0901–4046 и GLEAM-X J1627 показало, что время выхода этих объектов на стадию аккреции при реалистичных параметрах много меньше возраста Галактики.

#### Список литературы

- [1] K. Rajwade, B. Stappers, C. Williams, et al., Proceedings of the SPIE, 11447, 114470J (2020).
- [2] N. Hurley-Walker, X. Zhang, A. Bahramian, et al., Nature, 601, 526 (2022).
- [3] R. A. Chevalier, Astrophys. J., 346, 847 (1989).

---

\*E-mail: afonina.md19@physics.msu.ru

## Об избыточной энтропии и скрытой теплоте в кристаллизующихся белых карликах

Д. А. Байко\*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

В рамках приближения линейного смешивания рассчитано значение скрытой теплоты кристаллизации для полностью ионизированных смесей  $^{12}\text{C}/^{16}\text{O}$  и  $^{16}\text{O}/^{20}\text{Ne}$  в ядрах белых карликов (БК) для двух различных параметризаций поправок к энергиям линейного смешения и с учётом квантовых эффектов ионов. Обнаружены заметные отклонения избыточной энтропии от стандартного значения 0.77 на ион в обоих направлениях в зависимости от состава вещества. Тем же методом оценивается избыточная энтропия и выделяемое или поглощаемое тепло, сопровождающее процесс расслаивания в затвердевших слоях БК. Показано, что этот эффект важен для надёжной интерпретации данных об остывании БК [1].

### Список литературы

- [1] D. A. Baiko, Mon. Not. R. Astron. Soc., 522, L26 (2023)

---

\*E-mail: baiko@astro.ioffe.ru

## Быстрые радиовсплески

М. В. Барков\*

ИНАСАН

Быстрые радио всплески (FRB) являются одними из самых загадочных явлений современной астрофизики. Недавние одновременные наблюдения FRB и рентгеновской вспышки от SGR 1935+2154 позволяют нам связать FRB с нейтронными звёздами с очень сильным магнитным полем. Механизм излучения короткого (1 мс), но мощного ( $10^{42}$  эрг/с) импульса заставляет рассматривать самые экстремальные модели. Оказалось, что миллисекундный всплеск достаточной мощности может генерироваться синхротронным мазерным излучением, возникающим на обратной ударной волне, которое распространяется через слабо замагниченную среду, образующуюся при вспышке магнитара. Если мазерное излучение генерируется в анизотропном режиме (из-за геометрии области рождения или наличия мощного внешнего источника стимулирующих фотонов), то длительность мазерных радиовсплесков близка к длительности вспышки магнитара даже если радиус фронта ударной волны велик ( $10^{15}$  см). Такой сценарий позволяет смягчить требования к нескольким ключевым параметрам: напряжённости магнитного поля в месте образования, светимости вспышки и лоренц-фактору течения в излучающей области. Чтобы проверить работоспособность этой модели, мы изучаем статистическую связь между мощными магнитарными вспышками и частотой FRB. Ожидаемое отношение получено путем свёртки плотности магнитаров, зависящей от красного смещения, с функцией светимости их вспышек выше энергетического предела, определяемого порогом обнаружения FRB. Мы получаем, что только небольшая часть ( $\sim 10^{-5}$ ) мощных магнитарных вспышек вызывает FRB. Это соотношение на удивление хорошо согласуется с нашими оценками: мы получили, что 10% магнитаров должны находиться в эволюционной фазе, подходящей для производства FRB, и только  $10^{-4}$  всех вспышек предполагается слабо замагниченными (что является необходимым условием для высокочастотного мазерного излучения). Также мы предлагаем модель формирования периодического импульсного излучения быстрых радиовсплесков как следствие поглощения радиоизлучения в плотном звёздном ветре нормальной массивной звезды, входящей в двойную систему.

---

\*E-mail: barkov@inasan.ru

## Влияние мелкомасштабного поля на нагрев полярной шапки радиопульсара J0901–4046

Д. П. Барсуков\*, И. К. Морозов, А. Н. Попов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Рассматривается влияние мелкомасштабного магнитного поля на нагрев полярной шапки пульсара J0901–4046 обратным током позитронов. Показано, что при некоторых конфигурациях мелкомасштабного поля светимость его полярной шапки может достигать  $10^{25}$  эрг/с.

---

\*E-mail: bars.astro@mail.ioffe.ru

## Три старых вопроса про радиопульсары

В. С. Бескин<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>ФИАН

<sup>2</sup>МФТИ

<sup>3</sup>НИЦ Курчатовский институт

Прошло уже более пятидесяти лет после открытия радиопульсаров, а до сих пор есть несколько простых вопросов, сформулированных ещё в семидесятые годы прошлого века, на которые всё ещё нет ответа. И это при том, что на многих направлениях в последние годы действительно достигнут несомненный прогресс. Обсуждению трёх таких вопросов и посвящен мой доклад, который посвящается памяти ушедших от нас Я.Н. Истомина и Б.В. Комберга, с которыми эти вопросы активно обсуждались все эти годы. Первый вопрос связан с количеством типов радиоволн, которые могут распространяться в магнитосфере нейтронной звезды. На протяжении многих лет считалось, что таких волн три. Об этом говорил и Д. Мельроуз на последней конференции по физике нейтронных звёзд. В то же время наш анализ показывал, что таких волн четыре. Причина такого противоречия заключалась, однако, просто в неточности формулировок (речь шла о разных системах отсчёта), и в итоге удалось прийти к согласию. Хотя в системе покоя плазмы есть только три моды, решение с отрицательной частотой (которая традиционно не рассматривается как четвертая мода) в лабораторной системе отсчёта трансформируется в дополнительное решение с положительной частотой, распространяющееся вперёд в системе покоя нейтронной звезды. Второй вопрос связан с определением направления эволюции угла наклона магнитной оси нейтронной звезды к оси вращения. Существует твёрдое убеждение, что наблюдения однозначно свидетельствуют в пользу эволюции в область малых углов (alignment). На наш взгляд, это не так. Будут повторены аргументы, показывающие, что наблюдения не позволяют сделать выбор о направлении эволюции угла. Наконец, третий вопрос касается определения т.н. линии смерти пульсаров на диаграмме  $P - \dot{P}$  в модели Рудермана – Сазерленда. В своей первоначальной версии эта линия проходила значительно выше нижней границы популяции радиопульсаров, и поэтому предпринимались многочисленные попытки учесть дополнительные обстоятельства, которые бы позволили согласовать эту модель с наблюдениями. При этом один из возможных ответов заключался в учёте недипольности магнитного поля у поверхности нейтронной звезды. Однако можно показать, что аккуратный (и одновременный) учёт всех хорошо известных поправок (эффекты общей теории относительности, разброс по величинам радиусов, масс и моментов инерции нейтронных звёзд, а также учёт реального спектра изгибного излучения) позволяют согласовать теорию и наблюдения и для дипольного магнитного поля.

---

\*E-mail: beskin@lpi.ru

## Альтернативный сценарий нетипичной эволюции периода рентгеновского пульсара 4U 1626–67

Н. Г. Бескровная<sup>1,2\*</sup>, Н. Р. Ихсанов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН

<sup>2</sup>САО РАН

<sup>3</sup>ИПА РАН

В течение 40 лет наблюдений рентгеновского пульсара 4U 1626–67 было зарегистрировано два события реверса знака производной его периода. Монотонное замедление вращения нейтронной звезды в этом источнике наблюдалось с момента его открытия вплоть до 1991 года. Затем период пульсара столь же монотонно и с тем же абсолютным значением темпа стал уменьшаться. В 2008 году производная периода пульсара вновь сменила знак, и нейтронная звезда перешла в стадию монотонного торможения своего вращения с прежними параметрами. Изменения знака производной периода происходили без каких-либо резких изменений остальных параметров пульсара, которые в течение всего времени наблюдений претерпевали лишь относительно небольшие вариации [1,2]. Объяснить столь нетипичную эволюцию периода пульсара в рамках принятого в настоящее время сценария аккреции вещества на нейтронную звезду из кеплеровского аккреционного диска без дополнительных весьма неочевидных предположений оказывается затруднительно. Альтернативой является сценарий аккреции из некеплеровского магнитного аккреционного диска, обсуждаемый в нашем докладе. Механизм обмена угловым моментом между звездой и аккреционным диском, как и величина внутреннего радиуса диска, предлагаемые в этом сценарии, отличаются от общепринятых, но позволяют описать основные параметры наблюдаемой ротационной эволюции пульсара и указать на возможную причину реверса знака производной его периода.

### Список литературы

- [1] A. Camero-Arranz, M. H. Finger, N. R. Ikhsanov, C. A. Wilson-Hodge, E. Beklen, *Astrophys. J.*, 708, 1500 (2010)
- [2] A. Camero-Arranz, K. Pottschmidt, M. H. Finger, N. R. Ikhsanov, C. A. Wilson-Hodge, D. M. Marcu, *Astron. Astrophys.*, 546, A40 (2012)

---

\*E-mail: beskrovnaya@yahoo.com

## Зависимость наблюдаемого замедления одиночных радиопульсаров от магнитного угла

А. В. Бирюков<sup>1,2,3\*</sup>, Г. М. Бескин<sup>4,3</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ

<sup>2</sup>Физический факультет НИУ ВШЭ

<sup>3</sup>Институт физики КФУ

<sup>4</sup>САО РАН

Наиболее используемая модель для потерь вращательной энергии одиночной нейтронной звездой предполагает, что темп этих потерь зависит от магнитного угла звезды как  $P\dot{P} \propto \mu^2(k_0 + k_1 \sin^2 \alpha)$ . Здесь  $P$  и  $\dot{P}$  это период вращения звезды и его производная,  $\mu$  – дипольный магнитный момент, безразмерные параметры  $k_0 \sim k_1 \sim 1$ , а угол  $\alpha$  и есть угол между магнитной осью и осью вращения – *магнитный угол* [1]. В нашей работе мы проверяем, совместимы ли имеющиеся наблюдательные данные с предсказанным видом зависимости  $\dot{P}(\alpha)$ . Для этого мы сравниваем различие в распределениях параметра  $P\dot{P}$  у 50 почти ортогональных (со значениями  $\alpha$ , сравнимыми с 90 градусов) и у 27 почти выровненных (с малыми  $\alpha$ ) пульсаров со значениями, рассчитанными теоретически на основе модели [1]. Поскольку в этой модели величина  $P\dot{P}$  не зависит от периода вращения явно, то единственным свободным параметром в теоретическом расчёте оказывается среднее отношение магнитных моментов  $\langle \mu_{\perp} / \mu_{\parallel} \rangle$  ортогональных и выровненных пульсаров. В итоге мы находим, что имеющиеся наблюдения не противоречат модели [1] при условии, что магнитные поля ортогональных пульсаров систематически, на  $\sim 0.15 - 0.2$  порядка величины больше, чем поля выровненных. Кроме того, сравнивая замедления пульсаров двух типов с близкими периодами, мы получили независимую дополнительную оценку на показатель замедления (braking index)  $n$  для одиночных радиопульсаров. Использованные данные соответствуют интервалу  $1 \leq n \leq 4$  на уровне значимости 99%. С деталями работы можно ознакомиться в публикации [2].

### Список литературы

- [1] A. Philippov, A. Tchekhovskoy, J. G. Li, Mon. Not. R. Astron. Soc., 441, 1879 (2014)
- [2] A. Biryukov, G. Beskin, Mon. Not. R. Astron. Soc., 522, 6258 (2023)

---

\*E-mail: ant.biryukov@gmail.com

## Вторичные максимумы потока сверхновых из-за переменности пульсарной накачки и по другим причинам

С. И. Блинников<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ККТЭФ НИЦ Курчатовский институт

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ

Наблюдения показывают, что сверхмощные сверхновые иногда имеют кривые блеска с множественными пиками светимости. Причина такого поведения потоков неизвестна, но в популярной модели с пульсарной накачкой (торможение вращения «магнитара») оно может быть вызвано изменениями темпа этой накачки. С помощью нашего радиационно-гидродинамического кода мы получили, что временное увеличение накачки может привести к вторичным пикам светимости. Обнаружено, что повышение накачки сопровождается значительным повышением температуры фотосферы выброса сверхновой, а радиус фотосферы существенно не изменяется. У некоторых сверхновых именно это поведение и наблюдается, у других нет. Мы указываем, какие элементы магнитарной модели не доработаны, и обсуждаем другие механизмы, которые могут объяснить наблюдаемое поведение потоков сверхновых.

---

\*E-mail: sblinnikov@bk.ru

## Оптические спектроскопические наблюдения четырёх компаньонов миллисекундных пульсаров

А. В. Бобаков<sup>1\*</sup>, А. В. Карпова<sup>1</sup>, Д. А. Зюзин<sup>1</sup>, Ю. А. Шибанов<sup>1</sup>,  
А. Ю. Кириченко<sup>1,2</sup>, С. В. Жариков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А. Ф. Иоффе

<sup>2</sup>Instituto de Astronomía, UNAM, Мехико, Мексика

В этой работе мы представляем результаты оптических спектральных наблюдений компаньонов четырех миллисекундных пульсаров: J0621+2514, J2317+1439, J2302+4442 (наблюдались с помощью Большого Канарского телескопа), и J0214+5222 (наблюдавшегося на телескопе Gemini). В спектрах компаньонов J0621+2514 и J0214+5222 хорошо различимы бальмеровские линии поглощения, что позволяет отождествить их с белыми карликами с водородными атмосферами (DA-типа). В спектрах компаньонов J2317+1439 и J2302+4442 спектральные линии неразличимы, однако фотометрические данные и форма спектров позволяют предположить, что они также являются белыми карликами типа DA. Основываясь на анализе спектров компаньонов, мы нашли, что компаньоны пульсаров J0214+5222, J0621+2514 и J2317+1439 имеют температуры  $27000 \pm 500$  К,  $8600 \pm 200$  К и  $9600 \pm 200$  К, соответственно. Для компаньона пульсара J2302+4442 мы установили верхний предел температуры, составивший 6000 К. Таким образом, компаньон J0214+5222 является одним из самых горячих среди известных белых карликов – компаньонов пульсаров, тогда как компаньон J2302+4442 – одним из самых холодных. Также получены ограничения на другие параметры этих объектов. В частности,  $T_{\text{eff}} = 8600 \pm 200$  К и  $T_{\text{eff}} = 9600 \pm 200$  К соответственно. Для компаньона пульсара J2302+4442 мы установили верхний предел температуры  $T_{\text{eff}} < 6000$  К, что и делает его одним из самых холодных из известных белых карликов. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-22-00921, <https://rscf.ru/project/22-22-00921/>.

---

\*E-mail: bobakov\_alex@mail.ru

## Поиск вращающихся радиотранзиентов на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц

Е. А. Брылякова<sup>1\*</sup>, С. А. Тюльбашев<sup>1</sup>, М. А. Китаева<sup>1</sup>, В. С. Тюльбашев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПРАО АКЦ ФИАН

<sup>2</sup>ООО Яндекс

В 2007 году в архивных данных обсерватории Паркса были обнаружены импульсы длительностью несколько миллисекунд [1]. Оказалось, что они принадлежат редкому виду пульсаров, называемых вращающимися радиотранзиентами (RRATs). Отличительной особенностью этих объектов является нерегулярное излучение (интервалы между импульсами составляют от минут до десятков часов). Причина спорадического излучения объектов типа RRAT на сегодняшний день остаётся неизвестной. По современным представлениям неоспоримо лишь то, что они являются быстровращающимися нейтронными звёздами, которые обнаруживаются по излучению их отдельных импульсов. Исследования RRAT затруднены. Так как появление импульсов этих объектов непредсказуемо, а интервал времени между обнаруживаемыми импульсами велики, то для их исследования необходимо большое наблюдательное время. Помимо наблюдательного времени, необходимо также иметь высокую мгновенную чувствительность радиотелескопа, так как импульсы RRAT, как и импульсы обычных пульсаров, слабые. Поэтому до настоящего момента, поиск RRAT проходит на крупнейших в мире телескопах. С августа 2014 года на радиотелескопе БСА ФИАН (Пушино), проводятся круглосуточные наблюдения, используемые в том числе и для поиска пульсаров. Переобработка полученных данных позволила обнаружить множество новых RRAT [2, 3]. В докладе мы представляем результаты обработки кандидатов в RRAT, которые были обнаружены в данных БСА ФИАН в 2014–2015 годах. Поиск RRAT проводился до значений меры дисперсии  $DM < 100$  пк/см<sup>3</sup>. При проверке 164 кандидатов удалось обнаружить 16 новых RRAT. Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>).

### Список литературы

- [1] M. McLaughlin, A. G. Lyne, D. Lorimer, et. al., *Nature*, 817 (2006)
- [2] С. А. Тюльбашев, В. С. Тюльбашев, В. М. Малофеев и др., *Астрон. журн.*, 95, 68 (2018)  
[S. A. Tyulbashev, V. S. Tyulbashev, V. M. Malofeev, et al., *Astron. Rep.*, 62, 63 (2018)]
- [3] S. A. Tyulbashev, V. S. Tyulbashev, V. M. Malofeev, *Astron. Astrophys.*, 618, A70 (2018)

---

\*E-mail: elinxt@bk.ru



## Исследование ультраяркого рентгеновского источника VII Zw 403 ULX в рентгеновском и оптическом диапазонах

А. С. Винокуров<sup>1\*</sup>, К. Е. Атапин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>САО РАН

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ

В работе представлены результаты анализа рядов рентгеновских наблюдений, фотометрического и спектрального мониторинга ультраяркого рентгеновского источника VII Zw 403 ULX (UGC 6456 ULX), чьим аккретором по косвенным признакам является нейтронная звезда. Анализ данных *Swift*/XRT и данных фотометрии, полученной на телескопах САО РАН и КГО ГАИШ МГУ, выявил вспышечный характер переменности данного источника, амплитуда которой составляет примерно в 100 раз в диапазоне 0.3–10 кэВ с пиковой светимостью около  $10^{40}$  эрг/с, и примерно в 4 раза в полосе V с видимой звёздной величиной 20.2 в максимуме блеска. Спектральные наблюдения источника, выполненные на 6-м телескопе САО РАН, показали наличие сильно переменных эмиссионных линий бальмеровской серии водорода, нейтрального и ионизованного гелия. Обнаружена корреляция параметров эмиссии He II  $\lambda 4686$  (с коэффициентом корреляции R до  $\approx 0.9$ ) с оптическим блеском VII Zw 403 ULX и получены ограничения на степень корреляции параметров остальных линий; предложена интерпретация результатов наблюдений.

---

\*E-mail: vinokurov@sao.ru

## Формирование циклотронных линий и кинетические неустойчивости в плазме в атмосферах нейтронных звёзд

М. А. Гарасёв\*, Е. В. Дерিশев, Вл. В. Кочаровский

ИПФ РАН

Рассматриваются особенности переноса поляризованного циклотронного излучения в сильно-замагниченной плазме, характерной для атмосфер нейтронных звёзд. Особое внимание уделено перераспределению излучения по частоте внутри циклотронной линии. В частности, детально исследована статистика перераспределения фотонов по частоте при переносе гирорезонансного излучения в условиях, характерных для компактных звёзд. Найдены вероятности выхода фотонов за одно рассеяние из рассеивающей атмосферы произвольной оптической толщины. Смоделированы эффекты диффузии гирорезонансных фотонов в пространстве и по частоте. Показано, что при выходе фотонов из полубесконечной атмосферы с малым поглощением эффекты перераспределения по частоте приводят к значительному росту вероятности выхода фотонов с больших оптических толщин, а следовательно, существенно модифицируют динамику переноса фотонов гирорезонансного излучения в атмосферах нейтронных звёзд. Рассмотрен один из сценариев возникновения кинетических неустойчивостей в плазме под действием силы давления излучения в циклотронной линии. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10111).

---

\*E-mail: garasev@ipfran.ru

## Нелинейный эффект Холла в цилиндре

М. В. Глушихина<sup>1\*</sup>, Г. С. Бисноватый-Коган<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЛИ РАН

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ

Рассматривается модель плазменного цилиндра с однородным магнитным полем вдоль его оси и радиальным градиентом температуры. При больших температурных градиентах азимутальный электрический ток Холла создаёт осевое магнитное поле, напряжённость которого может быть сравнима с напряжённостью исходного поля. Показано, что магнитное поле, созданное азимутальным током Холла, приводит к уменьшению магнитного поля, создаваемого внешними источниками, и чем больше величина электрического тока, связанного с градиентом температуры, тем больше уменьшение внешнего магнитного поля. Полученные результаты необходимы для исследования влияния тока Холла на эволюцию магнитного и электрического полей в нейтронных звёздах, белых карликах и, возможно, в лабораторных условиях.

---

\*E-mail: m.glushikhina@cosmos.ru

## Диффузия в сверхтекучих ферми-жидкостных смесях

О. А. Гогличидзе<sup>\*</sup>, М. Е. Гусаков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Для корректной интерпретации наблюдательных данных требуется развитая теория, описывающая (магнито)гидродинамические процессы в нейтронных звёздах, такие как эволюция магнитного поля, а также возбуждение и затухание различных колебательных процессов. В частности, требуется аккуратный учёт механизмов диссипации энергии. Внутренние слои нейтронных звёзд состоят из смесей сильно взаимодействующих ферми-частиц: лептонов (электронов и мюонов) и барионов (нейтронов, протонов, гиперонов), причём последние могут находиться в сверхтекучем/сверхпроводящем состоянии. Таким образом, наряду с прочими механизмами диссипации должна рассматриваться и диффузия различных сортов частиц относительно друг друга. Последовательный расчёт должен учитывать как столкновения между квазичастицами, так и недиссипативное взаимодействие между ними. Данная работа посвящена учёту недиссипативных взаимодействий при расчёте диффузионных токов в сверхтекучих смесях в рамках теории ферми-жидкости Ландау. Для исследования диффузии в сверхтекучих смесях требуется ввести нормальные (не сверхтекучие) токи для различных сортов частиц. Для описания таких токов вводятся скорости, являющиеся сопряжёнными переменными к плотностям импульсов, ассоциированным с соответствующими сортами частиц. Показано, что эти скорости могут быть интерпретированы как скорости переноса парциальных энтропий различных компонент смеси. Вводятся матрицы, связывающие нормальные токи частиц с соответствующими плотностями импульсов и скоростями парциальных энтропий. Получены аналитические выражения для коэффициентов диффузии, связывающих диффузионные токи с градиентами химических потенциалов. Результаты работы могут быть использованы в качестве отправной точки для систематических расчётов коэффициентов диффузии (а также других кинетических коэффициентов) в сверхтекучих ферми-смесях, в частности, в сверхтекучих нейтронных звёздах. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-12-00048.

---

\*E-mail: goglichidze@gmail.com

## Термализация рентгеновского излучения в водородных атмосферах нейтронных звёзд

М. И. Горностаев\*

ГАИШ МГУ

Несмотря на то, что формирование спектров излучения атмосфер нейтронных звёзд исследуется в течение десятилетий, иногда удаётся обнаружить новые интересные закономерности, характеризующие поле излучения в указанных условиях. Явление термализации [1–5] в плазме атмосфер при не слишком высоких температурах (не превышающих одного или нескольких кэВ) может быть описано в широком диапазоне рентгеновского спектра в приближении почти консервативного когерентного рассеяния. В настоящей работе исследуется точность указанного приближения и рассчитывается глубина термализации в модели плоской полубесконечной чисто водородной атмосферы в соответствии с основными известными и новыми выражениями. Задача решается для случая гидростатического профиля электронной плотности при нулевом давлении на границе [6–8]. Для выраженной в единицах оптической толщи по томсоновскому рассеянию глубины термализации  $\tau_{\text{th}}$  можно получить, что  $\tau_{\text{th}} \propto E/E_0$ , где  $E$  — энергия фотона,  $E_0 = 1$  кэВ [9]. Для типичной нейтронной звезды в модели изотермической атмосферы  $\tau_{\text{th}} \sim E/E_0 \sqrt{T/T_0}$ , где  $T$  — электронная температура,  $T_0 = 1.5$  кэВ. Температура может быть выбрана распределённой, например, в соответствии с законом  $T = T_{\text{eff}} (3/4(\tau_{\text{R}} + 2/3))^{1/4}$ , где  $T_{\text{eff}}$  — эффективная температура, а  $\tau_{\text{R}}$  — рассчитанная с использованием Росселандовой непрозрачности оптическая глубина. В этом случае соотношение для  $\tau_{\text{th}}$  остаётся справедливым (пока  $T \sim T_{\text{eff}}$ ), ведь на высоких частотах вероятность гибели фотона в расчёте на одно рассеяние  $\epsilon \propto 1/\sqrt{T}$  мала. Уравнение переноса при изотропной функции источника решается в эддингтоновском приближении (ср. [8]) и численно методом Фотрие [10, 3]. Получены угловые распределения интенсивности выходящего излучения. Спектральные распределения интенсивности, соответствующие различной глубине, согласуются с расчётами длины термализации. Полученная формула для  $\tau_{\text{th}}(E)$  работает и на низких частотах, в приповерхностных слоях, хотя точность её здесь несколько ниже по сравнению с известными выражениями, применёнными к рассматриваемому профилю плотности (в единицах полной оптической толщи  $\tau_{\nu}$  глубина термализации [1–3]  $\tau_{\nu, \text{th}} = 1/\sqrt{\epsilon}$ , откуда линейная зависимость следует при  $\tau_{\nu} \simeq \tau$ , т. е. при  $\epsilon \simeq 1$ ). Если  $T$  зависит от координаты, поведение интенсивности и термализации удобно описывать посредством сравнения спектра со значениями функции Планка, определёнными в рассматриваемой точке.

### Список литературы

- [1] G. B. Rybicki, D. G. Hummer, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 144, 313 (1969)
- [2] J. T. Jefferies, *Astrophys. J.*, 132, 775 (1960)
- [3] Д. Михалас, *Звёздные атмосферы* / Пер. с англ. С. И. Грачёва и Д. И. Нагирнера, под ред. В. В. Иванова (М.: Мир, 1982) [D. Mihalas, *Stellar Atmospheres* (San Francisco: W. H. Freeman, 1978)]
- [4] G. B. Rybicki, A. P. Lightman, *Radiative Processes in Astrophysics* (New York: Wiley & Sons, 1979)
- [5] В. В. Иванов, *Перенос излучения и спектры небесных тел* (М.: Наука, 1969)
- [6] R. W. Nelson, E. E. Salpeter, I. Wasserman, *Astrophys. J.*, 418, 874 (1993)
- [7] Y. B. Zeldovich, N. I. Shakura, *Soviet Astronomy Lett.*, 13, 175 (1969)
- [8] R. Turolla, L. Zampieri, M. Colpi, A. Treves, *Astrophys. J.*, 426, 35 (1994)
- [9] M. Gornostaev, arXiv:2203.12589 (2022)
- [10] P. Feautrier, *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris*, 258, 3189 (1964)

---

\*E-mail: mgornost@gmail.com

## Выход излучения ультраярких рентгеновских пульсаров из оболочки, оттекающей от сверхкритического аккреционного диска

С. А. Гребенев<sup>1\*</sup>, С. Ю. Жуков<sup>2</sup>, А. В. Худов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ

Светимость недавно открытых ультраярких рентгеновских пульсаров (ULXPs) на 2–3 порядка превышает критическую эддингтоновскую светимость, что с трудом поддаётся объяснению. Временами ULXPs переходят в низкое состояние со светимостью лишь уровня эддингтоновской. Ранее нами было предложено объяснение такой бимодальности светимости достижением темпом аккреции уровня, при котором радиус магнитосферы нейтронной звезды уменьшается ниже радиуса сферизации аккреционного диска. При этом под действием давления излучения начинается сильное истечение вещества из диска, образующее вокруг системы плотную оболочку. Поглощение и рассеяние излучения пульсара в оболочке и приводит к переходу системы в низкое состояние. В рамках этой картины рассчитана модель оттекающей оболочки и её ионизационный баланс, проведены расчёты методом Монте-Карло искажений спектра рентгеновского излучения центрального источника, возникающие при прохождении оболочки. Расчёты проведены для большого набора параметров задачи. Самосогласованно, в зависимости от темпа аккреции, учтено изменение светимостей пульсара, аккреционного диска (внутри радиуса сферизации) и темпа истечения ветра из диска. Предсказано возникновение при определённых условиях особенности в спектре излучения ULXPs на энергиях выше 9 кэВ. Также проведены расчёты выхода излучения из оболочки в случае, если компактным объектом в ультраяркой рентгеновской системе (ULX) является чёрная дыра (ULXBH). В этом случае нет магнитосферы, влияющей на аккреционное течение, оттекающая оболочка существует при любом темпе аккреции, а истечение из диска происходит вплоть до последней устойчивой орбиты. Формирующаяся оболочка оказывается намного более плотной и оптически толстой. Различия в условиях формирования и параметрах оболочки в ULX системах, содержащих нейтронные звёзды и чёрные дыры, повышают вероятность наблюдения ULXPs по сравнению с ULXBHs (независимо от различия в частоте формирования таких систем).

---

\*E-mail: grebenev@iki.rssi.ru

## Послесвечение гамма-всплесков: новые наблюдения и согласованная модель релятивистской ударной волны

Е. В. Дерисhev\*

ИПФ РАН

Послесвечение гамма-всплесков характеризуется исключительно широкими спектрами, которые обусловлены синхротронным и обратным комптоновским излучением ускоренных электронов. Хотя эти радиационные процессы распространены в космосе, релятивистские ударные волны и сдвиговые течения обладают эффективным механизмом обратной связи, который отличает их от других мест ускорения частиц. Обратная связь осуществляется за счёт неупругих столкновений высокоэнергетических обратных комптоновских фотонов с низкоэнергетическими синхротронными фотонами. При этом рождаются электрон-позитронные пары в области, где скорость потока релятивистская по отношению к источнику фотонов. Пары получают энергию от разницы в скорости потока и, в свою очередь, излучают новые фотоны. Эта цепь событий реализует лептонный цикл конверсионного механизма ускорения. В условиях, когда оно эффективно, конверсионное ускорение доходит до режима нелинейного насыщения, при котором передача импульса фотонами высокой энергии поддерживает градиент скорости потока на минимальном уровне, необходимом для работы механизма. Таким образом формируется равновесная ударная волна. Баланс возникает при приближении к максимальной эффективности, когда фотонам обратного комптоновского пика в спектре едва хватает энергии для образования пар с фотонами синхротронного пика. Условие баланса позволяет предсказать положение как синхротронного, так и обратного комптоновского пиков, а также соотношение их высот. Наблюдения ТЭВ-ного излучения от послесвечения гамма-всплесков (пока немногочисленные) хорошо согласуются с этими предсказаниями. В докладе обсуждается интерпретация спектров послесвечения гамма-всплесков с точки зрения модели равновесной ударной волны, а также недавние наблюдения обсерватории LHAASO, которые открывают новые возможности для изучения природы породившей гамма-всплеск звезды. Работа поддержана грантом РФФ 21-12-00416.

---

\*E-mail: derishev@appl.sci-nnov.ru

## Мантия нейтронных звёзд: что предсказывают расширенный метод Томаса-Ферми и сжимаемая капельная модель?

Н. А. Земляков<sup>1\*</sup>, Н. Н. Щечилин<sup>2</sup>, А. И. Чугунов<sup>1</sup>, М. Е. Гусаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>Institut d’Astronomie et d’Astrophysique, Université Libre de Bruxelles, Брюссель, Бельгия

Одним из уникальных свойств нейтронных звёзд является возможность существования особого слоя между корой и ядром звезды – мантии, в которой ядерная материя кластеризована в одномерные или двумерные структуры. Мантия может оказывать значительное влияние на различные аспекты эволюции нейтронных звёзд: тепловое остывание, распад магнитного поля и т.д. В докладе мы сосредоточились на том, как на предсказания структуры мантии влияет выбранный метод исследования. Для этого мы выбрали конкретную модель межнуклонного потенциала (SLy4) и провели расчёты с использованием двух подходов: расширенного метода Томаса-Ферми (ETF) и сжимаемой капельной модели (CLDMnc), основанной на термодинамически согласованном описании поверхностной энергии двухфазной границы. Отметим, что в CLDMnc поверхностная энергия была специально рассчитана методом ETF, предполагая плоскую границу раздела и используя тот же межнуклонный потенциал (SLy4). Согласно расчётам методом ETF нейтронная звезда должна содержать мантию, состоящую из цилиндрических ядерных кластеров («спагетти»), инверсных цилиндрических ядерных кластеров («букатини») и инверсных сферических ядерных кластеров («швейцарский сыр»). Однако расчёты в рамках CLDMnc предсказывают более тонкий слой мантии, состоящий только из цилиндрических ядерных кластеров. Проведено сравнение с уже имеющимися в литературе расчётами для потенциала SLy4. В частности, недавние расчёты [1] в рамках другой формулировки сжимаемой капельной модели, которая учитывает поправки к плотности поверхностной энергии, связанные с кривизной капли, но не учитывает адсорбцию нейтронов на поверхность кластера (что, строго говоря, делает невозможным термодинамически согласованное описание поверхностных свойств), оказываются ближе к нашим расчётам методом ETF, чем CLDMnc. Указанный факт подчёркивает важность учёта поправок на кривизну для расчёта мантии в рамках сжимаемой капельной модели. Результаты опубликованы [2]. Работа поддержана Российским научным фондом (грант 22-12-00048).

### Список литературы

- [1] H. Dinh Thi, T. Carreau, A. F. Fantina, F. Gulminelli, *Astron. Astrophys.*, 654, A114 (2021)
- [2] N. N. Shchepochin, N. A. Zemlyakov, A. I. Chugunov, M. E. Gusakov, *Universe*, 8, 582 (2022)

---

\*E-mail: zemnic5@gmail.com

## Влияние конечных размеров нуклонных кластеров на упругие свойства внутренней коры и мантии нейтронной звезды

Н. А. Земляков\*, А. И. Чугунов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

В докладе рассмотрены упругие свойства внутренних слоёв коры и фазы цилиндрических кластеров («спагетти») в мантии нейтронной звезды. Показано, что при возникновении в этих слоях упругих сдвиговых напряжений, вблизи кластеров возникает асимметричный электростатический потенциал, который приводит к изменению их формы. Этот эффект рассмотрен в рамках сжимаемой капельной модели и приближения Вигнера–Зейтца. Получены простые аналитические формулы для описания упругих свойств. В частности, показано, что учёт деформации кластеров в рамках применяемой нами модели может быть описан фактором подавления, уменьшающим упругие коэффициенты. Этот фактор не содержит явной зависимости от используемой ядерно-физической модели и является функцией только доли объёма, занимаемого кластером. Явный вид фактора подавления зависит от формы кластера; в докладе он получен для сферических кластеров внутренней коры нейтронной звезды и фазы цилиндрических кластеров («спагетти») в мантии. Результаты опубликованы [1,2].

### Список литературы

- [1] N. A. Zemlyakov, A. I. Chugunov, Mon. Not. R. Astron. Soc. 518, 3813 (2023)  
 [2] N. A. Zemlyakov, A. I. Chugunov, Universe 9, 220 (2023)

---

\*E-mail: zemnic5@gmail.com

## Оптические наблюдения двойных систем 4FGL J1838.2+3233 и PSR J1622–0315

Д. А. Зюзин<sup>1\*</sup>, А. В. Карпова<sup>1</sup>, Ю. А. Шибанов<sup>1</sup>, С. В. Жариков<sup>2</sup>, А. Ю. Кириченко<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>Instituto de Astronomía, UNAM, Мехико, Мексика

Представлены результаты оптических наблюдений двух двойных систем: (1) с миллисекундным пульсаром PSR J1622–0315 и (2) возможного оптического компаньона гамма-источника 4FGL J1838.2+3233, предположительно являющегося миллисекундным пульсаром. Наблюдения проходили на 2.1-метровом телескопе обсерватории Сан Педро Мартин (Мексика) в полосах В, V, R и I. Для пульсара J1622–0315, который относится к классу так называемых «австралийских вдов» (или «красноспинных пауков», “redbacks”), были получены кривые блеска. Они имеют два пика за орбитальный период 3.8 часа, которые связаны с приливной деформацией звезды-компаньона. Также мы показали, что точечный оптический источник с координатами RA=18 38 16.773 и Dec=+32 24 11.1, согласующимися с положением 4FGL J1838.2+3233, является переменным с периодом примерно 4 часа. Его яркость в полосе R изменялась на три звёздных величины. Источник демонстрирует вспышечную активность в оптическом и рентгеновском диапазонах. Наблюдаемые свойства позволяют отнести 4FGL J1838.2+3233 к классу так называемых «чёрных вдов» (“black widows”). Вариации блеска этой системы объясняются нагревом стороны компаньона, обращённой к пульсару, ветром и/или излучением пульсара. Будут обсуждаться параметры этих двух систем.

---

\*E-mail: da.zyuzin@gmail.com

## Аномальная термодинамика энтропийных фазовых переходов

И. Л. Иосилевский<sup>1,2\*</sup>, В. К. Грязнов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОИВТ РАН

<sup>2</sup>МФТИ

<sup>3</sup>ФИЦ ПХФ и МХ

На примере сравнительного анализа двух фазовых переходов (ФП), активно обсуждаемых в физике нейтронных звёзд, – перехода типа газ-жидкость (GLPT) в плотной ядерной материи и кварк-адронного фазового перехода (QHPT) – объясняется ранее предложенное [1] разделение ФП 1-го рода на два подкласса – «энтальпийных» и «энтропийных» ФП ( $H$ -PT и  $S$ -PT). Главное, что отличает  $S$ -PT от  $H$ -PT, – это радикальное различие физических механизмов (драйверов), реализующихся в этих двух типах ФП. Так, если в «обычном» (ван дер Ваальсовом) переходе GLPT (это  $H$ -PT) система самопроизвольно сжимается («конденсируется») ради выигрыша (т.е. понижения) энтальпии, то в более сложном (и менее изученном) энтропийном типе перехода QHPT система самопроизвольно сжимается, напротив, ради выигрыша (т.е. повышения) энтропии за счёт принудительной (пусть и энергозатратной) делокализации каких-либо связанных комплексов (в случае QHPT это деконфайнмент). Как следствие вышеуказанного базового отличия в докладе иллюстрируются результирующие различия в структуре и свойствах фазовых диаграмм  $H$ -PT и  $S$ -PT, в номенклатуре и топологии их стабильных и метастабильных зон, в частичной многозначности («многослойности») некоторых термодинамических поверхностей и др. Особенно важно, что в отличие от хорошо изученного  $H$ -PT, изоструктурный  $S$ -PT не является одиночным объектом, а всегда выступает «в связке» с сопряжённой с ним зоной аномальной термодинамики (ATR), прилегающей к высокотемпературной околос критической области  $S$ -PT. Такая аномальность ATR частично известна и заключается в одновременной отрицательности большой группы обычно положительных вторых перекрёстных производных термодинамического потенциала (например, параметр Грюнайзена и коэффициент теплового расширения [2]). В докладе обсуждаются как термо-, так и гидродинамические следствия указанной аномальности уравнения состояния в зоне ATR.

### Список литературы

- [1] I. Iosilevskiy, Enthalpic and entropic phase transitions in high energy density nuclear matter, in Physics of Extreme States of Matter, Eds. V. Fortov et al. (IPCP RAS Pub.: Chernogolovka, 2013), 136; arXiv:1403.8053
- [2] I. Iosilevskiy, Entropic and enthalpic phase transitions and accompanying anomalous thermodynamics of high energy density nuclear matter, in Proceedings of the IV International Conference “Compact Stars in the QCD Phase Diagram” (CSQCD-IV), Prerow, Germany, 2014, edited by D. Blaschke and T. Fischer, eConf C140926, (2015); arXiv:1504.05850

---

\*E-mail: ilios@ihed.ras.ru



## Линия смерти радиопульсаров – «долина смерти»

А. Ю. Истомин<sup>1\*</sup>, В. С. Бескин<sup>1,2</sup>, П. Е. Литвинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МФТИ

<sup>2</sup>ФИАН

Радиоизлучение нейтронной звезды генерируется вследствие рождения электрон-позитронных пар в её магнитосфере. На диаграмме «период – производная периода» прослеживается прямая, ниже которой пульсары не наблюдаются. Хотя коэффициент наклона этой прямой был объяснен достаточно давно, её положение на диаграмме получалось значительно завышенным. Для объяснения этого противоречия привлекались различные соображения, например, введение недипольных компонент магнитного поля. В данной же работе была предпринята попытка объяснить наблюдаемое положение линии смерти, оставаясь в рамках классических представлений о магнитосфере пульсара. Основным предположением теоретической модели стало то, что вследствие нестационарности процесса рождения электрон-позитронных пар, у пульсаров вблизи линии смерти плазма периодически полностью покидает магнитосферу. В таком случае можно найти точное аналитическое выражение для ускоряющего потенциала и детально исследовать процесс рождения пар, приводящий к заполнению магнитосферы электрон-позитронной плазмой и, соответственно, к радиоизлучению. В ходе работы было получено условие, определяющее максимально возможный период радио-яркого пульсара в зависимости от его параметров. Для сравнения данного результата с наблюдениями использовались две модели эволюции, определяющие скорость замедления пульсара. В рамках обеих моделей было показано, что полученная линия смерти с достаточной точностью ограничивает наблюдаемые объекты. Кроме того, так как условие выключения пульсара оказалось существенно зависящим от его параметров, таких как масса, радиус или угол наклона магнитной оси к оси вращения, правильнее говорить не о линии смерти, а о долине смерти, ширина которой определяется распределением пульсаров по данным параметрам.

---

\*E-mail: istomin.aiu@phystech.edu

## Темп раскрутки аккреционных пульсаров

Н. Р. Ихсанов<sup>1,2\*</sup>, В. Ю. Ким<sup>1,3</sup>, Н. Г. Бескровная<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН

<sup>2</sup>ИПА РАН

<sup>3</sup>АФИФ, Казахстан

<sup>4</sup>САО РАН

Периоды аккрецирующих рентгеновских пульсаров не постоянны. Они непрерывно меняются, то увеличиваясь, то уменьшаясь, демонстрируя большое разнообразие форм ротационной эволюции нейтронной звезды, являющейся основным источником рентгеновского излучения этих объектов. Наряду с продолжительными (месяцы, годы) трендами роста или уменьшения периода пульсаров наблюдаются эпизодические (дни, недели) вариации, в течение которых раскрутка или торможение вращения нейтронной звезды происходят с аномально высоким темпом. В большинстве случаев эти изменения периода пульсара возникают спонтанно и слабо коррелируют с изменениями потока рентгеновского источника (см., например, [1] и приведённую там литературу). Определение темпа изменений периода пульсара позволяет оценить величину момента силы, приложенного к нейтронной звезде, и ограничить список возможных причин, приводящих к ее ротационной эволюции. В частности, наблюдаемый темп эпизодов раскрутки некоторых пульсаров существенно превосходит величину, ожидаемую в модели падения аккреционного потока из диска на поверхность звезды (т.е. произведение удельного углового момента вещества, расположенного на внутреннем радиусе кеплеровского аккреционного диска, на темп аккреции этого вещества на поверхность звезды). Мы показываем, что этот результат закономерен, т.к. величина момента силы, приложенного к нейтронной звезде вследствие взаимодействия между аккреционным диском и ее магнитным полем на границе магнитосферы, при определённых условиях может существенно превосходить величину момента силы, обусловленного аккрецией вещества на поверхность звезды. В рамках предлагаемого нами сценария раскрутка и торможение вращения нейтронной звезды слабо зависят от изменений темпа аккреции, реализуемого в пульсаре, и могут происходить без видимого изменения рентгеновской светимости источника.

### Список литературы

- [1] Н. Р. Ихсанов, Ю. С. Лих, Н. Г. Бескровная, *Астрон. журн.*, 91, 449 (2014) [N. R. Ikhsanov, Yu. S. Likh, N. G. Beskrovnaya, *Astron. Rep.*, 58, 37 (2014)]

---

\*E-mail: nazar.ikhsanov@mail.ru

## Внешняя кора нейтронных звёзд как резервуар энергии и регулятор её распространения

А. Д. Каминкер\*, А. Ю. Потехин, Д. Г. Яковлев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Проанализированы и систематизированы основные свойства глубоких прогретых слоёв внешней коры нейтронной звезды, в которых происходят мощные процессы накопления и выделения энергии, а также процессы распространения энергии внутрь или наружу звезды. Описаны главные элементы микрофизики вещества внешней коры: скорость глубокого взрывного ядерного горения; теплоёмкость, теплопроводность и температуропроводность; скорость нейтринного охлаждения (в основном, за счёт испускания нейтрино при распаде плазмона и аннигиляции электронно-позитронных пар). Дана общая характеристика наиболее важных и универсальных свойств внешней коры. К ним относятся: (1) Высокая теплоёмкость, позволяющая вбирать и удерживать тепловую энергию порядка  $10^{40}$ – $10^{43}$  эрг. (2) Эта энергия может быть выделена в результате мощного и быстрого термоядерного горения (главным образом, углерода) в глубоких слоях внешней коры (на глубинах с плотностью  $10^8$ – $10^{10}$  г/см<sup>3</sup>). (3) Часть этой энергии выносится на поверхность звезды за время от десятков часов до нескольких месяцев, а часть стекает во внутреннюю кору за время около года (например, [1]). (4) Нейтринное охлаждение ограничивает тепловую энергию во внешней коре и мощность электромагнитного излучения с поверхности звезды; уже через несколько часов после окончания энерговыделения температура внешней коры не может превышать  $3 \times 10^9$  К. Указанные свойства внешней коры нейтронной звезды важны для построения теоретических моделей глубоких и сильных сверхвыпшек аккрецирующих нейтронных звёзд [1-3]. Эти же свойства должны проявляться и при сверхвыпшках или обычных выпшках магнитаров [4] в их внутренней или внешней коре под действием сверхсильных магнитных полей. Кроме того, эти свойства важны в молодых и горячих нейтронных звёздах, прошедших стадию прото-нейтронной звезды. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-12-00133.

### Список литературы

- [1] D. G. Yakovlev, A. D. Kaminker, A. Y. Potekhin, P. Haensel, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 500, 4491 (2021)
- [2] J. in't Zand, Understanding superbursts, in “7 years of MAXI: monitoring X-ray Transients,” eds. M. Serino et al. (RIKEN: Saitama, Japan, 2017), 121
- [3] L. Keek, A. Cumming, Z. Wolf, et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 454, 3559 (2015)
- [4] V. M. Kaspi, A. M. Beloborodov, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 55, 261 (2017)

---

\*E-mail: kam@astro.ioffe.ru

## Нейтронные звёзды в теории гравитации с неминимальной производной связью скалярного поля и тензора Эйнштейна

П. Е. Кашаргин\*, С. В. Сушков

КФУ

Теория гравитации Хорндески – это модифицированная теория гравитации со скалярным полем наиболее общего вида, в которой соответствующие уравнения движения имеют порядок не выше второго. Теория Хорндески обобщает большинство известных моделей со скалярным полем, которые используются в современной космологии. Помимо общей теории относительности, теория Хорндески включает множество скалярно-тензорных теорий, в том числе теорию гравитации с неминимальной производной связью тензора Эйнштейна и скалярного поля. В работе мы рассматриваем компактные звёзды в теории гравитации с неминимальной производной связью скалярного поля и тензора Эйнштейна. Вакуумное решение в этой модели описывает чёрную дыру с асимптотикой анти-де Ситтера и имеет нетривиальное скалярное поле. Нейтронные звёзды в этой теории были рассмотрены ранее в случае нулевой космологической постоянной  $\Lambda_0 = 0$ , а также в отсутствие кинетического члена у скалярного поля,  $\alpha = 0$  [1]. В данной работе мы обобщаем эти исследования на случай  $\Lambda_0 \neq 0$  и  $\alpha \neq 0$  [2]. Было показано, что диаграммы масса-радиус в этом случае существенно отличаются от диаграмм в модели  $\alpha = \Lambda_0 = 0$ ; а именно, радиус монотонно убывает с уменьшением массы. Такая особенность характерна для так называемых странных звёзд. Также показано, что звёзды в теории гравитации с неминимальной производной связью более компактны по сравнению с нейтронными звёздами в немодифицированной теории, а также в модели  $\alpha = \Lambda_0 = 0$ . В работе кратко обсуждается устойчивость рассматриваемой модели и показывается, что данная модель устойчива в широком диапазоне параметров.

### Список литературы

- [1] A. Cisterna, T. Delsate, M. Rinaldi, Phys. Rev. D, 92, 044050 (2015).
- [2] P.E. Kashargin, S.V. Sushkov, JCAP, 2023, 01, 005 (2023).

---

\*E-mail: pkashargin@mail.ru

## Влияние межпланетной плазмы на поиск импульсных диспергированных сигналов

М. А. Китаева\*, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей

ПРАО АКЦ ФИАН

Пульсары, являющиеся источниками импульсного излучения, были открыты во время работ по исследованию межпланетной плазмы с помощью наблюдений мерцаний компактных (с угловым размером  $< 1 - 2''$ ) радиоисточников [1]. Мерцания на межпланетной плазме – это случайный процесс и поэтому время между отдельными пиками в записи меняется случайным образом. В отличие от мерцаний, импульсы пульсаров находятся на одинаковых временных интервалах друг от друга. В последние годы появились работы [2, 3], указывающие, что можно использовать межпланетную плазму, как усилитель сигналов от вращающихся радиотранзиентов (RRAT). Эти объекты, являющиеся подвыборкой пульсаров, были открыты как источники импульсного излучения, имеющего дисперсионное запаздывание сигнала из-за его прохождения в межзвёздной среде [4]. Регулярное (пульсарное) излучение у RRAT зачастую не обнаруживается. В работе [2] говорится, что межпланетная среда может в 1.5–2 раза усилить сигналы, проходящие через нее. Есть по крайней мере три проявления эффекта мерцаний при прохождении импульсов пульсаров через межпланетную плазму. Во-первых, увеличение количества наблюдаемых импульсов. Часть слабых импульсов, сигнал от которых ниже порога детектирования, усиливаются мерцаниями и становятся наблюдаемыми; часть сильных импульсов, наоборот, ослабляется. Во-вторых, если наблюдаются увеличение или уменьшение энергии отдельных импульсов, связанные с межпланетной средой, можно говорить об индексе мерцаний (индексе модуляции), отражающем в численной форме эти изменения. В-третьих, если из-за межпланетных мерцаний изменяется количество импульсов с разными энергиями, должно появиться искажение зависимости распределения импульсов пульсаров по энергиям. В докладе рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через неё импульсное излучение пульсаров. Изменение количества импульсов объясняется искажением энергетического распределения за счёт межпланетных мерцаний. Представлены аналитические выражения, позволяющие для степенного распределения импульсов по энергиям оценить индекс мерцаний по наблюдениям отдельных импульсов. Наблюдательные данные находятся в хорошем качественном соответствии с известными характеристиками межпланетных мерцаний. Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>).

### Список литературы

- [1] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, et al., *Nature*, 217, 709 (1968)
- [2] С.А.Тюльбашев, В.С.Тюльбашев, В.М.Малофеев и др., *Астрон. журн.*, 95, 68 (2018) [S. A. Tyulbashev, V. S. Tyulbashev, V. M. Malofeev, et al., *Astron. Rep.*, 62, 63 (2018)]
- [3] T. V. Smirnova, S. A. Tyulbashev, E. A. Brylyakova, et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 517, 1126 (2022)
- [4] M. A. McLaughlin, A. G. Lyne, D. R. Lorimer, et al., *Nature*, 439, 817 (2006)

---

\*E-mail: marina@prao.ru

## О природе трёхгорбых профилей пульсаров

Ф. А. Князев<sup>1\*</sup>, В. С. Бескин<sup>1,2</sup>, А. Ю. Истомин<sup>1</sup>, А. Г. Михайленко<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>МФТИ

<sup>2</sup>ФИАН

Одной из нерешённых проблем остаётся вопрос о существовании пульсаров, имеющих трёхгорбый средний профиль, сформированный одной ортогональной модой. Идея о том, что трёхгорбые профили радиоизлучения пульсаров могут быть связаны только с обыкновенной О-модой за счёт её преломления в сторону магнитной оси была высказана уже более 20 лет назад. Однако в то время профиль плотности истекающей плазмы не был известен с достаточной точностью. В нашей работе мы воспользовались недавними результатами работы Бескина и Литвинова [1], в которой профиль плотности вторичной плазмы в рамках модели полого конуса был последовательно определён с учётом спектра изгибного излучения первичных частиц. Данный подход позволил рассчитать точную зависимость коэффициента преломления от координаты и позволил, в рамках приближения геометрической оптики, смоделировать траекторию луча в магнитосфере пульсара. В ходе работы были получены смоделированные, с учётом точного выражения для плотности истекающей плазмы, средние профили с ярко выраженными тремя горбами для различных пульсаров. Во всех случаях имеется хорошее согласие между предсказаниями теории и данными наблюдений.

### Список литературы

- [1] V. S. Beskin, P. E. Litvinov, Mon. Not. R. Astron. Soc., 510, 2572 (2022)

---

\*E-mail: kniazev.fa@phystech.edu

## Эффект Джозефсона в нейтронных звёздах как ключ к физике быстрых радиовсплесков (БРВ, FRB) и пульсаров

Ю. А. Ковалев\*

АКЦ ФИАН

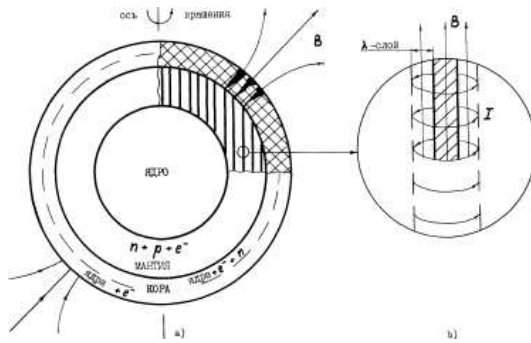


Рис. 1: Строение нейтронной звезды (а – слева) и вихревой сверхпроводящей нити – с током  $I > I_m$ , магнитным полем  $B$ , нормальной сердцевиной (заштрихована) и  $\lambda$ -слоем с микромостиками (б-справа). Трещины в коре (а) зачернены [3]

пятна», и вблизи магнитных полюсов формируется диаграмма направленности (ДН) излучения – в простейшем случае на частоте Джозефсона  $\nu_0 \sim 10^7$  Гц и её гармониках. Сечение ДН даёт наблюдаемую структуру импульсов – с поляризацией волноводной моды  $TE_{01}$  для 12 радиопульсаров [5]. Построена также модель пульсара в Крабовидной туманности [3].

Отсюда логично следует модель джозефсоновского БРВ, если после «звездотрясения»: 1) трещина быстро «запаивается» или 2) луч пульсара «уходит» от прежнего направления на наблюдателя (с новой прецессией) или 3) излучение «выключается». В случае 3 из-за возможного всплеска магнитного поля  $B$  может «переключиться» режим эффекта Джозефсона – с нестационарного (когда ток  $I \propto B$  через микромостик превышает критический ток Джозефсона»  $I_m < I$ , и излучение есть) на стационарный эффект (без излучения – когда  $I \leq I_m$ ).

### Список литературы

- [1] С. Б. Попов, К. А. Постнов, М. С. Пширков, Усп. физ. наук, 188, 1063 (2018) [Phys. Usp., 61, 965 (2018)]
- [2] Ю. А. Ковалев, Письма в Астрон. журн., 5, 390 (1979) [Yu. A. Kovalev, Soviet Astronomy Lett., 5, 210 (1979)]
- [3] Yu. A. Kovalev, Astrophys. Space Sci., 63, 19 (1979); 67, 397 (1980)
- [4] Л. Г. Асламазов, А. И. Ларкин, Письма в ЖЭТФ, 9, 150 (1969) [L. G. Aslamazov, A. I. Larkin, JETP Lett., 9, 87 (1969)]
- [5] G. M. Larionov, Y. Y. Kovalev, Astron. Astrophys. Trans., 11, 59 (1996)

\*E-mail: ykovalev@asc.rssi.ru

Несмотря на большой объём данных, происхождение БРВ остаётся невыясненным [1]. Когерентное радиоизлучение пульсаров может генерироваться нестационарным эффектом Джозефсона в нитях мантии нейтронных звёзд (рис. 1) и выходить в магнитосферу через замагниченные трещины в коре после «звездотрясений» [2, 3]. Главное условие: несверхпроводящие «вкрапления» образуют в  $\lambda$ -слое нити «губчатую» микроструктуру из «слабосвязанных» сверхпроводящих микромостиков – с их электродинамикой [4], «работающей в лаборатории»;  $\lambda$  – глубина проникновения магнитного поля.

Теория даёт критерий слабой связи. Оценки удовлетворяют ему с большим запасом [3]. Радиоволны в трещине частично поглощаются и ускоряют электроны и протоны, выходящие в магнитосферу.

На поверхности звезды образуются «горячие радиопятна», и вблизи магнитных полюсов формируется диаграмма направленности (ДН) излучения –

## Уравнения состояния ядерного вещества. Самосогласованные подходы

Е. Э. Коломейцев\*, Д. Н. Воскресенский

Лаборатория теоретической физики ОИЯИ

Рассматриваются различные подходы к моделированию уравнения состояния ядерного вещества, пригодного для описания различных стадий формирования и эволюции нейтронных звёзд: модель Скирма, модель релятивистского среднего поля, функционал плотности энергии, вириальный подход и модель  $\Phi$ -выводимого функционала. В центре внимания стоят вопросы согласованности подхода как с точки зрения термодинамики, так и с точки зрения согласованности со спектром элементарных возбуждений в среде. Эти вопросы становятся особенно актуальными в случае конечных температур. Кроме того, мы рассмотрим, какая экспериментальная информация о нуклон-нуклонном рассеянии, столкновениях тяжёлых ионов, холодных атомов и свойств нейтронных звёзд может быть использована для установления ограничений на уравнение состояния при разных плотностях.

---

\*E-mail: kolomei@theor.jinr.ru



## Токовый слой как оптимальный синхротронный мазер на радиопульсаре

С. А. Корягин<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ИПФ РАН

<sup>2</sup>ННГУ им. Н. И. Лобачевского

Рассмотрены оптимальные физические условия, при которых достигается максимальный инкремент для мазерного синхротронного излучения в плазменной среде. Для мазерного механизма фазовая скорость нормальных волн должна превышать скорость света в вакууме. Поэтому в качестве эталонной традиционно рассматривают модель с холодной фоновой плазмой, которая обеспечивает необходимую дисперсионную характеристику волн. Однако эталонная модель ограничивает сверху концентрацию релятивистских частиц, а следовательно, и инкремент, условием, что релятивистские частицы не влияют на дисперсионные свойства среды. Как следствие, максимальный инкремент мазерного излучения на заданной частоте реализуется в релятивистской плазме без холодных частиц. В работе решена задача о максимальном коэффициенте усиления синхротронного излучения на расстоянии в длину волны в модели релятивистской плазмы с изотропным моноэнергетическим распределением частиц. Искомый максимум достигается в среде, где плотность энергии магнитного поля порядка плотности энергии частиц. Указанное соотношение плотностей энергии соответствует токовому слою (типа слоя Харриса), где давление собственного магнитного поля удерживает плазму от разлёта. В указанных условиях синхротронное излучение усиливается в 2 раза на трассе всего лишь порядка электронного ларморовского радиуса, что существенно короче толщины слоя. Поэтому уровень выходящего из источника излучения определён насыщением мазерного механизма. Получен лоренц-фактор релятивистских электронов 350 и индукция магнитного поля 10 кГс в области мазерного синхротронного излучения для пульсара в Крабовидной туманности. Оценка предполагает, что оптическое и когерентное радиоизлучение объекта происходят от одного синхротронного источника. Значения обусловлены лишь характерными частотами максимумов оптического и радиоизлучения. Однако указанная индукция совпала с вариантом одинаковой плотности энергии магнитного поля и оптического излучения в источнике, расположенном в окрестности светового цилиндра. Наблюдаемое отношение интегральных потоков ( $\nu F_\nu$ ) в оптике и радио совпало с условием, что радиоизлучение насыщается на уровне релятивистской напряжённости для полученного выше лоренц-фактора. Таким образом, релятивистский токовый слой создаёт оптимальные условия для мазерного синхротронного излучения. В случае пульсара в Крабовидной туманности данная модель указывает на равномерное распределение энергии между частицами, магнитным полем и оптическим излучением в источнике. Когерентное радиоизлучение насыщается на уровне релятивистской напряжённости.

---

\*E-mail: koryagin@ipfran.ru

**Корреляционный анализ динамического спектра радиопульсара  
B0329+54 методом периодических главных компонент: Определение  
частотного периода, фазы и дрейфа фарадеевского вращения девяти  
компонент импульса и структура источника излучения**

Вл. В. Кочаровский<sup>1\*</sup>, В. В. Вдовин<sup>1</sup>, А. С. Гаврилов<sup>1</sup>, Е. Р. Кочаровская<sup>1</sup>,  
С. В. Логвиненко<sup>2</sup>, Е. М. Лоскутов<sup>1</sup>, В. М. Малофеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИПФ РАН

<sup>2</sup>ПРАО АКЦ ФИАН

Развит метод периодических главных компонент для сигналов со сложным квазипериодическим динамическим спектром, свойственным радиопульсарам. Метод основан на анализе собственных векторов и собственных значений матриц частотно-временных запаздывающих корреляций сигнала. На примере наблюдений PSR B0329+54 радиотелескопом ПРАО АКЦ ФИАН вблизи частоты 111 МГц в полосе 2,5 МГц показано, что даже для очень коротких интервалов наблюдения (порядка нескольких минут) развитый метод обеспечивает выделение всех 9 известных компонент импульса его излучения и даёт возможность найти степень корреляции между ними, и для каждой компоненты с высокой точностью порядка 1–3 % определить меру вращения (с учётом вклада трассы распространения излучения в непосредственной окрестности и области генерации той или иной компоненты). В результате, несмотря на имеющийся джиттер радиоимпульсов PSR B0329+54, впервые удалось найти частотный период, относительную фазу и скорость дрейфа (чирпа) фарадеевского поворота плоскости поляризации излучения различных компонент импульса в эпоху наблюдений 2018–2021 гг. Таким образом, развитый метод открывает возможность судить о пространственной структуре многокомпонентного источника радиоизлучения в магнитосфере вращающейся нейтронной звезды, используя недоступную ранее информацию о миллисекундной динамике скоррелированных поляризационных составляющих этого излучения. Работа поддержана грантом РФФ 23-62-10043.

---

\*E-mail: kochar@ipfran.ru

## Окна неустойчивости релятивистских $r$ -мод

К. Ю. Краав\*, М. Е. Гусаков, Е. М. Кантор

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Из многочисленных колебаний нейтронных звёзд  $r$ -моды наиболее перспективны с точки зрения гравитационно-волновых наблюдений, поскольку они наиболее сильно подвержены неустойчивости CFS (Chandrasekhar-Friedman-Schutz) по отношению к излучению гравитационных волн. Эволюция  $r$ -моды, помимо CFS-механизма, также определяется диссипативными механизмами в звёздном веществе. Те сочетания звёздных параметров (температура и скорость вращения), при которых CFS-механизм сильнее диссипации, соответствуют так называемым окнам неустойчивости  $r$ -мод. Чаще всего окна неустойчивости строятся для ньютоновских  $r$ -мод в предположении баротропного уравнения состояния звёздного вещества, а диссипация считается обусловленной сдвиговой и объёмной вязкостью. В данной работе мы расширяем описанную минимальную модель, учитывая небаротропность уравнения состояния, эффекты общей теории относительности, а также усиленную диссипацию за счёт диффузии в сверхпроводящем звёздном веществе. Показывается, что данные эффекты в существенной степени влияют на окна неустойчивости  $r$ -мод и на времена раскачки/затухания  $r$ -мод за счёт CFS-неустойчивости и диссипативных механизмов. Работа поддержана грантом РФФИ 22-12-00048

\*E-mail: kirill-kraav@yandex.ru

## Учёт раскрутки массивного компонента в модели обдирания нейтронных звёзд для коротких гамма-всплесков

Н. И. Крамарев<sup>1,2\*</sup>, А. В. Юдин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ККТЭФ НИЦ Курчатовский институт

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ

С помощью аналитических методов исследованы последние стадии эволюции двойной системы нейтронных звёзд (НЗ), которая, в зависимости от начальных масс компонент, может происходить как в рамках сценария слияния НЗ, так и в рамках модели обдирания [1]. Основным новым ингредиентом по сравнению с более ранними расчётами [2, 3] является учёт раскрутки массивного компонента [4], что ведёт к существенному уменьшению времени устойчивого перетекания вещества в механизме обдирания. В рамках ньютоновского приближения определена массовая граница между сценариями слияния и обдирания НЗ. Показано, что эта граница слабо зависит от полной массы системы и определяется, в основном, начальным отношением масс компонент. Сценарий обдирания реализуется при  $M_2/M_1 \lesssim 0.8$ , и тем самым должен давать большой вклад в популяцию близких к нам гравитационно-волновых событий от сливающихся систем НЗ–НЗ и сопутствующих им коротких гамма-всплесков. Также исследована зависимость времени устойчивого перетекания вещества от уравнения состояния вещества НЗ в области малых масс. Получено независимое ограничение сверху на параметр зависимости энергии симметрии ядерной материи от плотности:  $L < 114.5$  МэВ.

### Список литературы

- [1] С. И. Блинников, И. Д. Новикова, Т. В. Переводчикова, А. Г. Полнарев, Письма в Астрон. журн., 10, 422 (1984) [S. I. Blinnikov, I. D. Novikov, T. V. Perevodchikova, A. G. Polnarev, Soviet Astronomy Lett., 10, 177 (1984)]
- [2] J. P. A. Clark, D. M. Eardley, Astrophys. J., 215, 311 (1977)
- [3] S. Blinnikov, A. Yudin, N. Kramarev, M. Potashov, Particles, 5, 198 (2022)
- [4] N. Kramarev, A. Yudin, Mon. Not. R. Astron. Soc., 522, 626 (2023)

\*E-mail: kramarev-nikita@mail.ru

## Структура аккреционных дисков вокруг нейтронных звёзд

А. В. Кузин<sup>1\*</sup>, Г. В. Липунова<sup>2</sup>, Д. Д. Лисицин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ

<sup>2</sup>MPIfR, Бонн, Германия

Аккреционные диски (АД) вокруг нейтронных звёзд (НЗ) взаимодействуют с собственным сильным магнитным полем НЗ. В предположении того, что магнитное поле частично проникает в тонкий диск с  $\alpha$ -параметризованной вязкостью, мы находим радиальную и вертикальную структуру аккреционного диска вокруг замагниченной нейтронной звезды миллисекундного аккрецирующего пульсара. Для моделирования наблюдаемых явлений (кривых блеска рентгеновских вспышек, спектров, эволюции частоты вращения нейтронной звезды) необходимо уметь моделировать радиальную и вертикальную структуру аккреционных дисков с учётом внешнего магнитного поля. Внешнее магнитное поле может влиять на диск несколькими способами: во-первых, его давление останавливает аккрецию вещества на некотором расстоянии, большем, чем для чёрной дыры. Во-вторых, магнитное поле может модифицировать распределение вязких напряжений в диске и, следовательно, менять темп энерговыделения в диске. Наконец, проникающее магнитное поле входит в сами уравнения вертикальной структуры АД. Для решения задачи о структуре диска мы исследуем структуру магнитного поля, индуцированного в диске в результате его дифференциального вращения. В двух предположениях [внешнее поле полностью проникает в диск (парамагнитный диск) и поле проникает в очень узком кольце на внутреннем радиусе диска] мы решаем уравнение переноса момента импульса в диске. В первом случае внутренний радиус диска находится из условия равенства плотности потока момента импульса, переносимого вязкими и магнитными силами. Мы показываем, как отличается тепловой спектр диска вокруг НЗ от спектра диска вокруг чёрной дыры. Решая модифицированную с учётом магнитного поля систему уравнений вертикальной структуры диска, мы вычисляем вертикальные профили распределения температуры, давления и других физических величин в диске в случае томсоновской или крамерсовской непрозрачности. В результате показано, что индуцированное магнитное поле мало меняет коэффициент диффузии в уравнении эволюции вязкого диска. С другой стороны, абсолютные значения светимости диска, давления, температуры в плоскости симметрии сильно зависят от внешнего магнитного поля.

\*E-mail: alv.kuzin@gmail.com

## Природа двойного тора и прочих рентгеновских структур пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela)

К. П. Левенфиш<sup>1\*</sup>, Г. А. Пономарёв<sup>1,2</sup>, А. Е. Петров<sup>1</sup>, С. С. Фатеева<sup>2</sup>, А. Н. Фурсов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>СПбПУ Петра Великого

В работе изучается природа пульсарных туманностей с двойным тором, подобным тому, что виден на рентгеновском изображении пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela). Согласно нашим исследованиям, двухторовые туманности могут создавать пульсары, которые движутся трансзвуковым образом относительно внешней среды и имеют большое магнитное наклонение и слабозамагниченный ветер. Мы показываем, что релятивистская магнитогидродинамическая модель туманности пульсара с указанными свойствами естественным образом объясняет не только двойной тор туманности Vela, но и прочие необычные особенности её рентгеновской морфологии – высокоупорядоченную геометрию тороидального поля, трёхчастный подветренный джет с поперечной полоской и маленькими узелками вокруг, реверберацию торов и узелки на их доплеровски-ярких половинках, и др., – природа которых оставалась загадкой более 20 лет с момента их обнаружения. Численное моделирование пульсарной туманности выполнено А.П. и А.Ф. при поддержке гранта РФФ 21-72-20020. Анализ и интерпретация численных и наблюдательных данных выполнены К.Л. и Г.П. в рамках базового проекта ФТИ 0040-2019-0025.

\*E-mail: ksen@astro.ioffe.ru

## Модели сверхкритической аккреции на замагниченные нейтронные звёзды

Г. В. Липунова

MPIfR, Бонн, Германия

В двойных системах может реализоваться режим аккреции на замагниченные нейтронные звёзды с таким большим темпом, что давление излучения определяет динамику движения вещества. В «сверхкритическом» режиме при достаточно слабом магнитном поле нейтронной звезды из диска может запускаться ветер, а в магнитосферном течении, при достаточно сильном магнитном поле, появляется радиационно-доминированная ударная волна и «вырастает» аккреционная колонка. В докладе будет представлен обзор моделей сверхкритических режимов для диска и магнитосферы.

## Эффекты перестановочной неустойчивости при дисковой аккреции на замагниченные нейтронные звёзды

Д. Д. Лисицин\*, Н. И. Шакура

ГАИШ МГУ

Авторами был проведён анализ неустойчивости перестановочного типа на внутреннем крае тонкого диамагнитного аккреционного диска. Использована модель конфигурации магнитного поля из статьи [1]. Для анализа неустойчивости авторами было выведено дисперсионное соотношение с учётом кеплеровского вращения диска. Также было показано, что кеплеровское вращение не стабилизирует неустойчивость, если она возникает. В рамках рассмотрения перестановочной неустойчивости авторами был выведен внутренний радиус аккреционного диска. Показано, что характер эволюции внутреннего радиуса не отличается от альфвеновского, причём коэффициент пропорциональности зависит только от  $\alpha$ -параметра турбулентности и не зависит от толщины диска. Также было проведено сравнение поведения внутреннего радиуса в случае дисковой и квазисферической аккреции.

### Список литературы

- [1] J. J. Aly, *Astron. Astrophys.*, 86, 192 (1980)

---

\*E-mail: lisitsin\_2000@mail.ru

## Аккрецирующие нейтронные звёзды по наблюдениям СРГ

А. А. Лутовинов\*

ИКИ РАН

К настоящему времени обсерватория Спектр-РГ провела несколько полных обзоров всего неба, обзор большей части нашей Галактики телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского, а также значительное количество наблюдений наиболее интересных областей и объектов на небе. Среди зарегистрированных телескопом ART-XC источников несколько сотен представляют аккрецирующие нейтронные звёзды в двойных системах, как ранее известные, так и новые. В докладе будет представлен обзор полученных обсерваторией Спектр-РГ результатов по открытию и исследованию природы таких объектов, в том числе, с использованием многоволновых наблюдений совместно с другими наземными и космическими инструментами.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-12-00423.

---

\*E-mail: aal@cosmos.ru

## Эволюция углов между осью вращения и магнитным моментом в радиопульсарах

И. Ф. Малов<sup>1\*</sup>, З. В. Кенько<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИАН

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия

Получено распределение углов между магнитным моментом и осью вращения для радиопульсаров с периодами в интервале  $0,1 \text{ с} < P < 2 \text{ с}$ . Это распределение оказалось довольно широким со средним значением угла, равным 23 градуса. Для большей части пульсаров характерны умеренные значения углов от 20 до 45 градусов. Обнаружена полезная зависимость между кинематическим возрастом пульсара и его характеристическим возрастом. Такая зависимость даёт возможность по характеристическому возрасту, указанному в каталоге ATNF, оценить его более близкий к реальному кинематический возраст. Показано, что углы наклона в пульсарах с  $0,1 \text{ с} < P < 2 \text{ с}$  уменьшаются с возрастом. Обнаруженное уменьшение лучше всего описывается степенным законом. Были также вычислены углы наклона в пульсарах, находящихся в настоящий момент в остатках сверхновых. Эти углы не показывают заметного изменения в течение  $10^5$  лет. Их уменьшение начинается значительно позже.

---

\*E-mail: malov41@mail.ru

## Новый метод измерения дрейфа субимпульсов пульсаров

В. М. Малофеев\*, Т. В. Смирнова, С. А. Тюльбашев, М. А. Китаева

ПРАО АКЦ ФИАН

Предлагается методика измерения периодов второго и третьего класса у пульсаров, основанная на использовании суммарных фурье-спектров мощности [1,2]. С 2013 года на радиотелескопе БСА ФИАН ведётся круглосуточный поиск пульсаров в 96 пространственных лучах в интервале склонений от  $-9$  до  $+42$  градусов. Для повышения чувствительности поиска проводится суммирование спектров. При исследовании 68 известных и обнаруженных в ПРАО новых пульсаров было проведено суммирование от 500 до 1000 ежедневных спектров мощности. У части источников обнаружены две особенности в суммарных спектрах: модуляция амплитуд гармоник и появление у них спутников. Оказалось, что обе особенности связаны с дрейфом субимпульсов. Тщательный анализ и моделирование данных позволили измерить или уточнить у 12 пульсаров периоды второго класса, причём у четырех – впервые, а у восьми источников измерены периоды третьего класса, из них у двух – также впервые. Исследования проведены при поддержке грантов Российского научного фонда (РНФ) 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>) и 23-62-10043.

### Список литературы

- [1] V. M. Malofeev, S. A. Tyulbashev, *Research Astron. Astrophys.*, 18, 96 (2018)  
 [2] T. V. Smirnova, S. A. Tyulbashev, M. A. Kitaeva, V. M. Malofeev, послано в печать (2023)

---

\*E-mail: malofeev@prao.ru

## Гидродинамическое моделирование структуры аккреционной колонки рентгеновского пульсара с учётом резонансного рассеяния

И. Д. Маркозов\*, А. Ю. Потехин, А. Д. Каминкер

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Работа посвящена радиационно-гидродинамическому моделированию потока плазмы на полюса нейтронной звезды. При соударении аккрецируемого вещества с поверхностью нейтронной звезды генерируется излучение в рентгеновском диапазоне, причём давление этого излучения настолько велико, что оно влияет на динамику аккрецируемой плазмы. Поэтому задачи о нахождении характеристик излучения рентгеновского пульсара и гидродинамики падающего вещества должны решаться самосогласованным образом. При этом необходимо учитывать, что сильное магнитное поле нейтронной звезды модифицирует амплитуды элементарных процессов взаимодействия излучения и вещества. В работе получено самосогласованное решение нестационарных уравнений радиационной гидродинамики, описывающих процесс аккреции. Перенос излучения моделируется методом Монте-Карло. Учитывается комптоновское рассеяние в магнитном поле с сечением, содержащим основной циклотронный резонанс. Показано, как наличие резонанса влияет на динамическую структуру аккреционной колонки. Работа И.М. была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики БАЗИС.

---

\*E-mail: markozoviv@mail.ru

## Влияние искривления пространства на момент инерции магнитного поля радиопульсара

А. А. Матевосян<sup>1\*</sup>, Д. П. Барсуков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ Петра Великого

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Рассматривается влияние искривления пространства в метрике Шварцшильда на вклад в момент инерции радиопульсара от магнитного поля вне нейтронной звезды. Рассматривается как случай дипольного магнитного поля, так и случай недипольного «мелкомасштабного» поля, однако при этом рассмотрение ограничено вкладом в тензор инерции только одной гармоники.

---

\*E-mail: aramverner1@gmail.com

## Влияние особенностей гиперон-нуклонного взаимодействия на характеристики нейтронных звёзд

С. А. Михеев<sup>1,2\*</sup>, Д. Е. Ланской<sup>1</sup>, А. И. Насакин<sup>1</sup>, С. В. Сидоров<sup>1,2</sup>, Т. Ю. Третьякова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики

<sup>2</sup>НИИЯФ МГУ

Нейтронные звёзды являются астрономическими объектами с плотностью порядка ядерной. Поэтому для их описания применимы методы, характерные для ядерной физики и физики элементарных частиц. При этом при высоких плотностях, которые достигаются в нейтронных звёздах, может возникать дополнительная чувствительность к некоторым свойствам барионного взаимодействия в материи. Как следствие, изучение нейтронных звёзд может играть важную роль для понимания свойств барионных взаимодействий. В данной работе мы концентрируемся на изучении  $\Lambda N$ -взаимодействия. Мы рассматриваем нейтронные звёзды, состоящие из нуклонов, лептонов и  $\Lambda$ -гиперонов. Материя нейтронных звёзд моделируется на основе взаимодействия Скирма. Рассчитываются массы, радиусы и приливные деформируемости нейтронных звёзд. Мы изучаем влияние свойств гиперон-нуклонного взаимодействия на характеристики нейтронных звёзд. В частности, исследуются различия в описании многочастичных эффектов с помощью тройных  $\Lambda N N$  сил и  $\Lambda N$ -сил, зависящих от нуклонной плотности, а также чувствительность характеристик нейтронной звезды к значению показателя степени  $\gamma$  в зависимости взаимодействия от плотности. Проведён отбор параметризаций Скирма, наиболее подходящих для описания нейтронных звёзд, с учётом ограничений на значение коэффициента приливной деформируемости, полученных из гравитационного сигнала от слияния двух нейтронных звёзд в событии GW170817. Кроме того, мы исследуем влияние эффекта нарушения зарядовой симметрии в гиперон-нуклонном взаимодействии на характеристики нейтронных звёзд.

---

\*E-mail: semenmihey@gmail.com



## Магниторотационный механизм вспышек сверхновых

С. Г. Моисеенко\*, Г. С. Бисноватый-Коган

ИКИ РАН

Магниторотационный (МР) механизм взрыва коллапсирующих сверхновых был предложен Г.С. Бисноватым-Коганом в 1970 году. Идея МР механизма состоит в том, что радиальная кинетическая энергия разлета вещества (энергия взрыва сверхновой) возникает благодаря трансформации энергии вращения сколлапсировавшего железного ядра при помощи магнитного поля. Результаты численного моделирования МР взрыва сверхновой показывают, что форма взрыва качественно зависит от топологии начального магнитного поля. Взрыв может происходить преимущественно вдоль экваториальной плоскости (начальное поле квадрупольного типа симметрии) либо вдоль оси вращения (начальное магнитное поле – диполь). Энергия МР взрыва сверхновой может составлять до  $(2-4) \times 10^{51}$  эрг, что соответствует наблюдательным данным. В процессе МР взрыва возможно развитие магнитной дифференциально-вращательной неустойчивости. Максимальные значения магнитной индукции, полученные в расчётах, достигают  $10^{14}$  Гаусс. При наличии начального тороидального поля в дополнение к начальному полоидальному полю, а также когда начальное полоидальное поле представляет собой суперпозицию диполя и квадруполь, возможно нарушение зеркальной симметрии МР взрыва сверхновой, формирование односторонних джетов и отскок нейтронной звезды.

---

\*E-mail: moiseenko@cosmos.ru

## Наблюдение рентгеновских миллисекундных пульсаров телескопом ART-XC обсерватории СРГ

С. В. Мольков\*, А. А. Лутовинов, В. А. Арефьев, А. Ю. Ткаченко

ИКИ РАН

В докладе будет приведён обзор наблюдений быстро вращающихся нейтронных звёзд телескопом ART-XC имени М.Н. Павлинского. Несмотря на то, что телескоп был разработан для задач сканирования больших областей на небесной сфере, его детекторы обладают хорошим временным разрешением ( $\approx 23$  микросекунды), а бортовые часы достаточно стабильны, что даёт возможность проводить спектрально-временной анализ когерентных сигналов до периодов в несколько миллисекунд. Мы представим результаты наблюдений в основном по изолированным пульсарам, а также несколько наблюдений аккрецирующих миллисекундных пульсаров. Кроме того, проанализирована пригодность наблюдательных данных для абсолютного тайминга.

---

\*E-mail: molkov@cosmos.ru

## Однофотонные процессы в сильном магнитном поле

Д. И. Нагирнер\*, Д. Туричина

СПбГУ

Выводятся выражения для матричных элементов процессов излучения электроном фотона и рождения электрон-позитронной пары одним фотоном в цилиндрических координатах; также рассмотрены матричные элементы обратных процессов. Указанные процессы излучения возможны в плазме с сильным магнитным полем. Рассчитываются вероятности переходов, а также коэффициенты эмиссии и ослабления излучения, возникающего при этом. Результаты будут применяться при интерпретации спектров нейтронных звёзд.

---

\*E-mail: dinagirner@gmail.com

## Прохождение гамма-всплеска через молекулярное облако

А. В. Нестеренок\*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Построена численная модель распространения излучения гамма-всплеска в близлежащем молекулярном облаке. Учитываются процессы фотоионизации атомов H, He и атомов металлов, фотоионизация и диссоциация молекул H<sub>2</sub>, испарение частиц пыли, комптоновская ионизация, поглощение ультрафиолетового излучения молекулой H<sub>2</sub> в полосах Лаймана и Вернера. В работе рассчитана структура молекулярного облака (степень ионизации H, He и металлов, доля пыли в газе) после прохождения основного импульса гамма-всплеска и определена оптическая толщина в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне для послесвечения гамма-всплеска.

---

\*E-mail: alex-n10@yandex.ru

## Свойства самоподобия уравнений состояния и кривых масса–радиус нейтронных звёзд

Д. Д. Офенгейм<sup>1,2\*</sup>, П. С. Штернин<sup>1</sup>, Ц. Пиран<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>Еврейский университет г. Иерусалима, Израиль

Определение уравнения состояния сверхплотного вещества, в частности, зависимости давления  $P$  от плотности  $\rho$ , по данным наблюдений нейтронных звёзд (НЗ) является актуальной задачей. В литературе существует несколько сотен моделей уравнения состояния — нуклонных, гиперонных, гибридных (предсказывающих наличие кваркового внутреннего ядра НЗ), — основанных на различных подходах к микроскопическим свойствам вещества НЗ. Несмотря на различия в заложенной микрофизике, широкий набор таких моделей можно с высокой точностью описать одним семейством кривых  $P - \rho$ , которое задаётся всего несколькими параметрами [1]. Поскольку зависимость  $P - \rho$  взаимно однозначно связана с зависимостью радиуса НЗ  $R$  от её массы  $M$  [2], семейство кривых  $M - R$  должно задаваться таким же числом параметров. В данной работе на примере 160 моделей уравнения состояния показано, что в качестве двух из таких параметров удобно выбрать пару характеристик максимально массивной НЗ для данного уравнения состояния. Это могут быть её масса  $M_{\max}$  и радиус  $R_{\max}$ , либо давление  $P_{\max}$  и плотность  $\rho_{\max}$  в центре такой звезды. Безразмерные соотношения между массой и радиусом НЗ,  $M/M_{\max} - R/R_{\max}$ , при массах более  $1M_{\odot}$  с высокой точностью оказываются однопараметрическим семейством. Так же ведут себя безразмерные уравнения состояния  $P/P_{\max} - \rho/\rho_{\max}$  при плотностях более  $3\rho_0$  ( $\rho_0$  — плотность насыщенной ядерной материи), причём параметр семейства этих кривых определяется величинами  $P_{\max}$  и  $\rho_{\max}$ . Таким образом, максимально массивная НЗ задаёт удобные универсальные масштабы гидростатических характеристик любых НЗ. В работе представлены аналитические подгонки данных семейств кривых. Кроме того, между парами чисел  $M_{\max}$ ,  $R_{\max}$  и  $P_{\max}$ ,  $\rho_{\max}$  существует (приближённое) взаимно однозначное соответствие [3], также описанное аналитическими подгонками. Эти подгонки, в совокупности с подгонками зависимостей  $M - R$  и  $P - \rho$ , реализуют частичное приближённое аналитическое решение обратной задачи гидростатического равновесия НЗ. На основе этого решения предложен метод ограничения уравнения состояния при высоких плотностях по наблюдательным данным о массах и радиусах НЗ. В работе продемонстрировано, какие ограничения даёт этот метод при применении к современным результатам наблюдений НЗ. Работа поддержана грантом РФФ 19-12-00133-п.

### Список литературы

- [1] L. Lindblom, Phys. Rev. D, 82, 103011 (2010)
- [2] L. Lindblom, Astrophys. J., 398, 569 (1992)
- [3] D. D. Ofengeim, Phys. Rev. D, 101, 103029 (2020)

---

\*E-mail: ddofengeim@gmail.com

## Диссипация магнитного поля в ядрах нейтронных звёзд с мюонами

Д. Д. Офенгейм<sup>1,2\*</sup>, М. Е. Гусаков<sup>1</sup>, А. Ю. Потехин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>Еврейский университет г. Иерусалима, Израиль

Магнитные поля нейтронных звёзд (НЗ) ответственны за многие наблюдаемые проявления этих объектов. В числе прочего, диссипация магнитного поля в недрах НЗ служит источником тепла в сильно замагниченных НЗ (магнитарах), обеспечивая их аномально высокую тепловую светимость. Подтверждением того, что магнитные поля хотя бы отчасти ответственны за тепловые состояния НЗ, является наличие наблюдаемой «линии теплового баланса» — корреляции тепловой светимости и магнитного поля этих объектов [1]. Свойства вещества НЗ сильно различаются в коре и в ядре, и эволюция магнитного поля в этих областях тоже протекает по-разному. Большинство работ (например, [2] и ссылки там) ограничивается рассмотрением эволюции поля в коре. Полноценное исследование магнито-тепловой эволюции НЗ должно включать затухание магнитного поля в их ядрах. Решение этой задачи затруднено более сложной физикой вещества ядра, а большинство имеющихся в литературе попыток (например, [3–5]) рассматривает приближение минимального бета-равновесного состава ядра НЗ (нейтроны, протоны и электроны). В данной работе в рамках квазистационарного подхода [3,6] рассмотрена магнитогидродинамика ядра НЗ с мюонами (т.е. с более реалистичным составом). Рассчитаны темпы диссипации магнитного поля за счёт основных механизмов (неравновесные реакции, трение между нуклонами, трение между заряженными частицами). С помощью новейших моделей теплоизолирующей оболочки НЗ, применимых в магнитарных условиях [7], проведено сравнение теоретического предсказания положения «линии теплового баланса» между суммарной мощностью охлаждения НЗ и её нагревом за счёт диссипации магнитного поля в ядре с наблюдаемым положением этой «линии». Показано, что используемая модель даёт хорошую нижнюю оценку положения «линии теплового баланса» на диаграмме светимость — магнитное поле для наблюдаемого ансамбля НЗ. Это означает, что влияние затухания магнитного поля в ядре на магнито-тепловую эволюцию НЗ сопоставимо с влиянием диссипации поля в коре. Работа поддержана грантом РФФ 22-12-00048.

### Список литературы

- [1] J. A. Pons, B. Link, J. A. Miralles, U. Geppert, Phys. Rev. Lett., 98, 071101 (2007)
- [2] C. Dehman, D. Viganò, J. A. Pons, N. Rea, Mon. Not. R. Astron. Soc., 518, 1222 (2023)
- [3] P. Goldreich, A. Reisenegger, Astrophys. J., 395, 250 (1992)
- [4] F. Castillo, A. Reisenegger, J. A. Valdivia, Mon. Not. R. Astron. Soc., 498, 3000 (2020)
- [5] D. D. Ofengeim, M. E. Gusakov, Phys. Rev. D, 98, 043007 (2018)
- [6] M. E. Gusakov, E. M. Kantor, D. D. Ofengeim, Phys. Rev. D, 96, 103012 (2017)
- [7] M. V. Beznogov, A. Y. Potekhin, D. G. Yakovlev, Phys. Rep., 919, 1 (2021)

---

\*E-mail: ddofengeim@gmail.com

## Проблемы нуклеосинтеза тяжёлых элементов и килоновые

И. В. Панов<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ККТЭФ НИЦ Курчатовский институт

<sup>2</sup>МФТИ

Наблюдения лантанидов в спектрах килоновой после регистрации гамма всплеска и гравитационных волн [1] подтвердили теоретические сценарии r-процесса [2], связанные со слиянием нейтронных звёзд в конце эволюции тесной двойной системы, сопровождающимся сильным электромагнитным излучением. В результате многочисленных исследований процесса слияния нейтронных звёзд и регистрации таких событий стало ясно, что этот сценарий является основным для образования большинства тяжёлых элементов в r-процессе; его варианты и различные проблемы нуклеосинтеза и будут обсуждаться в докладе. Эволюция нейтронных звёзд в тесных двойных системах сильно зависит от их масс. Процесс слияния нейтронных звёзд близких масс изучен достаточно хорошо, но при сильном различии масс нейтронных звёзд сценарий слияния развивается совсем иначе [3]; по-другому развивается и нуклеосинтез тяжёлых элементов [4,5]. Мы обсудим нуклеосинтез в обоих сценариях, уделив внимание слиянию нейтронных звёзд, сильно различающихся по массе, когда происходит перетекание вещества с менее массивного компаньона на более массивный, что приводит к взрыву маломассивного компонента двойной системы по достижении гидродинамически-неустойчивой конфигурации [3]. Динамика нуклеосинтеза, как и самого выброса, в таком сценарии отличается от «стандартного» слияния двух нейтронных звёзд примерно равных масс, однако результаты моделирования в этих двух сценариях близки. Обсуждаются нерешённые вопросы динамики нуклеосинтеза, характерные для обоих сценариев. Автор благодарен Российскому научному фонду (проект 21-12-00061) за финансовую поддержку.

### Список литературы

- [1] N. R. Tanvir, A. J. Levan, C. González-Fernández, et al. *Astron. J.*, 848, L27 (2017)
- [2] J. Cowan, C. Sneden, J. E. Lawler, et al. *Rev. Mod. Phys.*, 93, 015002 (2021)
- [3] С. И. Блинников, Д. К. Надёжин, Н. И. Крамарев, А. В. Юдин, *Астрон. журн.*, 98, 379 (2021) [S. I. Blinnikov, D. K. Nadyozhin, N. I. Kramarev, A. V. Yudin *Astron. Rep.*, 65, 385 (2021)]
- [4] И. В. Панов, А. В. Юдин, *Письма в Астрон. журн.*, 46, 552 (2020) [I. V. Panov, A. V. Yudin, *Astronomy Lett.*, 46, 518 (2020)];
- [5] И. В. Панов, А. В. Юдин, *Ядерная физика*, 86, 4 (2023) [I. V. Panov, A. V. Yudin, *Phys. At. Nucl.*, 86, 1 (2023)]

---

\*E-mail: igor.panov@itep.ru

## Оценка параметров эволюции магнитного поля радиопульсаров с учётом эволюции магнитного угла

Г. А. Переверзев<sup>1\*</sup>, А. В. Бирюков<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>РУДН имени П. Лумумбы

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ

<sup>3</sup>Физический факультет НИУ ВШЭ

<sup>4</sup>Институт физики КФУ

Наблюдаемая статистика параметров вращения пульсаров (их периоды  $P$  и производные  $\dot{P}$ ) определяется, в том числе, темпом эволюции их магнитных полей. Поэтому логично исследовать затухание последних на основе наблюдаемого замедления вращения пульсаров. Здесь, однако, возникают две проблемы: 1) значительные не моделируемые вариации  $\dot{P}$ , наблюдаемые как шум тайминга пульсаров и аномальные показатели торможения; 2) эволюция магнитного угла  $\alpha$ , способная замаскировать медленную эволюцию поля, так как  $\dot{P} \propto B^2(1 + \sin^2 \alpha)$  [1]. В нашей работе предлагается простой подход, решающий эти две проблемы. Мы исследуем статистику периодов вращения  $P$  и возрастов  $t$  одиночных пульсаров, исключая  $\dot{P}$  из анализа явным образом. В качестве возрастов  $t$  используются кинематические возраста  $t_{\text{kin}}$ , оценённые из движения пульсаров в Галактике и возраста остатков сверхновых  $t_{\text{snr}}$ , связанных с отдельными объектами. Мы рассматриваем величину интеграла магнитного поля  $Y(t) = \int B^2(t) dt$ . Можно показать, что она не зависит явно от  $\dot{P}$ , но известным образом зависит от  $\alpha$ ,  $\alpha_0$ ,  $P$  и  $P_0$  – то есть учитывает и эволюцию угла тоже. Использование универсальных распределений для  $P_0$  и  $\alpha_0$  позволило проанализировать наблюдаемую зависимость  $Y(t)$  для 82 радиопульсаров с известными возрастными (от 1 тыс. лет до 10 млн. лет) и периодами. Представляя эволюцию магнитного поля в простом феноменологическом виде  $B(t) = B_0(1 + t/\tau_m)^{-\beta}$ , мы получили, что исследуемая выборка согласуется со следующим набором параметров модели:  $\log(B_0[\text{G}]) = -11.5 \pm 0.2$ ,  $\log(\tau_m[\text{клет}]) = 4.0 \pm 0.8$  и  $\beta = 0.28 \pm 0.05$ .

### Список литературы

- [1] A. Philippov, A. Tchekhovskoy, J. G. Li, Mon. Not. R. Astron. Soc., 441, 1879 (2014)

---

\*E-mail: grxbower@gmail.com

## Реверберация торов двухторовой рентгеновской пульсарной туманности в созвездии Парусов

А. Е. Петров<sup>1\*</sup>, К. П. Левенфиш<sup>1</sup>, Г. А. Пономарёв<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>СПбПУ Петра Великого

Трансзвуковое движение пульсара относительно внешней среды может способствовать формированию у него двухторовой пульсарной туманности. Этот двойной тор как целое испытывает реверберацию под действием напорного давления натекающей среды. При этом реакция обоих торов на этот напор однородна по азимуту, если среда натекает на пульсар параллельно оси туманности. Если же внешний поток атакует туманность под некоторым углом к её оси, подветренные половинки торов откликаются на действие внешнего потока с некоторой задержкой относительно их наветренных половинок. Эта задержка может приводить к любопытному явлению «повиливания» яркого сегмента подветренного джета двухторовой туманности. На основе релятивистской магнитогидродинамической модели такой туманности мы исследуем динамику её плазменных течений, которые могут приводить к возникновению явления «повиливания». Модель, в частности, позволяет естественным образом связать влияние яркого сегмента подветренного (юго-восточного) джета туманности пульсара в созвездии Парусов (Vela) с реверберацией её торов. Численное моделирование пульсарной туманности выполнено А.П. при поддержке гранта РФФ 21-72-20020.

---

\*E-mail: a.e.petrov@mail.ioffe.ru

## Джет пульсарной туманности как индикатор движения пульсара относительно среды

Г. А. Пономарёв<sup>1,2\*</sup>, К. П. Левенфиш<sup>1</sup>, А. Е. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>СПбПУ Петра Великого

В работе исследуются пульсарные туманности с морфологией «джет – тор», подобной той, что видна на рентгеновских снимках Крабовидной туманности (Crab) и пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela). У большинства джет-торовых объектов джет и контр-джет разительно непохожи, а иногда один из джетов не наблюдается вовсе. Указанные явления, согласно нашим исследованиям, могут быть следствием относительного движения пульсара и внешней среды. Даже дозвуковое относительное движение существенно меняет картину магнитных истечений туманности и её наблюдательное проявление в рентгеновском диапазоне; кроме того, оно привносит дополнительную временную переменность в высокоэнергичное нетепловое излучение туманности. Обычно относительным движением пренебрегают при интерпретации рентгеновской морфологии несверхзвуковых туманностей. На примере релятивистской магнитогидродинамической модели мы показываем, что подобное пренебрежение может привести к неверному истолкованию рентгеновской структуры туманности и, как следствие, к ошибочному причислению её к одно- или двухторовым объектам. Численное моделирование пульсарной туманности выполнено А.П., поддержанным грантом РФФ 21-72-20020. Анализ и интерпретация численных и наблюдательных данных выполнены К.Л. и Г.П., поддержанными базовым проектом ФТИ 0040-2019-0025.

---

\*E-mail: georgy.ponomaryov@gmail.com

## Эволюция магнитного поля нейтронных звёзд

С. Б. Попов<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ИСТР, Триест, Италия

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ

В докладе вначале кратко представлены ключевые представления об эволюции магнитных полей нейтронных звёзд и сопутствующих наблюдательных проявлениях. Затем обсуждается возможность существования магнитаров в двойных системах разных типов и рассматриваются возможные кандидаты в такие объекты. Список включает в себя аккрецирующие нейтронные звёзды, гамма-источники и быстрые радиовсплески. Обсуждается сценарий, допускающий существование нейтронных звёзд с сильным магнитным полем в массивных рентгеновских двойных.

---

\*E-mail: sergepolar@gmail.com

## Последние результаты в области детектирования гравитационно-волнового фона с помощью метода пульсарных сетей

Н. К. Порайко и Европейская пульсарная сеть

Университет Бикокка, Милан, Италия

MPIfR, Бонн, Германия

Главной задачей проекта пульсарной сети является регулярный мониторинг нескольких десятков миллисекундных пульсаров в радио диапазоне с целью детектирования динамических возмущений метрики пространства-времени. На сегодняшний день пульсарные сети являются единственным способом обнаружения гравитационно-волнового (ГВ) излучения в наногерцовом диапазоне частот. Наиболее часто рассматриваемым источником метрических возмущений на данных частотах является ГВ фон, генерируемый ансамблем сверхмассивных двойных чёрных дыр, которые теоретически могут находиться в центрах галактик. В докладе будут подведены итоги 25-летней работы Европейской пульсарной сети, занимающейся сбором пульсарных данных с помощью пяти крупнейших радиотелескопов в Европе. Будут приведены детали обработки пульсарных данных, а также современные методы детектирования астрофизических сигналов на фоне коррелированных помех. В конце доклада будут рассмотрены характерные особенности, обнаруженные в данных Европейской пульсарной сети, и их возможная интерпретация.



## Исследование квазипериодических вариаций МПИ пульсаров B0329+54 и V1642–03. Анализ гипотез о планетной системе и медленных глитчах

В. А. Потапов<sup>1\*</sup>, С. А. Андрианов<sup>2</sup>, А. В. Фраерман<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ПРАО АКЦ ФИАН

<sup>2</sup>СПбГУ, математико-механический факультет

<sup>3</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

Исследования пульсаров методом хронометрирования (тайминга) были начаты вскоре после их открытия в 1967 году. Данный метод оказался наиболее плодотворным для исследования динамики пульсаров, процессов в их магнитосфере, исследования орбитальных параметров двойных и планетных систем, включающих пульсары, а также для зондирования межзвёздной среды. Одни из первых качественных наблюдений этим методом были проведены в Лаборатории реактивного движения (JPL) в период с 1968 по 1982 г. с использованием антенн Deep Space Network [1]. Наблюдения части объектов из выборки JPL продолжаются вплоть до сегодняшнего дня (в частности, в ПРАО с 1978 по 2023 г. на частотах 102 и 111 МГц), что позволяет построить уникальные по продолжительности (более 50 лет) ряды их моментов прихода импульсов (МПИ). Поскольку в выборке ярких секундных пульсаров неизбежно находятся молодые активные пульсары, их МПИ подвержены сильным возмущениям, которые могут иметь квазисистематический характер. Особенности процедуры хронометрирования, включающей в себя уточнение параметров пульсаров по методу наименьших квадратов, часто приводят к неоднозначности интерпретации наблюдательных данных. Данная работа посвящена анализу результатов рядов МПИ двух секундных пульсаров из выборки JPL [1] (B0329+54 и V1642–03), обладающих ярко выраженными квазисистематическими ходами в МПИ с большой амплитудой, достигающей, после устранения степенных трендов, 50 мс и 100 мс соответственно. Долговременные вариации МПИ пульсара B0329+54 были интерпретированы в 1995 г. как результат наличия у пульсара планеты с периодом 6160 дней [2] и массой около 2 масс Земли, и, возможно, второй планеты с периодом 1105 дней. В работе [3] (впрочем, основанной на менее качественных рядах МПИ) был сделан вывод об отсутствии планет у данного пульсара. В [4] на основании более тщательного анализа почти непрерывного ряда наблюдений (1968–2011) был повторен вывод о наличии планеты с массой около 2 земных, но с периодом 27.8 года (около 10140 дней). В [5] исследовался пульсар V1642–03, обладающий необычными квазипериодическими вариациями МПИ большой амплитуды. Первоначальное объяснение этих вариаций прецессией пульсара было отвергнуто в [6] с предложением довольно экзотической феноменологической модели медленных глитчей, позволяющей (по мнению автора) предсказывать время их повторения и амплитуду. В нашей работе на основе архивных данных и наших наблюдений этих пульсаров в 2014–2022 годах на частоте 111 МГц были проверены обе вышеприведённые модели. Мы не обнаружили надёжного подтверждения наличия планетной системы у B0329+54 с указанными в [2] и [4] параметрами. Кроме того, нами не было найдено надёжного подтверждения модели медленных глитчей для V1642–03, предложенной в [6]. Вместе с тем у V1642–03 был обнаружен сбой периода, который может быть проинтерпретирован как классический глитч. Таким образом, на основании новых наблюдательных данных можно утверждать, что причина квазипериодического хода МПИ двух этих пульсаров вновь становится открытой для теоретической интерпретации.

### Список литературы

- [1] G. S. Downs, P. E. Reichley, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 53, 169 (1983)
- [2] T. V. Shabanova, *Astrophys. J.*, 453, 779 (1995)
- [3] M. Konacki, W. Lewandowski, A. Wolszczan, O. Doroshenko, M. Kramer, *Astrophys. J.*, 519, L81 (1999)
- [4] Е. Д. Старовойт, А. Е. Родин, *Астрон. журн.*, 94, 944 (2017)
- [5] T. V. Shabanova, A. G. Lyne, J. O. Urama, *Astrophys. J.*, 552, 321 (2001)
- [6] T. V. Shabanova, *Astrophys. J.*, 700, 1009 (2009)

---

\*E-mail: potap@prao.ru

## Нейтронные звёзды и астрофизика частиц

М. С. Пширков<sup>1\*</sup>, С. Б. Попов<sup>2,1</sup>, П. Г. Тиняков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ

<sup>2</sup>ИСТР, Триест, Италия

<sup>3</sup>Université Libre de Bruxelles, Брюссель, Бельгия

Исследование существования гипотетических частиц за пределами Стандартной модели часто имеет дело с экстремальными параметрами: большими энергиями, крошечными сечениями, большими временными масштабами и т.д. Иногда лабораторные эксперименты позволяют проверить необходимые области пространства параметров, но чаще естественные ограничения приводят к слабо ограничивающим верхним пределам. В таких случаях астрофизические исследования могут помочь существенно расширить исследуемый диапазон значений параметров. Среди астрономических источников, используемых в интересах фундаментальной физики, ведущую роль играют компактные объекты, прежде всего нейтронные звёзды. В докладе будут рассмотрены некоторые аспекты исследований в области астрофизики частиц, связанные с наблюдениями и свойствами этих небесных тел. Частицы темной материи могут накапливаться внутри нейтронных звёзд, что может приводить к их дополнительному нагреву или коллапсу в чёрные дыры. Количество аккумулированного вещества будет зависеть от режима и скорости захвата частиц. От их свойств взаимодействий будут зависеть возможные астрофизические последствия. Особое внимание будет уделено популярным кандидатам в тёмную материю – аксионам. Их существование может быть обнаружено благодаря наблюдениям эмиссии, возникающей в результате процесса Примакова в магнитосферах нейтронных звёзд. Также они могут способствовать охлаждению этих компактных объектов. В докладе представлены результаты в этих областях, включая верхние пределы, основанные на последних наблюдениях.

---

\*E-mail: pshirkov@gmail.com

## Жёсткое электромагнитное излучение, связанное с быстрыми радиовсплесками, по данным эксперимента Konus-Wind

А. В. Ридная\*, Д. Д. Фредерикс, Д. С. Свинкин, А. Л. Лысенко, А. Е. Цветкова, М. В. Уланов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Быстрые радиовсплески (Fast Radio Bursts, FRB) – мощные импульсы радиоизлучения внегалактического происхождения с характерной длительностью порядка нескольких миллисекунд. Это достаточно молодой класс астрофизических транзиентов – первый всплеск был обнаружен в 2007 году. На данный момент известно чуть меньше тысячи источников FRB, около 40 из них – повторные. С момента обнаружения феномена выдвинуто множество гипотез о их возможной природе, однако до сих пор происхождение этих транзиентов остаётся невыясненным. Наиболее перспективные модели связаны со вспышечной активностью магнитаров, связь которой с FRB была впервые наблюдательно подтверждена для галактического магнитара SGR 1935+2154. 28 апреля 2020 г. от этого источника были одновременно зарегистрированы очень похожий на FRB радиовсплеск и рентгеновская вспышка с необычно жёстким спектром. В октябре 2022 года совместное детектирование повторилось, однако для менее слабого события. Других подтвержденных отождествлений FRB с транзиентами любой природы пока нет. В докладе приводятся характеристики указанных событий, полученные в эксперименте Konus-Wind ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также представлены результаты направленного поиска возможных гамма-транзиентов, сопровождавших более 700 FRB, в архивных данных эксперимента Konus-Wind, осуществляющего непрерывный мониторинг излучения всего неба в диапазоне энергий 20–1500 кэВ. Полученные результаты обсуждаются в контексте предшествующих работ по поиску жёсткого электромагнитного излучения источников FRB и теоретических предсказаний. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-12-00250.

---

\*E-mail: ridnaia@mail.ioffe.ru

## Влияние внешней активной среды на процесс двойного комптоновского рассеяния

Д. А. Румянцев\*, Т. А. Пухов, М. В. Чистяков

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

Рассмотрен двойной комптоновский процесс  $e\gamma \rightarrow e\gamma\gamma$  в присутствии сильно замагниченной зарядово-асимметричной холодной плазмы. В этих условиях исследованы изменения дисперсионных и поляризационных свойств фотонов. Показано, что в условиях холодной, квазивырожденной, умеренно релятивистской плазмы векторы поляризации фотонов будут оставаться такими же, как и в чистом магнитном поле. Анализ уравнения дисперсии в такой плазме позволил установить, что фотон моды 1 имеет закон дисперсии, мало отличающийся от вакуумного,  $q^2 = 0$ , тогда как закон дисперсии фотона моды 2 претерпевает существенные изменения. В частности, наличие плазмы подавляет вероятности основных каналов расщепления фотона  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$  и  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$  по сравнению с магнитным полем в вакууме. С другой стороны, установлено, что в этом случае эффективным механизмом для получения поляризованных фотонов в холодной плазме ( $T \ll \mu - m$ ) может стать процесс двойного комптоновского рассеяния. Это может повлиять на формирование спектров излучения сильно замагниченных нейтронных звёзд. Получено простое выражение для дифференциального сечения процесса  $e\gamma_2 \rightarrow e\gamma_2\gamma_2$ , удобное для использования в задачах переноса излучения.

---

\*E-mail: rda@uniyar.ac.ru

## Возможное нетепловое рентгеновское излучение звезды HD 110432

Е. Б. Рыспаева<sup>1\*</sup>, А. Ф. Холтыгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КрАО РАН

<sup>2</sup>СПбГУ

Ве-звезда HD 110432 (BZ Стu) была первым обнаруженным объектом загадочного подкласса звёзд аналогов  $\gamma$  Cas, которым свойственны аномально высокие температуры излучающей в рентгеновской части спектра плазмы от 10 до 20 кэВ (и даже выше) в предположении о полностью тепловом рентгеновском излучении. Звезда HD 110432 многократно наблюдалась и оптическом, и в рентгеновском диапазонах и проявляла необычные свойства. Исследования рентгеновских спектров звезды указывают на наличие у неё вырожденного компонента в виде белого карлика или нейтронной звезды в режиме пропеллера, хотя оптическими наблюдениями это пока не подтверждено. В работе сделан независимый анализ архивных рентгеновских наблюдений BZ Стu, выполненных на спутниках XMM-Newton и Chandra, и проведено сравнение характеристик рентгеновских спектров разных лет. Обнаружено, что на звезде имеют место короткие рентгеновские квази-вспышки длительностью до 20 килосекунд, при которых рентгеновский поток возрастает примерно в два раза; при этом параметры плазмы, излучающей в рентгене, меняются незначительно. Зарегистрированы также множественные регулярные вариации рентгеновского излучения звезды с периодами от 2 до 400 минут. Предположено, что рентгеновское излучение звезды представляет собой совокупность теплового и нетеплового компонентов. Тепловой квазистационарный компонент генерируется в результате аккреции вещества звёздного ветра на компактный компонент. В то же время нетепловой компонент может быть связан со взаимодействием локальных магнитных полей Ве-компонента BZ Стu с магнитным полем декреционного диска. Нестационарность процесса генерации локальных магнитных полей может объяснить появление рентгеновских квази-вспышек.

---

\*E-mail: e.ryspaeva@yandex.ru

**RX J0440.9+4431: сверхкритический рентгеновский пульсар**

А. Салганик<sup>1,2\*</sup>, С. С. Цыганков<sup>3</sup>, В. Дорошенко<sup>4</sup>, С. В. Мольков<sup>2</sup>,  
А. А. Лутовинов<sup>2</sup>, А. А. Муштуков<sup>5</sup>, Ю. Поутанен<sup>3</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>ИКИ РАН

<sup>3</sup>Университет Турку, Финляндия

<sup>4</sup>Тюбингенский университет, Германия

<sup>5</sup>Оксфордский университет, Великобритания

В докладе приводятся результаты исследования транзиентной рентгеновской двойной RX J0440.9+4431 (J0440), состоящей из рентгеновского пульсара и Ве-звезды Главной последовательности, по данным обсерваторий *NuSTAR*, *INTEGRAL*, *NICER* и *Swift*. Источник долгое время относили к классу низкосветимостных постоянных Ве-систем, однако серия вспышек выявила его транзиентную природу. Исследование фокусируется на гигантской вспышке 2023 года, превосходящей предыдущие в десятки раз и достигнувшей пиковой светимости  $4.3 \times 10^{37}$  эрг/с. При умеренных темпах аккреции материя стекает на поверхность нейтронной звезды вблизи её магнитных полюсов. Однако в течение данной вспышки по достижении светимости  $2.8 \times 10^{37}$  эрг/с пульсар резко изменил характер зависимости жёсткости излучения от светимости, а также форму профиля импульса. Это было нами интерпретировано как переход в так называемый сверхкритический режим аккреции: давление излучения оказалось достаточно большим, чтобы остановить падение вещества, что сопровождалось формированием ударной волны и образованием аккреционной колонки. В результате широкополосных наблюдений была изучена эволюция двугорбой спектральной формы J0440 с пиками на 10–20 и 50–70 кэВ при переходе между различными режимами аккреции. Нами было обнаружено, что при описании спектра данной моделью нет необходимости в упоминавшейся в более ранних работах циклотронной линии на энергии 30 кэВ. В связи с этим нами была получена оценка на величину магнитного поля  $B \sim 10^{13}$  Гс на (основании непрямых методов).

**Список литературы**

- [1] A. Salganik, S. S. Tsygankov, V. Doroshenko, et al., arXiv:2304.14881

---

\*E-mail: alsalganik@gmail.com

## Спектральный и временной анализ быстрого рентгеновского транзиента IGR J16195–4945 по данным наблюдений CPG/ART-XC

М. Н. Сатыбалдиев<sup>1,2\*</sup>, И. А. Мереминский<sup>1</sup>, А. А. Лутовинов<sup>1</sup>, Д. И. Карасев<sup>1</sup>,  
А. Н. Семена<sup>1</sup>, А. Е. Штыковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН

<sup>2</sup>МФТИ

В работе представлены результаты исследования быстрого рентгеновского транзиента в системе со сверхгигантом (SFXT) IGR J16195–4945. Был проведён временной и спектральный анализ данных, полученных в марте 2021 года телескопом CPG/ART-XC. Во время наблюдения было зарегистрировано шесть ярких вспышек. Измеренные временные и энергетические характеристики вспышек сравнивались с моделью дозвуковой квазисферической оседающей аккреции и с характеристиками вспышек других SFXT-систем. Кроме того, была обнаружена необычная переменность в ближнем ИК диапазоне.

---

\*E-mail: maksatsatybaldiev@gmail.com

## Гигантские вспышки магнитаров в близких галактиках

Д. С. Свинкин<sup>\*</sup>, Д. Д. Фредерикс

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Наиболее впечатляющим проявлением активности магнитаров – молодых нейтронных звёзд со сверхсильными магнитными полями до  $10^{14}$ – $10^{15}$  Гс – являются исключительно редкие гигантские вспышки гамма-излучения (Magnetar Giant Flares, MGFs) с энерговыделением до  $\sim 5 \times 10^{46}$  эрг и пиковой светимостью до  $\sim 2 \times 10^{48}$  эрг/с. Колоссальная интенсивность коротких начальных импульсов двух известных MGF от Галактических источников (SGR 1900+14 и SGR 1806-20) не позволила детально изучить их временную структуру, а также оценить спектр и энергетику событий из прямых измерений. Решить эту непростую задачу позволяет детектирование MGF из близких галактик, по наблюдательным характеристикам близких к коротким гамма-всплескам (GRB). До 2020 г. было зарегистрировано два коротких GRB – кандидата во внегалактические MGF: GRB 051103 из группы галактик M81/M82 ( $\sim 3.6$  Мпк) и GRB 070201 из галактики Андромеды (M31,  $\sim 780$  кпк). Очень яркий короткий GRB 200415A, зарегистрированный в 15 апреля 2020 г, был, благодаря наблюдениям большой группой космических детекторов, впервые надёжно ассоциирован с близкой ( $\sim 3.5$  Мпк) галактикой NGC 253. При этом на основе временных и спектральных характеристик всплеск был практически идентичен всплеску GRB 051103, что позволило надёжно классифицировать эти события как MGF в близких галактиках. В ходе ретроспективного поиска MGF среди набора коротких гамма-всплесков были обнаружены ещё два кандидата в MGF из галактик M83 (GRB 070222) и NGC 253 (GRB 180128A). В докладе представлены характеристики наиболее полного на сегодня набора гигантских вспышек. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 21-12-00250.

---

\*E-mail: svinkin@mail.ioffe.ru

## Исследование переменности излучения пульсара B0823+26 от секунд до нескольких лет

Т. В. Смирнова<sup>1\*</sup>, М. О. Торопов<sup>2</sup>, С. А. Тюльбашев<sup>1</sup>, В. А. Самодуров<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ПРАО АКЦ ФИАН

<sup>2</sup>ООО ТЭК Информ

<sup>3</sup>НИУ ВШЭ

Проведено исследование переменности PSR B0823+26 на частоте 111 МГц. Этот пульсар имеет нуллинг, переключение мод и интеримпульс. Исследовались вариации амплитуды основного импульса (ГИ), посткурсор (ПК) и интерпульса (ИП) по ежедневным наблюдениям на интервале в 5.5 лет. Показано, что отношение амплитуд во вспышечной (В) и спокойной модах (С) ГИ составляет 60. В В-моду соотношение амплитуд ГИ и ИП равно 65. Нуллинг составляет 4% от общего времени наблюдения. Показано, что все компоненты пульсарного излучения имеют коррелированные вариации излучения на длительном временном интервале. Используя корреляционный и структурный анализ данных, мы получили характерные временные масштабы этих вариаций: 3–5 дней, 37 дней и 1 год. Эти вариации интерпретируются как рефракционные мерцания на межзвёздной плазме. Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>).

---

\*E-mail: tvs47.m@mail.ru

## Сверхмедленный радиопульсар со сверхсильным магнитным полем

Д. Н. Собьянин\*

ФИАН

Недавнее обнаружение радиопульсара PSR J0901–4046 с большим периодом 76 с ставит фундаментальный вопрос о том, как столь медленно вращающаяся замагниченная нейтронная звезда может быть активной в радиодиапазоне. Величина магнитного поля, вытекающая из канонической магнитодипольной оценки по периоду вращения и его производной по времени, недостаточно высока для объяснения наблюдаемого радиоизлучения поскольку по своим вращательным характеристикам данный радиопульсар попадает в область правее и ниже линии смерти. Дополнительный учёт малости угла наклона оси магнитного диполя относительно оси вращения не позволяет повысить оценку поля до величины, необходимой для развития каскадного рождения электрон-позитронной плазмы, ответственной за радиоизлучение. Если же отказаться от магнитодипольной модели и вместо этого непосредственно рассмотреть преобразование энергии при развитии каскада, то можно установить связь между магнитным полем на поверхности звезды и шириной микроимпульсов, наблюдаемых у данного радиопульсара [1]. Полученное магнитное поле почти на три порядка превышает швингеровское поле и оказывается достаточным для объяснения генерации электрон-позитронной плазмы и сопутствующего радиоизлучения. Сама нейтронная звезда при этом замедляется не за счёт магнитодипольного излучения, а за счёт электрических токов, текущих в полярной области, а энергия её вращения преобразуется в энергию ускоряемых там электронов и позитронов.

### Список литературы

- [1] D. N. Sob'yanin, Phys. Rev. D, 107, L081301 (2023)

---

\*E-mail: sobyanin@lpi.ru

## Массы и радиусы нейтронных звёзд по данным наблюдений

В. Ф. Сулейманов\*

Представлен краткий обзор современного состояния методов и результатов определения масс и радиусов нейтронных звёзд. Знание этих параметров важно для понимания физики внутреннего строения нейтронных звёзд. Представлены результаты определения масс пульсаров в двойных системах комбинацией радионастрономических и оптических наблюдений, которые привели к обнаружению массивных нейтронных звёзд, с массой, превышающей 2 массы Солнца. Представлены различные методы определения радиусов нейтронных звёзд. Особое внимание уделено методам, связанным с моделированием рентгеновских спектров одиночных нейтронных звёзд и спектров термоядерных вспышек на поверхности аккрецирующих нейтронных звёзд в тесных двойных системах. Отдельно представлены полученные недавно результаты определения массы и радиуса нейтронной звезды в центре остатка сверхновой HESS J1741–347, масса которой, возможно, является экстремально низкой, около 0.8 масс Солнца.

---

\*E-mail: vsuleimanov@gmail.com

## Обнаружение радиоизлучения от Геминга-подобного гамма-пульсара J1836+5925

Д. А. Теплых\*, В. М. Малофеев, О. И. Малов, М. А. Тимиркеева, И. Ф. Малов

ПРАО АКЦ ФИАН

Представлены результаты обнаружения радиоизлучения от гамма-пульсара J1836+5925. Данный пульсар имеет некоторые характерные черты пульсара Геминга (J0633+1746), и также считается радио-тихим пульсаром. В Пушинской радиоастрономической обсерватории на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц были зарегистрированы редкие события радиоизлучения от этого объекта. Обработано более 100 дней наблюдений и только в нескольких сеансах удалось накопить интегральный профиль за 6 минут наблюдений. Индивидуальные импульсы с отношением сигнал/шум  $> 4$  появляются в большем числе сеансов. Особенностью радиоизлучения пульсара J1836+5925 является широкий интегральный профиль и очень узкие индивидуальные импульсы. Возможно также наличие интерпульса. Была измерена мера дисперсии  $DM = 23,5 \pm 1$  пк/с<sup>3</sup>. Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>)

---

\*E-mail: niko-t@yandex.ru



## Углы между магнитным моментом и осью вращения. Структура магнитосферы пульсаров

М. А. Тимиркеева\*, И. Ф. Малов

ПРАО АКЦ ФИАН

В настоящее время известно более 3000 пульсаров. В основном они излучают на радиочастотах [1]; порядка 300 объектов зарегистрированы как пульсары в гамма-диапазоне [2]; тепловое и нетепловое рентгеновское излучение зарегистрировано от нескольких десятков объектов [3, 4]. Данное исследование посвящено вычислению углов между магнитным моментом и осью вращения в радиопулсарах, излучающих также в гамма- и рентгеновском диапазонах. Этот параметр позволяет понять не только специфику излучения конкретного радиопулсара: построенные распределения углов для объектов, излучающих в разных диапазонах, могут установить чёткие различия в исследуемых группах. Угол между магнитным моментом и осью вращения также является ключевым для проверки предлагаемых моделей излучения пульсаров. Для последующего анализа были сформированы три группы пульсаров: в первую группу входят только радио-громкие пульсары; вторая группа – это радиопулсары с зарегистрированным гамма-излучением – радио-громкие гамма-пульсары; третья группа состоит из рентгеновских радиопулсаров. Из выборки исключены пульсары, находящиеся в двойных системах и шаровых скоплениях (чтобы избежать влияния компаньонов). Были вычислены значения углов по наблюдаемой ширине импульса на уровне 10% для нескольких сотен известных радиопулсаров. Полученные значения, в совокупности с оценками на основе других методов, могут дать информацию об ориентации осей в пульсарах и послужить дальнейшему развитию теоретических представлений о структуре магнитосферы пульсара. Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>).

### Список литературы

- [1] R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, et al., *Astron. J.*, 129, 4, 1993 (2005)
- [2] A. A. Abdo, M. Ajello, A. Allafort, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 208, 1 (2013)
- [3] A. Possenti, R. Cerutti, M. Colpi, et al., *Astron. Astrophys.*, 387, 993 (2002)
- [4] T. Prinz, W. Becker, arXiv:1511.07713 (2015)

---

\*E-mail: marika-ko@yandex.ru

## Начальное распределение магнитных углов классических радиопульсаров

Е. А. Токарева<sup>1\*</sup>, А. В. Бирюков<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ

<sup>3</sup>Физический факультет НИУ ВШЭ

<sup>4</sup>Институт физики КФУ

Магнитный угол  $\alpha_0$  – угол между осью вращения и магнитным моментом нейтронной звезды. Теория предсказывает, что этот угол эволюционирует к меньшим значениям, заставляя магнитную ось становиться сонаправленной с осью вращения. В настоящей работе приводятся результаты расчёта начальных (на момент рождения) значений магнитных углов 35 одиночных радиопульсаров. Для этих пульсаров известны наблюдаемые оценки текущих значений этих углов, а также кинематический возраст, полученный из наблюдаемой скорости движения пульсара в Галактике и предположения о локализации пространственной области его рождения. Кроме того, совместно оценивались начальные периоды  $P_0$  пульсаров выборки. Предполагалось, что эволюция периода пульсара и эволюция его магнитного угла описываются моделью, следующей из результатов численного магнитогидродинамического моделирования [1], которая была дополнена эволюцией величины магнитного поля звезды. Показывается, что начальные магнитные углы пульсаров следуют скорее изотропному распределению ( $p(\alpha_0) \sim \sin \alpha_0$ ), а распределение начальных периодов согласуется с уже имеющимися в литературе оценками. При этом, однако, качество исходных данных не позволяет обнаружить возможную корреляцию между  $\alpha_0$  и  $P_0$ . Дополнительно в работе показывается, что применяемая модель замедления совместно с данными о кинематических возрастах пульсаров требует слабого затухания их магнитных полей – менее чем на 1 порядок величины за 10–100 млн. лет.

### Список литературы

- [1] A. Philippov, A. Tchekhovskoy, J. G. Li, Mon. Not. R. Astron. Soc., 441, 1879 (2014)

---

\*E-mail: e.tokareva135@gmail.com

## Радиосвойства нейтронных звёзд в рентгеновских двойных системах. Радиопульсары и магнитары

С. А. Трушкин\*, Н. Н. Бурсов, П. Г. Цыбулев, Н. А. Нижельский, А. В. Шевченко

САО РАН

В последние годы нейтронные звёзды (НЗ) стали не менее популярны, чем чёрные дыры в объяснении недавно открытых космических радиоисточников. Это и таинственные быстрые радиовсплески (БРВ), совокупные свойства которых почти однозначно связывают их с НЗ с мощными магнитными полями – магнитарами; это и ультраяркие рентгеновские источники, среди которых обнаружены по крайней мере четыре НЗ, рентгеновские пульсары. Происхождение некоторых транзитных радиоисточников однозначно связано с НЗ в разных состояниях. Уже в нескольких рентгеновских двойных системах – микроквазарах обнаружено пульсирующее радиоизлучение, однозначно указывающее на НЗ, как релятивистский компонент. Наконец, НЗ во всех их проявлениях (от одиночных радиопульсаров до событий слияния с чёрными дырами или другими НЗ) являются отличными источниками гравитационных волн, на которые возлагает особые надежды молодая гравитационно-волновая астрономия. Мы кратко обсудим свежие астрономические данные по НЗ, свойства и механизмы их излучения. В качестве примеров мы обсудим такие объекты как микроквазары Cir X-1 и LSI+61d303, галактический и внегалактические БРВ и транзитные радиоисточники. На радиотелескопе РАТАН-600 с введением многоканальных приемников с высоким временным разрешением (до 60 микросекунд) стало возможным исследовать и радиовсплески магнитаров, и отдельные импульсы ярких радиопульсаров. Стоит особо отметить, что появилась возможность эффективно копировать сигнал до одного часа. И многие годы ведётся мониторинг разного рода транзитных и вспыхивающих источников в см-дм диапазоне волн, часто именно в режиме внутрисуточных измерений до 5 часов.

---

\*E-mail: satr@sao.ru

## Поиск пульсаров на склонениях от $-9^\circ$ до $+55^\circ$

С. А. Тюльбашев<sup>1\*</sup>, Г. Э. Тюльбашева<sup>2</sup>, М. А. Китаева<sup>1</sup>, И. Л. Овчинников<sup>3</sup>,  
В. В. Орешко<sup>1</sup>, С. В. Логвиненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПРАО АКЦ ФИАН

<sup>2</sup>ИМПБ РАН

<sup>3</sup>НИИЯФ МГУ

При поиске пульсаров одинаково важны как обеспечение высокой чувствительности телескопа за счёт его высокой эффективной площади, широкой полосы приема, длительных сеансов наблюдений, так и применение новых методов обработки наблюдений. В 2012 году была закончена модернизация радиотелескопа БСА [1]. На основе одного антенного поля, состоящего из 16384 диполей, удалось создать два независимых радиотелескопа. Поиск пульсаров проводится на радиотелескопе БСА3, имеющем 128 неуправляемых лучей, перекрывающих склонения от  $-9^\circ$  до  $+55^\circ$  с полем зрения около 50 кв. градусов. Эффективная площадь БСА3 составляет 47000 м<sup>2</sup>, что делает его одним из самых больших в мире телескопов, работающих в метровом диапазоне длин волн. Входной поток данных после оцифровки сигнала, примерно 22 Тб в секунду, превращается в выходной поток (на запись) 4,65 Гб в час и 40 Тб в год. На настоящий момент запись наблюдений идет круглосуточно и ежедневно около 3000 дней. Обработка накопленных данных проводилась параллельно в 128 потоках на двух серверах. Поиск пульсаров проводится с помощью спектров мощности, получаемых за каждую наблюдательную сессию. Для каждого направления на небе, а их больше 100000, ежедневно создаётся 1500 спектров мощности. При суммировании спектров за разные сессии увеличивается отношение сигнала к шуму ( $S/N$ ) для гармоник, соответствующих периоду пульсара, если пульсар есть в записи. Ожидается увеличение чувствительности в 35–40 раз по сравнению с наблюдениями за одну сессию. В 2022 году была опубликована работа, рассматривающая новый способ представления спектров мощности [2]. Все спектры (для всех перебираемых мер дисперсии  $DM$  и периодов  $P$ ), соответствующие одному направлению на небе, представляются на одном рисунке (карте  $P/DM$ ). На этой карте по вертикальной шкале откладывается мера дисперсии  $DM$ , а по горизонтальной шкале – период пульсара  $P$ . Для представления спектров задаётся нижняя граница  $S/N$  показываемых гармоник (по умолчанию  $S/N = 4$ ). Высоты гармоник, имеющих  $S/N > 4$ , показываются на карте кружками разного размера. Размер кружка зависит от  $S/N$  гармоники. Детектированный пульсар виден на рисунке как набор вертикальных отрезков, где первый отрезок соответствует периоду пульсара (первая гармоника), второй половине периода (вторая гармоника) и т.д.. Линия, проходящая через середины отрезков, указывает на  $DM$  пульсара. Таким образом, в проводящемся обзоре используется и высокая чувствительность радиотелескопа БСА ФИАН, и увеличение чувствительности с помощью суммирования спектров мощности, и новый способ представления данных. Всего открыто 44 секундных пульсара. Показано, что в площадке со склонениями между  $+21^\circ$  и  $+42^\circ$  найдены все пульсары с регулярным излучением, имеющие  $0,5 \text{ с} < P < 3 \text{ с}$ ,  $0 < DM < 100 \text{ пк/см}^3$  и спектральную плотность потока  $S > 1 \text{ мЯн}$ . Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>).

### Список литературы

- [1] В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко и др., *Астрон. журн.*, 93, 1045 (2016) [V. I. Shishov, I. V. Chashei, V. V. Oreshko, et. al, *Astron. Rep.*, 60, 1067 (2016)]
- [2] S. A. Tyulbashev, M. A. Kitaeva, G. E. Tyulbasheva, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 517, 1112 (2022)

---

\*E-mail: serg@prao.ru

## Исследование влияния неоднородностей магнитного поля на спектр излучения гамма-всплеска

Ю. А. Уваров\*, А. М. Быков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Гамма-всплески представляют собой явления быстрого энерговыделения огромной мощности, связанного с коллапсом или слиянием звёзд. В результате внутренних процессов в них формируются популяции нетепловых ускоренных частиц, излучающих в широком диапазоне энергий. Ряд наблюдений показал, что от некоторых гамма-всплесков регистрируются фотоны с энергиями вплоть до десятков ТэВ. Однако из-за больших энергетических потерь излучающих частиц, объяснение такого высокоэнергичного излучения в рамках стандартных механизмов излучения сталкивается с большими трудностями. В данной работе на основе модели адиабатического расширения для фазы послесвечения всплеска исследуется влияние неоднородностей магнитного поля на спектры в рамках синхротронного механизма излучения электронов и протонов, с учётом эффектов комптоновского рассеяния синхротронных фотонов. Показано, что эффект неоднородности магнитного поля может увеличить максимальные энергии синхротронного излучения электронов и протонов в несколько раз, не влияя на максимальные энергии комптоновских фотонов, формирующихся в режиме Клейна–Нишины. Обсуждается также возможное влияние данного эффекта на формирование спектров излучения на более ранней стадии эволюции гамма-всплеска и его совместный учёт с другими механизмами излучения. Работа Ю. А. Уварова выполнена при поддержке гранта РФФИ 21-12-00250.

---

\*E-mail: uv@astro.ioffe.ru

## Ударно-волновое «начало» подветренного джета двухторовых пульсарных туманностей

С. С. Фатеева<sup>2\*</sup>, Г. А. Пономарёв<sup>1,2</sup>, К. П. Левенфиш<sup>1</sup>, А. Е. Петров<sup>1</sup>, А. Н. Фурсов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>СПбПУ Петра Великого

Движение пульсара относительно внешней среды может способствовать формированию у него двухторовой рентгеновской туманности. Мы показываем, что для подветренного джета такой туманности могут быть характерны строение из трёх частей и наличие узкой поперечной рентгеновской полоски в начале яркой средней части. Полоска, вероятно, имеет ударно-волновое происхождение; эта ударная волна отличается от прочих ударных волн в джете тем, что она особо сильна, квазистационарна, и выходит за тело джета. Наша численная магнитогидродинамическая модель туманности позволяет выявить, какие плазменные течения в подветренной полусфере туманности отвечают за формирование ударной волны. Модель способна реалистично воспроизвести рентгеновскую морфологию двухторовой пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela), включая поперечную рентгеновскую полоску, из которой будто бы возникает её юго-восточный (подветренный) джет. Фотонный индекс полоски в туманности Vela ( $\approx 1.6$ ) близок к таковому для синхротронного излучения электронов, ускоренных на сильной ударной волне, что говорит в пользу предложенной нами интерпретации этой рентгеновской особенности. Анализ и интерпретация численных и наблюдательных данных выполнены К.Л. и Г.П., поддержанными базовым проектом ФТИ 0040-2019-0025.

---

\*E-mail: fateeva.ss@edu.spbstu.ru

## Рентгеновские узелки в пульсарной туманности в созвездии Парусов: цепочка гигантских плазмoids?

А. Н. Фурсов<sup>1,2\*</sup>, Г. А. Пономарёв<sup>1,2</sup>, К. П. Левенфиш<sup>1</sup>, А. Е. Петров<sup>1</sup>, С. С. Фатеева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>СПбПУ Петра Великого

Джет-торовые пульсарные туманности имеют сложное строение, что отражается в большом разнообразии наблюдаемых у них рентгеновских структур – торов, колец, арок, джетов, полосок, узелков и др. Современные релятивистские магнитогидродинамические модели туманностей успешно объясняют их общую джет-торовую морфологию, однако природу более мелких рентгеновских структур – таких, как узелки на «внутреннем кольце» одноторовой структуры в Крабовидной туманности или узелки в окрестности юго-восточного джета двухторовой пульсарной туманности в созвездии Парусов (Vela), — ещё предстоит выяснить. Недавно узелки в Крабовидной туманности были истолкованы как гигантские плазмoids в токовом слое туманности сразу за фронтом ударной волны торможения пульсарного ветра. В рамках численной релятивистской магнитогидродинамической модели мы показываем, что в двухторовых объектах типа Vela условия для магнитного пересоединения и образования гигантских плазмoids реализуются на периферии туманности, а не в окрестности ударной волны торможения. Согласно нашей модели, цепочки плазмoids в двухторовых туманностях должны выстраиваться в два разновеликих «внешних кольца», что косвенно подтверждается рентгеновскими наблюдениями пульсарной туманности Vela. Численное моделирование пульсарной туманности выполнено А.П. и А.Ф. при поддержке гранта РФФ 21-72-20020. Анализ и интерпретация численных и наблюдательных данных выполнены К.Л. и Г.П. в рамках базового проекта ФТИ 0040-2019-0025.

\*E-mail: fursov.an@edu.spbstu.ru

## Возможность наблюдения HOFNARs на SRG/eROSITA

А. Д. Хохрякова<sup>1\*</sup>, А. И. Чугунов<sup>2</sup>, С. Б. Попов<sup>3,4</sup>, М. Е. Гусаков<sup>2</sup>, Е. М. Кантор<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МРЕ, Гархинг, Германия

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>3</sup>ИСТР, Триест, Италия

<sup>4</sup>ГАИШ МГУ

Нейтронные звёзды могут проявляться как источники различной природы. В данной работе мы рассматриваем возможность наблюдения гипотетического класса горячих быстровращающихся неаккрецирующих нейтронных звёзд HOFNARs (сокращение от HOf and Fast Non-Accreting Rotators). Такие объекты могут формироваться в маломассивных рентгеновских двойных системах и нагреваться из-за неустойчивости г-мод колебаний. При поверхностных температурах порядка  $10^6$  К ожидается, что они будут испускать мягкое тепловое рентгеновское излучение. Мы провели популяционный синтез HOFNARs для прогнозирования числа потенциально наблюдаемых источников в обзоре всего неба eROSITA. Для поверхностных температур порядка  $10^6$  К мы получили около 500 источников с темпом счёта фотонов, превышающим предел обнаружения 0.01 отс./с, и около 100 источников, которые легче идентифицировать с темпом счёта фотонов  $> 0.1$  отс./с. Модели с температурами  $\gtrsim 1.2 \times 10^6$  К начинают противоречить отсутствию обнаружения HOFNARs с помощью ROSAT. Только для  $T \lesssim 5 \times 10^5$  К предсказанное число наблюдаемых HOFNARs для eROSITA оказывается настолько низким, что их идентификация представляется невозможной. Таким образом, мы ожидаем, что у прибора eROSITA есть хорошие шансы обнаружить HOFNARs, если они существуют. Отсутствие обнаружения будет накладывать очень жёсткие ограничения на свойства этого типа нейтронных звёзд.

\*E-mail: alenahohryakova@gmail.com

## Поляризованное излучение рентгеновских пульсаров по данным обсерватории *IXPE*

С. С. Цыганков<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Университет Турку, Финляндия

<sup>2</sup>ИКИ РАН

Представлен обзор результатов наблюдений рентгеновских пульсаров по данным первой специализированной поляриметрической обсерватории в рентгеновском диапазоне энергий – *IXPE* (Imaging X-ray Polarimetry Explorer). В течение полутора лет работы на орбите обсерватория *IXPE* провела наблюдения девяти объектов данного класса. Во всех исследованных источниках измеренное значение степени поляризации находится в пределах 20%, что значительно меньше теоретически предсказываемых величин. В большинстве пульсаров удалось детально исследовать вариации степени поляризации и поляризационного угла как функцию фазы вращения нейтронной звезды, что позволило, в свою очередь, определить геометрические параметры системы. В докладе также обсуждаются физические механизмы, потенциально способные объяснить относительно низкую степень поляризации в рентгеновских пульсарах.

---

\*E-mail: stsygankov@gmail.com

## К морфологии средних профилей ортогональных интеримпульсных пульсаров

В. Д. Черносов<sup>1\*</sup>, В. И. Цуркис<sup>1</sup>, Д. С. Загоруля<sup>1</sup>, В. С. Бескин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МФТИ

<sup>2</sup>ФИАН

Ортогональные интеримпульсные пульсары благодаря возможности более точного определения их параметров (угла наклона магнитной оси к оси вращения, ориентации наблюдателя) позволяют получать уникальную информацию как о механизме излучения, так и о форме их средних профилей. В качестве первого шага в нашей работе в вакуумном приближении была уточнена структура электрического потенциала над полярными шапками. Справедливость такого подхода связана с результатами численного моделирования, которые показали, что процесс генерации вторичных частиц является нестационарным, и в определённые моменты времени плазма полностью покидает область генерации. Важным новым элементом здесь является учёт неосесимметричности задачи. Далее численно решались уравнения движения первичных заряженных частиц в заданном электрическом потенциале, что позволило определить двумерное распределение плотности вторичной плазмы на открытых силовых линиях. При этом были учтены и эффекты общей теории относительности. Предполагая, что интенсивность наблюдаемого радиоизлучения определяется плотностью истекающей плазмы, были построены модельные средние профили для восьми ортогональных интеримпульсных пульсаров, параметры которых были взяты из работы [1]. Выполнено сравнение этих профилей с наблюдениями.

### Список литературы

- [1] S. Johnston, M. Kramer, Mon. Not. R. Astron. Soc., 490, 4565 (2019)

---

\*E-mail: chernosov.w@gmail.com

## Аномалии равновесного профиля пространственного заряда как специфическое проявление фазовых переходов в модифицированной модели однокомпонентной плазмы

А. Ю. Чигвинцев<sup>1,2\*</sup>, И. Л. Иосилевский<sup>1,2</sup>, Л. Ю. Ногинова<sup>3</sup>, И. Г. Зорина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>МФТИ

<sup>2</sup>ОИВТ РАН

<sup>3</sup>НИТУ МИСиС

<sup>4</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана

В работе обсуждается возможность появления разрывов в результатах расчётов равновесных профилей пространственного заряда в окрестности источника неоднородности [1]. Эти разрывы рассматриваются как своеобразное микроуровневое проявление фазовых переходов и иных (макроуровневых) эффектов корреляции зарядов («неидеальности»), содержащихся в локальном уравнении состояния, которое используется для описания неидеальной электронной и/или ионной подсистемы в рамках приближения квазиоднородности («локальной плотности») [2]. Особое внимание в данной работе уделено возможности специфического проявления упомянутых выше эффектов неидеальности в изучаемых равновесных профилях зарядов в виде ультрадисперсной двухфазной смеси («смешанной фазы»). Предлагаемый общий вывод заключается в утверждении, что концепция смешанной фазы (mixed phase) не является атрибутом исключительно астрофизических приложений, а является достаточно общим свойством расчётных схем, используемых для описания равновесных неоднородных кулоновских систем [3].

### Список литературы

- [1] И. Л. Иосилевский, А. Ю. Чигвинцев, Л. Ю. Ногинова, И. Г. Зорина, Теплофизика выс. темп. 59, 836 (2021)
- [2] И. Л. Иосилевский, Теплофизика выс. темп., 23, 1041 (1985)
- [3] A. Yu. Chigvintsev, I. L. Iosilevskiy, I. G. Zorina, L. Yu. Noginova, J. Phys. Conf. Ser., 946, 012092 (2018)

---

\*E-mail: alex012008@gmail.com

## Фундаментальные свойства коры нейтронных звёзд

А. И. Чугунов\*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

В докладе дан краткий обзор моделей, применяемых для описания свойств коры нейтронных звёзд: уравнения состояния, термодинамики, элементов кинетики и теории упругости. Особое внимание уделено простым, физически прозрачным моделям: модели ионной сферы, а также сжимаемой капельной модели. Несмотря на свою простоту, они позволяют получить весьма точное описание свойств коры. Рассмотрена кора как изолированных, так и аккрецирующих нейтронных звёзд. Работа поддержана Российским научным фондом (грант 22-12-00048).

---

\*E-mail: andr.astro@mail.ioffe.ru



## Источник X5 в шаровом скоплении 47 Тукана: HOFNAR или qLMXB?

А. И. Чугунов<sup>1\*</sup>, Д. А. Зюзин<sup>1</sup>, А. В. Карпова<sup>1</sup>, А. Ю. Кириченко<sup>1,2</sup>, М. Е. Гусаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Instituto de Astronomía, UNAM, Мехико, Мексика

В 2014 году нами была высказана гипотеза, что в результате эволюции маломассивных рентгеновских двойных (LMXB) могут рождаться не только миллисекундные пульсары, но и нейтронные звёзды нового класса – HOFNAR (от HOt and Fast Non-Accreting Rotators). Последнее должно происходить когда раскрутка нейтронной звезды аккрецией привела к возникновению неустойчивости г-мод колебаний. Эта неустойчивость связана с излучением гравитационных волн, тормозящих вращение звезды столь эффективно, что часть выделяющейся вращательной энергии идёт на раскачку колебаний и, в конечном счёте, превращается в тепло за счёт диссипации. Так как запас вращательной энергии очень велик, этот механизм может длительное время (до сотен миллионов лет) поддерживать звезду горячей даже после прекращения аккреции. При анализе имевшейся в 2014 году литературы было выделено несколько источников-кандидатов в HOFNAR, среди которых наиболее перспективным представлялся рентгеновский источник X5 в шаровом скоплении 47 Тукана: он ни разу не наблюдался в состоянии активной аккреции, а его рентгеновский спектр хорошо описывается тепловой моделью незамагниченной водородной атмосферы нейтронной звезды. Альтернативным объяснением этого источника может быть то, что он является LMXB системой в спокойном состоянии (qLMXB), т.е. высокая температура нейтронной звезды связана с транзитной аккрецией с компаньона, однако по случайным обстоятельствам в эпоху рентгеновской астрономии не наблюдалось ни одного эпизода аккреции. В рамках этой гипотезы компаньон X5 должен заполнять полость Роша. Чтобы выяснить, какое из объяснений является наиболее правдоподобным, мы провели анализ имеющихся в настоящий момент архивных наблюдений X5. Это позволило отождествить компаньона X5 в оптическом и инфракрасном диапазонах и определить потоки в 8 фильтрах. По спектру были определены его температура  $T_{\text{eff}} = 4540 \pm 50$  К и радиус  $R = 0.41 \pm 0.02 R_{\odot}$ . Указанный радиус хорошо согласуется с продолжительностью рентгеновских затмений. С учётом орбитального периода (8.67 ч), компаньон может заполнять полость Роша только при массе  $< 0.1 M_{\odot}$ . Мы проанализировали недавно опубликованную базу данных по моделям аккрецирующих двойных систем [1] и не обнаружили в ней ни одного эволюционного трека, ведущего к образованию системы, согласующейся с наблюдаемыми параметрами X5 при сколько-нибудь существенном темпе аккреции. Это свидетельствует в пользу интерпретации источника X5 в шаровом скоплении 47 Тукана как объекта HOFNAR, однако эволюция двойных систем в шаровых скоплениях может быть более сложной, и мы пока не можем полностью исключить интерпретацию данного источника как qLMXB. Работа поддержана грантом Российского научного фонда 22-12-00048.

### Список литературы

- [1] C. S. Mangat, N. Ivanova, K. Van, *Astron. Comput.* 42, 100681 (2023)

---

\*E-mail: andr.astro@mail.ioffe.ru

## Диагностика газа в гало Галактики остатками вспышек сверхновых

Е. М. Чуразов\*

ИКИ РАН

Взрывы сверхновых типа II обычно происходят вблизи областей звездообразования в диске Галактики, где много плотного и сравнительно холодного газа. Для сверхновых типа Ia это правило не является обязательным, и такие сверхновые могут взрываться и в горячем и разреженном газе гало Галактики. Время остывания такого газа может превосходить время жизни остатка сверхновой. В таком случае появляется возможность непосредственно измерять температуру и плотность газа гало, причём измерения носят локальный характер.

---

\*E-mail: churazov@iki.cosmos.ru

## Наблюдения нейтронных звёзд в одиночных и двойных системах на крупных телескопах и космических обсерваториях

Ю. А. Шибанов\*, В. Ю. Абрамкин, Д. А. Зюзин, А. В. Карпова, А. Ю. Потехин, А. С. Танашкин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Будет представлен обзор многоволновых наблюдений неаккрецирующих нейтронных звёзд в одиночных и тесных двойных системах. Наблюдения выполнены недавно группой исследователей из ФТИ им. А.Ф. Иоффе с помощью больших наземных телескопов и космических обсерваторий оптического, ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов. Получены новые ограничения на параметры исследованных звёзд, включая их массы и радиусы, что важно для наложения ограничений на уравнение состояния вещества сверхъядерной плотности в ядрах нейтронных звёзд.

---

\*E-mail: shib@astro.ioffe.ru

## Остывание нейтронной звезды в остатке сверхновой Кассиопея А по данным наблюдений Chandra во всех режимах наблюдений

П. С. Штернин<sup>1\*</sup>, Д. Д. Офенгейм<sup>2,1</sup>, С. О. Heinke<sup>3</sup>, W. C. G. Ho<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>Еврейский университет г. Иерусалима, Израиль

<sup>3</sup>University of Alberta, Эдмонтон, Канада

<sup>4</sup>Haverford College, Хаверфорд, Филадельфия, США

Заметное остывание нейтронной звезды в остатке сверхновой Кассиопея А (КасА) может объясняться усилением нейтринного излучения за счёт процессов формирования и распада куперовских пар в сверхтекучем ядре звезды [1]. До недавнего времени ускоренное остывание КасА было обнаружено только в данных наблюдений источника обсерваторией Chandra в режиме GRADED детектора ACIS-S. Однако этот режим не является оптимальным для изучения ярких точечных источников из-за наличия инструментальных искажений, в первую очередь, эффекта наложения событий (pileup). Наблюдения КасА в более подходящем режиме FAINT проводились, однако их временного покрытия было недостаточно для надёжного ограничения темпа остывания звезды. Новые наблюдения увеличили базу для режима FAINT до 14 лет и подтвердили наличие ускоренного остывания источника [2]. В настоящей работе [3] проведён совместный анализ наблюдений КасА в режимах FAINT и GRADED. Показано, что при учёте поправки за pileup, результаты в двух режимах находятся в хорошем согласии, а темп понижения температуры поверхности звезды составляет  $\sim 2\%$  за 10 лет. Используя модель немагнитной углеродной атмосферы нейтронной звезды, мы ограничили массу и радиус звезды на уровне  $M = 1.55 \pm 0.25 M_{\odot}$  и  $R = 13.5 \pm 1.5$  км. С помощью разработанного ранее модельно-независимого метода [4], мы также ограничили максимальную критическую температуру нейтронной сверхтекучести,  $T_{Cn\max}^{\infty} = (4.3 \pm 1.0) \times 10^8$  К. Вместе с тем необходимая мощность нейтринного излучения при куперовском спаривании как минимум вдвое превышает существующие теоретические оценки. Работа поддержана грантом РФФ 19-12-00133-п.

### Список литературы

- [1] D. Page, M. Prakash, J. M. Lattimer, A. W. Steiner, Phys. Rev. Lett., 106, 081101 (2011); P. S. Shternin, D. G. Yakovlev, C. O. Heinke, W. C. G. Ho, D. J. Patnaude, Mon. Not. R. Astron. Soc., 412, L108 (2011)
- [2] B. Posselt, G. G. Pavlov, Astrophys. J., 932, 83 (2022)
- [3] P. S. Shternin, D. D. Ofengeim, C. O. Heinke, W. C. G. Ho, Mon. Not. R. Astron. Soc., 518, 2775 (2023)
- [4] P. S. Shternin, D. D. Ofengeim, W. C. G. Ho, C. O. Heinke, M. J. P. Wijngaarden, D. J. Patnaude, Mon. Not. R. Astron. Soc., 506, 709 (2021)

---

\*E-mail: pshternin@gmail.com

## Гамма-всплески в модели обдираания двойных нейтронных звёзд

А. В. Юдин\*

ККТЭФ НИЦ Курчатовский институт

Будет представлен обзор современного состояния модели обдираания (stripping model) для коротких гамма-всплесков. Проведено сравнение с предсказаниями стандартной модели слияния (merging) нейтронных звёзд. Также в свете модели обдираания рассмотрены некоторые свойства пекулярного гамма-всплеска GRB170817A, сопутствовавшего гравитационно-волновому событию GW170817. Кроме того, будет рассказано о тех проблемах, которые ещё предстоит решить в рамках указанной модели.

---

\*E-mail: yudin@itep.ru