

«УТВЕРЖДАЮ»:

и.о. директора

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

д.ф.-м.н.

_____ П. Н. Брунков

26 августа 2022 г.

ОТЗЫВ ведущей организации

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26) на диссертацию

Тимиркеевой Марии Андреевны

«Исследование особенностей радиопульсаров, излучающих в гамма- и рентгеновском диапазоне», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Актуальность. С момента открытия радиопульсаров прошло более 50 лет. За это время в радиодиапазоне обнаружено около 3500 таких объектов. Вместе с тем, более десятка пульсаров детектировано в оптике, несколько десятков в рентгене и более двух сотен в гамма диапазоне. Показательно, что существенная доля гамма пульсаров пока не идентифицированы в радио диапазоне. Спектральный анализ показывает, что во всех перечисленных случаях существенную долю излучения составляет нетепловая компонента от заряженных частиц, ускоренных до релятивистских энергий в магнитосфере нейтронной звезды. Различие состоит в том, что в радиодиапазоне излучение носит когерентный характер, тогда как в остальных диапазонах оно является некогерентным. Несмотря на существенный наблюдательный прогресс, полной ясности о механизмах нетеплового излучения пульсаров, о локализации областей его генерации в разных диапазонах и о длине волны

перехода от когерентного к некогерентному режиму до сих пор нет. Прогресс в этом направлении связывают с комплексными многоволновыми исследованиями пульсаров, включающими их одновременное наблюдение в разных диапазонах. Для выбора наиболее перспективных для таких наблюдений объектов необходимо классифицировать имеющиеся пульсары по их наблюдаемым параметрам. Рассматриваемая работа лежит в русле данного направления, что обуславливает ее **актуальность**.

Основное содержание диссертации. В работе делается попытка выявить различия в распределениях ключевых наблюдаемых и вычисленных параметров для четырех групп изолированных нейтронных звёзд: «чистые» радиопульсары, детектированные только в радиодиапазоне (1800 объектов); радиопульсары, обнаруженные в гамма диапазоне (гамма-громкие радиопульсары, 52 объекта); радиопульсары с зарегистрированным рентгеновским излучением (61 объект); гамма-пульсары без зарегистрированного радиоизлучения (радио-тихие гамма-пульсары, 36 объектов). В качестве исходных данных использовались значения параметров, опубликованных в широко известных каталогах (ATNF, 2-ой Ферми каталог и др.). Получен ряд интересных выводов о генерации жесткого излучения пульсаров, которые могут быть полезны при их дальнейшем исследовании. Кроме того, с помощью телескопа БСА ФИАН осуществлен глубокий поиск радиоизлучения на частоте 111 MHz от одного из радио-тихих гамма-пульсаров, J1836+5925, указанных автором в качестве перспективных на детектирование в радиодиапазоне, и получен верхний предел на плотность его потока на этой частоте.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 117 страниц, включая 35 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 127 наименований.

Во Введении представлены история открытия пульсаров и развитие представлений об их природе и механизмах излучения. Обоснована

актуальность темы диссертации, представлены основные цели работы, научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

В Первой главе приведен анализ наблюдаемых и вычисленных параметров для четырех выделенных групп пульсаров. Построены распределения периода, его производной, магнитного поля на поверхности нейтронной звезды, скорости потери энергии вращения и магнитного поля на световом цилиндре. Показано, что пульсары, обнаруженные как пульсирующие рентгеновские и гамма-источники, обладают высокими значениями магнитной индукции вблизи светового цилиндра ($\sim 10^4$ Гс), на два-три порядка превышающей величины индукции для радиопульсаров без зарегистрированного жесткого излучения ($\sim 10^2$ Гс). Их скорости потери вращательной энергии также в среднем на три порядка выше ($\sim 10^{34} \div 10^{35}$ эрг/сек) соответствующих значений для основной массы радиопульсаров ($\sim 10^{32}$ эрг/сек). Дана оценка согласованности распределений с помощью критерия Колмогорова-Смирнова.

Вторая глава посвящена анализу гистограмм распределения монохроматической радиосветимости, плотностей потока на частоте 1400 МГц, расстояния и пересчету условных светимостей в физические светимости. Радио-громкие гамма-пульсары обнаруживают бимодальное распределение монохроматической радиосветимости. Показано, что оно связано с разделением пульсаров на две пространственные группы, расстояние между которыми составляет несколько килопарсек. Первая популяция удалена от нас на 0.2–0.6 кпк и находится, по-видимому, в рукаве Ориона, вторая – расположена на расстояниях от 2 до 18 кпк (при среднем значении 5.3 кпк) в удаленных от Солнца рукавах. Бимодальность исчезает при правильном пересчете в физические светимости. Сделано предположение о генерации их гамма-излучения на периферии магнитосферы пульсара синхротронным механизмом из-за наличия больших магнитных полей на световом цилиндре. Оно подтверждается заметной

корреляцией гамма-светимости с величиной поля на световом цилиндре. Получено феноменологическое соотношение между гамма светимостью и монохроматической радиосветимостью, подтверждаемое данными по радио громким гамма пульсарам.

В главе Три, основываясь на результатах главы 2, определены кандидаты из радиопульсаров в потенциальные гамма-источники, а также радио-тихие гамма пульсары, перспективные для обнаружения в радиодиапазоне. Представлены результаты поиска радиоизлучения от радио-тихого гамма-пульсара J1836+5925 на частоте 111 МГц с помощью телескопа БСА ФИАН. По данным наблюдений дана верхняя оценка его плотности потока на этой частоте.

Четвертая глава посвящена анализу зависимости рентгеновской светимости от скорости потери энергии вращения нейтронной звезды, и рассмотрению генерации рентгеновского нетеплового излучения за счет синхротронного механизма на периферии магнитосферы пульсара вблизи светового цилиндра. Расчетная модель хорошо согласуется с наблюдениями и поддерживается заметной корреляцией между рентгеновской светимостью и величиной магнитного поля на световом цилиндре.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

Приложения содержат таблицы с исходными данными и списками пульсаров, предлагаемых в качестве перспективных для поиска в гамма и радио диапазонах. .

Среди наиболее важных и новых результатов отметим вывод о том, что пульсары с зарегистрированным жестким излучением обладают более сильными магнитными полями на световом цилиндре и более высокой скоростью потерь энергии вращения.

Особо подчеркнем полученную автором заметную корреляцию между светимостью пульсаров в рентгеновском и гамма диапазонах и индукцией магнитного поля на световом цилиндре.

Также отметим информативный верхний предел на поток излучения от гамма пульсара J1836+5925 на частоте 111 МГц, полученный автором с помощью телескопа БСА ФИАН.

Результаты, изложенные в диссертации являются новыми и представляют научную ценность, поскольку позволяют лучше понять взаимосвязи различных процессов, протекающих на различных высотах в магнитосферах нейтронных звезд.

Достоверность полученных результатов основывается на использовании хорошо зарекомендовавших себя и проверенных временем статистических методов. Все результаты опубликованы в 7-ми статьях в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах. Многие результаты, полученные в диссертации воспроизводятся другими авторами, в том числе на постоянно пополняющемся наблюдательном материале, что также говорит об их актуальности и востребованности.

Практическое значение результатов диссертации состоит в том, что на достаточно большой выборке пульсаров получено множество аппроксимационных зависимостей для светимости пульсаров, использование которых позволит наблюдателям легче отбирать кандидатов для поиска и детального исследования излучения в различных диапазонах, а теоретикам дает подсказку, как в их теориях должны зависеть светимости и энергии ускоренных частиц, от параметров пульсаров.

Имеются следующие вопросы и замечания.

- 1) Многие результаты приведены в диссертации лишь частично. Например, в большинстве случаев указано, что распределение данного параметра хорошо аппроксимируется гауссианой с таким-то χ^2 . Однако сама гауссиана не показана на соответствующем рисунке и ее параметры не приведены в тексте. Это затрудняет оценку качества полученной аппроксимации.
- 2) Во многих аппроксимационных формулах не указана размерность входящих в них величин, что затрудняет их использование

- 3) В выводе о более высокой скорости потерь энергии вращения для гамма пульсаров никак не обсуждается возможный эффект наблюдательной селекции: гамма обсерватория Ферми может просто не детектировать пульсары с малыми потерями энергии вращения из-за порога ее чувствительности.
- 4) В диссертации стоило бы сравнить представленные в ней результаты с результатами работ, которые вышли уже после опубликования данных результатов.
- 5) В разделе 1.4 помимо результатов, которые дает применение критерия Колмогорова-Смирнова, стоило бы привести и результаты которые дает применение критерия Андерсона-Дарлингга, а не ограничиваться общей фразой, что они «находятся в полной согласованности с результатами, полученными с помощью критерия Колмогорова-Смирнова».
- 6) На стр. 67 проделанная работа изложена крайне нечетко, зачастую затруднительно понять, что именно было проделано. Например, во втором абзаце сообщается, что для обработки выбраны сеансы «с тройным периодом», то есть предположительно с продолжительностью равной утроенному периоду пульсара около 0.5 сек? В то же время, выше на этой же странице указано, что длительность сеансов была около нескольких минут. Также не понятно откуда было взято расстояние $d = 300$ пк и как из него была получена ожидаемая мера дисперсии $DM \sim 6 \text{ см}^{-3} \text{ пк}$.
- 7) В разделе 3.5 для пульсара J1836+5925 стоило бы привести оценки ожидаемой радиосветимости в диапазонах 111 МГц и 1400 МГц, которые дают приведенные в главах 2 и 3 аппроксимационные формулы, и сравнение этих оценок с полученным наблюдательным верхним пределом. Если это «следующая Геминга», то было бы уместно сравнить результаты этих наблюдений с данными оценок и наблюдений Геминги.

- 8) В главе 4 не обсуждается как отделялось тепловое рентгеновское излучение пульсаров от нетеплового и отделялось ли оно вообще.
- 9) В таблице 4 отсутствуют пульсары B0943+10, B1133+16, J0108-1431, J1210-5256, J2043+2740 и B0834+06, наблюдаемые как в рентгеновском, так и в радио-диапазонах. Также у пульсара J0538+2718 стоило бы привести значение угла β , которое известно из поляризационных наблюдений.
- 10) На стр. 48 указано, что 14 пульсаров из каталога 2FGL, у которых измерен параллакс, не попали в рассматриваемую выборку. Не ясно, почему? Стоило бы добавить эти пульсары в рассматриваемую выборку и обсудить не приведет ли это к изменению полученных результатов.
- 11) Большую часть рентгеновских пульсаров в исследуемой выборке представляют достаточно старые пульсары. При построении корреляции L_x - V_{LC} стоило бы дополнительно построить такие корреляции отдельно для молодых пульсаров, с характеристическим возрастом менее 10^5 лет, и для старых пульсаров с характеристическим возрастом более 10^5 лет. По современным теориям примерно на этом возрасте проходит граница, разделяющая преимущественные области генерации нетеплового рентгеновского излучения вблизи светового цилиндра для более молодых и вблизи поверхности нейтронной звезды для более старых пульсаров.

Перечисленные замечания носят в основном рекомендательный характер и не умаляют научной и практической ценности полученных в диссертации результатов.

Заключение ведущей организации

Диссертация М.А. Тимиркеевой представляет значимый вклад в исследования пульсаров. Её результаты могут быть использованы при

отборе кандидатов для наблюдений на наземных и орбитальных телескопах и интерпретации наблюдений. В диссертации получено множество аппроксимационных зависимостей для светимостей пульсаров в различных диапазонах как друг от друга так и от параметров пульсаров. Получена корреляция светимости в рентгеновском и гамма-диапазонах с индукцией магнитного поля на световом цилиндре. Получены ограничения на плотность потока пульсара J1836+5925 в диапазоне 111 МГц. Результаты диссертации опубликованы в 7-ми статьях в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах и апробированы на 23-х российских и международных конференциях. Автореферат правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа М.А. Тимиркеевой «Исследование особенностей радиопульсаров, излучающих в гамма- и рентгеновском диапазонах» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - «астрофизика и звездная астрономия».

Доклад М.А. Тимиркеевой по материалам диссертации заслушан и одобрен 18.05.2022 на заседании семинара сектора Теоретической астрофизики ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН.

Отзыв составили

Шибанов Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Прикладной математики и математической физики» ФТИ им А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
shib.astro@mail.ioffe.ru (812) 292-71-80

Шибанов Юрий Анатольевич

Барсуков Дмитрий Петрович, кандидат физ.-мат. наук 01.03.02 –
«астрофизика и радиоастрономия», и.о. с.н.с. сектора «Теоретической
астрофизики» ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26
bars.astro@mail.ioffe.ru (812) 292-71-80

Барсуков Дмитрий Петрович

26 08 2022

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Телефон: (812) 297-2245

Факс: (812) 297-1017

Электронная почта: post@mail.ioffe.ru