

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор А.А. Федянин

« _____ » _____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

*(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу **ФАДЕЕВА Евгения Николаевича** на тему «**Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении пульсаров по данным наземно-космического интерферометра «Радиоастрон»**» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия»*

Радиопульсары – это единственный тип объектов, наблюдения которых позволяют исследовать структуру турбулентной межзвездной плазмы Галактики на малых масштабах, порядка до 10^4 см, никаким иным способом сделать это невозможно. Наличие неоднородностей электронной концентрации приводит к многолучевому распространению радиоволн, которое порождает ряд наблюдаемых эффектов, известных как «межзвездные мерцания» или «межзвездное рассеяние»: увеличение длительности импульсов, вариации интенсивности (амплитуды импульсов), частотная модуляция, и, наконец, увеличение видимого размера (появление «диска рассеяния»). Их можно наблюдать, только если угловой размер источника меньше диска рассеяния. Такому критерию отвечают единственно пульсары – идеальные точечные источники. Измеренные соотношения между этими величинами позволяют, согласно хорошо развитой на современный момент теории, определить физические параметры турбулентной среды, как это было

сделано ранее для ионосферной плазмы и межпланетной среды («солнечного ветра»). Наилучший результат достигается, если у источника (пульсара) удается с достаточной точностью измерить полный набор величин, однако до недавнего времени сделать это не представлялось возможным, в частности, нельзя было надежно измерить напрямую размер кружка рассеяния, поскольку не хватало разрешающей способности интерферометров даже с межконтинентальными базами (РСДБ). Такая возможность появилась после запуска в 2011 году космического аппарата «Спектр-Р» с 10-м радиотелескопом на сильно вытянутую эллиптическую орбиту с высотой апогея 350 000 км, что давало при работе с сетью наземных телескопов угловое разрешение в доли миллисекунды дуги. Таким образом, впервые стал возможен полный комплексный анализ межзвездного рассеяния, который и был выполнен соискателем в его диссертационной работе.

В качестве исходного материала автор использовал данные корреляционной обработки сеансов наблюдений пульсаров миссии Радиоастрон, выполненные на корреляторе АКЦ в специальном пульсарном режиме. Последующая посткорреляторная обработка, алгоритм которой был разработан автором и реализован им в виде пакета программ, имела своей целью получить для каждого сеанса очищенные от помех, скорректированные за различные аппаратурные эффекты и откалиброванные динамические спектры, которые затем использовались для дальнейшего анализа. Из них же получались «вторичные спектры», которые обрабатывались на предмет выявления параболических дуг. Этот этап предварительной обработки выполнен автором с большой тщательностью, что в итоге обеспечило высокое качество и надежность результатов, их безусловную достоверность.

Пульсары – это источники с очень специфическими свойствами, и для их наблюдений и обработки требуются нестандартные методы, поэтому в первых двух главах работы кратко перечислены свойства пульсаров, представлены основы теории межзвездного рассеяния, основная информация

о проекте Радиоастрон и о выполненных наблюдениях. Эти главы носят вводный характер и необходимы для лучшего понимания работы.

Далее идет основное содержание работы – определение характерных параметров межзвездного рассеяния для каждого из 10-ти объектов (глава 3). Каждому параметру посвящен отдельный раздел, при этом соблюдается единый принцип: сначала идет теоретическая часть, затем анализируются и сравниваются между собой возможные варианты конкретных алгоритмов, выбирается один или несколько способов, для каждого источника приводится результат(ы) и их обсуждение и сопоставление с другими данными по литературе. Для определения полосы декорреляции и времени мерцаний автор использовал вместо традиционного набора функций подгонки (Гаусс, Лоренц, и т.д.) предложенную им универсальную формулу (3.2), что позволило уверенно выделять различные масштабы и существенно улучшить точность измерений. Были проанализированы изменения этих значений со временем. Отмечено уникальное поведение пульсара B0834+16. Важнейшим является следующий раздел работы – анализ структурных функций, вид которых, согласно теории, напрямую связан со спектром турбулентности. Затем идет раздел, который посвящен исследованию специфического феномена, так называемых «параболических дуг» во «вторичных спектрах» пульсаров, которые возникают благодаря очень специфическому виду рассеяния, природа которого до конца непонятна. Несмотря на это, из параметров дуг легко определить положение рассеивающей области, их порождающей. Нужно отметить, что поиск и выделение таких структур – очень нелегкая задача, поскольку в них сосредоточена очень малая часть рассеянного излучения. В следующем небольшом по объему, но важном разделе определяются двумя независимыми способами характерные времена рассеяния. Далее представлены результаты измерений размеров дисков рассеяния с помощью наземно-космического интерферометра – важнейший результат эксперимента Радиоастрон. Заключительный раздел главы 3 посвящен анизотропии рассеяния пульсара B0833-45 (Vela). Результаты

измерений суммированы в удобном виде в итоговой таблице. В последней главе 4 детально проанализированы полученные результаты измерений, с целью определения локализации и свойств рассеивающей среды.

К оформлению работы замечаний нет. Работа написана хорошим языком, изложение ясное и четкое. Есть несколько опечаток. В пояснении к формуле 1.2 следовало бы указать, что мера дисперсии пульсаров обычно измеряется в специфических единицах см^{-3} парсек, а не в обратных квадратных сантиметрах, как принято в физике. Также несколько устарели данные о самом известном тяжёлом пульсаре – сейчас известная рекордно высокая масса составляет 2.1 солнечных (PSR J0740+6620), а не 1.9, как указано в работе. Такие понятия как «колмогоровский спектр» всё-таки не являются общеизвестными и должны вводиться с пояснениями, например «спектр с показателем $-11/3$ ».

Можно отметить новизну работы и добавить, что **все результаты, выносимые автором на защиту, являются новыми и оригинальными**, они вносят заметный вклад в понимание процессов в межзвездной среде Галактики. **Достоверность результатов** обеспечена тщательным контролем качества исходных данных, адекватным выбором оптимальных методов обработки и анализа, несколькими независимыми методами определения исследуемых параметров разными способами, сопоставлением с результатами других авторов.

Актуальность работы. Структура межзвездной среды всегда была актуальной темой в астрономии. Исследование межзвездного рассеяния в последнее время приобретает большое значение в том плане, что оно может искажать изображения компактных объектов (активных галактических ядер) и его возможно надо учитывать. Также лучшее понимание структуры межзвёздной среды необходимо для исследований быстрых радиовсплесков – области, которая сейчас активно развивается.

Результаты работы в 2016 – 2021 гг. были доложены на четырех российских и международных научных конференциях.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых журналах, которые удовлетворяют требованиям Высшей аттестационной комиссии к публикациям результатов диссертации: две статьи в *Астрономическом журнале*, две статьи в *MNRAS*, одна статья в *Research in Astronomy and Astrophysics*.

Рекомендации по использованию. Прежде всего, результаты и методы, представленные в диссертации, можно рекомендовать к практическому использованию в обсерваториях и институтах, где проводятся наблюдения пульсаров и РСДБ: САО РАН, ИПА РАН, ПРАО АКЦ ФИАН, КРАО РАН. Безусловно, работа представляет большой интерес для всех астрономических учреждений (ИНАСАН, ГАИШ МГУ и др.), и институтов, где ведутся исследования астрофизической плазмы (ИКИ РАН, ИЗМИРАН, теоротдел ФИАН и др.). Полезным было бы использование этой работы при подготовке будущих космических миссий, таких как проект «Миллиметрон». Работа стимулирует дальнейшие исследования в этом направлении. Данные наблюдений пульсаров миссии Радиоастрон сохраняются в архиве и свободно могут быть предоставлены по запросу, поэтому можно рекомендовать астрономическому сообществу продолжить работу

Резюмируя, можно заключить следующее.

Диссертационная работа Фадеева Евгения Николаевича «Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении пульсаров по данным наземно-космического интерферометра

«Радиоастрон»» представляет собой законченную научную квалификационную работу, отвечающую всем требованиям требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Фадеев Евгений Николаевич, несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия».

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 22 члена Совета из 30. Результаты голосования: «за» – 22; «против» – 0; «воздержалось» – 0. Протокол № 12 от «13» апреля 2022 г.

Отзыв составил заведующий отделом радиоастрономии ГАИШ МГУ доктор физико-математических наук М.С. Пширков.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук, профессор

К.А. Постнов