

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Фадеева Евгения Николаевича “Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении пульсаров по данным наземно-космического интерферометра «Радиоастрон»”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Целью диссертационной работы Фадеева Е. Н. является исследование рассеяния излучения на неоднородностях межзвездной среды (мерцаний) десяти избранных ярких пульсаров с использованием данных наблюдений на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон». В силу компактности и прерывистости излучения пульсары выступают в качестве идеальных зондов межзвездной среды, искажающей любые наблюдения галактических и внегалактических источников. Так, например, во многих случаях регистрируемая быстрая переменность излучения в направлении компактных радиоисточников (квazarов) бывает вызвана именно межзвездной средой, а не собственно переменностью наблюдаемого источника. Поэтому требуется разделение наблюдаемых эффектов, имеющих разную природу. Кроме того, изучение межзвездной среды имеет самостоятельное важное астрофизическое значение. Несмотря на прогресс в данной области исследований как в теоретическом, так и наблюдательном плане, достигнутый в течение нескольких последних десятилетий, остается еще множество неясных вопросов, что определяет **актуальность** темы настоящей диссертационной работы. Так, например, сравнительно недавнее открытие параболических дуг во вторичных спектрах пульсаров привело к необходимости создания новых моделей рассеивающей среды, что в свою очередь, требует наблюдательных подтверждений. **Актуальность** данной работы определяется также возможностью анализа мерцаний пульсаров по данным имеющихся наблюдений наземно-космического радиоинтерферометра «Радиоастрон», полученным с рекордным на сегодняшний день угловым разрешением, позволяющим измерять непосредственно угловые размеры структурных составляющих диска рассеяния пульсаров.

Достижение цели диссертационной работы потребовало решения следующих трех основных задач: 1) разработки нового программного обеспечения для анализа данных с выхода коррелятора АКЦ ФИАН; 2) оценки основных параметров мерцаний избранных пульсаров по данным наземно-космического интерферометра «Радиоастрон»; 3) определения, на основе полученных оценок, расстояний до рассеивающих экранов с использованием нескольких методов.

Диссертация **состоит** из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 133 страницах, включает 6 таблиц и 32 рисунка, список литературы содержит 137 наименований.

Поставленные в работе три основные задачи нашли свое отражение в структуре и содержании диссертации.

В **первой главе** дается постановка задачи диссертации, подробно описываются наблюдательные эффекты, возникающие при взаимодействии радиоизлучения с межзвездной средой, рассматриваются физические параметры, оцениваемые в дальнейшем в работе, приводится обстоятельный обзор литературы. Большое внимание уделено анализу вторичных спектров пульсаров, отличающихся большим разнообразием таких структур как параболические дуги. Рассмотрены различные модели рассеяния радиоизлучения межзвездной средой, отличающиеся степенью анизотропности, приводящие к образованию параболических дуг и вторичных дужек различной конфигурации. Указывается на важность измерения кривизны параболической дуги, позволяющей определять положение рассеивающего экрана. Обсуждается возможность существования нескольких рассеивающих экранов.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию наземно-космического интерферометра «Радиоастрон», дано описание корреляционной обработки сигналов на программном корреляторе АКЦ ФИАН. Дается описание алгоритма постдетекторной компенсации дисперсии сигналов в корреляторе, а также специальных процедур повышения отношения сигнал/шум, реализованных диссертантом самостоятельно. Представлены результаты обработки всех 10 избранных пульсаров. Описаны параметры наблюдательных сеансов для каждого пульсара, осуществленных на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон», при этом максимальная и минимальная базы интерферометра составили 18 и 0.5 диаметров Земли соответственно. Достигнутое угловое разрешение составило 0.5 мсд на частоте 324 МГц и 0.1 мсд на частоте 1.664 ГГц. Получены динамические спектры высокого разрешения (до 244 Гц на частотный канал).

**Третья глава** посвящена основной задаче диссертации – оценке параметров рассеяния излучения, введенных в первой главе, по данным наблюдений пульсаров на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон». Дается подробное описание методов оценки. Значительное место уделено анализу параболических дуг во вторичных спектрах пульсаров. Диссертантом модернизировано хорошо известное преобразование Хафа для определения коэффициентов парабол с учетом специфики данных экспериментов. Для корректного вычисления дисков рассеяния была использована специальная методика, призванная

минимизировать проблемы, связанные с измерениями на разных телескопах. Дается анализ полученных результатов для каждого пульсара.

В **четвертой главе** определены расстояния до рассеивающих экранов, в общей сложности, четырьмя методами. В частности, показаны преимущества метода определения расстояний, основанных на анализе вторичных спектров, по сравнению с анализом динамических спектров. Дается обоснование использования интерферометров с базами, превышающими размер Земли, для определения размеров кружков рассеяния. Дан анализ полученных результатов. Так, для части пульсаров результаты, полученные различными методами, оказались близкими в пределах погрешностей, а для части пульсаров совпадения результатов не произошло. В диссертации обсуждаются возможные причины расхождения результатов.

Особо хотелось бы отметить очень интересный и показательный рисунок 4.6, где изображены найденные положения рассеивающих экранов в проекции на плоскость Галактики, фактически совпадающие с положением средних линий спиральных рукавов, существование в которых областей турбулентной плазмы наиболее вероятно.

Сущность и **научная новизна** полученных результатов заключается в том, что изучение межзвездной среды методом мерцаний **впервые** произведено по данным наблюдений десяти избранных пульсаров (B0329+54, B0823+26, B0833-45, B0834+06, B1237+25, B1641-45, B1749-28, B1929+10, B1933+16, B2016+28), полученным на наземно-космическом радиоинтерферометре «Радиоастрон» с рекордным на настоящий момент угловым разрешением в диапазоне длин волн 18 и 92 см. Благодаря сверхвысокому разрешению наземно-космического интерферометра диссертанту удалось получить ряд **новых** результатов, недостижимых с использованием данных только наземных инструментов. К таким результатам относятся, в первую очередь, надежные измерения угловых размеров дисков рассеяния пульсаров, а также определение расстояний до компактных слоев плазмы в направлении каждого пульсара. Причем, для пяти пульсаров (B1641-45, B1749-28, B1237+25, B1933+16, B2016+28) расстояния до рассеивающих экранов измерены **впервые**. В ряде случаев положения экранов совпадают с хорошо известными физическими структурами в Галактике, что говорит о справедливости в этих случаях принятой модели тонкого рассеивающего экрана. Кроме того, важным и **новым** результатом является обнаружение во вторичных спектрах некоторых пульсаров параболических арок и их изучение.

**Практическая значимость** работы определяется разработанными программами, встроенными в работу программного коррелятора данных наблюдений наземно-космического радиоинтерферометра «Радиоастрон», обеспечивающими корректное определение параметров эффектов рассеяния неоднородностями межзвездной среды. Полученные результаты анализа

структуры и динамики межзвездной среды определяют несомненную **научную значимость** диссертации, поскольку являются ценнейшим материалом для дальнейшего развития теории мерцаний пульсаров, усовершенствования существующих и построения новых моделей рассеяния радиоизлучения неоднородностями межзвездной плазмы.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, а также их достоверность.** Все результаты диссертации, выносимые на защиту, выводы и рекомендации обоснованы. Достоверность результатов, полученных в настоящей работе, в первую очередь, обеспечивается использованием данных наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» с пространственным и временным разрешением, достаточным для решения задач диссертации. Надо также отметить хорошее согласие полученных результатов с известными результатами из литературы в сопоставимых случаях, а также согласием результатов, полученных несколькими методами. Кроме того, результаты диссертации прошли солидную апробацию на ряде конференций и опубликованы в ведущих международных изданиях.

**Полнота представления результатов.** Результаты диссертации полностью отражены в пяти публикациях. Все работы опубликованы в изданиях, входящих в международные базы данных (WOS, Scopus) и рекомендованных ВАК для представления результатов диссертаций. Две работы опубликованы в лучших международных астрономических журналах из Q1 (MNRAS), три работы – в изданиях из Q3 (RAA, Astron.Rep.). В одной из совместных работ диссертант является первым автором. В одной работе является единственным автором. Во всех совместных работах личный вклад автора четко обозначен как основной или равный вкладу соавторов. Результаты диссертации прошли хорошую апробацию на двух международных и двух всероссийских конференциях. **Автореферат** правильно отражает содержание диссертации.

Необходимо также отметить, что диссертация написана хорошим научным языком, обстоятельно, с подробным изложением всех необходимых технических деталей исследований, снабжена достаточным количеством иллюстраций, а также таблиц, в которых отражены результаты обработки, содержит минимальное количество опечаток.

#### **Замечания по диссертации:**

1. Основным замечанием является то, что в диссертации начисто отсутствует обоснование списка избранных пульсаров.
2. В формуле (1.32) на стр. 28 вместо  $f$  должно быть  $\nu$ .
3. Стр. 21. Нет слова «турбуленция», а есть слово «турбулентность».

4. На стр. 27 дважды приведен один и тот же текст “Режим моментального снимка дает возможность проанализировать поведение мгновенных значений амплитуды функции видности и выявить структуру кружка рассеяния, а режим анализа с усреднением позволяет получить средние значения величины кружка рассеяния  $\theta_n$  и времени рассеяния  $\tau_{sc}$ , что позволяет оценить положение рассеивающего экрана на луче зрения.”.

4. Режут слух англицизмы: нуллинг, гейтинг, сцинтиль.

Высказанные замечания носят преимущественно редакционный характер и не влияют на высокую общую оценку работы.

**Заключение.** Все вышеизложенное позволяет заключить, что диссертация Фадеева Евгения Николаевича “Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении пульсаров по данным наземно-космического интерферометра «Радиоастрон»” является законченным самостоятельным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне. Диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным Положением ВАК РФ о порядке присуждения степени кандидата наук, а ее автор Фадеев Евгений Николаевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент

А.Т. Байкова

Байкова Аниса Талгатовна

доктор физико-математических наук, ученое звание с.н.с.

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Главный научный сотрудник лаборатории

Динамики Галактики

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория

Российской академии наук

196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65, корп.1.

Тел. (812) 363 72 07, электронная почта [bajkova@gao.spb.ru](mailto:bajkova@gao.spb.ru),  
[anisabajkova@mail.ru](mailto:anisabajkova@mail.ru).

23 марта 2022 г.

Подпись А.Т. Байковой удостоверяю,  
Зам. директора по орг.вопросам ГАО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

Т. П. Борисевич