

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Рудницкого Алексея Георгиевича «**Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Диссертационная работа Рудницкого А.Г. посвящена экспериментальному исследованию фундаментального процесса рассеяния радиоволн от пространственно когерентных космических источников – радиопульсаров – на неоднородностях межзвездной среды. Эти исследования начались полвека назад после открытия пульсаров, но тем не менее не потеряли свою актуальность и в настоящее время. Главная причина – новые экспериментальные возможности, которые мировая наука получила после запуска в 2011 г. уникального космического телескопа «Радиоастрон», позволяющего вместе с наземными радиотелескопами осуществлять интерферометрические наблюдения космических источников с рекордным угловым разрешением порядка долей угловых миллисекунд. Предыдущие наблюдения пульсаров позволили выявить различные особенности в неоднородной межзвездной среде и получить указания на наличие анизотропных составляющих флуктуаций плотности на луче зрения. Повышение углового разрешения привело к открытию принципиально важных новых результатов о строении и свойствах рассеивающих «экранов» между пульсаром и наблюдателем. Таким образом, экспериментальные работы в этой области являются крайне **актуальными**. В диссертации А.Г. Рудницкого представлены результаты новых высокоточных наблюдений пульсара в Крабовидной туманности в эксперименте «Радиоастрон», которые позволили провести зондирование межзвездной среды на новом уровне точности и исследовать свойства гигантских импульсов от самого пульсара, происхождение и физика которых являются **фундаментальной и актуальной проблемой современной астрофизики**.

Диссертация Рудницкого А.Г. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации – 110 стр., включая 21 рисунок, 7 таблиц и списка литературы из 103 наименований.

Во введении автор описывает современную экспериментальную и теоретическую мотивацию изучения, обосновывает актуальность поставленной задачи и формулирует научную новизну и значимость работы.

В первой главе излагается краткая история открытия и исследования пульсара в Крабовидной туманности PSR B0531+21 и дается обзор результатов по исследованию гигантских импульсов от этого источника.

Вторая глава описывает наблюдаемые эффекты рассеяния радиоизлучения в межзвездной среде (мерцания, уширение импульса, из-за рассеяния, увеличение угловых размеров источника) и излагается методика определения параметров рассеяния в наиболее употребительной модели тонкого рассеивающего экрана между источником и наблюдателем. Методика основана на измерении средней функции видности в интерферометрических наблюдениях и ее зависимости от проекции базы интерферометра.

В третьей главе приводится описание космического эксперимента «Радиоастрон» и конкретные наблюдения источника PSR B0531+21 с рекордными значениями базы в 153000 км (18 см) и 57000 км (92 см). Такие наблюдения проводились **впервые**. Для первичной обработки (корреляции) наблюдений этого пульсаром автором **лично** был разработан модуль поиска и корреляции гигантских импульсов для программного коррелятора АКЦ ФИАН с применением метода некогерентной компенсации дисперсии сигнала. По результатам наблюдений было обнаружено около 6500 гигантских импульсов.

В четвертой главе проанализированы физические и статистические свойства индивидуальных гигантских импульсов PSR B0531+21. С этой целью было выполнено моделирование распространения гигантских импульсов с заданной структурой через рассеивающую среду с экспериментально измеренным значением полосы декорреляции и с модельной передаточной функцией приемника. Сравнение модельных и наблюдаемых импульсов позволило сделать вывод о наличии неразрешенных компонент с длительностью  $< 30$  нс и получить независимую оценку яркостной температуры в источнике гигантских импульсов выше  $10^{38}$  К. Такая субструктура гигантских импульсов в области частот сотен МГц ранее не наблюдалась. Кроме этого, подтверждены формы распределения гигантских импульсов по амплитудам, а также проведен тщательный анализ функции видности во времени для индивидуальных гигантских импульсов.

В пятой главе приводятся результаты исследований межзвездной среды и параметров рассеяния, полученные из анализа функции видности в наземно-космических РСДБ наблюдениях гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности – время рассеяния, полоса декорреляции, угловой размер диска рассеяния, время мерцаний и размер дифракционного пятна. Измерение полосы декорреляции и времени рассеяния проведено двумя независимыми способами, которые показали хорошее согласие. Также определены расстояния до рассеивающего тонкого экрана и показано, что оно меняется для разных эпох наблюдений. Подтверждена степенная зависимость углового размера диска рассеяния и времени рассеяния от частоты, показатели степени свидетельствуют о наличии анизотропии рассеивающего вещества на луче зрения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты диссертации Рудницкого А.Г. **опубликованы** в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, и 2 сборниках конференций, неоднократно докладывались лично автором на международных и всероссийских конференциях и семинарах.

К диссертационной работе Рудницкого А.Г. следует сделать несколько **замечаний**:

1. На стр. 30 в Таблице 2 термин SEFD не пояснен. Его смысл как чувствительности системы, выраженной в эквивалентной плотности потока, поясняется только дальше по тексту.
2. На стр. 38, формула (3.3), не пояснен смысл величин  $h_j$  и их связь с величинами  $H_k$ .
3. На стр. 43, формула (3.9), индекс телескопа и мнимая единица в экспоненте обозначены одной и той же буквой  $i$ .
4. На стр. 51, формула (4.1), не объяснен смысл величины  $\omega_1$  – полюса в подынтегральном выражении.
5. На стр. 54, дана ссылка на пунктирную линию на Рис. 4.1 в, на котором таковой нет.
6. На стр. 57, формула (4.3) для яркостной температуры неверна по размерности, если величина  $E_p$ , определенная 4мя строками ниже, имеет смысл спектральной плотности потока в импульсе.
7. На стр. 57, формула (4.4), во втором равенстве в числителе пропущена скорость света.
8. На стр. 59-60 при обсуждении возможного действия гигантских импульсов на заряженные частицы в магнитосфере пульсара игнорируется ультррелятивистский характер лептонов, заполняющих магнитосферу пульсара.
9. На стр. 62, формула (4.7), индекс  $\gamma$  употребляется также как показатель спектра в распределении частиц по энергиям.
10. На стр. 65 говорится, что значения спектрального индекса для каждого сеанса приведены в Таблице 2, но в Таблице 2 такой информации не содержится.
11. На стр. 71 говорится, что величина фазовых флуктуация для пульсаров значительно выше, чем для источников непрерывного спектра, и что это ожидаемый результат. Не поясняется, почему это ожидаемый результат.
12. Страницы 79-83 идут в обратном порядке: 79-82-81-80-83

Эти замечания, несколько затрудняющие чтение диссертации, однако, носят в целом редакционный характер. Они несколько не снижают в целом высокую научную и практическую ценность диссертационной работы Рудницкого А.Г. и могут быть учтены в дальнейшей работе.

Общее заключение. В диссертационной работе Рудницкого А.Г. получены **новые важные результаты** в области астрофизики и звездной астрономии – проведены уникальные наблюдения пульсара в Крабовидной туманности с помощью наземно-космического радиointерферометра «Радиоастрон». Автором самостоятельно разработан и внедрен модуль поиска и корреляции гигантских импульсов пульсаров для

программного коррелятора АКЦ ФИАН. Впервые получены новые научные результаты о структуре и других свойствах гигантских импульсов пульсара, природа которых остается невыясненной. Исследовано влияние структуры гигантских импульсов и эффектов рассеяния на полосу декорреляции и функцию видности, получаемую в РСДБ наблюдениях. По наблюдениям гигантских импульсов пульсара PSR B0531+21 определены параметры рассеивающей межзвездной среды в модели тонкого экрана на луче зрения пульсар-наблюдатель. Эти результаты работы вносят заметный вклад в изучение природы гигантских импульсов пульсаров в целом, а также в свойства рассеивающей пространственно-когерентное излучение пульсаров межзвездной среды.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается применением хорошо проверенных высокоточных методов обработки и анализа данных, получением оценок рассеивающей среды различными методами, сравнением с независимо полученными результатами, а также с высокой степенью апробации и международным признанием результатов в публикациях в высокорейтинговых журналах и докладами на крупных международных конференциях.

Результаты диссертации могут быть **использованы** при анализе и интерпретации данных РСДБ наблюдений пульсаров и изучении свойств межзвездной среды, а также при моделировании свойств гигантских импульсов радиопулсаров во многих отечественных и зарубежных радиоастрономических научных центрах, университетах и обсерваториях, включая ГАИШ МГУ, ПРАО АКЦ ФИАН, ИКИ РАН, СПбГУ, MPIfRA (Германия), NRAO (США) и др. Диссертационная работа Рудницкого А.Г. **полностью отвечает** всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а сам автор, Рудницкий Алексей Георгиевич, **безусловно заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук** по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Зам. директора ГАИШ МГУ

доктор физ.-мат. наук, профессор

К.А. Постнов

Подпись д.ф.-м.н. проф. Постнова К.А. заверяю:

Директор ГАИШ МГУ

академик РАН