

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Рудницкого Алексея Георгиевича**

"ЗОНДИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ ГИГАНТСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ПУЛЬСАРА В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ",

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 03.02.01 — астрофизика и звездная астрономия

Неслучайно великий Вернер Гейзенберг полагал турбулентность самым загадочным явлением природы. История изучения радиопульсаров прекрасно иллюстрирует эту мысль. Стало понятно, что ее роль как в механизмах генерации собственно излучения (особенно в радиодиапазоне), так и в его распространении за пределами магнитосферы трудно переоценить. В то же время детали физики замагниченных нейтронных звезд, картина их эволюции, важнейшие особенности процессов генерации электромагнитного излучения, несмотря на множество исследований, остаются неясными, если не сказать загадочными. В полной мере это относится и к феномену гигантских импульсов — многократному спорадическому возрастанию интенсивности импульсов радиопульсаров. К настоящему моменту такие события обнаружены почти у полутора десятков объектов, причем, различных возрастов и эволюционных фаз — молодых, старых, миллисекундных. С полной уверенностью о гигантских импульсах можно сказать прежде всего, что они имеют когерентную природу, как и обычные импульсы пульсаров. С другой стороны, как и для последних, конкретной модели этих явлений еще нет. В то же время их пространственная когерентность и малые размеры (линейные и угловые) зон генерации излучения делают гигантские импульсы (во многом в силу их высокой интенсивности) высокоэффективным средством для изучения турбулентных свойств межзвездной среды.

Основным объектом исследований в этой области является, разумеется, пульсар В 0532+21, чьи гигантские импульсы имеют максимальную амплитуду, а, поскольку он излучает во всех диапазонах, можно, сравнивая характеристики кривых блеска на разных частотах, анализировать физические условия в магнитосфере.

Принципиально новые возможности в этих исследованиях, равно как и в изучении собственно гигантских импульсов, появились в связи с запуском космического радиотелескопа «РАДИОАСТРОН». Уникальное угловое разрешение, созданного на его

основе наземно-космического интерферометра, достигающее 0.1 угловой секунды, позволяет изучать физические условия в зонах генерации радиоизлучения пульсаров с беспрецедентными подробностями, как и исследовать структуру межзвездной среды (ее турбулентности) на очень малых масштабах.

Все вышесказанное становится особенно важным при учете перспектив развития радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (глобальные комплексы типа Event Horizon Telescope, «МИЛЛИМЕТРОН», космические интерферометры). Опыт работы с телескопом «РАДИОАСТРОН» и результаты, полученные в процессе его эксплуатации, лягут в основу будущих проектов.

В силу этого диссертационная работа **А.Г. Рудницкого** представляется **исключительно актуальной**. Ее результаты, полученные с помощью разработанных диссертантом программ, представляются весьма важными как в методическом, так и в астрофизическом аспектах.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав и Заключения. Полный объем диссертации — 110 страниц, включая 21 рисунок и 7 таблиц. Список литературы на 10 страницах содержит 103 наименования.

Во **Введении** приводятся аргументы в пользу необходимости проведенных исследований, отмечается актуальность работы, ее научная новизна и практическая значимость, перечисляются выносимые на защиту положения, приводится список работ, на которых базируется диссертация и отмечается вклад автора в полученные результаты.

В **Первой главе** описывается история открытия и исследования пульсаров и, в частности, пульсара B0531+21. Отмечается, что его отличительной особенностью является феномен гигантских импульсов — спонтанных увеличений амплитуды импульсов пульсара в сотни и тысячи раз, происходящих как на главный, так и на вторичный импульсы. Подчеркивается, что в отличие от обычных импульсов, гигантские распределены по энергиям степенным образом. Указывается, что на высоких частотах гигантские импульсы являются суперпозицией множества изолированных пиков с длительностью на уровне наносекунд, а спектральные и временные характеристики интеримпульса принципиально отличаются от таковых у главного импульса. Отмечается, что до сих пор не существует модели, которая полностью бы описывала механизм генерации гигантских импульсов в пульсаре B0531+21, причем есть предположение, что импульсы могут возникать в областях полярных шапок близко к поверхности пульсара.

Вторая глава посвящается обсуждению наблюдаемых эффектов рассеяния, методики

исследования структуры межзвездной среды и определению параметров рассеяния в рамках модели одиночного тонкого рассеивающего экрана. Описывается формирование дифракционной картины в результате многолучевой интерференции когерентного радиоизлучения пульсаров на флуктуациях плотности свободных электронов межзвездной среды. Перечисляются эффекты, обусловленные рассеянием, - мерцания, удлинение импульса пульсара, определяемое временем рассеяния, увеличение угловых размеров источника, их характеристики измеряются в РСДБ с хорошей точностью. В конечном итоге изучение этих эффектов позволяет получить структуру межзвездной среды на масштабах от 1000 км до 10 а.е. Демонстрируется способ определения положения рассеивающего экрана по измерениям углового размера диска и времени рассеяния.

В **Третьей главе** приводятся основные параметры миссии «РАДИОАСТРОН» и описываются наземно-космические РСДБ наблюдения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности. Отмечается, что бортовой комплекс научной аппаратуры обеспечивают прием сигналов в четырех диапазонах длин волн: Р-диапазон (центральная частота 324 МГц, длина волны 92 см), L-диапазон с центральной частотой 1664 МГц (длина волны 18 см), С-диапазон (центральная частота 4832 МГц, длина волны 6 см), К-диапазон (центральная частота 22232 МГц, длина волны 1.3 см). С его помощью были впервые проведены наблюдения пульсара в Крабовидной туманности, исследована структура межзвездной среды и эффекты рассеяния радиоизлучения пульсара с ранее недостижимым угловым разрешением: ~ 0.24 миллисекунд дуги (длина волны 18 см) и ~ 3.2 миллисекунд дуги (длина волны 92 см). В течение семи сеансов наблюдений на 18 см и одного — на 92 см было зарегистрировано около 6500 гигантских импульсов. Первичная обработка (корреляция) данных наблюдений пульсара в Крабовидной туманности производилась на программном «FX» корреляторе АКЦ ФИАН с помощью разработанного соискателем модуля потокового поиска и корреляции гигантских импульсов при использовании метода некогерентной компенсации дисперсии. В заключение главы подчеркивается отличительная особенность проекта — хранение исходных данных для всех проводившихся наблюдений в центре обработки научной информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН, что позволяет при необходимости выполнять переобработку данных любого сеанса.

Четвертая глава содержит результаты исследования свойств отдельных гигантских импульсов пульсара B0531+2, зарегистрированных в сеансе 10.01.2015. Использование в первичной обработке метода когерентной компенсации дисперсии позволило получить наилучшее возможное временное разрешения — 0.03125 мкс. В наблюдениях

участвовали: «Радиоастрон», наземные телескопы Вестерборк (WB), Аресибо (AR), Эффельсберг (EF) и Хартбишок (HN). Результаты анализа данных показали, что спектр мощности зарегистрированного сигнала гигантского импульса состоит из протяженной компоненты (рассеяние) и узкополосной детали, соответствующей собственно гигантским импульсам. Описывается моделирование распространения сквозь рассеивающую среду гигантских импульсов с заданной структурой в виде случайного набора неразрешенных во времени всплесков, равномерно распределенных в интервале 2-х микросекунд с амплитудами, распределенными по Гауссу. Сравнение с результатами РСДБ наблюдений выявило наличие в гигантских импульсах тонкой структуры на шкале ≤ 30 нс. Отмечается, что такие неразрешенные компоненты, по-видимому, будут распространяться, как сильные электромагнитные волны, ускоряя частицы окружающей плазмы. Определяются показатели степенных энергетических спектров гигантских импульсов — они лежат в диапазоне $-1.6 \div -2.5$ в зависимости от эпохи наблюдений. Обсуждаются фазовые флуктуации, обусловленные как мерцаниями, так и тонкой структурой импульсов, а также атмосферными и ионосферными эффектами.

В пятой главе приводятся результаты исследования структуры межзвездной среды на основе анализа функций видности, полученных в наземно-космических РСДБ наблюдениях гигантских импульсов пульсара B0531+21. Для восьми эпох наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 были определены основные параметры рассеяния, значения которых согласуются с ранее опубликованными. С их использованием была определена локализация эффективного рассеивающего экрана для всех эпох и показано, что его положение существенно меняется. Подчеркивается наличие двух областей рассеяния в направлении к пульсару — близкой к Крабовидной туманности и протяженной, связанной с межзвездной плазмой. При этом ближняя область часто является доминирующей в эффектах рассеяния. Получены оценки показателей в степенных зависимостях углового размера диска рассеяния и времени рассеяния от частоты. Их значения несколько отличаются от таковых для гауссова распределения неоднородностей межзвездной среды по размерам, что свидетельствует о наличии анизотропии их распределения вдоль направления на пульсар.

В заключении приведены основные результаты работы, которые выносятся на защиту.

В рамках диссертационной работы **А.Г.Рудницкий** получил целый ряд важных результатов, как методического, так и астрофизического характера, **научная значимость** которых представляется весьма высокой. Он разработал и реализовал модуль поиска и

корреляции гигантских импульсов пульсаров для программного коррелятора Астрокосмического Центра ФИАН, он провел полную обработку данных по этой программе, им впервые обнаружена (и подтверждена моделированием) неразрешенная тонкая временная структура гигантских импульсов Краба с длительностью < 30 наносекунд на волне 18 см, а также обнаружены вариации показателя степенного распределения энергии импульсов от эпохи к эпохе. Им детально исследованы характеристики многолучевой интерференции когерентного излучения гигантских импульсов, что позволило определить особенности структуры межзвездной среды в направлении на Крабовидную туманность и ее вариации.

Эти результаты во многом намечают направления новых исследований с использования наземно-космических интерферометров, в чем и заключается их **практические приложения**, как и универсальность развитых соискателем методов анализа данных. Надо в то же время подчеркнуть, что они ставят важные вопросы, требующие и своего теоретического осмысления.

Все полученные автором результаты и выводы имеют высокую степень **обоснованности и достоверности**, что обуславливается использованием больших объемов экспериментального материала, при анализе которого применялись опробованные статистические методы и физические модели, реализацией современных способов программирования, а также проверкой разработанных методов в наблюдениях.

Материалы диссертации обсуждались на двух всероссийских и пяти международных конференциях и представлены в 6 статьях, 4 из которых опубликованы в реферируемых журналах из списка ВАК.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

К диссертации **А.Г.Рудницкого** следует высказать несколько **замечаний**.

1. Структура диссертации представляется не достаточно оптимальной — собственно исследованиям посвящено лишь около 60 % объема.
2. Следовало бы расширить текст в части интерпретации результатов — сравнить распределения гигантских импульсов по энергии с таковыми для нормальных импульсов (в разных диапазонах, в том числе), обсудить возможные причины изменения показателей степени, сопоставить результаты с теоретическими представлениями о локализации областей генерации etc.
3. Не хватает сопоставления свойств гигантских радиоимпульсов с таковыми у обычных

импульсов синхронных с гигантскими (оптических, рентгеновских и т. д.). Весьма вероятно, что ключ к их природе может лежать в этой сфере.

4. К п. 4.3. Сопоставление смоделированных и наблюдавшихся импульсов следовало бы провести на более формализованной основе. Получить количественные оценки степени их совпадения, оценить вероятности ошибок первого и второго рода, показать, что только (почти только) предложенная модель соответствует данным наблюдений (отвергнуть альтернативные гипотезы о тонкой структуре) и т. д.

5. Стоило бы обратить внимание на возможную связь степени близости рассеивающего экрана к пульсару с глобальной активностью его магнитосферы (вспы) и обсудить аргументы «за» и «против».

6. Текст диссертации содержит некоторое (умеренное!) количество ошибок и опечаток.

Наконец, скорее не замечание, а предложение. Представляется очень важным попытаться организовать оптические наблюдения пульсара в Крабе на 6-метровом телескопе БТА с микросекундным временным разрешением (комплекс МАНИЯ) синхронно с сеансами наземно-космической интерферометрии.

Упомянутые недостатки не снижают **высокого качества** диссертационной работы **А.Г.Рудницкого**. Она представляет из себя законченное исследование, проведенное на стыке целого ряда современных научных направлений — физики межзвездной среды, астрофизики нейтронных звезд, радиоастрономии, астроприборостроения, методов информатики и программирования.

Диссертация **А.Г. Рудницкого** полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, а сам автор, **Алексей Георгиевич Рудницкий** безусловно заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник,
руководитель группы релятивистской астрофизики,

Г.М.Бескин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук (САО РАН)
369167, пос.Нижний Архыз, КЧР, Зеленчукский р-н, САО РАН
т.8-87878-46156, адрес эл. почты: beskin@sao.ru

Подпись Г.М.Бескина заверяю
ученый секретарь САО РАН,
к. ф.-м.н.

Е.И.Кайсина