

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ГАО РАН
чл.-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук
А.В.Степанов



9 июня 2014 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации А.А. Кузнецова
«Радиоастрономическая диагностика активных
процессов на Солнце, звездах и планетах»

представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.03.03 – Физика Солнца

Диссертация А.А. Кузнецова посвящена развитию новых методов радиоастрономической диагностики активных процессов на Солнце, звездах и планетах. Несмотря на большое количество работ о вспышках на Солнце и звездах, значительное увеличение которых стимулировали исследования вспышек с помощью современных радиогелиографов и космических аппаратов, природа вспышек до сих пор не разгадана. Очевидно, что решение этой проблемы требует не только тщательного анализа результатов многоволновых наблюдений вспышек современными наземными и космическими телескопами, но и математического моделирования разнообразных процессов вспышечного излучения, включая радиоизлучение.

Автор диссертации обращает внимание на ряд актуальных проблем, решение которых имеет фундаментальное значение для физики вспышек. Среди них следующие: а) проблема создания современных средств быстрого компьютерного моделирования источников гиротронного излучения и развития новых методов диагностики распределений среднерелятивистских электронов в солнечных вспышечных петлях, б) проблема генерации тонкой структуры на динамических спектрах всплесков IV типа (зебра-структура, волокна) и соответствующая диагностика параметров плазмы и магнитного поля в радиоисточниках, в) проблемы радиоизлучения ультрахолодных карликов. Важно подчеркнуть, что в решаемых в диссертации актуальных астрофизических задачах, центральное место занимают задачи о природе вспышечного энерговыделения на Солнце и солнечно-звёздные аналогии.

Диссертация состоит из Введения, шести глав и Заключения.

Первые две главы посвящены разработке новых методов исследования гиротронного излучения вспышечных петель. Гиротронное излучение вносит основной вклад в микроволновое излучение вспышек и является основным источником информации о параметрах ускоренных среднерелятивистских электронов и магнитном поле на корональных высотах. Современные радиогелиографы позволяют получать детальную информацию о пространственном распределении характеристик микроволнового излучения. Для восстановления пространственного распределения параметров ускоренных электронов и вспышечной плазмы по

- наблюдаемым характеристикам микроволнового излучения крайне важно иметь компьютерные программы, дающие возможность решать обратную задачу. Существующие программы расчета характеристик гиротронного излучения по параметрам распределений электронов (в общем случае анизотропных) с использованием точных выражений для излучательной способности и коэффициента поглощения занимали слишком много времени. В то же время имеющиеся приближенные методы позволяли делать быстрые расчеты только для изотропных распределений электронов.

А.А.Кузнецову совместно с Г.Д. Флейшманом удалось разработать приближенный метод, впервые позволяющий рассчитывать коэффициенты гиротронного излучения и поглощения, не только для изотропных, но и для анизотропных распределений электронов, которые часто реализуются во вспышечных петлях. Данный метод и соответствующие ему компьютерные программы, получившие название быстрых гиротронных кодов, сократили время расчетов на несколько порядков, причем почти без потери точности. Большой заслугой авторов является не только разработка метода расчета и быстрых ГС кодов, но и широкая их пропаганда в сообществе солнечных радиоастрономов. Принципиально важно также, что авторы сделали свои компьютерные программы доступными для широкого круга пользователей, разместив их в интернете.

Разработанные компьютерные программы позволяют вычислить параметры излучения как для однородного, так и для неоднородного источника с автоматическим решением уравнения переноса излучения. Более того, созданная интерактивная компьютерная программа GS Simulator на основе IDL позволяет проводить трехмерное моделирование излучения магнитных петель с аналитически заданным дипольным магнитным полем. В данной геометрии петли рассмотрено излучение от электронов с распределением типа конуса потерь, граница которого определяется условием постоянства поперечного адиабатического инварианта. Показано, что наличие неоднородной анизотропии повышает интенсивность оптически тонкого излучения из оснований петли для петли, расположенной вблизи лимба, и понижает эту интенсивность для петли, расположенной вблизи центра солнечного диска.

Отметим еще одну важную и полезную при анализе излучения вспышек разработку – программу GX Simulator. Эта более совершенная версия программы трехмерного моделирования гиротронного излучения использует конфигурации магнитного поля, полученные с помощью экстраполяции наблюдаемых фотосферных магнитограмм, что впервые открывает возможность количественного сравнения наблюдений и результатов моделирования. Автор применил эту программу для диагностики параметров вспышечной петли в солнечной вспышке 21 мая 2004 г., которая имела простую структуру с одной большой петлей. Проведенная диагностика показала, что в рассматриваемом событии ускоренные электроны сконцентрированы в вершине петли, что, возможно, отражает процессы локальной инжекции частиц и последующего их захвата в неоднородном магнитном поле петли.

В третьей главе исследованы особенности генерации зебра-структур в динамических спектрах солнечных радиовсплесков IV типа. Одной из трудностей объяснения этих структур на основе двойного плазменного резонанса является наличие в некоторых всплесках необычно большого количества полос (более 40), которое невозможно получить в рамках классического двухтемпературного подхода.

Диссертантом совместно с Ю.Т.Цапом показано, что такая трудность преодолевается, если энергичные электроны в корональных вспышечных петлях с распределением типа конуса потерь имеют степенной, а не максвелловский закон распределения по энергии. Электроны с таким типичным для солнечных вспышек энергетическим спектром способны обеспечить формирование зебра-структуры с числом полос до нескольких десятков за счет эффекта двойного плазменного резонанса. Подтверждение адекватности модели зебра-всплесков, основанной на эффекте двойного плазменного резонанса, открывает новые возможности для диагностики магнитного поля в короне Солнца.

В главе 4 рассматривается другая разновидность тонких структур в динамических спектрах солнечных радиовсплесков IV типа – так называемые всплески с промежуточной скоростью дрейфа, известные как «волокна». Скорость частотного дрейфа таких всплесков примерно на порядок превышает скорость дрейфа всплесков II типа, генерируемых ударными волнами. Поэтому большинство теоретических моделей исходят из предположения, что скорость движения распространяющегося агента, приводящего к формированию этих всплесков, должна значительно превосходить альфвеновскую. В диссертации показано, что модели, основанные на вистлерах, встречаются со значительными ограничениями, связанными с сильным поглощением вистлеров. На частотах более 1 ГГц модель не может объяснить всплески с промежуточным дрейфом и с длительностью более одной секунды. Значительные трудности при сравнении с наблюдениями имеются у модели, основанной на модуляции излучения нелинейными альфвеновскими солитонами, распространяющимися с суперальфвеновскими скоростями.

Диссертантом предложена оригинальная модель формирования подобных всплесков, согласно которой они возникают в результате модуляции плазменного механизма излучения распространяющимися МГД-колебаниями магнитных трубок типа радиальных мод. Модуляция обусловлена вариацией локального градиента плотности плазмы, что приводит к изменению скорости выхода верхнегибридных волн из резонанса с ускоренными электронами в пространстве волновых векторов и, таким образом, к изменению плотности энергии плазменных волн. Показано, что данная модель может объяснить как наблюдаемые скорости частотного дрейфа всплесков, так и их спектры, состоящие из параллельных полос излучения и поглощения. Всплески с промежуточной скоростью дрейфа могут быть использованы для диагностики мелкомасштабных МГД-колебаний малой амплитуды в солнечной короне.

Пятая и шестая главы посвящены природе радиоизлучения ультрахолодных карликов. В настоящее время такое необычно интенсивное излучение из холодных звёзд размером с Юпитер представляет загадку для астрофизиков. Интенсивность радиоизлучения таких звёзд иногда превосходит интенсивность радиоизлучения более горячих активных красных карликовых звёзд. Особенно загадочно интенсивное периодическое радиоизлучение звёзд спектрального класса $\geq M7$, период излучения которых совпадает с периодом вращения звезды. Анализируя существующие модели излучения ультрахолодных карликов, диссертант приходит к выводу о неадекватности модели излучения, вызванного взаимодействием со спутником, как это имеет место в системе Юпитер-Ио, отдавая предпочтение модели наклонного магнитного диполя по отношению к оси вращения звезды. В качестве механизма интенсивного когерентного излучения А.А.Кузнецов развивает популярную в настоящее время модель электронного циклотронного мазера. Для этого в главе 6

численно моделируется электронно-циклотронная мазерная неустойчивость электронов, ускоренных до энергий ≥ 3 кэВ в результате «пересоединения» силовых линий достаточно сильного, $\sim 3-4$ кГс, магнитного поля в атмосфере звезды.

По существу диссертации нам представляется необходимым сделать следующие замечания.

В списке выносимых на защиту результатов под № 2 утверждается: «Показано, что даже умеренная анизотропия ускоренных электронов в солнечных вспышках существенно влияет на гиротронное микроволновое излучение». По нашему мнению, этот результат не является новым. Рассмотрению влияния анизотропии ускоренных электронов на интенсивность, спектр и поляризацию гиротронного микроволнового излучения солнечных вспышек посвящена статья Г.Д.Флейшмана и В.Ф. Мельникова, опубликованная в *Astrophysical Journal* в 2003 году. В ней рассмотрены разные типы и уровни анизотропии, в том числе умеренные, и показано их сильное влияние практически на все характеристики гиротронного излучения. В последующих работах Мельникова и соавторов. (2006-2012) аналогичные выводы были сделаны на основе решения нестационарного релятивистского уравнения Фоккера-Планка и полученных пространственных зависимостей pitch-угловой анизотропии, возникающей во вспышечной петле при различных режимах инжекции энергичных электронов.

При расчетах гиротронного излучения из вспышечной петли с учетом влияния обратного тока на распределение электронов в магнитной трубке автором диссертации используется решение уравнения Фоккера-Планка, полученное В.В.Жарковой с соавторами (2009-2010). Однако, это решение справедливо для уравнения Фоккера-Планка в случае нерелятивистских электронов, и применялось для расчетов жесткого рентгеновского излучения. Следовательно, привлечение его для расчета гиротронного излучения, вклад в которое дают в основном среднерелятивистские и релятивистские электроны, не вполне корректно. Диссертанту следовало бы оценить погрешность расчета характеристик микроволнового излучения при использовании этого нерелятивистского решения.

При расчетах мазерной циклотронной неустойчивости диссертант применяет подход «сильно разреженной плазмы», имея в виду преобладание гирочастоты электронов над частотой Ленгмюра, и привлекает «вакуумные» формулы для описания дисперсионных свойств системы «равновесная плазма + ускоренные электроны». С другой стороны, на стр. 267 утверждается, что «равновесная компонента плазмы практически отсутствует, так что преобладающей компонентой являются ускоренные электроны». Это означает, что $n_b \gg n_0$. В таком случае дисперсионные свойства системы определяются энергичной компонентой и задачу нужно решать аналогично задаче об устойчивости электронного пучка, инжектируемого в «вакуум» с магнитным полем (см., например, Ю.К.Алехин и др., *Cosmic Electrodynamics*, **2**, 293, 1971). Кроме того, неясно, откуда берутся ускоренные электроны, если $n_0 \ll n_b$?

Использование автором в главе 6 термина «сильная диффузия», без пояснения отличий от общепринятого, введенного П.А.Беспаловым и В.Ю.Трахтенгерцем (Альфвеновские мазеры, Горький, ИПФАН, 1986), к сожалению, затрудняет понимание постановки задачи об оценке времён диффузии и релаксации.

Высказанные замечания, тем не менее, не умаляют отмеченные многочисленные достоинства работы. Более того, отметим научную смелость диссертанта, взявшегося за решение таких непростых задач, как объяснение особенностей сверхтонкой структуры радиоизлучения солнечных вспышек и загадочного радиоизлучения ультрахолодных звезд. Результаты диссертации А.А.Кузнецова важны и для обширной области астрофизики – физики звезд.

Диссертационная работа «Радиоастрономическая диагностика активных процессов на Солнце, звездах и планетах» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.03.03 – физика Солнца, а её автор, Алексей Алексеевич Кузнецов, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук. Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов в области астрофизики, радиоастрономии и физики Солнца и могут быть использованы в ГАО РАН, ГАИШ МГУ, ФИАН, САО РАН, НИРФИ, КраО, ИПФ РАН, ИСЗФ СО РАН, ФТИ РАН. Результаты исследования опубликованы в журналах, перечень которых утверждён ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Работа А.А. Кузнецова была обсуждена и одобрена на объединённом астрофизическом семинаре ГАО РАН.

Отзыв составил главный научный сотрудник ГАО РАН д. ф.-м. н. В.Ф. Мельников.

Главный научный сотрудник ГАО РАН
доктор физ.-мат. наук

В.Ф. Мельников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН,
196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65
тел.: +7 915 9422017
e-mail: v.melnikov@gao.spb.ru

Подпись В.Ф. Мельникова заверяю
Ученый секретарь ГАО РАН



Т.П. Борисевич