

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук

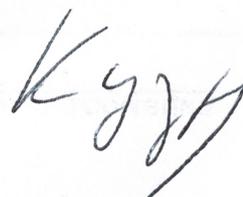
На правах рукописи  
УДК 523.98

Кузнецов Алексей Алексеевич

**Радиоастрономическая диагностика активных  
процессов на Солнце, звездах и планетах**

01.03.03 – Физика Солнца

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



Иркутск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

**Официальные оппоненты:**

Богод Владимир Михайлович, д. ф.-м. н.,  
Санкт-Петербургский филиал САО РАН, заведующий

Злотник Елена Яковлевна, д. ф.-м. н.,  
ИПФ РАН, ведущий научный сотрудник

Фомичев Валерий Викторович, д. ф.-м. н.,  
ИЗМИРАН, зам. директора

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук

Защита диссертации состоится 24 июня 2014 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан

2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к. ф.-м. н.



В.И. Поляков

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Радиоизлучение является одним из основных источников информации о процессах в солнечной короне, магнитосферах планет и на многих других астрофизических объектах. Наблюдения в радиодиапазоне потенциально могут быть использованы для диагностики напряженности и структуры магнитного поля и параметров ускоренных частиц, что очень важно, например, для исследования солнечных вспышек. Во многих случаях излучение в радио- и микроволновом диапазонах содержит информацию, которую невозможно (или крайне сложно) получить другими методами.

Вместе с тем, как правило, механизмы генерации радиоизлучения в плазме довольно сложны и зависят от многих параметров, что затрудняет интерпретацию наблюдений. Кроме наблюдений с высоким временным, спектральным и угловым разрешением, диагностика параметров астрофизических объектов по радиоизлучению требует использования теоретических моделей, которые позволили бы однозначно соотнести наблюдаемые характеристики излучения с параметрами его источника. Поэтому разработка подобных моделей и соответствующих им средств численного моделирования является актуальной задачей.

Разработка новых средств анализа и интерпретации наблюдений становится особенно важной в связи с планируемым вводом в строй новых инструментов. В частности, можно упомянуть строящиеся в настоящее время инструменты для наблюдений Солнца — Модернизированный Сибирский Солнечный Радиотелескоп (ССРТ), Китайский Спектральный Радиогелиограф (CSRH) и Усовершенствованный Радиогелиограф Оуэнс Вэлли (EOVSA), которые будут производить наблюдения с высоким временным и пространственным разрешением одновременно на многих частотах в радиодиапазоне. Данные инструменты будут измерять одновременно большое количество параметров излучения, что, как ожидается, впервые позволит производить точную количественную диагностику параметров солнечных активных областей по радионаблюдениям. В свою очередь, это потребует использования как новых (более точных) теоретических моделей генерации излучения, так и программных средств, способных в автоматическом режиме обрабатывать боль-

шие объемы данных. Аналогичный прогресс ожидается и в наблюдениях радиоизлучения планет и звезд. Отдельно следует отметить новые приложения радиоастрономических средств диагностики — например, для исследования МГД-волн и колебаний в солнечной короне; подобные исследования также требуют разработки новых теоретических моделей и программных средств для анализа результатов наблюдений.

### Цели работы

Целью работы является разработка новых теоретических моделей генерации радиоизлучения в космической плазме и соответствующих им средств численного моделирования. Основное внимание уделяется радиоизлучению Солнца; в частности, исследования, представленные в главах 1–2, непосредственно направлены на разработку средств анализа и интерпретации будущих данных упомянутых выше многоволновых радиогелиографов. Кроме того, рассматриваются радиоизлучение магнитосфер планет и недавно открытое радиоизлучение ультрахолодных карликов. Во всех случаях производится также анализ наблюдений с использованием разработанных теоретических методов и оценка параметров источников радиоизлучения.

### Научная новизна

- Разработаны новые алгоритмы и компьютерные средства для моделирования гиротронного излучения, которые обеспечивают очень высокую скорость вычислений и (впервые) применимы к анизотропным распределениям излучающих электронов.
- Проведено наиболее детальное (на данный момент) моделирование гиротронного излучения в солнечных вспышках с использованием реалистичных конфигураций магнитного поля и распределений ускоренных электронов; найдена зависимость наблюдаемых параметров излучения от различных параметров источника.
- Показано, что электронные пучки со степенным распределением по энергии и распределением типа конуса потерь по питч-углу способны обеспечить формирование зебра-структуры в спектрах солнечного радиоизлучения за счет эффекта двойного плазменного резонанса.

- Впервые была зарегистрирована зебра-структура на частотах более 5 ГГц; проанализированы возможные механизмы ее формирования и получены оценки параметров источника излучения.

- Показано, что «сверхтонкая временная структура» радиовсплесков с зебра-структурой может возникать в результате модуляции плазменного механизма излучения МГД-колебаниями.

- Впервые исследована зебра-структура в километровом радиоизлучении Юпитера; показано, что возникновение таких спектральных структур может быть обусловлено эффектом двойного плазменного резонанса.

- Разработана новая модель формирования всплесков с промежуточной скоростью частотного дрейфа в солнечном радиоизлучении, основанная на модуляции плазменного механизма излучения МГД-колебаниями.

- Впервые проведено моделирование периодических радиовсплесков от ультрахолодных карликов с использованием различных моделей источника; на основе анализа наблюдений получены оценки параметров источников излучения.

- Впервые проведено кинетическое моделирование электронно-циклотронной мазерной неустойчивости распределения ускоренных электронов типа «подковы» (horseshoe); найдены основные характеристики генерируемого излучения и их зависимость от параметров источника.

### Научная и практическая значимость

Разработанные алгоритмы и компьютерные программы для моделирования гиротронного излучения солнечных вспышек в настоящее время широко используются многими исследователями для анализа и интерпретации наблюдений. Эти алгоритмы и программы являются ключевым шагом на пути к разработке средств для анализа наблюдений будущих многоволновых радиогелиографов и диагностики параметров вспышечных областей по радионаблюдениям.

Проведенное исследование подтвердило, что эффект двойного плазменного резонанса является основным механизмом формирования зебра-структур в солнечном радиоизлучении; это позволяет использовать всплески с зебра-

структурой для диагностики параметров плазмы и магнитного поля в солнечной короне. Результаты исследования всплесков с тонкой спектральной и временной структурой открывают возможность диагностики мелкомасштабных МГД-волн и колебаний в солнечной короне по радионаблюдениям.

Результаты исследования радиоизлучения ультрахолодных карликов важны для дальнейшего развития теории звездного динамо и теории процессов в быстро вращающихся магнитосферах. Результаты моделирования электронно-циклотронной мазерной неустойчивости и разработанные при этом подходы могут быть использованы для дальнейшего развития теории когерентных механизмов излучения (как мазерного, так и плазменного).

#### Положения, выносимые на защиту

1. Разработаны новые алгоритмы и компьютерные программы для расчета параметров гиротронного излучения, что значительно повышает эффективность диагностики вспыхивающих областей на Солнце — в том числе, с использованием данных наблюдений на будущих многоволновых радиогелиографах.

2. Показано, что даже умеренная анизотропия ускоренных электронов в солнечных вспышках существенно влияет на гиротронное микроволновое излучение. Найдена зависимость наблюдаемых параметров излучения от особенностей распределения электронов и ориентации вспыхивающей петли. Получены оценки параметров ускоренных электронов в некоторых событиях.

3. Найдены условия формирования радиовсплесков с зебра-структурой электронным пучком с распределением типа конуса потерь на двойном плазменном резонансе. Показано, что данная модель формирования зебра-структуры хорошо согласуется с наблюдениями радиоизлучения Солнца и Юпитера; получены оценки параметров источников излучения в некоторых событиях.

4. Разработана новая модель формирования всплесков с промежуточной скоростью частотного дрейфа в солнечном радиоизлучении, основанная на модуляции плазменного механизма излучения распространяющимися МГД-колебаниями магнитных трубок.

5. На основе анализа наблюдений и численного моделирования установлены основные характеристики источников периодических микроволновых всплесков от ультрахолодных карликов, а также характеристики магнитосфер подобных объектов в целом.

6. Предложена приближенная схема учета конечных размеров источника излучения при численном моделировании электронно-циклотронной мазерной неустойчивости. Показано, что данная схема позволяет воспроизвести основные характеристики источников аврорального километрового радиоизлучения Земли и Сатурна; сделаны прогнозы для магнитосфер ультрахолодных карликов.

#### Личный вклад автора

Исследования, представленные в диссертации, выполнены автором как самостоятельно, так и в сотрудничестве с коллегами из ИСЗФ СО РАН, НИ ИрГТУ, Крымской Астрофизической Обсерватории (Украина), Университета Брэдфорда (Великобритания), Технологического Института Нью-Джерси (США), Университета Глазго (Великобритания), Обсерватории Армы (Великобритания), Университета Софии (Болгария) и других организаций. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит либо определяющий, либо равный вклад по сравнению с другими соавторами.

#### Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИСЗФ СО РАН, Обсерватории Нобеямы (Япония), Обсерватории Армы (Великобритания), Университета Глазго (Великобритания) и Технологического Института Нью-Джерси (США), а также на различных всероссийских и международных научных конференциях, включая 223 IAU Symposium “Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity” (Санкт-Петербург, 2004 г.), VII Международную Байкальскую молодежную научную школу по фундаментальной физике (Иркутск, 2004 г.), Всероссийскую конференцию «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности» (Троицк, 2005 г.), 36<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly (Пекин, Китай, 2006 г.), VII Российско-Китайский семинар по космической погоде (Иркутск,

2006 г.), Всероссийскую конференцию «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности» (Нижний Архыз, 2006 г.), CESRA Workshop “Solar Radio Physics and the Flare-CME Relationship” (Янина, Греция, 2007 г.), 12<sup>th</sup> European Solar Physics Meeting (Фрейбург, Германия, 2008 г.), Всероссийскую конференцию по физике Солнца «Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика — 2009» (Санкт-Петербург, 2009 г.), Royal Astronomical Society National Astronomy Meeting 2010 (Глазго, Великобритания, 2010 г.), CESRA Workshop “Energy Storage and Release Through the Solar Activity Cycle — Models Meet Radio Observations” (Ла Роше в Арденнах, Бельгия, 2010 г.), 274 IAU Symposium “Advances in plasma astrophysics” (Джардини-Наксос, Италия, 2010 г.), 11<sup>th</sup> RHESSI Workshop (Глазго, Великобритания, 2011 г.), EPSC-DPS Joint Meeting 2011 (Нант, Франция, 2011 г.), EGU General Assembly 2012 (Вена, Австрия, 2012 г.), CESRA Workshop “New Eyes Looking at Solar Activity” (Прага, Чехия, 2013 г.), 2<sup>nd</sup> Asian-Pacific Solar Physics Meeting (Ханчжоу, Китай, 2013 г.) и Workshop & School on RadioSun (Пекин, Китай, 2013 г.).

### Публикации

По теме диссертации опубликовано 55 работ, включая 1 статью в журнале, рекомендованном ВАК для публикации результатов докторских диссертаций, 19 статей в журналах, входящих в базы данных международных систем цитирования, 4 статьи в сборниках трудов научных конференций, 1 статью в журнале «Солнечно-земная физика» (ИСЗФ СО РАН), 1 публикацию в электронной базе данных VizieR и 29 тезисов докладов на научных конференциях. Список публикаций по теме диссертации (не включая тезисы докладов на конференциях) приведен в конце автореферата.

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 350 страниц, включая 95 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 368 наименований.

# Содержание диссертации

Во введении дана общая характеристика работы, сформулированы актуальность и цели исследования, приведены основные результаты работы. Кратко описано содержание глав диссертации.

Глава 1 посвящена разработке новых методов моделирования гиротронного излучения (некогерентного излучения умеренно релятивистских электронов в магнитном поле). Гиротронный механизм вносит основной вклад в микроволновое излучение солнечных и звездных вспышек; он играет заметную роль и в многих других источниках космического радиоизлучения. Поэтому при интерпретации наблюдений часто возникает задача вычисления параметров гиротронного излучения для различных условий в его источниках. Общая теория данного механизма излучения достаточно хорошо разработана; точные формулы для гиротронной излучательной способности и соответствующего коэффициента поглощения известны на протяжении нескольких десятилетий. Однако точные формулы достаточно громоздки и вычисления с их помощью требуют много времени, особенно если частота излучения значительно превышает циклотронную частоту.

В связи с важностью гиротронного излучения для солнечной радиоастрономии, для его вычисления были предложены несколько приближенных методов. Точность этих приближений, однако, ограничена. Что еще более существенно, они применимы только к определенным (изотропным) распределениям излучающих электронов; с другой стороны, в настоящее время имеется много доказательств существования анизотропных распределений ускоренных электронов в солнечных вспышках, в том числе в источниках микроволновых всплесков.

Автором (совместно с Г.Д. Флейшманом) были разработаны новый приближенный метод и соответствующие ему компьютерные программы, получившие название «быстрых гиротронных кодов», для моделирования гиротронного излучения. Новизна подхода заключается в использовании как аналитических, так и численных методов. Разработанные компьютерные программы позволяют вычислять параметры гиротронного излучения как для изотропных, так и для анизотропных распределений элек-

тронов; скорость вычислений на несколько порядков выше, чем при использовании точных формул, в то время как относительная погрешность (для типичных параметров) не превышает нескольких процентов. Предусмотрена возможность использования точных гиросинхротронных формул (на низких частотах) для повышения точности и воспроизведения гармонической структуры спектров излучения. Разработаны компьютерные программы для вычисления параметров излучения как для однородного источника, так и с автоматическим решением уравнения переноса излучения в неоднородной среде.

Быстрые гиросинхротронные коды были реализованы в виде внешних программных модулей (библиотек) для интерактивной системы программирования и обработки данных IDL; они имеют вид динамически загружаемых библиотек (dynamic link libraries, DLL) для операционной системы Windows и общих модулей (shared objects, SO) для Linux. Исполняемые файлы библиотек вместе с подробным описанием и примерами использования свободно доступны (<https://sites.google.com/site/fgscodes>).

В главе 2 с помощью численного моделирования (с использованием программных средств, разработанных в главе 1) исследуется гиросинхротронное излучение ускоренных электронов в солнечных вспышках. В частности, в разделе 2.1 проводится трехмерное моделирование излучения симметричных магнитных петель с аналитически заданным (дипольным) магнитным полем; для моделирования используется недавно созданная интерактивная компьютерная программа **GS Simulator** на основе IDL. Рассматривается пиччугловое распределение ускоренных электронов с конусом потерь, граница которого определяется условием постоянства поперечного адиабатического инварианта; в результате распределение является существенно анизотропным только вблизи оснований петли. Тем не менее, как оказалось, даже такая «умеренная» анизотропия оказывает существенное влияние как на двумерные изображения, так и на спектральные характеристики гиросинхротронного излучения. В частности, наличие 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. Пространственно неразрешенные спектры

сложным образом зависят от различных параметров петли, включая питч-угловую анизотропию и пространственное распределение ускоренных электронов. Неоднородность магнитного поля в петле приводит к размытию и уширению спектрального пика и, в некоторых случаях, к формированию практически плоского спектра в определенном интервале частот. Спектральный индекс излучения заметно зависит от частоты, причем даже в оптически тонкой части спектра. Существенно, что простые аналитические приближения, которые часто используются для интерпретации наблюдений (такие как синхротронное приближение и формулы Далка-Марша), не могут достаточно точно воспроизвести спектральные индексы излучения корональных магнитных петель с неоднородным полем.

В разделе 2.2 приводится пример использования более совершенного средства для моделирования солнечного гиротронного излучения — программы *GX Simulator*. Данная программа использует реалистичные конфигурации магнитного поля, полученные с помощью экстраполяции наблюдаемых фотосферных магнитограмм, что впервые открывает возможность количественного сравнения наблюдений и результатов моделирования. Моделирование используется для диагностики параметров вспышечной петли в приложении к конкретному событию — вспышке 21 мая 2004 г., которая имела достаточно простую структуру с одной большой петлей; результаты моделирования сравниваются с пространственно разрешенными наблюдениями радиогелиографа Нобеямы в микроволновом диапазоне. Данный подход позволил восстановить распределение ускоренных электронов вдоль вспышечной петли и оценить их энергетический спектр. Показано, что в рассматриваемом событии ускоренные электроны были сильно сконцентрированы в вершине петли, что, возможно, отражает процессы локализованной инжекции частиц и последующего их захвата в неоднородном магнитном поле петли. С другой стороны, использованный метод диагностики требует дополнительных данных (кроме микроволновых наблюдений), а именно, трехмерной модели магнитного поля в солнечной короне. Можно ожидать, что строящиеся в настоящее время многоволновые инструменты с высоким пространственным разрешением позволят (за счет большего количества измеряемых параметров) повысить надежность диагностики и дадут возможность непосредственно определять магнитные поля в короне.

В разделе 2.3 используется другой подход, а именно, рассматриваются более подробно функции распределения ускоренных электронов, которые могут формироваться в солнечных вспышках. Для моделирования этих функций распределения используется численное решение уравнения переноса частиц (уравнения Фоккера-Планка); соответствующий численный код был разработан В.В. Жарковой с коллегами. Рассматривается влияние различных факторов (таких как столкновения, неоднородность магнитного поля и самоиндуцированное электрическое поле) на функции распределения электронов и, таким образом, на параметры генерируемого гиротронного излучения. Проведенное численное моделирование показало, что основным фактором, влияющим на радиоизлучение, является сходящееся магнитное поле (которое приводит к формированию распределения электронов с конусом потерь). Тем не менее для мощных вспышек, возникающих вблизи центра солнечного диска, важен также учет самоиндуцированного электрического поля. В этом случае (для углов зрения порядка  $\theta = 140^\circ - 150^\circ$  относительно локального магнитного поля) влияние самоиндуцированного электрического поля (в дополнение к столкновениям и неоднородности магнитного поля) может привести к многократному возрастанию интенсивности излучения. Кроме того, самоиндуцированное электрическое поле влияет на поляризацию излучения, увеличивая относительный вклад О-моды.

Представленные в главе 2 исследования основаны на различных подходах к построению моделей источников излучения. В разделах 2.1–2.2 основной акцент делается на воспроизведении трехмерной структуры магнитного поля во вспышечной области, в то время как для функций распределения электронов используются упрощенные аналитические модели. С другой стороны, в разделе 2.3 ставится задача наиболее корректного и реалистичного задания функции распределения ускоренных электронов, в то время как структура источника излучения описывается достаточно приближенно. Таким образом, данные исследования можно рассматривать как шаги (с разных сторон) к разработке новых средств для моделирования солнечного радиоизлучения, предназначенных для анализа наблюдений на будущих многоволновых радиогелиографах.

Глава 3 посвящена исследованию зебра-структур в спектрах солнечного радиоизлучения. Зебра-структура наблюдается как набор практически параллельных светлых и темных полос в динамическом спектре на фоне широкополосного всплеска IV типа; количество полос зебра-структуры может достигать нескольких десятков. Наблюдения с высоким спектральным разрешением позволяют измерять характеристики зебра-структур с довольно высокой точностью, что потенциально может быть использовано для диагностики различных параметров источника излучения. Однако для этого прежде всего необходимо идентифицировать механизм формирования тонкой спектральной структуры.

Наиболее вероятным механизмом формирования зебра-структуры считается эффект двойного плазменного резонанса, который заключается в значительном возрастании эффективности генерации плазменных (верхнегибридных) волн, если локальная плазменная частота совпадает с гармоникой электронной циклотронной частоты ( $f_p \simeq s f_B$ ); в неоднородной вспышечной петле в солнечной короне указанное условие для различных номеров гармоник  $s$  выполняется на разных высотах, что и приводит к формированию полосатого спектра. Одним из возражений против данного механизма считались предъявляемые им жесткие требования к распределению ускоренных электронов — согласно некоторым исследованиям, эффект двойного плазменного резонанса слабо выражен для электронных пучков с конусом потерь. В разделе 3.1 проводится (совместно с Ю.Т. Цапом) детальное исследование процесса генерации верхнегибридных волн; используется полностью релятивистское описание и рассматриваются различные функции распределения ускоренных электронов. Показано, что электронные пучки со степенным распределением по энергии и распределением типа конуса потерь по питч-углу (которые, по-видимому, являются типичными для корональных вспышечных петель) способны обеспечить формирование зебра-структуры с большим количеством полос — до нескольких десятков; необходимыми условиями для возникновения выраженного эффекта двойного плазменного резонанса являются малая дисперсия ускоренных частиц по энергии (что соответствует относительно мягким пучкам) и большие (близкие к  $90^\circ$ ) значения питч-угловой границы конуса потерь. Показано также, что наблюдаемые спектры зебра-структур в дециметровом диапазоне хорошо согласуются с моделью двойного плазмен-

ного резонанса, что может быть использовано для диагностики параметров плазмы и магнитного поля в короне.

В разделе 3.2 представлены наблюдения зебра-структуры во вспышке 5 января 2003 г. — первый случай обнаружения зебра-структуры на частотах выше 5 ГГц. Для данного события характерны эквидистантность спектральных полос, высокая синхронность частотных дрейфов различных полос и высокая степень поляризации, соответствующая X-моду. Возможно, в данном случае (как и в некоторых других редко наблюдаемых микроволновых зебра-структурах) генерация излучения с тонкой спектральной структурой обусловлена нелинейным взаимодействием гармоник мод Бернштейна. Проведено аналитическое исследование и численное моделирование процессов генерации мод Бернштейна и их нелинейной трансформации в радиоизлучение. Показано, что данный механизм способен обеспечить генерацию излучения с наблюдаемыми интенсивностью и поляризацией. Тем не менее одновременная генерация нескольких гармоник мод Бернштейна требует выполнения определенных условий — в частности, отношение температур ускоренных и тепловых электронов должно находиться в определенном относительно узком интервале. Кроме того, количество полос зебра-структуры в данном механизме ограничено (не более 3–4). Таким образом, механизм формирования зебра-структуры за счет нелинейного взаимодействия мод Бернштейна является менее эффективным и универсальным, чем двойной плазменный резонанс, хотя в некоторых случаях он вполне может работать, о чем свидетельствуют наблюдения высокочастотных зебра-структур.

В разделе 3.3 рассматривается «сверхтонкая временная структура» — явление, заключающееся в том, что полосы «зебры» в некоторых событиях состоят из отдельных коротких всплесков. Подробно исследовано событие 21 апреля 2002 г., когда радиовсплеск с выраженной сверхтонкой временной структурой наблюдался в широком частотном диапазоне и в течение длительного времени. Показано, что период следования импульсов сверхтонкой структуры (25–40 мс) зависит от частоты излучения; существует также корреляция между данным периодом и скоростью частотного дрейфа полос «зебры». Указанные особенности хорошо согласуются с моделью, в которой сверхтонкая временная структура возникает в результате модуляции излучения (на уровнях двойного плазменного резонанса) некоторым квазиперио-

дическим распространяющимся агентом. Необходимая скорость распространяющегося агента составляет  $\sim 1000 \text{ км с}^{-1}$ , что делает наиболее вероятным кандидатом на эту роль МГД-колебания. Таким образом, сверхтонкая временная структура может быть использована для диагностики мелкомасштабных МГД-колебаний в солнечной короне.

В разделе 3.4 анализируются наблюдения зебра-структуры в километровом радиоизлучении Юпитера, сделанные аппаратом *Cassini* в 2000 г. Динамические спектры радиоизлучения демонстрируют очевидное сходство с зебра-структурами, наблюдаемыми в динамических спектрах солнечного радиоизлучения (несмотря на то, что радиоизлучение Юпитера имеет значительно более низкую частоту). Поэтому можно предположить, что и механизмы формирования тонкой спектральной структуры должны быть аналогичными. В отличие от солнечных вспышек конфигурация магнитного поля и распределение плазмы в магнитосфере Юпитера являются значительно более стабильными; они были непосредственно исследованы с помощью космических аппаратов. Данное обстоятельство ограничивает количество свободных параметров модели источника излучения и, таким образом, накладывает более жесткие ограничения на возможный механизм формирования зебра-структуры. Проведенное моделирование показало, что модель двойного плазменного резонанса позволяет качественно воспроизвести основные особенности наблюдаемой зебра-структуры. Излучение, по всей видимости, генерируется в плазменном торе Ио вблизи экваториальной плоскости на расстоянии около 10 радиусов Юпитера от планеты. Таким образом, сравнение результатов моделирования (на основе модели двойного плазменного резонанса) с наблюдениями позволяет приблизительно определить положение источника излучения; с другой стороны, пространственно разрешенные наблюдения (когда есть возможность независимого определения координат источника излучения) могут быть использованы для восстановления профилей плотности плазмы и магнитного поля в магнитосфере Юпитера.

В главе 4 рассматривается другая разновидность тонких спектральных структур, наблюдаемых в динамических спектрах солнечных радиовсплесков IV типа — так называемые всплески с промежуточной скоростью частотного дрейфа или «волокна». Для этих всплесков (возникающих, как правило, боль-

шими группами) характерны скорости дрейфа порядка десятков МГц  $\text{с}^{-1}$  и наличие полосы поглощения, прилегающей к всплеску с низкочастотной стороны. Показано, что существующие теоретические модели (основанные на излучении пакетов вистлеров или модуляции излучения альфвеновскими солитонами) не могут адекватно объяснить наблюдаемые характеристики «волокон», в особенности на высоких частотах.

Предложена другая модель, в которой всплески с промежуточной скоростью дрейфа возникают в результате модуляции плазменного механизма излучения распространяющимися МГД-колебаниями магнитных трубок типа «сосисочных мод». Модуляция обусловлена вариацией локального градиента плотности плазмы, что приводит к изменению скорости выхода плазменных (вернегибридных) 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 рассматриваемых всплесков, так и их характерные спектры. Таким образом, всплески с промежуточной скоростью дрейфа могут быть использованы для диагностики мелкомасштабных МГД-колебаний с малой амплитудой в солнечной короне.

В главе 5 рассматривается излучение ультрахолодных карликов. Ультрахолодными карликами (ultracool dwarfs) называют карликовые звездные и субзвездные объекты со спектральным классом  $\geq M7$  (с температурой менее 2700 К), т.е., данная группа включает наиболее холодные и маломассивные красные карлики и большую часть коричневых карликов. Принципиальной особенностью, позволяющей выделить данные объекты в отдельный класс, являются свойства их атмосфер: в то время как более горячие звезды обладают горячими ионизированными коронами (похожими на солнечную), для ультрахолодных карликов характерны нейтральные атмосферы планетного типа. Недавно было обнаружено, что некоторые из ультрахолодных карликов являются неожиданно яркими радиоисточниками; установлено, что около 10% объектов в интервале спектральных классов M7–L3 являются источниками интенсивного излучения в микроволновом диапазоне (было зарегистрировано излучение на частотах от 1 до 20 ГГц). Интенсивность радиоизлучения ультрахолодных карликов сравнима с интенсивностью излучения более горя-

чих «классических» красных карликов или даже превосходит ее. В дополнение к относительно постоянной (или медленно меняющейся) слабополяризованной компоненте, их излучение может содержать короткие периодические всплески с высокой яркостной температурой и высокой (близкой к 100%) степенью круговой поляризации; период всплесков, по всей видимости, совпадает с периодом вращения карлика. Данные особенности нетипичны для звездного радиоизлучения и напоминают, скорее, авроральное радиоизлучение планет солнечной системы, хотя излучение ультрахолодных карликов генерируется на значительно более высоких частотах и имеет значительно более высокую интенсивность; в частности, наиболее вероятным механизмом излучения является электронно-циклотронная мазерная неустойчивость. Чтобы обеспечить наблюдаемые частоты излучения, ультрахолодные карлики должны обладать магнитными полями с напряженностью порядка нескольких тысяч гаусс, что подтверждается рядом наблюдений. Радиоизлучение ультрахолодных карликов является основным средством для исследования структуры магнитного поля на подобных объектах (что важно для развития теории звездного динамо), а также для исследования магнитосферных процессов, качественно аналогичных процессам в магнитосферах планет (включая Землю), но протекающих в существенно отличных условиях.

В разделе 5.1 проводится численное моделирование динамических спектров радиоизлучения ультрахолодных карликов. Магнитное поле моделируется наклонным диполем; в качестве механизма генерации излучения рассматривается электронно-циклотронная мазерная неустойчивость. Рассматриваются две модели: излучение, индуцированное взаимодействием со спутником (аналогично системе Ио-Юпитер) и излучение из узкого сектора активных долгот (случай, аналогичный гектометровому излучению Юпитера). Задача моделирования — воспроизвести наблюдаемые короткие периодические (или квазипериодические) всплески. Как оказалось, по крайней мере, для ультрахолодного карлика TVLM 513–46546 модель со спутником не соответствует наблюдениям, поскольку не может воспроизвести высокую стабильность периода всплесков. С другой стороны, модель излучения из активного сектора способна качественно воспроизвести основные особенности наблюдаемых временных профилей радиоизлучения. По всей видимости, магнитный диполь сильно наклонен по отношению к оси вращения (примерно на  $60^\circ$ ),

т.е., магнитное поле данного объекта по своей топологии напоминает магнитное поле Урана. Радиоизлучение должно генерироваться на магнитных силовых линиях с индексом  $L \simeq 2.0 - 2.6$ .

В разделе 5.2 исследуется взаимосвязь между вращением ультрахолодных карликов и их активностью в радиодиапазоне; на основании статистического анализа наблюдений показано, что быстрое вращение является необходимым условием генерации интенсивного излучения. Сделан вывод о том, что наиболее вероятным источником ускоренных частиц в магнитосферах ультрахолодных карликов является магнитное пересоединение на границе областей коротации их магнитосфер, т.е. источником энергии для активных процессов является вращение карликов.

В главе 6 проводится численное моделирование электронно-циклотронной мазерной неустойчивости. Данная неустойчивость ответственна за генерацию аврорального километрового радиоизлучения в магнитосфере Земли, а также, скорее всего, за генерацию основных компонент радиоизлучения других планет солнечной системы и периодических радиовсплесков от ультрахолодных карликов. Мазерное излучение крайне чувствительно к параметрам плазмы, магнитного поля и ускоренных частиц в своем источнике. Тем не менее использовать его в качестве диагностического средства довольно сложно, поскольку в большинстве случаев это требует применения нелинейных моделей, учитывающих релаксацию неустойчивого распределения электронов за счет взаимодействия с возбуждаемыми волнами. Непосредственные измерения в источниках аврорального километрового радиоизлучения Земли и Сатурна показали, что данное излучение должно генерироваться распределениями электронов типа «кольца» или «подковы»; кинетическое моделирование электронно-циклотронной мазерной неустойчивости таких распределений пока не проводилось.

В разделе 6.1 рассматривается совместная эволюция электромагнитных волн и распределения электронов типа «подковы» в сильноразреженной плазме в так называемом приближении сильной диффузии, когда пространственное движение волн и частиц не учитывается. Численное моделирование с помощью специально разработанного двумерного релятивистского квазилинейного компьютерного кода показало, что а) указанное распределение ге-

нерирует главным образом необыкновенные волны с частотой немного ниже электронной циклотронной частоты; б) излучение направлено практически перпендикулярно магнитному полю, даже для сильноанизотропных распределений; в) интенсивность обыкновенной моды, а также излучения на более высоких циклотронных гармониках пренебрежимо мала; г) эффективность мазерного механизма генерации излучения, т.е., коэффициент трансформации энергии электронов в излучение может превышать 10%, что заметно выше, чем для распределения с конусом потерь. Вместе с тем, полная релаксация неустойчивого распределения электронов происходит очень быстро — для магнитосфер ультрахолодных карликов длительность этого процесса не превышает 0.1 мс, что значительно меньше типичной длительности наблюдаемых радиовсплесков. Поэтому более реалистичные модели должны учитывать процессы ускорения частиц, поддерживающие существование неустойчивых распределений в течение длительного времени, а также выход излучения из своего источника.

Подобная численная модель рассматривается в разделе 6.2. Пространственное движение электромагнитных волн (которое приводит к их выходу из источника) учитывается неявно, путем включения в модель конечного времени усиления. Пространственное движение электронов также учитывается неявно, путем включения в кинетическое уравнение слагаемых, описывающих инжекцию ускоренных частиц и их выход из области генерации излучения. Как показало моделирование, в условиях, типичных для источников аврорального километрового радиоизлучения Земли и Сатурна, основным фактором, влияющим на распределение электронов, является их выход из области генерации излучения. В результате распределение электронов оказывается слабoreлаксировавшим и достаточно близким к «подковообразному» распределению инжектируемых электронов. Коэффициент трансформации потока энергии частиц в излучение, как правило, не превышает нескольких процентов, но этого достаточно для того, чтобы обеспечить наблюдаемую интенсивность излучения. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами непосредственных спутниковых измерений. С другой стороны, в магнитосферах ультрахолодных карликов следует ожидать более высокой эффективности трансформации потока энергии частиц в излучение ( $\sim 10\%$ ); рассеяние частиц на генерируемых волнах оказывается настолько

сильным, что распределения электронов должны выглядеть как почти изотропные максвелловские или каппа-распределения. Ускоренные электроны с относительно низкой концентрацией ( $\omega_p/\omega_B \sim 10^{-3}$ ) и энергией порядка  $\sim 10$  кэВ способны обеспечить наблюдаемую интенсивность излучения ультракоротких карликов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

# Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторской диссертации

1. Кузнецов А.А. О сверхтонкой структуре солнечных микроволновых всплесков // Письма в Астрон. Журн. — 2007. — Т. 33. — С. 363–370.

Публикации в журналах, входящих в базы данных международных систем цитирования

1. Altyntsev A.T., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Rudenko G.V., Yan Y. On the origin of microwave zebra pattern // *Astron. & Astrophys.* — 2005. — Vol. 431. — P. 1037–1046.

2. Kuznetsov A.A. Generation of microwave bursts with zebra pattern by nonlinear interaction of Bernstein modes // *Astron. & Astrophys.* — 2005. — Vol. 438. — P. 341–348.

3. Altyntsev A.T., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Yan Y. Observations of “zebra” pattern in cm-range with spatial resolution // *Adv. Space Res.* — 2005. — Vol. 35. — P. 1789–1794.

4. Kuznetsov A.A. Generation of intermediate drift bursts by magnetohydrodynamic waves in the solar corona // *Solar Phys.* — 2006. — Vol. 237. — P. 153–171.

5. Kuznetsov A.A., Tsap Y.T. Loss-cone instability and formation of zebra patterns in type IV solar radio bursts // *Solar Phys.* — 2007. — Vol. 241. — P. 127–143.

6. Kuznetsov A.A., Tsap Y.T. Double plasma resonance and fine spectral structure of solar radio bursts // *Adv. Space Res.* — 2007. — Vol. 39. — P. 1432–1438.

7. Kuznetsov A.A. On the superfine structure of solar microwave bursts // *Astron. Lett.* — 2007. — Vol. 33. — P. 319–326.

8. Kuznetsov A.A. Superfine temporal structure of the microwave burst on 21 april 2002: What can we learn about the emission mechanism? // *Solar Phys.* — 2008. — Vol. 253. — P. 103–116.

9. Zharkova V.V., Kuznetsov A.A., Siversky T.V. Diagnostics of energetic electrons with anisotropic distributions in solar flares. I. Hard X-rays bremsstrahlung emission // *Astron. & Astrophys.* — 2010. — Vol. 512. — P. A8.
10. Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 721. — P. 1127–1141.
11. Kuznetsov A.A., Zharkova V.V. Manifestations of energetic electrons with anisotropic distributions in solar flares. II. Gyrosynchrotron microwave emission // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 722. — P. 1577–1588.
12. Kuznetsov A.A. Kinetic simulation of the electron-cyclotron maser instability: Relaxation of electron horseshoe distributions // *Astron. & Astrophys.* — 2011. — Vol. 526. — P. A161. — arXiv: 1011.4854.
13. Zharkova V.V., Meshalkina N.S., Kashapova L.K., Kuznetsov A.A., Altyntsev A.T. Diagnostics of electron beam properties from the simultaneous hard X-ray and microwave emission in the 2001 March 10 flare // *Astron. & Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. A17. — arXiv: 1105.3508.
14. Kuznetsov A.A., Nita G.M., Fleishman G.D. Three-dimensional simulations of gyrosynchrotron emission from mildly anisotropic nonuniform electron distributions in symmetric magnetic loops // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 742. — P. 87. — arXiv: 1108.5150.
15. Zharkova V.V., Meshalkina N.S., Kashapova L.K., Altyntsev A.T., Kuznetsov A.A. Effect of a self-induced electric field on the electron beam kinetics and resulting hard X-ray and microwave emissions in flares // *Geomagnetism and Aeronomy / Geomagnetizm i Aeronomiia.* — 2011. — Vol. 51. — P. 1029–1040.
16. Kuznetsov A.A., Vlasov V.G. Kinetic simulation of the electron-cyclotron maser instability: Effect of a finite source size // *Astron. & Astrophys.* — 2012. — Vol. 539. — P. A141. — arXiv: 1202.0926.
17. Kuznetsov A.A., Doyle J.G., Yu S., Hallinan G., Antonova A., Golden A. Comparative analysis of two formation scenarios of bursty radio emission from ultracool dwarfs // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 746. — P. 99. — arXiv: 1111.7019.
18. Antonova A., Hallinan G., Doyle J.G., Yu S., Kuznetsov A., Metodieva Y., Golden A., Cruz K. L. Volume-limited radio survey of ultracool dwarfs //

Astron. & Astrophys. — 2013. — Vol. 549. — P. A131. — arXiv: 1212.3464.

19. Kuznetsov A.A., Vlasov V.G. Formation of zebra pattern in low-frequency Jovian radio emission // Planetary & Space Sci. — 2013. — Vol. 75. — P. 167–172. — arXiv: 1209.2923.

#### Прочие публикации

1. Altyntsev A.T., Kardapolova N.N., Kuznetsov A.A., Lesovoi S.V., Meshalkina N.S., Sych R.A., Yan Y. Observations of microwave bursts with different types of fine structure using data with high spatial and spectral resolution // Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity / Ed. by A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev. — Vol. 223 of IAU Symposium. — Saint-Petersburg, Russia, 2004. — P. 437–438.

2. Алтынцев А.Т., Кузнецов А.А., Мешалкина Н.С., Ян У. Наблюдения зебра-структуры в микроволновом диапазоне // Труды VII Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. — Иркутск, 2004. — С. 173–175.

3. Кузнецов А.А. Тонкие спектральные структуры в дециметровых солнечных радиовсплесках // Труды Всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности». — Нижний Архыз, 2007. — С. 422–434.

4. Kuznetsov A.A., Fleishman G.D. Optimized gyrosynchrotron algorithms and fast codes // IAU Symposium / Ed. by A. Bonanno, E. de Gouveia Dal Pino, A.G. Kosovichev. — Vol. 274 of IAU Symposium. — Giardini Naxos, Italy, 2011. — P. 314–316. — arXiv: 1011.3156.

5. Жаркова В.В., Мешалкина Н.С., Кашапова Л.К., Алтынцев А.Т., Кузнецов А.А. Влияние самоиндуцированного электрического поля на кинетику электронного пучка и вызванные им во вспышках жесткое рентгеновское и микроволновое излучения // Солнечно-земная физика. — 2011. — Вып. 17. — С. 16–26.

6. Antonova A., Hallinan G., Doyle J.G., Yu S., Kuznetsov A., Metodieva Y., Golden A., Cruz K. L. Radio survey of ultracool dwarfs (Antonova+, 2013) // VizieR Online Data Catalog. — 2013. — Vol. 354. — P. 99131.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ №148 от 29 января 2014 г.

Объем 24 с.

Тираж 180 экз.