

Отзыв

официального оппонента на диссертацию А.А. Кузнецова
«Радиоастрономическая диагностика активных процессов на Солнце, звездах и планетах», представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.03.03 – физика Солнца

Диссертационная работа А.А. Кузнецова «Радиоастрономическая диагностика активных процессов на Солнце, звездах и планетах» посвящена теоретическому исследованию механизмов генерации радиоизлучения в плазме и использованию полученных теоретических моделей для диагностики параметров радиоисточников. Хотя рассматриваемые механизмы являются универсальными, основной акцент сделан на моделировании и интерпретации солнечного радиоизлучения (рассматриваются также планетные магнитосферы и коричневые карлики).

Диссертация ставит глобальные вопросы, связанные с общим пониманием природы и взаимосвязей как всей многообразной совокупности структур наблюдаемых на Солнце, так и детальным исследованием отдельной активной области. Сложность состоит в существовании структур сильно различающихся по интенсивности излучения от слабых флоккульных образований, волокон, корональных дыр, ярких точек и др., до ярких взрывных процессов и корональных выбросов масс КВМ, механизмы генерации которых значительно различаются.

Особое место в исследовании физики солнечной атмосферы для многих структур отводится радиоастрономическому методу исследований ввиду высокой чувствительности механизмов радиоизлучения к наличию магнитного поля, тогда как, например, EUV излучение зависит, главным образом, от температуры и меры эмиссии.

Автором создана компьютерная программа, которая содержит как точные формулы, так и новый непрерывный алгоритм, получившая название «гибридный код». Замечательным свойством программы является возможность вычислять параметры излучения на всех частотах с помощью точных формул. При этом могут использоваться как классические расчетные формулы, так и их приближения. Это значительно ускоряет время для расчетов, что иногда бывает весьма существенным. Автор показывает, что усилия по созданию расчетного инструмента могут быть использованы для эффективного анализа наблюдательных данных, что является важным откликом теории для решения существующих актуальных проблем физики Солнца: (i) физики взрывных процессов, (ii) физики нагрева солнечной короны, (iii) генерации солнечного ветра и др.

Например, автор на основе численного моделирования показывает в диссертации, что одним из основных факторов, влияющим на радиоизлучение, является сходящееся магнитное поле, которое совместно с самоиндуцированным электрическим полем приводит к многократному

усилению интенсивности излучения. Эти важные находки в диссертации нуждаются либо в прямом наблюдательном подтверждении, либо безусловным следствиям, которые могли быть подтверждены экспериментально и статистически.

Одна из основных задач теории является предсказание направлений развития современных технологий. В этом смысле важен анализ необходимых требований для наблюдательного процесса. Какие из требований по временному, пространственному, частотному разрешению и чувствительности к мелким (обсуждаемым) деталям (такие как уровень анизотропии в петле, структуры какого масштаба, которые принципиальные для развития диагностики вспышечного процесса, следует искать и др.).

Актуальность данной темы сегодня возрастает, поскольку в мире в настоящее время активно входят в строй новые солнечные радиотелескопы, модернизируются существующие инструменты. Это объясняется тем, что радиоизлучение является мощным (а иногда единственным) средством исследования энергичных процессов.

Реальные наблюдения значительно отличаются от модельных представлений. Но, как и технические ограничения существующих инструментов, так и сложность процессов в плазме затрудняют интерпретацию наблюдений, зачастую делая ее неоднозначной.

Цель работы А.А. Кузнецова заключается в разработке теоретических методов и численных программ, которые служили бы инструментом для точной и надежной интерпретации наблюдений.

В диссертации показано, что в этом направлении достигнут значительный прогресс. Получены новые научные результаты, которые были сформулированы в виде шести положений, выносимых на защиту:

I. Создана система программ, охватывающая расчеты для широкого круга механизмов с включением тормозного (free-free) излучения, циклотронного излучения на низких гармониках гирочастоты, гиросинхротронного излучения для гармоник в интервале 100 кэВ-10 МэВ, и синхротронного излучения для высокоускоренных электронов. Данный результат является одним из основных в диссертации. Новые алгоритмы и программы, действительно, обладают высокой практической ценностью. Они представляют собой основу для создания новых средств для трехмерного моделирования солнечного радиоизлучения. Возможность выбора оптимальных алгоритмов является важной особенностью созданной системы. Важно также и то, что программы доступны по ИНТЕРНЕТУ. Следует отметить, что разработанные программные средства позволят эффективно применять моделирование при работе с данными будущих многоволновых радиогелиографов. В этой же главе автор проводит сопоставление эффективности созданного ПО с реальными наблюдениями на примере солнечной вспышки 31 декабря 2007г. и приводит реализацию моделирования для эффекта линейного взаимодействия мод.

Замечания.

1. При чтении этой главы не покидает ощущение, что основная задача автора, это сокращение времени счета, и в этом он соперничает с ростом технического прогресса и старается сократить время счета, поскольку точные формулы являются медленными.
2. Следует отметить, что принципиальных оценок параметров инструментов для решения существующих, и постановке будущих задач не приведено. Например, для получения информации о вспышечной активности АО на всех фазах важно изучать, кроме стадии вспышечного энерговыделения, также подготовительную и пост-вспышечную фазы, и проводить оценки величин магнитного поля для всех структур активной области, для чего нужна информация о пространственных и поляризационных характеристиках объекта. Т.е. какой динамический диапазон нужен и какие временные и частотные свойства являются определяющими? Такие оценки отсутствуют даже для строящихся радиогелиографов. Правомерен здесь также глобальный вопрос: к каким предельным параметрам нужно стремиться для решения проблемы энерговыделения вспышек, прогнозирования, эффектов КВМ и др.? И на какой уровень познания можно выйти с помощью инструментов нового поколения?
3. На стр. 49 параграф 1.2.1. излагается хорошо известная теория линейного взаимодействия мод при квазиперечном распространении радиоизлучения без приведения важных ссылок!! Хотя хорошо известны вклады таких ученых как С. Alissandrakis, М. Kundu, В.В. Железнякова, Е.Я. Злотник, Б.И. Рябова, Н.Г. Петеровой, Г.Б. Гельфрейха и др.

Проведенные численные эксперименты (сравнение с точным решением уравнения переноса параметров Стокса) подтверждают, что в типичных для солнечной короны условиях модель линейного взаимодействия мод воспроизводит интенсивность и круговую поляризацию радиоизлучения с "исключительно высокой точностью", но не указано с какой именно численно.

II. В главе 2 приведены примеры применения созданных программных средств к различным физическим задачам, в которых используется гиротронное излучение. Ясно, что для проведения эффективного моделирования важно чтобы в модели были отражены реальные физические условия, т.е. магнитное поле, концентрации тепловых и нетепловых электронов, их температуры и др., которые могут быть получены из наблюдений в различных спектральных диапазонах. Автору удалось показать (с помощью программы GS Simulator), 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 вспышечной петли. Получены оценки параметров ускоренных электронов в некоторых событиях и

обсуждено влияние пространственной неоднородности. Для пространственно неразрешенных спектров, показано, что они сложным образом зависят от различных параметров петли, включая питч-угловую анизотропию и пространственное распределение ускоренных электронов. В частности, 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. Сравнение спектральных индексов, полученных в результате трехмерного моделирования, с ультрарелятивистским приближением и приближением Далка-Марша показывает, что ни одно из этих приближений не может достаточно точно воспроизвести спектральные индексы излучения корональных магнитных петель.

Автор предложил другой подход к построению моделей источников излучения, который заключается в детальном исследовании процессов ускорения и распространения частиц в солнечных вспышках, с корректным учетом функции распределения ускоренных электронов. Было исследовано влияние различных факторов в уравнении Фоккера-Планка на микроволновое излучение электронных пучков в солнечных вспышках.

Можно ожидать, что дальнейшее развитие средств моделирования и объединение указанных подходов позволит создать более совершенные модели солнечных вспышечных областей, включающие трехмерную структуру магнитного поля и плазмы и реалистичные (также зависящие от всех пространственных координат) функции распределения ускоренных электронов.

Важно также, что появляется возможность экспериментальной верификации подобных теоретических моделей путем сравнения их предсказаний с будущими наблюдениями на радиогелиографах нового поколения, в том числе на базе ССРТ.

Замечания.

1. Вместе с тем, это исследование было подтверждено лишь одним событием, и не ясно, насколько надежным является применяемый метод, т.е., может ли он быть распространен на другие события – «простая структура активной области», о которой говорится в работе, является относительным понятием. Кроме того, в ходе моделирования не было обнаружено заметного влияния анизотропии ускоренных электронов, что противоречит результатам предыдущего раздела, вынесенным на защиту («даже умеренная анизотропия ускоренных электронов в солнечных вспышках существенно влияет на гиротронное микроволновое излучение»). Возможно, что вспышка 21 мая 2004 г. являлась нетипичным событием, но в этом случае формулировка защищаемых положений требует уточнения.
2. В разделе 2.3 следовало бы более подробно обосновать применимость используемой модели распространения электронов. Насколько адекватны

принятые начальные и граничные условия? Существуют ли другие работы, в которых проводилось численное решение уравнения Фоккера-Планка для электронов в солнечных вспышках? Хотя представленные расчеты радиоизлучения для модельных функций распределения электронов представляются корректными, применимость полученных результатов к реальным солнечным вспышкам требует дальнейшего обоснования.

3. Несмотря на указания в диссертации о важности измерения магнитных полей для вспышечных процессов, тем не менее, в ней уделено недостаточное внимание поляризационным наблюдениям. Не упомянуты работы по двукратным и многократным инверсиям знака круговой поляризации по частотному спектру по данным РАТАН-600 для вспышечных областей. Для будущих исследований с помощью многочастотных радиогелиографов эти эффекты могут оказаться весьма важными.

III. В главе 3 рассмотрены так называемые зебра-структуры в радиоизлучении Солнца и планет. Дан подробный обзор механизмов, объясняющие такую структуру, среди которых: а) Нелинейные процессы с участием мод Бернштейна, б) Двойной плазменный резонанс, в) Процессы нелинейной самоорганизации с участием вистлеров, г) Эффекты распространения (интерференция), д) Процессы с участием собственных (захваченных) плазменных волн. Автором рассмотрены наблюдения зебра-структуры по данным ССРТ и китайского спектрополяриметра в Хуайроу. Показано, что динамические спектры, наблюдавшиеся 21 апреля 2002 г и 5 января 2003г, хорошо объясняются моделью двойного плазменного резонанса.

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. С другой стороны, обратная задача – восстановление параметров источника излучения по наблюдаемым спектрам – пока не имеет однозначного решения. Представляет интерес подробное исследование сверхтонкой временной структуры полос зебры и ее основной вывод о том, что эта структура вызвана модуляцией излучения МГД-колебаниями – представляется обоснованным.

Замечания.

1. Поскольку заявленной целью диссертации является разработка методов диагностики, хотелось бы здесь увидеть примерную оценку точности диагностики параметров солнечной короны по зебра-структурам, а также задачи (как для теоретиков, так и для экспериментаторов), которые необходимо решить для ее повышения.

2. Однако, как и в предыдущем пункте, отмечу, что исследование было ограничено только одним событием (21 апреля 2002 г.). Поскольку, как сказано в диссертации, сверхтонкая временная структура наблюдается достаточно

часто, возникают вопросы: насколько различаются ее параметры в различных событиях? Есть ли зависимость от характеристик используемого инструмента?

3. Общим недостатком данной диссертации, что свойственно и другим диссертациям теоретического плана, это небольшое количество наблюдательных примеров, что в случае Солнца резко понижает уверенность в корректности каждой модели. Поэтому вывод о безусловности конкретной модели на данном этапе является несколько преждевременным и нуждается в наблюдениях на радиогелиографах нового поколения.

IV. В главе 4 рассмотрены тонкие структуры, наблюдающиеся в динамических спектрах солнечных радиовсплесков IV типа, так называемые всплески с промежуточной скоростью дрейфа. Эти всплески наблюдаются на спектрополяриметре станции Хуайроу (Китай) в частотном диапазоне 1.1–2.06 ГГц; с временным и спектральным разрешением 5 мс и 4 МГц, соответственно и со скоростью частотного дрейфа около 80 МГц с^{-1} .

Автором предложена и разработана новая модель формирования всплесков с промежуточной скоростью частотного дрейфа. Новая модель основана на учете влияния неоднородности плотности плазмы и адекватно описывает наблюдаемые характеристики указанных всплесков и потенциально может быть использована для диагностики МГД-волн в солнечной короне.

Замечание.

Необходимо также отметить, что представленный в данной главе механизм модуляции излучения МГД-волнами никак не используется в предыдущей главе (при рассмотрении сверхтонкой структуры); очевидно, что единое рассмотрение всех феноменов, связанных с МГД-волнами, было бы более полезно.

V. В главе 5 рассмотрено радиоизлучение ультрахолодных карликовых звезд. Радиоизлучение коричневых карликов и маломассивных звезд является новым объектом исследований в радиоастрономии. В начале пятой главы диссертации приведено краткое введение в данную тему. В качестве механизма генерации излучения рассматривается мазерная циклотронная неустойчивость, что представляется оправданным; тем не менее, желательно было бы проанализировать и другие возможные механизмы – хотя бы для того, чтобы продемонстрировать их неприменимость в данном случае. Основным выводом данной главы является сильно асимметричный (по отношению к оси вращения) характер магнитного поля коричневых карликов; при этом поле оказывается достаточно стабильно во времени. Данный результат представляет интерес для теории звездных магнитных полей.

Замечание.

При этом нельзя исключать, что, помимо общепринятых в физике Солнца механизмов (мазерного, плазменного и т.д.), на коричневых карликах могут работать и какие-то другие механизмы генерации радиоизлучения.

VI. В главе 6 проведено численное моделирование мазерной циклотронной неустойчивости в сильноразреженной плазме в присутствии неустойчивого распределения ускоренных электронов типа «подковы». Для описания процесса генерации излучения в источнике конечного размера была предложена упрощенная модель, в которой выход волн из источника учитывается с помощью конечного времени усиления, а пространственное движение электронов — с помощью дополнительных факторов, описывающих инжекцию ускоренных частиц и их выход из источника излучения.

В диссертации представлены новые результаты, которые учитывают ранее не рассматривавшиеся факторы.

Замечание.

Отмечу, что полученные результаты никак не используются и даже не обсуждаются в контексте солнечного радиоизлучения, что не вполне понятно.

Общие замечания по тексту диссертации.

1. Текст диссертации изложен грамотно с минимумом грамматических ошибок, однако все же существуют странные высказывания. Так, например, на стр.7 встречаются выражения очень большой антенный массив вместо общепринятого- VLA (сверхбольшая антенная решетка), или низкочастотный антенный массив LOFAR (низкочастотная антенная решетка), или SKA переведено как антенный массив километровой площади. Это несколько омрачает хорошо написанный текст переводом английского слова array словом массив, вместо общепринятого в радиоастрономии понятия антенная решетка.

2. В целом, следует отметить, что диссертация объединена общей идеологией, хотя широкий круг рассматриваемых вопросов (теория, численное моделирование, обработка наблюдений, Солнце, звезды, планеты) несколько затрудняет понимание диссертации. Кроме того, в диссертации отсутствуют рекомендации для экспериментаторов, которые, на мой взгляд, являлись бы естественным (и практически значимым) продолжением проведенной работы. В частности, хотелось бы получить ответы на вопросы: какое пространственное и спектральное разрешение инструментов необходимо для диагностики ускоренных электронов в солнечных вспышках с заданной точностью? Какие наблюдения необходимы для надежного измерения магнитного поля по спектрам всплесков с зебра-структурой?

3. Несмотря на указания в диссертации важности измерения магнитных полей для вспышечных процессов, тем не менее, в ней уделено мало внимания поляризационным наблюдениям. Не упомянуты работы по двукратным и многократным инверсиям знака круговой поляризации по частотному спектру во вспышечно-продуктивных активных областях по данным РАТАН-600. Для будущих исследований с помощью многочастотных радиогелиографов эти эффекты могут оказаться весьма важными.

4. Мало внимания уделено наблюдениям быстрых процессов, собственно составляющие основу вспышек.
5. Отсутствует рассмотрение спектрально-поляризационных характеристик гиротронного излучения с подробной временной шкалой на всех стадиях вспышечного процесса.

Диссертация логично скомпонована, однако включение в нее диагностики процессов звезд и планет выглядит искусственным, хотя и отражает широкие пристрастия автора

Несмотря на сделанные замечания, считаю, что диссертационная работа А.А. Кузнецова выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты являются важным научным достижением. Основные результаты достаточно обоснованы, личный вклад автора является определяющим. Исследования, которые легли в основу диссертации, хорошо известны научной общественности. Они были опубликованы в ведущих научных изданиях и неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Таким образом, диссертация А.А. Кузнецова соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
директор Санкт-Петербургского филиала
Специальной астрофизической обсерватории РАН,

В.М. Богод 30 мая 2014г.

Санкт-Петербургский филиал
Специальной астрофизической обсерватории РАН,
196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, к.2,
раб. тел.: (812)-3637138
e-mail: vbog@sao.ru; vbog_spb@mail.ru

Подпись В.М. Богода заверяю *Маш*
Ученый секретарь СПб Ф САО РАН к.ф.м.н. А.В.Темирова
30 мая 2014г.