

## 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

Прогресс в исследовании солнечной и звездной активности в значительной степени обусловлен развитием наших знаний о параметрах и процессах, протекающих в атмосферах Солнца и звезд. Основными структурными элементами атмосфер этих астрофизических объектов являются корональные арки, представляющие собой магнитные плазменные трубки. Динамика этих образований и процессы в них являются определяющими для понимания многих явлений солнечной и звездной активности. При этом радиоастрономические наблюдения являются одним из важнейших средств исследования солнечных и звездных вспышек, а также различных процессов в магнитосферах планет. Несмотря на все возрастающий объем наблюдательных данных, а также многочисленные теоретические работы, природа некоторых разновидностей солнечных радиовсплесков пока остается неопределенной. Даже в тех случаях, когда механизм излучения установлен, количественная интерпретация наблюдений представляет собой сложную задачу, которую не всегда удается однозначно решить. Поэтому богатый диагностический потенциал наблюдений в радиодиапазоне пока раскрыт далеко не в полной мере.

Диссертация А.А. Кузнецова «Радиоастрономическая диагностика активных процессов на Солнце, звездах и планетах» является актуальной работой, посвященной дальнейшему исследованию механизмов генерации радиоизлучения в космической плазме. Используются как аналитические методы, так и численное моделирование и анализ наблюдений. В результате были разработаны новые теоретические модели источников определенных компонент радиоизлучения Солнца, планет и ультрахолодных карликов; разработаны компьютерные программы для моделирования радиоизлучения этих астрофизических объектов.

Мне нет необходимости останавливаться подробно на содержании отдельных разделов диссертации – это хорошо сделано в самой диссертации и автореферате. Исчерпывающее представление о научной деятельности А.А.Кузнецова и его вкладе в исследования механизмов генерации радиоизлучения в космической плазме можно получить, обратившись к опубликованным статьям диссертанта. Отмечу лишь те результаты, которые, на мой взгляд, являются наиболее важными и интересными.

Во-первых, разработаны новые алгоритмы и компьютерные программы для вычисления параметров гиротронного излучения как для однородного источника, так и с автоматическим решением уравнения переноса излучения в неоднородной среде. Продемонстрирована высокая скорость вычислений, а также высокая точность данных алгоритмов. Все разработанные программные продукты свободно доступны через Интернет. Полученные результаты являются существенным шагом вперед в моделировании солнечного радиоизлучения; они являются в значительной мере основой для исследований, изложенных в данной диссертации.

Во-вторых, выполнено численное моделирование микроволнового радиоизлучения солнечных вспышек. Проведено детальное параметрическое исследование радиоизлучения дипольных магнитных петель. С помощью более совершенной программы GX Simulator проведено моделирование в применении к реальному событию, с использованием экстраполированного магнитного поля. Проведены также расчеты для различных сложных распределений электронов, которые могут формироваться на разных высотах в солнечных вспышках. Хотя полученные результаты имеют научную ценность сами по себе, следует

отметить, что проведенные исследования являются последовательностью шагов на пути к построению более совершенных моделей солнечных вспышек.

В-третьих, исследованы солнечные радиовсплески с зebra-структурой в динамическом спектре. Сделан вывод о том, что основным механизмом формирования зebra-структуры является двойной плазменный резонанс, а источником излучения – электронные пучки с конусом потерь. Данная модель использована для оценки напряженности магнитного поля в одной из солнечных вспышек с особенно выраженной зebra-структурой. Также проведено детальное численное моделирование нелинейного слияния мод Бернштейна, хотя в итоге сделан вывод, что данный процесс реализуется в солнечной короне исключительно редко и не имеет отношения к большинству наблюдаемых зebra-структур. Приведены интересные наблюдения зebra-структуры в радиоизлучении Юпитера; показано, что наблюдаемый спектр не противоречит модели двойного плазменного резонанса.

В-четвертых, представлена новая интерпретация солнечных «волокон» – узкополосных радиовсплесков с промежуточной скоростью дрейфа. Предполагается, что подобные всплески возникают в результате модуляции излучения бегущими МГД-колебаниями узких магнитных трубок. Показано, что данная модель позволяет устранить некоторые трудности, возникающие в других моделях «волокон». Полученные результаты представляются во многом предварительными; тем не менее, предложенный автором диссертации подход открывает новые возможности для исследования МГД-волн в солнечной короне по радиовсплескам с тонкой спектральной структурой.

В-пятых, исследовано радиоизлучение ультрахолодных карликов – класса объектов, лежащих на границе между звездами и коричневыми карликами. Их радиоизлучение, по всей видимости, аналогично по своей природе радиоизлучению планет, но имеет более высокую частоту в связи с более сильным магнитным полем. В диссертации представлены результаты численного моделирования динамических спектров радиоизлучения с использованием простой геометрической модели. Необходимо отметить, что наблюдательные данные по ультрахолодным карликам пока ограничены – в диссертации подробно рассматривается только один такой объект. Тем не менее, представленные результаты достаточно убедительно указывают на то, что наблюдаемые радиовсплески обусловлены вращательной модуляцией в асимметричной магнитосфере. Важным результатом представляется также вывод о ключевой роли быстрого вращения в генерации радиоизлучения ультрахолодных карликов.

В-шестых, выполнено численное моделирование мазерной циклотронной неустойчивости в сильно разреженной плазме. Модель во многом аналогична той, что была использована в известных работах Ашвандена. Отличие заключается в том, что, во-первых, исследована релаксация распределения электронов типа «подковы». Во-вторых, в разделе 6.2 исследованы стационарные состояния в модели с постоянной инжекцией частиц и поперечным выходом излучения из источника. Полученные результаты для замкнутой модели качественно согласуются с результатами Ашвандена. С другой стороны, показано, что выход излучения из источника может существенно снизить эффективность мазерного механизма; получено хорошее согласие модели с результатами непосредственных спутниковых измерений. Полученные результаты представляют ценность для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований радиоизлучения в магнитосферах планет и ультрахолодных карликов.

Перейдем к замечаниям:

- в диссертации сказано, что быстрые гиросинхротронные коды можно использовать для различных астрофизических объектов, включая активные звезды, планетные магнитосферы и т.д. Однако в действительности применимость этих кодов демонстрируется только для типичных солнечных параметров. Насколько хорошо работают новые коды для электронов с очень высокой (сотни МэВ и выше) или низкой (несколько кэВ) энергией?
- численное моделирование гиросинхротронного излучения в главе 2 проведено применительно к низким петлям ( $\sim 10^9$  см) т.е. для микроволнового диапазона частот. Вместе с тем, в мощных вспышках континуальные вслески IV типа простираются и в более низкочастотный диапазон, т.е. магнитные петли более протяженные и неоднородностью фоновой плазмы пренебрегать нельзя. Кроме того, при моделировании (как и при рассмотрении МГД колебаний) топология магнитного поля принималась достаточно простой, в частности, было бы очень интересно учесть скрученность магнитных силовых линий
- вывод о концентрации электронов в вершине петли во вспышке 21 мая 2004 г. (раздел 2.2) является отдельным важным результатом и заслуживает более подробного обсуждения.
- энергия электронов в расчетах в разделе 2.3 ограничена 1.2 МэВ. Чем обусловлено это ограничение? На мой взгляд, учет электронов с более высокой энергией должен существенно повлиять на результаты моделирования.
- в разделе 2.1.2.3 при анализе пространственно неразрешенных спектров (т.е. интегрального излучения от всего источника следует иметь в виду, что при определенных условиях плоская часть спектра на высоких частотах может быть связана с тормозным излучением при заполнении магнитной петли плотной горячей плазмой за счет испарения.
- масштабы неоднородности плазмы и магнитного поля в разделе 3.1 были выбраны произвольно – так чтобы объяснить наблюдаемый спектр зебра-структуры с помощью модели двойного плазменного резонанса. В то же время, эти значения ничем не обоснованы; они не согласуются, например, с эмпирической моделью Далка и МакЛина (1978) для магнитного поля в активных областях. Данное противоречие (которое, очевидно, ставит под сомнение применимость модели двойного плазменного резонанса) известно достаточно давно, однако в диссертации оно не обсуждается.
- в разделе 3.3 сверхтонкая временная структура полос «зебра» структуры связывается с модуляцией плазменного механизма излучения на уровнях двойного плазменного резонанса распространяющимися МГД волнами. Вместе с тем, иногда такая сверхтонкая структура излучения наблюдается в отсутствие «зебра» структуры, и может быть обусловлена особенностями механизма генерации фонового излучения.
- как известно, периодические спектральные структуры неоднократно наблюдались в радиоизлучении Земли. В то же время, в разделе 3.4, посвященном зебра-структуре на Юпитере, в качестве механизма ее формирования рассматривается только двойной плазменный резонанс (на основании видимого сходства с солнечными зебра-структурами). По моему мнению, в данном случае следовало бы рассмотреть, в первую очередь, аналогию с радиовсплесками в земной ионосфере и возможное сходство / различие механизмов их формирования.
- применимость новой модели узкополосных радиовсплесков с промежуточной скоростью дрейфа (глава 4) демонстрируется на примере одного события с частотой около 1.6 ГГц. В то же время, «волокна» обычно наблюдаются в метровом диапазоне, и даже на еще более низких частотах. В диссертации не показано, что модель МГД-волн работоспособна для подобных (метровых и т.д.) всплесков и что при этом она является предпочтительной по сравнению с другими подходами к интерпретации.
- в главе 5 при исследовании радиоизлучения ультрахолодных карликов детально рассматривался только один объект – «наиболее изученный из радиоизлучающих ультрахолодных карликов TVLM 513». Тем не менее, из текста диссертации неясно, насколько типичным / нетипичным является этот объект.



- в главе 6 диссертации используется кинетическое описание процесса. В то же время, известно много работ, в которых моделирование мазерной неустойчивости проводилось методом частиц в ячейках (в том числе и с использованием подковообразного распределения электронов); эти работы в диссертации не упоминаются. Согласуются ли друг с другом результаты моделирования с использованием кинетического метода и метода частиц в ячейках? В чем преимущества кинетического описания (т.е., почему оно было выбрано)?

Несмотря на сделанные замечания, считаю, что диссертационная работа А.А. Кузнецова заслуживает высокой оценки, и ее можно рассматривать как фундаментальное исследование физических процессов в магнитных структурах в атмосферах Солнца, звезд и планет. Оценивая работу в целом, следует отметить ее высокий теоретический уровень, а также актуальность и перспективность проведенных исследований. Совокупность научных результатов, представленных в диссертации, можно квалифицировать как важное научное достижение. Данные результаты были опубликованы в ведущих мировых журналах и докладывались на различных научных конференциях, что подтверждает их обоснованность и научную ценность. 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,  
зам. директора ИЗМИРАН,  
В.В. Фомичев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН,  
142190, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4  
раб. тел.: 8(495)8510123  
e-mail: fomichev@izmiran.ru

