

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию **КУЗНЕЦОВА Алексея Алексеевича**
**«Радиоастрономическая диагностика активных процессов
на Солнце, звездах и планетах»**
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.03.03 – Физика Солнца

Диссертация А.А.Кузнецова посвящена разработке новых средств анализа и интерпретации наблюдений радиоизлучения из космической плазмы. Известно, что данные радионаблюдений содержат богатую информацию о физических условиях в источниках излучения, но для извлечения этой информации, кроме высококачественных наблюдений с высокой чувствительностью, высоким пространственным и временным разрешением, необходимо иметь достаточно хорошо развитую теорию генерации различных компонент радиоизлучения в плазме. Именно такая цель – создание новых и уточненных моделей источников космического радиоизлучения – поставлена в диссертации. Основное внимание уделяется физике солнечной короны, но есть разделы, посвященные магнитосферам планет и атмосферам ультрахолодных карликов.

Работа состоит из Введения, шести глав и Заключения.

Первые две главы посвящены разработке новых алгоритмов и компьютерных средств для расчета гиротронного излучения (некогерентного излучения умеренно релятивистских электронов в магнитном поле), которые применяются для моделирования микроволнового излучения солнечных вспышек. Общая теория гиротронного механизма разработана достаточно хорошо, однако формулы довольно громоздки, и это вызывает определенные трудности при построении конкретных моделей источников. Разработанные автором диссертации (совместно с Г.Д.Флейшманом) «быстрые синхротронные коды» обеспечивают, с одной стороны, более высокую скорость компьютерных расчетов гиротронного излучения с хорошей точностью, а с другой стороны, имеют достаточно широкие пределы применимости. Такая теория позволяет, во-первых, делать более обоснованные заключения о структуре магнитного поля в корональных источниках и, во-вторых, получать информацию о функциях распределения ускоренных электронов, которые формируются в солнечных вспышках. Таким образом, полученные в этих главах результаты обеспечивают более точную диагностику источников нетеплового микроволнового излучения солнечных вспышек, т.е. определение физических условий и параметров излучающих электронов в солнечной короне.

В третьей главе диссертации исследуется возможность диагностики корональной плазмы по наблюдаемым свойствам зebra-структуры. Механизм двойного плазменного резонанса в неоднородных корональных ловушках с захваченными электронами, который рассматривается автором, используется для интерпретации зebra-структуры в метровом и дециметровом излучении Солнца уже около 40 лет, его применимость многократно доказана, и новое слово здесь может быть сказано только в изучении конкретных событий и уточнении физических условий в источниках излучения. Именно это сделано в диссертации. А.А.Кузнецов в соавторстве с Ю.Т.Цапом представил численные расчеты инкрементов неустойчивости плазменных волн в областях двойного плазменного резонанса для функции распределения горячих электронов типа конуса потерь. Достоинство работы состоит в том, что, в отличие от предшествующего результата Winglee & Dulk, здесь показана возможность появления разрешенных полос повышенного излучения на частотах, близких к циклотронным гармоникам. Кроме того, А.А. Кузнецов представил уникальный всплеск, зарегистрированный в микроволновом диапазоне на

спектрографе Национальной астрономической обсерватории Китая, в котором полосы зебра-структуры строго эквидистантны, а изменения происходят синхронно. Надо отметить, что это единственный случай, в котором синхронность изменений частот зебра-полос строго доказана. Такой спектр не укладывается в рамки модели двойного плазменного резонанса, и автор разумно объясняет его неустойчивостью мод Бернштейна в квази-однородном компактном источнике. Большой интерес представляет также интерпретация зебра-структуры в километровом излучении Юпитера, происхождение которой автор также связывает с эффектом двойного плазменного резонанса в магнитосфере планеты.

В четвертой главе автор диссертации рассматривает возможность диагностики мелкомасштабных МГД-колебаний в солнечной короне по наблюдаемым характеристикам так называемых всплесков с промежуточной скоростью частотного дрейфа или волокон. Здесь убедительно показано, что существующие подходы к интерпретации такого типа всплесков, основанные на излучении пакетов вистлеров или модуляции излучения альфвеновскими солитонами, не объясняют адекватно наблюдаемые свойства волокон, и предложена модель, основанная на модуляции излучения плазменных волн распространяющимися МГД-колебаниями магнитных трубок.

Пятая глава посвящена моделированию радиоизлучения ультрахолодных карликов. Эта область радиоастрономии возникла совсем недавно в связи с обнаружением неожиданно сильного радиоизлучения, совершенно нетипичного для звездных радиоисточников. Автором установлены основные характеристики источников периодических микроволновых всплесков от ультрахолодных карликов, сделаны первые шаги в интерпретации такого излучения, в построении модели источника и диагностике магнитосфер таких объектов.

Последняя шестая глава связана с теорией электронно-циклотронной мазерной неустойчивости, а именно, здесь представлены результаты численного моделирования процессов генерации электромагнитных волн электронами с распределением по скоростям подковообразного типа, а также релаксации неустойчивого распределения электронов из-за взаимодействия с волнами. Мазерная неустойчивость рассматривается, как причина возникновения аврорального километрового излучения Земли и Сатурна, и сделанные автором расчеты (в том числе, учет конечных размеров источника) позволяют сделать выводы об основных характеристиках источников такого излучения.

В целом диссертация А.А.Кузнецова производит очень хорошее впечатление. Важнейшим ее достоинством является комплексный подход, в котором построение теоретических моделей описания плазменных процессов в солнечной короне опирается на широкий спектр наблюдательных данных, охватывающий огромный диапазон по длинам волн (от микроволн до километровых волн) и по объектам излучения (от Солнца до планет и других звезд). Наряду с такой широтой охвата наблюдательных данных, А.А.Кузнецов продемонстрировал эрудицию и широту теоретических взглядов, рассмотрев самые разные стороны механизмов излучения в космической плазме (когерентные и некогерентные механизмы, генерацию плазменных и электромагнитных волн, линейную и нелинейную стадии неустойчивости). Важно отметить еще одну положительную особенность работы А.А.Кузнецова – глубокую продуманность численных расчетов. В отличие от многих современных работ, в которых уравнения бездумно вставляются в некие коды, а затем в статьях приводятся результаты расчета, которые невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть, все численные модели, приведенные в диссертации, подробно обоснованы, а детали полученных кривых подробно обсуждаются с точки зрения физических процессов, ответственных за их появление.

Все результаты диссертации имеют четкое обоснование и ясную физическую интерпретацию. Тщательность проведения теоретических расчетов, сопоставление их результатов с наблюдательными данными (а в ряде случаев их согласованность с результатами других исследователей) позволяют считать основные научные результаты диссертации обоснованными и достоверными. Актуальность работы не вызывает сомнений: она определяется как целями фундаментальной астрофизики (познание физических условий в источниках космического излучения), так и практической значимостью (зависимость жизни на Земле от процессов, происходящих на Солнце и в около-солнечном пространстве). Диссертация написана четким, ясным языком, хорошо оформлена, содержит разумное количество иллюстраций, делающих изложение полученных результатов достаточно наглядным.

Таким образом, диссертация вполне отвечает докторскому критерию целостной работы, в которой приведены пути решения крупной научной проблемы. Все основные результаты диссертации опубликованы в журналах из списка ВАК и доложены на международных конференциях.

Как всякая большая работа, диссертация не лишена недостатков. Я остановлюсь только на замечаниях, связанных с третьей главой, посвященной генерации зебра-структуры.

Как известно, плазменный механизм генерации космического радиоизлучения включает в себя два этапа: неустойчивость плазменных волн, которые легко входят в резонанс с горячими частицами, и трансформацию этих продольных плазменных волн в электромагнитное излучение. Поскольку плазменные волны не могут покинуть источник из-за сильного затухания Ландау в разреженных слоях плазмы, оба эти процесса являются равноправными частями механизма. В связи с этим, выглядит довольно странным то, что в диссертации причиной возникновения зебра-структуры с многочисленными полосами называется неустойчивость плазменных волн на двойном плазменном резонансе, а в качестве механизма микроволновой зебры с ограниченным числом эквидистантных полос указывается нелинейное слияние мод Бернштейна без анализа неустойчивости этих мод. Кроме того, моды Бернштейна, возбужденные в компактном источнике, могут взаимодействовать и с плазменными волнами на частоте верхнего гибридного резонанса, причем интенсивность излучения, возникшего в последнем процессе, может быть существенно выше, чем при нелинейном слиянии мод Бернштейна с разными номерами. Этот вопрос ранее обсуждался в литературе [Изв. Вузов. Радиофизика, 1976 Т.19 С. 481], однако диссертантом проигнорирован.

Следующее замечание связано с нашей давней дискуссией по поводу возможности применимости приближенного дисперсионного уравнения $\omega^2 = \omega_p^2 + 3k_{\perp}^2 v_T^2$ для вычисления инкрементов плазменных волн на частотах, близких к гармоникам электронной гирочастоты. Начиная с работы [Winglee and Dulk, 1986], многие авторы, пользуясь близостью дисперсионных кривых для мод Бернштейна и приведенного выше закона, справедливого на частоте верхнего гибридного резонанса, вычисляли инкременты с помощью этого упрощения (см. Рис 3.1). В результате, Winglee и Dulk сделали вывод о том, что электроны с функцией распределения типа конуса потерь не могут обеспечить излучение с разрешенными зебра-полосами. Кузнецов и Цап, используя то же дисперсионное уравнение, подобрали такие конусные распределения, которые могли генерировать зебра-структуру. Однако в этих работах плазменные инкременты неустойчивости рассчитаны не совсем корректно. В частности, авторы сделали неправильный вывод о том, что гармонические интервалы, примыкающие сверху к гибридной полосе, также могут вносить вклад в инкремент на гибридной частоте. Действительно, если в выражении для инкремента

$$\gamma = \sum_s \frac{\text{Im } \varepsilon_{\parallel}}{|\partial \varepsilon_{\parallel}^{(0)} / \partial \omega|_{\omega=\omega(k_{\perp})}}$$

взять одинаковый знаменатель, то вклад соседних гармоник

может быть заметным, однако знаменатель должен быть взят при том k_{\perp} , для которого максимален числитель $\text{Im} \varepsilon_{\parallel}$ при заданном k_{\perp} . Если двойной плазменный резонанс имеет место на частоте, близкой к ω_B , то есть для вычисления $\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega(k_{\perp})}$ можно

воспользоваться приближенным выражением, то для соседней гармоники при том же k_{\perp} надо взять меньшие значения k_{\perp} , где дисперсионная кривая в соседней гармонике примыкает к значению $(s+1)\omega_B$, а не совпадает с кривой $\omega^2 = \omega_p^2 + 3k_{\perp}^2 v_T^2$. Здесь значение знаменателя существенно возрастает, а инкремент падает. Надо заметить, что эти аргументы против использования приближенного значения были высказаны в печати [Изв. Вузов. Радиофизика, 2009 Т.52 С.95] после опубликования статьи Кузнецова и Цапа, и странно, что при написании диссертации А.А.Кузнецов этого не учел.

Определенные возражения вызывает и интерпретация зебра-структуры в километровом излучении Юпитера. Одно из основных свойств, наблюдаемое во многих источниках зебра-структуры, состоит в том, что расстояние между полосами увеличивается с частотой. В том числе, это наблюдается и в зебра-структуре километрового излучения Юпитера. Это свойство является отражением того факта, что в источниках, как правило, градиенты магнитного поля и электронной концентрации имеют один знак. Однако, в модели, предложенной А.А.Кузнецовым, расстояние между зебра-полосами уменьшается с частотой. Такое противоречие с данными наблюдений не дает возможности считать предложенную модель происхождения зебра-структуры в километровом излучении Юпитера удовлетворительной.

Сказанное не влияет на оценку диссертации в целом, и диссертант несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Ведущий научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института прикладной физики
Российской академии наук (ИПФ РАН)
доктор физико-математических наук

Злотник Е.Я. Злотник
05.06.2014

603950, г. Нижний Новгород ул. Ульянова, 46.
тел. (831)4160659
zlot@appl.sci-nnov.ru

Подпись Е.Я.Злотник заверяю
Ученый секретарь ИПФ РАН
доктор физико-математических наук



В.Е. Шапошников

05.06.2014