ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Моргачева Александра Сергеевича «Микроволновая диагностика пространственных распределений параметров нетепловых электронов и плазмы солнечных вспышечных петель», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

В диссертации представлены результаты работ Моргачева А.С. по развитию методов микроволновой диагностики вспышечных процессов в магнитных структурах атмосферы Солнца. Несмотря на десятилетия исследований, мы до сих пор не знаем процессы в солнечных вспышках с необходимой полнотой. До сих пор нет адекватного понимания механизмов ускорения и нагрева. Решение этих задач важно не только для физики Солнца, но и для физики звездных атмосфер. Основные трудности в интерпретации вспышечных явлений вызваны ограниченными возможностями наблюдений. Успехи последних лет достигнуты благодаря наблюдениям с высоким пространственным и спектральным разрешением в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазоне. Однако их возможности существенно ограничены в исследованиях корональных вспышечных структур из-за недостаточно высокой плотности плазмы. Поэтому развитие технологий диагностики корональных процессов радиометодами, которые эффективны в магнитоактивной разреженной плазме, является принципиально важной задачей. Как следствие, в Китае, США и России создаются в настоящее время многоволновые радиогелиографы, позволяющие получать данные, сочетающие достаточно высокое пространственное, временное и спектральное разрешение.

Таким образом, тема настоящей диссертационной работы актуальна и соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований РАН. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы (99 наименований). Ее объем составляет 171 страницу, включая список литературы, 90 рисунков и 4 таблицы. Во введении сформулированы цели и задачи работы, обоснована их актуальность. Перечислены положения, выносимые на защиту, их научная и практическая значимость. Все необходимые характеристики работы имеются и соответствуют автореферату.

Для апробации развиваемых методов в диссертации используются данные наблюдений радиогелиографа Нобеяма на частотах приема 17 и 34 ГГц, пространственное разрешение которого позволяет разрешать вспышечные петли в достаточно протяженных вспышках. В модельных расчетах микроволнового излучения применяется апробированный быстрый код, разработанный Флейшманом Г.Д. и Кузнецовым А.А., позволяющий задавать практически полный спектр возможных начальных параметров излучающих частиц.

Характеристики микроволнового излучения чувствительно зависят от широкого набора параметров плазмы и излучающих частиц в источнике, а также от свойств среды на пути излучения от источника к наблюдателю. С одной стороны эти зависимости открывают обширные возможности для диагностики, а с другой стороны для определения параметров источника по наблюдаемым спектрам излучения требуется решение многофакторной обратной задачи. В первой главе диссертации Моргачев А.С. предлагает использовать новый метод фитирования наблюдаемых спектров - генетический алгоритм. Тестирование разработанного автором алгоритма на моделях вспышечных петель показало его

эффективность и быструю сходимость. Считаю необходимым сделать замечание к процедуре тестирования алгоритма. **Поскольку измерения потоков на реальных инструментах содержат ошибки из-за шумов аппаратуры, калибровок и т.д., то было бы необходимо изучить дополнительно устойчивость результатов оптимизации относительно разброса во входных значениях потоков.** Полученные ограничения на точность измерений спектра были бы полезны для наблюдателей при проведении калибровок и самих наблюдений.

В последнем разделе первой главы анализируется вклад теплового тормозного излучения в излучение вспышечных всплесков на 17 и 34 ГГц. Отношение потоков на этих частотах, измеряемых с относительно высокой точностью спектрополяриметром и радиогелиографом Нобеяма часто используется для оценки индекса степенного спектра средне релятивистских электронов, ускоряемых во вспышках. Хотя сам вывод о необходимости учета тормозного излучения на стадии спада гиросинхротронного излучения очевиден, представляют интерес полученные в диссертации количественные оценки.

Для идентификации механизма вспышечного ускорения электронов ключевым вопросом является определение их питч-углового распределения. В случае стохастического механизма можно ожидать доминирование популяции с большими углами, а преобладание компоненты скорости вдоль магнитного поля свидетельствует в пользу ускорения в электрическом поле. Практически единственным способом измерить угловую анизотропию является зависимость от нее степени, даже знака, поляризации гиросинхротронного излучения. Поиск в архиве наблюдений вспышек с аномальным поведением поляризации является трудоемкой задачей, а их анализ труден из-за эффектов распространения. До настоящего времени известны всего несколько публикаций, в которых обсуждаются вспышки с инверсией знака поляризации на высоких частотах. В диссертации просмотрен практически весь доступный массив данных, полученный на двух частотах радиогелиографом Нобеяма, и обнаружены события, в вершине вспышечной петли которых знак поляризации соответствует обыкновенной волне. С помощью моделирования достаточно убедительно показано, что наблюдаемая смена знака степени поляризации вдоль вспышечной петли может быть обусловлена продольным характером питч-угловой анизотропии ускоренных электронов в верхней части вспышечной петли. **Было бы интересным обсудить физические выводы, следующие из обнаружения продольной анизотропии в исследуемых событиях. Связана ли редкость обнаружения подобных событий с аномальным сценарием вспышки, или с наблюдательными трудностями?**

Горячей теме в радиоизлучении солнечных вспышек — механизмам генерации суб-терагерцового излучения, посвящена третья глава диссертации. Природа загадочного роста спектра на частотах выше 100 ГГц активно обсуждается в последнее время. Трудности в интерпретации обусловлены редкими наблюдениями подобных событий, и их ограниченными возможностями по пространственному и частотному разрешению. В частности, нет измерений размеров источников, а спектр измеряется только на двух частотах. Отсутствие необходимого комплекса данных открыло простор для спекуляций и публикации работ с самыми экзотическими механизмами. Привлекательной стороной исследования Моргачева А.С. является привлечение новых данных о суб-терагерцовых всплесках, полученных на российском телескопе РТ-7.5 на относительно низких частотах 93 и 140 ГГц. Диссертант участвовал в интерпретации трех вспышек, в которых наблюдался рост потока с частотой. Характер изменений световых кривых отличался во всех случаях. В рамках интерпретации данных наблюдений диссертантом рассматривались модели с

тепловым тормозным и гиросинхротронным излучением. Достаточно убедительно показано, что во всех случаях источник суб-терагерцового излучения должен быть погружен в плотную и холодную плазму верхней хромосферы. Интересны выводы диссертанта об ограничениях на размеры области излучения. В случае гиросинхротронного излучения наблюдаемые потоки в десятки солнечных единиц могут быть реализованы при значительном наклоне вспышечных петель. В случае же теплового тормозного излучения излучающий слой тонкий и для генерации наблюдаемых потоков необходима относительно большая его площадь. Результаты исследований суб-терагерцовых всплесков в диссертации не дают однозначного ответа о механизме их излучения, но полезны для планирования и анализа будущих наблюдений.

В целом диссертация А.С. Моргачева производит положительное впечатление и демонстрирует, с одной стороны, высокий потенциал радионаблюдений с пространственным разрешением, а с другой стороны, сложность их интерпретации и высокие требования к качеству наблюдений и широте диапазона наблюдений. Диссертация написана хорошим языком и аккуратно оформлена. Автореферат правильно отражает ее содержание. Все вынесенные на защиту результаты опубликованы в журналах ВАК, докладывались на конференциях и известны специалистам по физике Солнца. Результаты диссертационной работы А.С. Моргачева могут быть использованы в научных учреждениях ГАО РАН, САО РАН, ИЗМИРАН, ИСЗФ СО РАН, КрАО РАН и других.

В итоге, диссертацию А.С. Моргунова «Микроволновая диагностика пространственных распределений параметров нетепловых электронов и плазмы солнечных вспышечных петель» можно квалифицировать как законченное научное исследование, в котором получены важные фундаментальные результаты по разработке методов анализа микроволновых наблюдений астрофизических объектов. Диссертация удовлетворяет требованиям Положения ВАК «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к кандидатских диссертациям, а ее автор, Моргачев Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Научный руководитель
по направлению радиоастрофизика
ИСЗФ СО РАН,
д.ф.м.н., профессор А.Т. Алтынцев

12.11.2019

Подпись А.Т.Алтынцева заверяю
Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН И.И. Салахутдинова

Адрес: 664033, Иркутск, а/я 291, ул. Лермонтова 126а
e-mail: altyntsev@iszf.irk.ru, тел. 8-908-6630602
специальность 01.04.08 — физика и химия плазмы