

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Уртьева Федора Андреевича «**Моделирование астрофизических магнитных полей методами стохастической геометрии и вычислительной топологии**»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Диссертационная работа посвящена моделированию случайных полей, возникающих в нелинейных и нестационарных астрофизических процессах. Она состоит из двух частей объединенных общим контекстом физики и геометрии случайных полей.

В первой из них соискатель обсуждает взаимную связь корреляционных свойств турбулентной плазменной среды и характеристик наблюдаемого излучения гамма-всплесков. При движении в случайных магнитных полях заряженные частицы испытывают действие случайных сил Лоренца и их траектории приобретают форму диффузии. В этом случае, подходящим формальным контекстом для моделирования плазменной среды, полей и движения заряженных частиц являются методы стохастической теории излучения. Соискатель рассматривает и решает задачу оценки значений физических параметров и структуры магнитного поля в источниках гамма-всплесков. Уточнение моделей источников наиболее мощных энергетических выбросов во Вселенной несомненно относится к **актуальным** задачам современной астрофизики.

Вторая часть диссертации посвящена диагностике мультимасштабной структуры фотосферного магнитного поля в Активных Областях (АО) Солнца. В этом случае случайные поля обладают интересным свойством перемежаемости, когда основная энергия поля сосредоточена в редких и высоких пиках напряженности, разделенных обширными плато с низкими значениями. Конкретной задачей, которую решает Федор Уртьев являлась диагностика предвспышечной динамики магнитных полей в АО. Данными служили HMI/SDO магнитограммы по лучу зрения. В этой задаче соискатель использовал новые методы вычислительной топологии (TDA). Применение TDA позволило реализовать подход в построении характеристик сложности магнитного поля, которые не зависят от каких либо моделей и определяются из первых принципов, т.е. отсчетами магнитограмм. С помощью оригинального алгоритма, из отсчетов извлекаются два топологических инварианта, так называемые числа Бетти. Заявленная задача несомненно имеет важное прикладное значение в Физике Солнца и ее **актуальность** не вызывает сомнений.

Глава 1 посвящена изучению двух актуальных вопросов астрофизики высоких энергий. Прежде всего, в разделе 1.1 рассматриваются свойства резонансного переходного излучения (РПИ), возникающего в плазме с неоднородностями магнитного поля при движении в ней быстрых заряженных частиц. Получено выражение для спектра этого излучения, которое делает возможным изучение доминирующего канала РПИ для конкретных астрофизических объектов. Точнее, исследуется вопрос, в каком случае доминирует РПИ, вызванное неоднородностями плотности плазмы, а каком,

определяющую роль играют магнитные неоднородности. В разделе 1.2 приводятся результаты моделирования энергетических спектров гамма-всплесков, проведенного с использованием модели диффузионного синхротронного излучения (ДСИ). Показано, что измеренным параметрам гамма - всплесков лучше соответствует приближение сильного случайного магнитного поля, нежели приближение слабого случайного поля. Результаты работы, приведенные в этом разделе улучшают понимание процессов, протекающих при генерации излучения гамма-всплесков. Эта часть диссертации выполнена соискателем под руководством д-ра ф.-м.н. Г.Д. Флейшмана.

Глава 2 содержит основные понятия алгебраической топологии, необходимые для определения топологических характеристик поля. В диссертации используются два топологических инварианта. Это так называемые числа Бетти: первое из них Бетти-0 описывает количество компонент связности, на подуровне напряженности или, в гауссовском приближении, плотность минимумов поля. Второе число Бетти-1 характеризующие число «дыр», т.е. количество нестягивающихся 1-циклов. В гауссовском приближении это число измеряет плотность максимумов поля. Для каждого топологического свойства вычисляется характерный диапазон уровней, на которых оно представлено. По полученным данным строятся диаграммы персистентности (ДП), которые отображают время жизни свойства в единицах уровня напряженности. Упомянутые диаграммы представляют собой облако точек на плоскости. Для задач машинного обучения это облако необходимо векторизовать. Для этого, соискатель использует два разных метода векторизации: ранговые функции, аналоги кумулятивных функций распределения, и персистентные изображения, аппроксимирующие pdf. Показано, что такие техники позволяют проводить топологическую фильтрацию шумов. Описанные в этой главе методы используются в следующих главах работы для анализа сложности биполярного фонового магнитного поля солнечной фотосферы. Вклад соискателя заключается в реализации программного обеспечения, адаптированного для TDA магнитограмм.

Глава 3 начинается с кратких сведений из теории случайных полей, нужных для дальнейшей работы. Затем, приводятся примеры методов моделирования случайных полей с предписанным законом корреляции. В частности для симуляции наблюдаемых полей, обладающих свойством перемежаемости, приводится модифицированный итерационный алгоритм генерации логнормального случайного поля с предписанной степенной корреляцией. Соискатель обобщает методику на случай биполярного случайного поля. Получен ряд моделей логнормального случайного поля, имитирующих распределение магнитного поля в невозмущенной фотосфере. Показано, что распределения двух топологические характеристик поля, чисел Бетти, близки к аналогичным характеристикам, вычисленными по наблюдаемой магнитограмме. Таким образом, полученный результат подтверждает справедливость модели логнормального поля для описания реальных наблюдений.

Глава 4 посвящена практическому применению предлагаемого подхода к случайным магнитным полям АО. Фактически рассматривается задача предсказания времени до сильной вспышки ($>M5.0$) на основе обучающей выборки HMI/SDO магнитограмм. Как и в большинстве работ, под предсказанием понимается здесь симуляция на выборке уже состоявшихся событий. Существенное отличие подхода соискателя от множества работ в

этой области, заключается в использовании лишь двух топологических, т.е. универсальных, характеристик сложности поля, вычисленных по одной LOS компоненте. Напомню, что так называемые SHARP параметры, которые традиционно используются в западных прогностических схемах, содержат от 18 до 30 характеристик, вычисленных по *векторным* магнитограммам. Для того чтобы достичь корректного сравнения с традиционными схемами предсказания по SHARP параметрам, соискатель использовал ту же самую схему прогноза. С помощью метода машинного обучения автор продемонстрировал, что прогноз по одной наблюдаемой компоненте, на основе двух топологических инвариантов получается по крайней мере не хуже, а по некоторым оценкам даже лучше, чем прогноз по векторным магнитограммам и 18 SHARP параметрам.

Диссертация Урьева Ф.А. написана достаточно ясным языком и выполнена на высоком уровне технической строгости. Однако она не лишена недостатков.

Недостатки по существу:

1. В тексте диссертации встречаются опечатки и неточности. Например, в формуле (1.11) на стр. 18 отсутствует описание появившейся функции Тета; формула (3.20) на стр. 61 повторяет формулу (3.19).
2. Формула (1.3) на стр. 15 описывает ток, а не электрическое поле о котором говорится в тексте.
3. На стр. 16 указывается «Подставив (1.2) в (1.1)...». При этом не уточняется, о каких физических величинах идет речь.
4. В описании параметров спектральной функции Бэнда на стр. 25 отсутствует описание параметра E_0 , а на стр. 37 в списке 10 макроскопических параметров гамма-всплеска присутствует параметр z , никак не описанный в тексте.
5. При описании алгоритма генерации логнормального поля в главе 3.2 не обсуждается проблема сходимости итераций.

Стилистические недостатки:

1. В разделе 1.3 на стр. 36, "Выводы к Главе 1" приведенные выводы относятся только к одному разделу 1.2. Выводы к разделу 1.1 частично размещены в самом разделе 1.1 в "Обсуждение результатов".
2. Использование термина "время" жизни по отношению к диапазону уровней существования компонент Бетти 0 и Бетти 1, вносит путаницу в описание процедуры топологической фильтрации и отсылает читателя к неверным динамическим аналогиям. Необходимо было просто указать, что речь идет о длине интервала уровней, на котором появляется и исчезает топологическое свойство в процессе фильтрации.

Диссертация Урьева Ф.А. представляет собой законченное научное исследование, в котором рассматриваются и решаются задачи имеющую высокую теоретическую и практическую значимость.

Достоверность полученных соискателем результатов подтверждается применением строгих математических методов, и согласованностью результатов, с аналогами, полученными другими методами в других работах.

По результатам диссертации опубликовано 11 работ, 6 из них – в журналах из списка ВАК. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

В целом, диссертация Уртьева Федора Андреевича удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а автор безусловно заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент - профессор, д. ф.-м. н., Лившиц Моисей Айзикович,
maliv@mail.ru, Троицк, Калужское шоссе, д. 4,
главный научный сотрудник, ИЗМИРАН

М.А. Лившиц

Подпись официального оппонента заверяю

Ученый секретарь

26.09.17



23/09/2017