

## Отзыв

Официального оппонента на диссертацию Елагандула Нага Варун  
**«Теоретические исследования солнечных корональных петель:  
нелинейная радиальная мода»**, представленную на соискания ученой  
степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.03 «Физика Солнца»

Диссертационная работа Е. Нага Варун посвящена исследованию нелинейных эффектов для радиальной моды быстрых магнитозвуковых волн в солнечных корональных петлях. Данная мода также известна как мода типа перетяжек или «сосисочная» мода и является одной из нескольких собственных мод простейшей модели корональной петли — магнитного цилиндра или магнитной трубки. Последняя представляет собой цилиндрическую область в пространстве, заполненном плазмой, так что её макроскопические параметры (давление, плотность, температура и магнитное поле) однородны как внутри трубки, так и в окружающем его пространстве, но терпят разрыв на границе между внутренней частью трубки и внешней средой. Волновые моды в такой системе по своей природе делятся на быстрые магнитозвуковые, медленные магнитозвуковые и альфвеновские, а по характеру возмущения — на поверхностные и объёмные. Пространственная структура мод определяется тремя волновыми числами: продольным, радиальным и азимутальным  $m$ . Последнее в значительной степени определяет дисперсионные свойства МГД волны, а также ее наблюдательные проявления. Радиальная мода получается при  $m = 0$ ,  $m = 1$  соответствует изгибной моде, а  $m > 1$  --- баллонным модам.

В диссертации рассмотрена объёмная радиальная мода быстрой магнитоакустической природы в приближении холодной плазмы  $\beta \ll 1$ . Данная мода обладает очень сильной дисперсией и существует только при продольном волновом числе, превышающем некоторое критическое значение. Это приводит к тому, что наибольшая возможная продольная длина волны оказывается порядка поперечного размера петли, а соответствующие периоды колебаний для корональных условий составляют порядка единиц или десятков секунд. Это приводит к тому, что скважность современных изображающих инструментов, таких как SDO/AIA, наблюдающих солнечную корону в линиях крайнего ультрафиолета оказывается недостаточной для регистрации радиальной моды. Тем не менее, такие наблюдения возможны в радио- и рентгеновском диапазоне. И быстрая радиальная мода часто привлекается для интерпретации квазипериодических пульсаций (КПП) рентгеновского и радиоизлучения, связанного с солнечными вспышками.

Глубина модуляции излучения в таких КПП, как правило, значительно превышает единицы процентов, что говорит в пользу их нелинейной природы. Тем не менее, в большей части научных статей для интерпретации этого явления привлекается именно линейная теория радиальных колебаний вспыхивающих корональных петель, а возможные нелинейные эффекты не рассматриваются. Таким образом, необходимость разработки теории нелинейных эффектов радиальных МГД-колебаний корональных петель давно назрела. Это обуславливает **актуальность и практическую значимость** представленной диссертационной работы.

Диссертация Е. Нага Варун состоит из введения, четырёх глав, результатов и списка литературы. В конце каждой главы представлено заключение, в котором кратко описаны основные выводы и результаты, полученные в соответствующей главе.

**В первой главе** диссертации рассмотрена линейная теория магнитозвуковых волн в магнитной трубке. В частности, описаны собственные моды и выведено дисперсионное уравнение для магнитозвуковых волн в рамках идеальной МГД. В целом глава представляет собой подробный анализ линейной теории МГД-волн, опубликованной в классической работе Эдвина Робертса 1983 г..

**Во второй главе** диссертант рассматривает волновые движения, связанные с радиальной модой магнитной трубки, с учетом нелинейности. Представленные аналитические выкладки основаны на уравнениях идеальной МГД, из которых с применением метода многих масштабов Е. Нага Варун получает нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) с кубической нелинейностью для радиальной моды однородной магнитной трубки в приближении холодной плазмы  $\beta = 0$ . Коэффициенты НУШ выражены в функциях Бесселя и модифицированных функциях Бесселя.

**В третьей главе** исследуется поведение коэффициентов НУШ в зависимости от продольного волнового числа и соотношения между альфвеновскими скоростями внутри трубки и во внешней среде в равновесном состоянии. Для коэффициента при нелинейном члене НУШ обнаружена область параметров, в которых его абсолютное значение неограниченно возрастает, что приводит к так называемой супернелинейности, когда даже малое отклонение параметров от их равновесных значений может сопровождаться нелинейными эффектами.

**В четвертой главе** в приложении к радиальной моде магнитной трубки рассматриваются такие нелинейные эффекты, как модуляционная неустойчивость и образование солитонов. Для моделирования этих эффектов получена и проанализирована серия численных решений НУШ для различных значений параметров.

**В разделе «результаты»** кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**Новизна диссертационной работы** заключается в том, что

- Впервые было получено НУШ для радиальной быстрой магнитозвуковой моды в однородной магнитной трубке для условий солнечной короны.
- Для радиальной магнитозвуковой моды обнаружен новый эффект супернелинейности, а также представлена вспомогательная функция, которая позволяет определить область параметров, где этот эффект может наблюдаться.
- Для радиальной магнитозвуковой моды магнитной трубки в условиях солнечной короны впервые была подробно изучена модуляционная неустойчивость и качественно промоделированы квазипериодические пульсации, как её проявления.
- Впервые с помощью НУШ были промоделированы солитоны и солитонообразные образования в радиальной моде быстрых магнитозвуковых колебаний к корональным петлям.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертации заключается в новых результатах по нелинейной теории радиальной моды быстрых магнитозвуковых волн в корональных петлях, которые не только внесли вклад в развитие теоретического описания этого явления, но и могут быть использованы на практике для интерпретации наблюдений КПП радио и рентгеновского излучения солнечных вспышек.

**Достоверность результатов** подтверждается их успешной апробацией на 9 всероссийских и международных конференциях и публикацией 6 статей, из которых 4 опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых Scopus и WoS. Перечень результатов, вынесенных на защиту, в полной мере соответствует тексту диссертации, а автореферат полностью отражает ее основное содержание.

Несмотря на высокий уровень диссертации и представленных в ней результатов при её рассмотрении был выявлен ряд замечаний:

1. Во втором абзаце на странице 7 сказано «... в корональных условиях, т.е. при  $\beta \ll 1$  ... поверхностная и медленная мода не существуют в линейном приближении». На самом деле при малом, но конечном  $\beta$  медленные моды не только существуют в теории, но и регулярно наблюдаются в короне Солнца. Полное их исчезновение происходит в приближении  $\beta = 0$ . Кроме того, в тексте часто используется приближение  $\beta \approx 0$ . Мне не до конца понятно,

почему в этом обозначении используется знак приближённого, а не строгого равенства.

2. Во введении несколько нарушена логика изложения, в частности сначала объявляются задачи диссертационной работы, а только потом её цель.
3. При описании научной новизны диссертации было бы уместно использовать такие слова, как «впервые», «новый» и т.д..
4. На странице 22 диссертант использует термин «трубовая скорость». На мой взгляд, предпочтительным является уже устоявшийся термин «трубочная скорость».
5. В работе для обозначения полных производных от функции одной переменной часто используется символ частной производной. Это иногда сбивает с толку и усложняет понимание представленных выкладок. Примером может служить уравнение (1.2.37) и предшествующие ему выкладки.
6. В уравнениях (2.4.5) и (2.4.6) для частных производных по  $t$  и  $z$  в правой и левой части уравнения используется один и тот же символ, хотя очевидно, что эти производные имеют разный смысл. Чтобы этого избежать, в правой части  $t$  можно было бы обозначить как  $t_0$ , а  $z$  — как  $z_0$ .
7. На рисунках 4.6–4.11 показано поведение огибающей волны  $|\psi|$ . С точки зрения интерпретации наблюдений гораздо более информативной иллюстрацией были бы графики реальной части  $\psi$ , которая непосредственно отражает вариации параметров плазмы, таких как её плотность, а не медленно меняющуюся амплитуду этих вариаций.

Приведённые недостатки требуют пояснения при защите, но не являются принципиальными и не снижают на высокий уровень работы и представленных в ней результатов.

По моему мнению, диссертационная работа Елагандулы Нага Варуна является завершённым научным трудом и содержит новые и важные результаты. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 «Физика Солнца».

Я, Анфиногентов Сергей Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

Официальный оппонент:

старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук по специальности 01.03.03 «Физика Солнца».

Почтовый адрес: г. Иркутск ул. Лермонтова 126а

Рабочий телефон: +7(3952)56-45-00

e-mail: anfinogentov@iszf.irk.ru

05.05.2022

Подпись Анфиногентова С.А.  
заверяю  
учёный секретарь ИСЗФ СО РАН  
к.ф.-м.н.



Анфиногентов Сергей Александрович

Салахутдинова И.И.