

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации М.С.Рудермана
ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ И КОЛЕБАНИЯ В МАГНИТНЫХ ТРУБКАХ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ,
представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальностям 1.03.03–физика Солнца и 01.02.05–механика жидкости, газа и плазмы

Благодаря новым наблюдательным данным о структуре солнечной короны, полученных с помощью космических обсерваторий, особенно после запуска в 1998 году космического аппарата TRACE, интенсивно развивается новая область астрофизики - корональная сейсмология, изучающая волновые и колебательные явления в коронах активных звёзд. М.С.Рудерман справедливо отмечает, что более подходящим названием является "сейсмология звёздных атмосфер", поскольку разработанные в диссертации методы и подходы применимы также к хромосфере и фотосфере Солнца.

Диссертантом для исследования выбрана изгибная мода корональных солнечных арок, поскольку именно она надёжно регистрируется современными средствами. Быстрая магнитозвуковая и желобковая моды солнечных магнитных петель, например, пока не наблюдаются. Об их существовании свидетельствуют лишь косвенные данные, в частности, наблюдения модуляции излучения. Более того, исследования изгибной моды чрезвычайно актуальны для решения важной проблемы астрофизики - проблемы нагрева звёздных корон.

В первых работах о колебаниях и волнах в солнечной атмосфере рассматривалась простая модель прямой однородной магнитной трубки. В диссертации проведено фундаментальное исследование целого ряда новых тонких эффектов в изгибных волнах и колебаниях магнитных трубок, обусловленных различными формами трубок, неоднородностью плотности плазмы, течением плазмы, наличием электрического тока в трубках, учётом нелинейности колебаний и волн.

В первой части диссертации дан краткий обзор предшествующих работ, приведены основные уравнения магнитной гидродинамики и выведено дисперсионное уравнение для захваченных волн в прямой магнитной трубке, т.е. для волн, амплитуда которых экспоненциально затухает вдали от трубки.

Наблюдения свидетельствуют о том, что магнитные структуры солнечной атмосферы, как петлеобразные, так и открытые (вспышечные петли, спикулы, волокна, ...) часто имеют далеко не цилиндрическую форму, неоднородны по плотности плазмы и магнитному полю. Влияние указанных факторов на распространяющиеся волны исследуется во второй части диссертации. В приближении холодной плазмы выводится уравнение для изгибных волн в

трубках с меняющимся радиусом сечения и плотность плазмы. Изучены волны в бочкообразных петлях и расширяющихся от оснований открытых трубках.

Значительная часть диссертации посвящена важному физическому эффекту - резонансному затуханию изгибных колебаний. Если альфвеновская скорость в трубке возрастает с радиусом, то появляется резонансная поверхность на которой глобальная волновая мода находится в резонансе с локальными альфвеновскими колебаниями. На больших временах возмущения вдали от резонансной поверхности затухают, и вся энергия исходного возмущения концентрируется вблизи резонансной поверхности. В результате исходное возмущение, совпадающее с изгибной волной вне переходной области, затухает даже при незначительной диссипации. Эффект резонансного поглощения весьма перспективен для решения проблемы нагрева звёздных корон.

В главе 2.5. исследовано распространение нелинейных изгибных волн по тонкой магнитной трубке в приближении несжимаемой плазмы. При этом показано, что нелинейность способствует передаче энергии от фундаментальной волновой моды к обертонам. Это усиливает резонансное поглощение, то есть ускоряет затухания волны. Нелинейность приводит также к деформации границ трубки в виде желобковых мод.

В третьей части диссертации исследуются стоячие изгибные волны в магнитных трубках. Анализируя изгибные колебания магнитных трубок с плотностью плазмы и радиусом поперечного сечения изменяющимися вдоль трубки, диссертант рассмотрел практически важный случай когда зависимость радиуса трубки от координаты вдоль её оси описывается гиперболической функцией. М.С.Рудерману удалось получить оценку шкалы высот корональной петли по наблюдаемому отношению частот первого обертона и фундаментальной моды. По сравнению с моделью Andries et al (2005) показано, что шкала высот зависит от параметра расширения трубки, а её значения порядка $(3-11) \times 10^4$ км.

Наблюдения солнечных вспышек свидетельствуют о важной роли электрических токов в энерговыделении и в формировании магнитных петель. Поэтому в диссертации (глава 3.4.) исследован практически важный случай изгибных колебаний магнитных трубок с продольным током и показано, что скрученность магнитного поля трубки не влияет на частоту колебаний. Нужно заметить, что существует и другой подход к исследованию осцилляций токонесущих корональных петель, основанный на представлении магнитной петли в виде эквивалентного электрического контура. Такой подход развивается нижегородской и пулковской астрофизическими школами.

Современные наблюдения свидетельствуют о том, что область солнечной вспышки состоит из нескольких корональных петель, а сами магнитные петли филаментированы. В этой связи возникает задача о колебаниях системы магнитных трубок. В главе 3.6

исследуются изгибные колебания двух параллельных магнитных трубок с использованием бицилиндрических координат. Интересно было бы рассмотреть задачу о взаимодействии двух колеблющихся трубок с учетом электрического тока в трубках, как это было сделано в главе 3.4 для одиночной трубки. Полученные результаты было бы полезно сравнить с подходом Ходаченко и др. (Space Sci. Rev. **149**, 83, 2009) об индуктивном взаимодействии токонесущих трубок на языке эквивалентных электрических цепей.

В главе 3.7. изучаются изгибные колебания корональных петель в присутствии течения плазмы. Показано, что для наблюдаемых скоростей сифонных течений влияние течения на частоту фундаментальной моды и на отношение частот первого обертона и фундаментальной моды мало. Важный вывод состоит и в том, что можно не учитывать влияние сифонного течения на оценку шкалы высот в корональных петлях.

Различные аспекты резонансного затухания детально изучены М.С.Рудерманом и в задачах о поведении стоячих изгибных волн (главы 3.8 - 3.12). Здесь необходимо выделить важные результаты о том, что декремент затухания волн не зависит от числа Рейнольдса в случае $Re \gg 1$ и указание на возможность существования незатухающих колебаний при охлаждении магнитной петли.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания и вопросы:

- В диссертации основное внимание уделяется различным причинам затухания изгибных осцилляций магнитных трубок, но нет главы о способах генерации изгибных колебаний. В первой части диссертации нет главы о том, как формируются магнитные трубки. Такие дополнения заметно усилили бы представленную диссертационную работу.
- В главе 1.3 не учтено акустическое затухание изгибных колебаний (Spruit, Solar Phys. 1982; Рютов и Рютова, ЖЭТФ 1976), которое при определённых параметрах плазмы короны и магнитных трубок может оказаться существенным. Диссертант ограничивается случаем захваченных мод ($\Lambda_c^2 < 0$), хотя при изгибных колебаниях имеются и отходящие от трубки волны, удовлетворяющие условиям Зоммерфельда. В задаче о колебаниях двух близких магнитных трубок (глава 3.6) также не учтены излучающие моды, которые могут повлиять на осцилляции системы из двух трубок.
- Было бы полезно пояснить, почему уравнение (2.2.67) для изгибных мод с переменным поперечным сечением в приближении тонкой магнитной трубки не сводится к уравнению (29) в работе Spruit (A&A 1981) для поперечного смещения:

$$\frac{\partial^2 \xi_{\perp}}{\partial t^2} = c^2(z) \frac{\partial^2 \xi_{\perp}}{\partial z^2}.$$

- Можно ли, исходя из результатов диссертации по резонансному затуханию, сделать вывод о том, что для возбуждения изгибных колебаний в неоднородных по сечению корональных петлях необходим высокий порог по внешнему воздействию?

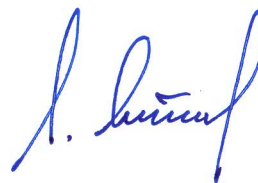
Несмотря на высказанные замечания, диссертация М.С.Рудермана производит впечатление фундаментального исследования, посвящённого динамике волновых и колебательных процессов в типичных магнитных структурах солнечной атмосферы – магнитных петлях и трубках. При этом диссертантом привлекался развитый математический аппарат, который позволил аналитически исследовать значительное число весьма тонких эффектов в изгибных колебаниях петель, вызванных неоднородностями плотности, температуры, магнитного поля, существованием электрического тока, течением плазмы в петлях. Можно надеяться, что с увеличением разрешения солнечных космических обсерваторий до уровня наземных оптических телескопов (0.1 угловых секунды ≈ 70 км на фотосфере Солнца) найденные диссертантом тонкие эффекты будут обнаружены.

Диссертация полностью отвечает критериям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям. Материалы диссертации содержатся в 30 статьях, опубликованных в ведущих международных изданиях, и могут привлекаться для исследовательских работ в ГАИШ МГУ, ИЗМИРАН, КраО, ГАО РАН, САО РАН, ИКИ РАН, ИПФ РАН, ФИАН, ФТИ РАН. Автореферат соответствует содержанию диссертации, а её автор, Михаил Соломонович Рудерман, несомненно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.03.03 – физика Солнца и 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

28 апреля 2016 г.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук
научный руководитель ГАО РАН, чл.-корр. РАН



А.В.Степанов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук
Почтовый адрес: 196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, ГАО РАН.
Телефон 812-363-70-03, эл. почта: stepanov@gao.spb.ru

Подпись А.В.Степанова заверяю

Учёный секретарь ГАО РАН
кандидат физико-математических наук



Т.П.Борисевич