

Кафедра общей и теоретической физики

Комендатян Андрей¹

Простейшая модель колебаний поверхности Солнца

(научно-исследовательская работа)

Аннотация

Простейшая модель пульсаций фотосферы Солнца рассмотрена в настоящей работе. Здесь решена задача о вычислении среднего радиуса фотосферы Солнца в зависимости от величины поверхностного заряда переходного слоя. Сформулирована динамическая модель дрейфа фотосферной плазмы. Получена замкнутая система дифференциальных уравнений с учетом начальных и граничных условий. Определена явная зависимость поверхностного заряда переходного слоя от концентраций частиц разных сортов. Выполнена редукция модели. Получена редукцированная замкнутая система дифференциальных уравнений движения слоев плазмы различных сортов, которая решена численным образом с учетом начальных условий. Выполнен численный анализ полученных результатов в случае фотосферной плазмы для тепловых и нетепловых скоростей тяжелых заряженных частиц. Показано, что в данной области возникают колебания плазмы различных сортов, которые могут быть, в принципе, идентифицированы по спектру радиоизлучения Солнца. Получена оценка на длины электромагнитных волн, соответствующих осцилляциям протонов и α -частиц. Показано, что такие колебания не могут представлять устойчивый процесс в физических условиях короны.

Комментарии: работа выполнена под научным руководством старшего преподавателя кафедры общей и теоретической физики СамГУ, к.ф.-м.н., Филиппова Ю.П.² и представлена на итоговой научно-практической конференции учащихся Самарской областной физико-математической школы в 2009 г.



Работа выставлена на **ASTRODROME**: 26.03.2009

¹E-mail:

²E-mail:yuphil@ssu.samara.ru

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| 1 Современные представления о природе Солнца | 8 |
| 1.1 Основные сведения о Солнце | 8 |
| 1.2 Спектр и химический состав Солнца | 11 |
| 1.3 Строение Солнца | 12 |
| 1.4 Современные представления о пульсациях Солнца | 20 |
| 2 Простейшая модель пульсаций Солнца | 24 |
| 2.1 Определение модели | 24 |
| 2.2 Определение радиуса Солнца как функции величины поверхностного заряда | 26 |
| 2.3 Основные уравнения динамики сплошной среды | 28 |
| 2.4 Начальные и граничные условия задачи. Определение величины поверхностного заряда | 32 |
| 2.5 Редукция модели трехкомпонентной плазмы | 34 |
| Заключение | 40 |
| Литература | 42 |

Введение



Рис. 1. Вид Солнца в оптический телескоп.

Актуальность работы. **Солнце** – центральное тело Солнечной системы. Оно представляет собой высокотемпературный плазменный шар, состоящий в основном из атомарного водорода. Солнце обладает самой большой массой среди всех тел Солнечной системы, так его масса в $3.33 \cdot 10^5$ раз больше массы Земли и составляет 99.866% массы всей Солнечной системы [1].

Солнце – это ближайшая к нам и единственная звезда Солнечной системы. Солнце является основным источником энергии в Солнечной системе, благодаря протеканию термоядерных реакций в недрах Солнца. Эта энергия затем переносится от Солнца посредством излучения (электромагнитного и корпускулярного) к телам Солнечной системы. Солнце, в принципе, рядовая звезда нашей Галактики, относится к классу желтых карликов $G2$. Поэтому такие проблемы, как источники энергии Солнца, его строение, образование спектра, являются общими для физики Солнца и звезд [2].

История исследования Солнца начинается с телескопических наблюдений, выполненных Г. Галилеем, который в 1611 г. открыл солнечные пятна и определил период обращения Солнца вокруг своей оси. В 1843 г. немецкий астроном Г. Швабе обнаружил цикличность солнечной активности. В 1814 г. Й. Фраунгофер обнаружил темные линии в спектре поглощения Солнца, что положило начало изучению его химического состава. С 1836 г. регулярно ведутся наблюдения затмений Солнца, что привело к обнаружению у него короны и хромосферы, а также солнечных протуберанцев.

В середине 30-х гг. XX в. было обнаружено радиоизлучение Солнца, по наличию помех при радиоприеме, изменения интенсивности которых, согласовывались с изменениями солнечной активности. В 1942 наряду с этим радиоизлучением Солнца – т. н. радиоизлучением активного Солнца было за-

регистрировано также радиоизлучение спокойного Солнца в дециметровом диапазоне волн. Систематические исследования радиоизлучения Солнца начались в 1946-47 гг. Изучение радиоизлучения Солнца позволило определить температуру различных областей его атмосферы, выявить множество особенностей, способствовавших построению модели атмосферы Солнца.

В настоящее время Солнце активно исследуется с помощью космических аппаратов. Так ученые продолжают наблюдать Солнце с помощью зонда-обсерватории SOHO (Solar and Heliospheric Observatory, ESA, NASA, 2.12.1995), находящейся на околоземной орбите. SOHO стала одним из наиболее продуктивных аппаратов в истории космических исследований. Она дала науке огромный массив информации о состоянии солнечной атмосферы, глубинных слоях Солнца, солнечном ветре и об активности солнечной короны. Несмотря на основную задачу аппарата по изучению Солнца, благодаря анализу сделанных и переданных на Землю снимков было открыто более 1500 околосолнечных комет.

В октябре 2006 г. была запущена спутниковая система Stereo (NASA, Британский исследовательский совет по физике элементарных частиц и астрономии), состоящая из двух аппаратов, предназначенных для наблюдения за активностью поверхности Солнца, солнечными выбросами и для составления трехмерной карты нашей звезды. Каждый аппарат имеет размеры, подобные обычному холодильнику и массу около 500 кг. Орбиты спутников лежат в плоскости орбиты Земли и расположены так, чтобы солнечные разведчики могли наблюдать поверхность Солнца последовательно. Один спутник движется "вперед" Земли, другой – "позади". Важно отметить, что стоимость проекта составляет около полумиллиарда долларов США.

Кроме того, на околоземной орбите сегодня работает Хинодэ (Hinode или Solar-B) – японский научный спутник предназначенный для высокоточных измерений малых изменений напряженности солнечного магнитного поля. Кроме того в число исследований включено: изучение динамики солнечных магнитных полей, исследование вариаций светимости Солнца, изучение энергетики солнечного ветра, исследования процессов, порождающих ультрафиолетовое и рентгеновское излучение.

В ближайшие годы в космос планируется запустить еще несколько солнечных обсерваторий, например, Solar Dynamics Orbiter (NASA, 2008). В 2015 году планируется запуск аппарата нового поколения – Solar Probe Plus (NASA), который приблизится к Солнцу и позволит получить намного более детальное представление о процессах, происходящих в недрах светила, обусловив новый этап в солнечных исследованиях.

Сегодня мы знаем о Солнце много больше, чем до начала космической эры. Возникает естественным образом вопрос: *почему и сегодня астрофизи-*

ки столь пристальное внимание уделяют Солнцу? Ответ прост – и сегодня существует ряд актуальных проблем, требующих неотложного решения, например, проблема солнечного нейтрино, проблема нагрева короны, проблема поверхностных колебаний Солнца.

Рассмотрим последнюю более подробно. Предположение о том, что солнечная атмосфера охвачена волновыми движениями, было высказано немецкими астрономами Л. Бирманом и М. Шварцшильдом в 1946-48 гг. при объяснении высокой температуры солнечной хромосферы и солнечной короны. В качестве возможного источника их нагрева рассматривалось превращение энергии волновых движений в тепловую. Генерация волн должна происходить в подфотосферных слоях, где существуют мощные турбулентные конвективные движения, создающие акустические шумы. Акустическая теория нагрева короны в дальнейшем не подтвердилась.

Впервые колебания на Солнце обнаружены Р. Лейтоном (США) в 1962 г. по периодическим доплеровским смещениям спектральных линий. Это были пятиминутные колебания (названы по продолжительности их периода). Амплитуда колебаний – от 100-200 м/с в фотосфере до 1-2 км/с в хромосфере. Горизонтальная (вдоль поверхности Солнца) длина волны $10^3 - 10^4$ км. Мощность колебаний зависит от частоты и горизонтальной длины волны. Спустя примерно 15 лет было установлено, что спектр пятиминутных колебаний состоит из отдельных полос. Такая структура спектра позволила установить, что пятиминутные колебания – это резонансные колебания верхних слоев конвективной зоны. Резонансный слой, или атмосферный волновод, создается за счет того, что выше и ниже некоторого уровня в атмосфере Солнца из-за увеличения скорости звука волны отражаются и не могут выйти за пределы этого слоя. Положение полос в спектре определяется строением конвективной зоны. Т.о. исследования колебаний на Солнце позволили "заглянуть" в недоступные для непосредственного наблюдения подфотосферные слои Солнца. Здесь же удалось определить, как изменяется скорость вращения Солнца с глубиной, что очень важно для теории генерации магнитного поля Солнца.

В солнечных пятнах наблюдаются колебания с периодом около трех минут. Это также резонансные колебания, а резонатором является хромосфера над пятном. Строение хромосферы над солнечными пятнами изучено недостаточно, и наблюдение колебаний позволяет уточнить существующие модели.

Корона над активными областями состоит из отдельных арок, изогнутых вдоль силовых линий магнитного поля. Благодаря вмороженности магнитного поля силовых линий корональные арки, концы которых как бы закреплены в хромосфере, могут совершать горизонтальные альвеновские колебания подобно изогнутой упругой струне. Первые наблюдения таких колебаний арок уже удалось провести. Все перечисленные резонансные колебания в солнечной ат-

мосфере могут возбуждаться волновым шумом из конвективной зоны. Однако установить, существует ли действительно такой источник волн на Солнце, до сих пор не удалось, т.к. резонансные колебания могут возбуждаться и из-за различного рода неустойчивостей.

В тех случаях, когда единый волновой процесс охватывает все Солнце в целом, говорят о пульсациях (колебаниях) Солнца как звезды. В 1976 г. советские астрономы А.Б. Северный, В.А. Котов и Т.Т. Цап на Крымской астрофизической обсерватории открыли пульсации Солнца с периодом [3]

$$P_1 = 159.9660 \pm 0.0006 \text{ мин.}$$

. Это открытие вызвало бурные дискуссии ученых, т.к. пульсации оказываются едва уловимыми для самой совершенной аппаратуры. Амплитуда колебаний составляет ~ 20 км, что составляет $\sim 10^{-3}\%$ диаметра Солнца. Особенно удивительным видится тот факт, что период P_1 обнаружен в вариациях блеска многих внегалактических объектов, и в кривых блеска некоторых переменных звезд. По-видимому, причиной такого колебания является какой-то универсальный механизм, который реализуется в различных физических объектах. Однако природа колебания P_1 , источник ее возбуждения до сих пор неизвестны [4]. Наблюдаются также пульсации Солнца с периодами 20-40 мин и 5 мин.

В личной беседе научного руководителя Филиппова Ю.П. с Котовым В.А. в 2004 году последний высказал мнение о возможной причастности электрического поля Солнца к данному феномену. Развивая идею Котова В.А. и учитывая существование солнечного ветра, мы предлагаем применить к описанию пульсации с P_1 схему периодически перезаряжающегося конденсатора, обусловленного необратимыми потерями потоков плазмы, и возникновением электрического заряда в области фотосферы.

В связи со сказанным главной целью настоящей работы является построение простейшей модели пульсаций фотосферы Солнца, основным назначением которой является выявление возможных периодов колебаний фотосферной плазмы и попытка описания колебания Солнца с периодом P_1 .

Согласно сформулированной цели основными задачами являются следующие положения:

1. Определение радиуса Солнца как функции величины поверхностного заряда.

2. Построение замкнутой системы уравнений, описывающей движение потоков заряженных частиц, составляющих солнечную плазму и вариацию границы поверхности фотосферы. Решение полученной системы уравнений с учетом начальных и граничных условий с использованием численных компьютерных методов.

3. Численный анализ законов движения различных компонент солнечной плазмы в различных областях Солнца. Обоснование известных данных наблюдений.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Методы интегро-дифференциального исчисления.
2. Основные уравнения динамики материальной точки и сплошной среды.
3. Методы классической электродинамики, в частности теорема Остроградского-Гаусса и ее алгоритм применения в электростатике.

Данная работа имеет следующую структуру.

В **первой главе** представлены современные физические представления о строении Солнца и основных свойствах его фотосферы и солнечного ветра.

Во **второй главе** представлено решение поставленных задач.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.