

Софийски университет Св. Климент Охридски
Физически факултет

Алберт Максимов Варонов

**Нагриване на космическа плазма
от магнитохидродинамични вълни**

Автореферат

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен
“Доктор”

Професионално направление: 4.1 Физически науки
Научна специалност: Теоретична и математическа физика (01.03.01)

Жури

Доц. д-р Станимир Колев	Физически факултет, Софийски университет Св. Климент Охридски
Проф. д-р Васил Василев	Институт по механика, Българска академия на науките
Доц. д-р Данчи Кулова	Институт по механика, Българска академия на науките
Доц. д-р Божидар Сребров	Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките
Научен ръководител: Проф. д-р Тодор Мишонов	Физически факултет, Софийски университет Св. Климент Охридски

Версия: 16/04/2019

[arXiv:1903.07688](https://arxiv.org/abs/1903.07688) [physics.plasm-ph]

Анотация

Повече от 75 години след откритието, че температурата на външния слой на атмосферата на Слънцето, наречен слънчева корона, е около милион градуса [1],[2],[3] физическият механизъм причиняващ тази висока температура е все още неизвестен. Първото предположение за природата на този механизъм е направено много бързо след гореспоменатото откритие от шведския физик Ханес Алфвен [4],[5], който предполага че турбулентността във слънчевата фотосфера създава магнитохидродинамични вълни, които разпространявайки се нагоре в слънчевата атмосфера се поглъщат, което води до милион градусовата температура на слънчевата корона. Магнитохидродинамичните вълни, още известни като Алфвенови вълни, са открити в слънчевата корона от космическия сателит *Hinode* през 2007 година [6]. Първата стъпка към потвърждението на идеята на Алфвен за нагряването на слънчевата корона е направена. Втората и финална стъпка е числено да се пресметне нагряването на слънчевата корона вследствие на поглъщането на Алфвенови вълни и резултатите да покажат качествено съгласуване с полу-емпиричните модели на височинния температурен профил на слънчевата атмосфера [7]. Задачата е едномерна, тъй като наблюденията показват, че повишаването на температурата в слънчевата атмосфера до достигането на коронална стойност се случва бързо в много тясна област, наречена преходен слой, чиято ширина е сравнима с дължината на град София.

Цел на настоящата работа е да се извърши това числено пресмятане и да се покаже, че нагряването на слънчевата корона се дължи на поглъщането на Алфвенови вълни, което да потвърди, че идеята на Алфвен е именно механизъмът за нагряване на слънчевата корона.

Съдържание

1	Описание на дисертационния труд	1
2	Публикации	5
3	Основни приноси	6
4	Литература	7

1 Описание на дисертационния труд

Дисертационният труд се състои от 5 глави, библиография и 1 приложение, събрани в общо 116 страници. Основният текст е 71 страници, библиографията е 9 страници и приложението е 29 страници. Броят на фигурите е 29, като 5 от тях са взаимствани със съответните цитати, а броят на цитатите е 111. Организацията на дисертацията по глави е както следва.

Първата глава е озаглавена “Въведение” и е посветена на встъпителни наблюдения и теория по задачата за нагряване на слънчевата корона. В първата секция е направен сбит исторически преглед на основните наблюдателни резултати, чиито анализ водят до откритието за нагрятата до милион градуса слънчева корона. Следва кратък обзор на първия предложен механизъм за това нагряване от Ханес Алфен и последвалите както теоретични, така и наблюдателни изследвания в тази посока, които детайлно разкриват особеностите на слънчевата атмосфера. В края на тази секция са споменати и другите предложени механизми за нагряване на слънчевата корона с кратки разсъждения за техните приложимост и напредък.

Следващите три секции съдържат теоретични изводи на основните магнитохидродинамични (МХД) уравнения: втора секция съдържа изводите на уравненията за движения, плътностите на потоците на енергия и импулс в хидродинамиката; в следващата секция към така изведените уравнения се добавя влияние на магнитно поле и се извеждат уравненията за движение, плътностите на потоците на енергия и импулс в магнитохидродинамиката; и последната четвърта секция съдържа кратки изводи на кинетичните коефициенти, които присъстват в МХД уравненията.

Втора глава се нарича “Извод на уравненията” и в нея са изведени уравненията на механизма за нагряване на слънчевата корона чрез поглъщане на Алфенови вълни, които ще бъдат използвани за численото пресмятане. В първата секция на втора глава са изведени вълновите уравнения на Алфеновите вълни в честотно представяне, които са две линейни диференциални уравнения от втори ред. Представен е още и матричен запис на вълновите уравнения, който е удобен за числено пресмятане, и накрая е изведено характеристично уравнение за разпространение на Алфенови вълни в хомогенна среда.

Втората секция съдържа извод на уравненията за запазване на плътностите на потоците енергия и импулс в едномерния случай на настоящата задача. Тези две уравнения са нелинейни диференциални уравнения от втори ред, като уравнението за потока на енергията дава решение за температурата, а уравнението за потока на импулса дава решение за скоростта на слънчевия вятър, разпространяващ се от Слънцето нагоре. Коефициентите пред старшите производни на тези диференциални уравнения са много малки, което ги прави твърди (stiff differential equations) и съответно трябва да се използват алгоритми за решаване на твърди диференциални уравнения. След това тези две уравнения се обезразмеряват и се представят като квадратно уравне-

ние, за чието решаване е разработен нов числен метод описан в трета глава. Анализът на квадратното уравнение показва, че то не позволява достигането на свръхзвукова скорост на слънчевия вятър.

В последната трета секция на втора глава са изведени граничните условия на вълновите уравнения. Анализът на тяхното характеристично уравнение за разпространение на Алфенови вълни в хомогенна среда показва, че съществуват 4 вида вълни (моди): лява и дясна разпространяващи се вълни; лява и дясна свръхзатихващи (overdamped) вълни, като дясна вълна е вълна разпространяваща се от Слънцето нагоре към неговата атмосферата, а лявата се разпространява надолу от атмосферата към Слънцето. Сравнението на вълновите вектори на двете десни моди в режим на ниски честоти показва, че и вълновите уравнения са твърди диференциални уравнения, което означава че за решението на задачата трябва да се решат самосъгласувано две линейни и две нелинейни диференциални уравнения от втори ред, при това всичките твърди.

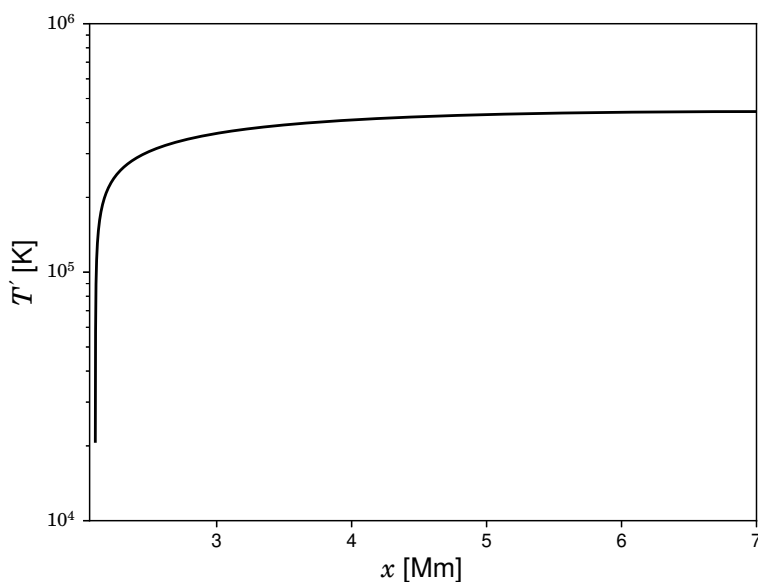
Трета глава съдържа описание на числените методи използвани за МХД пресмятане. Първата секция съдържа използвания метод за решаване на вълновите уравнения, който е WKВ приближение, приложимо при високо честотни Алфенови вълни. Втората секция съдържа подробно описание на използвания числен метод за решение на уравненията за плътностите на потоците на енергия и импулс. Това е предикторно-коректорен метод състоящ се от екстраполираща част и коригираща част, благодарение на когото диференциалните уравнения за потоците на енергията и импулса могат да се решат като едно квадратно уравнение, изведено в предната глава.

Последната секция от тази глава съдържа реализацията на предикторната част от числения метод, която използва свойството на Уин [8] (Wynn identity). Тази реализация е направена специално за настоящата задача и оригиналната новост в нея е механизмът за оценка и контрол на числената грешка на предикторната част. Работата на предикторната част е изпробвана с пресмятане на следните 3 примера: суми на 2 разходящи безкрайни редове и екстраполацията на функцията $\sin(x)$. Представени са графики, които позволяват да се направи подробен анализ на работата на предикторната част, разработеният механизъм за оценка и контрол на грешките при пресмятане. И най-важното, показано е кога предиктора спира да дава достоверни резултати чрез примерните пресмятания и как механизма за оценка и контрол на грешката дава индикация за това. Направените сравнения между истинските и емпиричните (от механизма за оценка) грешки от пресмятане показват отлична корелация между двете.

В заключение, разработеният предикторен числен метод е подходящ за практични приложения в теоретичната физика и приложната математика. Надеждният му механизъм за оценка и контрол на числените грешки го прави подходящ за внедряването му в комерсиалните софтуерни продукти за числени изчисления.

В четвърта глава са представени резултатите от числените пресмятания на МХД

уравнения за нагряване на слънчевата корона от една Алфенова вълна. Пресметнатата зависимост на температурата на слънчевата атмосфера T' от височината от Слънцето x е показана на Фиг. 1. Нарастване на температурата се дължи на поглъщането на



Фигура 1: Височинно зависим профил на температурата на слънчевата атмосфера $T'(x)$ числено пресметнат в рамките на магнитохидродинамиката. Стръмното нарастване на температурата в началото се намира в тясната област, наречена преходен слой. Наличието на този преходен слой в МХД пресмятане показва, че Алфеновите вълни нагряват слънчевата корона.

Алфеновата вълна, като между двата процеса се наблюдава положителна обратна връзка, която е и причината за този стръмен профил. Това нарастване също определя и ширината на преходния слой, което качествено съвпада със съвременните оценки.

Представени са още и височинните профили на скоростта на слънчевия вятър, както и плътностите на потоците на енергия и импулс. Тази глава още съдържа графики на два допълнителни параметри и накрая две графики на емпиричните грешки от предикторната част на числения метод. Анализът на последните показва, че именно в стръмния участък на нарастването на температурата емпиричните грешки са най-големи и са почти на границата на приложимост. Наличието на коректорната част допринася за успеха на цялостното МХД пресмятане.

В последната пета глава са описани заключенията и приносите, които са представени в Сек. 3.

Приложението е една глава с няколко секции, които включват голяма част от програмния код за МХД пресмятане направено на програмния език Фортран. Първата секция включва програмния код на ново разработената предикторна част на числения метод с включени коментари. Втората секция съдържа отделните модули и главната програма с включени коментари.

2 Публикации

1. T. M. Mishonov, A. M. Varonov, N. I. Zahariev, R. V. Topchiyska, B. V. Lazov and S. B. Mladenov, *Magnetohydrodynamic calculation of the temperature and wind velocity profile of the solar transition region. Preliminary results.*, in NCTAM 2017 – 13th Bulgarian National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, eds. V. Vassilev, S. Nikolov, M. Datcheva and Y. Ivanova, MATEC Web Conf. **145**, 03009, 1–29 (2018).
2. T. M. Mishonov and A. M. Varonov, *Temperature and wind profiles of the solar transition region – Preliminary results*, in 10th Jubilee International Conference of the Balkan Physical Union Aug. 2018, AIP Conference Proceedings 2075, 090002 (2019).
3. T. M. Mishonov and A. M. Varonov, *On the practical realization of ε -algorithm for calculation of limits of numerical sequences and N -point Padé approximations*, in 10th Jubilee International Conference of the Balkan Physical Union Aug. 2018, AIP Conference Proceedings 2075, 110004 (2019).
4. T. M. Mishonov, Y. G. Maneva, M. V. Stoev and A. M. Varonov, *Heating of the solar corona by Alfvén waves – magnetohydrodynamic calculation of height temperature profile of the transition region*, Magnetohydrodynamics **55**(3), (2019), (in print)

3 Основни приноси

1. Показано е, че Ханес Алфвен е прав, че МХД вълни нагряват слънчевата корона. Направените МХД пресмятания недвусмислено показват, че Алфвеновите вълни се поглъщат в слънчевия преходен слой и отдавайки своята енергия, нагряват слънчевата атмосфера. Досега никой друг предположен механизъм за нагряване на слънчевата корона основан изцяло на физични процеси не е успял да покаже височинно зависимост на температурния профил.
2. Това МХД пресмятане изисква разработването на специален числен метод. В процеса на изследването и пресмятането това е постигнато. Този числен метод не е включен в никой достъпен комерсиален софтуерен продукт и това е основната причина това МХД пресмятане да не е направено досега.
3. Разработен е нов числен метод за решаване на нелинейни твърди диференциални уравнения. Този метод включва надежден механизъм за оценка и корекция на грешката, който е незаменимо средство за всяко числено пресмятане. Разработката на този числен метод е достойно за втори дисертационен труд, в този е описана само последната част от разработването му.
4. Нов член е добавен към уравнението за пренос на топлина в магнитохидродинамиката. Този член е пренебрежим при средно и високо температурна плазма и най-вероятно това е причината да бъде пропускан. Разбира се, възможно е авторът да е пропуснал публикуването на този член и в такъв случай той ще е много благодарен на всеки, който предостави статията, монографията или учебника, където този член присъства.

4 Литература

1. P. Swings, *Edlén's Identification of the Coronal Lines with Forbidden Lines of Fe X, XI, XIII, XIV, XV; Ni XII, XIII, XV, XVI; Ca XII, XIII, XV; a X, XIV*, ApJ **98**, 116–128 (1943);
B. Edlén, ArMAF **28**, B No. 1 (1941);
B. Edlén, ZA **22**, 30 (1942).
2. W. Grotrian, *Zur Frage der Deutung der Linien im Spektrum der Sonnenkorona*, NW **27**, 214 (1939), (in German).
3. B. Edlén, *Die Deutung der Emissionslinien im Spektrum der Sonnenkorona. Mit 6 Abbildungen.*, ZA **22**, 30–64 (1942), (in German).
4. H. Alfvén, *Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves*, Natur **150**, 405–406 (1942).
5. H. Alfvén, *Granulation, magnetohydrodynamic waves, and the heating of the solar corona*, MNRAS **107**, 211–219 (1947).
6. C. Day, *Magnetic waves pervade the Sun's corona*, PhT **62**, 5, 18 (2009).
7. J. A. Eddy, *A New Sun: The Solar Results from Skylab*, ed. by R. Ise, prep. by George C. Marshall Space Flight Center (NASA, Washington, D.C., 1979).
8. P. Wynn, *Upon Systems of Recursions which Obtain Among the Quotients of the Padé Table*, Numerische Mathematik **8**, 264–269 (1966).