

## РЕЦЕНЗИЯ

от доц. д-р Божидар Атанасов Сребров от Национален институт по геофизика, геодезия и география – БАН

относно

дисертационния труд на **Алберт Максимов Варонов**

за получаване на образователната и научна степен „доктор“ по научната специалност: Теоретична и математическа физика (01.03.01). Професионално направление 4.1. Физически науки

на тема: „**Нагриване на космическата плазма от магнитохидродинамични вълни**“

### **1. Предоставени материали на изготвящия рецензията:**

1. Дисертация - 81 страници, включително фигурите и библиографията
2. Автореферат - 7 страници, включително фигурите и библиографията
3. Копия на публикации по темата на дисертацията - 4 броя
4. CV на докторанта

### **2. Отразяване на публикациите на автора в литературата**

Не са дадени сведения за цитиране от други автори на публикациите на докторанта по темата на дисертацията.

### **3. Актуалност на дисертационната тема**

Проблемът за загряването на слънчевата корона е един от най-дълго нерешените проблеми на физиката на Слънцето. Това се дължи преди всичко на това, че до скоро не беше възможно да се извършват наблюдения на Слънцето отблизо. Актуалността на проблема е красноречиво обоснована от програмата на NASA Parker Solar Probe, <https://www.nasa.gov/content/goddard/parker-solar-probe-humanity-s-first-visit-to-a-star>,

която има за цел да изучи загадките на физиката на Слънцето. В последните години има определен напредък и в теоретичното разглеждане на проблема. Пример за това отношение е настоящият дисертационен труд.

#### 4. Кратка характеристика на дисертационния труд

Първата глава на дисертацията е озаглавена „Въведение“. За съжаление може да се констатира, че литературният обзор, направен във въведението, не е задоволителен. По темата на дисертацията съществуват значителен брой публикации, защото тя е поставена за разглеждане от научната общност от много десетилетия. При този голям обем от работи едва ли трябва да се цитират всичките, но не е приемливо да не са представени алтернативните хипотези за загряване на короната на Слънцето. Това трябваше да се направи не само, за да се покаже осведомеността на автора, но и да се направи очаквания от него подходящ коментар. Такъв коментар би следвало да има както във въведението, така и при разглеждането на крайните резултати от дисертационния труд. На практика авторът е направил обзор предимно на работите, които са свързани с идеята на Ханес Алфвен за загряване на короната на Слънцето от т.н. алфвенови вълни. Във въведението не са разгледани обзорните публикации, които описват състоянието на проблема и в които са описани алтернативните хипотези за загряване на плазмата в слънчевата корона. Такива публикации лесно се намират при справка в интернет. При такава справка попаднах на дисертация по темата от 2004 година, която не е намерила място в литературния обзор на автора. В нея е разработен проблемът за нагряване на короната на Слънцето с използване на 3D магнитохидродинамичен (МХД) модел. Авторът на тази дисертация е Boris V. Gudiksen и е озаглавена „The coronal heating problem“, Stockholm University, 2004.

Относно подхода за решаване на задачата по темата на дисертационния труд, тук в полза на докторанта Алберт Варонов се налага да се направи коментар от рецензента, преди да се премине към разглеждане на същността на дисертационния му труд. В рецензираната дисертационна работа е използвано едномерно приближение, изведено от тримерните уравнения на МХД. Прави впечатление, че в дисертационния труд на Gudiksen (цитиран по-горе) крайният резултат от 3D моделирането е същият като този в дисертационния труд на Алберт Варонов. Имаме предвид резултата за хода на изменение на температурата на короната на Слънцето в радиална посока, т.е. във височина. Това води до мисълта, че дори да се използва 3D МХД модел за решаване на поставената задача, поради нейната съществена едномерност, резултатът ще бъде аналогичен. Така, че подходът на Варонов за свеждане на МХД задачата за нагряване на слънчевата корона (от самото начало) към едномерна изглежда разумен. Тук като аргумент за избора на 1D пространствената размерност на задачата идва и относителният линеен размер на т.н. „transition region“ или преходен слой, разположен в горния край на хромосферата на Слънцето. Както е добре известно, в този тънък слой става най-значителното повишаване на температурата на плазмата до милиони градуси К. При експериментални наблюдения е установено, че дебелината на хромосферата е около 2800 км, а тази на преходния слой е около 800 км. Като вземем предвид, че радиусът на Слънцето е  $7,48 \cdot 10^7$  км, то преходният слой, където става рязко повишаване на температурата на хромосферната плазма,

представлява една много тънка зона. Това показва, че едномерното приближение на задачата за загряване на плазмата в слънчевата корона може да е напълно разумно.

Във втората глава на дисертацията, наречена "Извод на уравненията", обосновано е направен извод на уравненията за запазване на плътностите на потоците на енергията и импулса в едномерния случай съобразно задачата, решавана в дисертацията.

Трябва да отбележим, че въпреки разглежданите различни механизми на загряване на короната, в обзорните публикации по темата се извежда заключението, **че въпросът за механизма на загряването на слънчевата корона остава отворен**. Както вече споменахме, в настоящия момент научната общност очаква да получи съществена информация от изследователската програма на НАСА, наречена Parker Solar Probe.

Авторът на настоящата дисертация разработва идеята на Ханес Алфвен, че механизмът на загряване на короната на Слънцето се осъществява чрез магнитохидродинамични вълни, които разпространявайки се нагоре в хромосферата се поглъщат и това води до значителното нарастване на температурата в короната в сравнение с тази на фотосферата. Приема се, че в резултат от турбулентността във фотосферата в нея се генерират магнитохидродинамичните вълни, които се разпространяват нагоре в хромосферата.

Тъй като авторът на дисертацията, както споменахме вече по-горе, не е направил обстоен обзор на всички предлагани механизми на загряване на слънчевата корона, тук се налага те да бъдат споменати накратко. Основният алтернативен механизъм се нарича reconnection-type heating и се свързва с т. н. присъединяване на магнитните силови линии. Този тип нагряване може да съществува обаче и едновременно и с нагряването от вълни. Основният термин при механизма от reconnection-type heating е "Nanoflare", който се използва за описване на случаи на импулсно нагряване на плазмата в относително малка пространствена област. „Нанофлеасите“ могат да дават принос в радиацията от хромосферата и могат да генерират вълни, които да загряват плазмата. В последно време обаче се смята, че този механизъм не е основен за загряване на плазмата в хромосферата. Съществуват много аргументи, поддържащи това твърдение. Един от тях е, че силното електрично поле в малка пространствена област, което се получава при присъединяване на магнитни силови линии, може да ускорява само електронната компонента на плазмата в тази малка област. Както обаче е известно, веднага след преходния слой не само електроните, но и протоните имат много висока температура.

В първата секция на втора глава на дисертацията са изведени вълновите уравнения на алфвеновите 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 числени пресмятания. Във втората секция на втора глава е направен извод на уравненията за запазване на плътностите на потоците енергия и импулс в едномерния случай за задачата на дисертацията. 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 плазмената среда. Тази скорост има радиално направление и плазмата се движи нагоре в атмосферата на Слънцето. След това, чрез въвеждане на две нови безразмерни променливи са изведени две квадратни уравнения за безразмерните температура и скорост на плазмената среда.

В последната трета секция на втора глава са изведени граничните условия на вълновите уравнения. Така се завършва с извеждането на МХД уравненията за задачата на самоиндуцирана непрозрачност за алфвеновите вълни в силно йонизираната плазма. Съществен е следният механизъм на загряване на плазмата. Визкозитетът е силно зависим от температурата и малко нарастване на температурата води до значително нарастване на визкозитета и поглъщането на алфвеновите вълни, а това води до следващо повишаване на температурата. Подобен механизъм не е предлаган досега за обяснение на загряването на плазмата.

В настоящата дисертация можем да видим една завършеност, вече като модел, на идеята на Ханес Алфвен, че абсорбцията на хидромагнитните вълни е механизъмът на загряване на короната на Слънцето. Построяването на модела е извършено коректно и прецизно. В този модел няма неясноти и всичко е нормално и разбираемо. Това се отнася както към подходът за изграждането му, така и към описанието на физичната картина на механизмите на загряване на плазмата от алфвеновите вълни, която изглежда напълно приемлива. Така в дисертацията е постигната първата и по-важна задача за намиране на подходящ и достоверен модел на явлениято *Загряване на короната на Слънцето от високочестотни алфвенови вълни*.

По-нататък в третата глава на дисертацията е дадено описание на методите за реализиране на МХД модела на загряване на короната. В първата секция на тази глава е описан метод за решаване на вълновите уравнения, който е WKB приближение, приложимо при високочестотни алфвенови вълни. Втората секция на трета глава съдържа описание на числен метод за решаване на уравненията за плътностите на потоците на енергия и импулс. Това е предикторно-коректорен метод, състоящ се от екстраполираща част и коригираща част.

В последната секция на трета глава се съдържа описание на реализацията на предикторната част от числения метод, която използва свойството на Уин (Wynn identity). Тази реализация е направена специално за задачата на дисертацията и съдържа оригинална новост, която представлява механизъм за оценка и контрол на числената грешка на предикторната част.

В четвъртата глава на дисертацията са представени резултатите от числените пресмятания на МХД уравненията или на модела за нагряване на слънчевата корона от една алфвенова вълна. Получена е зависимостта на температурата на слънчевата плазма от височината. Този резултат от модела показва, че нарастването на температурата се дължи на поглъщането на алфвеновата вълна, като между двата процеса има положително обратна връзка, което обяснява стръмния преден фронт на температурния профил. Това стръмно нарастване на температурата определя и ширината на преходния слой. Получената по такъв начин стойност за тази ширина качествено съвпада със съвременните оценки. В тази глава са представени и височинните профили на скоростта на слънчевата плазма, както и плътностите на потоците на енергия и импулс.

**Авторефератът на дисертацията** е написан кратко и много добре, напълно отговаря на изискванията и правилно отразява извършената работа и приносите в дисертацията.

## **5. Приноси и значимост на резултатите**

В настоящата дисертация е показано убедително, чрез разработване на МХД модел, че алфвеновите вълни се поглъщат в преходния слой и, отдавайки своята енергия, нагряват слънчевата плазма. Резултатите от моделирането са в много добро съвпадение с модела на слънчевата корона и преходния регион, създаден по данни от наблюденията на спектъра на ултравиолетовото излъчване (E. Avrett and R. Loeser, *The Astronomical J. Suppl. Series* 175:229-276, 2008). Предложеният механизъм на нагряване на слънчевата корона се основава изцяло на физични процеси, което води до самоиндуцираната непрозрачност на хромосферата за алфвенови вълни. Тези физични процеси са магнитохидродинамични, както кинетични. Тук имаме предвид ролята на т.н. втори визкозитет при нагряването на плазмата. Досега в научната литература не е предложен подобен механизъм на нагряване на слънчевата корона.

Съществен принос при реализиране на процеса на изследването е създаването на специален числен метод, който е разработен специално за поставената специфична МХД задача в дисертацията.

В дисертацията е разработен и нов числен метод за решаване на нелинейни твърди диференциални уравнения.

## **6. Оценка на личния принос на докторанта**

В областта на изследване на механизма на загаряване на короната на Слънцето във Физическия факултет на СУ се е формирала една научна група под ръководството на проф. Тодор Мишонов, която работи на най-високо научно ниво. Алберт Варонов е активен член на тази група. Представените резултати в дисертацията са плод от труда на докторанта, а също и на част от тази общност. В някои части на дисертацията личи изключително много личния принос на докторанта. Например, в Глава II докторантът се изяснява като един от водещите специалисти у нас, показвайки много високо ниво на познаване на физиката на плазмата, физическата кинетика и, разбира се, физиката на слънчевата корона. Същото се отнася и то в по-голяма степен по отношение на III и IV глави на дисертацията. Той е водещ при създаването на числените методи и при тяхната софтуерна реализация. Тези впечатления имам от личните ми контакти с докторанта.

## **7. Кратки коментари, забележки и препоръки по дисертацията**

Заглавието на дисертацията не е много подходящо. Космическата плазма на английски (*space plasma*), като понятие, обхваща не само плазмата в хромосферата и короната на Слънцето, но и плазмените структури на космическото обкръжение на Земята. Например, плазмата в йоносферата на Земята, която е частично йонизиран газ, и изобщо не става въпрос за загаряване от механизми от типа на тези в короната на Слънцето. Космическа плазма се нарича и междупланетната среда на английски (*Interplanetary medium*), която на разстояние над около 20 слънчеви радиуса е безстълкновителна. При нея също става въпрос за пренос на енергия чрез различни процеси. Например, при

ранните двуфлуидни модели на междупланетната среда такава роля се отреждаше на топлопроводността на електроните и т.н..

Може би по-подходящо заглавие е това, което е използвано в публикациите на автора, а именно „Загряване на короната на Слънцето от алфвенови вълни“. Така че поради последното, приемаме това малко недоразумение, свързано със заглавието, за не толкова съществено.

## 8. Заключение

Представените документи и анализът, направен в предишните точки на рецензията, категорично показват, че докторантът Алберт Воронов отговаря напълно на изискванията на ЗРАС за придобиване на научна степен «доктор». Вземайки предвид постигнатите от него научни резултати и гореизложеното в рецензията, напълно убедено препоръчвам на членовете на журито по защитата да гласуват на **магистър Алберт Максимов Варонов** да бъде присвоена образователната и научна степен „**доктор**“ по научната специалност „Теоретична и математическа физика“ (01.03.01); Професионално направление 4.1. Физически науки

София, 03.07.2019 г.

Член на журито.....  
доц. д-р Божидар Атанасов Сребров