

Отзыв официального оппонента на диссертацию

А.Б. Горшкова

«ДИФФУЗИОННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В ЗВЕЗДАХ СОЛНЕЧНОГО ТИПА»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Диссертационная работа А.Б. Горшкова посвящена исследованию процесса диффузии в звездах солнечного типа. На самом деле, многие разработанные и внедренные диссертантом подходы могут быть применены и к звездам других классов. Однако наша близость к Солнцу и возможность его изучения методами, недоступными или неэффективными при изучении других звезд вследствие их удаленности, делает выбор объекта исследования **обоснованным**. Солнце – наиболее изученная звезда, таящая, тем не менее, еще достаточно загадок. Наиболее обще тему диссертации можно сформулировать следующим образом: насколько процессы диффузии способны изменить распределение химических элементов в звезде по сравнению со стандартным случаем, когда химсостав меняется только вследствие термоядерных реакций. Как подробно объясняется во **Введении** диссертации, диффузия в звездах обладает рядом особенностей из-за присутствия сильного гравитационного поля, градиентов температуры и давления, потока излучения и т.д. Это приводит к тому, что здесь диффузия приводит не к выравниванию химического состава по звезде, а, наоборот, к его дифференциации. Это прямо влияет на параметры звезды, в частности, на время её пребывания на главной последовательности. С развитием методов и средств наблюдений за Солнцем, как земных, так и космических, мы получаем все более точное представление о его строении. Это интересно как само по себе, так и как способ изучения явлений, недоступных для эксперимента в земных условиях. Например, многолетняя проблема солнечных нейтрино была разрешена в пользу существования нейтринных осцилляций не в последнюю очередь благодаря тому, что имеющаяся модель строения Солнца была достаточно точна. Поэтому данная работа, результаты которой могут быть применены для дальнейшего уточнения и объяснения процессов, происходящих на Солнце, безусловно, **актуальна**.

Рассмотрим основные **результаты** диссертационной работы. Она состоит из введения, четырех глав и заключения.

Первая глава посвящена описанию модели, используемой для расчета процесса диффузии. Автор начинает с уравнения Больцмана для функции распределения частиц, затем подробно описывает метод моментов для его решения в конкретной реализации Бюргерса. В итоге получена полная система уравнений, определяющая динамику смеси ионизированных газов в звездах. Далее описаны два разных подхода (метод Тоул и метод Мишо-Профи) для вычисления скорости диффузии в звёздных условиях. В заключении этой главы рассматриваются три основных составляющих процесса диффузии (концентрационная, баро- и термодиффузии) и обсуждается их физический смысл.

Во второй главе описывается реализованный автором метод постмодельных расчётов эволюции химического состава. Этот метод позволяет рассчитывать тонкие эффекты диффузии на уже готовых эволюционных профилях звезды. Возможность осуществления таких расчётов представляется чрезвычайно важной. Далее приводятся и подробно сравниваются между собой четыре использованных модели эволюции Солнца, рассчитанные разными авторами при различных предположениях. В последней части данной главы сравниваются скорости конвекции и диффузии, делается вывод о выравнивании концентраций всех химических элементов в конвективной зоне и приводится формула для расчёта скорости осаждения элементов из неё.

Третья глава посвящена диффузии основных элементов на Солнце – водорода и гелия. Подробно рассматриваются результаты действия различных диффузионных механизмов: концентрационной, баро- и термодиффузий. Важным здесь является подтверждённый расчетами вывод о близости результатов применения формул Мишо-Профи и схемы Тоул. Это даёт дополнительную уверенность в **достоверности** полученных результатов. Затем приводится сравнение с результатами других авторов и экспериментальными данными в отношении величины диффузионного осаждения гелия (и, соответственно, накопления водорода) в конвективной зоне. Результаты находятся в хорошем согласии. Затем в данной главе рассматривается влияние глубины конвективной зоны на наблюдаемые концентрации водорода и гелия в ней.

Показано, что нельзя значительно сдвинуть границу зоны конвекции без того, чтобы войти в противоречие с данными наблюдений. Этот результат, безусловно, служит важным ограничением на параметры моделей строения Солнца. В заключение приводится расчёт, показывающий, что из-за действия диффузии наше Солнце слегка раньше сойдет с главной последовательности, чем принимается в стандартной модели.

Глава 4 посвящена изучению диффузии тяжёлых элементов на Солнце, которая обладает рядом особенностей. Во-первых, тяжёлые элементы можно рассматривать как малые примеси по отношению к основным компонентам – водороду и гелию, и их диффузия идёт на фоне крупномасштабного осаждения гелия и, соответственно, всплытия водорода. Кроме того, для тяжёлых элементов становится важен учёт ещё двух эффектов: фотолевитации, т.е. взаимодействия с потоком излучения, и состояния неполной ионизации, особенно важной для железа. В данной главе подробно исследуются все эти эффекты, приводится расчёт состояния ионизации в Солнце шести выбранных тяжёлых элементов от углерода до железа, полученные величины осаждения этих элементов сравниваются с результатами других авторов. Исходя из профиля температуры на Солнце дано объяснение существования зоны накопления тяжёлых элементов под конвективной зоной.

Общие итоги по работе представлены в **Заключении**. Они соответствуют заявленным целям и задачам исследования, характеризуют заявленную научную новизну и практическую значимость работы, кратко суммируют основные результаты исследования. В частности, показано, что эффекты диффузии, рассчитанные в данной работе, не способны объяснить найденное спектроскопическими методами пониженное содержание кислорода во внешних слоях Солнца, и, следовательно, необходим поиск иных механизмов для его объяснения.

Научное и прикладное значение полученных результатов заключается, во-первых, в развитии и применении на практике методов исследования процессов диффузии в звёздах солнечного типа. Во-вторых, в уточнении моделей строения Солнца, что позволяет наложить важные ограничения на его параметры, в частности, на глубину конвективной зоны. О **востребованности** результатов диссертации говорит уже тот факт, что они были использованы разработчиками известного кода MESA, моделирующего звёздную эволюцию.

Достоверность результатов, полученных в работе, основывается на корректном применении математического аппарата, опробованных методах исследования процесса диффузии, а также данных наблюдений. В частности данные гелиосейсмологии дают весовую долю гелия в конвективной зоне Солнца на величину 0.03 меньше ожидаемой, что как раз и объясняется действием диффузии и прекрасно согласуется с результатами автора. Кроме того, результаты значительно более сложных расчётов осаждения тяжёлых элементов, проведённых автором, хорошо согласуются с результатами других исследований. Материалы диссертации прошли апробацию на двенадцати международных и российских конференциях и семинарах. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в университетах и научных организациях, занимающихся исследованиями в области астрофизики и физики Солнца. К таковым, в частности, относятся Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга при МГУ, «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики» НИЦ «КИ», ФГБУН «Институт астрономии РАН». Все основные результаты диссертации являются новыми и впервые опубликованы в работах автора.

К недостаткам работы можно отнести:

1. При описании используемого метода Бюргера для решения уравнения Больцмана на стр. 31 приводится выражение (1.36) для замыкания системы моментов, однако никакого пояснения такому выбору не даётся.
2. При описании диффузии водорода и гелия в методе Мишо-Профи формула (1.71) на стр. 37 для скорости диффузии содержит две величины: X и X_H , причём сам автор подчёркивает их различие: X – содержание водорода, полученное «из модели», а X_H – «вычисленное в процессе решения задачи диффузии». Не понятно, как физическая величина – скорость диффузии, может зависеть от величины, взятой из какой-либо модели, в то время как у нас есть реальная локальная величина X_H .
3. Важным фактором при расчёте процесса диффузии (особенно тяжёлых элементов) является эффект поляризации плазмы в гравитационном поле, в

результате которого возникает крупномасштабное электрическое поле E . Напряжённость его даётся формулой (1.82), стр. 43. Автору следовало бы привести его численные оценки, хотя бы по порядку величины, для солнечных условий.

4. Как показано в диссертации, в области действия конвекции процессами диффузии можно пренебречь и считать, что химсостав здесь однороден. В более глубоких слоях Солнца перенос энергии осуществляется излучением, вещество находится в условиях лучистого равновесия. Но при этом и при наличии у звезды вращения обязательно возникает меридиональная циркуляция (парадокс фон Цейпеля!). Солнце хоть и медленно (с периодом порядка нескольких десятков суток), но вращается, а, значит, меридиональная циркуляция есть и в его недрах. Строго говоря, автор во второй главе ясно формулирует основные допущения, постулированные им при решении задачи: «сферическая симметрия, отсутствие вращения и магнитного поля». Однако следовало бы сделать оценку характерной скорости перемешивания, вызванного меридиональной циркуляцией на Солнце и сравнить её с рассчитанными скоростями диффузии.
5. Раздел 4.3.7 (стр. 108) посвящён найденной автором «линейности осаждения тяжёлых элементов из конвективной зоны по начальному содержанию». Однако приведённый график 4.17 показывает, что величина осаждения зависит линейно от начального содержания в дважды-логарифмическом масштабе (по оси x и по оси y). Таким образом, правильнее говорить о степенной зависимости ΔX от X_0 .
6. Диссертация очень грамотно написана и тщательно выверена, можно сделать всего несколько редакторских замечаний: при форматировании формулы (2.10) на стр. 60, видимо, произошёл сбой и она стала занимать четыре строки вместо максимум двух. В описании рисунка 3.7 на стр. 69 перепутаны типы линий (сплошная, штриховая и т.д.). На рис. 4.4 (стр. 87) отсутствует вертикальная линия, обозначающая границу конвективной зоны, хотя в подписи к рисунку она упоминается.

Тем не менее, отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку работы, ее научную ценность и полезность проведенных исследований. Развитые и реализованные автором подходы к моделированию процесса диффузии в звёздах, в частности, метод постмодельных расчётов, безусловно, найдут своё применение в дальнейшем. Более того, рассмотренные автором эффекты могут иметь интересные и важные следствия и в применении к более массивным, чем Солнце, звёздам. Например, эффект фотолевитации, по-видимому, будет значительно выше вследствие большей роли давления излучения в них. В массивных звёздах, в которых горение водорода осуществляется по CNO-циклу, эффект осаждения этих элементов из оболочки в ядро может иметь важные следствия и т.д.

Диссертация Алексея Борисовича Горшкова «Диффузионная эволюция химического состава в звёздах солнечного типа» выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу. Она удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия.

Официальный оппонент
кандидат физико-математических наук,
начальник Лаборатории Физики Плазмы и Астрофизики
ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «КИ»
Почтовый адрес: 117218, Россия, г. Москва,
ул. Большая Черёмушкинская, д. 25
тел. 8 (499) 123-75-65, e-mail: yudin@itep.ru


Юдин Андрей Викторович

Подпись А.В. Юдина заверяю:
Учёный секретарь
ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «КИ»
кандидат физико-математических наук



Васильев Валерий Васильевич

10 августа 2016 г.