

Отчет за 2023 год по теме «Гелиофизика и гелиосейсмология»

Номер госрегистрации АААА-А20-120012990071-0

Руководитель В.А. Батурин

По теме работает 4 человека, все кандидаты физ.-мат. наук, из них 3 старших научных сотрудника (В.А. Батурин, С.В. Аюков, А.В. Орешина), 1 научный сотрудник (А.Б. Горшков).

Статистика публикаций за 2023 год.

Вышло из печати 4 публикации, из них 3 в журналах (две в А&А, также в «Известия КрАО»), и одна в сборнике статей (труды конференции).

Доклады на конференциях и совещаниях.

Сделано 7 докладов, все устные, на 5 конференциях. 3 доклада от нашей группы on-line на конференции в Сиерре, Швейцария и 4 доклада на российских конференциях в соавторстве.

Основные направления деятельности по теме в 2023 г.

1. Теория ионизации плазмы и совершенствование УрС SAHA-S

1.1 Развитие версии SAHA-S

Объектом изучения является комплекс данных, вместе с системой их интерполяции, позволяющих исследовать термодинамические свойства плазмы в недрах звезд, подобных Солнцу. Комплекс включает непосредственно измеримые величины, такие как давление, удельную теплоемкость, показатель адиабатической сжимаемости. В базу данных так же входят величины, связанные с дифференциалами многообразий, и термодинамические потенциалы, такие как внутренняя энергия и удельная энтропия. Кроме того, доступны функции распределения по ионным состояниям, а также статистические суммы для отдельных ионов. Последнее играет принципиальную роль в расчетах астрофизических непрозрачностей и в сравнительном анализе между уравнениями состояния. Рассчитаны дополнительные таблицы величин, позволяющие вычислять ионизационный Г-спектр отдельных элементов.

Задачи текущего этапа условно делятся на две части.

Первая часть результатов получена в версии SAHA-S вер. 7. Выполнен расчет семейства версий УрС для изучения влияния смесей тяжелых элементов (т.е. тяжелее гелия по атомному весу) на адиабатические профили показателя сжимаемости Γ_1 . В дополнение к библиотеке стандартных содержаний, общепринятых в настоящее время, были также рассчитаны и исследованы экспериментальные смеси (обозначаемые M1-M4). В этих дополнительных смесях исследовалось изменение содержания в парах O-C (кислород – углерод), O-Ne (кислород – неон) при фиксированной доле «негазообразных» элементов, то есть тех элементов в смесях, которые тяжелее Ne. В нашем случае это - Mg, Si, S, Fe.

Расчетные профили использовались для расчетов моделей и гелиосейсмических инверсий, а также для анализа адиабатических структурных инверсий.

Важнейшие результаты связаны с (1) определением содержания тяжелых элементов по гелиосейсмической инверсиям; (2) определением содержания кислорода по профилю Г1 в нижней части адиабатической конвективной зоны; (3) моделированием профиля Г1 на фоне почти полностью ионизованных водорода и гелия.

Вторая часть связана с переходом на следующий уровень развития SAHA-S к версии 8.04 и получением на ее основе важных теоретических и прикладных астрофизических результатов.

Новое в версии SAHA-S8.04: предложен новый алгоритм расчета эффективного статистического веса для водорода и водородоподобных ионов; усовершенствована системы возбужденных состояний для гелия; проведены расчеты с моделями статистических сумм Старостина-Периха (SR) по сравнению с моделью Планка-Ларкина (PL).

1.2 Результаты по теории уравнения состояния.

-Изучен вклад возбужденных состояний водорода в эффективный статистический вес. Показано, что в случае модели SR возбужденные состояния повышают статистический вес до 20% в максимуме. Показано, что такое повышение происходит не только за счет второго уровня, но и за счет более высоких возбужденных состояний.

- Рассмотрена разница между моделями SR и PL. Показано, что обе модели образуют общее семейство температурных статистических функций с обрезающим множителем и подобным асимптотическим поведением.

- Была изучена ионизация водорода в солнечной оболочке в рамках двух моделей. При сравнении моделей обнаружен сдвиг по температуре области ионизации водорода, который ведет к аномальному сдвигу в крыле профиля показателя упругости Г1. Предложено объяснение данному явлению, основанное на интегральных характеристиках поля адиабат.

- Найдено, что сдвиг крыла профиля Г1 в области ионизации водорода ведет к акустически структурному смещению положения зоны ионизации гелия в конвективной зоне Солнца.

- Выполнен сравнительный анализ ионизационных термодинамических вкладов в уравнения состояния Free EOS и SAHA-S. Подтверждена эффективность метода для анализа свойств ионизации элементов в условиях солнечной плазмы. Метод позволяет выявить нерегулярности и ошибки в расчетах УрС, как это получено в случае FreeEOS.

- На основании элементарных разложений ионизационных вкладов был предложен метод регуляризации разложения с помощью фиксации содержания «нелетучей» группы элементов, тяжелее неона. Такая регуляризация продемонстрировала эффект стабилизации результатов МНК методе для оценки индивидуальных содержаний O и C. В тоже время, в применении такого подхода выяснилась высокая чувствительность к точности описания ионизационных вкладов сложных (не подобных водороду и гелию) ионов.

2. Современное моделирование Солнца. Процедура расширенной эволюционной калибровки.

Введение. Стандартная процедура эволюционной калибровки была расширена с помощью введения дополнительных свободных и целевых параметров, что позволяет получать модели внутреннего строения Солнца не только с заданными радиусом и светимостью, но и с заданной глубиной конвективной зоны, содержанием гелия во внешних слоях.

Целью работы была разработка метода, позволяющего получать модели внутреннего строения Солнца с заданными параметрами строения, а именно 1) глубиной конвективной зоны; 2)

химическим составом конвективной зоны; 3) плотностью в конвективной зоне. Такие модели используются как для общего анализа задачи расчета строения и эволюции Солнца, так и для проведения гелиосейсмических инверсий, которые основываются на моделях внутреннего строения Солнца.

Метод заключается в том, что в модель Солнца вводятся дополнительные свободные параметры, которые и подбираются для получения нужной модели. Такие модели являются нестандартными, т.к. в стандартной модели свободных параметров недостаточно. В качестве таких новых свободных параметров предложены: 1) локальная коррекция непрозрачностей в области нижней границы конвективной зоны; 2) глобальная коррекция непрозрачностей; 3) изменение сечения ядерной реакции $p+p$; 4) введение проникающей конвекции. Данные модификации модели оказались достаточно эффективными для решения задачи.

Результаты показали, что расчет нестандартных моделей вышеуказанным способом является эффективным способом построения моделей Солнца с нужными характеристиками. Были получены как отдельные модели, так и целые сетки моделей Солнца, в которых перебирается химический состав конвективной зоны (содержание гелия Y и содержание более тяжелых элементов Z). Эти модели и сетки моделей были использованы при проведении гелиосейсмических инверсий для изучения химического состава адиабатической части конвективной зоны.

Выводы. Несмотря на то, что получаемые модели включают произвольные модификации физических величин (непрозрачность, ядерные реакции и др.), они могут быть эффективно использоваться для целей гелиосейсмической инверсии.

3. Гелиосейсмическая инверсия Γ_1 и калибровка химического состава

3.1 Изучение профиля Γ_1 методом структурной инверсии

- Метод структурной инверсии даёт профиль показателя адиабатической упругости $\Gamma_1(r)$ в конвективной зоне Солнца, который сравнивается с теоретически профилем, рассчитанным на основании уравнения состояния. Структурная инверсия основана на анализе многообразия моделей, которые находятся в гидростатическом равновесии и адиабатически стратифицированы. В результате аналитического анализа выявлено различие между инверсией и теорией, которое связано с ошибками в описании самых верхних слоёв конвективной зоны.

- Показано, что профиль структурной инверсии даёт предпочтение моделям с низким содержанием тяжелых элементов $Z=0.013-0.014$ в конвективной зоне Солнца.

3.2 Изучение адиабатической конвективной зоны с помощью гелиосейсмической калибровки

Введение. Прохождение акустических волн через адиабатическую часть конвективной зоны описывается формулами, в которые входит адиабатическая упругость плазмы Γ_1 как основной компонент. С другой стороны, величина Γ_1 является чисто термодинамической и зависит от состава вещества. Поэтому скорость прохождения акустических волн в верхней части конвективной зоны зависит почти исключительно от химического состава и уравнения состояния; можно предпринять попытку определить, какой состав вещества наилучшим образом описывает прохождение волн.

Метод гелиосейсмической калибровки заключается в расчете прохождения волн через данные слои (описываемые некоторой моделью Солнца) и сопоставлении характеристик распространения волн с наблюдаемыми значениями. Ключевым компонентом метода являются определенные из

наблюдений собственные частоты колебаний Солнца. Распространение волн, имеющих данные частоты, рассчитывается от поверхности до нижней точки поворота, которая лежит в изучаемой области, и фазовая характеристика пути волны определяет, насколько хорошо модель воспроизвела распространение волны. Качество воспроизведения может быть описано величиной M , которая соответствует частному от деления полученных фазовых ошибок и оценок ошибок наблюдаемых частот. В данной работе использованы самые современные оценки собственных частот.

Результаты зависят от уравнения состояния, используемого при моделировании, а также от размера части конвективной зоны, используемой для анализа. Наиболее устойчивым является анализ, ограниченный только самой верхней частью конвективной зоны. Новая версия уравнения состояния SAHA-S (8.04) позволяет достичь $M=1.5$, что свидетельствует об очень высоком качестве воспроизведения распространения волн. Содержание гелия весьма устойчиво определяется равным $Y=0.255$, содержание более тяжелых элементов $Z=0.009$. Включение в анализ более глубоких слоев конвективной зоны дает более реалистичные оценки: $Y=0.25$, $Z=0.014-0.016$. Характеристика M ожидаемо хуже (3-3.9); описать все части конвективной зоны на одном уровне точности пока не удается.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что описание термодинамики в разных частях конвективной зоны отличается: для разных слоев оптимальным оказывается разное количество тяжелых элементов. Это может говорить как о проблемах в уравнении состояния, так и о проблемах в моделировании Солнца, хотя в конвективной зоне влияние последних минимально. Нельзя сбрасывать со счетов и возможные ошибки в определении наблюдаемых частот колебаний.

3.3. Гелиосейсмическое определение массовой доли металлов на Солнце

Введение. Массовая доля металлов Z в солнечной плазме является ключевым параметром в моделировании Солнца, но ее точное определение бурно обсуждается в настоящее время. Стандартный солнечный химический состав, принятый к концу 2000-х годов, давал соотношение металлов к водороду $Z/X = 0.0181$ с некоторым уточнением до 0.0187 в 2021 году, и был основан на 3D неравновесных моделях атмосферы. Однако в более поздних работах, с использованием усредненной по горизонтали и времени 3D-моделью, утверждалось, что $Z/X = 0.0225$. Такое новое определение возвращало к высоким значениям двадцатипятилетней давности, основанным на одномерной LTE-спектроскопии. Решению данного противоречия и посвящено большинство современных работ в моделировании Солнца.

Целью настоящего этапа НИР является альтернативное определение массового содержания тяжёлых элементов Z в солнечной конвективной оболочке на основе гелиосейсмических инверсий профиля показателя адиабатической упругости.

Метод заключается в сейсмической реконструкции профиля Γ_1 оболочки Солнца, сочетающей комбинированные инверсии Γ_1 и точное уравнение состояния плазмы для определения значения массовой доли тяжёлых элементов. Использованный профиль Γ_1 был получен в рамках нового метода инверсии бельгийскими коллегами, тогда как для подбора теоретических значений и получения оценки Γ_1 использовалось наше уравнение состояния SAHA-S.

В результате получено значение $Z=0.0137\pm 0.0004$. Такое значение согласуется с низкой спектроскопической оценкой, $Z/X = 0.0187$, и противоречит высоким значениям, $Z/X = 0.0225$.

3.4. Гелиосейсмическая оценка содержания кислорода в конвективной зоне Солнца

Введение. Профиль показателя адиабатической упругости Γ_1 в конвективной зоне Солнца лежит в основе оригинального метода ионизационных спектров, который развивается несколько лет в рамках темы НИР. Современные методы гелиосейсмологии позволяют определить профиль Γ_1 из наблюдаемых частот пятиминутных колебаний. Теоретический профиль Γ_1 является характеристикой термодинамики плазмы и отражает поэлементный химический состав. Нами использовались метод линейного МНК разложения и метод синтеза ионизационных вкладов.

Целью работы является сопоставление теоретических модельных профилей Γ_1 с профилем, полученным из гелиосейсмической инверсии. На основании наилучшей подобранной теоретической кривой, предполагается сделать выводы о содержании тяжелых элементов.

Метод основан на эффекте понижения показателя упругости плазмы в областях ионизации элементов, составляющих плазму. Понижение показателя упругости пропорционально содержанию элемента и имеет уникальную зависимость от температуры и радиуса внутри Солнца. Мы используем метод *линейного синтеза профиля* Γ_1 на основе суммирования вкладов отдельных тяжелых элементов, который позволяет избежать трудоемких расчетов всей таблицы уравнения состояния. Подбирая содержания тяжелых элементов, мы находим смесь, наилучшим образом описывающую инвертированный профиль Γ_1 .

Результаты демонстрируют, что гелиосейсмические профили Γ_1 удаётся воспроизвести с точностью $(1-2)e-5$, несколько изменяя относительные содержания основных элементов (O, C, Ne, N) по сравнению со стандартными отношениями в смеси AGSS09. При этом массовая доля кислорода находится в диапазоне $Z_{\text{oxygen}}=(0.58-0.62)e-2$, соответствующее логарифмическое обилие $\lg \varepsilon(\text{Oxygen}) = 8.69 - 8.72$. Отношение C:O=0.35-0.36. Содержание элементов тяжелее Ne предполагается равным принятому в спектроскопических наблюдениях.

Выводы. Метод теоретического синтеза профиля показателя адиабатической упругости применяется к данным, полученным из гелиосейсмической инверсии. Мы показываем, как относительные вариации химического состава плазмы могут объяснять детали в гелиосейсмически инвертированном профиле Γ_1 .

4. Астросейсмические приложения

4.1. Характеристики конвективной зоны в спектре колебаний F-звёзд

Проведено теоретическое моделирование проникающей конвекции под дном конвективной зоны звёзд класса F. Получена аналитическая связь между характеристиками этой области и возмущениями акустических частот. Показано, что глубина проникающей конвекции в моделях влияет на отношение r_{010} малого и большого расщепления для мод $l=0$ и $l=1$, изменяя амплитуду осциллирующей компоненты в r_{010} . Результаты планируются использовать для оценки глубины проникающей конвекции в звездах на основе астросейсмических данных, полученных спутником Kepler. (Результаты опубликованы в этом году в «*Astronomy and Astrophysics*»).

4.2. Эволюционная калибровка двойной системы alpha Centauri A & B.

Система alpha Centauri A & B является достаточно близкой и хорошо изученной, что позволяет с хорошей точностью определить ее современные звездные параметры. В последние годы получены новые, уточнённые, данные по массе компонент системы, их светимостям и радиусам. Это делает актуальным пересмотр существующих моделей. По совокупности параметров

предполагается определить возраст системы, а также начальное содержание тяжелых элементов и в дальнейшем параметры конвективной зоны.

Актуальность задачи связана с тем, что обе звезды оказываются близкими к Солнцу по массе. Тем самым, с одной стороны, есть возможность применить знания о детальной эволюции звезд солнечного типа к этим двум звездам. Прежде всего, это касается теории осаждения тяжелых элементов из внешних слоев звезд, а также теории стандартной эволюции звезды, подобной Солнцу, на главной последовательности. С другой стороны, при решении задачи построения эволюционных траекторий звезд, появляется возможность уточнить наши представления о самом Солнце. В частности, речь идет о решении дилеммы о низком или высоком содержании тяжелых элементов в оболочке Солнца. Для решения этой проблемы задача об эволюционной калибровке alpha Centauri может оказаться весьма полезной.

Сочетание методов эволюционной калибровки и наблюдений астросейсмологии ведет к принципиально новым возможностям в исследовании эволюции звезд. В частности, ставится задача об уточнении возраста системы alpha Centauri, а также о химическом содержании элементов в звездах.

Мы предложили метод обратной калибровки эволюции звездной системы. Он основан на хорошо изученном методе калибровок моделей Солнца, когда известными величинами являются наблюдаемые светимость, радиус и химический состав звезд, а также возраст Солнца. В случае звезд последний оказывается неопределенным и поэтому солнечная калибровка не использовалась напрямую для построения моделей звезд. Однако в случае двойной системы предполагается, что звезды образовались одновременно. То есть возраст неизвестен, но он одинаков для обеих звезд.

Наш метод предполагает построение пар звездных моделей с пробным точно задаваемым возрастом. Тем самым, для каждой из пары звезд задача эквивалентна задаче солнечной калибровки. Далее, наш метод предполагает обращение эволюционного отображения, то есть получение множества точек в пространстве начальных значений содержаний гелия и тяжелых элементов таких, что эволюционные треки, построенные для этих параметров, дают наблюдаемые светимость и радиус при предполагаемом возрасте. Это и есть обратная калибровка. На конечном этапе мы ищем множество совпадающих начальных значений химического состава и возрастов. Это множество совпадений, если оно существует, и образует решение задачи.

Построение обратного эволюционного отображения может быть сопряжено с вычислительными трудностями, поскольку вычисление каждой точки прямого отображения требует серьезных вычислительных затрат (до нескольких суток в нашем случае). Нами был исследован метод обращения дифференциала эволюционного отображения для ускорения сходимости к решению обратного отображения.

Результаты текущего этапа. Наши оценки показывают, что с новыми массами возраст системы alpha Centauri оценивается в 7-8 млрд. лет. В процессе калибровки получены оценки начального содержания тяжелых элементов 0.027-0.028 и начального содержания гелия 0.27-0.28. (Работа предполагает дальнейшее развитие).

5. Наблюдения и анализ избранных вспышек и протуберанцев на Солнце

В работах приведены результаты обработки наблюдений солнечного протуберанца и вспышки на спектрографах MFS и HSFA2 обсерватории Ондржейов (Астрономический институт, Чешская Республика) в линиях водорода, гелия и кальция. Одновременные наблюдения в нескольких линиях позволяют восстановить параметры плазмы с высокой степенью надёжности. С помощью спектров определены интегральные потоки в линиях и рассчитаны температура плазмы, её концентрация и др. Показано изменение физических параметров плазмы на временной шкале от одной до двадцати минут, а также высокая степень неоднородности: температуры соседних областей могут различаться на порядок величины.

Опубликованные статьи

1. Deal M., Goupil M.-J., Cunha M.S., Monteiro M.J.P.F.G., Lebreton Y., Christophe S., Pereira F., Samadi R., Oreshina A.V., Buldgen G. "Glitches in solar-like oscillating F-type stars. Theoretical signature of the base of the convective envelope on the ratios τ_{10} ." // *Astronomy and Astrophysics*, том 673, с. 1-19 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245103>
2. Y. A. Kupryakov, K. V. Vyckov, O. M. Belova, A. B. Gorshkov, V. A. Maliutin "Наблюдение и расчет модели спокойного протуберанца" // *Proceedings of the 27th All-Russia Conference on Solar and Solar-Terrestrial Physics*. — The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo Москва: 2023. — С. 199–202.
3. Ю. А. Купряков, К. В. Бычков, О. М. Белова, А.Б.Горшков, Р. Kotrc "Наблюдение солнечной вспышки sol 2015–10–01 и расчет ее излучения в модели наложения нагретых слоев" // *Изв. Крымской астрофизической обсерватории*. — 2023. — Т. 119, № 1. — С. 19–26.
4. Buldgen G., Noels A., Baturin V.A., Oreshina A.V., Ayukov S.V., Scuflaire R., Amarsi A.M., Grevesse N. "Helioseismic determination of the solar metal mass fraction" // *Astronomy and Astrophysics* DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346928>

Доклады на конференциях

1. Baturin V.A., Oreshina A.V., Ayukov S.V., Gryaznov V.K. "SAHA-S Equation of State. Present state and recent results" // "Solar workshop: The future of solar modelling", Sierre, Switzerland, 4-7 сентября 2023 (Устный)
2. Ayukov S.V., Baturin V.A., Oreshina A.V. "Standard and extended calibration procedures" // "Solar workshop: The future of solar modelling", Sierre, Switzerland, 4-7 сентября 2023 (Устный)
3. Oreshina A.V., Baturin V.A., Buldgen G., Gryaznov V.K., Ayukov S.V., Noels A., Scuflaire R. "Recent inferences of element abundance from helioseismology" // "Solar workshop: The future of solar modelling", Sierre, Switzerland, 4-7 сентября 2023 (Устный)
4. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б., Малютин В.А. "Наблюдение и расчет модели спокойного протуберанца" // XXVII Всероссийская ежегодная конференция с международным участием по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2023", Санкт-Петербург, Россия, 9-12 октября 2023 (Устный)
5. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б. "Эволюция физических параметров вспышки SOL 2012-07-05 по оптическим наблюдениям в линиях водорода" // Всероссийская конференция с международным участием «Физика звезд: теория и наблюдения», МГУ, ГАИШ, Россия, 27-30 июня 2023 (Устный)

6. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б., Barta M. “ Эволюция солнечной вспышки SOL 2013-05-17: анализ оптических спектров (серия Бальмера) и квазипериодические пульсации” // “Магнетизм и активность Солнца - 2023”, Крым, пгт Научный, Россия, 13-16 июня 2023 (Устный)
7. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б. “Расчет модели спокойного протуберанца”// 18-я ежегодная конференция Физика плазмы в Солнечной системе, 6-10 февраля 2023, Москва, Институт космических исследований РАН, Россия, 6-10 февраля 2023 (Устный)

Научное сотрудничество со сторонними организациями

Коллектив сотрудничает со следующими отечественными и зарубежными организациями:

1. ИФЗ, Москва (*С.В.Воронцов*)
2. МФТИ, г. Долгопрудный (*И.Л.Иосилиевский*)
3. ИХФ, г. Черноголовка (*В.К.Грязнов*)
4. Département d’Astronomie, Université de Genève, Switzerland (*G. Buldgen*)
5. Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Universidade do Porto, CAUP, Portugal (*M. Deal*)
6. Université de La Côte d’Azur, OCA, Laboratoire Lagrange CNRS, BP. 4229, 06304 Nice Cedex, France (*Frederic Thévenin*)
7. ИСЗФ РАН, Иркутск (*Л.К. Кашапова*)
8. Астрономический институт Чешской академии наук (*P. Heinzel, P. Kotrč, M. Bárta*).