

Отчет за 2022 по теме «Гелиофизика и гелиосейсмология»

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).

Основные направления и результаты

1. Развитие метода анализа ионизационных вкладов в адиабатическую упругость плазмы.

В центре исследования находится предложенный нами метод анализа адиабатической упругости Γ_1 с разложением по ионизационным вкладам тяжелых элементов (которые называются Z-вкладами) на фоне полностью ионизованной водородно-гелиевой плазмы.

Сокращенно: *Метод ионизационного анализа.*

Метод ионизационного анализа имеет обширные и глубокие аналогии с методом оптической спектроскопии. С некоторой долей обобщения, его можно назвать методом ионизационной спектроскопии. Основные аналогии с оптической спектроскопией следующие.

- Z-вклад от ионизации элемента пропорционален его содержанию.
- Z-вклад одного элемента не зависит от вкладов других элементов.
- Температура ионизации зависит от потенциала ионизации (который хорошо известен как фундаментальная характеристика) и от энтропии адиабаты, и её значение не влияет (в рамках модели фоновой ионизации) на интеграл от Z-вкладов.
- В общем случае, вклады последовательных ионизаций пересекаются, хотя существуют важные примеры, такие как ионизация K-электронов, когда Z-вклады становятся изолированными.

- Основы метода ионизационных вкладов, которые были изложены в статье А&А.

Метод основан на нескольких фундаментальных предположениях о процессе *идеальной классической адиабатической ионизации* малой примеси. В рамках этого определения, «идеальность» означает отсутствие явных кулоновских и других (обменных, дифракционных) членов в уравнении состояния, «классичность» означает малый параметр вырождения электронов в условиях рассматриваемых ионизаций, «адиабатичность» соответствует нагреванию вещества сжатием при условии тепловой изоляции. Ионизация *малой примеси* рассматривается на фоне почти полностью ионизованных водорода и гелия.

Главные факты, установленные нами для обоснования метода ионизационного анализа, следующие.

- (а) линейность Z-вклада по отношению к ионам различных элементов;
- (б) линейность вкладов последовательных ионизаций;
- (в) линейность ионизации примеси тяжелых элементов на фоне постоянной ионизации основных элементов;
- (г) компенсация неидеальности в плазме при использовании Z-вкладов вместо самого профиля адиабатической упругости;
- (д) малые возмущения Z-вкладов при возмущении адиабаты в предположении фоновой ионизации.

Главными проблемами метода ионизационного анализа являются следующие.

(а) Большая ширина профилей Z-вкладов по сравнению с расстоянием между положением вкладов, а также по сравнению с доступными интервалами для изучения.

(б) Плохая обусловленность задачи разложения по базису элементарных вкладов. Базис оказывается близким к вырожденному и плохо обусловленным.

(в) Возможные термодинамические возмущения базисных вкладов плохо изучены и могут вести к значительным ошибкам при применении разложения по ним.

Все указанные выводы были получены при расчётах с уравнением состояния (УрС) SAHA-S. В процессе этих расчетов была доказана исключительная внутренняя согласованность SAHA-S.

- Метод тестировался на альтернативных уравнениях состояния.

Разложение профилей из FreeEOS

В рамках метода ионизационного анализа адиабатической сжимаемости проведено тестирование УрС FreeEOS версии 2.2.1 (2008г). Были рассчитаны ионизационные вклады отдельных элементов для 19 элементов тяжелее гелия. Эти вклады рассчитывались для условий, характерных для конвективной зоны Солнца, и сравнивались с вкладом, рассчитанным по УрС SAHA-S. В первом приближении, Z-вклады, рассчитанные для FreeEOS, отражают физику ионизационных процессов и похожи на вклады SAHA-S. Однако в профилях FreeEOS наблюдаются сдвиги ионизационных пиков, а также дополнительные (нефизические) вариации, причем амплитуда их весьма значительна, и не позволяет ставить задачу определения ключевых элементов, таких как O и Ne. В результате, мы оцениваем точность профилей FreeEOS как недостаточную для выполнения ионизационного анализа.

Разложение профилей из OPAL

Теоретические эксперименты с Z-вкладами, вычисленными в рамках УрС OPAL, и разложенными по базисным функциям SAHA-S. Показано, что в диапазоне температур $lgT=5.4-5.5$ показатели Γ_1 в двух этих уравнениях состояния отличаются на величину порядка $1e-3$. При этом существующая особенность в OPAL не имеет физического основания и интерпретируется как артефакт. Если изолировать проблемный участок и повторить разложение, то содержание кислорода определяется с точностью 4-8 процентов, углерода 6-13 процентов. Эти оценки получены в модельном эксперименте при $Z=0.02$. Такой кросс-анализ между УрС позволяет получить оценку внутренней точности уравнений состояния. Для OPAL такую точность можем оценить на уровне $1e-4$ по величине Γ_1 без учета сильных выбросов.

- Применение метода к результатам гелиосейсмических инверсий.

В этом году метод ионизационного анализа был впервые применен к профилю гелиосейсмической инверсии реальных солнечных данных с целью получения содержания основных тяжелых элементов.

Разложение инверсионной Γ_1 0061s12.2, построенной на основе модели 771-0061 с низким содержанием тяжёлых элементов ($Z=0.008$).

При использовании метода ионизационного анализа были проведены многочисленные эксперименты, направленные на регуляризацию результатов разложения по элементному базису. Эти эксперименты включают разложение по восьми элементам без ограничений, по восьми элементам с условием положительности коэффициентов, по четырём основным элементам, по четырём элементам с фиксированным вкладом Mg, Si, S и Fe.

Результатом проведенных исследований является вывод, что использование методов регуляризации не ведет к устойчивому или правдоподобному результату.

Среди других методов МНК-разложения рассматривались такие как разложение производной Z-вклада по производным базисных функций (8, 8 с $Z>0$, 4), разложение инверсионной Γ_1 по разным адиабатам (адиабата оказалась на 5% менее плотной, чем модель). Также проводились

эксперименты с произвольными содержаниями C, N, O, Ne. Все они показали, что инверсионная Г1, построенная на основе модели со «сверхнизким» $Z=0.008$, не приводит к надёжному результату.

Анализ инверсионных Г1, рассчитанных на основе разных моделей Солнца, отличающихся смесями, содержанием тяжёлых элементов Z и гелия Y.

Два основных результата на сегодняшний день:

- 1) По амплитудному анализу инверсий, мы принимаем как оптимальную и достоверную модель с низким содержанием тяжелых элементов, $Z=0.0136$.
- 2) Условная оценка содержания кислорода составляет $Z_O = 0.6-0.66$. «Условность» оценки связана с правильностью оценки общего содержания Z.

2. Аналитическая теория идеальной адиабатической ионизации.

В рамках модели идеальной ионизации, а также на основе модели однократной фоновой ионизации, получены аналитические решения для профилей Z-вкладов. В рамках такого приближения, получены фундаментальные результаты об адиабатической ионизации. Среди них:

- существование высокотемпературного предела неполной ионизации вдоль адиабаты; величина этого предела зависит от энтропии, но также от отношения статистических сумм;
- параметры любого ионизационного перехода, выраженные через отношение потенциала к температуре, универсальны для заданной адиабаты и статистических весов;
- зависимость амплитуды Z-вклада от энтропии адиабатической траектории;
- сохранение интеграла Z-вклада при изменении температуры ионизации;
- асимметрия профиля Z-вклада, так же зависящая от энтропии;
- зависимость температуры ионизации от статистической суммы ионов.

Также рассмотрена задача о двукратной ионизации. В этом случае главную роль играют соотношения статистических сумм последовательных ионизаций. При наложении двух ионизационных переходов особую роль играет последовательность ионизаций He-подобных ионов в H-подобные ионы.

3. Структурный анализ гидростатически равновесного решения в адиабатической модели конвективной зоны.

Получены аналитические выражения для связи между поправкой к плотности и поправкой к Г1. С одной стороны, это отображение из профиля плотности в профиль Г1. Такое отображение используется в алгоритме инверсии наблюдательных данных. С другой стороны, мы получили обратное отображение возмущений профиля Г1 в градиент плотности.

Главный результат – в обратном отображении сама плотность по профилю Г1 не восстанавливается, а восстанавливается только градиент плотности. Тем самым, в гелиосейсмической инверсии явным образом появляется произвольная константа плотности, связанная с массовым параметром m_{75} – то есть долей массы внутри сферы в 0.75 радиуса Солнца.

4. Развитие SANA-S. Обновленная система возбужденных уровней для H- и He-подобных ионов.

Для увеличения точности уравнения состояния и исследования влияния статистической функции, нами были пересмотрены таблицы возбужденных уровней, используемых в расчетах. Такая ревизия включала

- расширение системы уровней для К-ионов C, N, O, Ne до возбужденных состояний с квантовыми числами $n=8$;
- уточнение статистических весов для атома He;
- использование нового метода, позволяющего суммировать все состояния H-подобных ионов.
- сравнение расчетов статистических сумм с использованием весовой функции по Старостину-Рёриху (SR) и по Планку-Ларкину (PL).

5. Определение непрозрачности по инверсии дискриминанта Леду

В сотрудничестве с коллегами из Швейцарии и Бельгии была выполнена работа по оценке величины непрозрачности солнечной плазмы на основе гелиосейсмической инверсии дискриминанта Леду, который по смыслу аналогичен частоте плавучести Брунта-Вяйсяля. Дискриминант связан с градиентом температуры в лучистой зоне, по которому определяется непрозрачность как функция радиуса. В данной схеме есть несколько существенных допущений, например, химический состав предполагается известным и предполагается тем же, что и в опорной модели. Получено, что непрозрачность на Солнце под дном конвективной зоны выше, чем значения непрозрачности OPAL примерно на 10%, и эта разность сильно локализована. В слоях, лежащих глубже, чем $0.65 R_{\text{sun}}$, заметных отличий от таблиц OPAL не обнаружено. Статья направлена в журнал «Nature Astronomy».

6. Моделирование проникающей конвекции и ее связь с двойной частотной разницей.

Совместно с коллегами из Португалии выполнена работа по исследованию проникающей конвекции на границе между конвективной и лучистой зоной в звёздах. Резкие изменения скорости звука и ее производных в этой области приводят к характерным возмущениям акустических частот. Для характеристики этой области используется двойное отношение τ_{10} , рассчитываемое для радиальных и дипольных мод со степенями $l=0$ и 1 . Получена связь между гладкостью области проникающей конвекции и τ_{10} . Такая связь тестировалась на модельных расчётах. Показано, что выбор уравнения состояния плазмы не влияет на τ_{10} , для чего сравнивались модели с OPAL2005 и SAHA-S. Предполагается использовать данный подход для оценки глубины проникающей конвекции в F-звёздах. Статья направлена в «Astronomy and Astrophysics».

7. Моделирование протуберанцев и характеристики вспышки.

В сотрудничестве с коллегами из ГАИШ ведётся работа по исследованию солнечной активности.

В солнечных вспышках наблюдаются квазипериодические пульсации (КПП) вспышечного излучения, которые являются эффективным инструментом диагностики вспышечных процессов и параметров тепловой плазмы и ускоренных частиц. В работе проанализированы КПП в излучении вспышки 1 октября 2015 года класса M 4.5 с использованием оптических (в линиях водорода и ионизованного кальция), рентгеновских (6-12 кэВ) и радио (3 ГГц) наблюдений. Получены близкие значения периодов колебаний в диапазоне 1–2 мин.

Также анализировались эмиссионные линии (H_{α} , H_{β} , $H \text{ Ca II}$, $IR \text{ Ca II}$, $D3 \text{ He I}$) той же вспышки 1 октября 2015 г. Получено, что наблюдения могут быть объяснены в модели хромосферного газа, нагреваемого снизу магнитогидродинамическими волнами и ионизуемого и возбуждаемого сверху потоком надтепловых частиц. В этой модели плазма состоит из двух-трех слоев, из которых нижний - "холодный" и плотный (5500 K , 10^{16} cm^{-3}), а верхний - "горячий" и разреженный (10000 K , 10^{12} cm^{-3}).

Была построена модель излучения эруптивного протуберанца 21 апреля 2015 г., проведено сравнение наблюдаемых и модельных потоков излучения протуберанца в оптических линиях водорода и ионизованного кальция, определены основные параметры слоев излучающей плазмы.

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. Черногловка (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. ИСЗФ РАН, Иркутск (Л.К. Кашапова)
7. Астрономический институт Чешской академии наук (P. Heinzel, P. Kotrč, M. Bárta).

Публикации

В журналах

1. V. A. Baturin, A. V. Oreshina, W. Däppen, S. V. Ayukov, A. B. Gorshkov, V. K. Gryaznov, and I. L. Iosilevskiy "Ionization of heavy elements and the adiabatic exponent in the solar plasma" // A&A 660, A125 (2022)
2. Kupryakov Yu A., Gorshkov A.B., Kashapova L.K.
Solar flare pulsation spectra
// Acta Astrophysica Taurica, издательство КрАО РАН (Научный). 2022. — Т. 3. — № 2. — С. 27-29.
3. Ю.А. Купряков, А.Б. Горшков, Л.К. Кашапова, М. Barta. Анализ и методика обработки спектров пульсаций хромосферного излучения на примере солнечной вспышки 1 октября 2015 года // Известия КрАО, 2022, т.118, № 3, с.58-62.
4. Analysis of pulsation spectra of chromospheric radiation from a solar flare sol2015-10-01
/ Y. A. Kupryakov, A. B. Gorshkov, L. K. Kashapova, M. Bárta
// Proceedings of Science. — 2022. — Vol. 425. — P. 1–5.

В печати или направлены в редакцию

- Ю.А. Купряков, К.В. Бычков, О.М. Белова, А.Б. Горшков, Р. Kotrc. Наблюдение солнечной вспышки SOL 2015–10–01 и расчет модели ее излучения в линиях водорода, гелия и кальция, направлена в «Известия КрАО»
- G. Buldgen et al., "Diving inside the Sun: seismic inference of the solar radiative opacity" // submitted to "Nature Astronomy"
- M. Deal et al., "Glitches in solar-like oscillating F-type stars: signature of the base of the convective envelope on the ratios r_{010} " // submitted to A&A

Опубликованы в трудах конференций

5. Analysis and calculation of an eruptive prominence model
/ Y. A. Kupryakov, K. V. Bychkov, O. M. Belova et al.
// XXVI ВСЕРОССИЙСКАЯ ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ СОЛНЦА. —

Труды XXIV Всероссийской ежегодной конференции. — Санкт-Петербург, 2022. — Р. 185–188.

6. Observation of solar flare intensity curves and comparing them with stellar flares
/ Kupryakov Yu A., Vyckov K.V., Belova O.M., Gorshkov A.B., Heinzl P., Kotrč P.
// ASTRONOMY AT THE EPOCH OF MULTIMESSENGER STUDIES.
Proceedings of the VAK-2021 conference, Aug 23–28, 2021. — 2022. — С. 314-316.

Конференции

1. АНАЛИЗ И РАСЧЕТ МОДЕЛИ ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА (Устный)
Авторы: Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б., Kotrč P.
XXVI всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2022», Санкт-Петербург, ГАО РАН, Россия, 3-7 октября 2022
2. Анализ и методы обработки спектров пульсаций хромосферного излучения солнечной вспышки SOL2015-10-01 (Стендовый)
Авторы: Купряков Ю.А., Горшков А.Б., Кашапова Л.К., Bárta M.
“Магнетизм и активность Солнца -2022”, Крым, пгт. Научный, Россия, 23-26 августа 2022
3. Наблюдение солнечной вспышки SOL 2015-10-01 и определение интегральных потоков излучения в спектральных линиях (Устный)
Авторы: Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б., Kotrč P.
“Магнетизм и активность Солнца -2022”, Крым, пгт. Научный, Россия, 23-26 августа 2022
4. Анализ спектров пульсаций хромосферного излучения солнечной вспышки 01-10-2015 (Устный)
Авторы: Купряков Ю.А., Горшков А.Б., Кашапова Л.К., Барта М.
Всероссийская научная конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022», посвященная 90-летию Ю.Н. Парийского, Нижний Архыз, САО РАН, Россия, 23-28 мая 2022

Научно-популярные издания

Астрономия: век XXI / Ред.-сост. В. Г. Сурдин - 4-е изд. испр
Батурин В.А., Гиндилис Л.М., Ефремов Ю.Н., Засов А.В., Миронова И.В., Попов С.Б., Прохоров М.Е., Родионова Ж.Ф., Руденко В.Н., Сажин М.В., Самусь Н.Н., Сурдин В.Г., Хованская О.С., Черепашук А.М., Чернин А.Д., Шевченко В.В.
место издания ДМК Пресс Москва, 2022 г., ISBN 978-5-89818-127-7, 622 с.

Астрономия: век XXI, 5-е изд. // Ред.-сост. В. Г. Сурдин
Батурин В.А., Гиндилис Л.М., Ефремов Ю.Н., Засов А.В., Миронова И.В., Попов С.Б., Прохоров М.Е., Родионова Ж.Ф., Руденко В.Н., Сажин М.В., Сажина О.С., Самусь Н.Н., Сурдин В.Г., Черепашук А.М., Чернин А.Д., Шевченко В.В.
место издания ДМК Пресс Москва, 2022 г., ISBN 978-5-93700-172-6, 570 с.

Научно-популярная лекция

А. Б. Горшков прочитал лекцию для студентов факультета журналистики МГУ на тему «Прикоснуться к Солнцу» — о трудной судьбе солнечного зонда имени Паркера».