

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД

В.М. Томозов

ON SOME REGULARITIES OF CHEMICAL COMPOSITION DISTRIBUTION IN STELLAR ATMOSPHERES

V.M. Tomozov

Изучение обилий примесных элементов в солнечной атмосфере и внешних звездных атмосферах представляет фундаментальный интерес, поскольку их распределение оказывает существенное влияние на состав межзвездной среды и, следовательно, на формирование звезд. В атмосферах звезд различных спектральных типов и Солнца распределение примесных элементов является весьма неоднородным и обусловлено физическим эффектом, связанным с величиной первого потенциала ионизации (FIP-эффект). Представлен обзор современных наблюдательных результатов о распределении примесных элементов в атмосферах Солнца и звезд. Обсуждаются физические процессы, которые могут приводить к наблюдаемым распределениям примесных элементов в верхних атмосферах звезд разных спектральных классов. Кратко описаны некоторые закономерности распределений примесных элементов у ряда звезд солнечного типа (в частности, зависимость FIP-эффект – спектральный тип).

The study of element abundances in the solar atmosphere and in the outer stellar atmospheres is of substantial interest, since their distribution greatly influences the composition of interstellar medium and, therefore, the star formation. In the atmospheres of stars of different spectral types and in the solar atmosphere, the element abundance distribution is inhomogeneous and is determined by the physical effect connected with the value of the first ionization potential (FIP-effect). We present the review of modern observational results of element abundance distribution in the solar and stellar atmospheres. We discuss the physical processes that can lead to observed distributions of element abundances in upper atmospheres of stars of different spectral types. Besides, we give a brief description of some regularities of element abundance distributions in a variety of solar-type stars (in particular, the relation “FIP-effect – spectral type” (FBST)).

Введение

Результаты, полученные в ходе изучения физических процессов в атмосфере Солнца, регулярно и широко используются для интерпретации характеристик атмосфер других звезд, особенно близких спектральному классу Солнца. Обычно для объяснения процессов в коронах звезд используется определенная аналогия с явлениями, происходящими в солнечной короне. Считается, что атмосферы звезд, обладающих конвективными зонами, должны быть подобны солнечной атмосфере. Структура верхней атмосферы Солнца определяется динамикой магнитных полей, которые генерируются механизмом солнечного динамо в конвективной зоне и играют важную роль в нагреве солнечной короны до высоких (>1 МК) температур. Поскольку магнитные поля на поверхности Солнца концентрируются на границах ячеек разных масштабов, магнитное поле в верхней атмосфере приобретает сложный динамичный и многоярусный характер. Эффективность действия механизма динамо контролируется в основном скоростью вращения звезды, которая совместно с конвективными движениями вещества определяет ее магнитную активность. В ходе эволюции звезды на главной последовательности скорость ее вращения постепенно уменьшается благодаря потере углового момента и магнитная активность звезды понижается. Несмотря на то, что Солнце принадлежит очень распространенному классу звезд в Галактике – желтым карликам, – прямая аналогия с Солнцем при изучении звезд представляется несколько упрощенным подходом, поскольку звезды демонстрируют целый ряд характеристик и процессов, которые представляются экстремальными по сравнению с физическими условиями в солнечной атмосфере. Тем не менее, сравнительное изучение активных

процессов на звездах способно значительно расширить существующие представления о самом Солнце благодаря накопленному обширному набору данных об энергетических процессах в атмосферах звезд. Прежде всего, это касается определения содержаний примесных элементов в солнечной короне по сравнению с их распределением во внешних атмосферах звезд различной активности. Содержание тяжелых примесных элементов на Солнце ($Z \sim 2\%$ по массе) определяет толщину солнечной конвективной зоны и, следовательно, влияет на корональную активность, а перераспределение этих элементов в короне является индикатором происходящих в ней процессов выделения энергии. Известно, что химический состав на поверхности звезд главной последовательности отражает первоначальный состав элементов в глобулах газово-пылевой туманности, из которых они сформировались в Галактике [Drake, 2003]. Глобулы состоят в основном из молекулярного водорода и в процессе своей эволюции вследствие гравитационного сжатия и трансформации в молодые звезды подвергаются воздействию галактических космических лучей, ионизирующей радиации от соседних образовавшихся горячих звезд ОВ и от взрывов близких сверхновых, что приводит к определенному обогащению вещества глобул тяжелыми элементами. Так возникла и ближайшая к нам звезда – Солнце. В современном состоянии Солнце находится почти в центральной части главной последовательности (на диаграмме Герцшпрунга–Рассела) и проходит среднюю стадию своей эволюции, обладая довольно умеренной корональной активностью по сравнению с соседними звездами близких спектральных классов [Güdel, 2010].

Сравнительный анализ распределений примесных элементов во внешних атмосферах Солнца и звезд представляет особый интерес для астрофизики.

В этой работе, которая является продолжением серии статей [Томозов, 2004, 2011, 2012], кратко описаны основные результаты наблюдений распределения химсостава в атмосферах звезд различных спектральных классов и уровней корональной активности.

В то время как состав элементов в солнечной фотосфере, надежно определенный спектроскопическими методами, является вполне однородным по всей поверхности Солнца, содержания примесных элементов в его короне и в солнечном ветре оказываются в разной степени зависящими от величины первого потенциала ионизации (FIP) относительно их содержаний в фотосфере. По отношению к содержанию в фотосфере элементы с низким FIP < 10 эВ (low-FIP) Fe, Mg, Si, K и т. д. показывают усиленные корональные обилия в различных солнечных структурах. В то же время отношения элементов C, N, O и т. д. с высоким FIP > 10 эВ (high-FIP) относительно их фотосферных обилий остаются практически неизменными. Величина FIP-отклонения ξ обычно определяется как отношение содержания примесного low-FIP элемента в короне относительно водорода, но иногда в наблюдениях для этого используются и отношения к другим элементам, например, Mg/O, Fe/O и др. (см., например, [Томозов, 2012]). По-видимому, впервые признаки FIP-эффекта были обнаружены при спектроскопических наблюдениях в ультрафиолетовой области спектра в солнечной короне в ходе ракетных полетов [Pottasch, 1963] (см. также обзор [Meyer, 1985]). К настоящему времени проявлениям FIP-эффекта, его наблюдениям и интерпретации посвящено очень большое число оригинальных работ и обзоров. Такой интерес к изучению FIP-эффекта обусловлен, прежде всего, тем, что он оказывается индикатором физических процессов, происходящих в атмосферах Солнца и звезд и может служить способом получения информации об этих процессах. Приведем сводку некоторых основных наблюдательных результатов, касающихся распределения примесных элементов в верхней атмосфере Солнца.

Некоторые выводы из результатов наблюдений FIP-эффекта в солнечной атмосфере

Перечисленные ниже результаты наблюдений FIP-эффекта в верхней солнечной атмосфере должны учитываться в любой модели, которая может быть использована для описания физических процессов, происходящих в короне Солнца и солнечном ветре. В основном здесь будут приведены выводы, сформулированные в работах [Feldman, Laming, 2000; Widing, Feldman, 2001].

Прежде всего отметим, что химический состав фотосферы Солнца, достаточно надежно определенный спектроскопическими методами и проверенный по результатам анализа состава каменных метеоритов (углистых хондритов), является постоянным и однородным. В то же время состав верхней атмосферы – короны и солнечного ветра – может изме-

няться как в различных структурных образованиях, так и во времени. Поскольку распределение корональных структур меняется с циклом солнечной активности, можно ожидать соответствующих изменений средней амплитуды FIP-эффекта от всего Солнца в цикле его активности. Заметим, что амплитуда ξ FIP-эффекта в солнечной короне зависит от широты, причем его проявления сильнее вблизи экватора и слабее в полярных областях [Wood, Linsky, 2010].

Принято считать, что основное фракционирование примесных элементов по признаку FIP происходит в хромосфере с $T=10^4$ К и переходной зоне хромосфера–корона, т. е. в областях, где уже начинает сказываться влияние УФ-излучения короны. Тем не менее, слабые признаки FIP-эффекта с амплитудой $\xi=1.1 \div 1.2$ были обнаружены даже в фотосферных слоях солнечного магнитного потока в факеле активной области [Sheminova, Solanki, 1999].

Химический состав плазмы верхней солнечной атмосферы, которая располагается вне петельных структур, по-видимому, близок составу фотосферы. Это справедливо также для корональной плазмы над областями корональных дыр, которые считаются источниками быстрого солнечного ветра (FIP-отклонение несколько превышает единицу) [Feldman, Laming, 2000].

Интересные результаты о связи FIP-эффекта с эволюцией активных областей были получены в работах [Sheeley, 1996; Feldman, Laming, 2000; Widing, Feldman, 2001]. По результатам анализа спектрогелиограмм, полученных с ОКС Skylab (300–600 Å), было показано, что выходящая активная область вскоре после своего появления характеризуется фотосферным составом примесных элементов, спустя 2–3 дня она показывает среднюю величину FIP-отклонения для короны $\xi=4$, а через 4–5 дней FIP-отклонение может достигать значений $\xi \sim 8 \div 9$ (рис. 1).

Таким образом, состав примесных элементов в плазме верхней солнечной атмосферы, в течение длительного времени накапливаемых в петельных

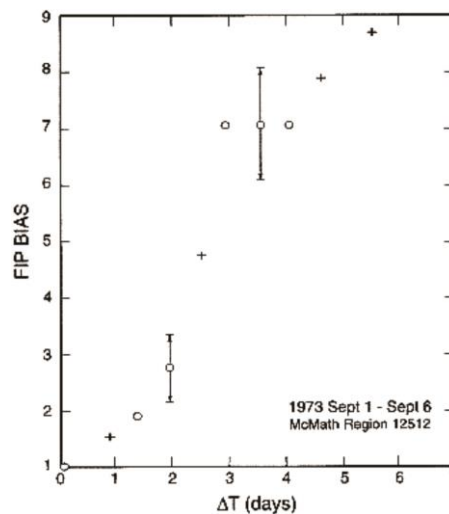


Рис. 1. Рост FIP-отклонения в зависимости от времени развития активной области McMath 12512 после ее выхода в фотосферу (по изменению величины отношения содержаний Mg/Ne) [Widing, Feldman, 2001].

структурах магнитного поля, обогащается low-FIP элементами. FIP-отклонение оказывается прогрессивно нарастающим в зависимости от времени удержания (наибольшее FIP-отклонение $\xi \sim 15$ было зарегистрировано в изолированной области, которая появилась в униполярном остатке распадающейся активной области [Feldman, Laming, 2000]). В этом исследовании наблюдались только активные области с известными временами выхода поля, т. е. области, которые появились на видимой стороне диска Солнца.

Средняя величина FIP-отклонения в корональной плазме спокойного Солнца с температурой $1.4 \cdot 10^6$ К составляет около $\xi \sim 4$. Плазма с подобным FIP-отклонением регистрируется в медленном солнечном ветре. Кроме того, наблюдения показали, что состав low-FIP элементов в верхней атмосфере Солнца, удерживаемый в крупномасштабных петельных магнитных структурах над поверхностью Солнца, подвержен гравитационному разделению (высоко над лимбом наблюдается некоторое понижение содержания более тяжелых элементов по отношению к водороду). Эффект гравитационного разделения элементов отчетливо проявляется в плазме короны на высотах $h > 1.2R_{\odot}$ (на высотах между $1.03R_{\odot}$ и $1.45R_{\odot}$ интенсивности линий ионов Fe уменьшаются более чем в три раза по сравнению с интенсивностями линий более легких ионов Ne, Mg и Si). Существуют некоторые основания считать, что FIP-отклонение зависит также от величины FIP (при уменьшении величины FIP амплитуда ξ проявляет тенденцию к росту). Скорость изменения состава элементов была спектроскопически изучена по данным с ОКС Skylab в сгустке нагретого вещества, выброшенного из фотосферы в корону [Feldman, Laming, 2000]. Было обнаружено, что спустя 20 мин после выброса сгустка вещества FIP-отклонение достигло величины $\xi \sim 1.2$, а это означает, что для существенной модификации состава элементов необходим промежуток времени, существенно превышающий десятки минут. Практически фотосферным остался состав примесных элементов спустя три минуты после начала кратковременной импульсной вспышки 2 декабря 1973 г., также наблюдавшейся с ОКС Skylab. Лишь в ходе дальнейшей эволюции активной области, где произошла эта вспышка, по мере выхода новых петель магнитного поля в фотосферу начался дальнейший постепенный рост FIP-отклонения. По-видимому, это явление было очень кратковременным, поскольку в таких вспышках обычно наблюдается рост содержания изотопов $p = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ (до $p \sim 1$; см., например, [Томозов, 2012]). В этих вспышках наблюдается также существенное увеличение содержания ионов Ne, Mg, Si и Fe. Значительное возрастание low-FIP элементов ($\xi \sim 7 \div 8$) было зарегистрировано с помощью УФ-спектрометра UVCS/SOHO в токовых слоях (лучевидных структурах) в волновых следах после корональных выбросов массы [Ko et al., 2003].

Заметим, что захваченная замкнутыми магнитными структурами активных областей и обогащенная low-FIP элементами плазма может выходить в межпланетную среду вследствие процесса обменного

магнитного пересоединения полей в основании короны. Доказательством существования этого процесса является регистрация «следов» активных областей во внешней короне и межпланетной среде [Woo et al., 2004]. Таким образом, содержание low-FIP элементов в активных областях прослеживается на больших расстояниях и в медленном солнечном ветре. Добавим, что недавно обнаруженные с ИСЗ Hinode устойчивые высокоскоростные (до 50 км/с) истечения горячей плазмы из границ активных областей, которые могут быть потенциальными источниками медленного солнечного ветра, также обнаруживают наличие значительного FIP-эффекта ($\xi \sim 3 \div 4$) [Brooks et al., 2011].

Для объяснения проявлений FIP-эффекта в верхней атмосфере Солнца было предложено большое количество теоретических моделей (см., например, работы [Томозов, 2004; 2011] и цитируемую в них литературу). Все описанные модели основаны на различном поведении нейтральных атомов и ионов по отношению к динамике магнитных полей и течений плазмы в той части солнечной хромосферы, где low-FIP элементы уже подвергаются ионизации, а high-FIP элементы могут оставаться нейтральными. В [Drake, 2003] выделено четыре основных воздействия на заряд и массу примесных частицы. В работе эти воздействия в условиях верхней солнечной атмосферы могут приводить к фракционированию элементов. Во-первых, это эффект гравитационного разделения, зависящий от массы частиц, противодействие которому могут оказывать течения плазмы или турбулентность вещества. Во-вторых, это тепловая диффузия – процесс, в ходе которого более тяжелые ионы в областях короны с градиентом температуры диффундируют в зону повышенных температур, однако этому может препятствовать гравитация. И, наконец, амбиполярная диффузия, обусловленная пространственным распределением протонов и электронов (действие амбиполярного электрического поля на примесные ионы зависит от отношения заряда иона q_i к массе, т. е. q_i/m_i), и сила трения, возникающая при взаимодействии примесных ионов с быстрыми протонами в течениях плазмы. Эволюционирующие магнитные поля способны захватывать примесные ионы и также могут приводить к фракционированию элементов. Напротив, влияние турбулентности, перемешивающей корональную плазму, может подавлять или даже исключать химическое фракционирование [Drake, 2003; Testa, 2010]. В рамках определенной модели относительная роль этих эффектов может быть различной, поэтому решающая проверка модели фракционирования может быть основана только на данных наблюдений.

Первые данные о содержаниях химических элементов в коронах звезд, близких по характеристикам короне Солнца, были получены в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах спектра с ИСЗ ASCA и EUVE. Эти данные показали, что содержания примесных элементов в корональной плазме звезд могут существенно отличаться от обилий элементов в солнечной короне. Так, например, FIP-эффект солнечного типа наблюдался у звезд с

низкой активностью (α Cen, ε Eri и ξ Boo A), отсутствие FIP-эффекта было зарегистрировано у Проциона и обнаружен дефицит металлов (по Fe) в звездах с более высокой корональной активностью (II Peg K2 IV с невидимым компонентом) [Testa, 2010]. Затем по рентгеновским спектрам, полученным с высоким разрешением с ИСЗ XMM-Newton, авторы работы [Brinkman et al., 2001] уверенно доказали наличие обратного FIP-эффекта (IFIP) у активной двойной звезды HR 1099, т. е. концентрации high-FIP элементов оказались усиленными относительно элементов с низким FIP (отмечено также высокое содержание Ne). Таким образом, у звезд с разным уровнем активности FIP-эффект проявляется в двух ипостасях: прямой (солнечного типа у звезд со слабой и умеренной активностью) и обратный в коронах активных звезд, причем пограничное значение $FIP \approx 10$ эВ остается одним и тем же. Следует иметь в виду, что, хотя с помощью спектроскопии высокого разрешения в рентгеновском диапазоне с ИСЗ Chandra и XMM-Newton удалось довольно точно определить химический состав, а также температуру и плотность корональной плазмы у многих звезд, содержание элементов в их фотосферах в основном базируется на составе солнечной фотосферы.

Несмотря на то, что для объяснения FIP-эффекта в солнечной короне было предложено несколько моделей фракционирования элементов, обнаружение IFIP-эффекта у звезд с высокой корональной активностью сразу же привело к существенным ограничениям моделей фракционирования и стимулировало поиски единой перспективной модели. Модель фракционирования элементов, основанная на действии пондеромоторных сил, обусловленных альфвеновскими волнами и МГД-волнами других типов в хромосфере [Laming, 2004; 2009], оказалась наиболее перспективной для дальнейшего развития, поскольку она способна объяснить как прямой, так и обратный FIP-эффект и зависит в основном от плотности энергии волн в хромосфере. Кроме того, помимо удовлетворительного объяснения фракционирования химического состава элементов в солнечной короне (в особенности, поведения Ne), эта модель позволяет существенно продвинуться в понимании процессов нагрева корон Солнца и звезд. Перейдем теперь к описанию некоторых закономерностей распределения химсостава в коронах звезд различных спектральных классов.

Закономерности распределения состава примесных элементов в верхних атмосферах звезд

Молодые звезды формируются из сгущений (глобул) в плотных газовой-пылевых облаках межзвездного газа в Галактике. Наблюдения в рентгеновском диапазоне спектра, выполненные с космической обсерватории Chandra с субсекундным разрешением, позволили прояснить существовавшие представления о формировании звезд, оказавшиеся заметно более сложными, чем классический гравитационный коллапс облака холодного газа. Молекулярные облака в областях формирования звезд в Галактике находятся в динамическом состоянии с развитой МГД-турбулентностью, подвергаются воз-

действию космических лучей и ионизирующего излучения. Гравитационное сжатие сгущений газа тормозится угловым моментом и нарастающим магнитным и тепловым давлением. Избыточный угловой момент приводит к образованию двойных и кратных звезд и формированию околозвездных дисков, где происходит рождение планет [Feigelson, 2010].

Наиболее ранние стадии эволюции звезд прослеживаются по характеристикам излучения в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. На «нулевой» (0) стадии развития (длительность $\sim 10^4$ лет) протозвезды заметны в ИК- и миллиметровой областях спектра. В это время происходит квазисферическое сжатие центрального сгущения и формирование толстого и протяженного протопланетного диска размером в сотни а. е. [Feigelson, 2010]. На стадии I, продолжающейся $\sim 10^5$ лет, уже преобладает инфракрасная эмиссия от аккрецирующего протопланетного диска вокруг молодой звезды. Наблюдения эмиссионных атомных и молекулярных линий в областях формирования звезд выявили наличие высокоскоростных ($v \sim 100\div 700$ км/с) биполярных истечений газа из молодых протозвезд 0 и I классов. По-видимому, они представляют собой вещество протопланетного диска, выбрасываемое наружу магнитными и центробежными силами из внутренних областей диска [Reipurth et al., 2001]. Столкновения газовых выбросов с окружающей межзвездной средой приводят к образованию ударных волн, наблюдающихся в эмиссионных молекулярных линиях – такие структуры известны как объекты Хербига–Аро (H–H). Нагретый ударными волнами до высоких температур ($T \sim 10^6$ K) газ наблюдается в виде пятен свечения мягкого рентгеновского излучения, которые обнаруживаются также в областях H–H. На II стадии своего развития перед главной последовательностью (PMS) длительностью около 10^6 лет звезда окружена аккреционным диском, но ее фотосфера уже заметно проявляется в оптическом диапазоне спектра. Такие звезды, обнаруженные десятилетия назад, относятся к классическим звездам T Tauri (CTTS). Звезды типа CTTS характеризуются также усиленной потерей массы, до $10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$. Звезды на III стадии развития, у которых аккреция останавливается, скорости потери массы небольшие, а остатки диска практически не обнаруживаются, отнесены к звездам типа T Tauri со слабыми линиями (WTTS). Хотя звезды WTT и CTT имеют примерно одинаковый возраст, эти два класса могут представлять собой эволюционную последовательность от звезд CTT с диссипацией околозвездного диска к звездам WTT, когда в основном происходит образование планет [Giampapa, 2005]. Следует добавить, что хромосферная и корональная активность звезд типа T Tauri существенно выше солнечной активности, уровни эмиссии рентгеновского излучения в 10^3 раз превышают современный солнечный уровень. Наблюдаемые у звезд T Tauri мощные всплески рентгеновского излучения – аналоги солнечных вспышек – также в 10^3 раз мощнее солнечных вспышек. Считается, что природа вспышек в рентгеновском диапазоне у молодых звезд обусловлена механизмом пересоединения магнитных полей, за-

висающим от внутреннего магнитного динамо – процесса, который включается на самых ранних стадиях формирования звезды (по-видимому, такие молодые звезды должны быть полностью конвективными [Telleschi et al., 2007]). Помимо этого, молодые звезды T Tauri обладают быстрым вращением.

Приведем интересные сравнительные данные о современном Солнце и о солнечной стадии звезды WTT [Giampapa, 2005]. Масса Солнца за все 4.5 млрд лет его эволюции изменилась незначительно (по разным оценкам, оно потеряло от <7 до 0.3 % первоначальной массы). Радиус Солнца на стадии звезды WTT примерно в 2.5 раза превосходил современное значение. Светимость Солнца на стадии WTT составляла 1.7 от современной величины, а период его вращения был равен ~5 сут. Кроме того, если на современном Солнце в максимуме активности доля его поверхности f , занимаемая солнечными пятнами, составляет $f < 2\%$, то для Солнца на стадии WTT эта доля была существенно больше $f \sim 25\%$.

Определение обилий элементов в некоторых звездах CTTS с массами, близкими массе Солнца, привело к большому разнообразию результатов. Так, например, спектр TW Hydrae показал сильное понижение Fe и O ($\text{Fe} \sim 0.2\text{Fe}_\odot$) и большое повышение содержания Ne (в два раза выше солнечного значения). Такие аномальные обилия объясняются пониженным содержанием элементов, которые участвуют в формировании пылевых частиц (Fe, O, Si). Частицы пыли накапливаются в средней части околозвездного диска, а газовая составляющая простирается до самой поверхности диска, где ионизируется и подвергается аккреции на звезду, поэтому ее рентгеновское излучение будет отражать химический состав газовой компоненты диска с высоким отношением концентраций Ne/Fe [Testa, 2010].

По результатам анализа спектров из выборки двадцати ярких TTS звезд в области звездообразования Taurus-Auriga был сделан вывод, что источники рентгеновской эмиссии как при наличии аккреции вещества диска на звезду, так и при ее отсутствии, обладают очень близкими температурами и химическим составом корон. Следовательно, связанные с аккрецией вещества диска процессы существенно не меняют химический состав звездных корон молодых активных звезд [Scelsi et al., 2007]. В работе [Telleschi et al., 2007] по спектрам рентгеновского излучения девяти звезд типа TTS, полученным с ИСЗ XMM-Newton, были обнаружены признаки существования зависящего от FIP-процесса фракционирования элементов, связанного со спектральным типом звезды. Были проанализированы спектры четырех звезд CTTS, четырех звезд WTTS и одной молодой звезды промежуточной массы, принадлежащей к классу звезд Herbig. Обнаружено повышенное содержание Ne (отношение Ne/Fe в 4–6 раз выше солнечного) у PMS звезд K- и M-типа.

В рамках продолжения программы «Солнце во времени» была изучена длительная эволюция рентгеновского излучения корон звезд – солнечных аналогов – по данным с ИСЗ XMM-Newton. Было исследовано шесть ближайших звезд G-типа (от ран-

него до среднего) на главной последовательности с различным возрастом от ~0.1 до ~1.6 млрд лет и периодами вращения от 1 до 12.4 сут [Telleschi et al., 2005]. Следует отметить, что информация об изменениях коротковолновой УФ- и рентгеновской эмиссии звезды солнечного типа в ходе ее эволюции может быть полезной для исследования не только замедления вращения звезды и действия внутреннего динамо, но также и воздействия жесткой радиации на ранние атмосферы планет. Одним из результатов этой программы наблюдений является четко зарегистрированный тренд понижения корональных температур, сопровождаемый уменьшением общей рентгеновской светимости звезд с их возрастом от 0.1 до 10 млрд лет. Был сделан вывод о том, что уменьшающаяся эффективность нагрева корон звезд – солнечных аналогов – обусловлена понижением частоты мощных вспышек в их коронах из-за меньшего фактора заполнения магнитными полями корон более старых звезд [Telleschi et al., 2005]. Образно говоря, частые и мощные вспышки на молодых звездах порождают горячую и плотную плазму, и, вследствие этого, активные звезды обладают горячими коронами. В этой же работе по рентгеновским спектрам были определены обилия корональных элементов C, N, O, Ne, Mg, Si, S и Fe и распределения корональных мер эмиссии. Подчеркнем, что у большинства изученных звезд были измерены фотосферные обилия элементов (за исключением 47 Cas). Анализ спектров этой выборки звезд привел к интересному результату: оказалось, что распределения обилий примесных элементов изменяются от распределения, соответствующего IFIP-эффекту в звездах с возрастом в пределах от ~0.1 млрд лет, до распределения с FIP-эффектом солнечного типа в звездах с возрастом, превышающим 0.3 млрд лет и более. Отмечено, что этот переход между закономерностями содержаний элементов в коронах звезд совпадает также с резким понижением интенсивности нетеплового радиоизлучения [Telleschi et al., 2005].

В работе [Wood, Linsky, 2006] были проанализированы полученные с ИСЗ Chandra рентгеновские спектры пяти карликовых звезд с одинаковыми умеренными уровнями активности. Четыре из этих звезд входят в двойные системы 70 Oph [K0 V+K5 V] и 36 Oph [K1 V+K1 V] (пятая звезда в выборке – ϵ Eri). Эти звезды имеют примерно одинаковый возраст, обладают близкими скоростями вращения, но сильно различаются по скорости потери массы (звездным ветрам). Не было обнаружено никаких существенных различий в корональной плотности или температуре у этих звезд, однако были найдены значительные различия в структуре корональных обилий элементов, связанные с проявлением FIP-эффекта. Два экстремальных случая наблюдаются для компонентов двойной системы 70 Oph. Компонент 70 Oph A показал FIP-эффект, подобный солнечному, а компонент 70 Oph B, возможно, даже продемонстрировал слабый IFIP-эффект. Остальные звезды в выборке – 36 Oph AB и ϵ Eri – показали антикорреляцию между корональным FIP-отклонением и силой звездного ветра. Кроме того, авторы сделали вывод, что в

этой выборке звезд содержания high-FIP элементов являются пониженными в короне по отношению к фотосферным обилиям, что отличается от стандартной картины солнечного FIP-эффекта, согласно которой low-FIP элементы усилены в короне, а содержания high-FIP элементов совпадают с фотосферными значениями.

Примечательный результат, демонстрирующий зависимость FIP-эффекта от спектрального класса звезды, был получен недавно [Wood, Linsky, 2010] (рис. 2). Приведена зависимость FIP-отклонения от спектрального типа звезды. Звезды более ранних типов демонстрируют FIP-эффект, подобный солнечному, а звезды более поздних спектральных классов показывают IFIP-эффект. Точка обращения FIP-эффекта находится вблизи звезд спектрального типа K5 V.

Нужно подчеркнуть, что на рисунке показаны звезды главной последовательности со слабой и умеренной активностью, причем их рентгеновская светимость ограничена величиной $\log L_x < 29.1$ (в эрг/с). Такие звезды обладают периодами вращения $P > 6$ сут и возрастом, превышающим 0.35 млрд лет. Для М-карликов в качестве опорных данных для сравнения были использованы обилия элементов солнечной фотосферы. Данные в рентгеновском диапазоне спектра, по которым был сделан вывод о связи FIP-эффекта с уровнем корональной активности звезд, включали в себя разнообразные звезды, в том числе и двойные системы, которые в основном являлись экстремально яркими источниками корональной активности и поэтому легко наблюдались рентгеновскими телескопами. После исключения подобных экстремальных источников из выборки звезд и при анализе умеренно активных звезд главной последовательности удалось выявить четкую зависимость FIP-эффекта от спектрального класса звезды [Wood, Linsky, 2010]. Согласно выводам работы, эволюционные вариации FIP-эффекта в конечном счете связаны с изменениями основных характеристик звезды, обусловленными ее быстрым вращением, а не только с потоком общего рентгеновского излучения или магнитным полем. Подобной зависимости не обнаружено для чрезвычайно активных звезд, поскольку многие из них обладают несравнимыми фотосферными характеристиками и, кроме того, среди них много взаимодействующих двойных систем. Помимо этого, взаимодействующие двойные системы и быстро эволюционирующие звезды обладают существенными различиями в свойствах атмосфер по отношению к характеристикам атмосфер звезд главной последовательности с теми же спектральными классами.

Перейдем теперь к обсуждению проявлений FIP-эффекта у звезд в «холодной» части диаграммы Герцшпрунга–Рассела, где расположены М-карлики. Они обладают самыми небольшими массами и низкими температурами в конце главной последовательности (от массы $0.6 M_\odot$ и температуры на поверхности $T = 3800$ К для спектрального класса M0 до массы $0.1 M_\odot$ и $T = 2200$ К для класса M9) [Liefke et al., 2008]. В оптических спектрах поздних подклассов с понижением температуры фотосферы начинают преобладать молекулярные линии. Переход от поздних М-карликов к коричневым карликам L и T классов

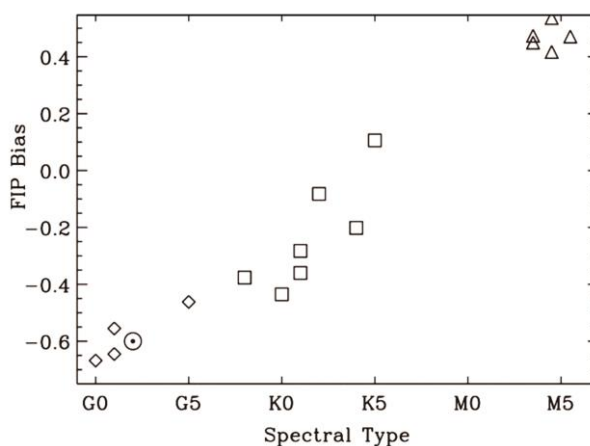


Рис. 2. Зависимость FIP-эффект – спектральный тип звезды (FBST) [Wood, Linsky, 2010]. Обозначения: ◇ – выборка звезд Telleschi et al. [2005], ○ – положение Солнца, □ – данные [Wood, Linsky, 2010], Δ – данные [Liefke et al., 2008] по М-карликам. Определение обозначения FIP_{bias} на этом рисунке представлено в работе [Wood, Linsky, 2010].

отмечается формированием пыли в их атмосферах. Тем не менее все М-карлики демонстрируют некоторые активные явления, например достаточно частые и сильные вспышки, а карлики классов M0–M4 являются яркими рентгеновскими источниками со светимостью L_x , близкой эмпирическому пределу насыщения $L_x/L_{bol} \sim -3.3$ [Liefke et al., 2008].

Сильная корональная эмиссия звезд в рентгеновской области спектра обычно связана с генерацией магнитных полей, обусловленной механизмом динамо. Численные модели карликовых звезд показали, что М-карлики спектральных классов позднее класса M3 могут быть полностью конвективными с отсутствием сдвигового слоя между радиативным ядром и конвективной зоной (см., например, [Mullan et al., 2001]). Полностью конвективные звезды демонстрируют достаточно спокойную рентгеновскую эмиссию, но другие индикаторы активности (например, эмиссия в линии H α) могут даже усиливаться к L-карликам с малыми массами. Изменения в структуре обилий элементов в коронах ранних и поздних М-карликов представляют особый интерес для выяснения характеристик корон этих звезд в отношении связи с действием различных механизмов динамо – локализованным или распределенным. В связи с этим авторы работы [Liefke et al., 2008] по рентгеновским данным с ИСЗ Chandra выполнили спектральное исследование двойной системы М-карликов EQ Peg (с компонентами M3.5 и M4.5; расстояние до звезд 6.25 пс с угловым разделением компонент $\sim 6''$). Двойная система EQ Peg является источником сильного рентгеновского и ультрафиолетового излучения, причем оба ее компонента известны как вспыхивающие звезды. По результатам анализа спектров было выяснено, что дифференциальные меры эмиссии обоих компонентов обладают максимумами при температуре 3 МК, а содержания примесных элементов в их коронах демонстрируют IFIP-эффект. В пределах ошибок измерений обилия элементов в обоих компонентах системы согласуются между собой; IFIP-эффект представляется слабее выраженным у менее актив-

ной звезды EQ Peg B. Эта тенденция была подтверждена [Liefke, 2008] при сравнении с другими М-карликами из дополнительной выборки звезд.

В работе [Wood et al., 2012] анализировались спектры рентгеновского излучения с ИСЗ Chandra близкой ($d=5.81$ пс) двойной звезды CJ 338 (M0 V + M0 V), состоящей из двух М-карликов слабой активности. С целью выяснения вопроса о том, демонстрируют ли короны звезд CJ 338 ожидаемый для М-карликов IFIP-эффект, были проведены измерения обилий элементов в коронах обеих звезд. В результате для обоих компонентов системы CJ 338 было найдено свидетельство существования умеренного IFIP-эффекта, что согласуется с ожидаемым эффектом из ранее полученного соотношения FIP-эффект – спектральный тип (FBST) [Wood, Linsky, 2010]. Этот результат подтверждает также сделанный ранее вывод о том, что все М-карлики (не только активные) должны демонстрировать в коронах IFIP-эффект. Кроме того, в работе [Wood et al., 2012] была сделана попытка моделирования IFIP-эффекта в М-карликах, основанная на предыдущих работах [Laming et al., 2009, 2012], в которых было показано, что МГД-волны, распространяющиеся в корональных петлях, приводят к пондеромоторной силе, которая вызывает фракционирование элементов и порождает FIP-эффект. В модели FIP-эффекта, предложенной для солнечной атмосферы [Laming, 2009], предполагается, что в корональных магнитных петлях возбуждаются альфвеновские волны с амплитудами ~ 50 км/с на резонансной частоте петли магнитного поля (период $\tau = 2L/(nV_A)$, где L – длина петли, V_A – корональная альфвеновская скорость), которые захватываются в ее резонансной полости. После отражения от подножий петель в хромосфере волны создают пондеромоторную силу в области крутых градиентов плотности, действующую только на ионы хромосферы, но не на нейтралы, и ускоряют их в корону. При учете взаимодействия альфвеновских волн со звуковыми волнами в слое, где скорость альфвеновских волн равна скорости звука (слой в хромосфере с $\beta \sim 1$), в верхней хромосфере возникают волны быстрой моды, конкуренция которых с корональными альфвеновскими волнами может привести к IFIP-эффекту [Laming, 2012]. В условиях солнечной короны этот механизм приводит к нормальному FIP-эффекту, а в коронах более активных звезд – к IFIP-эффекту. Решающим преимуществом этого механизма является то, что он оказывается пока единственным из многих, предложенных ранее, способным при определенных условиях объяснить IFIP-эффект. Нужно подчеркнуть, что в работах [Laming, 2012; Wood, Laming, 2013] обсуждаются различные варианты сценария механизма фракционирования с участием МГД-волн. Так, в работе [Laming, 2012] рассматривалась параметрическая генерация параллельно распространяющихся волн медленной моды альфвеновскими волнами и влияние этого процесса на процесс фракционирования в солнечной короне. В условиях же корон М-карликов основную роль должны играть волны быстрой моды [Wood, Laming, 2013]. Заметим, что подробное об-

суждение ранее предлагавшихся механизмов фракционирования элементов в солнечной атмосфере было проведено в работах [Томозов, 2004, 2012].

Главной целью наблюдений звездных корон в рентгеновском диапазоне спектра является выяснение вопроса о том, каким образом меняются характеристики корон со спектральным типом звезд (по крайней мере, для звезд главной последовательности) при уменьшении толщины конвективной зоны к ранним спектральным типам. Считается, что конвективная зона должна полностью исчезать у звезд спектрального класса A5 V, что скажется и на существовании их корон [Wood, Laming, 2013]. Поскольку было установлено, что корональные обилия элементов тесно коррелируют со спектральным типом звезд (соотношение FBST), то FIP-эффект (или IFIP-эффект) должен быть индикатором корональной активности и поэтому его измерения у различных типов звезд представляют особый интерес.

Вследствие этого авторы работы [Wood, Laming, 2013] проанализировали рентгеновские спектры звезды π^3 Ori с целью определения корональных обилий элементов и проверки соотношения FBST для звезд более ранних типов. Звезда π^3 Ori относится к раннему спектральному классу F6 V, находится на расстоянии 8.1 пс от Солнца, обладает быстрым вращением (период ~ 4.1 сут) и относительно высокой рентгеновской светимостью $\log L_x = 28.96$. Согласно результатам проведенного анализа данных для π^3 Ori, было показано, что, по-видимому, зависимость FBST становится менее крутой при переходе к более ранним типам звезд, вероятно указывая на проявление уменьшения толщины конвективной зоны. Амплитуда FIP_{bias} для этой звезды оказалась равной -0.55 (ожидаемым значением было -0.8), сравнимой со значениями для Солнца и других ранних G-звезд, вероятно, вследствие большей рентгеновской светимости π^3 Ori. Как известно, основные характеристики звезд главной последовательности тесно коррелируют с их спектральным типом (радиус звезды, температура, масса, гравитация на поверхности звезды, толщина конвективной зоны и др.), поэтому существование FBST-соотношения указывает, что одна или несколько основных характеристик звезды оказывают существенное влияние на ее корональные обилия [Wood, Laming, 2013]. Заметим, что зависимость от спектрального типа существует и для молодых звезд T Tauri, и для очень активных звезд главной последовательности. Известна также зависимость содержания элементов от уровня активности звезд, которые обладают высокими рентгеновскими светимостями $\log L_x > 29.1$ и располагаются вне главной последовательности. В этом случае основным определяющим фактором может быть быстрое вращение звезды, влияющее на характеристики ее фотосферы и конвективной зоны, что приводит к изменению корональных обилий элементов так же, как и спектральный тип звезды определяет обилия в FBST-соотношении для звезд главной последовательности.

Существуют звезды, не согласующиеся с FBST-соотношением, и одной из таких ярких звезд является субгигант Процион (F5 IV-V) –

сравнительно близкая к Солнцу и часто наблюдаемая звезда, которая изучалась также спектроскопически с ИСЗ Chandra и XMM-Newton и не показала никаких признаков FIP-эффекта. Конечно, Процион не относится к звездам главной последовательности – класс его светимости составляет IV–V, а радиус – $2.05R_{\odot}$, что определенно превосходит средний размер карликовых звезд главной последовательности. Несмотря на то, что рентгеновская светимость Проциона составляет $\log L_x = 28.51$, вероятно, что механизм нагрева его короны сильно отличается от механизма нагрева корон звезд, удовлетворяющих FBST-соотношению, так что существенного фракционирования элементов в его короне не происходит. Возможно, нагрев короны Проциона осуществляется динамикой спикул, которые благодаря своей высокой скорости быстро проходят через хромосферу, не приводя к заметному фракционированию элементов [Wood, Laming, 2013].

В работе [Audard et al., 2003] проведено спектроскопическое исследование выборки из тесных двойных звезд RS CVn по данным с ИСЗ XMM-Newton с целью выяснения поведения FIP-эффекта в коронах таких звезд. Обычно такие двойные системы состоят из звезды типа G или K с активной хромосферой и звезды-компаньона позднего типа на главной последовательности или субгиганта. Эти звезды довольно быстро вращаются с типичным орбитальным периодом в несколько суток, демонстрируют высокий уровень активности с сильной эмиссией хромосферных линий и насыщенным корональным рентгеновским излучением ($L_x/L_{bol} \sim 10^{-3}$). Следует отметить, что двойные системы являются яркими рентгеновскими источниками с повышенными уровнями активности относительно одиночных звезд главной последовательности солнечного типа. У таких звезд часто наблюдаются мощные вспышки, которые приводят к очень высоким наблюдаемым температурам корональной плазмы (до ~ 100 МК). Анализ спектров показал, что звезды выборки с высоким уровнем активности продемонстрировали пониженное содержание low-FIP элементов по отношению к high-FIP элементам (IFIP-эффект), а двойные звезды с промежуточной активностью показали либо отсутствие FIP-эффекта, либо некоторые признаки солнечного FIP-эффекта (примером является Капелла G0 III + G8 III). Отмечено, что обилия low-FIP элементов меняются с уровнем корональной активности, поскольку наблюдается, что абсолютное содержание Fe (low-FIP элемент) возрастает при уменьшении активности звезд. Несмотря на то, что исследованная выборка звезд является небольшой (всего 5 звезд), авторам удалось показать, что в этой выборке двойных звезд RS CVn наблюдается переход от заметного IFIP-эффекта в очень активных системах к весьма слабым проявлениям солнечного FIP-эффекта в короне Капеллы при умеренном уровне корональной активности.

Для полноты картины проявления FIP-эффекта в коронах солнечно-подобных звезд с массами $M < 1.5M_{\odot}$ опишем результаты изучения FIP-эффекта в коронах звезд-гигантов поздних типов (β Cet, 31 Com и μ Vel) с массами $\sim 3M_{\odot}$ [Garcia-Alvarez et al., 2006].

Звезды-гиганты с умеренными массами на главной последовательности не обладают внешней конвективной зоной и пересекают «холодную» половину диаграммы Герцшпрунга–Рассела как желтые гиганты. Магнитная активность этих звезд во время их эволюции проходит несколько стадий: фазу провала Герцшпрунга с относительно быстрым вращением, фазу быстрого торможения и фазу красного гиганта с горением гелия в ядре. Каждая из изучаемых звезд находилась на одной из указанных стадий эволюции. Результаты анализа рентгеновских спектров этих звезд с ИСЗ Chandra выявили аналогичные корональные характеристики как в структуре температур, так и в обилиях элементов у звезд с большим возрастом (μ Vel и β Cet), с небольшими отличиями в короне у «молодого» гиганта (31 Com). В отношении проявлений FIP-эффекта было выяснено, что гиганты β Cet и μ Vel показали пониженные примерно в два раза содержания high-FIP элементов в коронах по отношению к фотосферному составу. В противоположность этому корона 31 Com не показала никаких признаков FIP-эффекта (заметим, что корона этой звезды значительно более горячая, чем у двух других звезд). Авторами был сделан вывод, что структурные изменения в ходе эволюции гигантов поздних типов могут быть ответственны за наблюдаемые различия в обилиях корональных элементов и в структуре температур. Возможно, размер конвективной зоны, связанный со скоростью вращения, играет ключевую роль в формировании корональных характеристик [Garcia-Alvarez et al., 2006].

В завершение отметим появление интересных работ, в которых проанализировано влияние примесных элементов (O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca и Ti) в составе звезд на размеры их обитаемых зон, где могут располагаться планеты, пригодные для зарождения жизни [напр., Young et al., 2012].

Заключение

В первой части статьи были кратко описаны основные сведения об определениях состава примесных элементов в различных структурах внешней атмосферы Солнца и в солнечном ветре, а во второй части изложены результаты изучения звездных атмосфер. Распределение состава примесных элементов на Солнце определяется FIP-эффектом, согласно которому содержания элементов с $FIP < 10$ эВ в различных структурах короны и в солнечном ветре в различной степени повышены по отношению к их обилиям в фотосфере.

Спектральные исследования корональной плазмы большого количества звезд разных типов в рентгеновской области спектра с ИСЗ Chandra и XMM-Newton позволили изучить проявления процессов фракционирования примесных элементов в их внешних атмосферах в очень широком диапазоне параметров звезд и уровней их активности, которые являются недостижимыми в условиях солнечной атмосферы. Полученные результаты показали, что процессы фракционирования элементов в звездах с разными уровнями активности приводят как к FIP-эффекту солнечного типа, так и к IFIP-эффекту в коронах очень активных звезд. Несмотря на большое разнообразие характеристик рас-

смотренных звезд, в распределении примесных элементов в их внешних атмосферах удалось выявить существование определенных закономерностей в проявлениях как прямого, так и обратного FIP-эффекта.

В связи с этим возникает вопрос, какие же основные характеристики звезд могут определять корональные обилия элементов [Wood, Laming, 2013]. Известно, что свойства звезд главной последовательности, характеристики их фотосфер и конвективных зон тесно связаны со спектральным типом звезд. Выявленное для подавляющего большинства звезд главной последовательности с умеренной активностью соотношение FIP-отклонение – спектральный тип (FBST) показывает, что какая-либо одна или несколько основных характеристик звезды оказывают решающее влияние на распределение примесных элементов в ее короне. Возможно, что быстрое вращение звезды, влияющее на фотосферные характеристики и/или свойства конвективной зоны и соответственно определяющее степень ее активности, и оказывается главным фактором, влияющим на FBST-соотношение. Для молодых звезд Т Tauri и очень активных звезд главной последовательности также существует определенная зависимость от спектрального типа [Testa, 2010].

В настоящее время перспективным теоретическим механизмом, объясняющим как прямой, так и обратный FIP-эффект, является механизм, основанный на действии пондеромоторной силы, вызванной альфвеновскими волнами [Laming, 2009, 2012]. В этом механизме фракционирования примесных элементов волны быстрой моды распространяются через хромосферу снизу, отражаются назад в хромосфере, где альфвеновская скорость растет с высотой. Эти волны приводят к пондеромоторной силе, направленной вниз, которая конкурирует с направленной вверх пондеромоторной силой, вызванной корональными альфвеновскими волнами, направленными вниз и отражающимися обратно. Считается, что корональные альфвеновские волны возбуждаются процессами пересоединения магнитных полей во время нановспышек в короне (возможная роль пересоединения магнитных полей в FIP-эффекте отмечалась еще в работе [Томозов, 2004]). Показано, что в области карликовых звезд типа F и G главной последовательности преобладает FIP-эффект солнечного типа от корональных альфвеновских волн. В «холодной» же зоне М-карликов на диаграмме Герцшпрунга–Рассела доминирующим оказывается IFIP-эффект из-за преобладания первоначально распространяющихся в верхние слои атмосферы волн быстрой моды. Переход от FIP-эффекта к IFIP-эффекту происходит в зоне K5 V карликов, что вполне согласуется с соотношением FBST. В этой схеме фракционирования корональных обилий элементов, обусловленной альфвеновскими и другими МГД-волнами, критически важными оказываются характеристики фотосферных колебаний, поскольку именно они являются источниками хромосферных волн [Wood, Laming, 2013]. Необходимо подчеркнуть, что соотношение FBST выполняется только для звезд главной последовательности с относительно низким и промежуточным уровнем активности.

Определение содержания неона во внешней атмосфере Солнца и в коронах звезд представляет особый интерес, поскольку неон вносит большой вклад в непрозрачность вещества и, следовательно, влияет на толщину конвективной зоны. В то же время линии неона не возбуждаются и соответственно не регистрируются в фотосфере Солнца из-за ее относительно низкой температуры. В коронах звезд с умеренными и высокими уровнями активности отношение обилий Ne/O представляется постоянным (Ne/O~0.4) и существенно превосходящим возможное солнечное значение (Ne/O~0.2). Повышенное содержание неона в фотосфере Солнца, близкое значениям отношения Ne/O в коронах звезд, привело бы к большей непрозрачности вещества конвективной зоны и соответственно помогло бы разрешить «проблему солнечных моделей» [Drake, Testa, 2005]. Тем не менее, недавно было выяснено, что повышенное содержание Ne не способно полностью решить указанную проблему.

Как уже отмечалось, недавно из анализа рентгеновских спектров был получен очень интересный результат, показавший различия корональных содержаний элементов в двойной системе 70 Oph A (K0 V) и 70 Oph B (K5 V). Звезды этой системы во всех остальных характеристиках являются практически одинаковыми, однако компонент А показал FIP-эффект, близкий солнечному, а компонент В продемонстрировал отсутствие FIP-эффекта или даже признаки слабого IFIP-эффекта [Wood, Linsky, 2006]. Ранее указывалось, что это различие можно объяснить условиями наблюдений. Возможно, во время наблюдений двойной системы 70 Oph с ИСЗ Chandra в короне компонента 70 Oph A могли преобладать развитые активные области с сильным FIP-эффектом (см. рис. 1), а в короне 70 Oph B – молодые активные области по аналогии с Солнцем. В таком случае наблюдаемая ИСЗ Chandra разница в содержаниях примесных элементов у компонента 70 Oph оказывается лишь временным явлением [Wood, Linsky, 2006]. Однако более вероятна другая интерпретация этого различия в обилиях элементов: поскольку компонент 70 Oph B относится к более позднему спектральному типу (K5 V), то вследствие этого (см. рис. 2) он оказывается именно в зоне перехода от обычного FIP-эффекта к IFIP-эффекту [Wood, Linsky, 2013].

Итак, можно констатировать, что в последние годы в изучении распределения химического состава в коронах Солнца и звезд удалось достичь значительного прогресса. В различных структурных образованиях солнечной короны и в солнечном ветре были выявлены основные характеристики распределений примесных элементов в соответствии с проявлениями FIP-эффекта. Тем не менее, данные в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах о спектрах Солнца как звезды являются еще недостаточно полными, что представляет трудности при определении обилий элементов на Солнце в целом, причем такие сведения очень важны для сравнительного анализа характеристик Солнца и звезд. Следует иметь в виду, что при определении состава звездных корон очень часто в качестве ре-

перных данных используется химический состав солнечной фотосферы. Подчеркнем, что FIP-эффект имеет очень важное диагностическое значение для различного рода процессов во внешних атмосферах Солнца и звезд. Так, в солнечных условиях по FIP-отклонению можно оценить стадии развития активных областей (см. рис. 1), а при наблюдениях звезд главной последовательности по FIP-эффекту и соотношению FBST можно независимо определить спектральный класс звезды.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, Соглашение 8407.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Томозов В.М. Аномалии химического состава короны и солнечного ветра как средство для изучения динамики атмосферы Солнца. Обзор современных представлений // *Солнечно-земная физика*. 2004. Вып. 6. С. 68–74.
- Томозов В.М. Динамика солнечной атмосферы и FIP-эффект // *Избранные проблемы астрономии* / под ред. С.А. Язева. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. С. 186–193.
- Томозов В.М. FIP-эффект как индикатор динамических процессов в солнечной атмосфере и межпланетной среде // *Солнечно-земная физика*. 2012. Вып. 19. С. 19–35.
- Audard M., Güdel M., Sres A., et al. A study of coronal abundances in RS CVn binaries // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 398. P. 1137–1149.
- Brinkman A.C., Behar E., et al. First light measurements with XMM-Newton reflection grating spectrometers: Evidence for an inverse first ionization potential effect and anomalous N_e abundance in the coronae of HR 1099 // *Ibid.* 2001. V. 365. P. 324–328.
- Brooks D.H., Warren H.P. Establishing a connection between active region outflows and the solar wind: Abundance measurements with EIS/Hinode // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 727. P. L13–L17.
- Drake J.J. Chemical fractionation and abundances in coronal plasma // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32, N 6. P. 945–954.
- Drake J.J., Testa P. The “solar model problem” solved by the abundance of neon in nearby stars // *Nature*. 2005. V. 436. P. 525–528.
- Feigelson E.D. X-ray insights into star and planet formation // *PNAS*. 2010. V. 107. P. 7153–7157.
- Feldman U., Laming J.M. Element abundances in the upper atmosphere of the Sun and stars: update of observational results // *Physica Scripta*. 2000. V. 61. P. 222–252.
- Garcia-Alvarez D., Drake J.J., Ball B., et al. Evidence of the FIP effect in the coronae of late-type giants // *Astrophys. J.* 2006. V. 638. P. 1028–1040.
- Güdel M. Magnetic activity, high-energy radiation and variability: From young solar analogs to low-mass objects // *Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets*. Proc. IAU Symp. / Eds. A.G. Kosovichev, A.H. Andrei, J.-P. Rozelot. 2010. N 264. P. 375–384.
- Giampapa M. Stellar analogs of solar activity: The Sun in a stellar context // *Saas Fee Advanced Course 34 “The Sun, solar analogs and the climate”* / J.D. Haigh, M. Lockwood, M.S. Giampapa. 2005. P. 307–415.
- Ko Y.-K., Raymond J.C., Lin J., et al. Dynamical and physical properties of a post-coronal mass ejection current sheet // *Astrophys. J.* 2003. V. 594. P. 1068–1084.
- Laming J.M. A unified picture of the first ionization potential and inverse first ionization potential // *Ibid.* 2004. V. 614. P. 1063–1072.
- Laming J.M. Non-WKB models of the first ionization potential effect: implications for solar coronal heating and coronal helium and neon abundances // *Ibid.* 2009. V. 695. P. 954–969.
- Laming J.M. Non-WKB models of the first ionization potential effect: The role of slow mode waves // *Ibid.* 2012. V. 744. P. 115–127.
- Liefke C., Ness J.U., Schmitt H.M., et al. Coronal properties of the EQ Pegasi binary system // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 491. P. 859–872.
- Meyer J.-P. The baseline composition of solar energetic particles // *Astrophys. J. Suppl.* 1985. V. 57. P. 151–171.
- Mullan D.J., MacDonald J. Are magnetically active low-mass M dwarfs completely convective? // *Astrophys. J.* 2001. V. 559. P. 353–371.
- Pottasch S.R. The lower solar corona: interpretation of the ultraviolet spectrum // *Ibid.* 1963. V. 137. P. 945–966.
- Reipurth B. et al. Herbig-Haro flows: Probes of early stellar evolution // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* V. 39. P. 403–455.
- Scelsi L., Maggio A., Micela G., et al. Coronal abundances of X-ray bright pre-main sequence stars in the Taurus molecular clouds // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 473. P. 589–601.
- Sheminova V.A., Solanki S.K. Is the FIP effect present inside solar photospheric magnetic flux tubes? // *Ibid.* 1999. V. 351. P. 701–706.
- Sheeley N.R. Elemental abundance variations in the solar atmosphere // *Astrophys. J.* 1996. V. 469. P. 423–428.
- Telleschi A., Güdel M., Briggs K., et al. Coronal evolution of the Sun in time: high-resolution X-ray spectroscopy of solar analogs with different ages // *Ibid.* 2005. V. 622. P. 653–679.
- Telleschi A., Güdel M., Briggs K.R., et al. X-ray emission from T Tauri stars and the role of accretion: Inferences from the XMM-Newton extended survey of the Taurus molecular cloud // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 468. P. 425–442.
- Testa P. Element abundances in X-ray emitting plasma in stars // *Space Sci. Rev.* V. 157. P. 37–55.
- Widing K.G., Feldman U. On the rate of abundance modifications versus time in active region plasmas // *Astrophys. J.* 2001. V. 555. P. 426–434.
- Woo R., Habbal S.R., Feldman U. Role of closed magnetic fields in solar wind flow // *Ibid.* 2004. V. 612. P. 1171–1174.
- Wood B.E., Linsky J.L. Coronal emission measures and abundances for moderately active K dwarfs observed by Chandra // *Ibid.* 2006. V. 643. P. 444–459.
- Wood B.E., Linsky J.L. Resolving the ξ Boo binary with Chandra, and revealing the spectral type dependence of the coronal “FIP effect” // *Ibid.* 2010. V. 717. P. 1279–1290.
- Wood B.E., Laming J.M., Karovska M. The coronal abundance anomalies of M dwarfs // *Ibid.* 2012. V. 753. P. 76–84.
- Wood B.E., Laming J.M. The coronal abundances of mid-F dwarfs // *Ibid.* 2013. V. 768. P. 122–132.
- Young P.A. et al. The impact of stellar abundance variations on stellar habitable zone evolution // *Astrophys. J. Lett.* V. 755. P. L31–L35.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия