

УДК 523.9-36, 537.632.5

Солнечное содержание углерода, магнитные поля и солнечная металличность

А.В. Сухоруков, Н.Г. Шчукина, И.Э. Васильева

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,
ул. Акад. Заболотного 27, Киев, Украина, 03680
suh@mao.kiev.ua, shchukin@mao.kiev.ua, vasil@mao.kiev.ua

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.

Аннотация. Мы оценили влияние мелкомасштабного магнитного поля спокойной атмосферы Солнца на определение фотосферного содержания углерода по 29 линиям C I, применив четыре трехмерные магнитогидродинамические модели со значением среднего вертикального поля 0.5–80 Гс с механизмом локального динамо. Поле проявляет себя преимущественно косвенно, возмущая термодинамическую структуру атмосферы и режим формирования линий. Средняя суммарная поправка к содержанию не превышает 0.01 dex и находится в пределах статистической погрешности современных значений химсостава Солнца. Данный эффект трудно наблюдать и он не достаточен для объяснения проблемы низкой металличности Солнца.

SOLAR ABUNDANCE OF CARBON, MAGNETIC FIELDS AND SOLAR METALLICITY, by *A.V. Sukhorukov, N.G. Shchukina, I.E. Vasilyeva*. We estimated the influence of small-scale magnetic field of the quiet solar atmosphere on the photospheric abundance determination of carbon for 29 lines of C I, using four three-dimensional magnetohydrodynamical models, which have mean vertical magnetic field of 0.5–80 G with local dynamo action. The field manifests itself indirectly perturbing the thermodynamical structure of the atmosphere and altering the line formation. The mean net abundance correction doesn't exceed 0.01 dex, which is within the scopes of statistical errors of modern values of the solar chemical composition. This effect is hard to observe and it is not enough to explain the problem of the low solar metallicity.

Ключевые слова: Солнце, химический состав, магнитные поля, эффект Зеемана

1 Введение

Углерод, азот и кислород являются одними из наиболее важных химических элементов в астрофизике. В настоящей работе мы сузили область исследований до определения поправок к содержанию данных элементов под влиянием магнитных полей в атмосфере Солнца.

Все три элемента вносят преимущественный вклад в солнечную металличность Z (содержание всех элементов тяжелее H и He): 0.64 % по массовой доле для O, 0.22 % для C и 0.07 % для N.

В 1990-х годах по референтным данным 1980-х годов (Андерс, Гревес, 1989) было уточнено значение $Z = 2.31$ % (Гревес, Сауваль, 1998), полученное путем моделирования солнечного спектра с

помощью одномерных (1D) моделей атмосферы Солнца. Оно прекрасно согласовывало стандартную модель недр Солнца с высокоточными гелиосейсмологическими наблюдениями ($Z_{\text{obs}} = 2.22\%$).

За последние 10 лет после применения более новых, реалистичных трехмерных (3D) гидродинамических моделей (ГД) атмосферы Солнца, содержания многих элементов были уменьшены примерно в два раза (Асплунд и др., 2009). Такие 3D ГД модели атмосферы прекрасно воспроизводят солнечный спектр по сравнению с традиционными 1D моделями, однако новый химсостав противоречит данным гелиосейсмологии. Теперь принято $Z = 1.81\%$, для которого содержание O снижено в 1.9 раз, C – в 1.5 раз, N – в 1.9 раз соответственно. При таком Z теоретические и инвертированные профили скорости звука расходятся в относительных значениях на 1%, тогда как абсолютная точность гелиосейсмологических измерений на порядок-два выше. Поскольку O и C составляют более 60% величины Z , принято говорить об *кислородном и углеродном кризисе* на Солнце.

В последних работах не учитывались отклонения от ЛТР и наличие магнитного поля в солнечной атмосфере. Однако результаты солнечной спектрополяриметрии (Трухильо Буэно и др., 2004, Санчез Альмейда, Мартинез Гонзалез, 2011) доказывают присутствие слабых, мелкомасштабных магнитных полей в атмосфере спокойного Солнца. Они создают слабую поляризацию в линиях солнечного спектра и могут отвечать за механизм нагревания хромосферы и короны.

Поскольку сейчас уже существуют 3D-модели атмосферы Солнца, полученные с помощью магнитогидродинамических (МГД) расчетов, то мы решили проверить влияние слабых магнитных полей на определение химического содержания по линиям C I, N I и O I. Существует только одна работа (Фаббиан и др., 2012), в которой такие оценки сделаны для линий Fe I и получена значительная поправка 0.15 dex к солнечному обилию железа. В этой работе использовались МГД-модели, в которых магнитное поле генерировалось физическим механизмом глобального динамо. Однако уже известно (Буглер и др., 2013), что более вероятным является механизм локального динамо, когда магнитные поля порождаются конвективными движениями плазмы.

Таким образом, мы решили сделать аналогичную оценку для содержаний CNO-элементов, используя 3D МГД модели с механизмом локального динамо.

2 Исходные данные и метод

В качестве моделей атмосферы спокойного Солнца мы применили результаты четырех 3D МГД-симуляций (Ремпель, 2013) с механизмом локального динамо. Модели различаются между собой средним значением вертикального магнитного поля $\langle B_z \rangle$ у дна фотосферы: 0.5 Гс, 7.6 Гс, 51 Гс и 80 Гс соответственно. Горизонтальное пространственное разрешение моделей составляет 8 км.

При образовании линий магнитное поле проявляет себя двояко: непосредственно путем зеемановского расщепления линий и косвенно путем локального изменения температуры и давления плазмы. Для 3D МГД-моделей с локальным динамо показано (Фаббиан и др., 2012), что доминирует второй эффект, который проявляется изменением вертикального градиента температуры. Мы оценили предварительно эффекты поля для наших четырех 3D МГД-моделей с механизмом локального динамо, но не смогли однозначно определить доминирующий эффект из-за более выраженных высотных неоднородностей атмосферы. Поэтому были проделаны полные вычисления для обоих эффектов во всех четырех моделях. Технически невозможно вычислить отдельно прямой и косвенный эффект магнитного поля, поэтому на первом этапе вычислений мы моделировали только зеемановское расщепление, а на втором – их совместное действие. Максимальное зеемановское расщепление достигается в модели с максимальной величиной поля $\langle B_z \rangle = 80$ Гс. Для его оценки были вычислены изменения профилей линий в этой же модели при наличии и отсутствии поля. Для оценки совместного действия двух эффектов были вычислены изменения профилей Стокса линий при переходе от моделей с $\langle B_z \rangle = 80$ Гс, 51 Гс и 7.6 Гс к модели с полем 0.5 Гс, которая близко описывает спокойную атмосферу Солнца без магнитного поля.

Профили линий вычислены при помощи кода DELOPAR (созданного Х. Трухильо Буэно и Н.Г. Щукиной), который основан на параболическом методе DELO для решения уравнений пере-

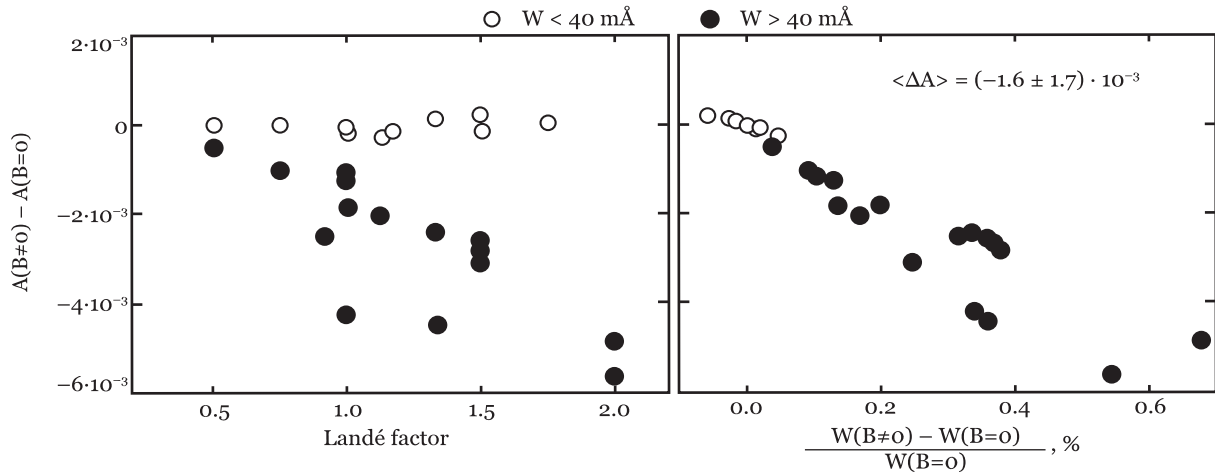


Рис. 1. Изменение фотосферного содержания углерода в линиях С I под действием только эффекта Зеемана в мелкомасштабном магнитном поле Солнца. Значения поправок $A(B \neq 0) - A(B = 0)$ указаны в зависимости от фактора Ланде (слева) и относительного изменения эквивалентных ширин W линий (справа). Отмечена группа слабых линий ($W < 40 \text{ m\AA}$), а также группа сильных линий ($W > 40 \text{ m\AA}$)

носа в среде со слабым магнитным полем (Ланди Дель'Инноченти, Ландольфи, 2004). Вычисления сделаны без учета отклонений от ЛТР.

Содержание углерода мы определяли для 29 линий С I в диапазонах длин волн 478–1258 нм и эквивалентных ширин 1–200 мÅ. Силы осцилляторов линий и другие их параметры взяты из монографии Гуртовенко, Костык, 1989. Поправки к содержанию элемента определялись по изменению эквивалентной ширины профиля интенсивности.

3 Результаты

Значения поправок к солнечному содержанию углерода, возникающих под действием только зеемановского расщепления линий, приведены на рис. 1. Данные представлены в виде зависимостей от фактора Ланде линий и относительного изменения их эквивалентных ширин.

Для слабых линий ($W < 40 \text{ m\AA}$), которые обычно используются при определении содержания, эффект мал. Для остальных линий эффект сильнее и может достигать -0.006 dex . Средняя поправка составляет $(-1.6 \pm 1.7) \cdot 10^{-3} \text{ dex}$. Как средняя, так и максимальная поправки малы по сравнению с современными систематическими погрешностями определения химсостава Солнца (около 0.01–0.03 dex для большинства элементов). Следовательно, прямой эффект влияния мелкомасштабного магнитного поля на содержание углерода в атмосфере Солнца наблюдать невозможно.

Результаты вычисления полных поправок к солнечному содержанию углерода, возникающих под действием и зеемановского расщепления линий, и изменения термодинамической структуры атмосферы, приведены на рис. 2. Представлены две наиболее важные зависимости между поправками к содержанию и относительными изменениями эквивалентной ширины линий, а также между последними и изменениями средней температуры на высоте формирования линии. Сравнение сделано для моделей $\langle B_z \rangle = 7.6 \text{ Гс}$, 51 Гс , 80 Гс с референтной моделью $\langle B_z \rangle = 0.5 \text{ Гс}$.

С усилением магнитного поля от $\sim 8 \text{ Гс}$ до $\sim 50 \text{ Гс}$ возрастают эквивалентные ширины линий, градиент температуры и падает содержание. С дальнейшим увеличением поля до 80 Гс эквивалентные ширины линий и градиент температуры уменьшаются, а содержание увеличивается, благодаря чему средний эффект снова становится близким к нулю. Максимальный эффект проявляется у модели с

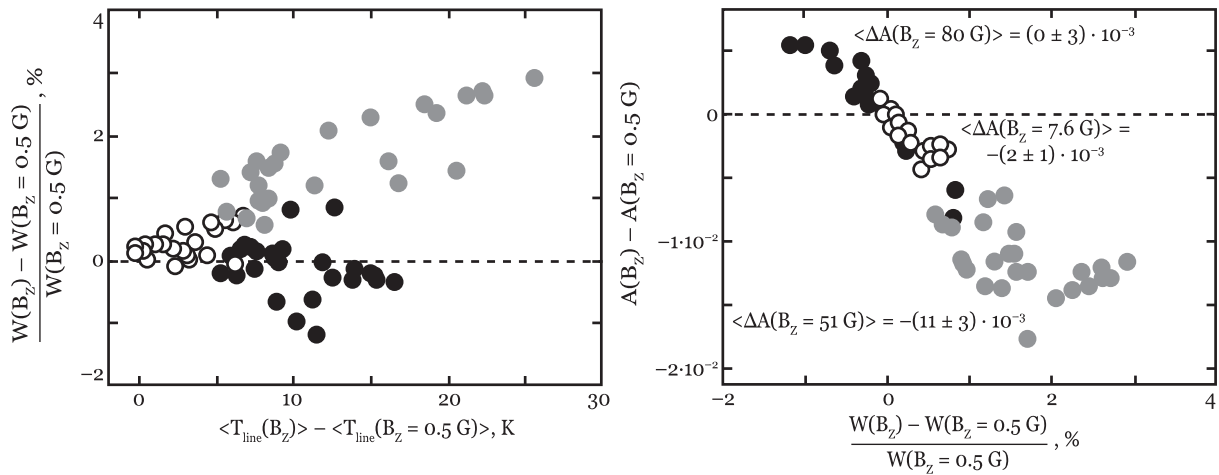


Рис. 2. Изменение фотосферного содержания углерода в линиях C I под влиянием совместного действия прямого и косвенного эффектов мелкомасштабного магнитного поля: зеемановского расщепления и изменения термодинамической структуры атмосферы. Слева указана зависимость относительного изменения эквивалентных ширин W линий от изменения средней температуры атмосферы $\langle T_{\text{line}} \rangle$ на высоте формирования линии. Справа показана зависимость поправок к содержанию $A(B_Z) - A(B_Z = 0.5 \text{ G})$ от относительного изменения W . Выделены три группы данных сравнения с референтной моделью $B_Z = 0.5 \text{ G}$: для модели $B_Z = 7.6 \text{ G}$ (белые кружки), 51 G (серые кружки) и 80 G (черные кружки) соответственно

полем $\langle B_Z \rangle = 51 \text{ G}$ и может достигать -0.02 dex , а среднее значение составляет $(-11 \pm 3) \cdot 10^{-3} \text{ dex}$. Поскольку прямой эффект зеемановского расщепления на порядок меньше, заключаем, что косвенный эффект влияния мелкомасштабного магнитного поля спокойного Солнца на профили линий C I в его спектре доминирует также и для моделей с локальным механизмом динамо. Между тем величина его остается сравнимой со статистическими погрешностями определения фотосферных содержаний. Поэтому данный эффект для углерода далеко не решает проблемы низкой металличности Солнца и если и может наблюдаться, то лишь для сильных, интенсивных линий C I.

4 Выводы

Мы показали, что как прямой, так и непрямой эффекты влияния мелкомасштабного магнитного поля спокойного Солнца на определение фотосферного содержания углерода по линиям C I являются пренебрежимо малыми и сравнимыми с современными статистическими погрешностями определения химсостава Солнца, если для моделирования используются 3D МГД-модели атмосферы с механизмом локального динамо. В рамках такого подхода учет магнитного поля спокойной фотосферы не может разрешить проблему низкой металличности Солнца, а его влияние если и можно наблюдать, то лишь для сильных линий в солнечном спектре.

Мы полагаем, что при учете отклонений от ЛТР влияние магнитного поля может сильно возрасти, поскольку линии C, N и O в солнечном спектре весьма чувствительны к механизмам не-ЛТР.

Мы также считаем, что эффекты могут измениться в сторону увеличения содержаний, если при вычислениях будут использованы 3D МГД-модели локального динамо со значением поля около $\langle B_Z \rangle = 130\text{--}160 \text{ G}$, которые в данный момент еще недоступны. Такие более реалистичные значения поля получаются по измерениям линейной поляризации линий под действием эффекта Ханле в атмосфере Солнца (Трухильо Буэно и др., 2004, Санчес Альмейда, Мартинез Гонзалес, 2011).

Литература

- Бюеглер и др. (Buechler D., Lagg A., Solanki S.K.) // *Astron. Astrophys.* 2013. V. 555. P. A33.
- Андерс, Гревес (Anders E., Grevesse N.) // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1989. V. 53. P. 197.
- Асплунд и др. (Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., Scott P.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2009. V. 47. P. 481.
- Гревес, Сауваль (Grevesse N., Sauval A.J.) // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 85. P. 161.
- Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. // *Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов*. К.: Наукова думка. 1989.
- Ланди Дель'Инноченти, Ландольфи (Landi Degl'Innocenti E., Landolfi M.) // *Polarization in Spectral Lines*. Kluwer Acad. Publ. 2004.
- Ремпель М. (Rempel M.) // *Частное сообщение*. 2013.
- Санчез Альмейда, Мартинез Гонзалез (Sánchez Almeida J., Martínez González M.) // *Astron. Soc. Pacific Conf.* 2011. V. 437. P. 451.
- Трухильо Буэно и др. (Trujillo Bueno J., Asensio Ramos A., Shchukina N.) // *Nature*. 2004. V. 430. P. 326.
- Фаббиан и др. (Fabbian D., Moreno-Insertis F., Khomenko E., Nordlund A.) // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 548. P. 35.