

УДК 523.9-355, -36

**А. В. Сухоруков, Н. Г. Щукина**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
27, ул. Академика Заболотного, Киев 03680

### **Солнечный спектр кремния и диагностика атмосферы Солнца**

*Выполнен обзор работ, касающихся формирования солнечного спектра кремния и его применения для диагностики атмосферы Солнца. Особое внимание уделено работам по определению солнечного содержания кремния, от надежного знания величины которого зависит решение проблемы металличности Солнца. Проанализировано влияние погрешности сил осцилляторов спектральных линий, постоянной затухания и скоростей неупругих столкновений с атомами водорода на ошибки оценок содержания кремния. Подведен итог работам, посвященным исследованию влияния отклонения от локального термодинамического равновесия, неоднородной структуры атмосферы Солнца и мелкомасштабного магнитного поля на формирование линий Si I.*

*СОНЯЧНИЙ СПЕКТР КРЕМНІЮ ТА ДІАГНОСТИКА АТМОСФЕРИ СОНЦЯ, Сухоруков А. В., Щукіна Н. Г. — Виконано огляд літератури, яка стосується формування сонячного спектру кремнію та його застосування для діагностики атмосфери Сонця. Особливу увагу надано роботам з визначення сонячного вмісту кремнію, від надійного знання величини якого залежить розв'язок проблеми металічності Сонця. Проаналізовані причини помилок сил осциляторів спектральних ліній, постійної згасання та швидкості непружних зіткнень з атомами водню на похибки оцінок вмісту кремнію. Підведено підсумок робіт, присвячених впливу відхилень від локальної термодинамічної рівноваги, неоднорідної структури атмосфери Сонця та дрібномасштабного магнітного поля на формування ліній Si I.*

*SOLAR SPECTRUM OF SILICON AND DIAGNOSTICS OF THE SOLAR ATMOSPHERE, by Sukhorukov A. V., Shchukina N. G. — The literature on the formation of the solar silicon spectrum and on its application to the solar atmosphere diagnostics is reviewed. Particular attention is given to studies on the determination of the solar silicon abundance. A reliable esti-*

*mate for this abundance is of critical importance for the solution of the solar metallicity problem. We discuss the errors of oscillator strengths, broadening damping constant and rates of inelastic collisions with hydrogen atoms which cause some errors in estimates of the silicon abundance. We summarize the investigations relative to the impact of some deviation from local thermodynamical equilibrium, inhomogeneous structure of the solar atmosphere and small-scale magnetic fields on the formation of solar Si I lines.*

## ВВЕДЕНИЕ

Солнечный фраунгоферов спектр содержит большое количество линий Si I и Si II с длинами волн от УФ- до ИК-области. Многочисленные УФ-линии кремния сильно блендированы, что затрудняет их интерпретацию. В видимой области солнечного спектра наблюдается более 80 достаточно чистых линий Si I и три чистые линии Si II [3, 11]. Отличительной чертой ИК-области спектра является наличие около 50 сильных линий Si I, свободных от блендов.

Исследование спектра кремния представляет интерес по нескольким причинам.

1. Кремний играет важную роль при моделировании глубоких слоев фотосфер Солнца и звезд поздних спектральных классов, так как является важным источником непрерывного поглощения в ультрафиолете.

2. Велика роль кремния при моделировании более высоких фотосферных слоев, где, благодаря достаточно низкому потенциалу ионизации (8.152 эВ), он (наряду с магнием и железом) является одним из основных доноров свободных электронов.

3. Для многих ИК-линий Si I характерны достаточно большие значения эффективного фактора Ланде ( $g_{\text{эф}} > 1.5$ ) и, как следствие, достаточно сильный поляризационный сигнал [24, 55], что делает их потенциально полезными для диагностики магнитных полей на Солнце [54, 55, 61]. Особый интерес в этом плане представляют исследования мелкомасштабных магнитных полей [32, 64]. Эти поля содержат запас энергии, достаточный для объяснения нагрева хромосферы и короны [64]. В частности, много полезной информации о магнитной взаимосвязи фотосферы и хромосферы можно получить из одновременных наблюдений близлежащих ИК-линий Si I 1082.7 нм и He I 1083 нм [28, 62]. Одновременные наблюдения этих линий представляют особый интерес при изучении динамики верхней фотосферы и нижней хромосферы [50], а также при исследовании распространения магнитоакустических волн в пятнах [35, 36].

4. Кремний используется в качестве репера при сравнении солнечного и метеоритного содержания химических элементов. Известно [51], что значения содержаний более 40 тяжелых химических элемен-

тов в фотосфере Солнца и в углистых метеоритах типа CI (т. н. хондритах CI), согласуются в пределах 15 %, если нормировать их к значению содержания элемента, не успевшего проэволюционировать с момента конденсации метеоритов из допланетного газа солнечного состава. С данной точки зрения кремний является идеальным нормировочным элементом, поскольку его концентрация по массе в указанных метеоритах достаточно стабильна и может быть надежно определена путем химического анализа. Обычно при сравнении солнечного и метеоритного содержания элементов используют так называемую космическую химическую шкалу  $N_{el}$ . В ней число атомов какого-либо элемента  $n_{el}$  измеряют относительно числа атомов кремния  $n_{Si}$  следующим образом:

$$N_{el} = 10^6 n_{el} / n_{Si} .$$

Что касается принятой в астрономии логарифмической шкалы

$$A_{el} = \lg n_{el} = \lg(n_{el}/n_H) + 12,$$

то из-за истощения водорода логарифмическое содержание химических элементов в хондритах  $A_{el}(\text{meteor})$  может быть определено лишь при условии, что содержание кремния в космохимической шкале  $N_{Si} = 10^6$  будет в точности соответствовать фотосферному содержанию  $A_{Si}$ . Иными словами,

$$A_{el}(\text{meteor}) = [A_{Si}(\text{Sun}) - 6] + \lg N_{el} .$$

В результате метеоритное содержание элементов в логарифмической шкале оказывается привязанным к величине содержания кремния в фотосфере Солнца. Между тем значения  $A_{Si}(\text{Sun})$ , полученные за последние 20 лет, различаются между собой на 25 %, что приводит к соответствующим неопределенностям при нахождении  $A_{Si}(\text{meteor})$  и, как следствие, к соответствующему смещению логарифмической шкалы содержания других химических элементов в хондритах CI. Принимая во внимание, что с точки зрения минералогии метеориты этого типа практически не изменились с момента их конденсации из протопланетного облака, точное знание их химического состава необходимо для понимания эволюции Солнечной системы и внутреннего строения Солнца. Очевидно, что без надежного определения фотосферного содержания кремния достичь этого понимания вряд ли возможно.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛТР-СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ

Исследования солнечного спектра кремния ведутся с конца 1920-х гг. [56]. Подавляющее большинство из них посвящено определению солнечного содержания кремния для одномерных полуэмпирических моделей атмосферы в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для ранних публикаций [30, 39, 56, 65] характерен

большой разброс полученных значений  $A_{Si}$  между 7.12 и 7.94, сильно отличающихся от принятого на сегодня логарифмического содержания в CI хондритных метеоритах [8, 51].

В 1960 г. Голдберг, Мюллер и Аллер [40] опубликовали результаты определения содержаний 42 элементов на Солнце, используя все доступные на тот момент значения лабораторных сил осцилляторов  $I_{ggf}$ . Отсутствующие значения вычислялись в приближении LS-связи. Для исследования кремния было выбрано 56 слабых и сильных линий Si I в диапазоне  $\lambda = 410...2210$  нм с высоким потенциалом возбуждения 4.9...6.7 эВ. Благодаря сравнительно небольшим погрешностям (0.08 dex) сил осцилляторов и эквивалентных ширин (10 %) удалось достичь меньшего разброса значений содержания кремния на Солнце и получить оценку  $A_{Si} = 7.50$  dex. В 1964 г. Аллер, О'Мара и Литл [7] подтвердили это значение, рассмотрев линии ионизованного кремния. Позднее к такому же выводу пришел Уисбро [72], использовавший наблюдения УФ-спектра короны, и Гревес и Свингс [41], проанализировавшие наблюдения запрещенной линии [Si I] 1099.141 нм для различных положений на диске Солнца.

Определение солнечного содержания кремния одновременно по линиям Si I и Si II было выполнено в 1968 г. Ламбертом и Уорнером [48, 49, 69, 70]. С этой целью рассчитывались волновые функции, вероятности дипольных переходов, средние квадратичные радиусы оболочек и другие параметры спектральных линий Si I и Si II на основе полуклассического подхода теории возмущений (т. н. масштабный метод Томаса — Ферми — Дирака). Согласно Ламберту и Уорнеру шкала сил осцилляторов близка к экспериментальным данным, полученными для УФ-линий Si I Славенасом, Хохловым и Хеем [5, 6, 43]. Найденные по кривым роста значения  $A(\text{Si I}) = 7.55 \pm 0.10$  и  $A(\text{Si I}) = 7.57 \pm 0.02$  оказались в хорошем согласии друг с другом. Небольшое расхождение оценок, полученных по линиям нейтрального и ионизованного кремния, Ламберт и Уорнер объяснили различием шкал сил осцилляторов для Si I и Si II.

Проанализировав в 1973 г. 19 линий Si I и две линии Si II, Холвегер [44] пришел к выводу, что солнечное содержание кремния должно быть увеличено до  $A_{Si} = 7.65 \pm 0.07$ . Отличие в более чем в 0.1 dex от предыдущих исследований он объяснил тем, что использованная им экспериментальная шкала сил осцилляторов Гарц [38] сдвинута на 0.1 dex вниз по сравнению со шкалой Ламберта и Уорнера. Результаты Холвегера близки к данным Ламберта и Лака [47], получившими содержание  $A(\text{Si I}) = 7.64 \pm 0.13$  и  $A(\text{Si II}) = 7.60$  для двух линий Si II. В 1980 г. Беккер и др. [23] понизили найденное в работе [44] значение на 0.1 dex за счет привязки экспериментальной шкалы [38] к новой экспериментальной шкале Беккера и др. [23]. За год до этого Б. Т. Бабий и др. [2] и позднее Р. Е. Рикалюк [4], выполнив количественный анализ разных факторов, рекомендовали использовать в качестве ЛТР-содержания кремния значение  $A_{Si} = 7.65 \pm 0.06$ .

## ОБРАЗОВАНИЕ ЛИНИЙ КРЕМНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО СОДЕРЖАНИЯ ПРИ НЛТР

Приведенные выше значения содержания кремния были найдены без учета эффектов отклонения от локального термодинамического равновесия (НЛТР) и неоднородной структуры атмосферы Солнца, вызванной грануляцией. Исследования по НЛТР-образованию солнечного спектра кремния ведутся с середины 1970-х гг. Все известные на сегодня по этой тематике работы выполнены в рамках одномерного приближения [18, 29, 37, 58, 67, 68, 71].

В первых таких работах рассматривались простые модели атома. В работе [67] (1976 г.) в рамках одномерной модели Вернацца, Аврет и Лусер поставили целью учесть возможные эффекты отклонения от ЛТР при расчете непрерывного поглощения в УФ-части солнечного спектра, вызванного связанно-свободными переходами между уровнями Si I. Сконструированная ими модель атома кремния была достаточно простой и включала лишь восемь атомных уровней Si I, восемь линий и восемь радиативных связанно-свободных переходов. Спустя два года Финн и МакАлистер [37] при изучении эмиссионных линий Si II в солнечном УФ-спектре разработали более сложные модели атомов (16 уровней, восемь линий Si I и восемь линий Si II). В 2001 г. Цинцинеги и Мауас [29] выполнили НЛТР-моделирование двух сильных хромосферных УФ-линий Si I 390.6 и 410.3 нм, еще более усложнив атомную модель (21 уровень и 48 радиативных переходов). Отличительной чертой НЛТР-исследований последнего десятилетия является использование реалистичных моделей атома Si I + Si II, включающих сотни термов и от сотни [71] до нескольких тысяч радиативных переходов [18]. Впервые такая модель была использована Ведемейером [71] для определения содержания кремния на базе экспериментальной шкалы сил осцилляторов Беккера и др. [23]. Оказалось, что в модели HOLMUL большинство из 18 рассмотренных им линий Si I образуются глубже  $\tau = -2.0$ , где населенности атомных уровней близки к ЛТР-значениям. По мере увеличения длины волны область формирования линий Si I смещается в более высокие слои, в которых уровни недонаселены. В результате линии Si I в ИК-области наиболее подвержены НЛТР-эффектам. В среднем НЛТР-поправки  $A_{\text{Si}}^{\text{НЛТР}} = A_{\text{Si}}^{\text{ЛТР}} \cdot A_{\text{Si}}^{\text{ЛТР}}$  к содержанию для линий из списка Ведемейера не превышают  $-0.01$  dex. Сами значения содержания ( $A_{\text{Si}}^{\text{НЛТР}} = 7.55 \pm 0.056$  и  $A_{\text{Si}}^{\text{ЛТР}} = 7.56 \pm 0.066$ ) практически совпадают с рекомендованным в работах [8, 51] значением метеоритного содержания и мало чувствительны к погрешностям параметров уширения линий, сечений фотоионизации и сечений ударных скоростей.

Исследования по одномерному НЛТР-моделированию спектра кремния, выполненные Ши и др. [58, 59], основаны на использовании еще более сложной, чем в работе Ведемейера [71], модели атома. При анализе механизмов заселения уровней нейтрального кремния была

отмечена отличительная особенность диаграммы термов Si I, связанная с большим энергетическим интервалом между основным  $3p^2\ ^3P$  и первым возбужденным уровнем  $3p^3\ ^3P^o$ , а также между этим уровнем и метастабильными уровнями  $3p^2\ ^3D$ ,  $3p^2\ ^1S$ , составляющим 5, 4 и 3 эВ соответственно. Значительная часть линий Si I, образующихся при переходах с указанных уровней, находится в ультрафиолетовой части спектра ( $\lambda < 200$  нм), где связанно-свободное поглощение атомами нейтрального алюминия, связанно-связанное поглощение молекулами и сателлитами подавляют поле излучения на порядок. Как следствие, радиативные процессы в такого рода УФ-линиях не играют существенной роли в заселении уровней Si I. По мнению Ши и др. [58] основным механизмом, контролирующим число атомов на трех нижних уровнях  $3p^2\ ^3P$ ,  $3p^2\ ^3D$ ,  $3p^2\ ^1S$ , являются связанно-свободные переходы под действием излучения и неупругих ударов электронами. При этом населенности этих уровней начинают отклоняться от ЛТР-значений лишь в верхних слоях фотосферы Солнца. Была отмечена важная роль неупругих столкновений с атомами водорода при образовании ИК-линий Si I. Линии Si I в оптическом диапазоне спектра чувствительны к этим столкновениям в значительно меньшей степени. Интересно, что слабые линии Si I из списка [58] с потенциалами возбуждения  $EPL = 5$  и  $EPL = 6$  эВ дают особенно большой разброс значений солнечного содержания кремния (в диапазоне от 6 до 8 dex). Одной из причин этого могут быть погрешности сил осцилляторов для линий Si I из атомной базы данных NIST и из таблицы Куруча и Пейтремана [46]. Если исключить из рассмотрения вышеупомянутые линии Si I, то ЛТР-значение содержания кремния  $A_{Si}^{НЛТР} = 7.52 \pm 0.06$  для оставшихся из них (18 линий из списка [38]) оказывается достаточно близким к определенному ранее Ведемайером [71]. В среднем НЛТР-поправки к содержанию, полученные Ши и др. [58] для данных линий, малы (около  $-0.02$  dex), но больше, чем в работе Ведемайера ( $-0.01$  dex). При этом абсолютные значения НЛТР-поправок к содержанию, найденные по линиям из списка [38], увеличиваются с силой линий, достигая  $-0.07$  dex для наиболее сильных из них.

Цель работы Барда и Карлсона [18] состояла в изучении физики формирования линии Si I 1082.7 нм, являющейся важным инструментом при диагностике верхней фотосферы и нижней хромосферы. Скопструированная в этой работе наиболее реалистичная и наиболее сложная на сегодняшний день модель атома Si I (3152 радиативных перехода и 238 уровней, включая ридберговские состояния) позволила выполнить тщательное исследование ионизационного равновесия атома кремния в солнечной атмосфере. Оказалось, что основным поставщиком ионов кремния Si II служит фотоионизация атомов, находящихся на уровнях Si I с энергией возбуждения  $EPL = 6$  эВ:  $3p^3\ ^3D^o$ ,  $3p3d\ ^3F^o$ ,  $3p^2\ ^1S$ ,  $3p3d\ ^1D^o$ ,  $3p4p\ ^3D$  и  $3p^2\ ^3P$ . Рекомбинация же ионов происходит в основном под действием ударов на высоковозбужденные триплетные уровни. Синглетные уровни в этом отношении практически

ки не важны. На основании данного исследования Бард и Карлсон [18] пришли к выводу, что при интерпретации линии Si I 1082.7 нм можно существенно упростить модель атома Si I (до 23 уровней и 171 перехода), сохранив при этом все ее физические свойства. Независимо от степени сложности модели атома, один из двух НЛТР-эффектов, известный как дефицит непрозрачности, пренебрежимо мал. Основным НЛТР-эффектом в данной линии является дефицит функции источника, ведущий к более глубокому профилю по сравнению с ЛТР-случаем. При этом НЛТР-ядро линии Si I 1082.7 нм оказывается заметно глубже наблюдаемого. Согласно Барду и Карлсону объяснить эти расхождения погрешностями атомных параметров, в первую очередь погрешностями силы осцилляторов данной линии, вряд ли возможно. Другая причина расхождений с наблюдениями, вызванная пренебрежением неупругих столкновений атомов кремния с атомами водорода, по их мнению, требует дальнейшего исследования ввиду отсутствия надежных атомных данных.

#### НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Анализ работ по формированию солнечного спектра кремния и определению его содержания на Солнце показывает, что на сегодняшний день есть ряд нерешенных проблем.

**Силы осцилляторов спектральных линий кремния.** Выбор той или иной шкалы сил осцилляторов является решающим при выяснении вопроса, «низкое» или «высокое» содержание кремния на Солнце. Все опубликованные на сегодня силы осцилляторов линий химических элементов можно разделить на экспериментальные, теоретические и «солнечные». Экспериментальные силы осцилляторов для линий Si немногочисленны [5, 6, 22, 43, 52, 57, 60], при этом большинство из них получено для УФ-части спектра, малопригодного из-за сильной блендированности для определения солнечного содержания. Более пригодные для этого экспериментальные силы осцилляторов из оптического диапазона спектра привязаны к абсолютным вероятностям переходов УФ-линий Si I, что делает их зависимыми от лабораторных методов, применяемых при измерении времени жизни их верхнего уровня  $4s^3P^o$ . Интересно, что считающийся на сегодня более надежным метод лазерной флуоресценции, использованный Беккером и др. [23], дает существенно меньшее время жизни данного уровня (в среднем на 25 %), чем другие методы [22, 38, 52, 57, 60]. Как следствие, неопределенность значений фотосферного содержания кремния  $A_{Si}$ , найденных на основе экспериментальных данных, близка к 0.1 dex.

Использование теоретических сил осцилляторов ведет к большому разбросу значений  $A_{Si}$ . Согласно исследованиям [42, 58] значения сил осцилляторов, приведенные в работе Куруча и Пейтремана [46],

имеют очень большие погрешности, особенно для высоковозбужденных линий. К еще большему разбросу содержаний приводит использование значений сил осцилляторов линий Si из базы данных NIST (см. [58]).

Основным недостатком «солнечных» значений сил осцилляторов [3, 25], основанных на подгонке теоретических профилей спектральных линий к наблюдаемым, является их зависимость от постоянной затухания, поля скоростей (микро- и макротурбулентных скоростей при одномерном моделировании), модели атмосферы. Профили линий Si, используемые при определении сил осцилляторов, могут оказаться чувствительными к грануляционной структуре атмосферы Солнца, мелкомасштабному магнитному полю и НЛТР-эффектам.

**Постоянная затухания.** Другая проблема связана с постоянной затухания  $\epsilon_6$ , описывающей ван-дер-ваальсовское уширение линий вследствие столкновений с нейтральными атомами водорода. Эта постоянная определяет контуры интенсивности спектральных линий и, как следствие, в той или иной степени влияет на оценки содержания. На сегодняшний день есть большое количество лабораторных, эмпирических и теоретических исследований по определению  $\epsilon_6$ , обзор которых можно найти в работах Р. И. Костыка [45] и Э. А. Гуртовенко и Р. И. Костыка [3].

Из трех указанных типов исследований лабораторные измерения ван-дер-ваальсовской постоянной затухания являются, по-видимому, наименее надежными, так как в этом случае невозможно воспроизвести условия в солнечной атмосфере.

Эмпирические определения  $\epsilon_6$  по эквивалентным ширинам линий солнечного спектра показывают, что поправочный множитель  $E$  к теоретической постоянной, рассчитываемой в рамках классической ударной теории Вайскопфа — Линдхольма (см. [53]) по формуле Унзольда [1, 66], в среднем равен 1.4—1.5 для линий элементов группы железа. В 1990-е гг. Ансти, Барклем и О’Мара, основываясь на подходе Брукнера [26], разработали полуклассическую теорию ударного уширения линий атомами водорода [9, 10, 20, 21], в которой при вычислении энергии взаимодействия между двумя атомами используется теория возмущений Рэлея — Шрёдингера второго порядка. Согласно Дероичу и др. [31] данная полуклассическая теория, известная сейчас как теория АВО, согласуется с вычислениями на основе квантово-механического подхода в пределах 20 %. Теория АВО в целом дает значение  $\epsilon_6$  в 2.4—3.0 раза больше, чем приближение Унзольда. Тестирование данной теории в работах [20, 21] для нескольких сильных солнечных спектральных линий в рамках одномерного моделирования показало удовлетворительное согласие теоретических и наблюдаемых профилей. Заметим, что при таком моделировании все уширение профиля приписывается затуханию вследствие ван-дер-ваальсовского взаимодействия с атомами водорода. Между тем необходимо помнить, что часть этого уширения создается полем скоростей нетепловых движе-



ний и структурными неоднородностями (грануляция, волны и т. п.). При учете указанного дополнительного уширения постоянная затухания  $\tau_6$  может оказаться меньше предсказываемой теорией АВО. Очевидно, что для окончательного подтверждения правильности этой теории нужен анализ существенно большего количества линий, и в рамках 3D-моделирования.

**Скорости неупругих столкновений с атомами водорода.** Третья нерешенная проблема касается формулы Дроина [33, 34], обычно используемой в НЛТР-задачах для расчета скоростей неупругих столкновений с атомами водорода. Известно, что формула Дроина — это модификация классической формулы Томсона, описывающей столкновения частиц одного типа, а именно столкновения атомов водорода между собой. Согласно исследованию [19] обобщение этой формулы Стинбоком и Холвегером [63] для случая столкновений с неводородоподобными атомами других химических элементов может вести к ошибкам, превышающим порядок величины. В связи с этим формулу Дроина часто умножают на масштабирующий множитель  $S_H$ , выбор которого требует серьезного квантово-механического обоснования [19]. Очевидно, что подгонка теоретических НЛТР-профилей линий Si к наблюдаемым путем выбора соответствующего множителя  $S_H$  по сути дела является маскировкой других эффектов, вызванных использованием большого набора свободных параметров, таких как атомные данные (силы осцилляторов, сечения фотоионизации, скорости неупругих столкновений с электронами, постоянная затухания и т. п.), поле скоростей (микро- и макротурбулентные скорости при одномерном моделировании), модель атмосферы. В частности, профили линий Si могут оказаться чувствительными к неоднородной структуре атмосферы Солнца, вызванной грануляцией. На сегодня неизвестны исследования НЛТР-образования линий этого элемента в реалистичной солнечной атмосфере, термодинамические параметры которой, как известно, изменяются вдоль более чем одного направления.

**Неоднородная структура атмосферы Солнца.** Учет грануляционной структуры атмосферы Солнца, выполненный Асплундом и др. [11—14] при определении ЛТР-содержания элементов на основании гидродинамических 3D-моделей, привел к возникновению новой проблемы. Полученное значение фотосферного содержания кремния составило  $A_{Si} = 7.51 \pm 0.03$ , что на 0.04 dex меньше рекомендованного в работе [8] метеоритного содержания. Не ставя под сомнение полученное солнечное значение и исходя из предположения, что в логарифмической шкале солнечное и метеоритное содержание этого элемента должны совпадать, Асплунд и др. предложили понизить метеоритное содержание кремния до  $A_{Si}(\text{meteor}) = 7.51 \pm 0.02$ . Поскольку кремний является репером при определении содержания других химических элементов, такой подход влечет за собой сдвиг всей метеоритной шкалы содержаний элементов на 0.04 dex вниз [12]. Аналогичный сдвиг солнечной шкалы, получаемый при ЛТР-моделировании профилей химических элементов в трехмерных гидродинамических моделях

[12—14], приводит к хорошему согласию с новой метеоритной шкалой. Следствием такого сдвига оказывается уменьшение суммарного содержания металлов в два раза и уменьшение металличности Солнца с  $Z/X = 0.0275$  [8] до 0.0165 [13] или до 0.0181 [14]. Это новое значение металличности соответствует аномально низкому значению скорости звука на Солнце, что противоречит данным гелиосейсмологии [16, 17]. В настоящее время в литературных источниках предлагается несколько путей решения этой проблемы:

1) определение содержания кремния в рамках трехмерного моделирования должно быть выполнено с учетом НЛТР-эффектов;

2) возможно, что непрозрачность в континууме выше, чем предполагалось раньше, на 12—15 % возле дна конвективной зоны и на 2—5 % в центре Солнца. Новые расчеты, выполненные в рамках проекта TORBase [15], показывают, что по крайней мере увеличение на 5 % вполне возможно;

3) согласно Кафау и др. [27] учет грануляции не может быть причиной систематического понижения содержания химических элементов, поскольку в зависимости от характеристик используемых линий можно получить как положительные, так и отрицательные поправки к содержанию. По их оценкам металличность Солнца должна быть выше ( $Z/X = 0.0209$ ). Учет влияния диффузии элементов в толще атмосферы Солнца может привести к дополнительному увеличению содержания элементов еще на 0.04 dex, что вполне достаточно для совпадения скорости звука на Солнце с данными гелиосейсмологии.

**Мелкомасштабное магнитное поле.** Еще одна нерешенная проблема, касающаяся формирования солнечного спектра кремния, связана с учетом влияния мелкомасштабного магнитного поля, изменяющегося в пределах грануляции. Согласно Бореро [24] профили интенсивности слабых и умеренно слабых линий Si I из оптического диапазона спектра, полученные с низким пространственным и временным разрешением, мало чувствительны к такому полю, что делает их наиболее пригодными при определении содержания кремния. Однако этот вывод получен для идеального случая, а именно для одномерной модели атмосферы Солнца с фиксированным направлением магнитного поля и в приближении ЛТР. На сегодняшний день не ясно, как изменится данный вывод, если рассмотреть реалистичную модель атмосферы Солнца, в которой приняты во внимание пространственные вариации температуры, плотности, поля скоростей, напряженности магнитного поля и НЛТР-эффекты. Неизвестно, насколько чувствительны к мелкомасштабному магнитному полю профили более сильных ИК-линий.

## ВЫВОДЫ

Обзор литературных источников показывает, что на сегодня остается большое число нерешенных проблем, связанных с образованием сол-

нечного спектра кремния. Одна из самых актуальных проблем — вопрос о металличности Солнца — напрямую зависит от значения содержания кремния в атмосфере. Для надежного определения этой величины необходимо рассмотреть образование линейчатого спектра в неоднородной атмосфере Солнца с учетом отклонения от локального термодинамического равновесия. На сегодняшний день исследований такого рода не проводилось, и мы планируем сделать эти исследования темой наших будущих работ.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.—446 с.
2. Бабий Б. Т., Гирняк М. Б., Рикалюк Р. Е. О содержании кремния в фотосфере Солнца // Циркуляр Львов. астрон. обсерватории.—1979.—**54**.—С. 27—33.
3. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
4. Рикалюк Р. Е. Содержание химических элементов в солнечной атмосфере. Состояние на 1986 год // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—**4**, № 3.— С. 21.
5. Славенас И.-Ю. Ю. Силы осцилляторов спектральных линий Si I и Ge I // Оптика и спектроскопия.—1964.—**16**, № 3.—С. 390—393.
6. Хохлов М. З. Силы осцилляторов набора переходов p<sup>2</sup>—p<sup>1</sup>s в спектре свинца, олова, германия, кремния и углерода. Германий, кремний, сравнение теории и эксперимента (Pb I, Sn I, Ge I, Si I) // Изв. Крым. астрофиз. обсерватория.—1963.—**29**.—С. 131—140.
7. Aller L. H., O'Mara B. J., Little S. The abundances of Iron and Silicon in the Sun // Proc. Nat. Astron. Soc.—1964.—**51**, N 6.—P. 1238—1243.
8. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements — Meteoritic and solar // Geochim. Cosmochim. Acta.—1989.—**53**.—P. 197—214.
9. Anstee S. D., O'Mara B. J. An investigation of Brueckner's theory of line broadening with application to the Sodium D lines // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1991.—**253**, N 1.—P. 549—560.
10. Anstee S. D., O'Mara B. J. Width cross-sections for collisional broadening of s—p and p—s transitions by atomic Hydrogen // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1995.—**276**, N 3.—P. 859—866.
11. Asplund M. Line formation in solar granulation. III. The photospheric Si and meteoritic Fe abundances // Astron. and Astrophys.—2000.—**359**.—P. 755—758.
12. Asplund M. New light on stellar abundance analyses: Departures from LTE and homogeneity // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.—2005.—**43**, N 1.— P. 481—530.
13. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J. The solar chemical composition // ASP Conf. Ser.—2005.—**336**.—P. 25—38.—(Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis / Eds F. N. Bash, T. G. Barnes).
14. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P. The chemical composition of the Sun // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.—2009.—**47**, N 1.—P. 481—522.
15. Badnell N. R., Bautista M. A., Butler K., et al. Updated opacities from the opacity project // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2005.—**360**, N 2.—P. 458—464.
16. Bahcall J. N., Basu S., Pinsonneault M., Serenelli A. M. Helioseismological implications of recent solar abundance determinations // Astrophys. J.—2005.—**618**, N 2.— P. 1049—1056.
17. Basu S., Antia H. M. Constraining solar abundances using helioseismology // Astrophys. J. Lett.—2004.—**606**, N 1.—P. 85—88.
18. Bard S., Carlsson M. Constructing computationally tractable models of Si I for the 1082.7 nm transition // Astrophys. J.—2008.—**682**, N 2.—P. 1376—1385.

19. *Barklem P. S., Belyaev A. K., Guitou M., et al.* On inelastic hydrogen atom collisions in stellar atmospheres // *Astron. and Astrophys.*—2011.— **530**.—id. A94.
20. *Barklem P. S., O'Mara B. J.* The broadening of p—d and d—p transitions by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—**290**, N 1.—P. 102—106.
21. *Barklem P. S., O'Mara B. J., Ross J. E.* The broadening of d—f and f—d transitions by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**296**, N 4.—P. 1057—1060.
22. *Bashkin S., Astner G., Mannervik S., et al.* Lifetimes for excited levels on Si I—Si IV // *Phys. scr.*—1980.—**21**.—P. 820—824.
23. *Becker U., Zimmermann P., Holweger H.* Solar and meteoritic abundance of silicon // *Geochim. et cosmochim. acta.*—1980.—**44**.—P. 2145—2149.
24. *Borrero J. M.* On the role of magnetic fields in abundance determinations // *Astrophys. J.*—2008.—**673**, N 1.—P. 470—476.
25. *Borrero J. M., Bellot Rubio L. R., Barklem P. S., del Toro Iniesta J. C.* Accurate atomic parameters for near-infrared spectral lines // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**404**.—P. 749—762.
26. *Brueckner K. A.* Collision broadening by neutral hydrogen // *Astrophys. J.*—1971.—**169**.—P. 621—634.
27. *Caffau E., Ludwig H.-G., Steffen M., et al.* Solar chemical abundances determined with a CO5BOLD 3D model atmosphere // *Solar Phys.*—2011.—**268**, N 2—P. 255—269.
28. *Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J.* Spectropolarimetric investigation of the propagation of magnetoacoustic waves and shock formation in sunspot atmospheres // *Astrophys. J.*—2006.—**640**, N 2.—P. 1153—1162.
29. *Cincunegui C., Mauas P. J. D.* Blue lines as chromospheric diagnostics: the Si I lines at 3906 and 4103 Å // *Astrophys. J.*—2001.—**552**, N 2.—P. 877—888.
30. *Claas W. J.* The composition of the solar atmosphere // *Utrecht Rijksuniversiteit Sterrewacht. Recherches Astronomiques: Rech. Astr. Obs. Utrecht, 1951.*—**12**.—P. 1—53.
31. *Derouich M., Sahal-Brechot S., Barklem P. S., O'Mara B. J.* Semi-classical theory of collisional depolarization of spectral lines by atomic hydrogen I. Application to p states of neutral atoms // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**404**.—P. 763—773.
32. *de Wijn A. G., Stenflo J. O., Solanki S. K., Tsuneta S.* Small-scale solar magnetic fields // *Space Sci. Revs.*—2009.—**144**, N 14.—P. 275—315.
33. *Drawin H. W.* Zur formelmäßigen Darstellung des Ionisierungsquerschnitts für den Atom-Atomstoß und über die Ionen-Elektronen-Rekombination im dichten Neutralgas // *Z. Phys.*—1968.—**211**, N 4.—P. 404—417.
34. *Drawin H. W.* Influence of atom-atom collisions on the collisional-radiative ionization and recombination coefficients of hydrogen plasmas // *Z. Phys.*—1969.—**225**, N 5.—P. 483—493.
35. *Felipe T., Khomenko E., Collados M.* Magneto-acoustic waves in sunspots: First results from a new three-dimensional nonlinear magnetohydrodynamic code // *Astrophys. J.*—2010.—**719**, N 1.—P. 357—377.
36. *Felipe T., Khomenko E., Collados M., Beck C.* Multi-layer study of wave propagation in sunspots // *Astrophys. J.*—2010.—**722**, N 1.—P. 131—144.
37. *Finn G. D., McAllister H. C.* Observed and theoretical profiles of the Si II lines at 1814 // *Solar Phys.*—1978.—**56**.—P. 263—273.
38. *Garz T.* Absolute oscillator strength of Si I lines between 2500 Å and 8000 Å // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**26**.—P. 471—477.
39. *Goldberg L., Aller L. H.* Atoms, stars and nebulae. — Philadelphia: Blakiston Co., 1943.—323 p.

40. *Golbberg L., Müller E. A., Aller L. H.* The abundances of the elements in the solar atmosphere // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1960.—**5**.—P. 1—137.
41. *Grevesse N., Swings J. P.* The solar abundance of silicon from forbidden lines of Si I // *Astrophys. J.*—1972.—**171**.—P. 179—184.
42. *Gurtovenko E. A. Kostik R. I.* On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. Part two — on the errors of the oscillator strengths of Fe I lines in the Kurucz // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**101**.—P. 132—133.
43. *Hey P.* Messung der absoluten Übergangswahrscheinlichkeiten einiger Silizium I-, Silizium II sowie einiger Chlor I- und Chlor II-Linien // *Z. Phys.*—**157**, N 1.—P. 79—88.
44. *Holweger H.* The solar abundance of silicon // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**26**.—P. 275—278.
45. *Kostik R. I.* Damping constant and turbulence in the solar atmosphere // *Solar Phys.*—1982.—**78**.—P. 39—57.
46. *Kurucz R. L., Peytremann E. A.* A table of semiempirical gf values. Part 1: Wavelengths: 5.2682 nm to 272.3380 nm. — Cambridge, Mass.: SAO Special Report, 1975.—362 p.
47. *Lambert D. L., Luck R. E.* The abundances of the elements in the solar photospheres. IX. Na to Ca // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1978.—**183**, N 1.—P. 79—100.
48. *Lambert D. L., Warner B.* The abundances of the elements in the solar photosphere. III. Silicon // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1968.—**138**, N 2.—P. 213—227.
49. *Lambert D. L., Warner B.* Absorption lines of neutral silicon in the solar spectrum // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1968.—**139**, N 1.—P. 35—101.
50. *Lites B. W., Keil S. L., Scharmer G. B., Wyller A. A.* Steady flows in active regions observed with the He I 10830 Å line // *Solar Phys.*—1985.—**97**, N 1.—P. 35—49.
51. *Lodders K.* Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 2.—P. 1220—1247.
52. *Marek J., Richter J.* Lifetime measurements of optical levels for 6 elements of astrophysical interest // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**26**.—P. 155—157.
53. *Mihalas D.* Stellar atmospheres: Second ed. — San Francisco: W. H. Freeman and Co, 1978.—650 p.
54. *Ramsauer J., Solanki S. K., Biemont E.* Interesting lines in the infrared solar spectrum. II. Unblended lines between 1.0 and 1.8  $\mu$ m // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**113**.—P. 71—89.
55. *Rüedi I., Solanki S. K., Livingston W., Harvey J.* Interesting lines in the infrared solar spectrum. III. A polarimetric survey between 1.05 and 2.50  $\mu$ m // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**113**.—P. 91—106.
56. *Russell H. N.* On the composition of the Sun's atmosphere // *Astrophys. J.*—1929.—**70**.—P. 11—82.
57. *Savage B. D., Lawrence G. M.* Radiative lifetimes of ultraviolet multiplets in Si, P, S, O, Ne II and Ar II // *Astrophys. J.*—1966.—**146**, N 3.—P. 940—943.
58. *Shi J. R., Gehren T., Butler K., et al.* Statistical equilibrium of silicon in the solar atmosphere // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**486**.—P. 303—310.
59. *Shi J. R., Gehren T., Mashonkina L. I., Zhao G.* Statistical equilibrium of silicon in the atmospheres of metal-poor stars // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**503**.—P. 533—540.
60. *Smith P. L., Huber M. C. E., Tozzi G. P., et al.* Absolute oscillator strengths for 108 lines of Si I between 163 and 410 nanometers // *Astrophys. J.*—1987.—**322**, N 1.—P. 573—583.

61. *Solanki S. K., Biemont E., Mürset U.* Interesting lines in the infrared solar spectrum between 1.49 and 1.8  $\mu\text{m}$  // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1990.—**83**.—P. 307—315.
62. *Solanki S., Lagg F., Woch J., et al.* Three-dimensional magnetic field topology in a region of solar coronal heating // *Nature*.—2003.—**425**, N 6959.—P. 692—695.
63. *Steenbock W., Holweger H.* Statistical equilibrium of lithium in cool stars of different metallicity // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**130**.—P. 319—323.
64. *Trujillo Bueno J., Shchukina N., Asensio Ramos A.* A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun // *Nature*.—2004.—**430**, N 6997.—P. 326—329.
65. *Unsöld A.* Quantitative Spektralanalyse der Sonnenatmosphäre // *Z. Astrophysik*.—1948.—**24**.—P. 306—329.
66. *Unsöld A.* Physik der Sternatmosphären: Second ed. — Berlin: Springer, 1955.—866 p.
67. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. II. The underlying photosphere and temperature-minimum region // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1976.—**30**.—P. 1—60.
68. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1981.—**45**.—P. 635—725.
69. *Warner B.* Atomic oscillator strength — I. Neutral Silicon // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1968.—**139**, N 1.—P. 1—34.
70. *Warner B.* Level-broadening constants for Mg I and Si I // *Z. Astrophysik*.—1968.—**69**, N 1.—P. 161—167.
71. *Wedemeyer S.* Statistical equilibrium and photospheric abundance of silicon in the Sun and in Vega // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**373**.—P. 998—1008.
72. *Withbroe G. L.* A comparison of solar EUV intensities and K-coronameter measurements // *Solar Phys.*—1971.—**18**, N 3.—P. 458—473.

Поступила в редакцию 04.05.11