

УДК 523.94

К вопросу о поведении молекулярных линий на солнечном диске

М.М. Ковальчук., М.Б. Гирняк.

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета
им. И. Франко, Львов, ул. Кирилла и Мефодия 8, 79005
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua

Поступила в редакцию 31 января 2007 г.

Аннотация. В работе проведено исследование физических условий в высоких слоях солнечной фотосферы. Проведено сопоставление рассчитанных профилей молекулярных линий с наблюдаемыми на диске Солнца. Наблюдаемые профили в центре и на краю диска получены в ГАО РАН на спектрометре двойного прохождения. Выяснено, что за механизм образования молекулярных линий отвечает совместное действие истинного поглощения и когерентного, а также некогерентного рассеяния; уточнена концентрация молекул и ее изменение с высотой в солнечной атмосфере; определены оптические глубины образования молекулярных линий; проанализирован выбор оптимальной модели солнечной атмосферы.

ON THE QUESTION ABOUT BEHAVIOUR OF MOLECULAR LINES ON THE SOLAR DISK, by *M.M. Koval'chuk, M.B. Hirnyak*. In the present work we studied physical conditions in high layers of the solar photosphere. Comparison of the calculated profiles of molecular lines with the observed ones on the solar disk is carried out. The observed profiles in the centre and at the limb of the disk are obtained with a spectrometer of double passing at the Main Astronomical Observatory, Russia. The joint action of true absorption and coherent, and noncoherent absorption too, is responsible for the mechanism of formation of molecular lines; molecules concentration and its change with height in the solar atmosphere are specified; optical depths of formation of molecular lines are determined; the choice of an optimum model of the solar atmosphere is analyzed.

Ключевые слова: солнечная атмосфера, молекулярные линии

Анализ молекулярных спектров помогает решить целый ряд важных проблем физики Солнца. Как известно, молекулярные линии образуются в высших, по сравнению с атомными линиями, слоях атмосферы Солнца, где физические условия исследованы еще недостаточно. Таким образом, молекулярные спектры привлекаются, главным образом, для изучения переходных слоев от фотосферы к хромосфере, а также невозмущенной фотосферы и активных областей на Солнце. Особый интерес состоит в изучении профилей молекулярных линий при переходе от центра солнечного диска к краю, чем охвачен большой диапазон оптических глубин.

Цель работы – исследование физических условий в высоких слоях солнечной атмосферы на основании расчета теоретических профилей молекулярных линий и достижения согласованности их с наблюдаемыми профилями как в центре, так и на краю солнечного диска.

Записи профилей наблюдаемых линий заимствованы из работы (Печинская, 1976). Наблюдения проводились в двух точках диска Солнца – в центре ($\mu = \cos \vartheta = 1$) и на краю ($\mu = 0.24$).

В работе использована система линий СН электронного перехода $B^2\Sigma - X^2\Pi$, поскольку молекула СН довольно широко распространена в атмосфере Солнца и отображена в его спектре. Мы выбрали шесть чистых неблендированных линий, список которых приведен в таблице 1. В таблице обозначены: длина волны, ветка, которой принадлежит эта линия, квантовое вращательное число, колебательная полоса, а также длина волны, интенсивность в которой принята за интенсивность непрерывного спектра для данной линии, эквивалентная ширина линии в $m\text{\AA}$ и доплеровская полуширина в $m\text{\AA}$.

Таблица 1. Молекулярные и физические данные для системы линий СН электронного перехода $B^2\Sigma - X^2\Pi$

λ , \AA	Ветка, вращательное квантовое число	Колебательная Полоса	λ , \AA непрерывного спектра	W, $m\text{\AA}$	$\Delta\lambda_D$, $m\text{\AA}$
4253.004	R 10	1 - 1	4252.875	36	23
4253.210	R 10	1 - 1	4252.875	40	22
4255.251	R 9	0 - 0	4252.875	61	26
4293.036	Q 18	0 - 0	4295.510	65	25
4293.114	Q 17	0 - 0	4295.510	87	30
4346.295	P 7	1 - 1	4349.595	49	24

Техника расчета состояла в методе согласования теоретических эквивалентных ширин молекулярных линий поглощения с наблюдательными данными.

При расчете теоретических эквивалентных ширин проводился расчет уравнения переноса излучения с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР) в солнечной атмосфере. При практическом вычислении профиля или эквивалентной ширины линии мы пользовались методом числового интегрирования.

В случае неравновесного расчета уравнения переноса мы допускали, что механизмом образования линий является комбинация истинного поглощения и когерентного, а также некогерентного рассеяния (Бабий, Ковальчук, 1984).

Получено, что влияние некогерентности рассеяния значительно меньше, чем влияние когерентности, поскольку отличия в профилях, рассчитанных с добавлением к основным механизмам – истинному поглощению и когерентному рассеянию – еще и некогерентного рассеяния, являются незначительными. Отличия составляют всего 0.5 – 0.8 % для центральных остаточных интенсивностей в центре солнечного диска. На краю диска отличия между профилями, которые рассчитаны с двумя видами рассеяния, немного увеличиваются, достигая 0.8 – 1.2 %.

Для выяснения влияния структуры атмосферы Солнца на расчет профилей линий поглощения мы использовали два типа наиболее употребляемых современных моделей Солнца – VAL-C-80 (Вернацца и др., 1981) и MACKKL (Малтби и др., 1980). Они отличаются характером наблюдаемых данных, на основании которых они построены, и как следствие этого – различным значением и положением уровня температурного минимума.

Коэффициент поглощения в непрерывном спектре вычисляем с учетом многих физических процессов, в которых поглощающие частицы выполняют связанно-свободные и свободно-свободные переходы.

Для определения постоянной затухания, которая входит как один из параметров в функцию Фойгта, учтено только затухание с атомами нейтрального водорода, поскольку затухание вследствие излучения и затухание в случае столкновений с электронами ничтожно. Потенциалы диссоциации молекулы СН и возбуждения ее нижнего и верхнего уровней рассчитаны с помощью молекулярных данных, приведенных в работе (Тейтем, 1966).

Подробнее остановимся на вычислении сил осцилляторов молекулярных линий, поскольку существуют некоторые особенности в расчетах по сравнению с атомными линиями. Силу осциллятора для перехода $(iQ''N''J'') \rightarrow (kQ'N'J')$, где i и k обозначают различные электронные состояния, Q - колебательное, N и J - вращательные квантовые числа, можно записать в виде:

$$f_{abs} = f_{el} f_{vib} f_{rot} = \frac{f_{el} q_{Q'Q''} S_{N'N''}}{2N'' + 1}.$$

Здесь f_{el} - сила осциллятора электронного перехода; $q_{Q'Q''}$ - фактор Франка-Кондона (вероятность этого колебательного перехода); $S_{N'N''}$ - фактор силы линии, или фактор Хенля-Лондона, что учитывает распределение интенсивности между линиями одной полосы.

Фактор Хенля-Лондона $S_{N'N''}$ выражается довольно просто через соответствующие квантовые числа и молекулярные постоянные (Шейди, 1964). Дальше, согласно рекомендациям, приведенным в (Хохлов, 1980), для перехода $B^2\Sigma^- - X^2\Pi$ примем $f_{el} = (2.5 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$ для полосы (0-0) и $1.6 \cdot 10^{-3}$ для полосы (1-1). Значения факторов Франка-Кондона для перехода $B^2\Sigma^- - X^2\Pi$ молекулы СН для диагональных полос ($Q' = Q''$), а именно для полос (0-0) и (1-1) равны, соответственно, 0.86 и 0.57 (Гревс и Соувел, 1973). Они составляют всего несколько сотых для других переходов. Ошибки этих значений не превышают 1-2%. Некоторая неопределенность существует в значениях f_{el} . Поэтому не всегда можно с уверенностью сказать, чем объясняется отклонение рассчитанных профилей и эквивалентных ширин от реальных, либо несоответствием модели атмосферы или механизма образования линий, либо разбросом значений f_{el} .

Для расчета коэффициента поглощения в линии необходимо определить концентрацию молекул СН в нижнем состоянии в различных слоях атмосферы Солнца. Концентрацию рассчитываем на основе теории диссоциативного равновесия (Шейди, 1964). Воспользуемся алгоритмом, приведенным в (Драке, 1985):

$$\frac{P_C P_H}{P_{CH}} = K_{CH}(T),$$

где P_C , P_H и P_{CH} - парциальные давления атомов С и Н и молекулы СН; $K_{CH}(T)$ - константа диссоциации, что зависит только от температуры и определяется соотношением:

$$K_{CH}(T) = \left(\frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{3/2} kT \frac{Q_C Q_H}{Q_{CH}} e^{-D_0^0 / kT}.$$

Здесь Q_C , Q_H , и Q_{CH} – суммы по состояниям атомов С и Н молекулы СН (подробные таблицы сумм по состояниям для некоторых молекул приведены в работе (Маунт и др., 1973)); D_0^0 – потенциал диссоциации молекулы, определение которого описано выше; для молекулы СН это значение равно 3.46 ± 0.01 eV; $m = m_C m_H / m_{CH}$ – приведенная масса. Таким образом, парциальное давление, создаваемое молекулами СН определяем непосредственно с парциальных давлений С и Н. В общем случае нужно учитывать все молекулы, что влияют на парциальные давления атомов С и Н.

Однако только образование молекул СО существенно воздействует на концентрацию молекул СН (вследствие высокой энергии диссоциации молекул СО (Тейтем, 1966)). Двухкратную ионизацию углерода и кислорода в верхних слоях солнечной фотосферы можно не учитывать. Окончательно получена такая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_H^* &= P_H + P_{H^+} + P_{H_2} \\ P_C^* &= P_C + P_{C^+} + P_{CO} \\ P_O^* &= P_{O^+} + P_{O^{2+}} + P_{CO_2} \end{aligned} \right\},$$

где P_H^* , P_C^* и P_O^* – фиктивные парциальные давления водорода, углерода и кислорода, обусловленные полным числом атомов (нейтральных, ионизированных и связанных в молекулах) соответственных элементов.

Зададим модельные значения газового давления P_g и электронного давления P_e и учтем, что $P_{He}^* = P_{He}$. Тогда легко найти P_H^* , ибо

$$P_g = P_H^* + P_e + P_{He}.$$

На основании P_H^* можем определить P_C^* и P_O^* :

$$P_C^* = A_C P_H^* ;$$

$$P_O^* = A_0 P_H^* ,$$

где A_C и A_0 – относительное содержание углерода и кислорода в атмосфере Солнца. Выразив из уравнения диссоциативного равновесия парциальные давления молекул СО и Н₂ через парциальные давления составных молекул атомов, а из уравнения Саха парциальные давления ионов и используя модельные значения температуры полного газового и электронного

давления, можно решить полученную систему уравнений. Самое большое значение концентрации молекул СН ($\lg N_{\text{CH}} = 9.78$ dex), как доказано в (Драке и Эзерыньш, 1985), есть при $\tau_{5000} = 0.5$, что отвечает высоте $H = 40$ км над основанием фотосферы. На высотах, что превышают 650 км ($\lg \tau_{5000} = -4.5$) происходит резкое уменьшение концентрации молекул СН.

Оптические глубины образования молекулярных линий для различных положений на солнечном диске мы определяли с помощью функций вклада в эмиссию.

Результаты расчетов показывают, что центры сильных линий λ 4255.251, 4293.036, 4293.114 Å молекулы образуются в более высоких слоях атмосферы, чем центры линий с меньшей эквивалентной шириной (λ 4253.004, 4253.210, 4346.295 Å). Крылья линий ($\Delta\lambda = 100$ mÅ) образуются глубже, чем ядра. С приближением к краю диска оптическая глубина образования линий заметно уменьшается. Линии молекулы СН образуются в довольно протяженном слое, $-2.0 \leq \lg \tau_{5000} \leq -5$, расположенном глубже от области температурного минимума. Этот результат согласуется с расчетами концентрации молекулы СН и ее изменения с глубиной в атмосфере Солнца.

Вопрос о глубинах формирования молекулярных линий, а также о механизмах их образования оказывается существенным для выбора модели.

Выбор модели атмосферы мы проводили на основе анализа эквивалентных ширин молекулярных линий. В таблице 2 приведены значения эквивалентных ширин линий при переходе центр-край. Наблюдаемые значения эквивалентных ширин сопоставлены с теоретическими, рассчитанными по моделям VAL-C и MACKKL.

Таблица 2. Сопоставление наблюдаемых эквивалентных ширин линий с рассчитанными по моделям VAL-C и MACKKL в центре и на краю солнечного диска.

λ , mÅ	W, mÅ					
	Наблюд.		Модель VAL-C		Модель MACKKL	
	$\mu = 1$	$\mu = 0.24$	$\mu = 1$	$\mu = 0.24$	$\mu = 1$	$\mu = 0.24$
4253.004	36	43	39	48	38	46
4253.210	37	46	41	51	39	49
4255.251	61	67	65	72	63	70
4293.036	65	69	69	75	68	74
4293.114	87	93	92	97	90	94
4346.295	49	52	53	55	50	54

Как видно из таблицы 2, эквивалентные ширины наблюдаемых и теоретических эквивалентных ширин увеличиваются при переходе от центра к краю диска. Однако существуют значительные расхождения между наблюдаемыми и теоретическими эквивалентными ширинами, что основаны на расчетах в рамках двух используемых моделей. Эти отличия в значениях эквивалентных ширин невелики в центре диска и увеличиваются к краю солнечного диска. Отметим, что изменение эквивалентных ширин к краю диска больше соответствует распределению параметров в модели MACKKL, чем в модели VAL-C. Таким образом, хорошо зарекомендовав себя при интерпретации непрерывного спектра и слабых линий, модель VAL-C здесь сталкивается с трудностями.

Подводя итог этой работы, отметим наиболее важные результаты:

1. Для согласования теоретических профилей с наблюдаемыми на диске, расчеты нужно проводить в рамках теории, в которой учтено отклонение от локального термодинамического равновесия в атмосфере Солнца.
2. Показано, что механизмом образования молекулярных линий есть комбинация истинного поглощения и когерентного, а также некогерентного рассеяния.
3. Определены оптические глубины образования молекулярных линий с помощью функций вклада в эмиссию. Линии молекулы CN образуются в слое $-2.0 \leq \lg \tau_{50000} \leq -0.5$.
4. На основании комплексного подхода к проблеме образования линий определена концентрация молекул CN в солнечной атмосфере. Эти значения изменяются от максимального $\lg N_{\text{CN}} = 9.78 \text{ dex}$ при $\lg \tau_{5000} = -0.3$ до значения $\lg N_{\text{CN}} = 7.07 \text{ dex}$ в области температурного минимума.
5. Теоретические эквивалентные ширины молекулярных линий увеличиваются при переходе от центра к краю солнечного диска, что согласуется с наблюдениями.
6. Обнаружены эффекты повышенной чувствительности молекулярных линий к температурной модели атмосферы. Таким образом, при интерпретации молекулярных линий с учетом отклонений от ЛТР лучшее согласие поведения теоретических и наблюдаемых профилей и эквивалентных ширин молекулярных линий на солнечном диске получаем при использовании модели MACKKL.
7. Анализ результатов этих исследований дает возможность диагностировать физическое состояние солнечной атмосферы на различных глубинах.

Литература

- Бабий Б.Т., Ковальчук М.М. // *Астрон. журн.* 1984. Т. 61. Вып. 4. С. 771.
- Вернацца (Vernazza J.E., Avrett E.R., Loeser R.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1981. V. 5. №. 4. P. 635.
- Хохлов Р.В. // *Вероятности оптических переходов двухатомных молекул.* 1980.
- Гревс (Grevesse N., Sauval A.J.) // *Astron. Astrophys.* 1973. V. 27. №. 1. P. 29.
- Драке Н.И., Эзерыньш Н.В. // *Солнечные данные.* 1985. №. 9. С. 48.
- Малтби (Maltby P., Avrett E.H., Carlsson M., Kjeldseth, Moe O., Kuruch R.L., Loeser R.) // *J. Phys. Chem. Ret. Data.* 1980. V. 9. P. 1.
- Маунт Г. (Mount G.H., Linsky J.L., Shine R.A.) // *Solar Phys.* 1973. V. 32. №. 1. P. 13.
- Печинская Н.И. // *Солнечные данные.* 1976. №. 6. С. 55.
- Тейтем (Tatum J.B.) // *Publ. Dom. Obs. Victoria.* 1966. V. 13. №. 1. P. 1.
- Шейди А. (Schadee A.) // *BAN.* 17. 1964. №. 5. P. 311.