

РАСЧЕТ СПЕКТРА ЗАТМЕННОГО ПРОТУБЕРАНЦА 29.03.2006 В НЕОДНОРОДНОЙ МОДЕЛИ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ПЕРЕХОДНЫЙ СЛОЙ ПРОТУБЕРАНЕЦ-КОРОНА

Калинин А.А., Калинина Н.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

CALCULATION OF THE SPECTRUM OF THE ECLIPSE PROMI- NENCE 29.03.2006 IN AN INHOMOGENEOUS MODEL INCLUDING THE PROMINENCE-CORONA TRANSITION REGION

Kalinin A.A., Kalinina N.D.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Spectrum of the eclipse prominence 29.03.2006 (see [1]) is modeled. In [3], on the basis of a homogeneous model using the methods briefly described in [4], the prominence spectra were calculated in the lines of the blend of helium lines He 388.8 nm and hydrogen H₈ 388.9, hydrogen H_ε and lines of ionized calcium H and K. Comparison of the calculated integral intensities of all these lines with observations made it possible to obtain a hotter model of the prominence compared to [1]. In this communication, we performed calculations taking into account the presence of the prominence-corona transition layer (hereinafter referred to as PCTR). PCTR parameters are taken according to [7]. Turning on the PCTR significantly increases the number of variable parameters when modeling the spectrum, which rather complicates the assessment of the physical properties of the prominence due to the small number of observational quantities. In our case, the use of an inhomogeneous model seems to be an excess of the accuracy of the model compared to the observational data. Therefore, the results of the papers [1], [3] can be considered as fairly well characterizing the average properties of the observed prominence.

A feature of our simulation is the calculation of the response functions for the hydrogen, calcium, and helium lines under study, which makes it possible to estimate their formation depths. Such response functions for prominences have been obtained, as far as we know, for the first time, and can be used later in the analysis of the spectra of solar coronal formations.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-139-142

Экспедицией АО УрГУ получены спектры петельных структур протуберанца в области H и K CaII и широкополосные снимки солнечной короны в линиях 530.3 и 637.4 нм во время полного солнечного затмения 29 марта 2006 года. Описание наблюдений, аппаратуры и предварительные результаты см. в работе [1]. В ней рассмотрен спектр протуберанца в линиях H и K ионизованного кальция и линии водорода H_ε и получены оценки физических параметров протуберанца по методике [4, 6]. В [2] получена оценка электронной плотности, а в [3] спектр промоделирован с учетом линии нейтрального гелия 388.8 нм в изотермической модели, в результате оценка температуры возросла на 1000 К.

В работе проведено моделирование спектра данного затменного протуберанца в неоднородной модели, позволяющей температуре и давлению меняться в теле протуберанца от значений в холодной центральной зоне (определяемыми по линиям кальция и водорода) до стремящихся к корональным.

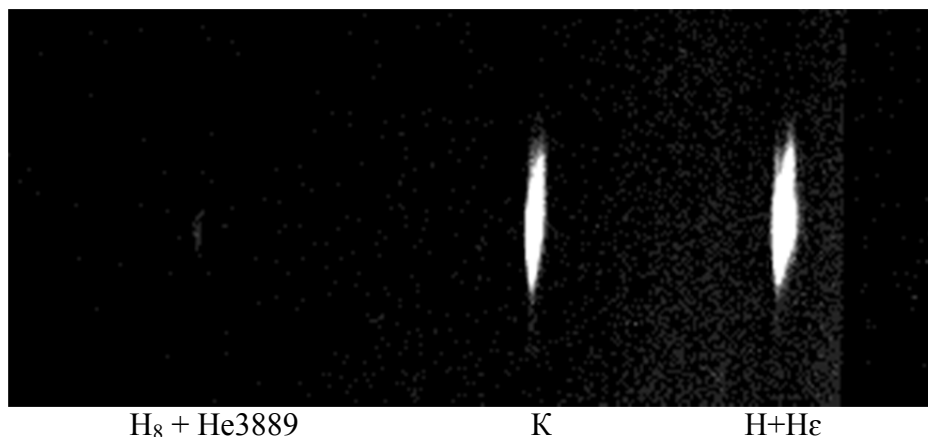


Рис. 1. Вид анализируемого спектра (кадр 209) с указанием спектральных линий.

Анализируемый спектр отражен на рис. 1. Линии имеют характерный вид наклонных бочек с раздвоенным концом в направлении Солнца. Максимальный доплеровский сдвиг достигает 90 км/с. Такой вид характерен для вращающихся цилиндров или спиралей (внутри вещество движется по спирали), когда щель пересекает их под углом. Возможно также наложение петель, в которых течет вещество. Поскольку нет самообращения в линиях, то вероятно вращение, а не расширение. Так как мало разрешение по λ – используем интенсивности, а не профили. Ранее показано, что вращение слабо влияет на интенсивности, поэтому можно использовать результаты для плоского слоя [6]. Линии H и K CaII в спектре Солнца широки – движения мало влияют на входящее в протуберанец излучение.

Расчет спектра производился при помощи программы PRODOP (см., например, [8]). Геометрия модели тела протуберанца плоский слой, перпендикулярный поверхности Солнца. Параметры модели: температура T (тыс. Кельвин), газовое давление P (дин/см²), геометрическая толщина протуберанца D (км), микротурбулентная скорость V (км/с), высота над поверхностью Солнца H (км).

В неоднородной модели допускается изменение давления и температуры. Соответствующие зависимости взяты из [7, 9] и получены для магнитогидростатической модели Киппенхана-Шлютера, а именно

$$P(m) = 4P_c \frac{m}{M} \left(1 - \frac{m}{M}\right) + P_0,$$

$$T(m) = T_{\text{cen}} + (T_{\text{tr}} - T_{\text{cen}}) \left(1 - 4 \frac{m}{M} \left(1 - \frac{m}{M}\right)\right)^\gamma.$$

Здесь P – газовое давление, T – температура, M – масса протуберанца, m – текущая масса ($m = \rho dx$, x – текущая толщина). T_{tr} – температура на внешней границе, принята равной 100 000 К, T_{cen} – температура в центре слоя. P_0 – давление на внешней границе, P_c – характерное давление в центре (полное в центре $P_c + P_0$, $m = M/2$). Постоянная γ контролирует скорость нарастания температуры и соответственно ширину PCTR ($\gamma \geq 2$).

В нашей неоднородной модели центральные значения должны быть близки к полученным для кальция и водорода в однородной модели. Мы приняли следующие значения:

$$T_{cen} = 5000 \text{ K}, \quad P_c = 0.2 \text{ cgs}, \quad T_{tr} = 10^5 \text{ K}, \quad P_0 = 0.01 \text{ cgs}, \quad D = 2000 \text{ км}, \quad \gamma = 2.$$

В неоднородной модели можно попытаться точнее отделить места образования отдельных линий. Считается, что гелий светится в более горячих частях протуберанца. Для более объективных оценок можно использовать понятия функций вклада и отклика, CF – contribution function и RF – response function соответственно. Для полубесконечной атмосферы они определяются следующим образом (см. [10]). В формуле

$$I_\lambda = \int_{-\infty}^{z_0} S_\lambda(z) \exp(-\tau_\lambda(z)) \frac{d\tau_\lambda(z)}{dz} dz = \int_{-\infty}^{z_0} C_\lambda(z) dz,$$

$C_\lambda(z)$ – функция вклада. Она характеризует вклад различных глубин в атмосфере в интенсивность линии. Удобна в ЛТР, т.к. все определяется температурой ($S_\lambda = B_\lambda(T)$) и коэффициентом поглощения. В неравновесном случае вклад в интенсивность линии дают нелокальные эффекты переноса излучения, для протуберанца в том числе внешнее излучение Солнца – фотосферы, хромосферы и короны, по разному ослабленное на разных глубинах. RF для полубесконечной атмосферы определяется как

$$I_\lambda = \int_{-\infty}^{z_0} R_\lambda^{I,X}(z) X(z) dz,$$

где R описывает вклад физического параметра X на глубине z и длине волны λ в интенсивность I . Методика расчета RF для отклика эквивалентной ширины линии ΔE на возмущение ΔT на глубине z в корональной структуре описана в работе [11].

Результаты и выводы

Метод расчета спектра неоднородного протуберанца дополнен расчетом функций отклика, позволяющих рассчитать глубину образования отдельных линий. Методика реализована в виде дополнения к известной программе PRODOP. Рассчитана функция отклика энергии линии гелия 3889 нм на возмущения температуры в протуберанце с описанными выше

параметрами неоднородной структуры и определено место свечения данной линии – 500 км от центра при температуре 10^4 К. Физические параметры протуберанца (температура 5000 К, полное давление газа 0.2 дин см^{-2} , концентрация электронов 10^{11} , скорости в основании структуры порядка 90 км с^{-1}) свидетельствуют об активизации петельной структуры. Низкие температуры и высокая концентрация электронов свидетельствуют в пользу большой скважности наблюдавшейся структуры и малой толщине ($<500 \text{ км}$) составляющих ее волокон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации, тема № FEUZ-2020-0030.

Литература

1. Калинин А.А., Горда С.Ю., Крушинский В.В., Попов А.А. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2012», 24–28 сентября 2012 г., ГАО РАН, СПб, с. 235.
2. Калинин А.А. Труды 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3–6 февр. 2014 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, с.233.
3. Калинин А.А., Калинина Н.Д. Тезисы докладов XXV Всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика – 2021», ГАО РАН, СПб, 4–8 октября 2021, с. 39.
4. Калинин А.А. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018», 8–12 октября 2018 г., ГАО РАН, СПб, с. 195.
5. Gouttebroze P., Heinzel P. // Astron. Astrophys., 2002, v. 385, pp. 273-280.
6. Kalinin A.A. // Geom.Aeron., 2012, v. 52, No. 8, pp. 1-5.
7. Levens P.J., Labrosse N. // Astron. Astrophys., 2019, v. 625, A30.
8. Labrosse N., Gouttebroze P., and Vial J.-C. // Astron. Astrophys, 2007, v. 463, pp. 1171–1179.
9. Anzer U., Heinzel P. // Astron. Astrophys., 1999, v. 349, pp. 974-984.
10. Uitenbroek H. // ASP Conf. Ser., 2006, v. 354, pp. 313-323.
11. Fossum A., Carlsson M. // Astrophys. Journ., 2005, v. 625, pp. 556-562.