

НАБЛЮДЕНИЕ И РАСЧЕТ МОДЕЛИ СПОКОЙНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

**Купряков Ю.А.^{1,2}, Бычков К.В.², Белова О.М.²,
Горшков А.Б.², Малиутин В.А.²**

¹*Астрономический институт Академии наук Чешской Республики, Ондřejев, Чехия*

²*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

OBSERVATION AND CALCULATION OF A QUIET PROMINENCE MODEL

**Kupryakov Yu.A.^{1,2}, Bychkov K.V.², Belova O.M.²,
Gorshkov A.B.², Maliutin V.A.²**

¹*Astronomical Institute AS CR, Ondřejov, Czech Republic*

²*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-199-202>

The paper presents the results of the analysis of observations of a quiet prominence on the horizontal solar spectrograph HSFA-2 of the Ondřejov observatory (Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences) in the spectral lines of hydrogen, helium and calcium. After processing the spectra, the integral fluxes of radiation in the lines were determined and a theoretical calculation of the physical parameters of the plasma was made under the assumption that the prominence is transparent in the continuous spectrum of the optical range, but taking into account possible self-absorption in the spectral lines. The parameters of the prominence are calculated in the heated gas model. Comparison of five lines at once made it possible to restore the parameters of the radiating gas with a high degree of confidence. The observed fluxes in the lines can be explained in terms of purely thermal heating of the prominence gas. The density and electron temperature of the prominence, as well as the calculated fluxes in the emission lines of the Balmer series, are variable on time scales from one to twenty minutes.

1. Введение

Несмотря на прекрасную монографию, посвященную протуберанцам, Jean-Claude Vial [1], вышедшую в 2015 году, ситуация с определением физических параметров этих объектов остается весьма запутанной. Наземные наблюдения, наблюдение со спутников в УФ дают богатый материал, однако каждая новая работа приносит новые данные, которые не всегда совпадают со значениями полученными ранее. Этот разброс данных можно объяснить особенностями используемых инструментов (различием применяемых фильтров, разными методами калибровки и обработки). Поэтому в нашей работе мы использовали данные, полученные нами на одном инструменте. Мы представляем наблюдения спокойного протуберанца, расположенного на NW лимбе Солнца. Весь материал был получен 22 октября 2013 г. с 10:39 до 11:07 UT на горизонтальном солнечном телескопе HSFA-2

Чешской Академии Наук (Ondřejov observatory). Цель работы – определение параметров плазмы протуберанца в линиях CaII H, H β , D3, H α и CaIR 8542 Å для спокойного протуберанца и сравнение результатов с расчетными значениями. Выполнены расчёты в линиях водорода кальция и гелия с учётом основных процессов, определяющих излучение газа прозрачного в спектральных линиях.

2. Наблюдения и обработка

Изображение исследуемого нами протуберанца можно увидеть на рис. 1. Высота протуберанца над диском Солнца была равна почти 50000 км. При наблюдениях мы выбирали различные области протуберанца, что соответствует разным моментам наблюдений.

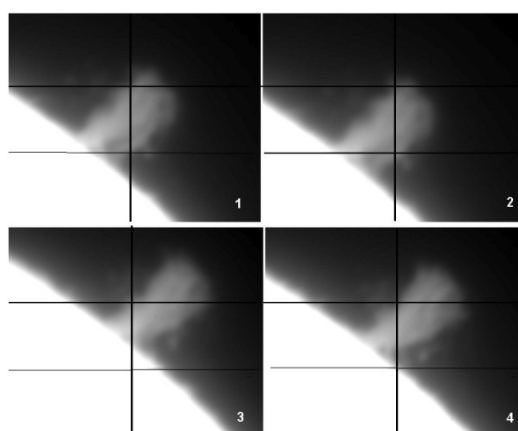


Рис. 1. Изображение протуберанца в линии H α на щели спектрографа HSFA-2 в выбранные моменты времени (1 – 10:42:07; 2 – 10:43:03; 3 – 11:00:10; 4 – 11:06:59 UT). Расстояние между горизонтальными (реперными) линиями соответствует $5.38 \cdot 10^4$ км, вертикальная линия показывает положение щели спектрографа.

После калибровки спектров с учетом кадров темнового (dark-frame) и плоского (flat-field) полей мы определили значения потоков в спектральных линиях (таблица 1).

Таблица 1. Наблюдаемые потоки излучения для протуберанца в линиях водорода, кальция и гелия на четыре момента времени в эрг/см²/с.

	10:42:07	10:43:03	11:00:10	11:06:59
H α	1.29E+6	1.44E+6	2.09E+6	2.07E+6
H β	2.24E+5	1.91E+5	5.81E+5	4.76E+5
H CaII	2.17E+5	2.08E+5	3.28E+5	2.90E+5
IR CaII	9.90E+4	9.10E+4	1.91E+5	8.60E+4
D3 HeI	9.69E+4	9.00E+4	2.64E+5	1.25E+5

3. Расчёт излучения в модели нагретого газа

Теоретические значения потоков вычислены нами в рамках модели однородного слоя или нескольких однородных слоёв, расположенных друг

за другом на луче зрения. Электронная температура T_e , концентрация газа N и толщина L каждого слоя подбирались таким образом, чтобы теоретические потоки излучения в спектральных линиях оказались близки наблюдаемым. Протуберанец может получать энергию от нижних слоёв атмосферы путём затухания МГД-волн, а также от окружающего его коронального газа. Оптическое излучение фотосферы во многом определяет состояние иона CaII и воздействует на субординатные переходы водорода и гелия. Некоторый вклад в скорость ионизации иона CaII может дать излучение хромосферы в линиях лаймановской серии водорода, начиная с $\text{Ly}\beta$. В этой модели состояние ионизации и населённости дискретных уровней слоя вычисляются по заданным значениям его электронной температуры, плотности и толщины. Рассеяние в частотах спектральных линий учитывалось в модели вероятности выхода фотона. Вероятность выхода для свёртки доплеровского и хольцмарковского контуров мы вычисляли по известным формулам, приведённым, в работе [2]. Уравнения баланса для населённостей вместе с источниками атомных данных приведены авторами в работе [3].

Таблица 2. Параметры протуберанца на моменты: 11:06:59 (1 слой); 10:42: 07 (2 слоя); и 10:43:03; 11:00:10 (3 слоя). Величина L выражена в километрах, T_e – в кельвинах, v – в километрах в секунду.

N	L	T_e	v	$T(\text{hms})$
9.0E+9	55000	15600	3.5	11:06:59
3.4E+9	25000	25000	3.0	10:42:07
9.1E+9	20000	6000	3.0	10:42:07
4.0E+9	8700	19700	1.8	10:43:03
5.5e+9	22500	17000	1.8	10:43:03
6.0E+9	20000	12000	1.45	10:43:03
1.2E+10	20000	22000	3.0	11:00:10
1.2E+10	24500	10900	3.5	11:00:10
4.0E+9	17000	7000	3.6	11:00:10

Таблица 3. Результаты вычислений теоретических потоков в спектральных линиях, δ – значение бальмеровского декремента.

	104207	104303	110010	110659
$\text{H}\alpha$	1.27E+6	1.44E+6	2.23E+6	2.09E+6
$\text{H}\beta$	2.20E+5	1.92E+5	6.16E+5	4.67E+5
δ	5.77	7.50	3.62	4.48
H CaII	2.14E+5	2.08E+5	3.23E+5	2.95E+5
Ir CaII	1.00E+5	9.10E+4	1.88E+5	8.74E+4
D3 HeI	9.66E+4	8.99E+4	2.62E+5	2.24E+5

Расчёты выполнены при разных сочетаниях полной концентрации газа N , его электронной температуры T_e , толщины слоя L и турбулентной скорости v . Поле излучения фотосферы в оптическом диапазоне спектра при-

нято чернотельным с температурой 5500 К. Мы пытались по возможности получить результаты в модели однородного слоя газа и только в тех случаях, когда это оказывалось невозможным, прибегали к многослойной модели (таблицы 2, 3).

5. Выводы

1). Наблюдаемые потоки в линиях можно объяснить в рамках чисто теплового нагрева газа протуберанца.

2). Сопоставление теории с наблюдениями сразу по достаточно большому числу спектральных линий позволяет уверенно восстановить параметры излучающего газа.

3). В большинстве эпизодов газ протуберанца является существенно неоднородным, есть градиенты электронной температуры и плотности.

4). Излучение эмиссионных линий лаймановской серии и параметры протуберанца меняются на масштабах времени от одной до десяти минут.

Литература

1. Solar Prominences Jean-Claude Vial, Oddbjorn Engvold in Astrophysics and Space Science Library (2015)
2. Бычков К., Белова О., Малютин В. // Известия Крымской астрофизической обсерватории, 2022, Т. 118, № 3, С. 33–38. DOI: 10.34898/izcrao-vol118-iss3-pp33-38
3. Belova O.M., Bychkov K.V. // Astrophysic., 2018s, vol. 61, pp. 224–240