

УДК 523.9

Исследование ярких областей в протуберанце 2015-08-21 в шести спектральных линиях на разных расстояниях от лимба Солнца

Ю.А. Купряков^{1,2✉}, К.В. Бычков¹, В.А. Малютин¹, А.Б. Горшков¹, О.М. Белова³

¹ Астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic

³ Кафедра экспериментальной астрономии, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 23 июля 2026 г.

Аннотация. Проведен анализ ярких областей в протуберанце 2015-08-21. Наблюдения проводились в интервале 13:19:10–13:22:54 UT. Перед наблюдением протуберанца была зафиксирована вспышка класса M1.4 в активной области NOAA 12403 недалеко от протуберанца, которая продолжалась с 10:00 до 13:30 UT. При обработке мы выбирали области протуберанца с повышенным потоком. Для объяснения наблюдаемых потоков мы приняли модель газа, прозрачного в непрерывном спектре оптического диапазона, но испытывающего возможное самопоглощение в частотах спектральных линий. Был получен результат, в соответствии с которым двухслойная модель протуберанца удовлетворяет наблюдаемым потокам во всех шести исследуемых линиях кальция, водорода и гелия. Концентрация плазмы в двух рассмотренных слоях варьируется от $1.5 \cdot 10^{10}$ до $7.30 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; толщина слоев – от $5 \cdot 10^3$ до $20 \cdot 10^3 \text{ км}$; температура – от 12200 до 15100 К; микротурбулентная скорость – от 0.1 до 15 км/с; параметр T_{Ly} , который по смыслу является температурой фотосферного излучения в частотах лаймановской серии водорода, – от 10400 до 10700 К.

Ключевые слова: корона, модель газа, стационарный нагрев

1 Введение

Протуберанцы – это холодные и плотные структуры солнечной короны. В протуберанцах могут реализовываться плотности до 10^{11} см^{-3} , причем не обязательно плотность уменьшается с ростом высоты над фотосферой. В случае уменьшения плотности и увеличения температуры режим излучающей плазмы меняется с оптически толстого на оптически тонкий. Оптически плотная плазма означает, что она частично или полностью поглощает собственный и падающий свет. По этой причине волокна на диске кажутся темнее, чем окружающая их среда. Диагностика оптически плотной плазмы подробно описана в работах Heinzel (2015) и Labrosse (2015). Напротив, когда плазма оптически тонкая, она прозрачна для собственного или падающего излучения, что означает, что все излучение, проходящее через структуру, выходит из нее и в конечном итоге достигает наблюдателя. Таким образом, для наблюдаемой структуры общее количество фотонов спектральной линии и ее профиль, измеренный наблюдателем, обусловлены суммой вкладов в эту линию от плазмы вдоль луча зрения. В этом случае структура выглядит такой же яркой, как окружающая среда, или ярче. В протуберанцах различные факторы могут нарушать условие равновесия ионизации. Наблюдавшиеся мелкомасштабные потоки и регистрируемые временные изменения могут быть причиной локальных изменений плотности и температуры. Эти изменения имеют временной масштаб порядка нескольких минут и приводят к изменению баланса ионизации и рекомбинации атомов и ионов вещества. Например, Engvold (1980) уже заметил, что при плотностях, обнаруженных в протуберанцах, эмиссия водорода может образовываться в неравновесных условиях. Некоторые исследователи предполагают, что протуберанцы имеют состав ближе к составу фотосферы, чем короны (например, Parenti, Vial, 2007). Это важный фактор для понимания формирования протуберанцев, который определяет источник происхождения их плазмы: из коронального или фотосферного газа.

✉ Адрес для корреспонденции: kupry@sai.msu.ru

2 Наблюдения

Наблюдения спокойного протуберанца 2015-08-21 (рис. 1), расположенного на восточном лимбе недалеко от NOAA 12403, проводились на горизонтальной солнечной установке (HSFA) обсерватории Ondřejov Астрономического института Чешской академии наук. В установке используется целостат (Jensh type Carl Zeiss)

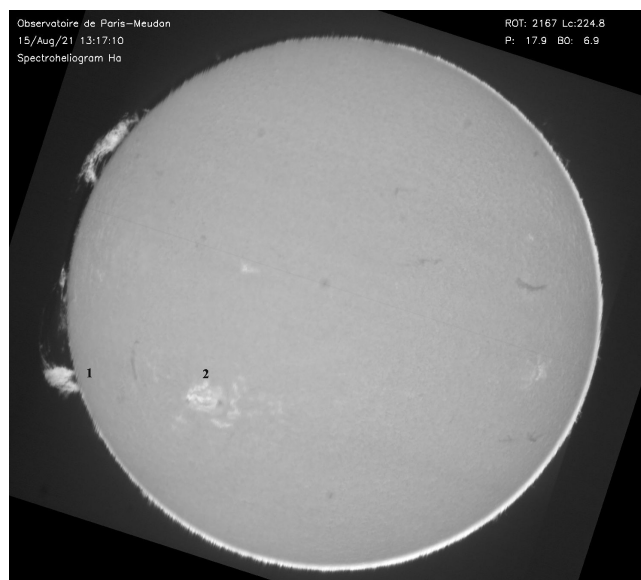


Рис. 1. Гелиограмма в линии $H\alpha$ (обсерватория Meudon, Париж). Цифрами отмечены: 1 – положение исследуемого протуберанца, 2 – область вспышки

с двумя зеркалами диаметром 600 мм и первичное зеркало диаметром 500 мм с фокусным расстоянием 35 м для построения изображения Солнца на щели спектрографа. Спектрограф оснащен дифракционной решеткой (Richardson, Spectra-Physics) с разрешением 1200 штрихов/мм. Приемниками излучения являлись шесть ПЗС-камер (VDS Vosskuhler-1300LN + Grabber Matrix Vision), изображение на которых строилось с помощью зеркальных телескопов с диаметром главного зеркала 200 мм и фокусным расстоянием 2500 мм. Одна из камер, установленных перед щелью спектрографа, фиксировала изображение хромосферы на щели спектрографа в линии $H\alpha$ (кадр slit-jaw или SJ). Поперек щели были закреплены две реперные нити, их назначение – привязка участков вдоль щели на спектрах, снятых разными камерами.

При наблюдениях протуберанца 2015-08-21 были получены наборы спектров объекта в линиях CaII H , $\text{H}\epsilon$, $\text{H}\beta$, HeI D3 , $\text{H}\alpha$ и CaII IR (8542 Å) последовательно для четырех положений щели спектрографа, соответствующих следующим моментам времени UT: 13:19:10, 13:20:15, 13:21:25 и 13:22:54 (см. рис. 2). Кроме того, были получены кадры темнового тока и плоского поля, а в 10:44:32 набор спектров был получен для центра диска Солнца. При этом положение щели плавно перемещалось по Солнцу в течение экспозиции с целью усреднения (т. н. спектр центра диска, служит для последующей калибровки наблюдений). Длительность экспозиций при наблюдениях протуберанца составила от 300 мс для HeI D3 до 3500 мс для CaII IR , при наблюдениях центра диска – от 15 до 140 мс соответственно. Расстояние между реперными нитями соответствует 53800 км на Солнце.

Первичная обработка спектров заключалась в учете темнового тока и плоского поля и проводилась при помощи программ, предоставленных обсерваторией Ondřejov. Для каждого из четырех положений щели выбраны участки вдоль нее, в которых путем усреднения получены спектры изучаемого объекта (отмечены цифрами 1–4) и спектры фона (Q1–Q4). Цифры 1, 2, 3, 4 соответствуют моментам наблюдения UT 13:19:10, 13:20:15, 13:21:25 и 13:22:54. Важно отметить, что спектр фона в нашем случае отличен от нуля, несмотря на то что протуберанец наблюдается на лимбе. Участки вдоль щели выбирались таким образом, чтобы профили линий в них были примерно постоянными, так что усреднение приводило бы к снижению уровня шума, но не к изменению профиля линии. Для четвертого момента наблюдения были выбраны по два фрагмента протуберанца для последующего анализа, которые обозначены строчными буквами a и b. При сканировании кадров мы выбирали области с повышенной плотностью на разных расстояниях от диска Солнца.

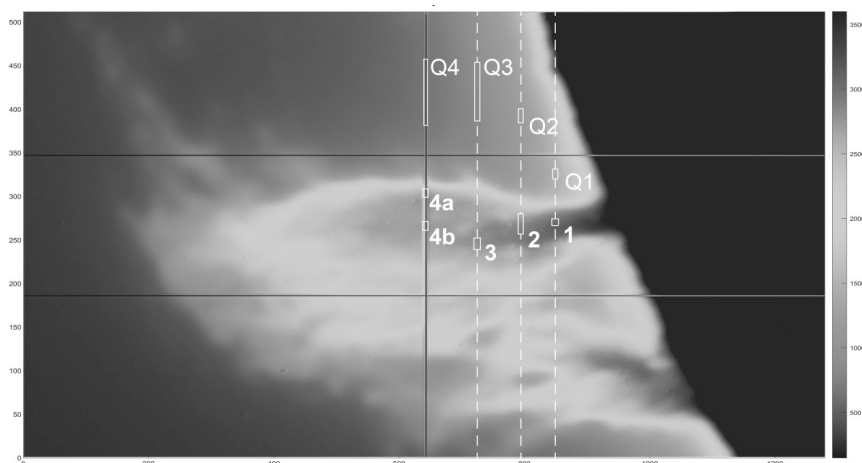


Рис. 2. Кадр SJ для четырех моментов наблюдения и соответствующих положений щели спектрографа с обозначенными местами измерения спектров протуберанца и спектров фона (с буквой Q). Для удобства моменты подписаны порядковыми номерами, а не тайм-кодами

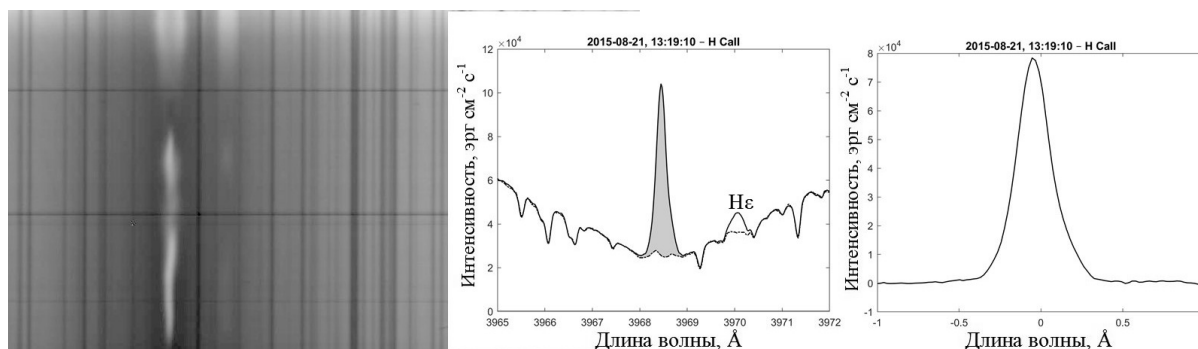


Рис. 3. Определение потока в линии CaII H для момента 13:19:10 UT. Слева – спектр объекта, в центре – фотометрический разрез спектра (сплошная линия) и фона (штриховая линия). Видна также линия H ϵ , присутствующая в спектре протуберанца. Справа – вклад протуберанца в наблюдаемый профиль линии, т. е. разница между спектрами на центральном рисунке. Интегрирование этого вклада по длинам волн определяет поток в линии от объекта, равный площади области, закрашенной серым на центральном рисунке

Исключив влияние темнового и плоского поля, мы получили потоки в линиях CaII H, H ϵ , H β , D3, H α и CaII IR (8542 Å). На рис. 3 в качестве примера приведены спектр протуберанца и спектр фона в линии CaII H, а также профиль этой линии, соответствующий вкладу протуберанца. В таблице 1 приведены значения наблюдаемых потоков для различных областей протуберанца.

Таблица 1. Определенные значения потоков в $\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$, H (км) – расстояние до лимба Солнца

Время	13:19:10	13:20:15	13:21:25	13:22:54a	13:22:54b
H	15500	33800	47500	62100	64000
H α	$2.74 \cdot 10^6$	$2.63 \cdot 10^6$	$3.11 \cdot 10^6$	$2.94 \cdot 10^6$	$3.05 \cdot 10^6$
H β	$5.02 \cdot 10^5$	$4.67 \cdot 10^5$	$5.74 \cdot 10^5$	$5.49 \cdot 10^5$	$5.85 \cdot 10^5$
H ϵ	$4.37 \cdot 10^4$	$3.33 \cdot 10^4$	$4.34 \cdot 10^4$	$4.56 \cdot 10^4$	$4.33 \cdot 10^4$
CaII H	$3.27 \cdot 10^5$	$2.33 \cdot 10^5$	$2.74 \cdot 10^5$	$3.40 \cdot 10^5$	$2.46 \cdot 10^5$
CaII IR	$2.52 \cdot 10^5$	$2.14 \cdot 10^5$	$2.80 \cdot 10^5$	$2.21 \cdot 10^5$	$3.06 \cdot 10^5$
HeI D3	$6.23 \cdot 10^4$	$5.50 \cdot 10^4$	$6.80 \cdot 10^4$	$7.75 \cdot 10^4$	$6.49 \cdot 10^4$

3 Теоретический расчет потоков

Для теоретического расчета наблюдаемых потоков в спектральных линиях мы приняли модель газа, прозрачного в непрерывном спектре оптического диапазона, но испытывающего возможное самопоглощение в частотах спектральных линий. Населенности дискретных уровней и состояние ионизации химических элементов, необходимые для расчета потока излучения в линиях, определялись путем решения уравнений баланса, записанных для 18 дискретных уровней атома водорода, 22 уровней иона CaII и 29 уровней атома гелия. Учитывались основные элементарные процессы заселения уровней: связанно-связанные, связанно-свободные и свободно-связанные ударные и радиационные переходы в поле фотосферного излучения (которое считается чернотельным с температурой $T = 5500$ К). Мы также ввели дополнительный параметр T_{Ly} , который по физическому смыслу является температурой чернотельного фотосферного излучения в частотах лаймановской серии водорода. Атомные данные для водорода взяты из статьи Johnson (1972). Расчет переноса излучения выполнен в рамках модели вероятности выхода фотона Соболева – Холстейна – Бибермана (Биберман, 1947; Holstein, 1947, 1951). Профиль коэффициента поглощения для линий атома водорода является сверткой контуров Доплера и Хольцмарка, а для линий иона кальция и атома гелия – фойгтовским контуром. В данной работе мы используем модель совокупности газовых слоев, которая взята из статьи Барановский (1983). Каждый слой характеризуется своим значением газовой концентрации N , толщины L , температуры T и микротурбулентной скорости v_t . В нашей работе используется приближение стационарного нагрева слоев газа. Подробное изложение применяемого нами алгоритма изложено в статьях Белова, Бычков (2018) и Купряков и др. (2024).

Значения параметров подбирались интуитивно, так как единого теоретического подхода пока нет. Одна лишь модель стационарно нагретого газа не в состоянии объяснить всей совокупности наблюдений. Ранее мы убедились в полезности модели медленной ударной волны для объяснения относительно большого потока резонансной линии кальция. В будущем мы собираемся рассмотреть и другие механизмы. Выбор двухслойной модели обусловлен тем, что модель однородного слоя не позволяет сопоставить теорию с наблюдениями ни при каких теоретических параметрах.

Таблица 2. Теоретические значения потоков F в эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ и параметры газа в приближении стационарного нагрева. Индекс 1 у параметров соответствует дальнему слою, индекс 2 – ближнему слою от наблюдателя. Моменты времени указаны в UTC. Концентрация газа N указана в см^{-3} , толщина слоев L – в км, температура газа T – в К, микротурбулентная скорость v_t – в км/с

Время (UTC)	13:19:10	13:20:15	13:21:25	13:22:54a	13:22:54b
$F(\text{H}\alpha)$	$2.59 \cdot 10^6$	$2.35 \cdot 10^6$	$2.68 \cdot 10^6$	$2.66 \cdot 10^6$	$2.72 \cdot 10^6$
$F(\text{H}\beta)$	$5.27 \cdot 10^5$	$4.67 \cdot 10^5$	$5.79 \cdot 10^5$	$5.47 \cdot 10^5$	$5.79 \cdot 10^5$
$F(\text{H}\epsilon)$	$4.23 \cdot 10^4$	$3.47 \cdot 10^4$	$4.10 \cdot 10^4$	$4.32 \cdot 10^4$	$4.16 \cdot 10^4$
$F(\text{CaII H})$	$3.28 \cdot 10^5$	$2.57 \cdot 10^5$	$2.96 \cdot 10^5$	$3.41 \cdot 10^5$	$2.53 \cdot 10^5$
$F(\text{CaII IR})$	$2.50 \cdot 10^5$	$2.37 \cdot 10^5$	$3.02 \cdot 10^5$	$2.16 \cdot 10^5$	$3.07 \cdot 10^5$
$F(\text{HeI D3})$	$6.29 \cdot 10^4$	$5.43 \cdot 10^4$	$6.86 \cdot 10^4$	$7.78 \cdot 10^4$	$6.58 \cdot 10^4$
$N_1, \text{см}^{-3}$	$3.30 \cdot 10^{10}$	$2.60 \cdot 10^{10}$	$1.7 \cdot 10^{10}$	$7.30 \cdot 10^{10}$	$2.20 \cdot 10^{10}$
$N_2, \text{см}^{-3}$	$2.20 \cdot 10^{10}$	$2.00 \cdot 10^{10}$	$2.20 \cdot 10^{10}$	$1.26 \cdot 10^{10}$	$1.48 \cdot 10^{10}$
$L_1, \text{км}$	5000	6000	16000	1200	10000
$L_2, \text{км}$	8000	8000	8000	20000	16000
$T_1, \text{К}$	12600	12200	12500	12300	12300
$T_2, \text{К}$	15000	15100	15100	15050	14800
$v_{t1}, \text{км с}^{-1}$	13.0	7.0	12.0	14.0	15.0
$v_{t2}, \text{км с}^{-1}$	1.0	1.0	1.0	2.0	0.1
$T_{Ly}, \text{К}$	10700	10500	10400	10700	10400

Предположения о стационарном нагреве газа оказалось достаточно: так, для объяснения наблюдаемых потоков во всех шести линиях потребовалось рассмотреть двухслойную модель с параметрами, указанными в таблице 2. Индекс 1 в таблице относится к наиболее далекому слою от наблюдателя, индекс 2 – к ближайшему к наблюдателю слою. Основной вклад в излучение кальция (а именно инфракрасной линии 8542 Å) и в линию D3 гелия дает первый слой. В линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{H}\beta$ все слои вносят значительный вклад. Оптическая толщина

двух линий – $\text{H}\alpha$ и CaII H – превышает единицу. Итак, наша модель протуберанца представляется двумя слоями с похожими по порядку величины параметрами. Введения дополнительного слоя или упрощения структуры до однородного слоя не происходит вдоль исследуемого участка протуберанца, а также не происходит и за несколько минут сеанса наблюдений. Слои протуберанца имеют общую протяженность более 10000 км и разогреты приблизительно от 12000 до 15000 К. Температура T_{Ly} превышает 10000 К; только при таких значениях удастся объяснить бальмеровский декремент водорода. Такое повышенное значение T_{Ly} может свидетельствовать о дополнительном источнике нагрева газа и осуществляется именно на частотах лаймановской серии. Можно предположить, что таким механизмом является ударная волна, распространившаяся в этой области после вспышки класса M1.4 в активной области NOAA 12403.

4 Заключение

1. Наблюдаемые потоки в шести спектральных линиях удастся объяснить в рамках модели стационарного нагрева.
2. Параметр T_{Ly} превышает значение 10000 К. Такие значения T_{Ly} можно интерпретировать как дополнительный источник энергии, связанный с накачкой энергии на частотах лаймановской серии. У других серий такой накачки нет. Возможный источник нагрева определяется предшествующей нашим наблюдениям вспышкой вблизи лимба.
3. В двухслойной модели при стационарном нагреве концентрация варьируется от $1.5 \cdot 10^{10}$ до $7.3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; толщина слоев – от 5000 до 20000 км; температура – от 12200 до 15100 К; микротурбулентная скорость – от 0.1 до 15 км/с.

Благодарности. Авторы благодарят рецензента за полезные замечания, а также коллективы обсерваторий Meudon и Ondřejov за предоставленную возможность проведения наблюдений и использования данных.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Барановский Э.А., 1983. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 67. С. 84–90. [Baranovsky E.A., 1983. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 67. pp. 84–90. (In Russ.)]
- Белова О.М., Бычков К.В., 2018. Астрофизика. Т. 61. № 2. С. 255–270. [Belova O.M., Bychkov K.V., 2018. Astrofizika, vol. 61, no. 2, pp. 255–270. (In Russ.)]
- Биберман Л.М., 1947. ЖЭТФ. Т. 17. С. 416. [Biberman L.M., 1947. ZhETF, vol. 17, p. 416. (In Russ.)]
- Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Малютин В.А., Горшков А.Б., 2024. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. Т. 79. № 2. С. 2420801. [Kupryakov Yu.A., Bychkov K.V., Belova O.M., Malyutin V.A., Gorshkov A.B., 2024. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya, vol. 79, no. 2, p. 2420801. (In Russ.)]
- Engvold O., 1980. Solar Phys., vol. 67, pp. 351–355. EDN: VAQRDV.
- Heinzel P., 2015. In: Vial J.-C., Engvold O. (Eds.), Solar Prominences. Springer Cham, vol. 415, pp. 103–130.
- Holstein T., 1947. Phys. Rev., vol. 72, p. 1212.
- Holstein T., 1951. Phys. Rev., vol. 83, p. 1159.
- Johnson L.C., 1972. Astrophys. J., vol. 174, pp. 227–236.
- Labrosse N., 2015. In: Vial J.-C., Engvold O. (Eds.), Solar Prominences. Springer Cham, vol. 415, pp. 131–155.
- Parenti S., Vial J.-C., 2007. Astron. Astrophys., vol. 469, pp. 1109–1115.

A study of bright regions in the 2015-08-21 prominence in six spectral lines at different distances from the solar limb

Yu.A. Kupryakov^{1,2}, K.V. Bychkov¹, V.A. Maliutin¹, A.B. Gorshkov¹, O.M. Belova³

¹ Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

² Astronomical Institute ASCR, Ondřejov, Czech Republic

³ Department of Experimental Astronomy, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The authors analyze bright regions in the 2015-08-21 prominence observed with the Ondřejov Observatory's Horizontal-Sonnen-Forschungs-Anlage (HSFA-2). Observations were conducted between 13:19:10 and 13:22:54 UT. Before the observation of the prominence, a flare of class M1.4 was recorded in NOAA AR 12403 near the prominence, which lasted from 10:00 to 13:30 UT. In our processing, we selected regions of the prominence with an increased flux. To explain the observed fluxes, we adopted a model of gas that is transparent in the continuous spectrum of the optical range, but undergoes possible self-absorption at spectral line frequencies. We obtained a result according to which a two-layer model of the prominence satisfies the fluxes in all six studied lines of calcium, hydrogen, and helium. Among the parameters is the T_{Ly} value, which is the temperature of photospheric radiation at Lyman frequencies of hydrogen. The plasma density in the two layers considered varies from $1.5 \cdot 10^{10}$ to $7.30 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; the layer thickness ranges from $5 \cdot 10^3$ to $20 \cdot 10^3 \text{ km}$; the temperature is 15100–15200 K; the microturbulent velocity is 0.1–15 km/s; T_{Ly} is 10400–10700 K.

Key words: corona, gas model, steady-state heating